

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 5285

**Hibridni supekondenzatorsko-baterijski
spremnik energije**

Ivana Marinović

Zagreb, lipanj 2017.

Zagreb, 9. ožujka 2017.

ZAVRŠNI ZADATAK br. 5285

Pristupnik: **Ivana Marinović (0036486424)**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Modul: Elektroničko i računalno inženjerstvo

Zadatak: **Hibridni supekondenzatorsko-baterijski spremnik energije**

Opis zadatka:

Dizajnirati sustav koji koristi najbolja svojstva baterija i superkondenzatora kao spremnika energije. Nadzirati naponske i strujne veličine baterije. Razviti elektroničke podsustave koji štite elemente sustava od nedozvoljenih razina struja i napona. Termički analizirati projektirani sklop. Korištenjem programskog okruženja Altium Designer nacrtati elektroničku shemu sustava, popis materijala i projektirati tiskanu pločicu. Dizajnom osigurati male dimenzije sustava uz adekvatan termički dizajn. Simulacije provesti u programskom okruženju MATLAB. Realizirati sustav detaljno ispitati i analizirati sve režime rada sustava.

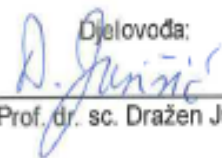
Zadatak uručen pristupniku: 10. ožujka 2017.

Rok za predaju rada: 9. lipnja 2017.

Mentor:


Prof. dr. sc. Damir Seršić

Djelovođa:


Prof. dr. sc. Dražen Jurišić

Predsjednik odbora za
završni rad modula:


Prof. dr. sc. Mladen Vučić

Zahvaljujem se mentoru dr.sc Damiru Seršiću na pomoći i korisnim savjetima pri izradi Završnog rada, kao i asistentici Ani Smolić na strpljenju i odgovorima na brojna pitanja.

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Baterije	2
2.1. Svojstva baterija	2
3. Kondenzatori	5
3.1. Konvencionalni kondenzatori.....	5
3.2. Superkondenzatori	6
3.3. Implementiran sustav za regulaciju napona na superkondenzatorima	8
4. Superkondenzatorsko-baterijski spremnik.....	10
4.1. STM32F4 DISCOVERY	11
4.1.1 STM32F407VGT6	12
4.1.2 Analogno-digitalni pretvornik (ADC)	13
4.1.3 Pulsno širinska modulacija (PWM)	14
4.2. Instrumentacijska pojačala.....	14
4.3. Naponski pretvarači.....	15
4.4. Flyback pretvarač	16
4.5. Implementacija flyback pretvarača	18
5. Projektiranje i razvoj tiskane pločice.....	20
5.1. Rad u programskom okruženju Altium Designer	20
5.2. Izrada PCB dizajna.....	21
5.3. Izrada tiskane pločice	21
6. Termička analiza projektiranog sklopa.....	24
6.1. Odvođenje topline.....	24
6.2. Zaštitni sklop	24
7. Zaključak	26
8. Literatura.....	27
9. Sažetak	28
10. Privitak.....	30

1. Uvod

Živimo u svijetu u kojem potreba za energijom sve više raste, a samim time i njena potrošnja. Kako društvo postaje svjesno negativnog ekološkog utjecaja korištenja tradicionalnih izvora energije poput fosilnih i nuklearnih goriva današnji se trendovi u proizvodnji energije okreću obnovljivim izvorima energije. Iako su takvi izvori dostupni širom Zemlje, najveći problem predstavlja nejednoliko iskorištavanje energije tijekom dana, odnosno tijekom cijele godine. Stoga, javlja se potreba za skladištenjem energije kako bi ju iskorištavali kad je proizvodnja iz obnovljivih izvora energije privremeno nedostupna ili smanjena. Baterije su danas najčešći oblici skladištenja električne energije. Njihova prednost je što mogu pohraniti veliku količinu energije u relativno malom volumenu. Uz stalan razvoj materijala i tehnologije za izradu baterije uspijevaju pohraniti veliku količinu energije, ali ne isporučiti ju u kratkom vremenu. Zbog svega navedenog, u okviru Završnog rada razvijen je sustav za izravno skladištenje energije, a temelji se na korištenju baterija i superkondenzatora. U konačnici hibridni superkondenzatorsko-baterijski spremnik energije koji je zamišljen koristio bi se u vozilima kojima bi baterije osiguravale potrebnu količinu energije, a kad bi se javila potreba za većom energijom u kratkom vremenu (npr. pri pretjecanju, pokretanju) osiguravali bi ju superkondenzatori u kombinaciji s baterijama. Sustav bi podržavao autonomno punjenje baterija i superkondenzatora regenerativnim kočenjem (punjenje kod kočenja i na nizbrdicama) tako da bi superkondenzatori mogli preuzeti veću količinu energije u kratkom vremenskom intervalu jer se pune brže nego baterije.

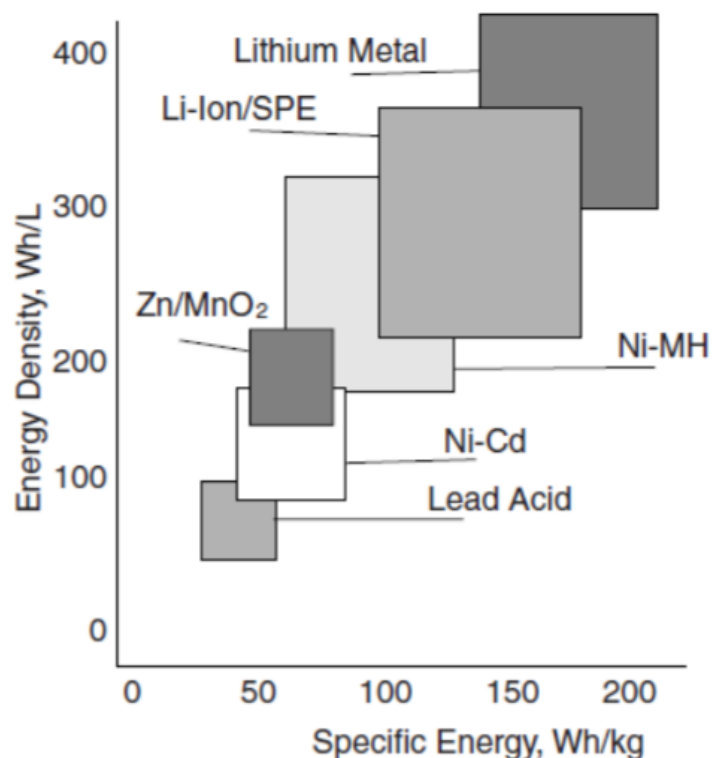
2. Baterije

2.1. Svojstva baterija

Akumulatorske baterije predstavljaju obnovljivi kemijski izvor električne energije. Posljednjih dvadeset godina došlo je do naglog tehnološkog napretka u proizvodnji akumulatorskih baterija. Razlog za to je brzi razvoj sofisticiranih elektroničkih uređaja i mobilnih telekomunikacija. Za te primjene danas se najčešće koriste suhe akumulatorske baterije Li⁺ (litij-ion), Li-polimer (Li-poly), Li-ionpolimer (Li-ion-poly) i NiMH (nikal-metal-hibrid) koje su iz upotrebe gotovo istisnule zatvorene NiCd i olovne akumulatorske baterije.

Znanstvenici su dugo pokušavali iskoristiti litij kao osnovu za izradu baterija. Ovaj metal je vrlo lagan, ima visok elektrokemijski potencijal i omogućuje najveću specifičnu energiju baterije. Međutim, osnovni problem je što litijeve baterije nakon više punjenja i pražnjenja postaju temperaturno nestabilne i sklone su eksplozivnoj reakciji. Primjenom Li-ion tehnologije eksplozivne sklonosti litijevih baterija svedene su na prihvatljivu mjeru. Sve današnje Li-ion baterije su opremljene zaštitnim elektroničkim sklopovima koji ne dozvoljavaju nepravilnosti pri punjenju i radu koje bi mogle izazvati eksploziju. Li-ion baterije imaju značajne prednosti u odnosu na NiMH baterije. Lakše su i veće specifične energije (do 170 Wh/kg), imaju tri puta veći napon otvorenog kruga (3,6 V), uopće nisu podložne memorijskom efektu¹, mogu podnijeti veliki broj cikličkih pražnjenja (do 1000), imaju malo samopražnjenje, itd. Nedostaci su im što za pouzdan rad zahtijevaju zaštitni elektronički sklop, podložne su starenju čak i onda kada nisu u upotrebi, skupe su (cca 40% skuplje od NiCd baterija), budući da im zaštitni sklopovi ograničuju struje punjenja i pražnjenja nisu pogodne za izuzetno brza pražnjenja i brza nadopunjavanja.

¹ Još se naziva i baterijski efekt, vjeruje se da kod punjivih baterija (izraženo kod nikal-kadmijevih baterija) baterija „pamti“ manji kapacitet ako ju se puni prije nego li se potpuno isprazni



Slika 1. Različite specifične gustoće i energije baterija

Prilikom punjenja litijskih ćelija litij-ionskih baterija vrlo je važno regulirati napon na njima. Već malo prekoračenje dozvoljenog napona može oštetiti bateriju, a prenizak napon neće moći dovoljno napuniti bateriju. Litij-ionska baterija je zanimljiva zbog svoje male težine, pogotovo proizvođačima električnih vozila. U osmišljavanju ovog superkondenzatorsko-baterijskog spremnika energije odabrano je šest baterija² koje su spojene u paralelu i preko priključaka dovedene na tiskanu pločicu. Njihove najvažnije karakteristike prikazane su u Tablici 1.

