

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 1234

**NOSIVI MJERNI SUSTAV ZA PREPOZNAVANJE
I KLASIFIKACIJU POREMEĆAJA TEČNOSTI
GOVORA**

Nikola Gudan

Zagreb, lipanj, 2024.

Student: Nikola Gudan

Naslov teme:

Nosivi mjerni sustav za prepoznavanje i klasifikaciju poremećaja tečnosti govora

Naslov teme (engleski):

Wearable measurement system for detection and classification of speech fluency disorders

Mentor:

Prof. dr. sc. Hrvoje Džapo

Profil:

Elektroničko i računalno inženjerstvo

Kratki opis:

Upoznati se s metodama određivanja poremećaja tečnosti govora u logopedskoj dijagnostici i terapiji. Istražiti postojeće sustave koji se koriste u dijagnozi i analizi poremećaja tečnosti govora. Proučiti karakteristike mikrofona prikladnih za snimanje govora u dijagnozi i analizi poremećaja tečnosti govora. Istražiti mogućnosti praćenja razine stresa ispitanika mjeranjem bioloških signala (EKG, psihogalvanski refleks, bioimpedancija kože, fotopletizmografija itd.) i odabrati veličine koje se mijere prikladne za integraciju u nosivi mjerni sustav. Razviti sklopovsko rješenje nosivog baterijski napajanog uređaja prikladnog za nošenje u svakodnevnim situacijama koje treba omogućiti: dugotrajno snimanje govora visokom kvalitetom pomoći odabranog mikrofona, prikupljanje odabralih bioloških signala u svrhu praćenja razine stresa ispitanika i pohranu podataka. Odabrati prikladni mikrokontroler koji će omogućiti snimanje i pohranu mjerjenja te će imati dovoljne resurse za izvođenje modela strojnog učenja prilagođenih ugradbenim računalnim sustavima s ograničenim resursima. Integrirati funkcionalnost punjenja baterija, programiranja mikrokontrolera i bežične komunikacije u svrhu spajanja s pametnim telefonom (WiFi, Bluetooth). Izraditi i ispitati sklopovski prototip rješenja.

Zahvaljujem se svom kolegi i bliskom prijatelju Petru Sušcu na pronalasku interesantne teme diplomskog rada i pružanoj podršci tijekom izrade.

Sadržaj

1. Uvod	3
2. Građa uređaja	5
3. Središnji uređaj	7
3.1. Mikrokontroler	7
3.1.1. Pierceov oscilator	9
3.1.2. Dizajn oscilatora	10
3.2. Sat realnog vremena (RTC)	11
3.3. Bežična komunikacija	12
3.4. SD kartica i konektori	12
3.5. Napajanje	14
3.5.1. Proračun potrošnje	14
3.5.2. Baterija i punjač baterije	15
3.5.3. Baterijska zaštita	19
3.6. USB napajanje	21
3.7. PCB	24
4. Narukvica	27
4.1. Bežična komunikacija	27
4.2. Fotopletizmografski senzor	29
4.3. Impedancija kože	30
4.4. Napajanje	31
4.4.1. Proračun potrošnje	31
4.4.2. Napajanja od 3.3 V i 1.8 V	32
4.4.3. Referentni napon	32

4.4.4. Napajanje od 5 V	33
4.5. Baterija i punjač baterije	34
4.5.1. Punjač baterije	34
4.5.2. Baterijska zaštita	35
4.6. USB napajanje	37
4.7. PCB	38
5. Ispitivanje	40
5.1. Središnji uređaj	41
5.2. Narukvica	42
6. Zaključak	46
Literatura	48
Sažetak	50
Abstract	51

1. Uvod

Zamuckivanje i mucanje se odnosi na poremećaje u ritmu govora u kojima pojedinac zna točno što želi reći, ali tijekom govora ne može pričati radi nehotičnog ponavljačeg produljenja ili prestanka zvuka [1]. Na mucanje utječe tjeskoba osobe s poremećajem, a povezanost tjeskobe i poremećaja uvjetovane su s vremenom i izloženosti osobe poremećaju.

Mucanje se može kontrolirati logopedskom terapijom. Procjena intenziteta mucanja provodi se tijekom i nakon terapije kako bi se utvrdila učinkovitost terapije. Intenzitet se procjenjuje brojanjem netočnih slogova na uzorku od nekoliko stotina izgovorenih slogova prilikom razgovora između logopeda i pacijenta. Kako ne bi došlo do smetnji u razgovoru između logopeda i pacijenta, razgovor se snima te logoped procjenjuje intenzitet mucanja nakon terapije slušajući snimku jer je teško brojati slogove u stvarnom vremenu. Međutim, na pacijentovu sposobnost govora utječe stres, koji je manje izražen u kontroliranim uvjetima terapije, a više u kaotičnom svijetu van terapije. Radi toga, intenzitet mucanja pokazuje veliku varijabilnost [2].

Svrha ovog rada je razviti prototip uređaja koji osoba s poremećajem može, bez većih smetnji, nositi van terapije koji mjeri utjecaj stresa na osobu i snima govor osobe. Uređaj obrađuje prikupljene podatke i mjeri intenzitet mucanja s obzirom na razinu stresa korisnika.

Sustav prikuplja zvukovne podatke i fiziološke signale na temelju kojih se određuje intenzitet mucanja i razina stresa. Fiziološki signali prikupljaju se radi određivanja razine stresa korisnika i moraju se mjeriti neinvazivnom metodom radi udobnosti korisnika. Obrađeni podaci pohranjuju se lokalno na uređaj kako bi logoped kasnije te podatke mogao preuzeti i analizirati ih. Iako postoje sustavi koji mjere razne biomedicinske

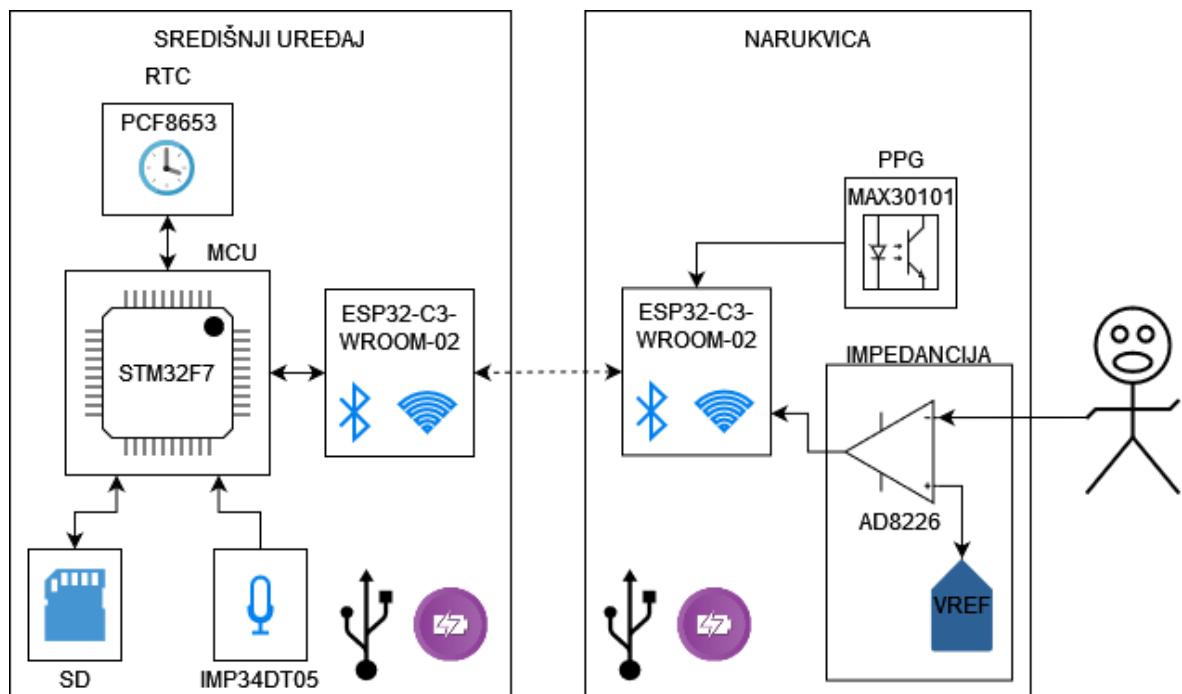
parametre, poput fitnes narukvica i pametnih satova, za sada ne postoji sustav koji objedinjuje mjerjenje fizioloških signala s govornim podacima u svrhu određivanja intenziteta muanja.

Radi zahtjeva na nosivost potrebno je napraviti prikladni sustav napajanja prateći trendove u nosivim uređajima, poput korištenja litij-ionskih baterija, mogućnost brzog punjenja, kompatibilnost s USB-C priključkom i male dimenzije uređaja.

U radu su opisani razlozi za odabir ključnih elektroničkih komponenti, proračun oscilatora, proračun potrošnje energije, metodologija mjerjenja biomedicinskih signala, prikupljanja zvučnih zapisa te postupak projektiranja, izrade i ispitivanja realiziranog uređaja.

2. Građa uređaja

Sustav se sastoji od dva uređaja koji zajedno rade u prikupljanju i obradi podataka. *Središnji uređaj* služi za snimanje, obradu i pohranu glasovnih podataka te obradu i pohranu fizioloških signala. Za snimanje fizioloških signala koristi se vlastito projektirana narukvica. Središnji uređaj i narukvica razmjenjuju podatke i naredbe putem Bluetooth protokola. Prikupljeni podaci se obrađuju s pomoću neuronske mreže koja se izvodi u stvarnom vremenu na mikrokontroleru, kako bi se utvrdio intenzitet mucanja. Blok dijagram sustava prikazan je na slici 2.1.



Slika 2.1. Blok dijagram sustava

Na središnjem uređaju nalazi se mikrokontroler (engl. *Microcontroller Unit*, MCU) za obradu podataka, MEMS mikrofon za snimanje govora korisnika, SD kartica za lokalnu pohranu podataka i integrirani sklop za praćenje vremena (engl. *Real Time Clock*,

RTC) za vremensku sinkronizaciju snimljenih govornih podataka i biomedicinskih podataka. Podaci će se pohranjivati lokalno na uređaj (SD karticu) kako bi logoped mogao kasnije preuzeti podatke te ih analizirati. Pri tome je važno napomenuti ulogu neuronske mreže na mikrokontroleru, koja može razlikovati korektan govor od mucanja te se izlaz iz neuronske mreže pohranjuje umjesto zvuka, kako bi se izbjegli mogući pravni problemi vezani uz privatnost osoba koje se mogu snimiti skupa s ispitanikom. Upravo je navedeni problem privatnosti i glavni razlog zašto se u trenutnoj kliničkim praksi naprsto ne koriste uređaji koji kontinuirano snimaju zvuk u svakodnevnim prilikama u kojima se nalazi ispitanik tijekom praćenja.

Narukvica mjeri brzinu otkucanja srca (engl. *Heart Rate*, HR) putem fotopletizmografskog senzora (engl. *photoplethysmography*, PPG) i impedanciju kože s pomoću instrumentacijskog pojačala. Promjena impedancije kože je dobar pokazatelj stresa kod ispitanika [3], a osobe s poremećajem tečnosti govora pokazuju značajno smanjenje brzine otkucanja srca u stresnim situacijama u odnosu na osobe bez takvih poremećaja [4].

Oba uređaja sadržavaju sustav za bežičnu komunikaciju, baterijsko napajanje i mogućnost punjenja. Zbog dobrih karakteristika i uobičajene primjene u sličnim uređajima, koristi se litij-ionska baterija i mogućnost punjenja putem USB-C sučelja.

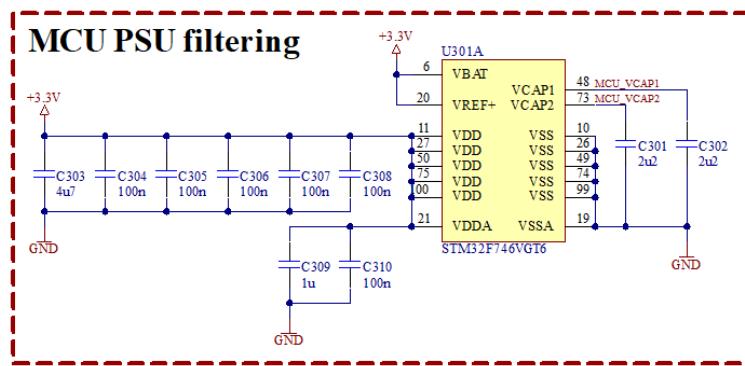
Zbog zahtjeva na nosivost uređaja, tiskane pločice (engl. *Printed Circuit Board*, PCB) imaju ograničenje na dimenzije, ali s obzirom da se radi o prototipu uređaji će sadržavati testne točke i dovoljno velike komponente kako bi eventualna prerada pločice bila lakša. Izrađene pločice su uzimale u obzir kompromise da se ispune ta dva zahtjeva.

Najprije je izrađen središnji sustav kako bi se ispitala mogućnost prikupljanja glasovnih podataka i sustav za napajanje, na temelju čega je u drugom koraku izrađena narukvica da bi se upotpunila tražena funkcionalnost sustava.

3. Središnji uređaj

3.1. Mikrokontroler

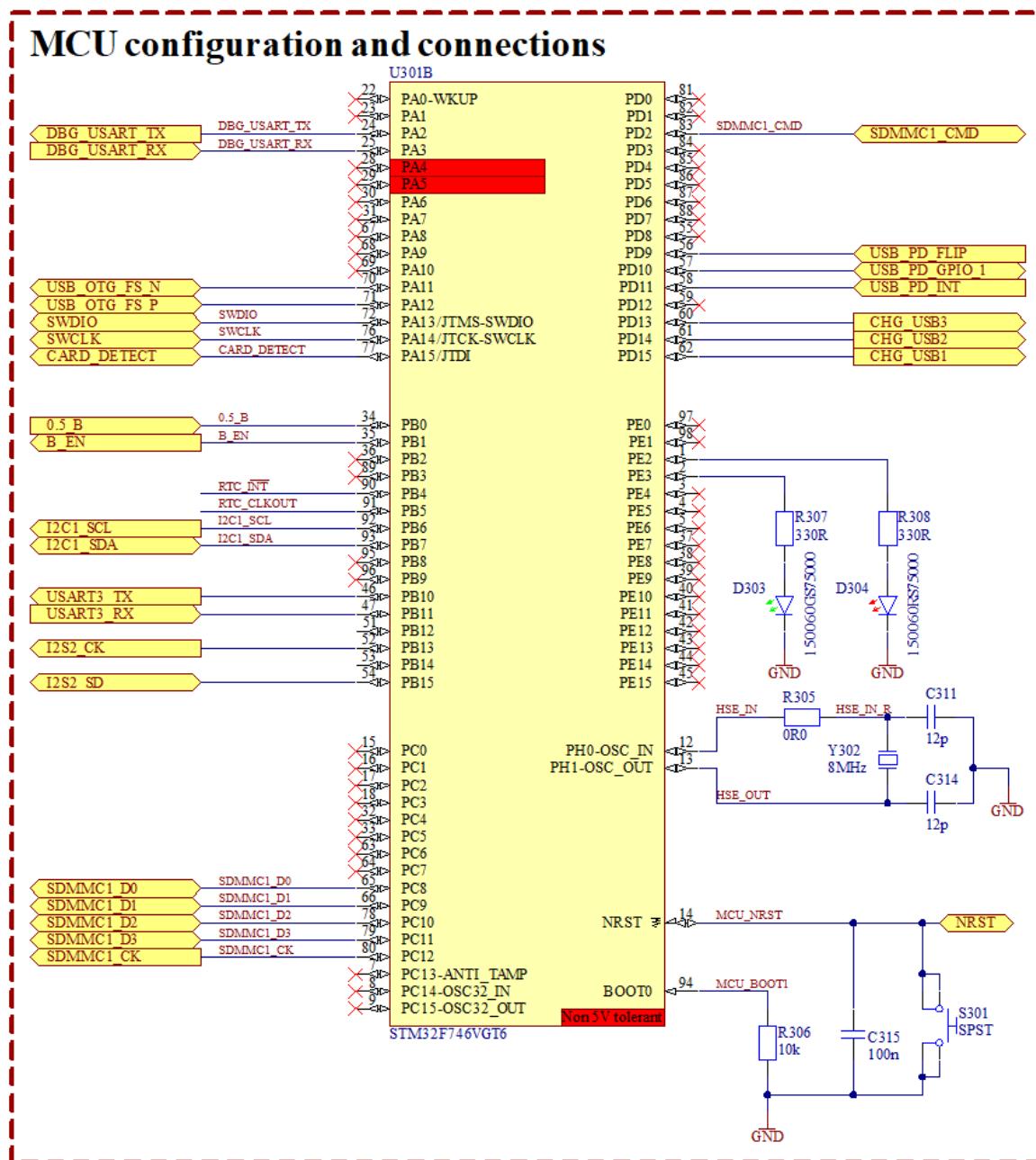
Kao glavna procesorska jedinica središnjeg uređaja odabran je mikrokontroler STM32F746VG temeljen na Cortex-M7 arhitekturi koji integrira funkcionalnosti digitalne obrade signala, sadrži sve potrebne periferije za integriranje s ostatkom sustava i ima dovoljno procesorske snage za obavljanje zadataka, primarno za izvođenje razmjerno zahtjevne neuronske mreže. Također, s obzirom da je programska potpora u okviru drugog rada razvijena koristeći razvojni sustav NUCLEO-F746ZG, spomenuti mikrokontroler odabran je radi kompatibilnosti s razvijenom programskom potporom. Shema napajanja mikrokontrolera prikazana je na slici 3.1., a shema spajanja mikrokontrolera s ostatkom sustava prikazana je na slici 3.2.



