

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. Glavna ploča	4
2.1. Mikrokontroler	5
2.1.1. Pierceov oscilator	8
2.1.2. Dizajn oscilatora	9
2.2. RTC	10
2.3. Bežična komunikacija	11
2.4. SD kartica i konektori	11
2.5. Potrošnja	13
2.6. Napajanje i punjač baterije	14
2.7. USB napajanje	20
2.8. PCB	23
3. Narukvica	26
3.1. Bežična komunikacija	26
3.2. Fotopletizmografski senzor	28
3.3. Impedancija kože	29
3.4. Napajanje	30
3.4.1. Proračun potrošnje	30
3.4.2. Napajanja od 3.3 V i 1.8 V	31
3.4.3. Referentni napon	31
3.4.4. Napajanje od 5 V	32
3.5. Baterija i punjač baterije	32
3.5.1. Punjač baterije	32

3.5.2. Baterijska zaštita	34
3.6. PCB	36
4. Testiranje	38
4.1. Glavna ploča	38
5. Zaključak	39
Literatura	40
Sažetak	42
Abstract	43

1. Uvod

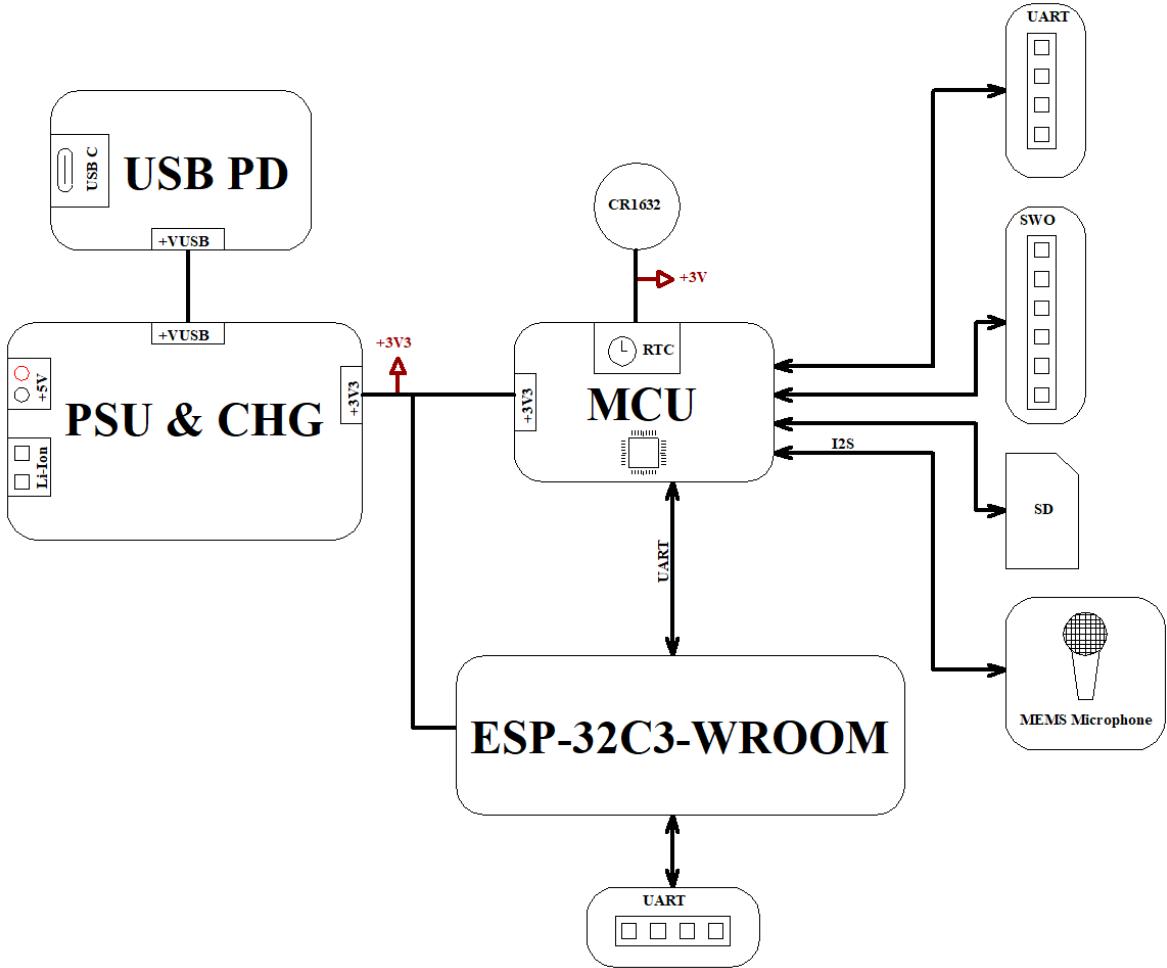
2. Glavna ploča

Sustav se sastoji od dva uređaja koji rade u simbiozi. Glavna ploča služi za snimanje, obradu i pohranu glasovnih podataka i obradu i pohranu biomedicinskih parametara. Za snimanje biomedicinskih parametara koristi se narukvica. U ovom poglavlju se opisuje glavna ploča.

Zahtjevi na glavnu ploču su sljedeći:

- mikrokontroler (engl.*Microcontroller Unit, MCU*), dovoljno moćan za pokretanje neuralnih mreža i obradu podataka,
- konektor za SD karticu,
- bežična komunikacija putem Wi-Fi ili Bluetooth sučelja,
- praćenje vremena putem RTC-a,
- mikrofon za prikupljanje govora korisnika,
- sučelja za testiranje i prženje koda na mikrokontroler,
- napajanje i punjenje baterije preko USB C priključka,
- baterijsko napajanje putem litij-ionske baterije.

Blok dijagram glavne ploče je prikazan na slici 2.1. U dalnjem tekstu ovog poglavlja opisane su odabrane komponente, kao i razlog njihova odabira, način, razlozi i proračuni dizajna pojedinih podsustava, te dizajn, proizvodnja i testiranje PCB-a.