² <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/597042/PANASONICBATTERY/NCR18650A.html>

Rated capacity ⁽¹⁾	Min. 2900mAh
Capacity ⁽²⁾	Min. 2950mAh Typ. 3070mAh
Nominal voltage	3.6V
Charging	CC-CV, Std. 1475mA, 4.20V, 4.0 hrs
Weight (max.)	47.5 g
Temperature	Charge*: 0 to +45°C Discharge: -20 to +60°C Storage: -20 to +50°C
Energy density ⁽³⁾	Volumetric: 620 Wh/l Gravimetric: 225 Wh/kg

Tablica 1. Specifikacije litij-ionske baterije



Slika 2. Litij-ionska baterija

3. Kondenzatori

3.1. Konvencionalni kondenzatori

Konvencionalni kondenzatori sastoje se od dvije vodljive elektrode koje su odvojene dielektrikom. Kada se na vodljive elektrode dovede napon, naboji različitog polariteta akumuliraju se na površini svake elektrode, kako prikazuje slika 2. Naboji ostaju odvojeni dielektrikom i posljedica toga je nastajanje električnog polja između elektroda i pohrana energije. Kapacitet (C) superkondenzatora može se odrediti prema sljedećoj relaciji:

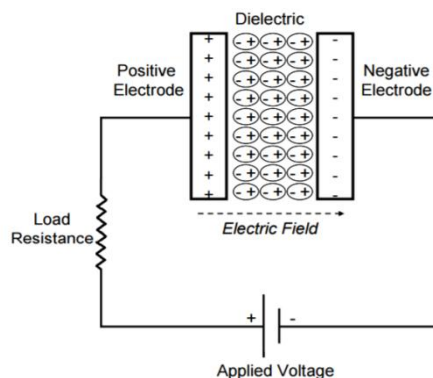
$$C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{d}, \quad (1)$$

gdje je S površina elektrode, d udaljenost između elektroda, ε dielektrična konstanta dielektrika i ε_0 dielektrična permitivnost vakuumu. Energija pohranjena u konvencionalnom kondenzatoru ovisi o njegovom kapacitetu i razlici napona na elektrodama i opisana je sljedećom jednadžbom:

$$E = \frac{1}{2} C U^2 \quad (2)$$

Maksimalna snaga ovisi o ekvivalentnom serijskom otporu:

$$P_{MAX} = \frac{U^2}{4ESR} \quad (3)$$



Slika 3. Shema konvencionalnog kondenzatora

3.2. Superkondenzatori

Posljednjih godina sve se više upotrebljavaju kondenzatori čiji su kapaciteti deset, stotinu pa i tisuću farada. Superkondenzatori, poznati još kao elektrokemijski kondenzatori i ultrakondenzatori su uređaji za skladištenje električne energije. Rad superkondenzatora temelji se na istim principima kao i rad konvencionalnih kondenzatora. Superkondenzatori se sastoje od dvije elektrode, elektrolita i separatora. Elektrode čine veliku razliku između superkondenzatora i konvencionalnih kondenzatora. Tehnologija izrade elektroda koja se bazira na nanomaterijalima omogućuje jako veliku površinu elektroda i iznimno malu udaljenost između njih. Elektrode su izvedene kao nanočestice grafita ili isprepletene ugljikove nanočestice u međusobnom električnom kontaktu. Elektrolit može biti čvrsti, tekući, ili organskog karaktera. Uloga separatora je omogućiti gibanje iona te istovremeno spriječiti elektronski kontakt između elektroda. Upravo zbog ovako opisane strukture superkondenzatori imaju puno veću gustoću snage u odnosu na baterije, veći kapacitet u odnosu na konvencionalne kondenzatore, ali i malu gustoću energije. Gustoća energije predstavlja količinu energije koju uređaj može pohraniti po jedinici mase ili volumena uređaja, a gustoća snage predstavlja energiju koju uređaj može predati trošilu u jedinici vremena po jedinici mase ili volumena uređaja. Superkondenzatori mogu imati 100-1000 puta kapacitet po jedinici volumena u usporedbi s konvencionalnim kondenzatorom.

Osim navedenog, superkondenzatori imaju mali ekvivalentni serijski otpor (ESR) koji omogućuje davanje ili apsorpiranje jako velike struje i posljedica tog je jako brzo punjenje. Odlikuje ih velik broj ciklusa punjenja i pražnjenja, širok raspon radne temperature, mala dimenzija i masa. Kao takvi, superkondenzatori sve više postaju izvorima napajanja za uređaje kojima je potrebna velika snaga i dugotrajnost izvora električne energije.

Uz već navedenu malu količinu energije koju superkondenzator može uskladi, najveći nedostaci su vrlo nizak maksimalni napon na kondenzatoru i nemogućnost korištenja superkondenzatora u AC krugovima i visokofrekventnim sklopovima zbog prevelike vremenske konstante. U većini slučajeva maksimalni

napon koji iznosi svega 1 V do 4 V nije dovoljan za rad većine aplikacija i uređaja zbog toga je potrebno spojiti više supekondenzatora u seriju. Za superkondenzatorsko-baterijski sustav koji je osmišljen korištena su četiri superkondenzatora od 400 F spojena serijski. Tablica 2 prikazuje najvažnija svojstva superkondenzatora, a dostupan je i datasheet³ u cijelosti.

Specifications	
Capacitance	300F to 400F
Working Voltage	2.7V
Surge Voltage	2.85V
Capacitance Tolerance	-5% to +10%
Operating Temperature Range	-40°C to 65°C

Tablica 2. Specifikacije superkondenzatora



Slika 4. Superkondenzatori

³ <http://www.farnell.com/datasheets/1640990.pdf>

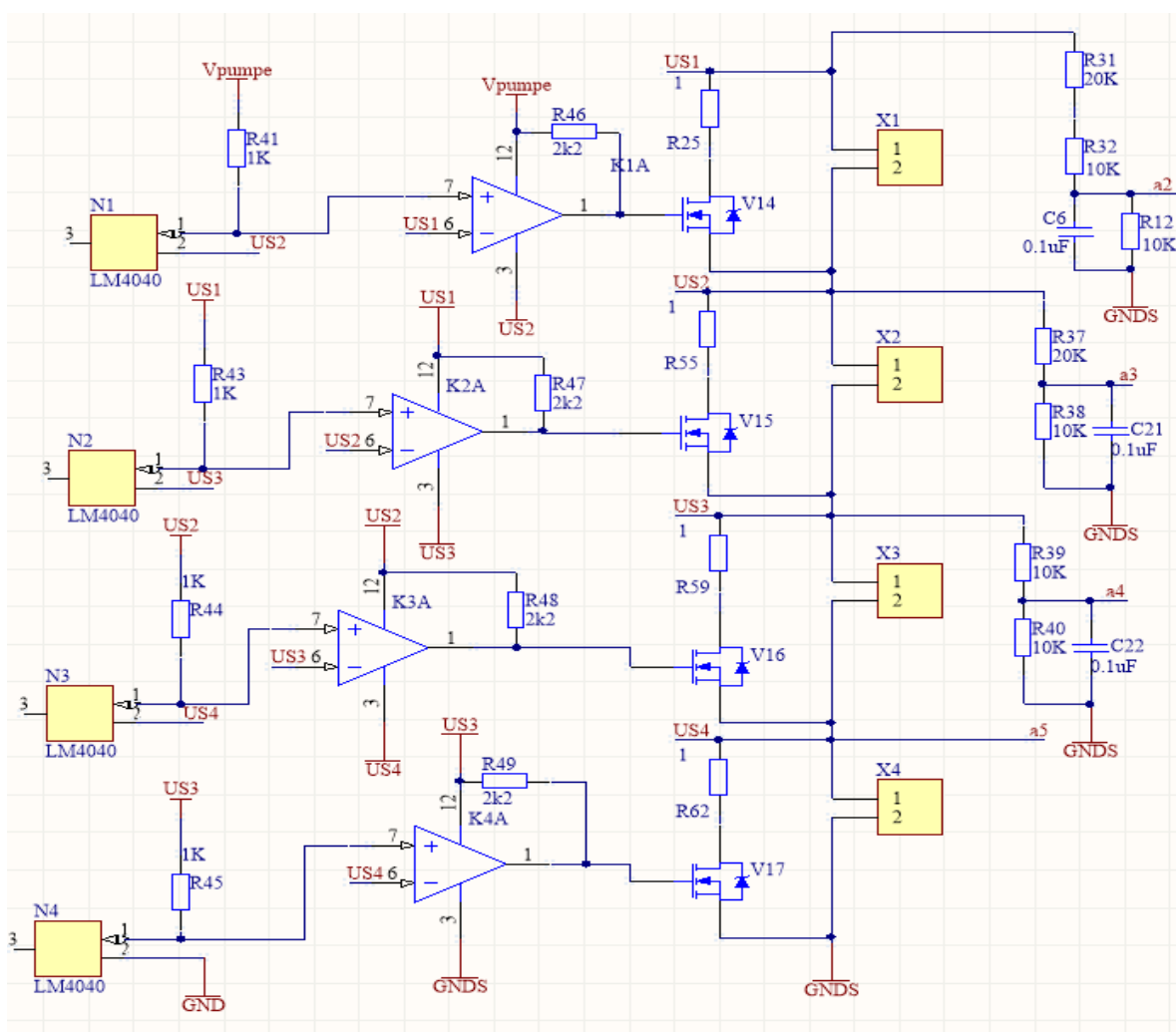
3.3. Implementiran sustav za regulaciju napona na superkondenzatorima