Slika 3.1. Shema napajanja mikrokontrolera

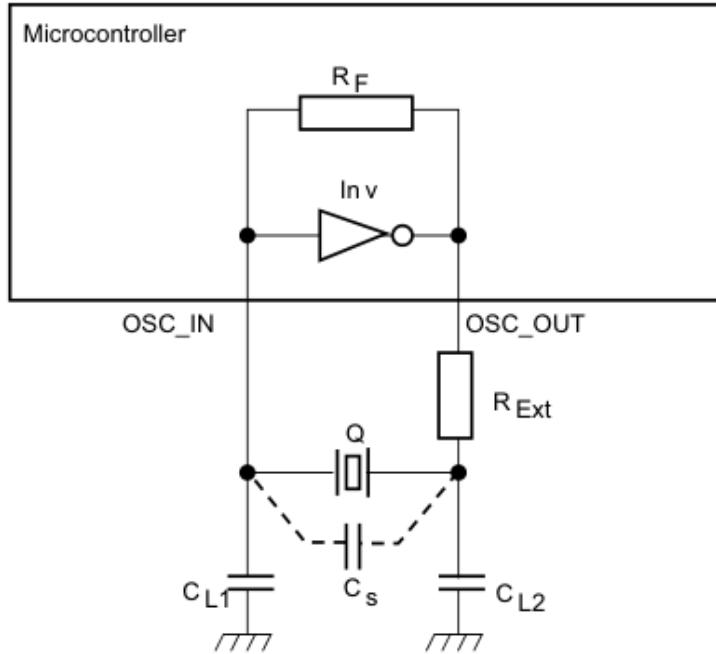
Shema napajanja napravljena je prema uputama proizvođača [5]. S obzirom da na ovoj ploči nema analognih signala, nije potrebno raditi analogno-digitalnu pretvorbu pa su stezaljke za napajanje analognog dijela mikrokontrolera spojene sa stezalkama za napajanje digitalnog dijela. Također, nije potrebna precizna naponska referenca, a baterijskim napajanjem će upravljati vanjski integrirani sklop pa su te dvije stezaljke

spojene na napajanje od +3,3 V.



Slika 3.2. Shema periferije mikrokontrolera

Postavljene su dvije svjetleće diode za pomoć pri programiranju i tipka za reset mikrokontrolera. Kod određivanja potrebnih priključaka za referencu je korišteno razvojno okruženje STM32CubeIDE. Dizajn oscilatora opisan je u priručniku proizvođača STMicroelectronics [6]. Oscilator koji mikrokontroler koristi je Pierceov oscilator (slika 3.3.).



Slika 3.3. Shema Piercovog oscilatora [6]

3.1.1. Pierceov oscilator

Pierceov oscilator se sastoji od invertera Inv , koji radi kao pojačalo, kristala Q , otpornika u povratnoj vezi R_F , vanjskog otpornika za ograničenje izlazne struje invertera R_{Ext} , vanjskog opteretnog kapaciteta C_{L1} i C_{L2} , parazitskog kapaciteta tiskane pločice i kapaciteta između stezaljki mikrokontrolera C_s .

Uloga otpornika R_F je da inverter dovede u način rada kada se ponaša poput pojačala. Otpornik povratne veze je spojen između izlaza i ulaza pojačala čime se ulaz i izlaz drže na istom naponu i osigurava se da pojačalo radi u linearном području rada. Ovaj otpornik je integriran u mikrokontroleru zajedno s pojačalom.

Opteretni kapacitet je ukupni kapacitet povratne veze oscilatora i mora biti jednak je kapacitetu između stezaljki kristala kako bi oscilator prooscilirao. Opteretni kapacitet specificira proizvođač kristala i označava se s C_L . Vanjskim kondenzatorima C_{L1} i C_{L2} se postavlja opteretni kapacitet povratne veze kako bi odgovarao opteretnom kapacitetu kristala. Opteretni kapacitet se računa prema sljedećoj jednadžbi:

$$C_L = \frac{C_{L1} \cdot C_{L2}}{C_{L1} + C_{L2}} + C_s \quad (3.1)$$

Kod dizajna oscilatora potrebno je izračunati kritično pojačanje petlje:

$$g_{mcrit} = 4 \cdot ESR \cdot (2\pi f)^2 \cdot (C_0 + C_L)^2 \quad (3.2)$$

gdje je f frekvencija oscilatora, ESR serijski otpor kristala i C_0 serijski kapacitet kristala. Ovaj parametar je potrebno izračunati kako bi se moglo provjeriti hoće li se oscilator upaliti i prooscilirati. Dobiveni podatak se uspoređuje sa specificiranim vrijednostima transvodljivosti g_m u dokumentaciji mikrokontrolera. Da bi oscilator proradio mora se proračunati margina pojačanja i treba vrijediti:

$$gain_{margin} = \frac{g_m}{g_{mcrit}} > 5 \quad (3.3)$$

Kako ne bi došlo do kvara kristala potrebno je ograničiti snagu koja se na njemu disipira s pomoću vanjskog otpornika R_{Ext} . Maksimalna snaga koja se može disipirati na kristalu naznačena je u dokumentaciji proizvođača. Ovaj otpornik s kondenzatorom C_{L2} formira niskopropusni filter kako bi oscilator proradio na osnovnoj frekvenciji, a ne na višim harmonicima. Ako snaga disipirana na kristalu bude veća od maksimalne dozvoljene, onda je vanjski otpornik obavezan i mora se proračunati, u suprotnom ga nije potrebno stavljati. Vrijednost otpornika se računa na sljedeći način:

$$R_{Ext} = \frac{1}{2\pi f C_{L2}} \quad (3.4)$$

3.1.2. Dizajn oscilatora

Oscilator je vidljiv na slici 3.2. Odabran je kristal NX8045GB proizvođača NDK. Njegove karakteristike su sljedeće:

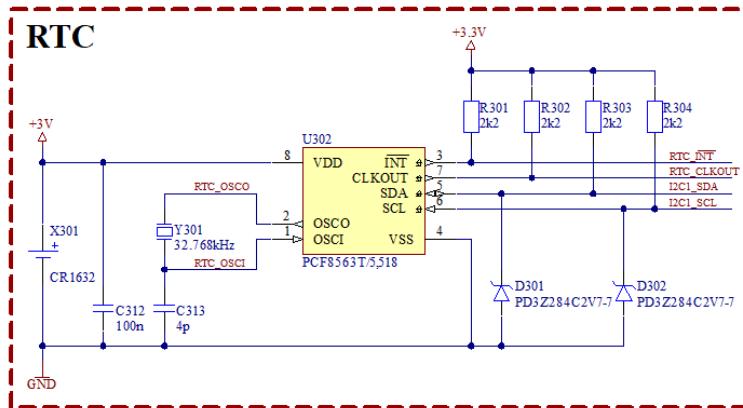
- $C_L = 2 \text{ pF}$
- $ESR = 200 \Omega$
- $f = 8 \text{ MHz}$

C_0 nije naznačen pa se uzima vrijednost 0. Uzimajući za parazitni kapacitet $C_s = 2 \text{ pF}$ i koristeći formula 3.1 dobiju se vrijednosti kondenzatora $C_{L1} = C_{L2} = 12 \text{ pF}$.

Odabir parazitnog kapaciteta je približan jer se ne može znati unaprijed bez mjerenja dovršene tiskane pločice. Kod odabira kondenzatora potrebno je obratiti pažnju na dielektrik kondenzatora i tolerancije. Kako bi frekvencija oscilatora bila što stabilnija, potrebno je koristiti temperaturno stabilan dielektrik, odnosno kondenzatore klase 1. Korišteni kondenzatori imaju C0G dielektrik. Koristeći jednadžbu 3.2 dobiva se $g_{m crit} = 0,1294 \text{ mA/V}$. Iz dokumentacije mikrokontrolera se dobiva $g_m = 1 \text{ mA/V}$. Iz uvjeta 3.3 dobiva se $gain_{margin} = 7,73$, čime je uvjet zadovoljen. S obzirom da nije moguće odrediti koliko će se kristal grijati, za vanjski otpornik postavljen je otpornik vrijednosti 0Ω pa u slučaju prevelike disipacije snage na kristalu moguće je na njegovo mjesto zalemiti otpornik odgovarajuće vrijednosti prema jednadžbi 3.4

3.2. Sat realnog vremena (RTC)

S obzirom da uređaj treba uskladiti podatke s mikrofona i narukvice, potrebno je precizno praćenje vremena. U tu svrhu dodan je vanjski RTC PCF8653 proizvođača NXP [7]. Za ovaj integrirani sklop postoji već razvijena programska podrška u ZephyrOS operacijskom sustavu za rad u stvarnom vremenu, pa je razvoj programske potpore za uređaj znatno olakšan. Shema RTC-a prikazana je na slici 3.4. S obzirom da se litij-ionska bate-



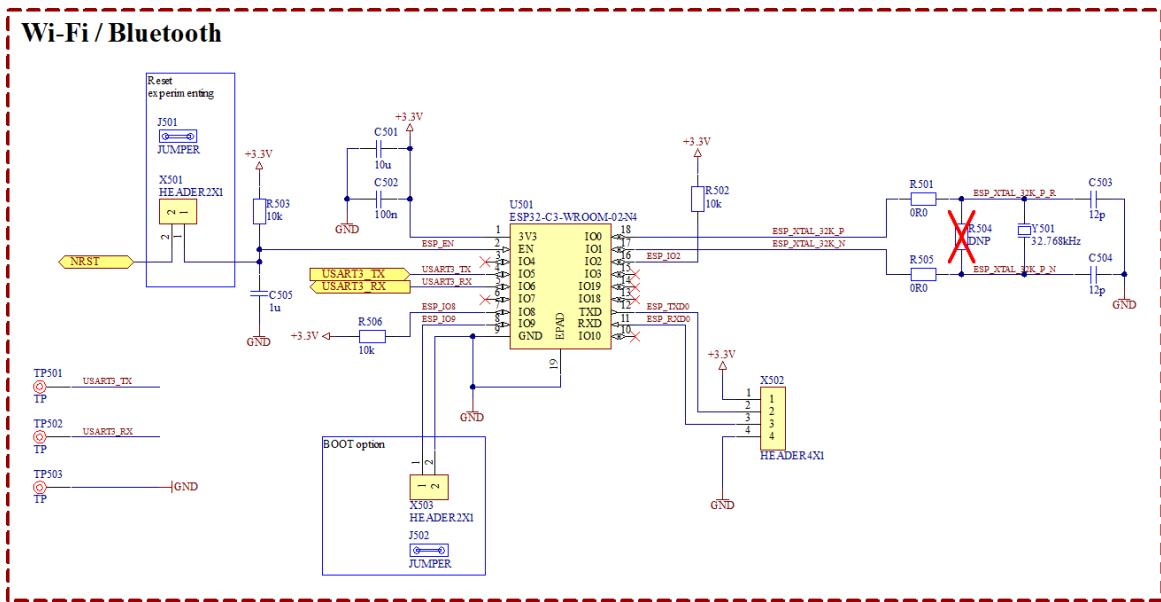
Slika 3.4. Shema RTC-a

rija, koja napaja cijeli uređaj, može isprazniti, otkopčati ili na neki drugi način se može prekinuti napajanje s vanjske baterije, RTC se napaja iz litajske baterije kako praćenje vremena ne bi bilo izgubljeno. S obzirom da je napon litajske baterije 3 V, a napon ostatka sustava 3,3 V, na I²C linije dodane su Zener diode s probojnim naponom od 2,7 V, čime se maksimalni napon ograničava kako ne bi došlo do oštećenja integriranog tijekom

komunikacije s mikrokontrolerom.

3.3. Bežična komunikacija

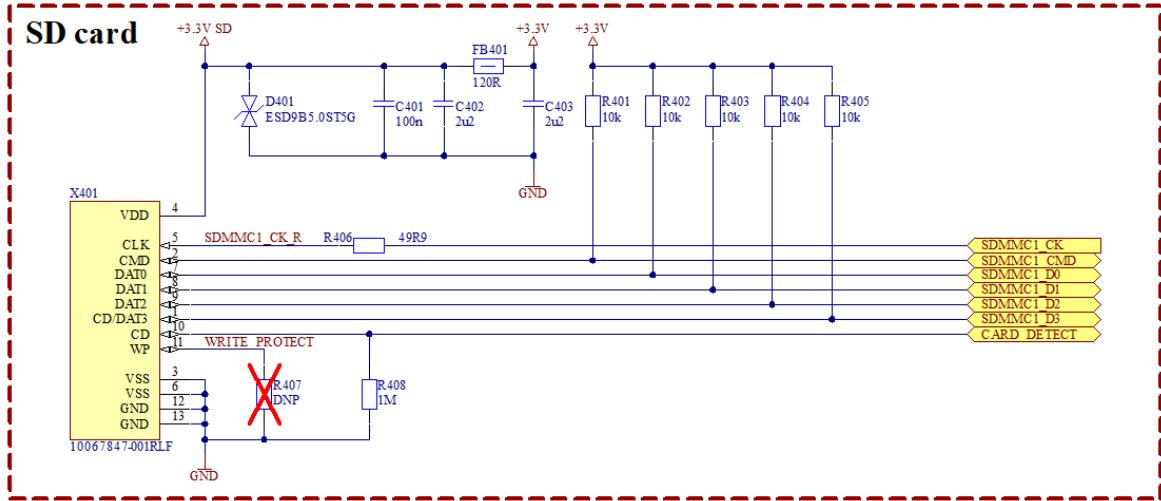
Shema podsustava za bežičnu komunikaciju prikazana je na slici 3.5. Radi lakšeg razvoja odabran je razvojni sustav ESP32-C3-WROOM-02 proizvođača Espressif Systems. Shema je razvijena prema preporukama proizvođača [8]. Dodan je još jedan kratkospojnik za ispitivanje funkcionalnosti reseta sustava.



