

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 5284

Baterijama potpomognut superkondenzatorski spremnik

Antonija Marinović

Zagreb, lipanj 2017.

Zagreb, 9. ožujka 2017.

ZAVRŠNI ZADATAK br. 5284

Pristupnik: **Antonija Marinović (0036486403)**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Modul: Elektroničko i računalno inženjerstvo

Zadatak: **Baterijama potpomognut superkondenzatorski spremnik**

Opis zadatka:

Potrebno je projektirati elektronički pretvornik koji povezuje bateriju i slog superkondenzatora. Nadzirati naponske razine na superkondenzatorima. Osmisliti sustav za ujednačavanje napona, odvođenje viška energije, kao i nadzor nedozvoljenih stanja. Korištenjem programskog okruženja Altium Designer nacrtati elektroničku shemu sustava, popis materijala i projektirati tiskanu pločicu. Dizajnom minimizirati utjecaj električnih i magnetskih smetnji. Razdvojiti visokoenergetske i signalne sklopove. 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

Djelovoda:

Prof. dr. sc. Dražen Jurišić

Predsjednik odbora za
završni rad modula:

Prof. dr. sc. Mladen Vučić

*Zahvaljujem se mentoru i Ani Smolić na smjernicama i pruženoj
pomoći tijekom izrade Završnog rada.*

SADRŽAJ

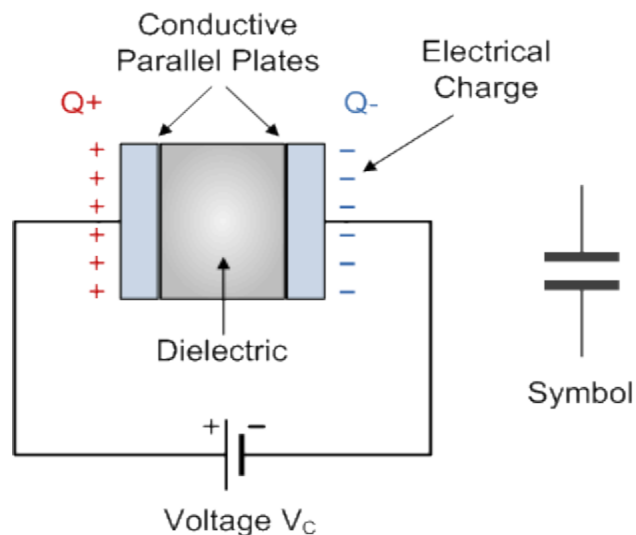
1. Uvod	1
2. Kondenzatori	2
2.1. Superkondenzatori	3
3. Baterije	6
3.1. Litij-ionske baterije	7
4. Regulacija napona na superkondenzatorima	9
5. Uloga i realizacija transformatora	12
5.1. Načelo rada transformatora	12
5.2. Prekidački izvori napajanja	13
6. Rad u Altium Designeru	16
6.1. Izrada pločice	17
6.2. Sastavnica	19
7. Integrirane elektroničke komponente	22
8. STM32F4 DISCOVERY	23
9. Zaključak	25
10. Literatura	26
11. Naslov, sažetak i ključne riječi	27
12. Privitak	29

1. Uvod

Elektroenergetski sustav kao najveći, najutjecajniji i najskuplji tehnički sustav pokriva skoro svaki dio Zemljine površine. Svakodnevno raste broj električnih uređaja na tržištu kao i potreba za potrošnjom energije. Novi principi skladištenja energija postaju ne samo izazov već i zahtjev pouzdane opskrbe energijom. Društvo svakodnevno podiže ljestvicu zahtjeva za novim tehničkim inovacijama. Manje dimenzije elektroničkih uređaja, veća funkcionalnost, napredniji i dugotrajniji izvori napajanja samo su neke od stavki koje je potrebno zadovoljiti. Proizvođači vode utrku za unaprjeđenjem efikasnosti te dominacijom na konkurentnom tržištu. Pojavila se nova tehnologija gdje su superkondenzatori predstavljeni kao primamljivo rješenje za napajanje te koja nudi veliku mogućnost napredovanja u skladištenju energije. Prednost superkondenzatora u odnosu na obične kondenzatore je količina energije koju može pohraniti dok je glavna prednost u odnosu na baterije veća gustoća snage. Tamo gdje su potrebne veće količine energije u kraćem vremenu superkondenzatori bi se koristili kao pomoćni izvori energije. Uz to ih karakterizira vrlo brzo punjenje odnosno pražnjenje. Kombiniranjem superkondenzatora i baterija povećava se trenutna maksimalna snaga spremnika i produljuje vijek baterije koji je kratkotrajan u odnosu na same superkondenzatore. Cilj ovog rada bio je projektiranje elektroničkog pretvornika koji povezuje baterije i seriju superkondenzatora u svrhu ostvarenja boljeg i inovativnijeg načina skladištenja energije.

2. Kondenzatori

Najbitnije značajke za pohranu električne energije su gustoća energije i gustoća snage. Gustoćom energije označavamo količinu energije koju neki uređaj može pohraniti po jedinici mase ili volumena uređaja dok gustoćom snage nazivamo količinu energije koju uređaj u vremenu može predati trošilu. Kondenzatori se u praksi koriste kao spremnici električne energije te su sastavljeni od dvije metalne elektrode (najčešće silicij), između kojih se nalazi dielektrik, čija je svrha akumuliranje električnog naboja.



Slika 1. Shema kondenzatora

Jedinica koja opisuje kondenzator je električni kapacitet koji pokazuje koliku količinu naboja Q ima određeni kondenzator na svojim elektrodama pri naponu U .

$$C = \frac{Q}{U} \quad (1)$$

Kapacitet kondenzatora je proporcionalan umnošku permitivnosti dielektrika koji se nalazi u kondenzatoru ϵ_r , permitivnosti vakuumu ϵ_0 i površine elektroda S te obrnuto proporcionalan razmaku d između elektroda.

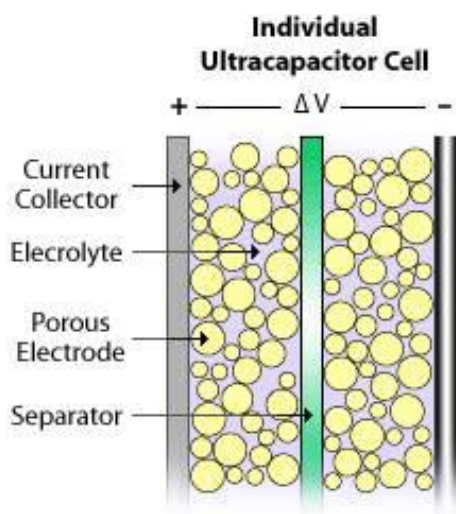
Jednadžba poprima sljedeći oblik :

$$C = \epsilon_r * \epsilon_0 * \frac{S}{d} \quad (2)$$

Što je veća površina elektroda, a razmak između elektroda manji to je kapacitet u zadanom dielektriku veći. Kada je napon priključen na kondenzator, naboji suprotnog polariteta se skupljaju na površini svake elektrode, Slika 1. Naboji ostaju odvojeni dielektrikom te dolazi do pojave električnog polja među elektrodama i pohrane električne energije. Kondenzator će biti nabijen kada razlika potencijala između elektroda i baterije bude jednaka. Kondenzator se prazni kad odspojimo izvor jer se tad elektroni kreću od elektrode koja je negativno nabijena do elektrode koja je pozitivno nabijena.

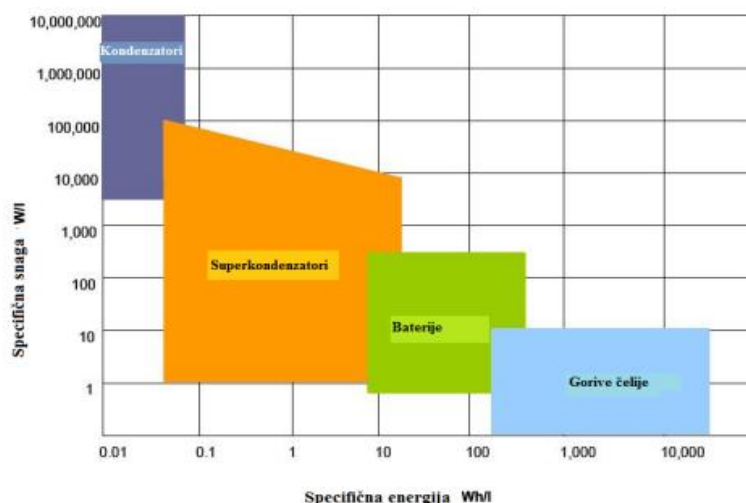
2.1. Superkondenzatori

U mobitelima i ostalim prijenosnim uređajima baterije se koriste za pohranu velikih količina električne energije. Unatoč velikoj količini energije za pohranu glavni nedostatak baterija je mala gustoća snage. No, razvojem tehnologije omogućena je izvedba kondenzatora vrlo velikih površina elektroda i manjeg razmaka među njima u odnosu na klasične kondenzatore. Time je povećan kapacitet i količina energije koju ti kondenzatori mogu pohraniti dok je gustoća snage znatno veća nego kod baterija. Tehnologija koja stoji u pozadini superkondenzatora postiže razmak između elektroda koji je nanometarskog iznosa. Superkondenzatori su sastavljeni od dvije elektrode, elektrolita i separatora.



Slika 2. Shema superkondenzatora

Separator osigurava prolazak iona, ali služi i kao električna izolacija između elektroda. Princip rada sličan je kao kod klasičnih kondenzatora. Kada na elektrodama superkondenzatora postoji razlika potencijala, električni naboj se akumulira na površini elektrode, a ioni suprotnog naboja iz elektrolita su privučeni. Prema mehanizmu pohrane naboja superkondenzatore dijelimo u 3 skupine: elektrokemijski dvoslojni kondenzator (EDLC¹) čije se skladištenje naboja odvija putem razdvajanja električnog naboja na granici faza elektroda/elektrolit, pseudo-superkondenzatori koji skladište energiju putem elektrokemijskih reakcija na elektrodama i hibridni kondenzatori. Na Slika 3 vidljivo je kako superkondenzatori zauzimaju područje između baterija i običnih kondenzatora. Dijagram pokazuje međusobnu ovisnost jedinične snage (W/kg) i jedinične energije (Wh/kg odn. J/kg) kod kondenzatora, superkondenzatora, baterija i gorivih ćelija.