Superkondenzatori koji se koriste imaju radni napon 2.7 V uz toleranciju kapaciteta -5% do +10% i mogu rezultirati različitim naponima na pojedinom superkondenzatoru. Pri izradi ovog spremnika bilo je potrebno osmisliti sustav koji će regulirati napon na superkondenzatorima, ali i paziti da ne prijeđe dozvoljenu vrijednost. Prekoračenje maksimalnog napona superkondenzatora može uzrokovati njegovo uništenje ili smanjenje životnog vijeka. Sustav za regulaciju napona na superkondenzatorima može biti pasivan ili aktivan. Moguće izvedbe pasivne mreže su paralelno spajanje zener diode pojedinom superkondenzatoru ili paralelno spajanje serijskog spoja zener diode i otpornika također pojedinom superkondenzatoru. Budući da takva rješenja nisu energetske učinkovita i da postoji mogućnost uništenja diode zbog velike struje pa tako i superkondenzatora u osmišljavanju ovog projekta odlučili smo se na aktivnu mrežu za izjednačavanje napona na serijskom spoju superkondenzatora. Na slici 4 prikazan je dio električne sheme na kojoj je vidljiv regulacijski sustav sa svim potrebnim komponentama poput analognih komparatora, referentnih izvora, n-kanalnih MOSFETA, otpornika. Superkondenzatori su na tiskanu pločicu u električni krug povezani odgovarajućim konektorima. Osnovna ideja ovakvog sustava je korištenje n-kanalnog MOSFETA kao sklopke koja će se uključivati u ovisnosti što je na izlazu analognog komparatora MIC6270YM5-TR⁴. Ako promatramo superkondenzator koji je na pločicu povezan preko konektora oznake X3 vidljivo je da se potencijal na pozitivnom polu superkondenzatora preko analognog komparatora uspoređuje s nekim referentnim naponom. Zapravo se radi o naponu na donjem superkondenzatoru te njemu superponiranom fiksnom naponu od 2.5 V kojeg na sebi drži referentni izvor⁵ napona. Time se postiže zatvaranje MOSFETA u trenucima kad dolazi do prekoračenja dozvoljenih vrijednosti napona. Kao što je vidljivo u Tablici 1 najveći dozvoljen napon između elektroda superkondenzatora iznosi 2.85 V. Kako se radi o niskim naponima i prototipu budućeg sklopa odlučeno je da će sustav za ujednačavanje napona na superkondenzatorima

⁴ <http://www.vishay.com/docs/62883/sij470dp.pdf>

⁵ <http://export.farnell.com/texas-instruments/lm4040dim3-2-5/voltage-ref-shunt-2-5v-sot-23/dp/9778322>

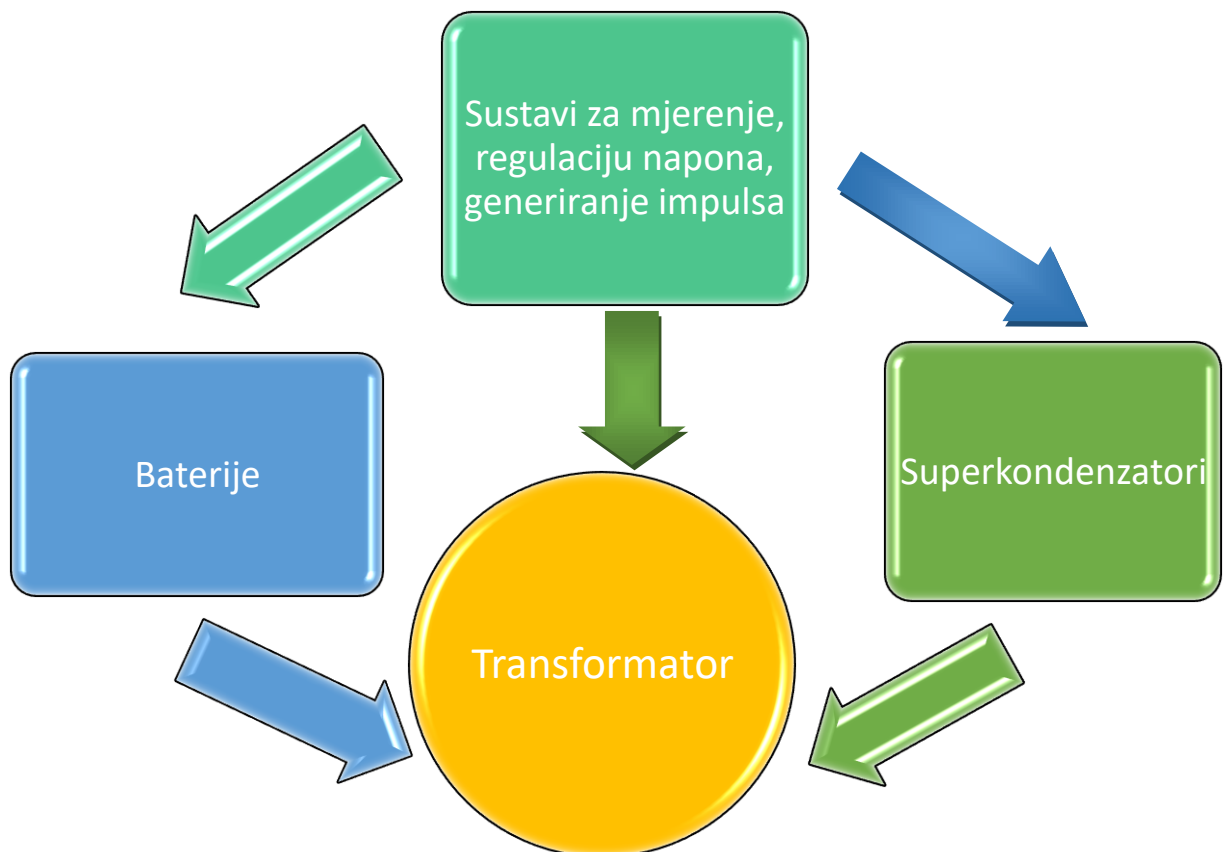
regulirati da napon ne prelazi 2.5 V. Upravo zbog tog na ulaze komparatora dovode se naponi koji su za 2.5 V veći od potencijala donje elektrode pojedinog superkondenzatora. Time se postiže zatvaranje MOSFETA u trenucima kad dolazi do prekoračenja dozvoljenih vrijednosti napona. U tu svrhu na odvode MOSFETA koji su upravljani komparatorima spojeni su otpornici velike snage. Dozvoljena disipacija snage odabranih otpornika je oko 7 W što je dovoljno za regulaciju napona na superkondenzatorima. Opisan princip rada primjenjuje se za regulaciju napona na svim ostalim superkondenzatorima, a također se oslanja na rad analognih komparatora i referentnih izvora napona u plivajućoj izvedbi.



Slika 5. Električna shema sustava za regulaciju napona na superkondenzatorima

4. Superkondenzatorsko-baterijski spremnik

U osmišljavanju i dizajniranju sustava koji koristi najbolja svojstva baterija i superkondenzatora kao spremnika energije trebalo je izabrati komponente koji će svojim karakteristikama apsolutno odgovarati svim zahtjevima. Popis svih komponenti nalazi se u Privitku pod Sastavnicom, a u nastavku je dan opis, principa rada i osnovna uloga komponenti ovog elektroničkog sklopa.



Slika 6. Blok dijagram superkondenzatorsko-baterijskog sustava

4.1. STM32F4 DISCOVERY



Slika 7. STM32F4 DISCOVERY

STM32F4 DISCOVERY je razvojni sustav koji se temelji na STM32F407VGT6 čipu i uključuje ST-LINK/V2 ugradbeno sučelje za debugiranje, ST MEMS digitalni akcelerometar, ST MEMS digitalni mikrofoni, audio DAC s integriranom klasom D, LED-ice, tipkala i USB OTG micro-AB priključak.

STM32F407xx familija mikrokontrolera bazirana je na ARM Cortex-M4 32-bitnoj RISC jezgri visokih performansi koja radi na frekvencijama i do 168 MHz. Uključuje ugrađenu memoriju velike brzine (Flash memorija do 1 MB i 192 KB SRAM-a), bogati asortiman ulazno/izlaznih perifernih priključaka spojenih na dvije APB sabirnice, tri AHB sabirnice i 32-bitnu multi-AHB sabirnicu.

Radi na temperaturnom području od -40 do +105 °C ako je napajanje između 1.8 i 3.6 V. Napajanje može biti i 1.7 V samo ako uređaj radi na temperaturnom području od 0 do 70 °C.

Ove značajke čine STM32F407xx familiju mikrokontrolera pogodnu za široki raspon aplikacija:

- Kontrola vrtnje motora
- Medicinska oprema
- U industriji: PLC, pretvarači, prekidači
- Printeri i skeneri
- Alarmni sustav, video interfon
- Kućni audio uređaj

4.1.1 STM32F407VGT6

Mikrokontroler STM32F407VGT6 u projektiranom sklopu koristio se uglavnom za generiranje PWM signala i analogno-digitalnu pretvorbu prilikom mjerenja različitih napona.