Slika 3.5. Shema podsustava za bežičnu komunikaciju

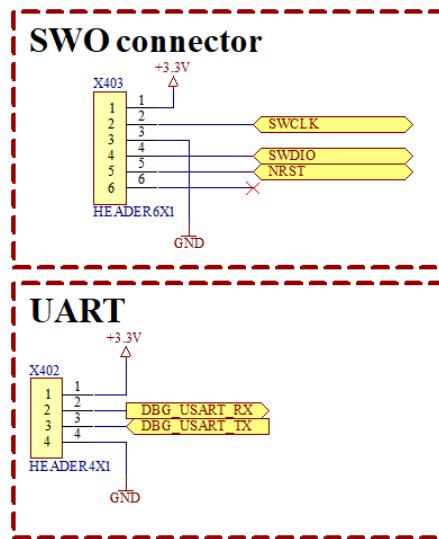
3.4. SD kartica i konektori

Za pohranu podataka na uređaju se nalazi SD kartica standardne veličine. Razlog oda-bira ove veličine jest taj da uređaj onda podržava i standardnu SD karticu i adapter za SD kartice manje veličine. Shema SD konektora prikazana je na slici 3.6. Konektor ima ESD zaštitu u obliku diode D401 i filtriranje napajanja preko mreže koja se sastoji od konden-zatora i feritne perle. Na svim komunikacijskim linijama se nalaze pritezni otpornici, a linija za takt ima terminacijski otpor od $49,9 \Omega$ kako bi se suzbila refleksija. Kako CD ste-zaljka za detekciju spojene kartice ne bi ostala plutajuća dodan je pritezni otpornik od $1 M\Omega$. Razlog odabira tako velikog otpora je unutarnji pritezni otpornik prema napajanju na SD karticama pa se velikim otporom suzbija efekt naponskog djelila.



Slika 3.6. Shema konektora SD kartice

Za upisivanje korisničkog programa u Flash memoriju mikrokontrolera potreban je konektor za SWO sučelje. Dodatno, za testiranje programske podrške i komunikaciju s računalom potreban je konektor za UART sučelje. Sheme konektora prikazane su na slikama 3.7.

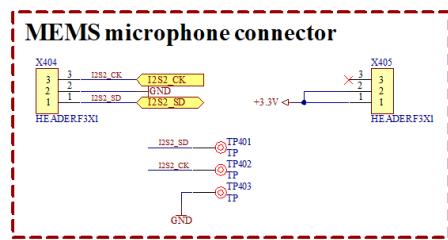


Slika 3.7. Shema konektora za UART i SWO sučelje

Za mikrofon se koristi evaluacijska pločica STEVAL-MIC003V1 (slika 3.8.) na kojoj se nalazi MEMS mikrofon IMP34DT05 proizvođača STMicroelectronics [9]. Za ovaj mikrofon također postoji razvijena programska podrška unutar ZephyrOS operacijskog sustava za rad u stvarnom vremenu. Ove evaluacijske pločice na sebi imaju montirane muške konektore s razmakom od 7 mm, pa se ovdje koriste ženski konektori (slika 3.9.). Kraj



Slika 3.8. STEVAL-MIC003V1



Slika 3.9. Konektori za MEMS

konektora su postavljene testne točke za promatranje signala preko logičkog analizatora u slučaju da postoje poteškoće tijekom programiranja ili rada.

3.5. Napajanje

Nakon što su odabrane sve potrebne komponente za postizanje pune funkcionalnosti sustava, moglo se projektirati i prikladno napajanje. Prvo je bilo potrebno proračunati potrošnju sustava, a potom odabrati komponente napajanja koje mogu zadovoljiti traženu potrošnju sustava na što efikasniji način.

3.5.1. Proračun potrošnje

Napravljena je tablica potrošnje za sustave koji se napajaju s 3,3 V (tablica 3.1.). Za maksimalne i minimalne vrijednosti potrošnje uzeti su podaci iz dokumentacije komponenata, a prosječna potrošnja procjenjena je približno jer je nemoguće znati prosječnu potrošnju bez mjerjenja u stvarnim uvjetima rada. Na temelju ovih podataka se može odrediti za koliku snagu napajanje mora biti projektirano. Maksimalna struja je manja od 1 A, a uređaj nikada neće dostići toliku razinu potrošnje jer se neće koristiti sve mogućnosti

Tablica 3.1. Potrošnja struje za sustave koji se napajaju sa 3,3 V

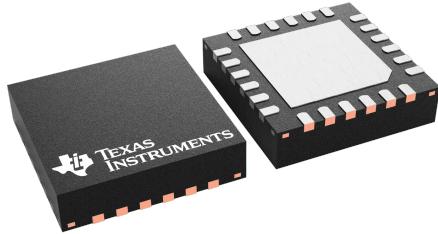
	Min. [mA]	Avg. [mA]	Max. [mA]
MCU	0,00	60,00	320,00
RTC	0,00	0,80	50,00
SD Card	1,25	25,00	100,00
MEMS	0,00	0,65	10,00
Wireless	13,00	82,00	350,00
Total on SYS	14,25	168,45	830,00

najvećih potrošača (mikrokontroler i bežična komunikacija). S obzirom na to da korisnik neće cijelo vrijeme pričati sustav će ući u mirovanje, a prosječna struja će onda biti još manja. Imajući na umu sve navedeno, procjenjuje se da će baterija od kapaciteta 2 Ah biti dovoljna. Tek nakon ove analize mogće su biti odabrane sve prikladne komponente za napajanje.

3.5.2. Baterija i punjač baterije

Za punjač baterije odabran je BQ24166 proizvođača Texas Instruments (slika 3.10.). Ovaj integrirani sklop u sebi ima integriran sustav za upravljanje tokom snage [10]. BQ24166 se može napajati s dva ulaza, ulaza za USB ili ulaza za druge vrste napajanja (AC/DC adapter, DC laboratorijski izvor napajanja, itd.), a da pritom u isto vrijeme puni bateriju i na svom izlazu daje napon baterije, s tim da izlazni napon neće pasti ispod 3,5 V. U tu svrhu u integrirani sklop je ugrađen silazni prekidački regulator napona, kako bi se kod punjenja baterije konstantnim naponom dobio izlazni napon od 4,2 V potreban za punjenje. Ako na ulaz integriranog sklopa nije spojeno ništa, onda se na izlaz izravno prosljeđuje napon baterije. U slučaju da napon baterije padne ispod 3,5 V, a da pritom ništa nije spojeno na ulaz čipa, izlazni napon se regulira na 3,5 V, čime se baterija može u potpunosti iskoristiti. Ovaj čip također ima ugrađene zaštite od prenapona, a jednim otpornikom moguće je i programirati prekostrujnu zaštitu. Također je jednim otpornikom moguće i programirati maksimalnu struju punjenja baterije.

Shema baterijskog punjača prikazana je na slici 3.11. Blokadni kondenzatori su postavljeni prema uputama proizvođača, a potrebno je bilo odabrati odgovarajuće otpornike za programiranje prekostrujne zaštite i maksimalne struje punjenja, kao i prikladnu zavojnicu. Kako bi se navedene komponente odabrale na odgovarajući način, potrebno je znati izlaznu struju iz punjača.



Slika 3.10. BQ24166 u QFN kućištu

Na izlazu punjača se nalazi linearni regulator napona s niskim padom napona (190 mV na struji od 1,5 A) koji regulira napon na 3,3 V (slika 3.13.). Imajući na umu da je ulazna struja linearnog regulatora otprilike ista kao i izlazna struja, dobiva se izlazna struja baterijskog punjača, što odgovara proračunu iz tablice 3.1., a to je ujedno i struja koju daje baterija. Proizvođač preporuča zavojnice vrijednosti $2,2 \mu\text{H}$ za slučaj manje valovitosti struje i manjeg ograničenja na prostor i $1,5 \mu\text{H}$ u slučaju manjeg ograničenja na valovitost i većeg ograničenja na prostor. Ovdje je odabrana vrijednost od $2,2 \mu\text{H}$, a zavojnica je odabrana tako da su struje zasićenja zavojnice i maksimalna struja koju zavojnica može podnijeti veće od dvostrukog izlazne struje, što je slučaj najveće valovitosti.

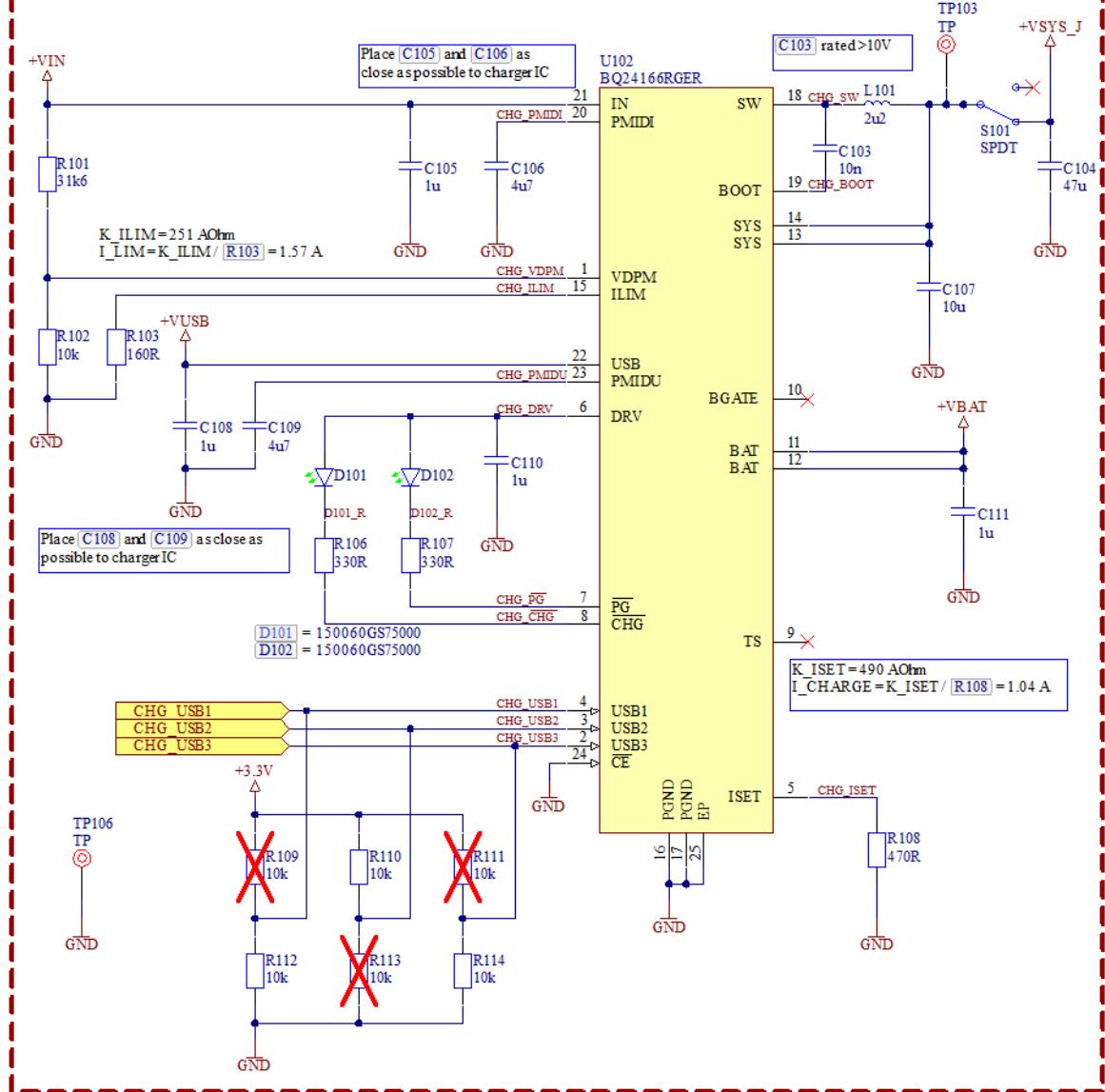
Tablica 3.2. Ograničenja struje USB-a [10]

IUSB3	IUSB2	IUSB1	Ograničenje ulazne struje	Minimalni napon
0	0	0	100 mA	4,28 V
0	0	1	500 mA	4,44 V
0	1	0	1,5 A	4,44 V
0	1	1	Visoka impedancija	Nikakav
1	0	0	150 mA	4,28 V
1	0	1	900 mA	4,44 V
1	1	0	800 mA	4,44 V
1	1	1	Visoka impedancija	Nikakav

Radi potreba testiranja dodani su pritezni otpornici na stezaljkama USB1, USB2 i USB3. Ovisno o logičkim razinama na tim stezaljkama moguće je ograničiti struju na ulazu za USB. Razne konfiguracije ograničenja struje prikazane su u tablici 3.2. Uobičajeno ograničenje u ovom slučaju je 1,5 A.

Da bi se dobila maksimalna ulazna struja punjača potrebno je uzeti u obzir najgori mogući slučaj: baterija je odspojena, potrošnja sustava je maksimalna. Unutar punjača

Battery charger



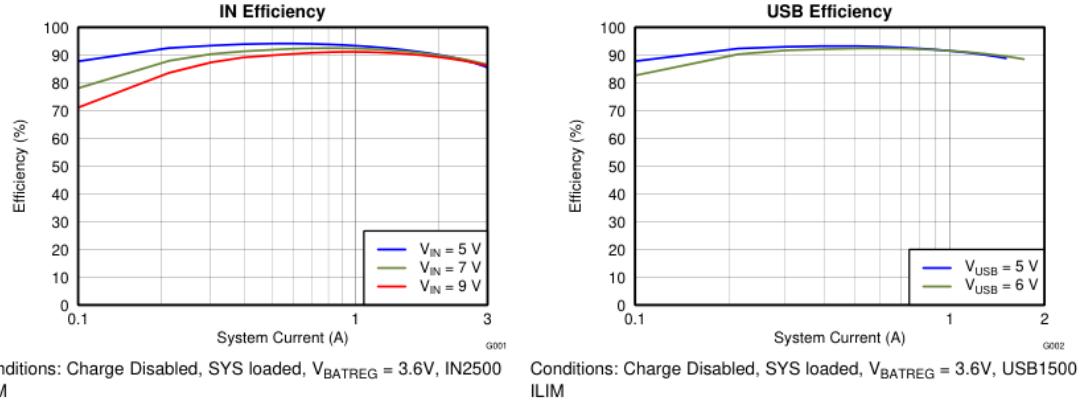
Slika 3.11. Shema baterijskog punjača

se nalazi silazni pretvarač, dakle vrijedi:

$$P_{IZ} = \eta \cdot P_{UL} \quad (3.5)$$

$$U_{IZ} \cdot I_{IZ} = \eta \cdot U_{UL} \cdot I_{UL} \quad (3.6)$$

gdje je U_{IZ} i I_{IZ} izlazni napon, odnosno struja, U_{UL} i I_{UL} , ulazni napon, odnosno struja, a η učinkovitost. Provjerom dokumentacije proizvođača, može se uzeti efikasnost od 90 % (slika 3.12.).

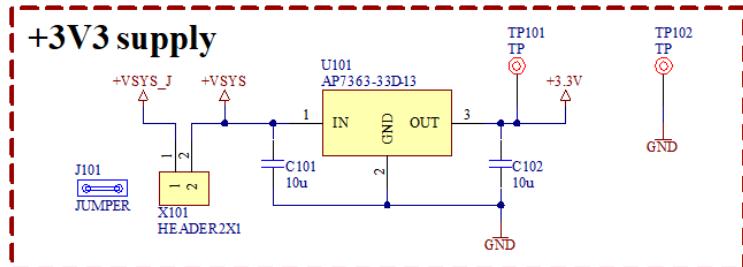


Slika 3.12. Ovisnost efikasnosti o izlaznoj struji punjača [10]

Iz jednadžbe 3.6 se sada može dobiti izraz za ulaznu struju:

$$I_{UL} = \frac{\eta \cdot U_{IZ} \cdot I_{IZ}}{U_{UL}} \quad (3.7)$$

Iz jednadžbe 3.7 je vidljivo da će ulazna struja biti najveća kada je ulazni napon što manji, što u ovom slučaju iznosi 5 V. Za izlazni napon se također uzima najgori slučaj od 4,2 V. Sada se za maksimalnu ulaznu struju punjača uz odspojenu bateriju dobiva iznos od $I_{UL,BATOFF} = 627,48\text{ mA}$.