Slika 3. Ragoneov dijagram

Glavne prednosti superkondenzatora su:

- velika gustoća snage
- kratko vrijeme punjenja i pražnjenja
- jednostavno punjenje
- velika učinkovitost

¹ eng. electrochemical double layer capacitor

- dugo vrijeme života (procjena više od 20 godina) tj. višestruko veći broj ciklusa nabijanja i izbijanja
- širok raspon radne temperature
- mogućnost izbijanja bez posljedica u vrlo kratkom vremenu
- ekološka prihvatljivost.

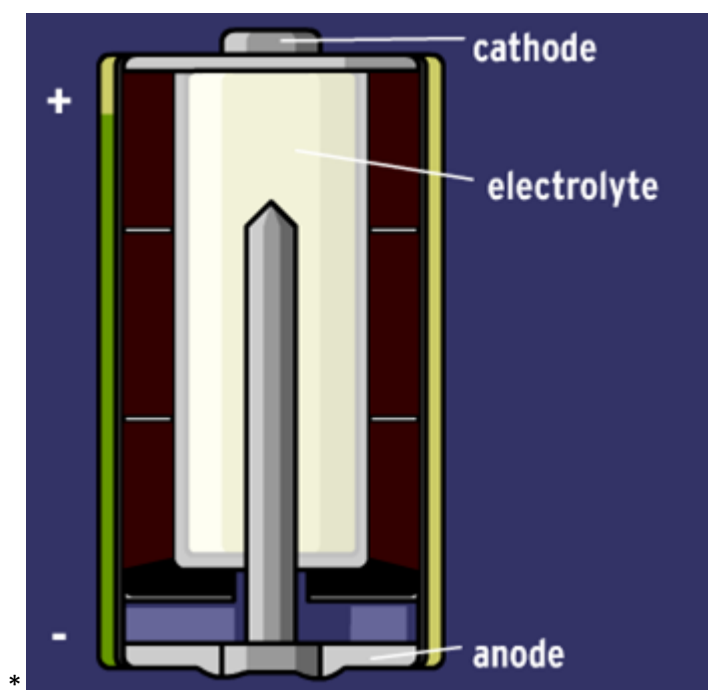
Navedene prednosti čine superkondenzatore odgovarajućim izvorom napajanja za uređaje koji zahtijevaju veliku snagu i dugotrajnost izvora električne energije. Nedostatci superkondenzatora su vrlo nizak maksimalni napon (napon pri kojem elektrolit više ne može zadržati naboje na elektrodama odvojene i dolazi do proboja) te mala gustoća energije.



Slika 4. Različita pakiranja superkondenzatora

3. Baterije

Kako raste broj električnih uređaja tako raste i potreba za većim brojem baterija. Baterija je samostalni spremnik energije koji može proizvesti određenu količinu električne energije kada je to potrebno. Baterija polagano pretvara kemijsku energiju u električnu energiju te ju otpušta dok se ne isprazni. Baterija se sastoji od više članaka koji su spojeni serijski ili paralelno, ovisno o željenom naponu i kapacitetu. Svaki članak se sastoji od elektroda, elektrolita, separatora, oklopa i priključaka.

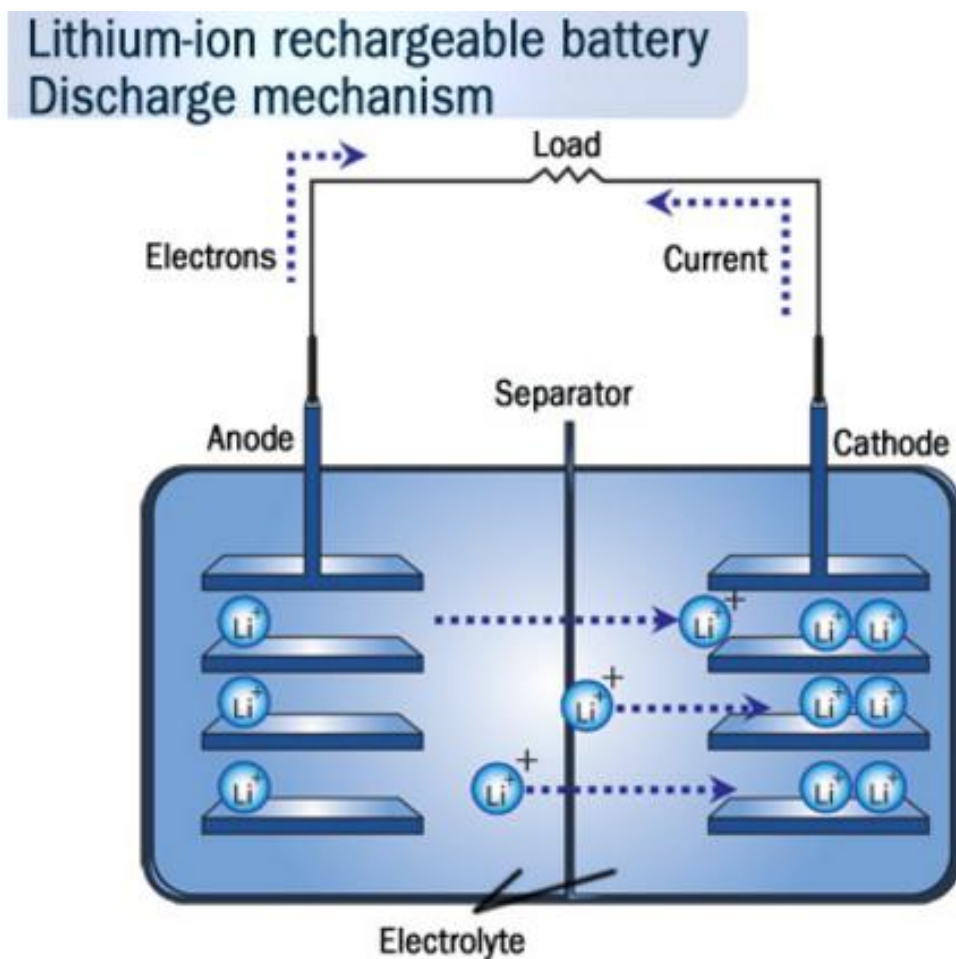


Slika 5. Shema baterije

Otpuštanje elektrona (oksidacija) odvija se na anodi (negativni pol) dok se prihvatanje elektrona (redukcija) odvija na katodi (pozitivni pol). Elektrolit služi kao medij kojim se prenosi naboj između anode i katode. Baterije se dijele u 2 kategorije : primarni izvori (baterije) - kemijska reakcija nije reverzibilna pa se ne mogu puniti i sekundarni izvori (akumulatori) - kemijska reakcije je reverzibilna pa imaju mogućnost punjenja.

3.1. Litij-ionske baterije

Litij-ionske baterije pripadaju skupini punjivih baterija. Katoda je litijev metalni oksid, a anoda porozni ugljik. Ioni se kreću u 2 smjera (slika 6). Tijekom punjenja, litijevi ioni prolaze iz katode do anode kroz elektrolit. Elektroni također protječu od katode do elektrode, ali uzimaju dulji put oko vanjskog kruga. Elektroni i ioni se kombiniraju na negativnoj elektrodi i pohranjuju litij tamo. Kada više nema iona, baterija je potpuno napunjena. Tijekom pražnjenja, ioni putuju natrag kroz elektrolit iz anode do katode. Kada se ioni i elektroni kombiniraju na katodi litij se taloži. Baterija je potpuno ispražnjena kada se svi ioni pomiču natrag.



Slika 6. Mehanizam rada litij-ionskih baterija

Litiji-ionske baterije su lagane, dugotrajne i imaju minimalni memorijski efekt, što znači da se mogu početi puniti i prazniti u bilo kojem stanju napunjenosti bez da baterija trajno izgubi nešto od svoga kapaciteta. Upravo manja masa i veći nazivni napon u odnosu na LiFePO_4 baterije (nazivni napon oko 3.2- 3.3 V) osigurali su prednost li-ionskim baterijama² u projektiranju superkondenzatorsko-baterijskog spremnika energije. Prednosti ove vrste baterija u odnosu na nikal-metal-hibridne (NiMH) baterije je dvostruko veća gustoća energije i oko triput veći nazivni napon (oko 3.6 V). Ipak nedostatak baterija je velika osjetljivost na prepunjavanje kao i na pražnjenje. Taj se problem rješava dodatnim elektroničkim sklopovljem što u konačnici povisuje ukupnu cijenu baterije. Također litij-ionske baterije podložne su starenju ako se ne upotrebljavaju. Ova vrsta baterija primjenu je pronašla u potrošačkoj elektronici, ponajviše kod mobilnih uređaja kao se u zadnje vrijeme sve više koristi u razvoju hibridnih električnih vozila.

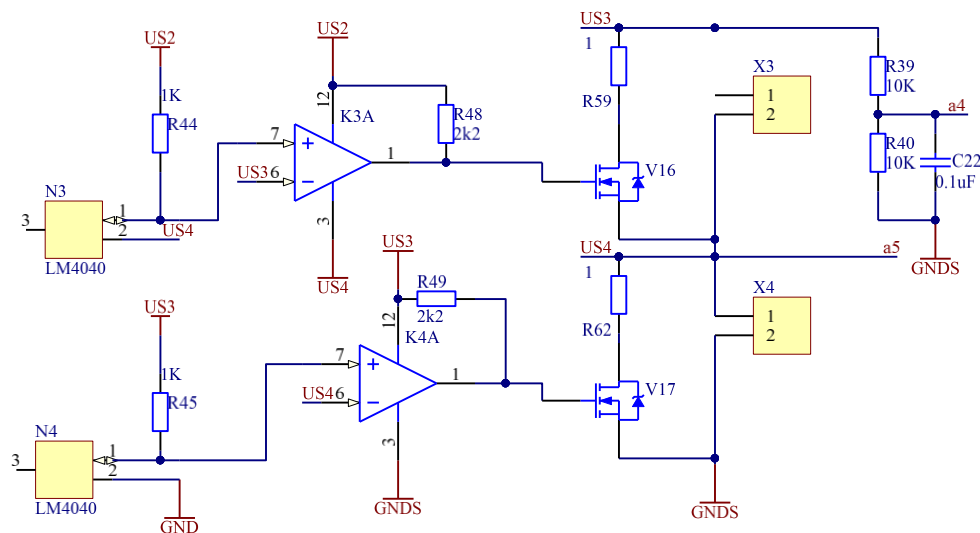


Slika 7. Li-ionska baterija korištena u radu

² <http://html.alldatasheet.com/html-pdf/597042/PANASONICBATTERY/NCR18650A/1538/1/NCR18650A.html>

4. Regulacija napona na superkondenzatorima

Glavni nedostatak korištenja superkondenzatora u području skladištenja energije je njihov ograničeni napon između elektroda. Superkondenzatori se često spajaju u seriju kako bi se postigle veće vrijednosti napona. Tolerancija u karakteristikama superkondenzatora dovodi do neuravnoteženog napona tijekom punjenja odnosno pražnjenja. Na primjer tolerancija kod superkondenzatora³ koji su korišteni u radu je od -5 % do +10 %. To svakako skraćuje život superkondenzatora pa je bilo potrebno osigurati potrebnu elektroniku kako bi poboljšali karakteristiku, produžili životni vijek i kako bi osigurali pouzdanost našeg spremnika energije u cjelini.