STM32F407VGT6 mikrokontroler sadrži 1 MB Flash memorije, 192 KB RAM u LQFP100 kućištu. Napajanje se izvodi preko USB sabirnice ili vanjskim napajanjem. Napajanje mikrokontrolera u ovom sklopu rješava se korištenjem naponskog stabilizatora⁶ koji bez obzira na napon doveden na ulaz (doveden je napon baterije) daje stalan napon od 3. Time je omogućena prijenosna uporaba uređaja, a to je vrlo značajno ako bi se konačni proizvod uistinu koristio u vozilima kako je i zamišljeno.

⁶ <http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?genericPartNumber=REG710-33&fileType=pdf>

4.1.2 Analogno-digitalni pretvornik (ADC)

Analogno-digitalni pretvornik sastavni je dio suvremenih sustava za obradbu, pohranu i prijenos informacija. Analogno digitalni pretvornik sa sukcesivnom aproksimacijom koji je prilagođen mikrokontroleru STM32F ima 12-bitnu rezoluciju i u ovom radu koristi se za pomoć pri mjerenju napona. Svaki uzorak analognog signala ADC pretvara u konačan broj bitova. AD pretvorba pojedinog kanala može biti u pojedinačnom, kontinuiranom, skenirajućem ili isprekidanom načinu rada. Time se omogućuje programsko reguliranje napona na seriji superkondenzatora kao i uključivanje/isključivanje sklopki ovisno o načinu rada projektiranog sklopa. Mjerenje pojedinih napona na otpornicima niskih vrijednosti prvo je zahtijevalo pojačavanje signala instrumentacijskim pojačalima čija će funkcija biti objašnjena kasnije.

Glavne značajke ADC-a

- Rezolucija: 12-bit, 10-bit, 8-bit ili 6-bit
- Generira prekid: na kraju pretvorbe, na kraju injektirane pretvorbe te u slučaju aktiviranja analognog watchdoga ili prekoračenja granica
- Pojedinačni i kontinuirani način pretvorbe
- Skenirajući način pretvorbe za automatsku pretvorbu kanala
- Poravnavanje podataka
- Programabilno vrijeme uzrokovanje signala
- Isprekidani način pretvorbe
- Napajanje ADC-a: 2.4 V do 3.6 V za brži način rada i do 1.8 V za sporiji način rada
- Ulazni raspon ADC-a: $0 \leq U_{IN} \leq U_{REF+}$

4.1.3 Pulsno širinska modulacija (PWM)

Pulsno širinska modulacija (Pulse Width Modulation ili PWM) je tehnika dobivanja analognih vrijednosti preko digitalnih oblika. Dobivanje različitih analognih vrijednosti postiže se modulacijom širine pulsa. Ovaj način rada može simulirati napon koji se mijenja između stanja kada signal ima najvišu vrijednost (5 V) i stanja kada signal ima minimalnu vrijednost (0 V) tako da se mijenja dio vremena u kojem ima signala i vremena u kojem nema signala. Upravo ta tehnika idealna je za upravljanje radom niza n-MOSFETA ovog sklopa tj. uključivanje odnosno isključivanje sklopki. Kao što je vidljivo na električnoj shemi za rad ovog sklopa potrebna su 3 PWM signala: jedan za upravljanje sklopkama kod podizača napona, jedan za uključivanje sklopke kad napon serije superkondenzatora pređe 9.9 V, jedan za upravljanje sklopki ispod transformatora.

4.2. Instrumentacijska pojačala

Kao što je već bilo spomenuto vrijednost napona na nekim otpornicima bit će toliko niska da je potrebno naponsko pojačanje. Zato su u tu svrhu korištena dva CMOS⁷ instrumentacijska, operacijska pojačala Texas Instruments INA331IDGKT i INA2331AIPWT⁸. To su pojačala koja omogućuju namještanje faktora pojačanja pomoću odabira odgovarajućih vrijednosti otpornika koji su spojeni izvana. Jedan od njih namijenjen je za pojačavanje signala na otporniku koji će biti spojen na izlaz cijelog sklopa tako da u svakom trenutku znamo izlaznu struju. Drugo pojačalo omogućuje pojačanje dva signala, napon na otpornicima R8 i R16 na kojima je potrebno znati iznos struje kako bi regulirali procese punjenja i pražnjenja baterija. Budući da su očekivane vrijednosti ponekad negativne pojačalima je na odgovarajuće pinove dovedeno -3 V sa invertera. Izlazni signal je uvećan za napon V_{ref} koji iznosi oko 1.8 V kako bi pojačani signali koji se odvođe na ADC pinove mikrokontrolera STM32F407VGT6 bili u radnom opsegu AD pretvornika.

⁷ (engl. Complementary Metal Oxide Semiconductor) je tehnologija za izradu digitalnih i analognih mikroelektroničkih sklopova prvenstveno koristeći u projektiranju unipolarne MOS tranzistore.

⁸ <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina2331.pdf>

4.3. Naponski pretvarači

Inverter

Prilikom projektiranja superkondenzatorsko-baterijskog spremnika korišten je inverter TL7660CD⁹ koji izvodi pretvorbu napona napajanja iz pozitivnih u negativne vrijednosti. Točnije, radi se o naponu -3 V koji je dobiven invertiranjem analognog izlaza mikrokontrolera STM32F407VGT6 vrijednosti 3V.



Slika 8. Inverter

Podizač napona

Podizači napona (engl. BOOST Converter) su DC-DC pretvarači snage kod kojih je moguće namjestiti željenu vrijednost izlaznog napona. LTC®3459¹⁰ koristi se za generiranje napona od 9.9 V koji je potreban za reguliranje napona na superkondenzatorima. Izlazni napon sklopa može se prilagoditi bilo kojoj vrijednosti između 2.5 V i 10 V kombinirajući različite veličine otpornika.

Stabilizator

Stabilizator REG710NA¹¹ još je jedan naponski pretvarač koji je bio potreban u projektiranju ovog sklopa. Korišten je u stabiliziranju napona kojim se napaja mikrokontroler kako bi cijeli uređaj bio prijenosan. Zbog širokog raspona ulaznog napona koji može varirati od 1.8V do 5.5V idealan je za mnoštvo baterijskih izvora. Zato se koristi u stabiliziranju varijabilnog napona litij-ionske baterije te pritom daje 3 V izlaznog napona koji služi kao izvor napajanja mikrokontrolera.

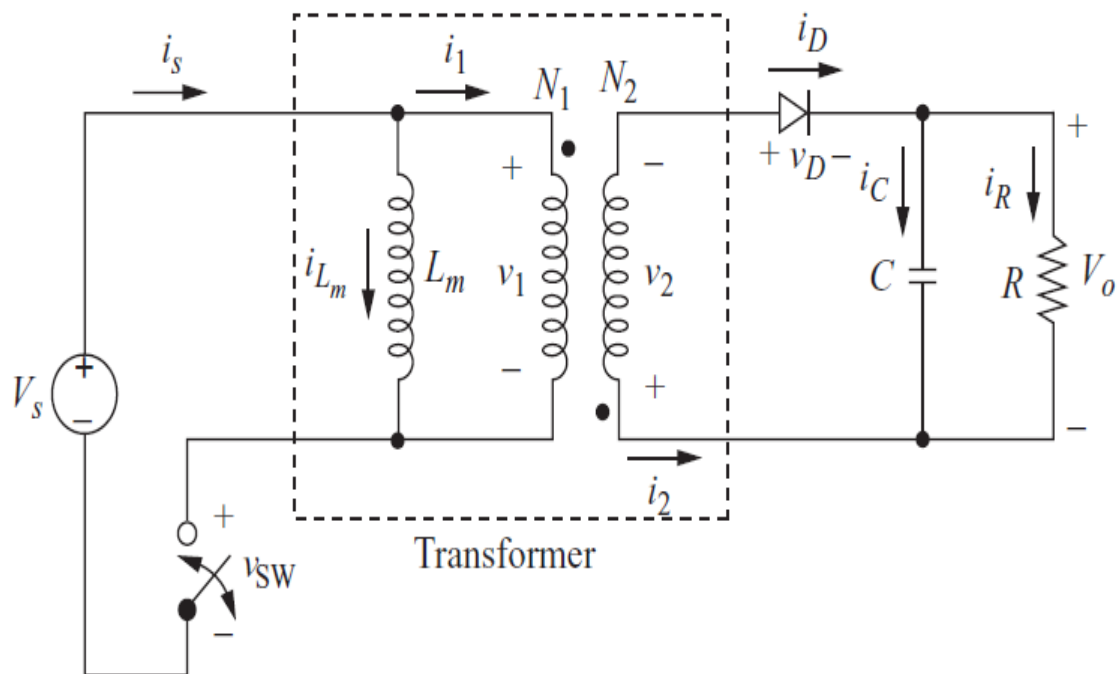
⁹ <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl7660.pdf>

¹⁰ <http://www.farnell.com/datasheets/1599503.pdf>

¹¹ <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/reg710-33.pdf>

4.4. Flyback pretvarač

U svrhu postizanja željenog napona napajanja uređaja često se koriste regulatori. Pri tome regulatori se mogu podijeliti u dvije osnovne skupine koje se temelje na njihovom načinu rada. Postoje linearni i prekidački regulatori. Glavni problem linearnih regulatora je efikasnost, odnosno relativno velika disipacija energije. Upravo zbog problema s disipacijom energije koriste se prekidački regulatori. Iako su prekidački regulatori osjetljivi na vanjske smetnje (elektromagnetsko zračenje) veliku prednost ostvaruju zbog svoje efikasnosti i mogućnošću ostvarivanja većeg izlaznog napona. Naime, kada se tranzistor koristi kao sklopka, on ili ima jako veliki otpor (kada tranzistor ne vodi) ili jako mali otpor (kada tranzistor vodi). Dok kod linearnih regulatora to nije slučaj, na njemu se konstantno disipira energija. Flyback¹² pretvarač spada u prekidačke regulatore, a njegov princip rada implementiran je u superkondnzatorsko-baterijskom sustavu. Specifičnost ove vrste regulatora je korištenje transformatora kao dvostruke zavojnice (eng.*two-winding inductor*).