Slika 3.13. Linearni regulator napona

Imajući na umu da će do maksimalne potrošnje doći rijetko, ako uopće, i činjenicu da će sustav imati mogućnost ulaska u način rada mirovanja, može se uzeti kapacitet baterije od 2 Ah, čime se postiže balans trajanja baterije i cijene. U tom slučaju dovoljno je ograničiti punjenje baterije na 1 A, a izračun otpornika je vidljiv na shemi (slika 3.11.). Odgovarajuće konstante za izračun otpornika su dobivene iz dokumentacije proizvođača. Sada je isto pomoću jednadžbe 3.7 moguće izračunati ulaznu struju;

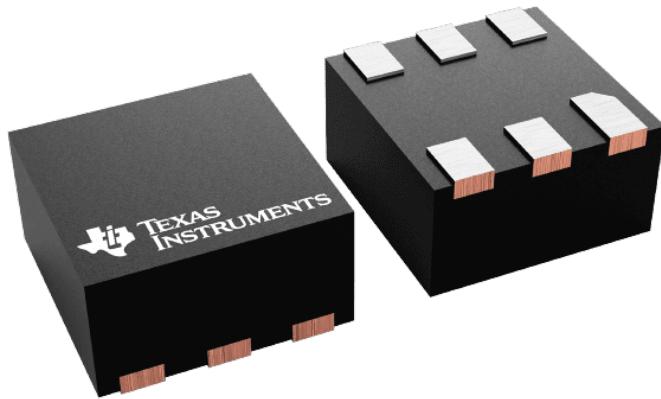
$I_{UL,BATCHG} = 756 \text{ mA}$. Ukupna maksimalna ulazna struja je stoga:

$$I_{UL,MAX} = I_{UL,BATCHG} + I_{UL,BATOFF} = 1.38 \text{ A} \quad (3.8)$$

Uz dodatak sigurnosne zalihosti, za prekostrujnu zaštitu se onda uzima 1,5 A. Za potrebe testiranja i otklanjanje eventualnih grešaka na ulaz linearног regulatora dodan je kratkospojnik.

3.5.3. Baterijska zaštita

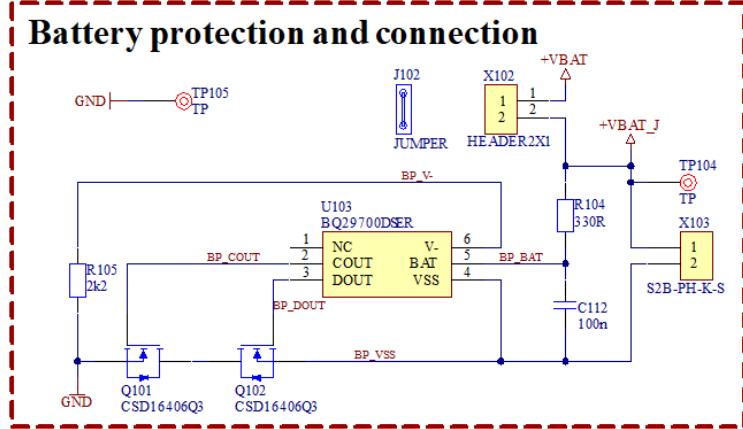
S obzirom na mnoge opasnosti vezane uz korištenje litij-ionskih baterija, potrebno je dizajnirati prikladnu zaštitu za bateriju. U tu svrhu odabran je BQ29700 proizvođača Texas Instruments, prikazan na slici 3.14. Ovaj integrirani sklop ima zaštitu baterije od preniskog i previsokog napona, prejake struje pražnjenja i punjenja te kratkog spoja. Shema sklopa za zaštitu baterije prikazana je na slici 3.15. Otpornici i kondenzatori su



Slika 3.14. BQ29700

odabrani prema preporukama proizvođača, dok se tranzistori biraju prema potrebama sustava tijekom dizajna [11]. Napon baterije se mjeri preko BAT i VSS stezaljki čipa. U slučaju previsokog napona isključuje se tranzistor Q101, a u slučaju preniskog napona isključuje se tranzistor Q102. Struja se mjeri preko stezaljki V- i VSS, dakle preko otpora tranzistora Q101 i Q102. U slučaju prevelike struje pražnjenja ili kratkog spoja isključuje se tranzistor Q102, a u slučaju prevelike struje punjenja isključuje se tranzistor Q101.

U tablici 3.3. navedeni su pragovi napona na kojima se aktivira zaštita baterije. Ako



Slika 3.15. Shema sklopa za zaštitu baterije

Tablica 3.3. Pragovi aktiviranja zaštite za bateriju [11]

	Previsok napon	Prenizak napon	Previsoka struja punjenja	Previsoka struja pražnjenja	Struja kratkog spoja
Prag [V]	4,275	2,800	-0,100	0,100	0,5

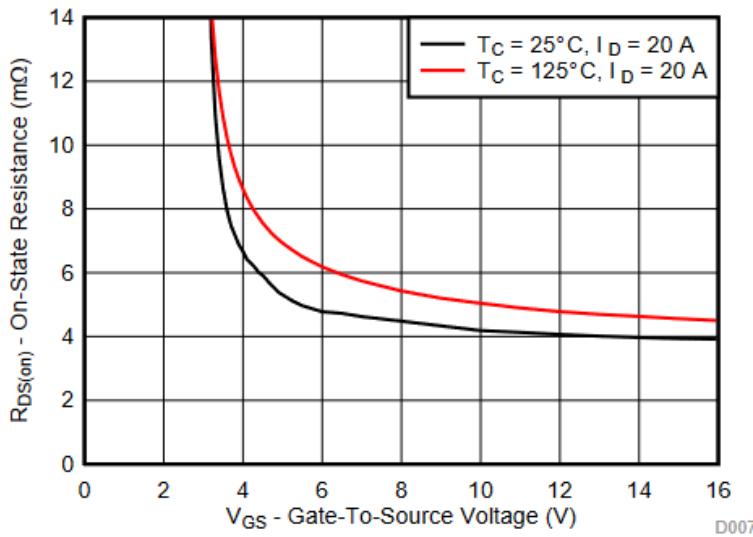
su oba tranzistora jednaka, onda za struju kroz tranzistor vrijedi:

$$I_Q = \frac{U_{TH}}{2 \cdot R_{DS(on)}} \quad (3.9)$$

gdje je U_{TH} napon praga, a $R_{DS(on)}$ otpor jednog tranzistora. U dokumentaciji proizvođača navodi se da tranzistor mora podržavati napon između upravljače elektrode i uvoda u iznosu od $U_{GS} = 3,5$ V. Iz grafa ovisnosti $R_{DS(on)}$ o U_{GS} prikazanog na slici može se isčitati vrijednost otpora od $R_{DS(on)} = 12,5$ mΩ. Zaštita baterije će se aktivirati u sljedećim uvjetima:

- previsoka struja punjenja $I_{OCC} = 4$ A,
- previsoka struja pražnjenja $I_{OCD} = 4$ A,
- struja kratkog spoja $I_{SCD} = 20$ A.

Ovo je dizajn napravljen po uzoru na dokumentaciju proizvođača, međutim, očito je da je ovaj tranzistor loš odabir za ovaj slučaj. Pragovi struja na kojima će se zaštita aktivirati su previsoki i može doći do oštećenja sklopovlja ili baterije dogodi li se situacija kada zaštita mora proraditi. Ispravan način proračuna i odabira tranzistora bit će demonstriran u



Slika 3.16. Graf ovisnosti otpora o naponu između upravljačke elektrode i uvoda tranzistora CSD16406Q3 [12]

poglavlju vezanom uz izradu narukvice.

3.6. USB napajanje

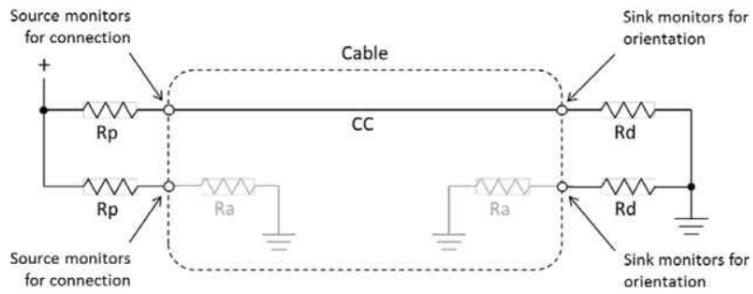
Evolucijom USB sučelja rasla je snaga koju USB izvor može dati. Tablica 3.4. prikazuje snage koje razne verzije USB sučelja mogu dati. Korisnik obično ne razmišlja na koju

Tablica 3.4. Maksimalni naponi, struje i snage raznih verzija USB sučelja [13]

Verzija	Maksimalni napon	Maksimalna struja	Maksimalna snaga
USB 2.0	5 V	500 mA	2.5 W
USB 3.0 i USB 3.1	5 V	900 mA	4.5 W
USB BC 1.2	5 V	1.5 A	7.5 W
USB Type-C 1.2	5 V	3 A	15 W
USB PD 3.0	20 V	5 A	100 W

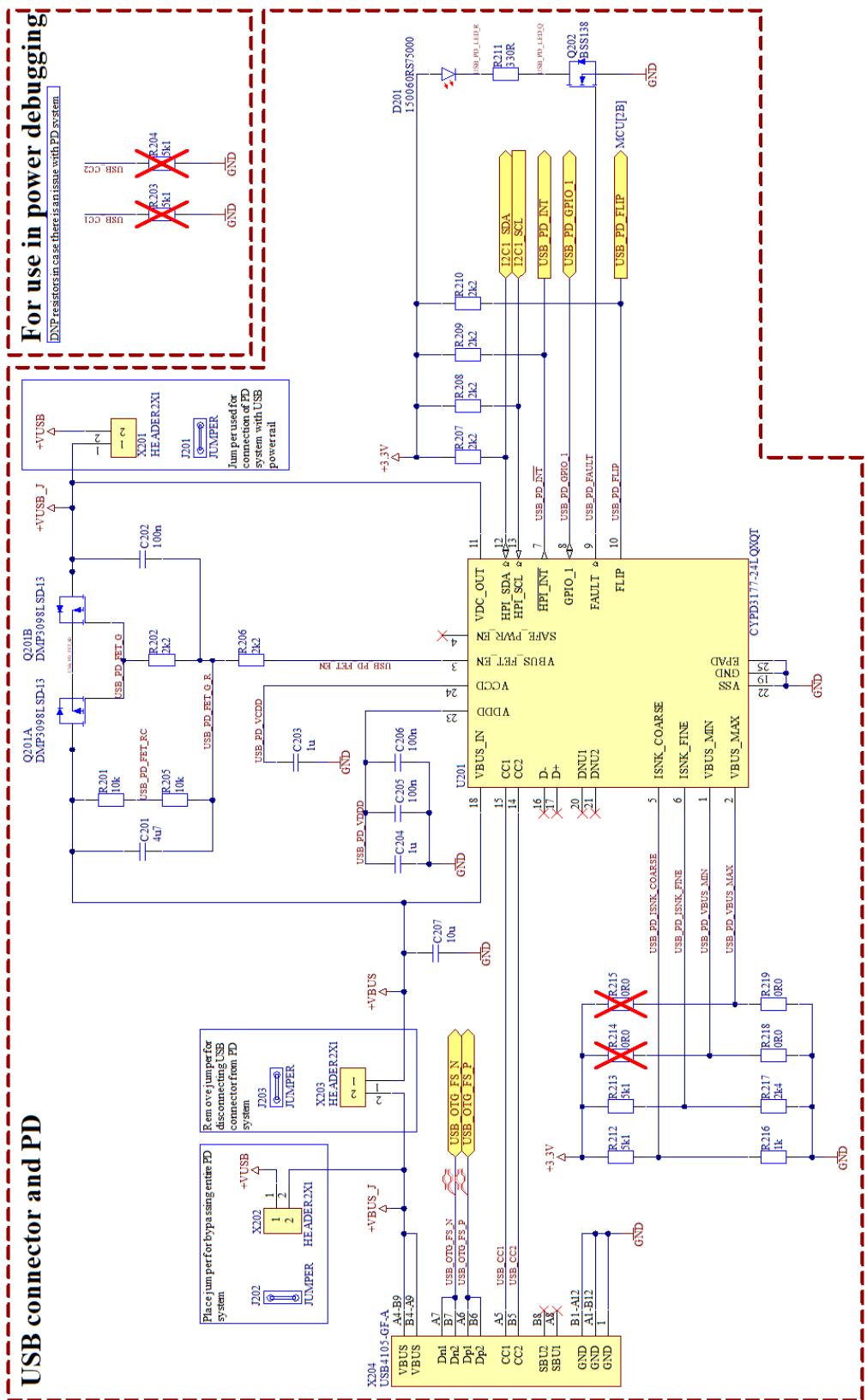
verziju sučelja spaja svoj uređaj, moguće je spojiti uređaj na USB 2.0 ili USB PD 3.0. Ako je uređaju potrebno 1.5 A struje, a spojen je na USB 2.0, doći će do pada napona na USB izvoru, te može doći do kvara izvora. Iz tog razloga USB C priključak sadržava konfiguracijske kanale, odnosno CC linije (engl.*Configuration Chanenels*), preko kojih uređaj i izvor mogu razmijeniti podatak o potrebnoj snazi. Način na koji CC linije funkcioniraju je prikazan na slici 3.17. Izvor u sebi sadržava pritezne otpornike na napajanje spojene na CC linije, dok uređaj, odnosno ponor na CC linije ima spojene pritezne otpornike na masu. Uređaj promatra CC linije kako bi zaključio kako je kabel orijentiran, dok izvor

promatra napon na CC linijama, odnosno naponskom djelilu. Mjereći napon izvor može zaključiti koliku snagu traži uređaj. Dakle, najjednostavniji način za USB napajanje uređaja je spojiti par priteznih otpornika na masu, čime se traži fiksna vrijednost snage. Međutim, uređaj mora imati sposobnost napajanja iz više vrsta izvora, te je potrebno nešto kompleksnije rješenje.



Slika 3.17. Prikaz načina rada CC linija [13]

Radi toga je potrebno projektirati sklopolje koje će moći zatražiti snagu od izvora, a koje će potom uključiti USB napajanje ako izvor može dati tu snagu, odnosno držati isključenim ako ne može. Postoji niz integriranih krugova koji to mogu napraviti, a ovde je odabran CYPD3177 tvrtke Cypress Technologies. Shema USB napajanja prikazana je na slici 3.18. Ovaj integrirani krug u sebi ima niz priteznih otpornika na stezalkama CC1 i CC2 koje su spojene direktno na USB konektor. Struja i napon koju će čip zahtijevati namještaju se naponskim djelilima preko priključaka ISNK_COARSE, ISNK_FINE, VBUS_MIN i VBUS_MAX. Vrijednosti otpornika na shemi odabrane su prema savjetima proizvođača [14]. U ovom slučaju napon koji će se tražiti iznosi 5 V, a struja 1.5 A. Na temelju toga čip postavlja prikladne vrijednosti otpora na CC linije. Ako izvor može dati zahtijevanu snagu čip postavlja stezaljki VBUS_FET_EN u visoku razinu, čiji je napon u visokom stanju jednak naponu koji se nalazi na USB priključku. Na taj se način uključuje vanjski P-MOSFET koji prosljeđuje napajanje s USB priključka. Otpori i kondenzatori oko tranzistora služe za usporavanje rasta napona, čime se izbjegavaju neugodne tranzientne pojave. Za indikaciju neuspješnog dogovora između izvora i uređaja služi crvena svjetleća dioda D201. Za svrhe testiranja i otklanjanja grešaka predviđeni su kratkospojnici kojima se može odvojiti i preskočiti ovaj dio sklopoljla. U tom slučaju potrebno je zalemiti otpornike R204 i R203 u vrijednosti od $5.1\text{ k}\Omega$, čime se traži snaga od 15 W (5 V, 3 A).