Slika 8. Dio električne sheme koji prikazuje regulaciju napona na superkondenzatorima

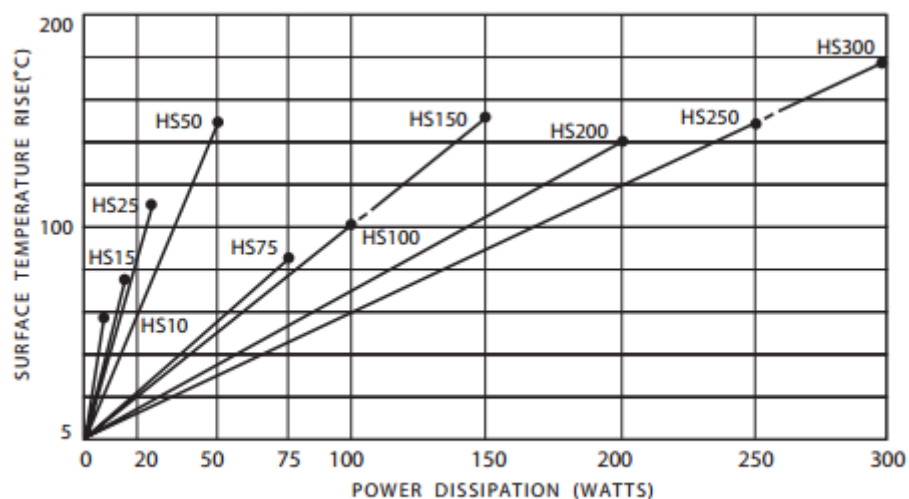
³ <http://www.farnell.com/datasheets/1640990.pdf>

U nastavku će biti objašnjeno kako je izvedena regulacija napona na superkondenzatorima. Princip rada ovog regulatora zasnovan je na uključivanju unipolarnih tranzistora pri prekoračenju napona na bilo kojem od superkondenzatora. Na najdonjem analognom komparatoru (oznaka na shemi K4 A) uspoređuje se napon na najdonjem superkondenzatoru (oznaka na shemi US4) koji se nalazi na + stezaljci i napon od 2.5 V koji je doveden preko izvora referentnog napona (oznaka na shemi N4) odnosno napon koji se nalazi na - stezaljci. Postoje 3 moguća slučaja. Prvi slučaj: ako je napon na +stezaljci veći od napona na -stezaljci izlaz komparatora je spojen na masu te MOSFET ne vodi. Drugi slučaj: ako napon na + stezaljci manji od napona na - stezaljci izlaz komparatora je napon na superkondenzatoru koji se u shemi nalazi iznad promatranog superkondenzatora te MOSFET vodi. Struja tada ne prolazi samo kroz superkondenzator već se dijeli na granu s otpornikom i na granu sa superkondenzatorom. Time se smanjuje struja kroz superkondenzator odnosno usporava punjenje superkondenzatora. Treći slučaj: kada su gornja i donja stezaljka komparatora iste vrijednosti sve ostaje u stanju u kojem je bilo do tog trenutka. Situacija sa svim ostalim komparatorima je analogna samo što se na donju stezaljku uz izvor referentnog napona od 2.5 V superponira vrijednost napona koja je bila na prethodnom superkondenzatoru.

Ako napon na sva 4 superkondenzatora prijeđe 9.9 V dolazi do problema zbog mogućeg oštećenja superkondenzatora. Rješenje ovog problema izvedeno je sklopovski i programski. Sklopovsko rješenje uključuje komparator na kojeg je doveden referentni napon od 9.9 V i napon na cijeloj seriji superkondenzatora. Ako je referentni napon veći od napona na superkondenzatoru izlaz komparatora je u niskoj naponskoj razini pa nije postignut dovoljno velik napon da bi se otvorio MOSFET. Obrnuti slučaj je kad napon na seriji superkondenzatora pređe iznos referentnog napona izlaz iz komparatora je napon od 5 V koji je dovoljan za otvaranje sklopke (FET vodi). Za regulaciju uređaja gdje mogu teći velike struje (u ovom slučaju nekoliko 10-aka ampera) potrebni su otpornici za velike snage. Uobičajeno se izvode iz limenih ploča pakiranih u prozirne metalne kutije ili ormariće koje omogućuju efikasno hlađenje. Tako se struja troši na otporniku snage 25 W takozvanoj "grijalici". Odabrani otpornik može izdržati visoke

temperature u normalnim uvjetima, no bilo ga je potrebno udaljiti od ostalih fizičkih komponenti kako bi bezopasno rasipao toplinu.

Dodatan problem s temperaturom stvaraju otpornici snage 7 W koji također disipiraju toplinu. Zato su prilikom bušenja tiskane pločice predviđene rupe za aluminijski hladnjak koji bi se priključio iznad samih otpornika kako bi odveli nepotrebnu toplinu i time zaštitili samu tiskanu pločicu. Programsko rješenje uključuje komparator na kojeg je doveden PWM signal i napon od 1.5 V koji je dobiven otporničkim djelilom. Na Sliku 9 9 vidljivo je kako rasipanjem snage raste i temperatura na površini otpornika.



Slika 9. Karakteristika otpornika od 4Ω/25 W

5. Uloga i realizacija transformatora

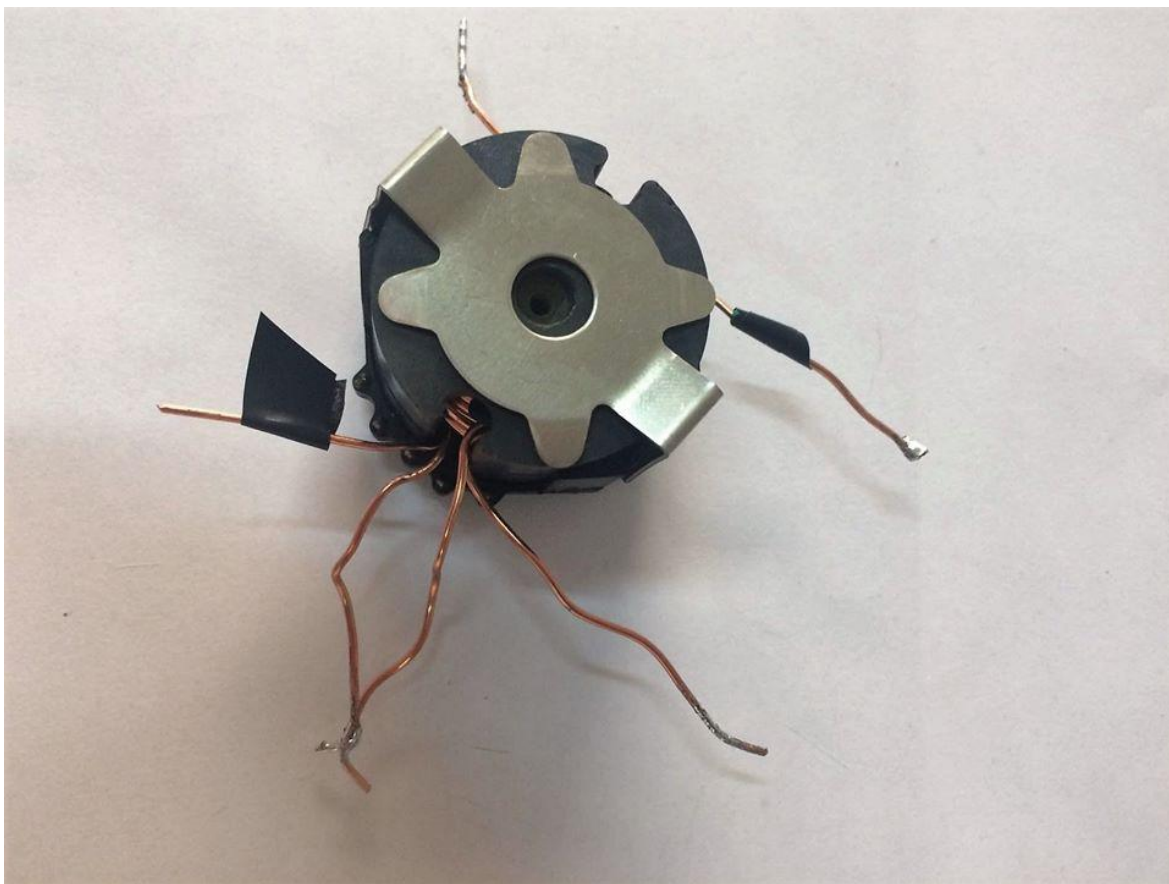
5.1. Načelo rada transformatora

Transformator se sastoji od 2 namota: primarnog s N_1 zavoja i sekundarnog s N_2 zavoja namotanih na zajedničku jezgru načinjenu od feromagnetskih limova. Ako kroz primarni namot teče vremenski promjenjiva struja i_1 , a stezaljke sekundarnog namota su otvorene, primarna struja će stvoriti vremenski promjenjivi magnetski tok kroz jezgru. Struja i_1 se naziva *struja magnetiziranja*. Taj magnetski tok obuhvaćen je zavojima primarnog i sekundarnog namota, pa će u njima inducirati napone. Napon u_1 je inducirani napon primarnog namota koji je u ravnoteži s narinutim naponom izvora koji daje struju magnetiziranja i_1 . Napon u_2 je napon otvorenih stezaljki sekundarnog namota. Omjer napona jednak je omjeru broja zavoja namota:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3)$$

Ako zatvorimo strujni krug sekundara tako da na stezaljke spojimo npr.otpornik, kroz sekundarni namot će poteći struja i_2 čiji smjer je po Lenzovom zakonu takav da stvara svoj magnetski tog suprotstavljen primarnom magnetskom toku. Da bi sačuvao magnetski tok u jezgri mora iz izvora poteći dodatna struja i_1 takvog iznosa kojim će se poništiti magnetski tok sekundarne struje i_2 , tj.mora biti: [1]