Slika 9. Shema flyback pretvarača

¹² neizravni istosmjerni pretvarač s transformatorom

Primarna i sekundarna zavojnice ne vode istovremeno, što je inače slučaj kod transformatora.

Kada tranzistor radi kao zatvorena sklopka, dioda u izlaznom krugu je zaporno polarizirana zbog polariteta napona koji se ostvaruje transformatorom i struja kroz nju ne teče. U trenutku isključenja tranzistora na njemu se inducira napon koji se suprotstavlja promjeni struje. Budući, da je tranzistor isključen struja ipak neće proteći kroz njega već će se energija magnetskog polja transformatora osloboditi na sekundaru. Dioda je propusno polarizirana i energija se predaje trošilu.

Primarni krug transformatora služi kao spremnik energije u obliku magnetskog polja koji periodično, ovisno o faktoru vođenja, predaje energiju sekundaru. Upravo zahvaljujući toj karakteristici flyback pretvarač spada u prekidačke regulatore gdje sekundar periodički propušta energiju do trošila. Izlazni napon će ovisiti o ulaznom naponu, omjeru namota transformatora kao i o faktoru vođenja. Inače, flyback pretvarač izveden je iz buck-boost konfiguracije tako što je zavojnica zamijenjena transformatorom, a istovremeno služi i za galvansko odvajanje ulaza i izlaza regulatora.

Napon na sekundaru se može definirati kao:

$$v_2 = V_S \left(\frac{N_2}{N_1} \right), \quad (4)$$

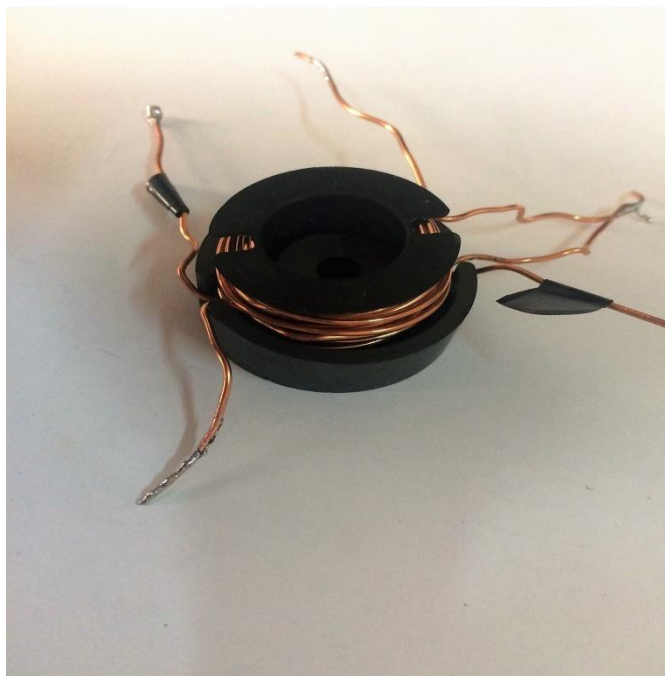
U nastavku je prikazana naponska transformatorska jednadžba flyback regulatora:

$$\frac{V_O}{V_S} = \left(\frac{D}{1-D} \right) \left(\frac{N_2}{N_1} \right), \quad (5)$$

gdje je faktor vođenja sklopa definiran varijablom D , a $\frac{N_2}{N_1}$ predstavlja prijenosni omjer transformatora.

4.5. Implementacija flyback pretvarača

Osnovni princip rada flyback pretvarača koji je opisan gore korišten je u realiziranju ovog sustava i prikazan je na slici 7. Zbog zahtjeva protoka energije u oba smjera dioda je zamijenjena dvjema sklopkicama tj. tranzistorima. Takav pristup nam omogućava kontrolu nad punjenjem i pražnjenjem baterija. Kao što je prikazano na električnoj shemi upravljanje tokom energije izvedeno je pravokutnim PWM signalom mikrokontrolera STMF32F4. Dakle, direktnim namještanjem faktora vođenja pravokutnog signala upravljamo vođenjem struje i induciranjem napona u primarnom, odnosno sekundarnom krugu transformatora. Transformator je električni uređaj koji međuinduktivno povezuje dva električna kruga izmjenične struje. Sastoji se od magnetske jezgre na koju su namotana u pravilu dva međusobno odvojena svitka (namota). Prijenos energije s jednog svitka na drugi odvija se zahvaljujući fizikalnom načelu elektromagnetske indukcije, u načelu pri stalnoj frekvenciji. Transformator koji je izrađen u ovom projektu namotan je trifilarno na feritnu jezgru bakrenom žicom u omjeru 1:2, a prikazan je na slici 10.



Slika 10. Izrada transformatora



5. Projektiranje i razvoj tiskane pločice

Projektiranje tiskanih pločica podrazumijeva izradu električne sheme i dizajn (crtanje) vodova tiskane pločice. Projektiranje se izvodi pomoću raznih računalnih CAD alata kao što su Altium Designer, Expedition, Pads, P-CAD i mnogi drugi. Prvo se crta električna shema sklopa u nekom od gore navedenih CAD alata za PCB dizajn. Za izradu ove tiskane pločice korišten je programsko okruženje Altium Designera.

5.1. Rad u programskom okruženju Altium Designer

Električna shema prevodi se u datoteku koja sadrži informacije o povezanosti komponenata i njihovim karakteristikama („Netlist” datoteka), te se „Netlist” učitava u modul Altium alata za crtanje tiskanih pločica. Električna shema, *BOM*¹³, dokumenti za izradu tiskane pločice nalaze se u Privitku. Tiskana pločica može imati jedan ili više slojeva. Najčešće se koriste tiskane pločice za s dva sloja bakra, a nisu rijetke ni pločice s četiri ili više slojeva. Crtanje električne sheme, tj. izrada shematskog dokumenta, početna je faza rada na projektu i svodi se na postavljanje komponenata na radnu površinu i njihovo povezivanje vodovima (ožičenje). Altium Designer posjeduje skup pravila za dizajn (eng. Design rules) koja se koriste kao pomoć pri projektiranju tiskane pločice. Neka od opće poznatih i uobičajenih pravila su minimalna i maksimalna širina vodova, minimalni razmak između vodova, minimalna i maksimalna širina rupe, veličina prospojne rupe. Slijedeći pravila koja se preporučuju za rad na laboratorijskim vježbama na kolegiju Računalom podržano projektiranje elektroničkih uređaja shematski dokument prenesen je u PCB editor u kojem su prethodno definirane dimenzije pločice. Nakon što su kućišta i pločica povezane u jednu cjelinu, tj. u jedan PCB dokument, kućišta je bilo potrebno rasporediti po pločici prema nekom već unaprijed osmišljenom rasporedu, a potom povezati vodovima.

¹³ Eng. Bill of Materials- naziv za sastavnicu koja sadrži sve potrebne podatke za narudžbu komponenti

5.2. Izrada PCB dizajna

Kao što je u prethodnom potpoglavlju bilo opisano prije početka projektiranja tiskanih vodova potrebno je osmisliti električnu shemu pazeći da sve oznake električnih simbola budu usklađene s footprintom¹⁴ komponente. Sve dimenzije, raspored pinova, širine rupa potrebno je pronaći u datasheetu¹⁵ pojedine komponente i nacrtati kako je to zadano u uputama. Taj postupak proveden je u realiziranju nastale tiskane pločice. Zatim se krenulo na razmještanje i povezivanje komponenti preko tiskanih vodova. Komponente je najbolje postaviti tako da duljina vodova između njih bude što kraća zbog gubitaka, ali da istovremeno čine funkcionalne cjeline. Za dobro projektiranje tiskanih vodova potrebno je znati kolika je najveća struja koja će prolaziti kroz neki vod. U skladu s time, odabire se širina vodova. Prilikom projektiranja ove tiskane pločice debljina većine signalnih vodova postavljena je na 15 mila¹⁶. Budući da će struje baterija iznositi par ampera, a da se na izlazu sklopa tj. na trošilu očekuju kratkotrajni šiljci od nekoliko desetaka ampera takvi vodovi trebaju biti puno deblji od ostalih i kreću se od 150-190 mila.