Slika 3.18. Shema USB napajanja

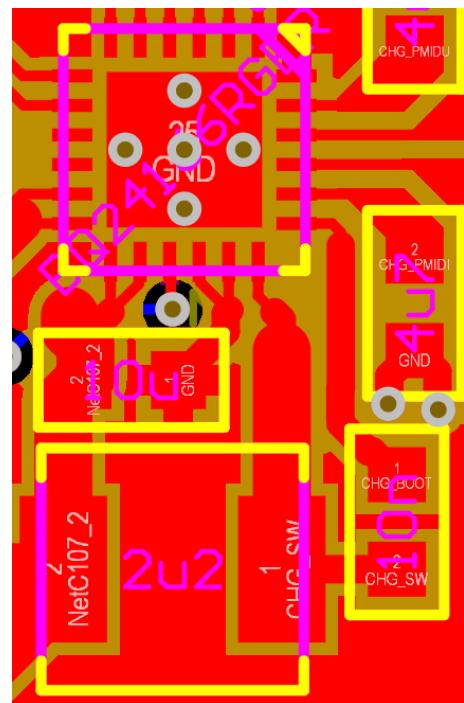
3.7. PCB

Raspored slojeva tiskane pločice prikazan je na slici 3.19. Oba unutarnja sloja su ravnine za uzemljenje kako bi se što bolje očuvao integritet signala na gornjem i donjem sloju. Ova konfiguracija je preuzeta sa web stranice proizvođača pločice JLCPCB.

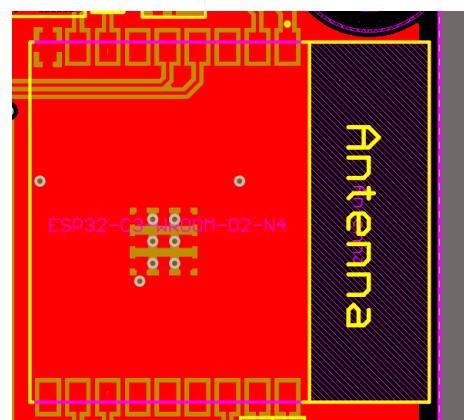
Stack Up		Layer Stack			
Layer	Board Layer Stack	Name	Material	Thickness	Constant
1		Top Overlay		0mm	
2		Top Mask	Solder Resist	0.015mm	38
3		Top Copper		0.035mm	
4		Dielectric 1	7628	0.2mm	46
5		GND		0.0175mm	
6		Core	FR-4	1.065mm	45
7		Signal Layer 2		0.0175mm	
8		GND	7628	0.2mm	46
9		Bottom Copper		0.035mm	
10		Bottom Mask	Solder Resist	0.015mm	38
11		Bottom Overlay		0mm	
		Height : 1.6mm			

Slika 3.19. Raspored slojeva PCB-a

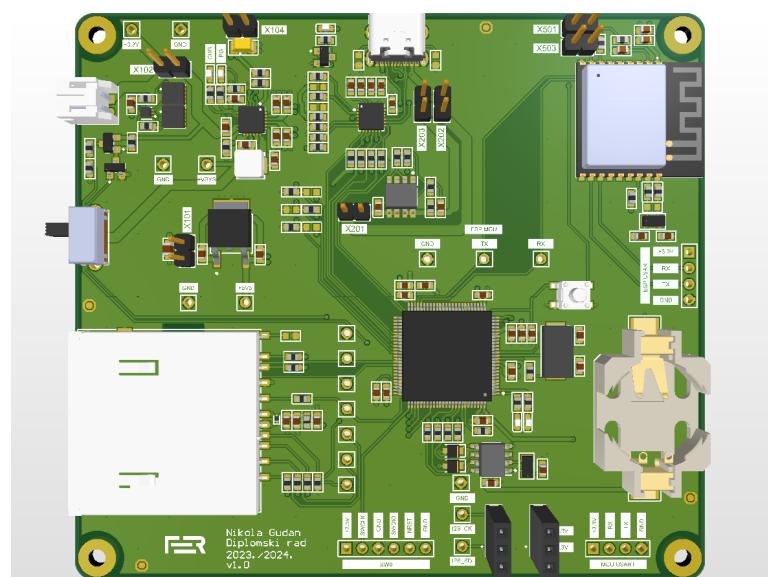
Tijekom projektiranja pločice bilo je potrebno posebno obratiti pažnju na smanjene površine komutacijske petlje kod punjača (slika 3.20.) kojega čine zavojnica L101 te kondenzatori C103 i C107 (slika 3.11.) kako bi se smanjile emitirane smetnje. Također je bilo potrebno obratiti pažnju na pozicioniranje antene i ravnine uzemljenja oko nje (slika 3.21.). Ovdje se može uočiti greška u projektiranju jer iako nema uzemljenja ispod antene, on se nalazi okolo antene, što može predstavljati poteškoće u bežičnoj komunikaciji. 3D prikaz projektirane pločice može se vidjeti na slici 3.22.



Slika 3.20. Komutacijska petlja punjača



Slika 3.21. Antena na PCB-u



Slika 3.22. 3D prikaz pločice

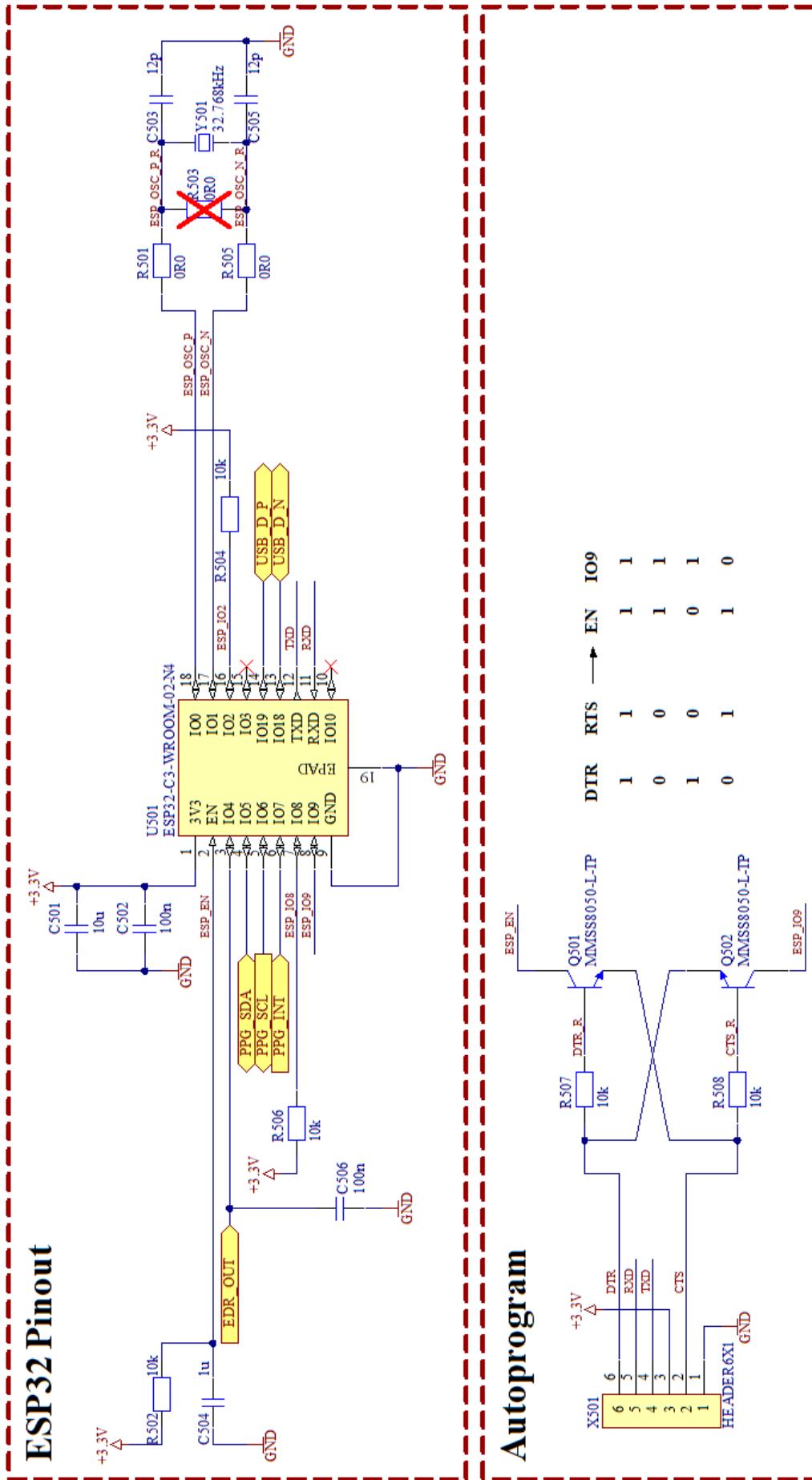
4. Narukvica

Svrha narukvice je prikupljanje biomedicinskih parametara korisnika i njihovo slanje na obradu na glavnoj ploči. Biomedicinski parametri koji će se promatrati su brzina otkucaja srca putem fotopletizmografskog senzora (PPG) i impedancija kože, odnosno elektrodermalna aktivnost.

Što se tiče zahtjeva na napajanje narukvice, situacija je ista kao i kod glavne ploče, uz drugačiju potrošnju. Tako da izrada pločice za narukvicu predstavlja mogućnost ispravljanja grešaka nastalih tijekom dizajna napajanja glavne ploče. Narukvica također mora imati mogućnost bežične komunikacije. S obzirom na ograničenje veličine ploče maknuti su kratkospojnici i testne točke.

4.1. Bežična komunikacija

Shema bežične komunikacije na narukvici (slika 4.1.) je veoma slična onoj na glavnoj ploči (slika 3.5.), uz nedostatak kratkospojnika, dodatak signala za upravljanje I₂C sujetjem i korištenje analogno-digitalnog pretvornika za mjerjenje impedancije kože. Još jedna promjena dolazi u obliku programiranja preko UART-a. S obzirom na probleme tijekom programiranja glavne ploče dodani su signali DTR i CTS kako bi se BOOT i EN stezaljke ESP mikrokontrolera mogle programski upravljati.

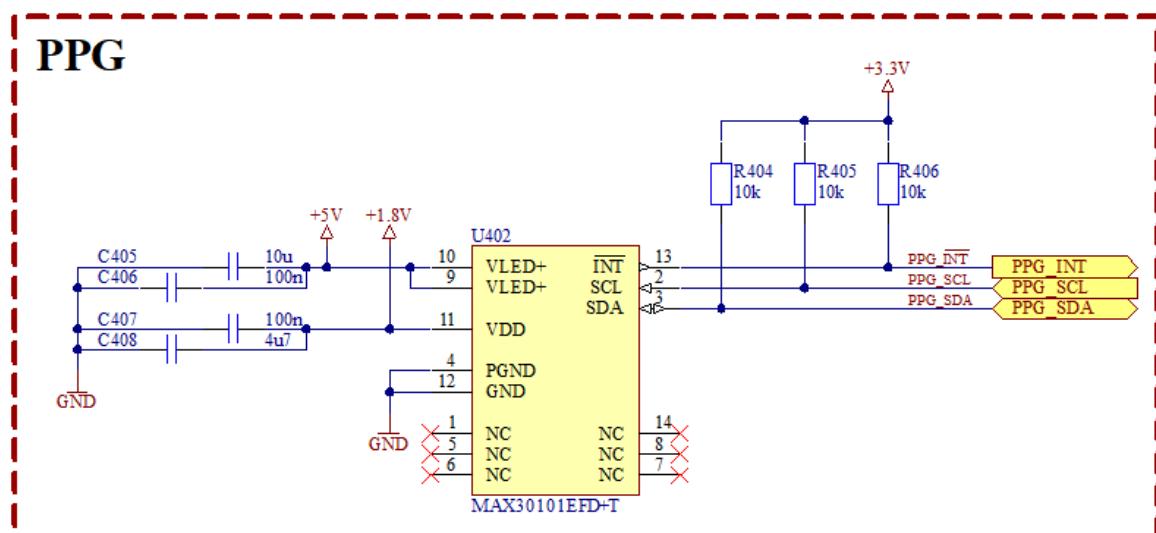


4.2. Fotopletizmografski senzor

Za mjerjenje brzine otkucaja srca koristi se PPG senzor MAX30101 tvrtke Analog Devices (slika 4.2.). Ovaj senzor u sebi ima crvenu, zelenu i infracrvenu svjetleću diodu i fotosenzor, upravljačko sklopoljje za diode, te komunicira preko I²C sučelja. Kao što je vidljivo na shemi na slici 4.3. ovaj senzor je veoma jednostavan za implementaciju uz svega par par priteznih otpornika i blokadnih kondenzatora. Jedina komplikacija dolazi u obliku napajanja od 5 V, koje je potrebno jer je pad napona na zelenoj svjetlećoj diodi specificiran na 3.3 V.



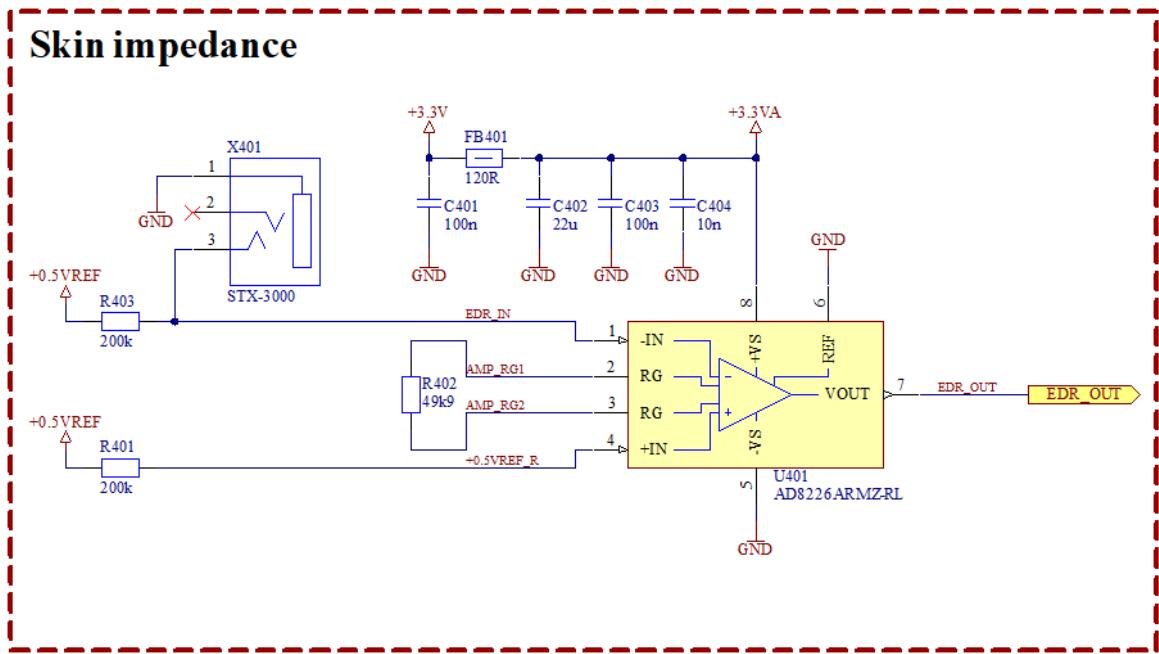
Slika 4.2. MAX30101 PPG senzor



Slika 4.3. Shema PPG senzora

4.3. Impedancija kože

Impedancija kože mjerit će se pomoću instrumentacijskog pojačala. Shema mjernog kruga prikazana je na slici 4.4. Odabrano je instrumentacijsko pojačalo AD8226 tvrtke Analog Devices zbog svog velikog ulaznog otpora, malog šuma i dobrog potiskivanja za jedničkih smetnji [15]. Napajanje pojačala je filtrirano pasivnom mrežom kako ne bi došlo do smetnji od digitalnog dijela sklopovlja. Za mjerjenje impedancije koristi se re-



Slika 4.4. Shema mjernog kruga za impedanciju kože

ferentni napon od 0.5 V, a mjerjenje impedancije se temelji na mjerenuju napona na naponskom djelilu na stezaljci -IN pojačala. Kožu predstavlja donji otpornik u naponskom djelilu, te razlika između tog napona i referentnog napona pojačava:

$$U_{IZ} = A \cdot U_{REF} \cdot \frac{R_{403}}{R_{403} + R_{skin}} \quad (4.1)$$

Impedancija kože mjeri se u stotinama kilooma (maksimalno cca. 250 kΩ [16]), tako da je vrijednost gornjeg otpornika 200 kΩ. Pojačanje iznosi 2 i namješta se preko otpornika R402.