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (4)$$



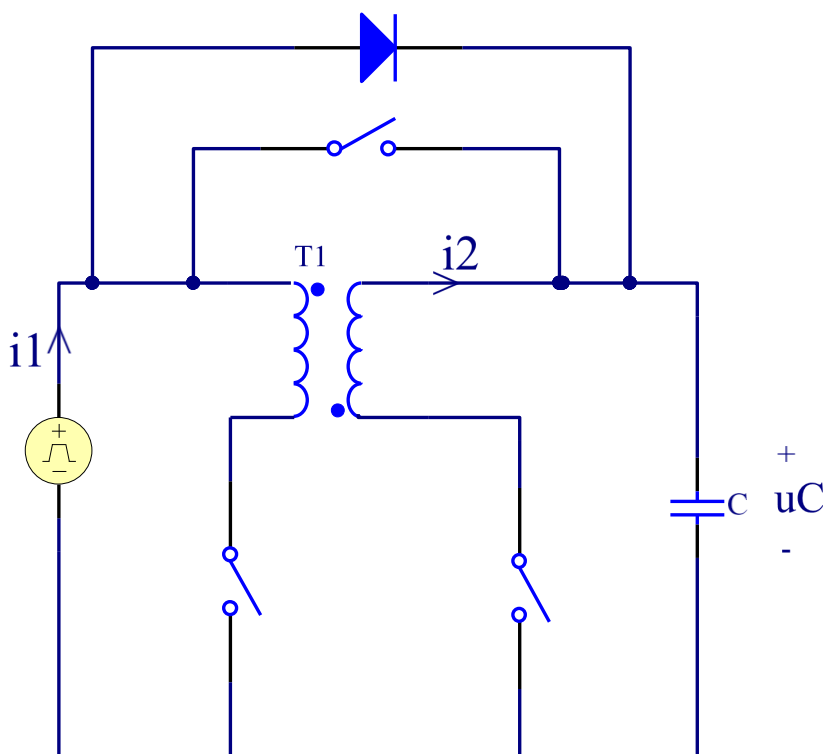
Slika 10. Trfiliarno namotan transformator korišten u radu

5.2. Prekidački izvori napajanja

Razvoj tehnologije poluvodiča omogućio je razvoj izvora napajanja realiziranih kao prekidački izvori napajanja. Prekidački izvori napajanja⁴ zahtijevaju analizu sklopa kroz dva stanja, u ovisnosti o stanju prekidačke sklopke . Prednosti koje su se pojavile ovom tehnologijom su male dimenzije, visoka efikasnost i manje cijena. Upravljanje prekidačkih regulatora napajanja zasnovano je na generiranju impulsa za tranzistore i to se ostvaruje pulsno-širinskom modulacijom (eng. PWM). Realizacija transformatora najviše opisuje flyback konverter tako da će u nastavku biti objašnjena njegova osnovna ideja. Shema flyback konvertera je prikazana na

⁴ SMPS – Switching- mode power supply

slici 11 gdje sklopke ispod transformatora zapravo predstavljaju mjesto gdje je u konačnici dovedena potrebna elektronika zadužena za upravljanje radom transformatora. Za implemetaciju su korišteni unipolarni tranzistori. PWM signal na ulazu u tranzistor kontrolira stanje sklopa možemo razlikovati 2 stanja: stanje vođenja tranzistora, te stanje kada tranzistor ne vodi. Kada je PWM signal u visokoj razini (na razini napona napajanja) tranzistor je zatvorena sklopka te struja kroz primarni namot raste te se u transformator sprema energija. Inducirani napon na sekundaru je uslijed suprotno orijentiranih zavojnica suprotan primarnom te je dioda reverzno polarizirana. Trošilo se tada napaja iz kondenzatora spojenog nakon diode paralelno istom. Nakon prebacivanja sklopke se struja kroz primar prekida, energija se prenosi preko međuinuktiviteta na sekundaru stranu, odnosno, inducira se napon suprotan početnom stanju, dioda provede struju koja nabija kondenzator te napaja trošilo u sljedećem koraku, odnosno, sve dok je tranzistor ugašen.



Slika 11. Shema flyback converter

$$u_0 = L \frac{di_1}{dt} \quad (5)$$

$$L \frac{di_2}{dt} + u_C = 0 \quad (6)$$

$$\frac{1}{L} \int_0^{D \times T} u_0 dt = i_1 \quad \Rightarrow \quad i_1 = \frac{DT}{L} u_0 \quad (7)$$

$$\frac{1}{L} \int_0^{(1-D) \times T} u_C dt = i_2 \quad \Rightarrow \quad i_2 = -\frac{(1-D)T}{L} u_C \quad (8)$$

Uvodimo nove oznake gdje struja i_5 označava struju primara kada signal ima najveću vrijednost (5 V) dok struja i_0 označava kada signal ima najnižu vrijednost (0 V). Zahtjev koji je bio postavljen da je $N_1=1$ i da je $N_2=2$, uz nove oznake $i_1 = i_5$ te $i_2=i_0$, gdje oznaka D u jednadžbama predstavlja radni ciklus (eng. Duty cycle) odnosno omjer između trajanja impulsa τ i perioda pravokutnog signala T .

$$i_5 = \frac{DT}{L} u_0 \quad te \quad i_0 = -N_2 \frac{(1-D)T}{L} u_C \quad (9)$$

$$i_5 + i_0 = 0 \quad (10)$$

u konačnici se dobiva

$$u_C = u_0 \frac{D}{N_2 \times (1-D)} \quad (11)$$

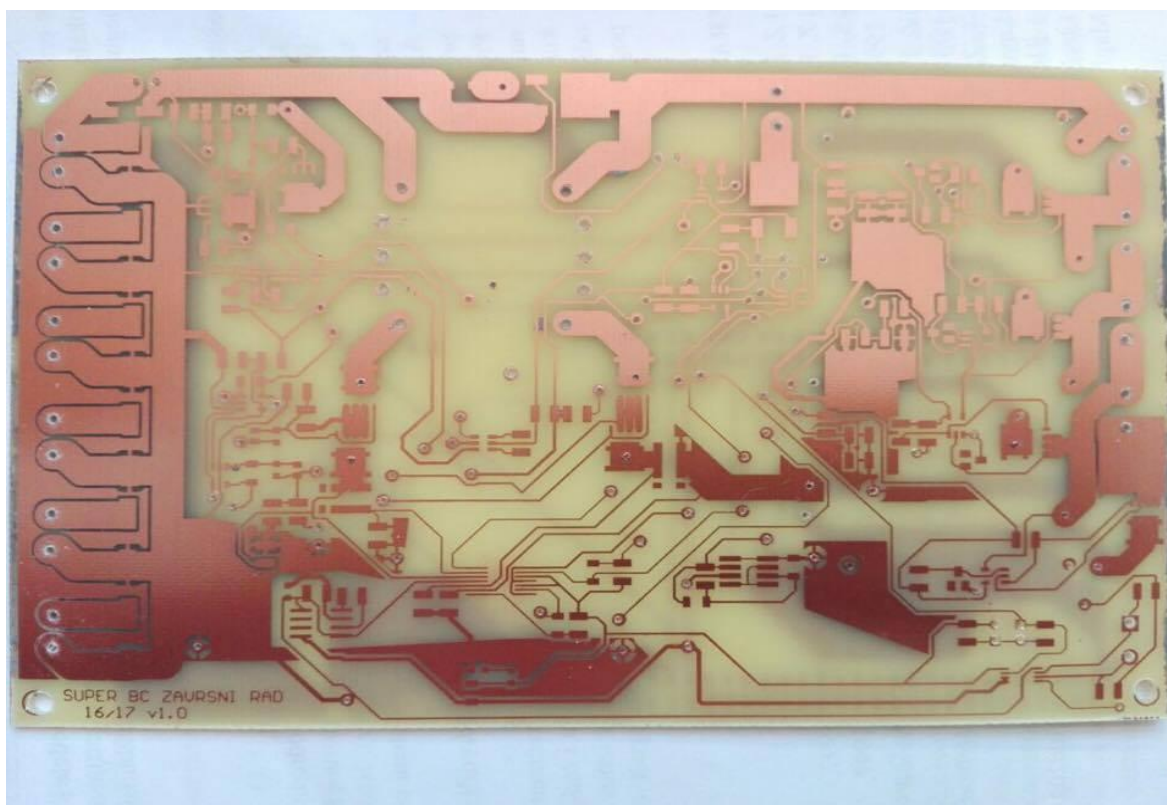
6. Rad u Altium Designeru

U procesu dizajniranja elektroničkog uređaja inženjer koristi različite razvojne alate čija je svrha olakšati i ubrzati svaku od razvojnih faza. Integriranje pojedinačnih razvojnih alata u jedinstveno razvojno okruženje za rezultat ima automatiziranje pojedinih radnji koje se obavljaju tijekom procesa projektiranja. Integrirano razvojno okruženje pruža niz prednosti nad skupom pojedinačnih razvojnih alata prije svega u pogledu vremena potrebnog za obavljanje posla. Altium Designer je jedan takav programski paket koji omogućuje korisnicima izradu elektroničkog dizajna za razne tiskane pločice.

Prilikom crtanja električne sheme i dizajniranja vodova tiskane pločice bilo je potrebno pridržavati se mnogo zahtjeva kako bi u konačnici dobili funkcionalan proizvod. Nakon odabira pravila, pristupa se crtanju tiskane pločice tako da se prvo smjeste komponente, a zatim se pristupa povezivanju komponenti s vodovima. Posljednji postupak je provođenje DRC (eng. *Design Rule Check*) provjere koja provjerava jesu li zadovoljena sva pravila koja su zadana i je li sve ispravno povezano s obzirom na električnu shemu. Komponente koje su osjetljive na elektromagnetske smetnje udaljene su od komponenti koje proizvode te iste smetnje. Temperaturno osjetljive komponente (npr. MOSFET-ovi) su smješteni dalje od komponenti koje se zagrijevaju. Sve komponente su odmaknute od ruba pločice te su međusobno razmaknute ovisno o načinu ugradnje na tiskanu pločicu i o tolerancijama njihovih dimenzija. Osigurano je pravilno razvođenje napajanja i mase. Raspon debljine vodova ovisi o struji koja teče tim vodovima. Vodovi kojima teče struja do 10-ak mili ampera su dimenzija 15 mila dok su najdeblji vodovi 170 mila zbog značajno veće struje. Osim vodova koji vode signal na tiskanoj pločici postoje i prospojne rupe (eng. *Vias*) koje povezuju tiskane vodove između 2 različita sloja. Dvoslojne tiskane pločice omogućuju zalijevanje u masu obje strane tiskane pločice, što povećava visokofrekvencijske karakteristike sklopa, kao i općenito bolje razvođenje mase.