5.3. Izrada tiskane pločice

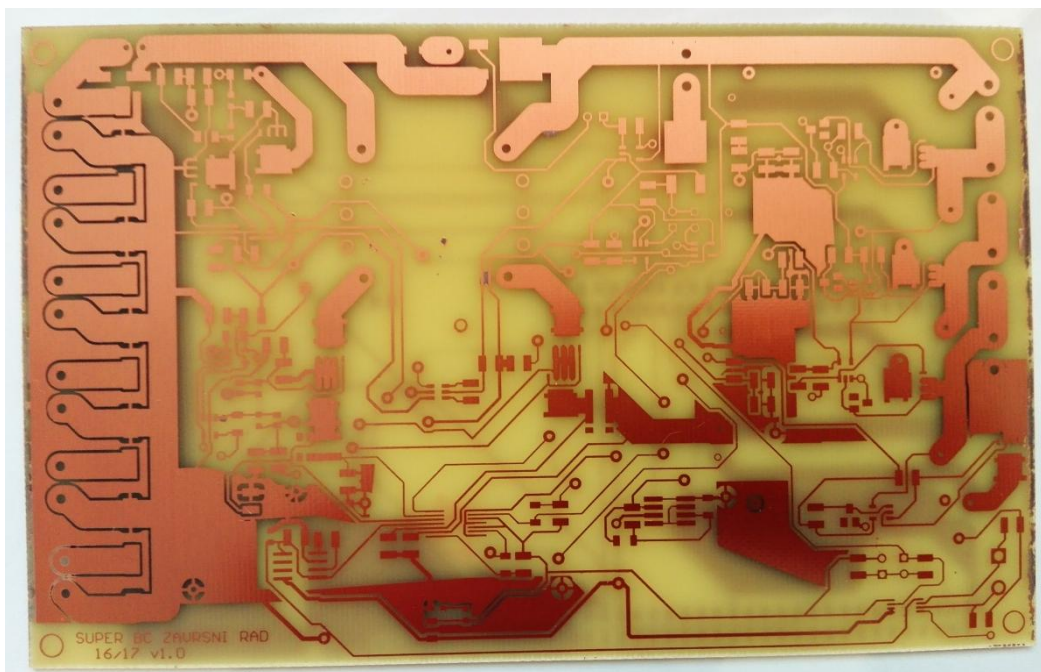
Postupak izrade dvoslojne tiskane pločice započeo je ispisivanjem vodova za jednu i drugu stranu pločice. Kupljena tiskana pločica već je bila odgovarajućih dimenzija i imala je na površini tanki sloj fotoosjetljivog laka tako da su se mogli preskočiti postupci izrezivanja i nanošenja laka na bakrenu površinu. Pozitiv film koji je nastao ispisivanjem laserskog pisača na foliju koristio se prilikom osvjetljavanja pločice UV zračenjem. Svaku stranu pločice bilo je potrebno osvjetliti tri minute strogo pazeći da strana folije na kojoj se nalazi toner mora nalijegati na pločicu kako bi se postigla dovoljna oštrina vodova. Nakon toga slijedio je postupak razvijanja tiskane pločice u 7%-tnoj vodenoj otopini natrijeve lužine i ispiranje vodom. Time je fotoosjetljivi lak na pločici ostao samo na

¹⁴ Otisak komponente

¹⁵ Dokument koji sažima izvedbu i sve ostale tehničke karakteristike komponente

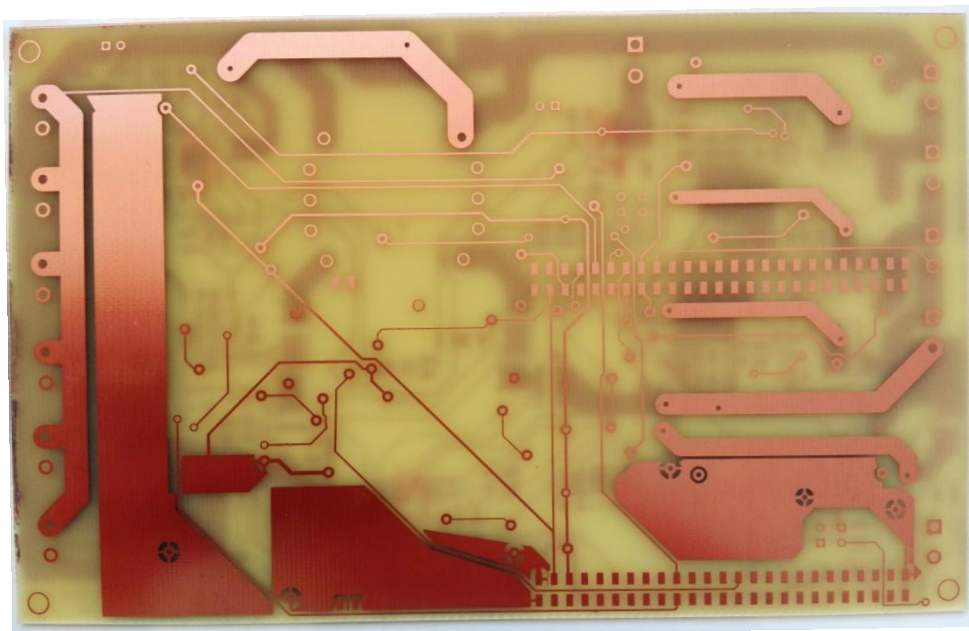
¹⁶ 1 mil = 1/100 inch = 0.0254 mm

vodljivim likovima i pločica je bila spremna za jetkanje. U postupku jetkanja korištena je jetkalica koja proizvodi otopinu željezovog klorida u obliku pjene i time ubrzava cijeli proces. U završnoj obradi preostali lak skinuo se tako što je pločica ponovno bila osvijetljena i razvijana u natrijevoj lužini. Pločica koja je izrađena na Zavodu ZESOI prikazana je na slikama 6 i 7 u *Top* i *Bottom layeru*¹⁷.



Slika 12. Komponentna strana tiskane pločice

¹⁷ Odnosi se na sloj pločice, kod dvoslojne tiskane pločice postoje dva sloja u kojima se projektiraju vodovi-Top i Bottom layer



Slika 13. Lemna strana tiskane pločice

6. Termička analiza projektiranog sklopa

6.1. Odvođenje topline

Jedan od ključnih problema kod dizajniranja električnih krugova je odvođenje topline sa samih komponenata. Budući da se snaga na otpornicima maksimalne snage od 7W disipira u obliku topline predviđen je aluminijski hladnjak na cijelu površinu koju zauzimaju ti otpornici. Hladnjak bi omogućavao odvođenje topline i tako štutio komponente na pločici od pregrijavanja. Razlog uporabe takvog hladnjaka je i korištenje THT (eng. Through Hole Technology) otpornika. Ostatak komponenti koje se koriste u realiziranju ovog sustava većinom je površinske izvedbe (eng. Surface Mount Technology) te je omogućena velika gustoća smještanja na tiskanu pločicu. Kod ovih komponenata hladnjak se smješta na tiskanu pločicu, ustvari tiskana pločica (bakreni sloj) postaje hladnjak za dotičnu komponentu. Površina koja služi kao hladnjak nalazi se s jedne ili obje strane tiskane pločice, te se povezuje s više prosopjnih rupa radi što bolje konvekcije topline.

6.2. Zaštitni sklop

Otpornici snage 7W koji su prethodno opisani nisu dovoljni za reguliranje napona na superkondenzatorima. Zbog toga, predviđen je jedan žičani otpornik¹⁸ maksimalne disipacije snage 25 W koji bi dodatno štutio cijeli sklop. U odnosu na standardne otpornike ovi otpornici su puno skuplji, proizvodnja je složenija i imaju veće dimenzije. Ipak za neke primjene ističu se zbog rada na višim temperaturama, stabilni su, a i mogu se izrađivati za veće nazivne snage s malim odstupanjem otpornosti od nazivne vrijednosti. Radeći s velikom snagom ovaj otpornik bi trebao služiti kao „grijalica“ koja će primljenu energiju pretvarati u toplinu. Na slici 5 vidi se kako je otpornik ugrađen u keramičko kućište sa žljebovima, a na njemu je postavljen aluminijski hladnjak. Rad takvog jednog

¹⁸ <http://uk.farnell.com/arc01-ohmite/hs25-4r-f/resistor-wirewound-4r-1-solder/dp/2678665>

otpornika u ovom sklopu riješen je programski i sklopovski. Slično kao i prije, na komparator se dovode referentni napon koji u ovom slučaju iznosi 9.9 V i napon serije superkondenzatora. Time se u iznimnim situacijama kad kroz superkondenzatore počne prolaziti velika struja uključi MOSFET sklopka i provede dio struje kroz žičani otpornik da bi se višak energije oslobodio na njemu. Programsko i sklopovsko rješenje izvedeno je pomoću logičke funkcije ILL dovođenjem izlaza oba komparatora na upravljačku elektrodu MOSFETA. Napon na svakom superkondenzatoru mjeri se preko analognih ulaznih pinova mikrokontrolera STM32F4DISCOVERY koji imaju mogućnost A/D pretvorbe i time se otvara mogućnost programskog upravljanja ovom sklopkom. Što znači da kad vrijednost napona na seriji superkondenzatora pređe 9.9 V može se digitalnim izlazom mikrokontrolera koji obavlja pulsno-širinsku modulaciju upravljati radom sklopke.