Za svrhe lakšeg prototipiranja koristit će se samoljepljive elektrode (slika 4.5.) koje se montiraju na kabel prikazan na slici 4.6. Ovaj kabel se spaja na narukvicu putem 3.5 mm audio priključka.



Slika 4.5. Samoljepljiva elektroda



Slika 4.6. Kabel za elektrode

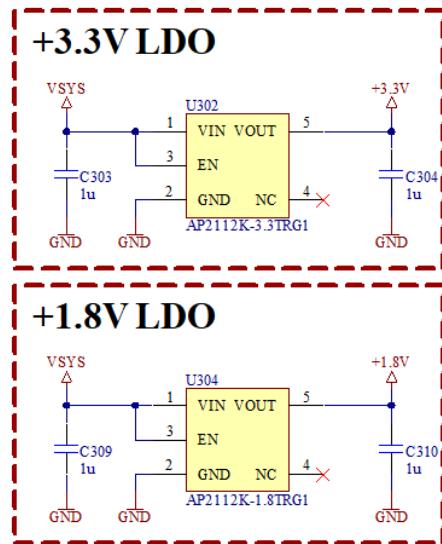
4.4. Napajanje

4.4.1. Proračun potrošnje

Proračun potrošnje za narukvicu je bio puno jednostavniji od proračuna za glavnu ploču. U ovom slučaju, najveći potrošač je i dalje sustav za bežičnu komunikaciju, međutim on je efektivno i jedini potrošač na 3.3 V jer je potrošnja instrumentacijskog pojačala izrazito mala, maksimalno $20 \mu\text{A}$ [15]. Za potrošnju sustava bežične komunikacije uzima se vrijednost prikazana u tablici 3.1. Na napajanju od 5 V jedini potrošač je PPG senzor i njegova potrošnja u najgorem slučaju iznosi 50 mA, a na napajanju od 1.8 V senzor troši maksimalno 1.1 mA [17].

4.4.2. Napajanja od 3.3 V i 1.8 V

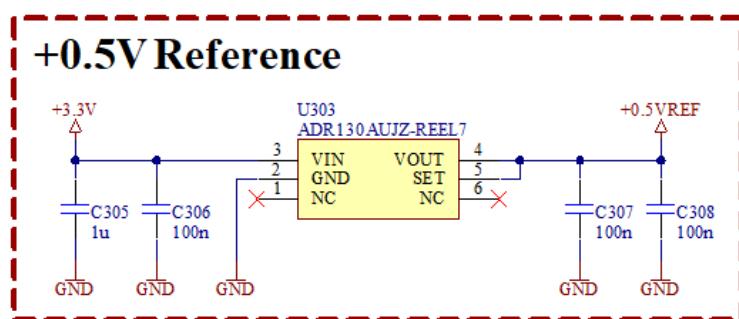
Shema napajanja od 3.3 V i 1.8 V prikazana je na slici 4.7. U oba slučaja koristi se LDO AP2112K proizvođača Diodes Incorporated. Ovaj LDO je odabran radi svoje male veličine u SOT-25 s obzirom na ograničenje veličine PCB-a.



Slika 4.7. Napajanje od 3.3 V i 1.8 V za narukvicu

4.4.3. Referentni napon

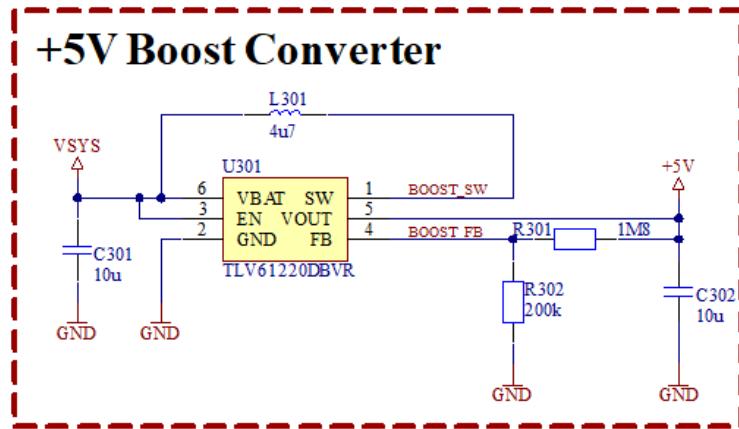
Shema izvora referentnog napona prikazana je na slici 4.8. Koristi se ADR130 referencia tvrtke Analog Devices. Iznos referentnog napona se može namjestiti na 1 V ili 0.5 V, a veličina kućišta je ista kao i kod linearnih regulatora prikazanih u dijelu 4.4.2.



Slika 4.8. Referentni izvor napona od 0.5 V

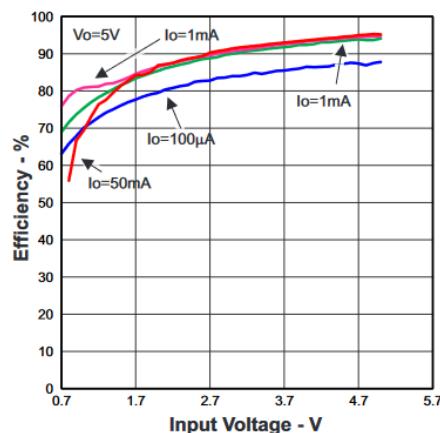
4.4.4. Napajanje od 5 V

Za napajanje od 5 V bilo je potrebno dizajnirati uzlazni prekidački regulator. Shema regulatora prikazana je na slici 4.9. Odabran je TLV61220 proizvođača Texas Instruments jer je idealan za napajanje s baterije. Regulator može raditi na ulaznom naponu od 0.7 V do 5.5 V i potrebno je malo komponenata za rad [18]. Također je pogodan radi svoje male veličine u SOT-23 kućištu. Zavojnica je odabrana prema preporukama proizvođača,



Slika 4.9. Uzlazni prekidački regulator

a naponsko djelilo je proračunato imajući na umu da donji otpornik ne bi trebao biti veći od $500\text{ k}\Omega$ kako bi vrijednost struje koja teče u FB stezaljku bila što bliže $0.01\text{ }\mu\text{A}$ [18]. Efikasnost za izlazne struje od 1 mA do 50 mA je skoro ista na ulaznom naponu u rasponu baterije i može se uzeti efikasnost od 90 % (4.10.). Uz minimalni ulazni napon od 3 V, potrošnja, prema jednadžbi 3.7 iznosi 75 mA.



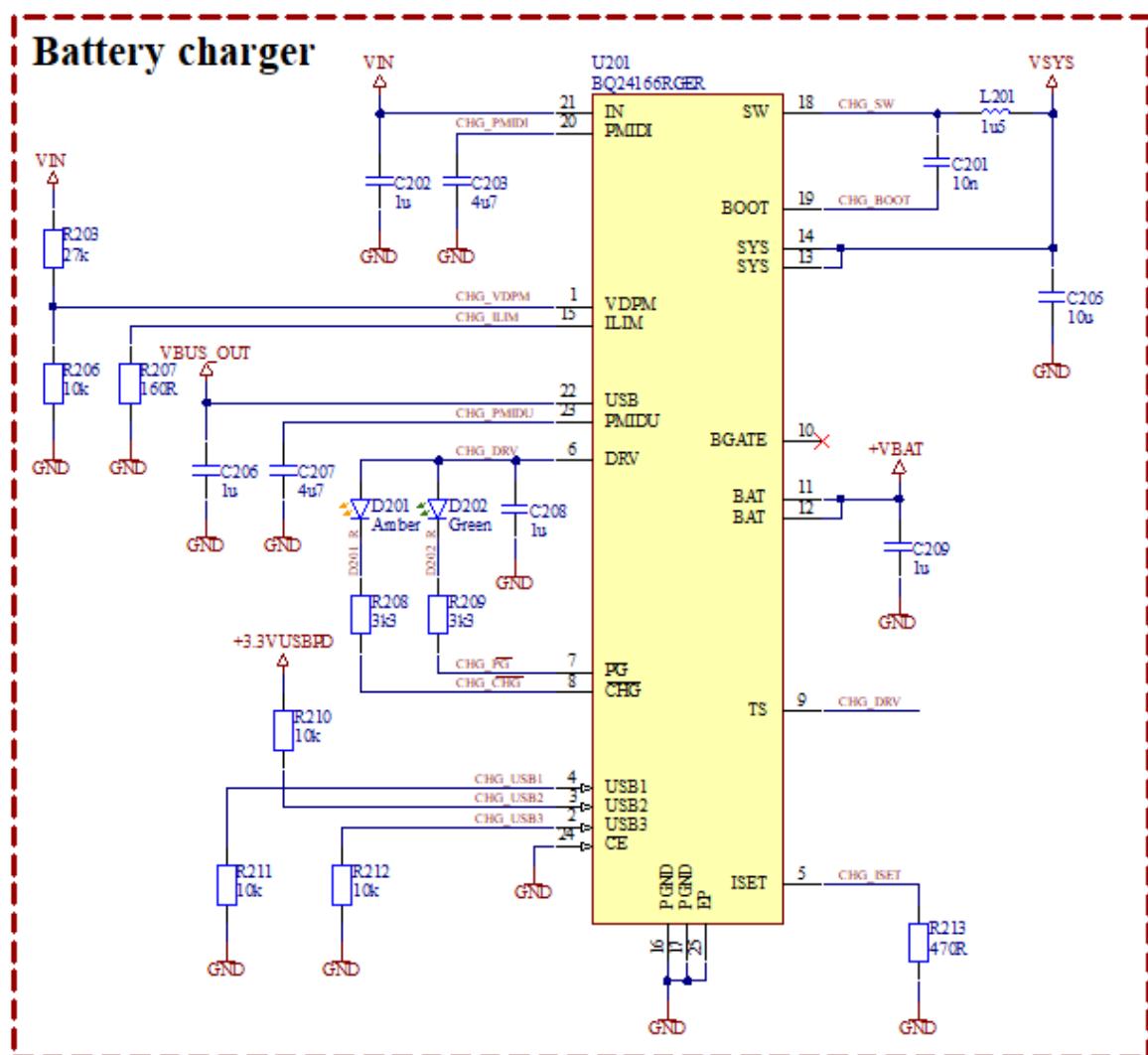
Slika 4.10. Efikasnost regulatora [18]

4.5. Baterija i punjač baterije

Uzveši u obzir potrošnju svih podsustava ukupna struja koju punjač mora moći dati je 426.12 mA. Uz struju punjenja baterije od 1 A i uzveši u obzir jednadžbe 3.7 i 3.8 ukupna struja koju USB sučelje mora moći dati iznosi 1.08 A, dakle uzet će se ograničenje na ulaznu struju od 1.5 A. Uvjeti su, dakle, veoma slični onima kao kod glavne ploče.

4.5.1. Punjač baterije

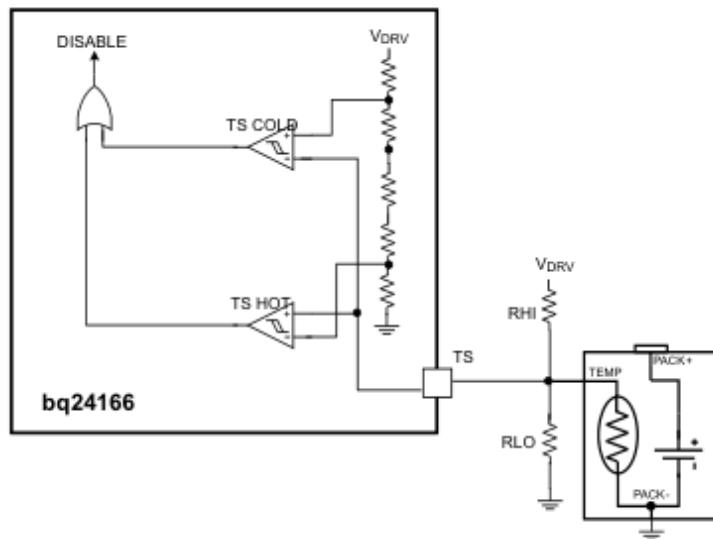
Shema punjača narukvice na slici 4.11. veoma je slična shemi sa slike 3.11. Promijenjena je svjetleća dioda za indikaciju punjenja u žutu, kako bi se jasnije mogla razlikovati indikacija između indikacije punjenja i indikacije statusa dobrog napajanja. Također su dodani veći otpornici u seriju s diodama jer je svjetlina bila prevelika.



Slika 4.11. Shema punjača baterije na narukvici

Još jedna razlika je u priteznim otpornicima na konfiguracijskim linijama za ograničenje struje USB-a, ovdje je ograničenje uvijek 1.5 A jer nema potrebe za drugačijim postavkama i postoji ograničenje na veličinu pločice. S obzirom na ograničenje na veličinu pločice ovdje je odabrana zavojnica od $1.5 \mu\text{H}$.

Zadnja razlika je vrlo suptilna, ali veoma ključna za ispravan rad punjača. Pogledom na shemu na slici 3.11. vidljivo je da stezaljka TS nije nigdje spojena, odnosno „pluta”. Ova stezaljka služi za mjerjenje temperature baterije tijekom punjenja. Ako je temperatura prevelika ili premala punjenje se zaustavlja. Shema mjerjenja prikazana je na slici 4.12. Mjeri se napon na naponskom djelilu kojega čine otpornici i NTC termistor. Naponi na kojima se zaštita aktivira iznose 30% i 60% napona na stezaljci DRV, dakle 1.56 V i 3.12 V. S obzirom na to da stezaljka TS „pluta”, napon na stezaljci je manji od donjega praga i punjenje ne radi. Kako bi se mjerjenje temperature onemogućilo napon na TS stezaljci mora biti veći od 70% napona na stezaljci DRV. Iz tog razloga proizvođač preporučuje kratko spajanje stezaljka TS i DRV kako bi punjenje cijelo vrijeme bilo omogućeno.