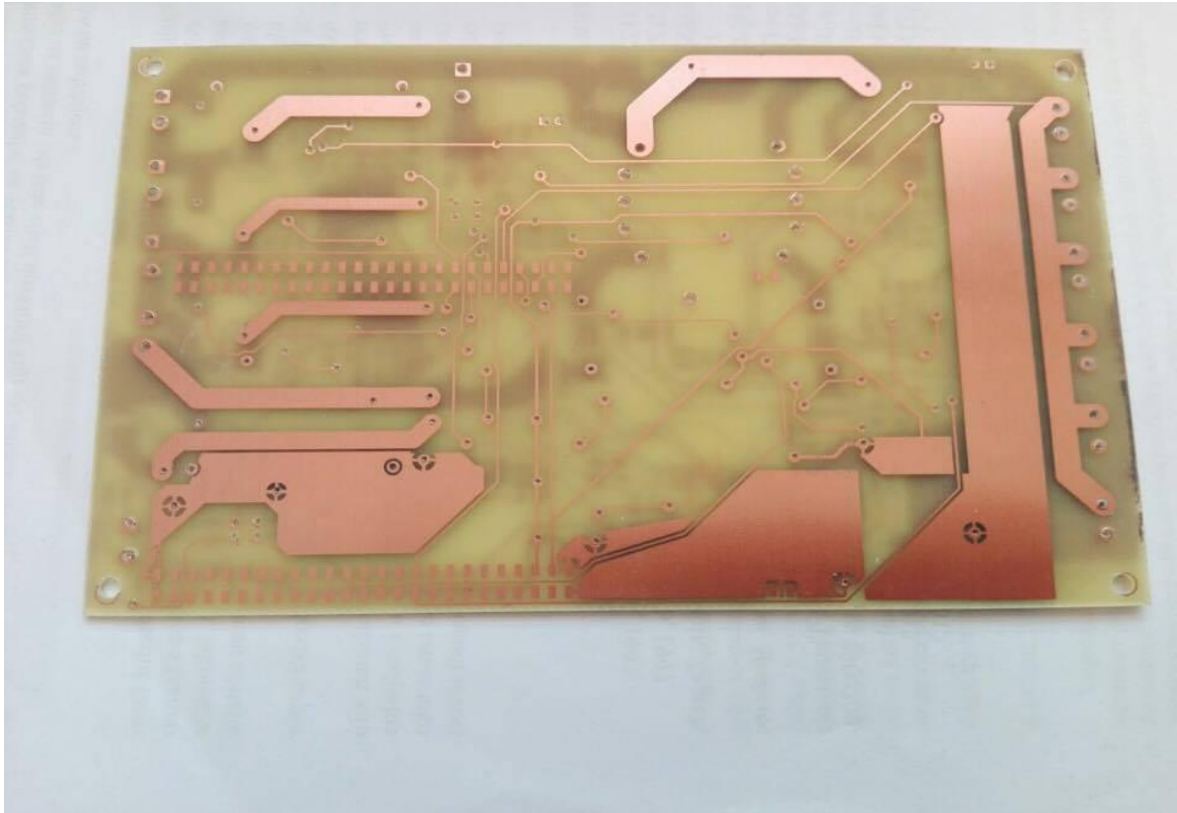
6.1. Izrada pločice

Proces izrade pločice ubrzalo je to što smo krenuli od kupljene štampane pločice od vitroplasta⁵ s već nanesenim fotoslojem, debljine 1.5 mm i površine 160*100 mm stoga pločicu nije trebalo izrezivati/čistiti niti nanositi fotoosjetljivi lak. Prvi korak je bio ispisivanje pozitiva filma nacрта tiskanih veza na prozirnu foliju pomoću laserskog pisača. Nakon pažljivog namještanja filma na pločicu slijedilo je osvjetljavanje UV zrakama- svaku stranu pločice oko 3 minute. Zatim se pločica razvijala u 7% vodenoj otopini natrijeve lužine. Nakon razvijanja i ispiranja pločice, bakreni sloj pločice prekriven je fotoosjetljivim lakom samo na vodljivim likovima odnosno gdje su vodovi tiskanih veza. Uslijedilo je jetkanje pločice u otopini željeznog klorida koja nagriza bakar koji nije prekriven fotoosjetljivim lakom. Nakon ispiranja vodom i bušenja rupa odgovarajućim promjerom svrdla dobio se proizvod kao na Slika 12 i Slika 13.



Slika 12. Komponentna (Top) strana

⁵ Vitroplast je bakreni laminat za izradu tiskanih pločica koji se sastoji od epoksilne smole, staklenih vlakana i bakrene folije



Slika 13. Lemna (Bottom) strana

6.2. Sastavnica

Tablični opis svih komponenti određenog uređaja naziva se sastavnica. Na temelju podataka sastavnice nabavljaju se potrebne komponente. Najčešće sadrži oznake i opis komponente, količinu. Priložena izgenerirana sastavnica sadrži oznaku i opis komponente, kataloški broj dobavljača, kućište, količinu, cijena.

Redni broj	Designator	kataloški broj	opis komponente	cijena (funte)	Footprint	Quantity	manufacturer
1	D4	1330678	chip	3.50 f	F za stabilizator	2	LINEAR TECHNOLOGY
2	W1, W2, W3, W4, W5, W6	2396303	jumper	0.0874	HDR1X2	10	HARVIN
3	K10, K11	2510412	komparator	0.239	SOT-23	5	MICROCHIP
4	R55	2678665	resistor 4 ohm, 25 W	5.44 f	spajamo ga od vani	1	ARCHOL/OMITE
5	R9	2307691	resistor 4.12k	0.0316	C1206	10	PANASONIC ELECTRONIC COMPONENTS
6	R7	1100252	resistor 200 k	0.0185	C1206	10	WELWYN
7	C5	2466729	cap 0.01 uF	0.176	C1210_L		WURTH ELEKTRONIK
8	V11, V9, V7, V8, V19, V24, V25, V8, V7	1773531	diode	0.237	DIODE-SMALLSIGNAL	12	DIODES INC.
9	P1, P2	1932146	header	6.61 f	Header SMD 25x2 pin	2	SAMTEC
10	R63, R64, R65, R66	2502771	resisoR 10K	0.304	C1210_L	10	WALSIN
11	R50	2057769	resistor 3.74 kohm	0.0317	C1206	10	PANASONIC ELECTRONIC COMPONENTS
12	R20, R21	1501812	resistor 90.9 kohm	1.45 F	1206	3	HOLSWORTHY - TE CONNECTIVITY
13	R60, R54, R53	1100209	Resistor 4k7	0.0274	1206	5	WELWYN
14	R5, R6	1160198	RESisto 9.09kOhma	0.561	805	4	WELWYN
15	C2, C12	9527826	CAP 1uF	0.198	1210	2	MURATA

16	C1, C6, C8, C9, C10, C11, C14, C16, C17, C21, C22	1828960	Capacitor	0.241	C1210_L	18	MURATA
17	C3	9527826	Capacitor	0.173	C1210_L	2	MURATA
18	C4	1735535	Capacitor	0.337	C1206	5	MURATA
19	C5	1855914	Capacitor	0.307	C1210_L	5	MULTICOMP
20	C7, C18	2320934	Ceramic Capacitor	0.275	C1210_L	4	MULTICOMP
21	C12	9527826	Capacitor	0.173	C1210_L	3	MURATA
22	C13	2320943	Capacitor	0.389	C1210_L	3	MULTICOMP
23	C101, C102, C103, C104, C105, C106	1539457	Electrolytic Capacitor	0.526	SMD_CAP_RAD_8X10.2	6	PANASONIC ELECTRONIC COMPONENTS
24	D1	1755282	inverter	1.32	inverter	2	TEXAS INSTRUMENTS
25	D2	2496201	pojačalo	2.95	F za pojačalo(2)	2	TEXAS INSTRUMENTS
26	D3	1459472	INA331	2.63	F za pojačalo (1)	2	TEXAS INSTRUMENTS
27	D4	2102608	Boost Step Up Regulator	4.11	TSOT-23	2	LINEAR TECHNOLOGY
28	K1, K2, K3, K4, K5	2510412	Analogue Comparator	0.239	SOT-23	5	MICROCHIP
29	K6, K7	2510412	Analogue Comparator	0.239	SOT-23	4	MICROCHIP
30	L1	2429403	zavojnica	0.182	C1210_L	5	TDK
31	N1, N2, N3, N4	9778322	chip za ref napon	0.567	SOT23_L	6	TEXAS INSTRUMENTS
32	R1, R12, R13, R19, R22, R38, R39, R40	2502771	resistor	0.304	C1210_L	10	WALSIN
33	R2, R10, R37	2380713	resistor	0.249	C1210_L	10	PANASONIC ELECTRONIC COMPONENTS
34	R3	1100070	Resistor	0.60	C2512	10	WELWYN
35	R4, R14	2447484	resistor	0.009	C1206	10	MULTICOMP
36	R5, R23	2078988	resistor	0.0362	C1206	10	WELWYN
37	R6	2670415	resistor	0.0352	C1206	10	WALSIN
38	R7	2327145	resistor	0.171	C1206	10	PANASONIC ELECTRONIC COMPONENTS