Slika 14. Otpornik snage 25 W

7. Zaključak

U današnje vrijeme uz sve veći razvoj tehnologije značajna su ulaganja usmjerena učinkovitijem korištenju energije te njenim ponovnim iskorištavanjem. Baterije su najrašireniji spremnici električne energije i razvoj njihovih značajki omogućio je njihovo korištenje u raznim primjenama, a pogotovo je utjecao na razvoj prijenosnih uređaja. S druge strane, popularni superkondenzatori javljaju se kao rješenje relativno male gustoće snage baterija. Superkondenzatori mogu razviti veliku snagu i imati veliki broj ciklusa punjenja-pražnjenja. U okviru ovog završnog rada osmišljen je hibridni baterijsko-superkondenzatorski sustav energije koji bi se mogao koristiti u raznim uređajima koji zahtijevaju isporuku velike količine energije u kratkom vremenu. Kada bi takav spremnik energije koristili u električnim vozilima poput električnog bicikla superkondenzatori bi omogućili opskrbu energijom prilikom ubrzavanja, dok bi baterija davala veće količine energije sa smanjenom snagom, dakle tijekom jednolike vožnje. Superkondenzatorsko-baterijski spremnik pohranjivao bi mehaničku energiju tijekom regenerativnog kočenja. Prilikom projektiranja i izrade ovog rada bilo je potrebno osmisliti sustav za pražnjenje/punjenje baterija i superkondenzatora. Osim toga, zbog niskih dozvoljenih napona na superkondenzatorima hardverskim upravljanjem sklopki postignuta je zaštita superkondenzatora i balansiranje napona. Budući da se radi o velikim snagama i o oslobađanju velike količine topline sustav je zahtijevao i termički nadzor. Korištenjem različitih elektroničkih komponenti i razvojnog sustava STMF32F4 tiskanim vodovima na bakrenoj pločici sve je povezano u jednu cjelinu koja zasad predstavlja prototip spremnika energije koji ima iznimne mogućnosti, a daljnjim razvojem trebao bi pronaći i svoju uporabu.

Ivana Marinović

8. Literatura

- [1] <http://www.altium.com>
- [2] Javor Škare, Akumulatorske baterije za sustave besprekidnog napajanja, s Interneta https://www.fer.hr/download/repository/Kvalifikacijski_skare.pdf
- [3] M. S. Halper, J. C. Ellenbogen, " Supercapacitors: A Brief Overview," The MITRE Corporation, McLean, Virginia, USA, 2006. S Interneta http://www.tuks.nl/pdf/Reference_Material/Electrolytic_Caps_and_Super_Caps/Halper%20and%20Ellenbogen%20-%20Supercapacitors:%20A%20Brief%20Overview.pdf
- [4] Y. Diab, P. Venet, G. Rojat, "Comparison of the Different Circuits Used for Balancing the Voltage of Supercapacitors: Studying Performance and Lifetime of Supercapacitors," ESSCAP, Lausanne, Switzerland, 2006, s Interneta https://www.researchgate.net/publication/29599612_Comparison_of_the_Different_Circuits_Used_for_Balancing_the_Voltage_of_Supercapacitors_Studying_Performance_and_Lifetime_of_Supercapacitors
- [5] User manual, Discovery kit with STM32F407VG MCU, 2017, s Interneta http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/70/fe/4a/3f/e7/e1/4f/7d/DM00039084.pdf/files/DM00039084.pdf/jcr:content/translations/en.DM00039084.pdf
- [6] Predavanja kolegija "Spremnici energije", 2017, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, https://www.fer.unizg.hr/download/repository/04_Baterije.pdf
https://www.fer.unizg.hr/download/repository/06_Ultrakondenzatori.pdf
- [7] K. Deepa, Hridya Merin Saju, M. Vijaya Kumar, "Soft switched flyback converter for SMPS applications", 2013
<http://ieeexplore.ieee.org/document/6731701/authors>

9. Sažetak

Naslov

Hibridni supekondenzatorsko-baterijski spremnik energije

Sažetak

Glavna značajka akumulatorskih baterija je mogućnost pohrane velikih količina energije i zato su s vremenom postale glavni izvor napajanja kod većine prenosivih uređaja. Suprotno baterijama, superkondenzatori imaju veliku gustoću snage, ali malu gustoću energije. U ovom radu osmišljeno je i projektirano rješenje hibridnog superkondenzatorsko-baterijskog spremnika za izravno skladištenje energije koje bi iskoristavao najbolja svojstva superkondenzatora i baterija. Detaljno je razrađen i objašnjen način rada jednog takvog sustava. Predstavljene su modeli punjenja i pražnjenja akumulatorskih litij-ionskih baterija i superkondenzatora. Također, razvijeni su elektronički podsustavi koji štite elemente sustava od nedozvoljenih razina struja i napona. Zbog pretpostavke o zagrijavanju pojedinih elektroničkih komponenti projektirani sklop termički je analiziran. Korištenjem programskog okruženja Altium Designer nacrtana je elektronička shema sustava, sastavljen je popis materijala i projektirana tiskana pločica povezuje mikrokontroler i sve komponente međusobno u jednu povezanu cjelinu.

Ključne riječi

Spremnik energije, superkondenzatori, litij-ionske baterije, zaštitni sustavi, električna shema, PCB dizajn

Title

Hybrid Ultracapacitor-Battery Energy Storage

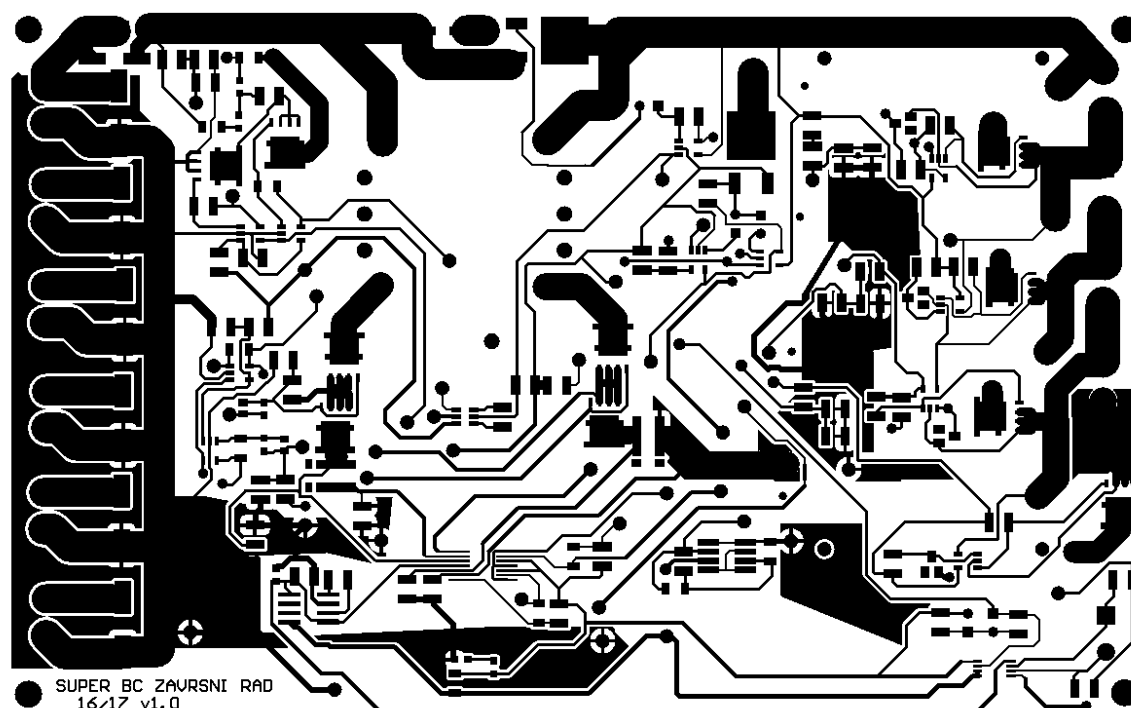
Summary

The main feature of accumulator batteries is the ability to store large amounts of energy and therefore they have become the main source of power for most portable devices over time. Contrary to batteries, ultracapacitors have a high density of power, but low energy density. In this bachelor thesis a hybrid ultracapacitor-battery storage that exploits best characteristic ultracapacitors and batteries was designed. There is a detailed elaboration and explanation of how one of these systems should work. The charging and discharging models of lithium-ion batteries and ultracapacitors are featured. Also, electronic subsystems that protect system elements from unauthorized levels of current and voltage were designed. Due to the assumption of heating of individual electronic components the designed circuit is thermally analyzed. Using the Altium Designer programming environment, an electronic scheme of system was drawn up, a list of materials was made and the printed circuit board that connects the microcontroller and all components to one another in a single entity was designed.

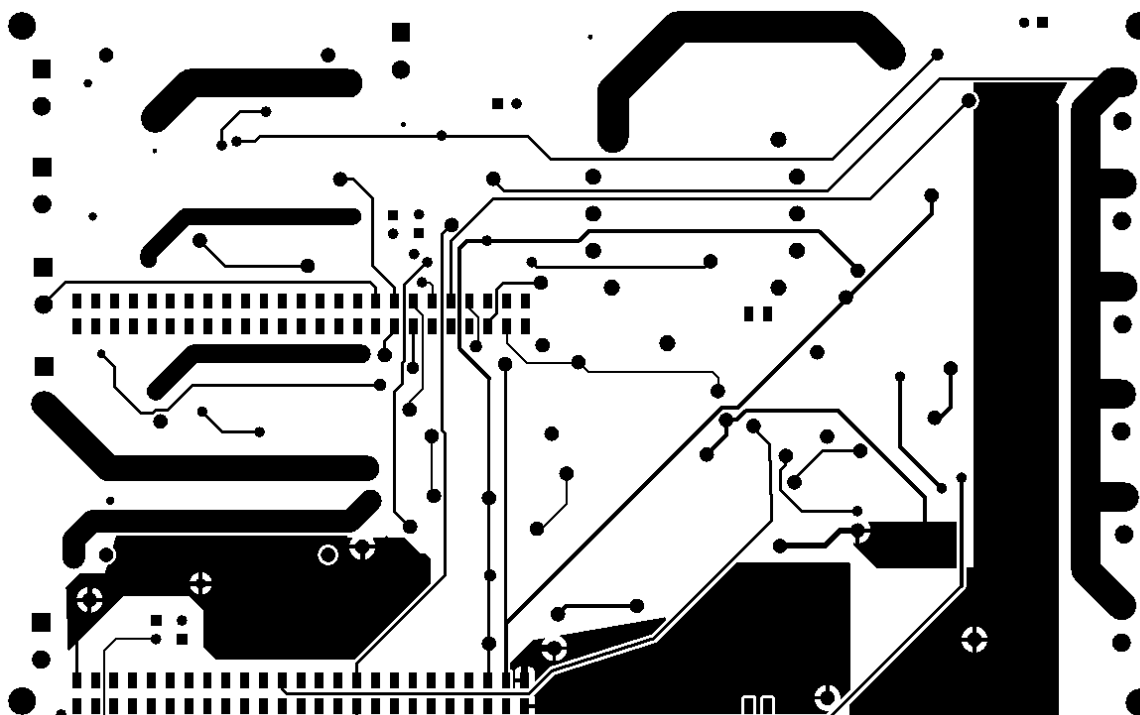
Key words

Energy storage, ultracapacitors, lithium-ion batteries, protection systems, electrical scheme, PCB design