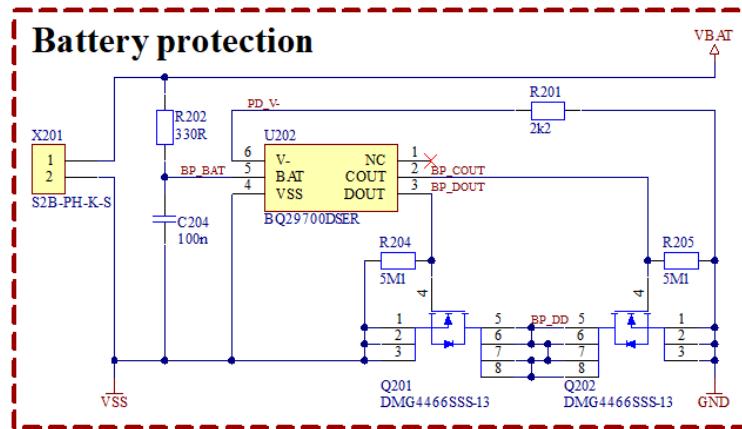


Slika 4.12. Mjerjenje temprature senzora

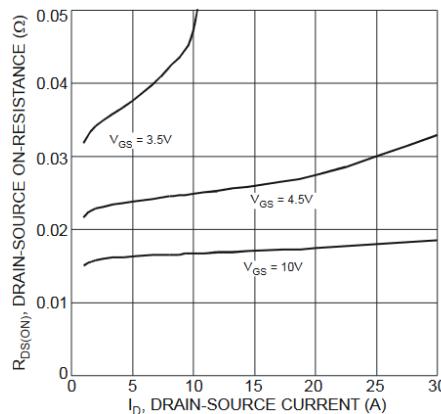
4.5.2. Baterijska zaštita

Shema baterijske zaštite na narukvici je prikazana na slici 4.13. Shema je slična onoj s glavne ploče na slici 3.15., a ovdje su tranzistori pažljivije odabrani. Maksimalna struja pražnjenja iznosi, prema 4.5., iznosi 426.12 mA. Za aktivaciju zaštite uzet će se struja od $I_{OCD} = 1.5 \text{ A}$, dakle otpor obaju FET-ova prema jednadžbi 3.9 iznosi

$2R_{DS(on)} = 66.67 \text{ m}\Omega$. Na temelju toga, struja na kojoj će se aktivirati zaštita za punjenje iznosi $I_{OCC} = 1.5 \text{ A}$. Dakle, tranzistor treba imati otpor $R_{DS(on)} = 33.33 \text{ m}\Omega$. Struja na kojoj će se aktivirati zaštita od kratkog spoja iznosi $I_{SCD} = 7.5 \text{ A}$, tako da tranzistor mora moći podnijeti tu struju. Prikaz promjene otpora u ovisnosti o naponu i struji odbranog tranzistora prikazana je na slici 4.14. Vidljivo je da će otpor biti veći s većom strujom, što znači da će se zaštita aktivirati nešto prije vrijednosti proračunatih pragova, a opet se neće aktivirati prerano da se onemogući punjenje, što je i poželjno s perspektive sigurnosti. Očito je da je ovo bolje projektirana zaštita u odnosu na onu na glavnoj ploči.



Slika 4.13. Baterijska zaštita na narukvici



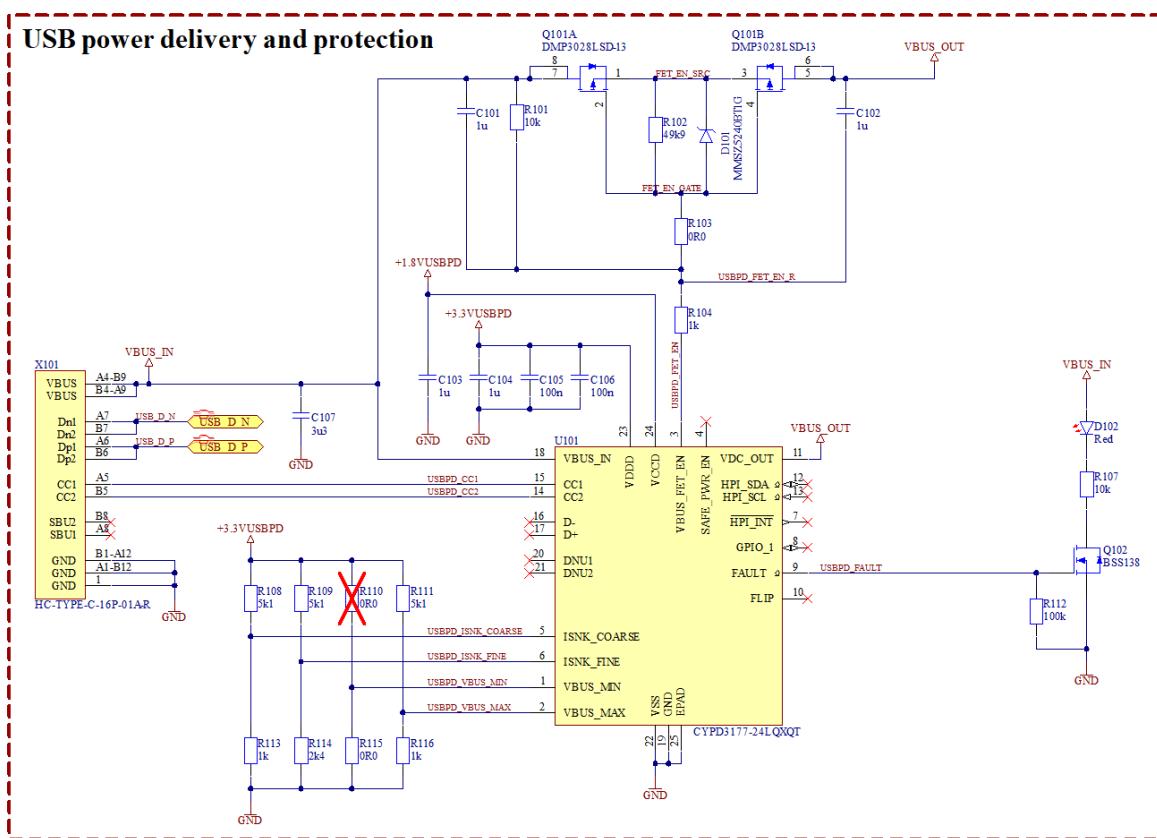
Slika 4.14. Graf ovisnosti otpora o naponu između upravljačke elektrode i uvoda tranzistora DMG4466SSS-13 [19]

Ovdje su još dodani i otpori između upravljačke elektrode i uvoda tranzistora koji služe za bolje izbijanje naboja na kapacitetu između upravljačke elektrode i uvoda tranzistora [11].

4.6. USB napajanje

Shema USB napajanja narukvice prikazana je na slici 4.15. Dodan je pritezni otpornik R102 koji osigurava da ne dolazi do smanjenja napona na uvodu tranzistora Q101B radi diode u tranzistoru Q101A. Dodana je i Zener dioda od 10 V koja služi za zaštitu od prevelikog napona.

Osim toga, naponska djelila koja služe za podešavanje struje i napona USB-a se sada napajaju s internog regulatora čipa. Kod središnjeg uređaja (slika 3.18.) su se napajala s regulatora od 3.3 V koji se nalazi na pločici, što je u redu dok god je prikopčana puna baterija. Međutim, u slučaju prazne ili iskopčane baterije dolazi do problema, jer je sada sustav ostao bez napajanja i ne mogu se podesiti naponi i struje USB-a. To je veoma grub previd i ispravljen je na ovaj način, što je i preporuka proizvođača.



Slika 4.15. USB napajanje na narukvici

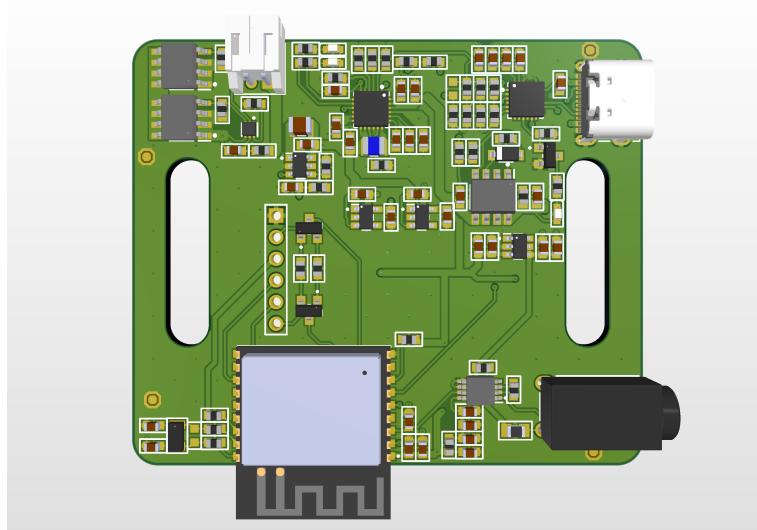
4.7. PCB

Tijekom projektiranja PCB osim što je bilo potrebno paziti na iste probleme kao i kod glavne ploče, bilo je potrebno paziti na ograničenje prostora i dvostranu montažu. Na slikama 4.16. i 4.17. prikazan je 3D prikaz projektirane pločice.

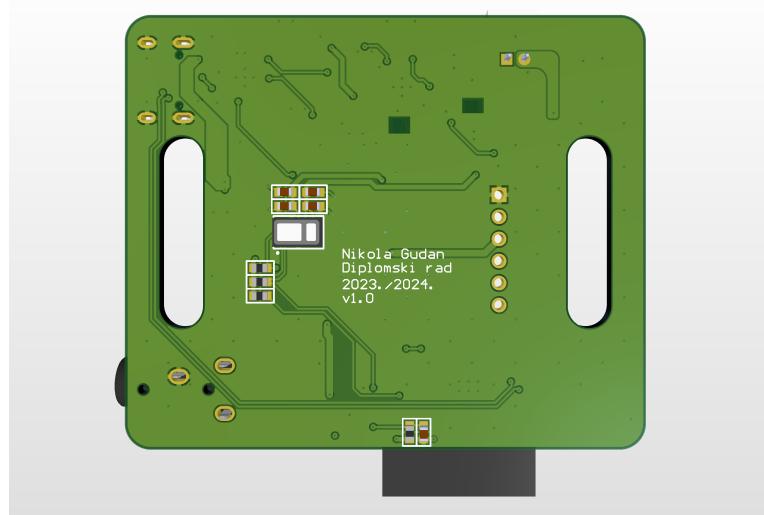
Za razliku od glavne ploče, ovdje je podsustav za bežičnu komunikaciju postavljen tako da se antena nalazi u potpunosti izvan pločice. Tako će podsustav bolje primati signale i stvarati manje smetnje na pločicu tijekom slanja signala.

Ideja je da se PPG senzor nalazi na dijelu narukvice koja ostvaruje kontakt s kožom, pa je radi toga potrebno bilo postaviti senzor na donji sloj pločice (slika 4.17.).

Radi ograničenja prostora maknute su sve testne točke i kratkospojnici.



Slika 4.16. 3D prikaz gornjeg sloja pločice



Slika 4.17. 3D prikaz donjeg sloja pločice

5. Ispitivanje

Ispitani su sustavi za napajanje, komunikacije između dijelova sustava, bežična komunikacija, upisivanje korisničkog programa u Flash memoriju mikrokontrolera, snimanje zvuka, pohrana podataka na SD karticu, RTC, komunikacija s PPG senzorom i mjerjenje impedancije kože.

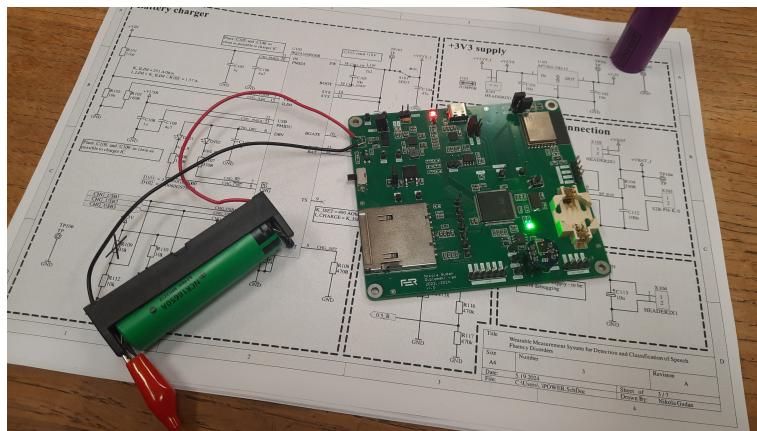
U svim testovima korišten je multimetar za mjerjenje napona i osciloskop za promatranje signala u komunikacijama između sustava. Za ispitivanje napajanja korišteni su USB strujni adapter koji podržava mogućnost brzog punjenja, razne litij-ionske baterije u 18650 kućištu i USB ispitivač UT658DUAL tvrtke Changan UNI-T prikazan na slici 5.1. Ovaj uređaj se može spojiti između USB izvora i uređaja te pokazuje razinu napona, jakost struje koju izvor daje, količinu potrošenog naboja u mAH i vrijeme trajanja mjenja.



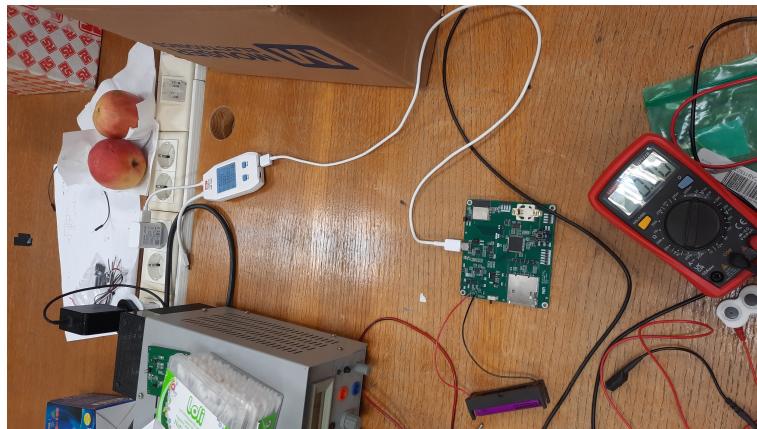
Slika 5.1. USB ispitivač UT658DUAL

5.1. Središnji uređaj

Na slikama 5.2. i 5.3. prikazano je ispitivanje središnjeg uređaja. Umjesto priključka za bateriju namontiran je držač za standardnu 18650 bateriju radi lakšeg testiranja. Naime, baterija se često vadi i stavlja tijekom testiranja, a odabran priključak je predviđen da se rijetko otkapča, pa ga je radi toga i teško otkopčati.



Slika 5.2. Ispitivanje pločice središnjeg uređaja



Slika 5.3. Postav ispitivanja pločice središnjeg uređaja

Oktrivena je greška u dizajnu USB napajanja. Kada se spoji USB, bez obzira na to da li izvor podržava zatraženu snagu ili ne, napajanje sa USB-a se ne prosljeđuje dalje na ostatak sustava. Problem se nalazi u tranzistorskoj sklopci (slika 3.18.). Naime, kada čip pokuša uključiti tranzistore, na prvom tranzistoru dolazi do pada napona na porednoj diodi koja se nalazi unutar tranzistora, pa se na uvodu drugog tranzistora nalazi napon napajanja umanjen za napon provoda diode (između 0.5 V i 1.2 V [20]). Čip je preko VDC_OUT stezeljke onda detektirao prevelik pad napona i onemogućio napajanje sa

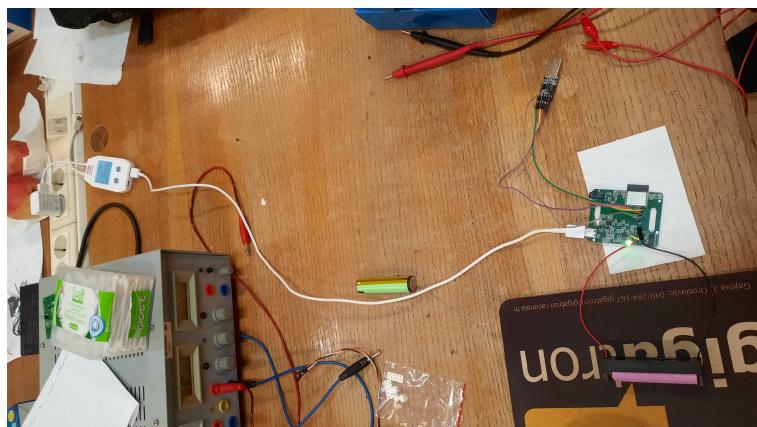
USB-a. Radi toga su napravljene izmjene u USB napajanju kod narukvice vidljive na slici 4.15.