39	R8, R16	2363991	Resistor	2.49	C2512	4	OHMITE
40	R11	2327218	resistor	0.171	C1206	10	PANASONIC ELECTRONIC COMPONENTS
41	R15, R17				C1210_L	10	
42	R18	2057752	resistor	0.0259	C1206	10	PANASONIC ELECTRONIC COMPONENTS
43	R20, R21	2327087	resistor	0.162	C1206	10	PANASONIC ELECTRONIC COMPONENTS
44	R24	2324037	resistor	0.0949	C1210_L	10	PANASONIC ELECTRONIC COMPONENTS
45	R25, R26, R27, R28	2476355	resistor	0.411	C2512	10	CGS - TE CONNECTIVITY
46	R33, R34	1894354	resistor	0.26	C1210_L	10	PANASONIC ELECTRONIC COMPONENTS
47	R41, R43, R44, R45, R46, R47, R48, R49	2324006	resistor	0.0952	C1210_L	10	PANASONIC ELECTRONIC COMPONENTS
48	R50		resistor		C1210_L	1	
49	T1		transformator		F za transformator	1	
50	V1, V2, V3, V4, V5, V6, V14, V15, V16, V17		MOSFET Transistor		SO-8L single	10	
51	V7, V8, V9, V11	2533388	Diode	0.0908	F za diodu	10	ON SEMICONDUCTOR
52	V10, V13	1794799	n-mosfet	0.585	TO-252-3	4	VISHAY
53	V12	1858631	Zener Single Diode	0.196	SOD123	3	DIODES INC
54	V18	9556923	Schottky Rectifier	0.216	SOD123	3	ON SEMICONDUCTOR
55	V19, V20, V21	1757848	zener dioda	0.167	SOT-23_L	6	NEXPERIA
56	X1, X2, X3, X4, X10, X11, X12, X13, X14, X15, X16, X17	2396251	Header, 2-Pin	0.239	F Header 1x2	20	MULTICOMP
57	X7, X8, X18	2112483	Header, 5-Pin	2.51	HDR1X5	4	BUCHANAN - TE CONNECTIVITY
58	X9	3041359	Header, 2-Pin	0.472	HDR1X2	2	PHOENIX CONTACT

Tablica 1. Informacije potrebne za narudžbu komponenti

7. Integrirane elektroničke komponente

inverter TL7660	TL7660 je CMOS naponski inverter koji izvodi pretvorbu napona iz pozitivnog u negativni napon. Uz još dva vanjska kondenzatora ulazni napon u rasponu od 1,5 V do 10 V pretvara u komplementarni negativni izlazni napon od -1,5 V do -10 V. U shemi se invertirani napon dovodi na pinove pojačala.
pojačalo INA2331AIPWT INA331IDGKT	INA331 i INA2331 su CMOS instrumentacijska pojačala koja svojim unutarnjim dizajnom mogu omogućiti veće vrijednosti izlaznog napona odabirom odgovarajućih iznosa vanjskih otpornika.
Podizač napona LT1635	Potrebni 9.9 V u električnoj shemi dobiveno je pomoću podizača napona LT1635 namještanjem otpornika R1 i R2 po formuli $V_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) * V_{ref}$. Odabrani otpornici moraju imati što manja odstupanja od nazivne vrijednosti kako bi se što preciznije dobila željena vrijednost od 9.9 V.
izvor referentnog napona	Precizni izvor referentnog napona dostupan je u sitnom kućištu. Napredni dizajn LM4040-N uklanja potrebu za vanjskim stabilizatorskim kondenzatorom. Također osigurava stabilnost s bilo kojim kapacitivnim opterećenjem čineći ovaj referentni chip jednostavnim za korištenje. U shemi je korišten za dobivanje referentnog napona iznosa 2.5 V.
analogni komparator	Komparator se može napajati od 2 do 36 V. Njegova niska potrošnja struje je neovisna o iznosu napona napajanja.
DC-DC Switching Buck, Boost Regulator	Stabilizator se koristi kako bi se promjenjiv napon baterija stabilizirao na konstantan iznos napona od 3 V za napajanje mikrokontrolera.

Tablica 2. Kratki opis integriranih elektroničkih komponenti

8. STM32F4 DISCOVERY

STM32F4 Discovery je razvojna pločica dimenzija 66*97 mm. Omogućuje korisnicima da lako razvijaju aplikacije sa STM32F4 visokoučinkovitim mikrokontrolerom s ARM Cortex-M4 32-bitnim jezgrom. Uključuje sve što je potrebno za početnike ili za iskusne korisnike za brzi i učinkovit rad. Na pločicu se dovodi napon iz stabilizatora s projektirane prototipne pločice u iznosu od 3.3 V (pločica se napaja u rasponu između 1.8 i 3.6 V).



Slika 14. Fizički prikaz pločice STM32F4

Glavne značajke:

- STM32F407VGT mikrokontroler s 32-bitnim ARM Cortex-M4 s FPU jezgrom, 1-MB Flash memorija, 192 KB RAM-a u LQFP100 paketu
- napajanje pločice: preko USB sabirnice ili preko vanjskog izvora napajanja: 3V i 5V
- dva ST-MEMS digitalna akcelerometra, digitalni mikrofoni, jedan audio DAC
- Integrirani upravljački zvučnik razreda D, 8 LED dioda, gumbi i

- USB OTG s mikro-AB priključak
- 2 tipke (reset i korisnička)

Generiranje C koda i implementacija na STM32F4 mikrokontroleru je u potpunosti automatizirana. Kod je generiran i prilagođen za jednog od tri moguća programska alata za programiranje ugradbenih sustava (Atollic, IAR i Keil).

Pulsno širinska modulacija⁶ način je dobivanja analognih rezultata iz digitalnih signala. Digitalni signal postavi se na neku fiksnu frekvenciju i mijenja se omjer aktivnog odnosno neaktivnog dijela signala. Tako se mogu simulirati naponi između punih (5 V) i isključenih (0 V) – izlaz se jednostavno uključuje i isključuje pri odabranoj fiksnoj frekvenciji. Da bi se dobile različite analogne vrijednosti, potrebno je modulirati širinu pulsa. Širina pulsa naziva se dio vremena kad je signal uključen. Korištena su 3 PWM signala:

PWM1- nadzor nad sklopkama kod podizača napona

PWM2- ako napon na seriji svih superkondenzatora premaši dozvoljeni iznos od 9.9 V PWM služi za uključenje sklopke

PWM3- upravljanje sklopki ispod transformatora.

Analogno digitalni pretvornik služi za pretvorbu analognih signala u digitalne signale. Ima 19 multipleksiranih kanala koji omogućuju mjerenje signala s 2 interna izvora, 16 različitih vanjskih izvora i napon U_{BAT} . Rezultat pretvorbe ADC-a je spremljen, lijevo ili desno poravnat, u 16-bitni podatkovni registar. ADC u sklopu služi za mjerenje napona na odabranim otpornicima kao i za regulaciju napona na seriji superkondenzatora.

⁶ eng. Pulse Width Modulation- PWM

9. Zaključak

Jedan od izazov današnjih inženjera je poboljšanje sustava za napajanje i produženje životnog vijeka uređaja s kojima svakodnevno punimo računala, mobitele i ostale mnogobrojne elektroničke uređaje. Iako su baterije najčešći oblik pohrane energije njihov nedostatak je što ne mogu u kratkom vremenu isporučiti velike količine energije. Zato je u ovom završnom radu ideja bila izraditi sustav za skladištenje energije koji uključuje baterije i superkondenzatore gdje baterije osiguravaju potrebnu količinu energije trošilu, no kad je potrebna veća energija u kraćem vremenu te se baterije kombiniraju sa superkondenzatorima koji mogu predati odnosno preuzeti veće količine energije u kratkom vremenu. U okviru završnog rada korištenjem programskog okruženja Altium Designer ideja je prenesena u električnu shemu. Automobilaska industrija danas razvija hibridna vozila predstavljajući ih kao prijevozna sredstva budućnosti. Kao konačni proizvod hibridni superkondenzatorsko-baterijski spremnik energije koristio bi se u vozilima u kojima bi baterije osiguravale potrebnu količinu energije, a pri potrebi za većom snagom npr. pri pretjecanju vozila superkondenzatori bi u kombinaciji s baterijama osiguravali potrebnu energiju. Zamišljeno je punjenje baterija i superkondenzatora regenerativnim kočenjem npr. pri spuštanju nizbrdicama.

Antonija Marinović

10. Literatura

[1] Elektromagnetska polja –skripta, FER

[2] datasheet za STM32F4 Discovery razvojnu pločicu

<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/ef/92/76/6d/bb/c2/4f/f7/DM00037051.pdf/files/DM00037051.pdf/jcr:content/translations/en.DM00037051.pdf>, 2016.

[3] “How to Prolong Lithium-based Batteries” članak s Interneta,

http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_prolong_lithium_based_batteries, 2017.

[4] Radin J. i Zdenković J : “Litij-ionske baterije” članak s Interneta,

<https://www.schrack.hr/alternativni-izvori/photovoltaik/litij-ionske-baterije/>,

[5] Marin S. Halper, James C. Ellenbogen :” Supercapacitors: A Brief Overview”,

http://www.tuks.nl/pdf/Reference_Material/Electrolytic_Caps_and_Super_Caps/Halper%20and%20Ellenbogen%20-%20Supercapacitors:%20A%20Brief%20Overview.pdf, March 2006.

[6] VUČIĆ, M: Upotreba mikrokontrolera u ugradbenim računalnim sustavima, Zagreb, 2007.

[7] “Tutorial - Getting Started with PCB Design”,

<https://techdocs.altium.com/display/ADOH/Tutorial+-+Getting+Started+with+PCB+Design>, 2017.

[8] “Flyback Converters”, članak s Interneta

<http://www.dos4ever.com/flyback/flyback.html#introduction>, 2017.

11. Naslov, sažetak i ključne riječi

Naslov

Baterijama potpomognut superkondenzatorski spremnik

Sažetak

U ovom radu osmišljen je i projektiran elektronički pretvornik koji povezuje baterije i superkondenzatore. Zbog niskih dozvoljenih vrijednosti napona na superkondenzatorima bilo je potrebno ostvariti sustav za ujednačavanje napona kao i sustav za nadzor naponskih razina na superkondenzatorima te nadzor nedozvoljenih stanja. Crtanje električne sheme i projektiranje tiskane pločice se radilo u programskom okruženju Altium Designer. Naposljetku je u Altiumu izgenerirana sastavnica za narudžbu komponenti. U programskom okruženju MATLAB provedene su simulacije elektroničke sheme. Pomoću razvojne pločice STM32F4 Discovery putem AD pretvorbe omogućeno je mjerenje željenih napona. Nakon projektiranja tiskane pločice uslijedilo je tiskanje pločice fotopostupkom u laboratoriju na zavodu te lemljenje. Bilo je potrebno detaljno ispitati realizirani sustav kao i analizirati sve moguće režime rada sustava koji su opisani u tekstu.