10. Privitak

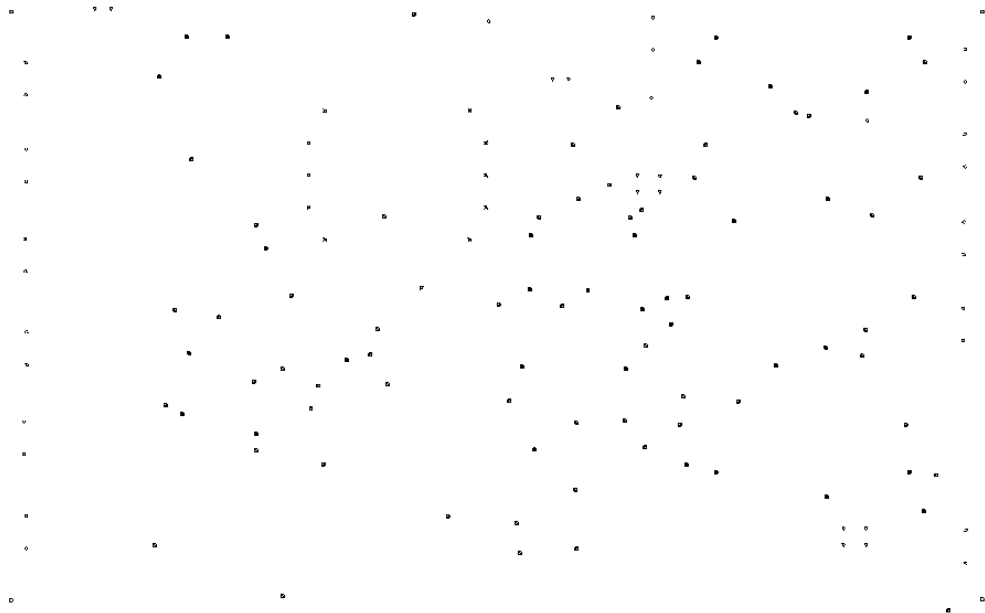


Slika 15. Nacrt tiskanih vodova na komponentnoj strani



Slika 16. Nacrt tiskanih vodova na lemnoj strani

Symbol	Count	Hole Size	Plated	Hole Type	Drill Layer Pair	Via/Pad	Pad Shape	Template
○	3	0,711mm (27,99mil)	PTH	Round	Top Layer - Bottom Layer	Via	Rounded	v71h71
■	87	0,800mm (31,50mil)	PTH	Round	Top Layer - Bottom Layer	<Mixed>	Rounded	<Mixed>
▽	12	0,900mm (35,43mil)	PTH	Round	Top Layer - Bottom Layer	Pad	<Mixed>	<Mixed>
⊗	11	1,400mm (55,12mil)	PTH	Round	Top Layer - Bottom Layer	Pad	Rounded	c220h140
☆	24	1,500mm (59,06mil)	PTH	Round	Top Layer - Bottom Layer	Pad	<Mixed>	<Mixed>
□	4	3,200mm (125,98mil)	PTH	Round	Top Layer - Bottom Layer	Pad	Rounded	c381h320
	141 Total							



Slika 17. Plan bušenja

32

Designator	Dobavljač	kataloški broj	opis komponente	cijena (funte)	Footprint	manufacturer	Quantity
C1, C6, C8, C9, C10, C11, C16, C17, C21, C22	Farnell	1828960	Capacitor	0.241	C1210_L	MURATA	10
C2, C3, C12	Farnell	9527826	Capacitor	0.173	C1210_L	MURATA	3
C4	Farnell	1735535	Capacitor	0.337	C1206	MURATA	1
C5	Farnell	2466729	CAP	0.176	C1210_L	WURTH ELEKTRONIK	1
C7, C18	Farnell	2320934	Ceramic Capacitor	0.275	C1210_L	MULTICOMP	2
C15	Farnell	1759369	Capacitor	0.198	C1210_L	MULTICOMP	1
C23, C24	Farnell	2688549	caapcitor	0.293	C1210_L	MURATA	2
C101, C102, C103, C104, C105, C106	Farnell	1539457	Electrolytic Capacitor	0.526	SMD CAP RAD 8X10.2	PANASONIC ELECTRONIC COMPONENTS	6
D1	Farnell	1755282	inverter	1.32	inverter - duplicate	TEXAS INSTRUMENTS	1
D2	Farnell	2496201	pojačalo	2.95	F za pojačalo(2)	TEXAS INSTRUMENTS	1
D3	Farnell	1459472	INA331	2.63	F za pojačalo (1)	TEXAS INSTRUMENTS	1
D4	Farnell	1330678	Amplifier za 9.9	3.50 f	F za stabilizator	Linear Technology	1
D5	Farnell	1207264	DC-DC Switching Buck, Boost Regulator	1.31	SOT23-6_L	TEXAS INSTRUMENTS	1
K1, K2, K3, K4, K7	Farnell	2510412	Analogue Comparator	0.239	SOT-23	MICROCHIP	5
K5, K8, K9, K10, K11	Farnell	2510412	Analogue Comparator	0.239	SOT-23	MICROCHIP	5
K6	Farnell	2510412	Analogue Comparator	0.239	otpornik R8, R16	MICROCHIP	1
N1, N2, N3, N4	Farnell	9778322	chip za ref napon	0.567	SOT23_L	TEXAS INSTRUMENTS	4
P1	Farnell	1932146	header za NUCLEO	1932146	Header SMD 25x2 pin	SAMTEC	1
P2	Farnell	1932146	header za NUCLE	1932146	Header SMD 25x2 pin	SAMTEC	1
R1, R10, R12, R13, R19, R22, R32, R38, R39, R40, R63, R64, R65, R66	Farnell	2502771	resistor	0.304	C1210_L	WALSIN	14
R2, R31, R37	Farnell	2380713	resistor	0.249	C1210_L	PANASONIC ELECTRONIC COMPONENTS	3
R3	Farnell	1100070	Resistor	0.60	R3	WELWYN	1
R5, R6	Farnell	1160198	resistor	0.561	6-0805_L	WELWYN	2
R7, R9	Farnell	1100252,	resistor	0.0185, 0.0316	C1206	WELWYN, PANASONIC	2

R8, R16	Farnell	2363991	Resistor	2.49	otpornik R8, R16	OHMITE	2
R15, R17			veličina ovisna o pojačanju		C1210_L		2
R20, R21	Farnell	1501812	resistor	1.45	C1206	HOLSWORTHY	2
R23	Farnell	2078988	Resistor	0.0362	C1206	WELWYN	1
R24, R46, R47, R48, R49, R52, R61	Farnell	2324037	resistor	0.0949	C1210_L	PANASONIC ELECTRONIC COMPONENTS	7
R25, R55, R59, R62	Farnell	1292518	Through Hole Resistor 7W	0.426	F za 7W otpornik	WELWYN	4
R33, R34	Farnell	1894354	resistor	0.26	C1210_L	PANASONIC ELECTRONIC COMPONENTS	2
R41, R43, R44, R45	Farnell	2324006	resistor	0.0952	C1210_L	PANASONIC ELECTRONIC COMPONENTS	4
R50	Farnell	2057769	resistor	0.0317	C1206	PANASONIC ELECTRONIC COMPONENTS	1
R53, R54, R60	Farnell	1100209	resistor	0.0274	C1206	WELWYN	3
T1			transformator		F za transformator		1
V1, V2, V4, V5, V6, V14, V15, V16, V17, V23	Farnell	2533388	Diode	0.0908	SO-8L single	ON SEMICONDUCTOR	10
V7, V8, V9, V11, V19, V24, V25	Farnell	1773531	dioda	0.237	Diode -small signal	DIODES INC	7
V10, V13	Farnell	1794799	n-MOSFET	0.585	TO-252-3	VISHAY	2
V18	Farnell	9556923	Schottky Rectifier	0.216	SOD123	ON SEMICONDUCTOR	1
W1, W2, W3, W4, W5, W6	Farnell	2396303	jumper	0.0874	HDR1X2	HARVIN	6
X1, X2, X3, X4, X10, X11, X12, X13, X14, X15, X16, X17	Farnell	2396251	Header, 2-Pin	0.239	F Header 1x2	MULTICOMP	12

Tablica 3. Sastavnica