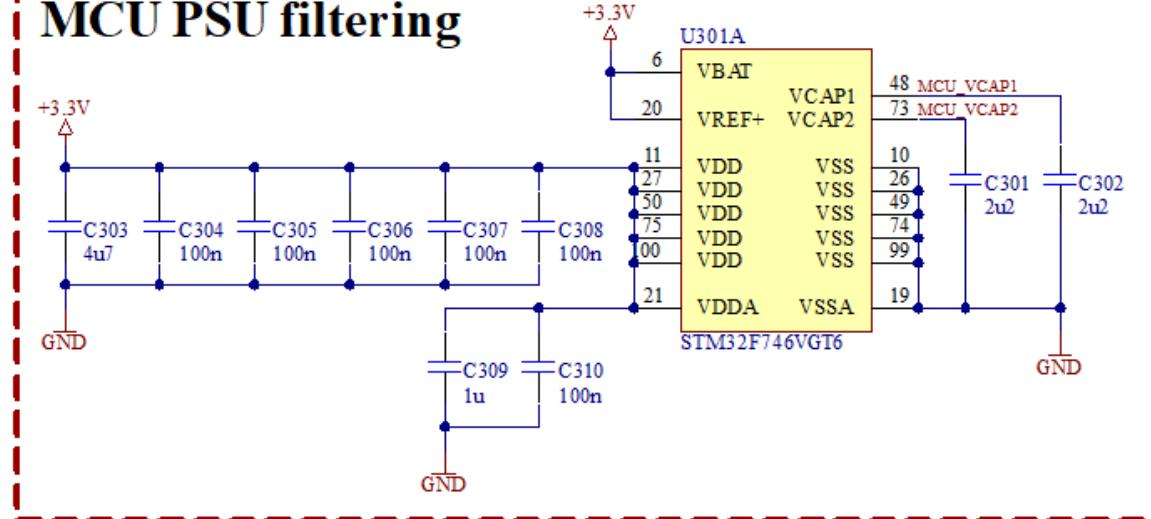
Slika 2.1. Blok dijagram glavne ploče

2.1. Mikrokontroler

Za mikrokontroler odabran je STM32F746VG baziran na Cortex-M7 arhitekturi koji integrira funkcionalnosti digitalne obrade signala, bogat sa svim potrebnim periferijama za integriranje s ostatkom sustava i dovoljno procesorske snage za obavljanje zadatog zadataka. Također, programska potpora je razvijena na razvojnem sustavu BLABLABLA, pa je ovaj mikrokontroler odabran radi lakšeg razvoja cijelokupnog sustava. Shema napajanja mikrokontrolera prikazana je na slici 2.2., a shema spajanja mikrokontrolera s ostatkom sustava prikazana je na slici 2.3.

Shema napajanja napravljena je prema uputama proizvođača [1]. S obzirom na to da na ovoj ploči nema analognih signala, nije potrebno raditi analogno-digitalnu pretvorbu, pa su stezaljke za napajanje analognog dijela mikrokontrolera spojene sa stezaljkama za napajanje digitalnog dijela. Također, nije potrebna precizna naponska referenca, a bate-