Ključne riječi

superkondenzatori, litij-ionske baterije, regulacija napona, spremnik energije, STM32F4

Title

Battery Supported Ultracapacitor Storage

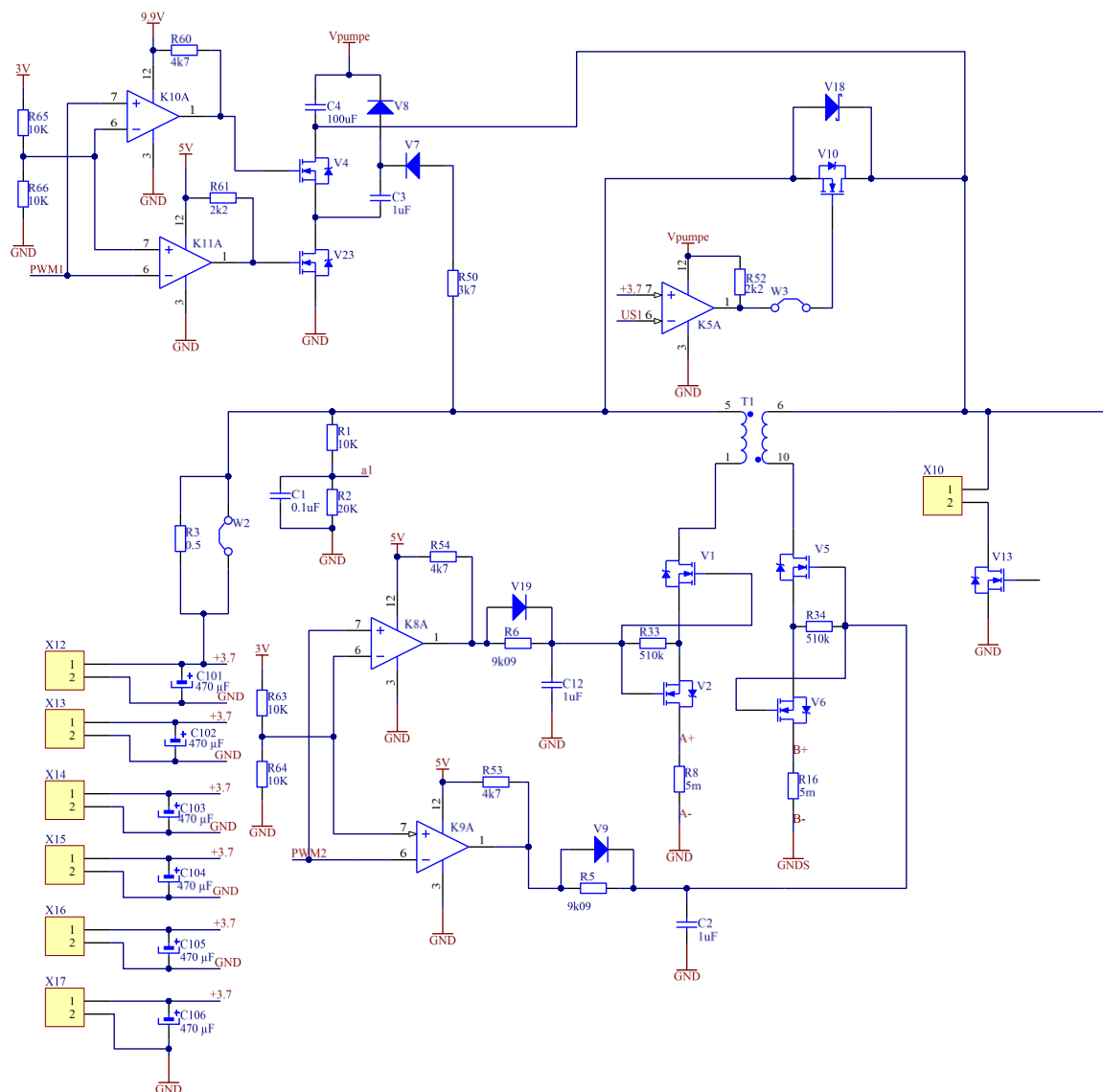
Summary

An electronic converter that connects lithium-ion batteries and supercapacitors has been designed in this project. Due to the low allowed voltage values at supercapacitors it was necessary to build a voltage equalization system as well as a voltage monitoring system for supercapacitors and supervision of unauthorized states. Drawing of the electrical scheme and design of the printed circuit board was made in the Altium Designer programming environment. Finally Bill of materials was exported as a list of information for ordering components.. Measurement of desired voltages was enabled through AD conversion on STM32F4 Discovery. After designing of the printed circuit board a PCB was made with the photo-positive-method in the laboratory and soldering of components. It was necessary to examine realized system as well as to analyze all possible system operation regimens described in the text.

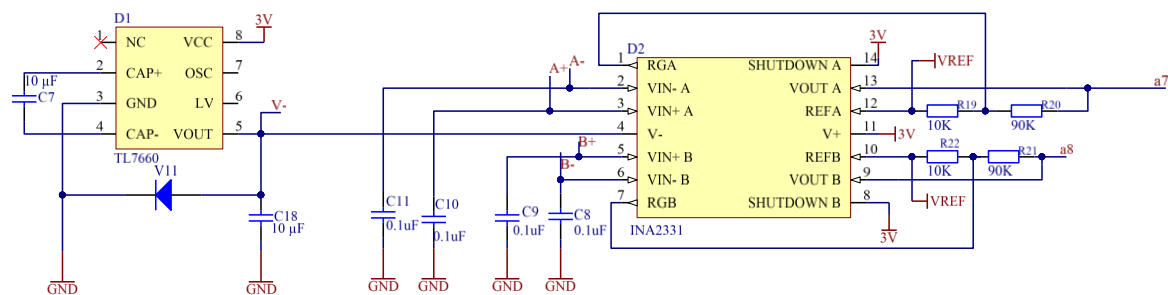
Key words

Supercapacitors, Lithium-ion batteries, voltage regulation, energy storage, STM32F4

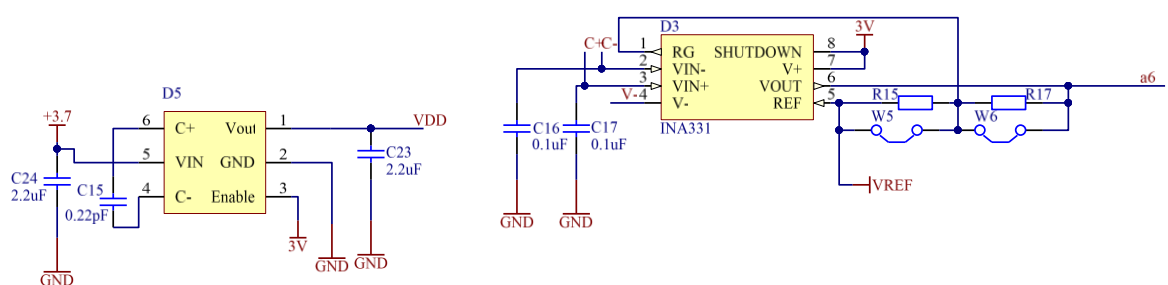
12. Privitak



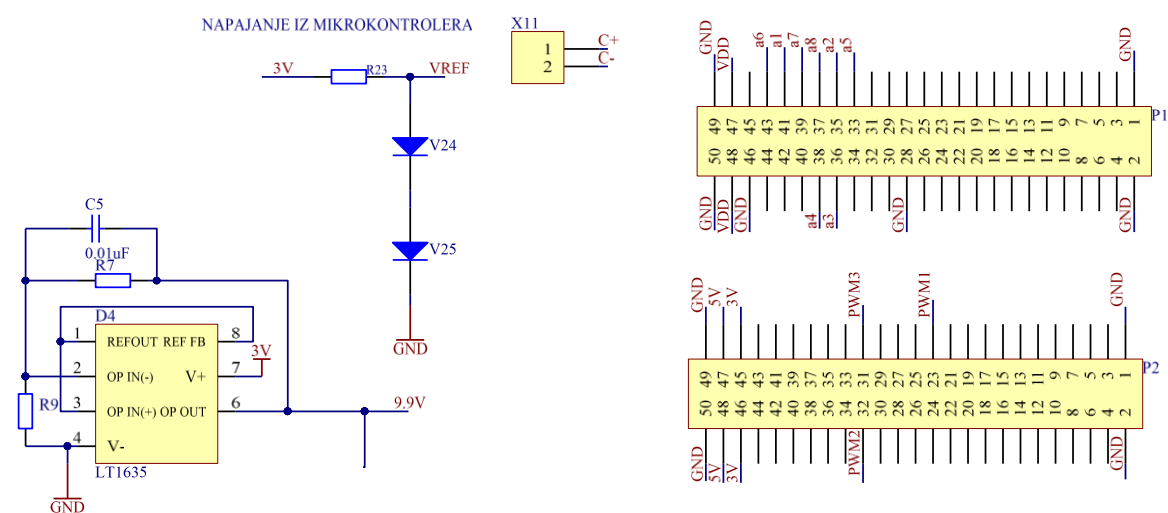
Slika 15. Dio električne sheme koji se odnosi na baterije i reguliranje njihovog punjenja/praznjenja