Kada baterija nije bila spojena, nije bilo moguće uključiti USB napajanje iz razloga objašnjeno u potpoglavlju 4.6. Ukratko, čip nije mogao postaviti odgovarajuće otpornike na CC linije pa se nije mogla zatražiti nikakva snaga od USB izvora.

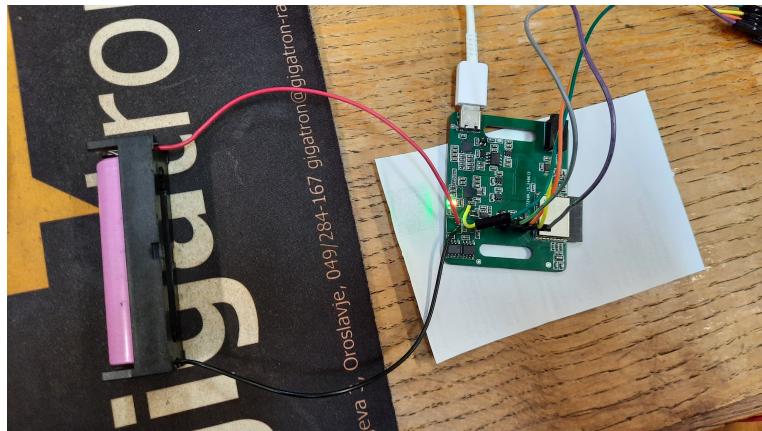
Tijekom testiranja punjača utvrđeno je da punjač može bez problema proslijediti napon baterije na izlaz. Međutim, kada se je priključio vanjski napon, bilo na USB ili preko priključka za laboratorijski izvor napona u svrhu punjenja baterije, punjač više nije radio. Bilo je vidljivo treptanje svjetlećih dioda za indikaciju ispravnog napajanja i punjenja u frekvenciji 1 treptaj po sekundi. Naime, dolazi do aktiviranja temperaturne zaštite na način opisan u potpoglavlju 4.5.

Tijekom čekanja izrade tiskane pločice, razvijena je cijelokupna programska podrška za središnji uređaj. S obzirom na to da većina napajanja, izuzev baterije, nije radila, tijekom testiranja programske podrške, a samim time i digitalnog dijela sustava, uređaj se je napajao preko programatora, koji je bio priključen na pločicu cijelo vrijeme tijekom testiranja programske podrške. Utvrđeno je da mikrofon normalno snima govor, mikrokontroler komunicira sa svim podsustavima te također bez poteškoća obrađuje i sprema podatke na SD karticu, bežični podsustav se uspješno može programirati i RTC mjeri vrijeme napajavši se sa litijsko baterije. Dakle, digitalni dio sustava u potpunosti radi.

5.2. Narukvica



Slika 5.4. Postava ispitivanja pločice narukvice



Slika 5.5. Ispitivanje pločice narukvice

Na temelju ispitivanja središnjeg uređaja, napravljene su izmjene i popravci napajanja opisani u poglavlju 4. Prikaz ispitivanja se nalazi na slikama 5.4. i 5.5.

Tijekom ispitivanja primjećena je greška u dizajnu baterijskog napajanja. Ime mreže koja je spojena na pozitivan terminal baterije (slika 4.13.) i ime mreže koja je spojena na ulaz za bateriju na punjaču (slika 4.11.) su različiti. Radi toga baterija, nakon zaštite, efektivno nije bila nigdje spojena, pa je bilo potrebno te dvije mreže kratko spojiti žicom.

Napajanje sada radi. Podsustav za USB napajanje sada može upravljati napajanjem i kada je na uređaj spojeno samo USB napajanje, a i cijelokupna narukvica se sada može napajati sa USB-a i kada baterija nije spojena. Baterijski punjač može proslijediti napajanje baterije ili može regulirati napajanje USB-a. Punjenje baterije konstantnom strujom



Slika 5.6. Brzo punjenje, punjenje konstantnom strujom

i konstantnim naponom prikazano je na slikama 5.6. i 5.7. Sustav ima napajanje i tijekom punjenja, dakle punjač sada isto radi. Prekidački i linearni regulatori provjereni su multimetrom i na svom izlazu pokazuju napon za koji su projektirani.

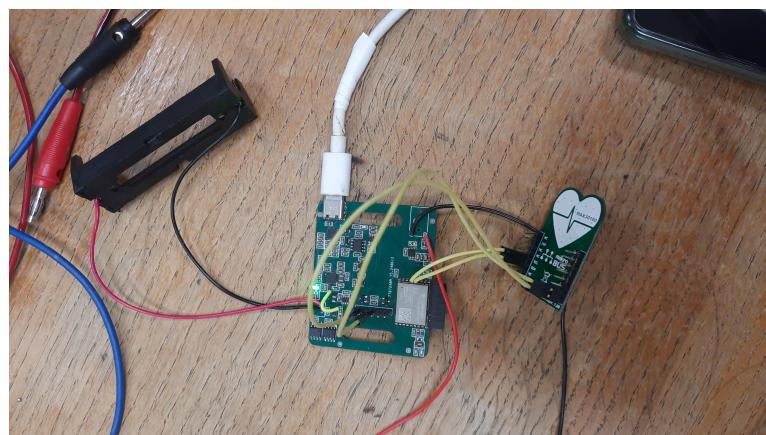


Slika 5.7. Brzo punjenje, punjenje konstantnim naponom

Tijekom ispitivanja mjernog lanca za EDR primjećeno je da je priključak za elektrode veoma loše kvalitete jer se je stalno gubio kontakt. Radi toga je taj priključak odlemljen, a žice za EDR su onda direktno zalemljene na pločicu. Još jedan problem je osciliranje pojačala, a to je rješeno preuzorkovanjem i usrednjavanjem više mjerena sa ADC-a. Nakon toga su se dobivala stabilna mjerena koja su odgovarala očekivanim rezultatima.

PPG senzor se nažalost nije mogao ispitati. Naime, tijekom montaže, gornji sloj pločice se je lemio pomoću infracrvene peći radi velike količine komponenata, dok je donji sloj lemljen pomoću vrućeg zraka. Senzor nije predviđen za montažu vrućim zrakom, pa se je tijekom lemljenja oštetio i otpalo je stakalce koje štiti diode i fotodetektor. Također nije bilo moguće provjeriti kvalitetu lemnog spoja jer se stezaljke nalaze ispod čipa. Radi toga je na sustav spojen modul sa senzorom MAX30100, koji se od MAX30101 razlikuje u nedostatku zelene svjetleće diode. Prikaz načina spoja modula na pločicu prikazan je na slici 5.8. Na ovaj način ispitana je razvijena programska podrška za PPG mjerjenje. S obzirom da se radi o modulu, sklopovsko rješenje je očito ispravno.

ESP modul koji se nalazi na pločici programiran je putem USB sučelja.



Slika 5.8. Spoj modula sa MAX30100 na pločicu

6. Zaključak

S obzirom na zahtjeve uređaja, sklopolje prototipa uređaja razvijeno u ovome radu bi se moglo smatrati skoro gotovim. Jedini dio sustava s kojim je došlo do poteškoća, gleđajući sa strane dizajna, jest napajanje, a i kasnije su spomenute poteškoće otklonjene ispravnim dizajnom. Drugi problem je bio dvostrana montaža pločice. Međutim, imajući na umu da se u ovom radu pločica montirala ručno, moguće je zaključiti da do ovakvih problema neće doći u uvjetima profesionalne proizvodnje. Sljedeći korak bi bio ovaj prototip unaprijediti tako da bude što manje invazivan na udobnost korisnika kako bi se u potpunosti ispunili zahtjevi na uređaj.

Za početak, potrebno je dizajnirati elektrode za mjerjenje impedancije kože. U sadašnjem stadiju, impedancija se mjeri preko samoljepljivih elektroda spojenih na uređaj s pomoću veoma duge žice. Očito je da je takva metoda u potpunosti neprihvatljiva za korisnika koji bi ovaj uređaj trebao nositi cijeli dan uokolo dok obavlja razne zadatke. Cilj je napraviti narukvicu koja će elektrode imati izložene na kućištu narukvice, koja će tako ostvarivati kontakt s kožom. Elektrode bi se onda montirale na donju stranu pločice, kao što je zamišljeno s PPG senzorom.

Nadalje, potrebno je smanjiti fizičke dimenzije pločica. To će se ostvariti uklanjanjem testnih točaka i kratkospojnika koji zauzimaju veliku količinu prostora, kako radi svoje veličine, tako radi svojih velikih međusobnih razmaka na pločici koji su bili potrebnii za ispravno i jednostavno testiranje. Još jedan značajniji način na koji će se smanjiti veličina pločice jest korištenje manjih komponenata. To su većinom pasivne komponente, koje su trenutačno u 0603 kućištu, a odokativnom procjenom, korištenje kućišta 0402 bi već smanjile dimenzije pločica za više od pola. Tu je također priključak za SD karticu, koji zauzima površinu veličine sustava za bežičnu komunikaciju. Korištenjem microSD kartice ta površina će se smanjiti četiri puta. Također bi bilo moguće smanjiti sustav za

bežičnu komunikaciju tako da se dizajnira vlastiti sustav od diskretnih komponenata, za razliku od modula koji se trenutačno nalazi na pločici.

Također je potrebno promijeniti mikrofon. Naime, mikrofon se sada nalazi montiran direktno na pločicu središnjeg sustava. To je nepraktično jer bi korisnik morao nositi kutiju značajne veličine montiranu negdje blizu glave radi boljeg primitka zvuka. To bi se moglo riješiti klasičnim mikrofonom u bubici, koja je dizajnirana upravo tako da se zakači što bliže glavi, a da pritom što manje smeta. Taj bi se mikrofon onda mogao spajati na središnji sustav žicom koji se nalazi negdje blizu struka korisnika ili gdje god ga korisnik želi montirati.

Iako je filtriranje signala sa sustava za mjerjenje impedancije kože izvedeno softverski, bilo bi bolje to učiniti sklopovski. Koristi se manje procesorskih resursa i time se više vremena prepušta mjerenu. To se može napraviti klasičnim niskopropusnim filtrom prvoga reda. Impedancija kože se vrlo sporo mijenja, pa će takav filter biti dovoljno dobar za ovu situaciju.

Naravno, nema smisla da korisnik uokolo hoda s golim pločicama, iz očitih razloga. Potrebno je dizajnirati kućište i način na koji će korisnik uređaj staviti na sebe, a da mu on što manje smeta dok ga nosi.

Literatura

- [1] WHO, “Manual of the international statistical classification of diseases, injuries, and causes of death”, u *International Classification of Diseases*, sv. 1. World Health Organization, 1977.
- [2] J. S. Y. S. E. Tichenor, “Variability of stuttering: Behavior and impact”, *American Journal of Speech-Language Pathology*, sv. 30, br. 1, str. 75–88, 2021. https://doi.org/10.1044/2020_AJSLP-20-00112
- [3] M. Savić i G. Geršak, “Metrological traceability of a system for measuring electrodermal activity”, *Measurement*, sv. 59, str. 192–197, 01 2015. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.010>
- [4] P. A. Alm, “Stuttering, emotions, and heart rate during anticipatory anxiety: a critical review”, *Journal of Fluency Disorders*, sv. 29, br. 2, str. 123–133, 2004. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfludis.2004.02.001>
- [5] *Getting started with STM32F7 Series MCU hardware development*, STMicroelectronics, Veljača 2017., rev. 5.
- [6] *Oscillator design guide for STM8AF/AL/S, STM32 MCUs and MPUs*, STMicroelectronics, Travanj 2023., rev. 19.
- [7] *PCF8563 Real-time clock/calendar*, NXP USA Inc, Listopad 2015., rev. 11.
- [8] *ESP32-C3-WROOM-02 Datasheet*, Espressif Systme, Veljača 2023., v1.3.
- [9] *Microphone coupon board based on the IMP34DT05 digital MEMS*, STMicroelectronics, Lipanj 2018., rev. 1.

- [10] *2.5A, Dual-Input, Single Cell Switch Mode Li-Ion Battery Charger with Power Path Management*, Texas Instruments, Ožujak 2013., rev. B.
- [11] *BQ297xx Cost-Effective Voltage and Current Protection Integrated Circuit for Single-Cell Li-Ion and Li-Polymer Batteries*, Texas Instruments, Lipanj 2021., rev. H.
- [12] *CSD16406Q3 N-Channel NexFET™ Power MOSFET*, Texas Instruments, Prosinac 2015., rev. B.
- [13] *A Primer on USB Type-C® and USB Power Delivery Applications and Requirements*, Texas Instruments, Ožujak 2022., rev. B.
- [14] *USB Type-C Port Controller for Power Sinks*, Cypress Technologies, Svibanj 2021., rev. B.
- [15] *Wide Supply Range, Rail-to-Rail Output Instrumentation Amplifier*, Analog Devices, Listopad 2019., rev. D.
- [16] J. Malmivuo i R. Plonsey, *Bioelectromagnetism. 27. The Electrodermal Response*, 01 1995., str. 428–434.
- [17] *High-Sensitivity Pulse Oximeter and Heart-Rate Sensor for Wearable Health*, Analog Devices, Lipanj 2020., rev. 3.
- [18] *TLV61220 Low-Input Voltage Step-Up Converter in Thin SOT-23 Package*, Texas Instruments, Svibanj 2014., rev. A.
- [19] *N-Channel Enhancement Mode MOSFET*, Diodes Incorporated, Rujan 2013., rev. 4.
- [20] *DUAL P-CHANNEL ENHANCEMENT MODE MOSFET*, Diodes Incorporated, Si-ječanj 2014., rev. 4.

Sažetak

Nosivi mjerni sustav za prepoznavanje i klasifikaciju poremećaja tečnosti govora

Nikola Gudan

Projektiranje i izrada sklopolja za nosivi mjerni sustav za prepoznavanje i klasifikaciju poremećaja tečnosti govora. Sustav se sastoji od dva nosiva uređaja. Jedan je za snimanje glasovnih podataka s MEMS mikrofonom, obradu podataka i njihovu pohranu na SD karticu. Drugi je za snimanje biomedicinskih signala (PPG i EDR) u obliku nosive narukvice. Oba sustava imaju funkcije bežične komunikacije preko Wi-Fi ili Bluetooth sučelja, napajanje s litij-ionskom baterijom te napajanje i punjenje preko USB C sučelja. Opisani su dizajn sustava, projektiranje tiskane pločice i funkcionalno ispitivanje sastavljenih uređaja.

Ključne riječi: MEMS mikrofon, SD kartica, PPG, EDR, Wi-Fi, Bluetooth, litij-ionska baterija, USB C sučelje

Abstract

Wearable measurement system for detection and classification of speech fluency disorders

Nikola Gudan

Design and production of hardware for a wearable measurement system for the recognition and classification of speech fluency disorders. The system consists of two wearable devices. One is for recording voice data with a MEMS microphone, processing the data, and storing it on an SD card. The other is for recording biomedical signals (PPG and EDR) in the form of a wearable wristband. Both systems have wireless communication functions via Wi-Fi or Bluetooth interfaces, are powered by a lithium-ion battery, and can be powered and charged via a USB-C interface. The design of the system, the printed circuit board (PCB) design, and the functional testing of the assembled devices are described.

Keywords: MEMS microphone, SD card, PPG, EDR, Wi-Fi, Bluetooth, Lithium-Ion Battery, USB C Interface