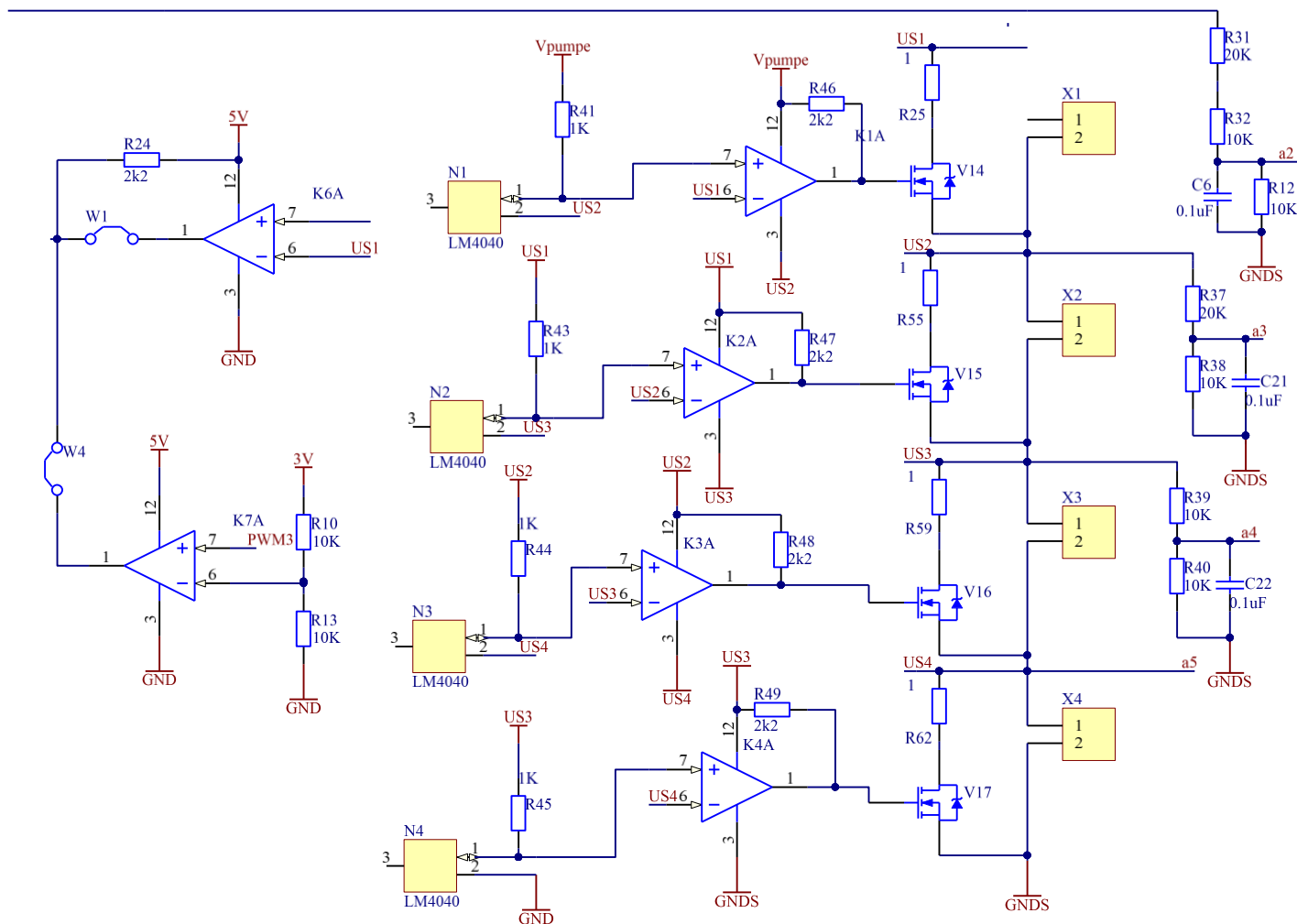
Slika 16. Inverter TL7660 i pojačalo INA2331



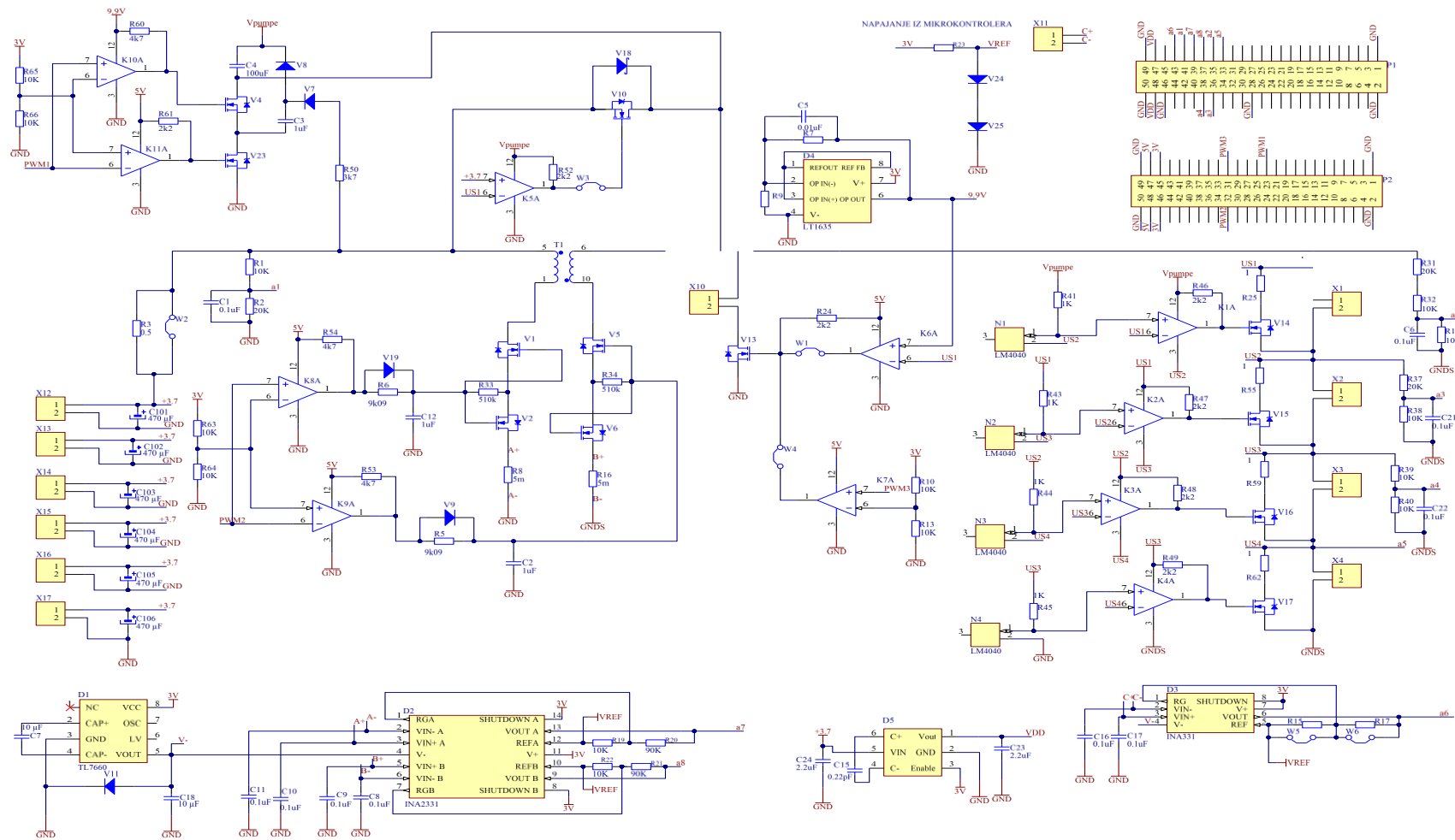
Slika 17. Regulator i pojačalo INA331



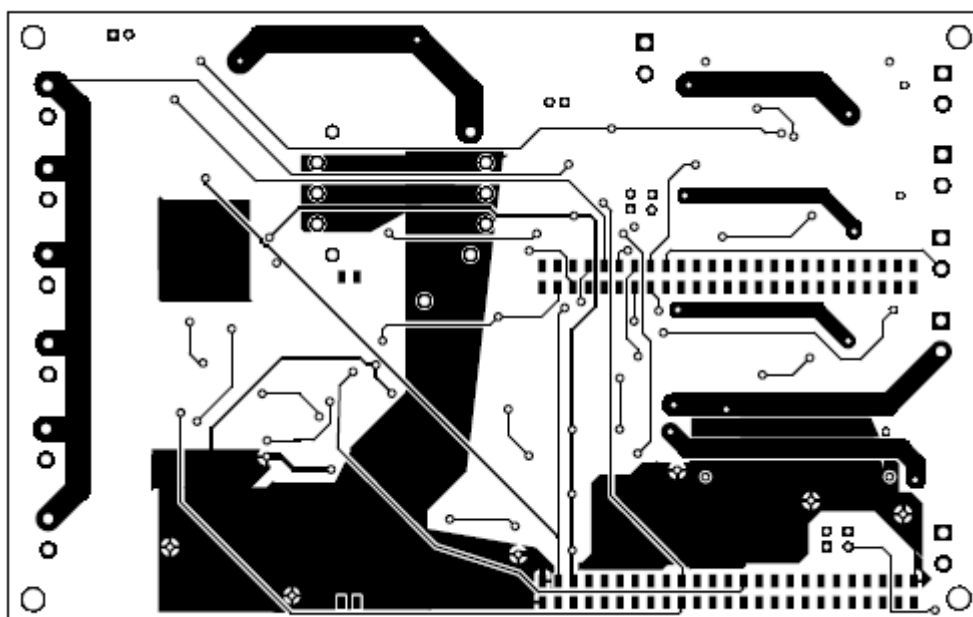
Slika 18. Pojačalo LT1635 i 2 površinska konektora za priključak STM32F4 Discovery



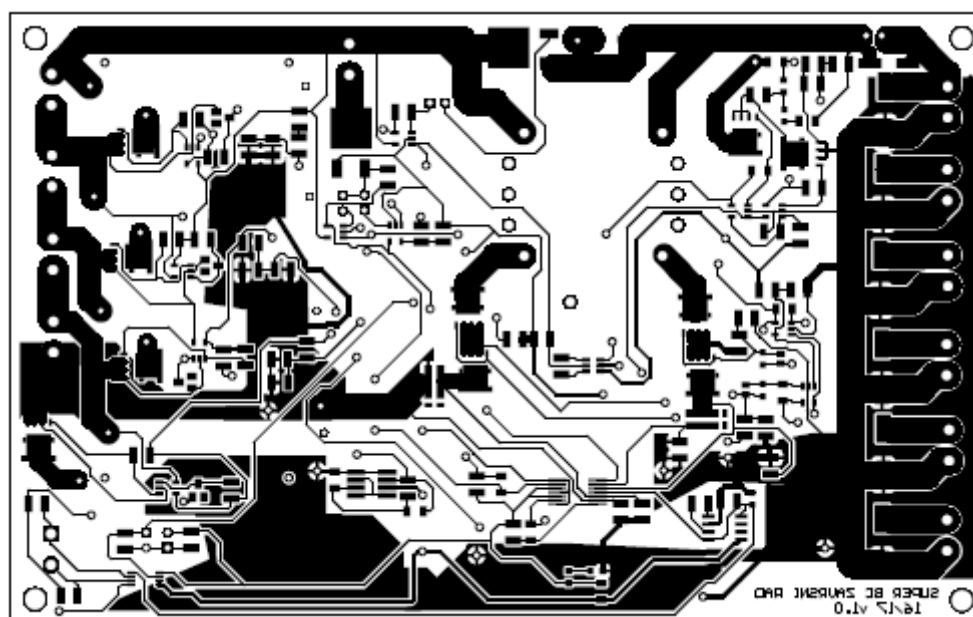
Slika 19. Dio električne sheme koji prikazuje regulaciju napona na superkondenzatorima



Slika 20. Cijela električna shema kopirana iz alata Altium Designer



Slika 21. Lemna (Bottom) strana koja je printana na odgovarajućoj prozirnoj foliji



Slika 22. Komponentna (Top) strana koja je printana na odgovarajućoj prozirnoj foliji