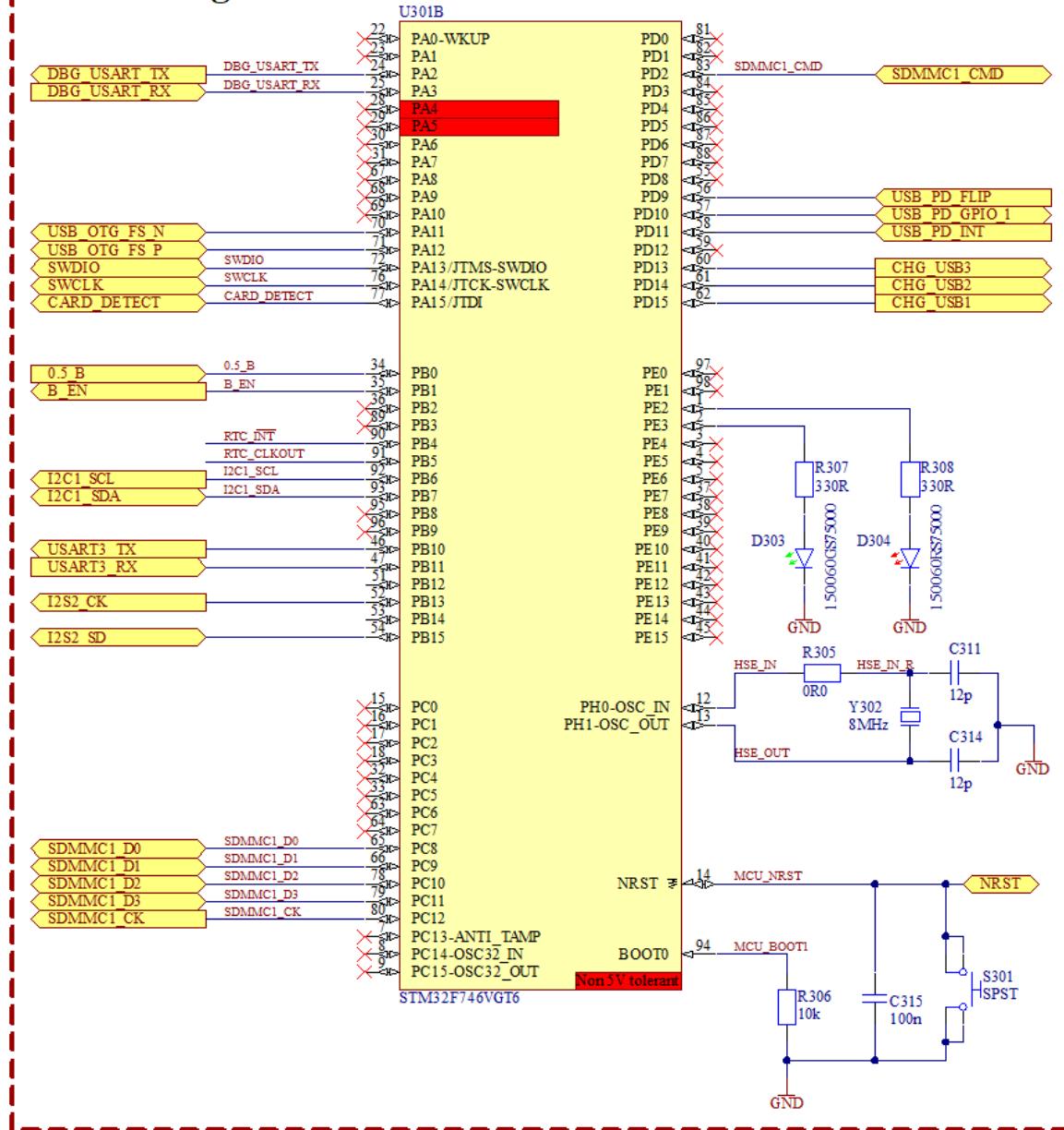
MCU PSU filtering



Slika 2.2. Shema napajanja mikrokontrolera

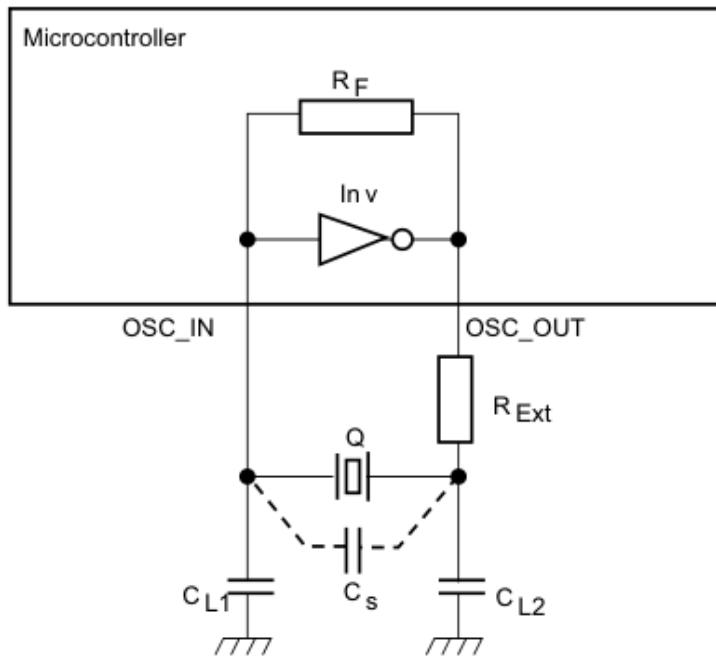
rijskim napajanjem će upravljati vanjski čip, pa su te dvije stezaljke spojene na napajanje od +3.3 V.

MCU configuration and connections



Slika 2.3. Shema periferije mikrokontrolera

Postavljene su dvije svjetleće diode za pomoć pri programiranju i tipka za reset mikrokontrolera. Kod određivanja korištenih stezaljki za pomoć je korišteno razvojno okruženje STM32CubeIDE. Dizajn oscilatora opisan je u priručniku proizvođača STMicroelectronics [2]. Oscilator koji mikrokontroler koristi je Pierceov oscilator (slika 2.4.).



Slika 2.4. Shema Piercovog oscilatora [2]

2.1.1. 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} , vanjskih kapaciteta opterećenja C_{L1} i C_{L2} , parazitskog kapaciteta PCB-a i kapaciteta između stezaljki mikrokontrolera C_s .

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

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

$$C_L = \frac{C_{L1} \cdot C_{L2}}{C_{L1} + C_{L2}} + C_s \quad (2.1)$$

Kod dizajna oscilatora potrebno je izračunati kritično pojačanje petlje:

$$g_{mcrit} = 4 \cdot ESR \cdot (2\pi F)^2 \cdot (C_0 + C_L)^2 \quad (2.2)$$

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 transkonduktivnosti g_m u dokumentaciji mikrokontrolera. Da bi oscilator proradio mora se proračunati margina pojačanja i treba vrijediti:

$$gain_{margin} = \frac{g_m}{g_{mcrit}} > 5 \quad (2.3)$$

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:

$$R_{Ext} = \frac{1}{2\pi F C_{L2}} \quad (2.4)$$

2.1.2. Dizajn oscilatora

Oscilator je vidljiv na slici 2.3. Odabran je kristal NX8045GB proizvođača NDK. Njegove karakteristike su sljedeće:

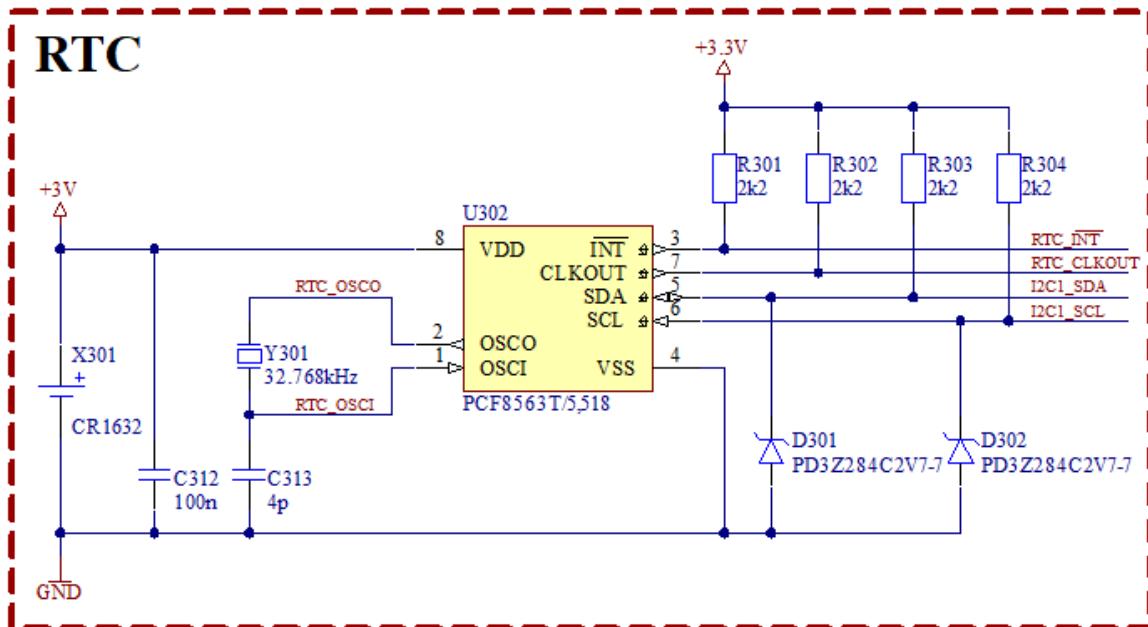
- $C_L = 2 \text{ pF}$
- $ESR = 200 \Omega$
- $F = 8 \text{ MHz}$

C_0 nije naznačen pa se uzima vrijednost 0. Uzimajući za parazitni kapacitet $C_s = 2 \text{ pF}$, i koristeći formulu 2.1 dobiju se vrijednosti kondenzatora $C_{L1} = C_{L2} = 12 \text{ pF}$. Odabir pa-

razitnog kapaciteta je odokativan jer se ne može znati unaprijed bez mjeranja 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 2.2 dobiva se $g_{mcrit} = 0.1294 \text{ mA/V}$. Iz dokumentacije mikrokontrolera se dobiva $g_m = 1 \text{ mA/V}$. Iz uvjeta 2.3 dobiva se $gain_{margin} = 7.73$, čime je uvjet zadovoljen. S obzirom na to 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 2.4

2.2. RTC

S obzirom na to da uređaj treba uskladiti podatke s mikrofona i narukvice potrebno je precizno praćenje vremena. U tu svrhu dodan je vanjski RTC PCF8653 proizvođača NXP [3]. Za ovaj čip postoji već razvijena programska podrška u ZephyrOS operacijskom sustavu za rad u stvarnom vremenu, pa je razvoj programske potpore za uređaj znatno olakšana. Shema RTC-a prikazana je na slici 2.5. S obzirom na to da se litij-ionska baterija, koja

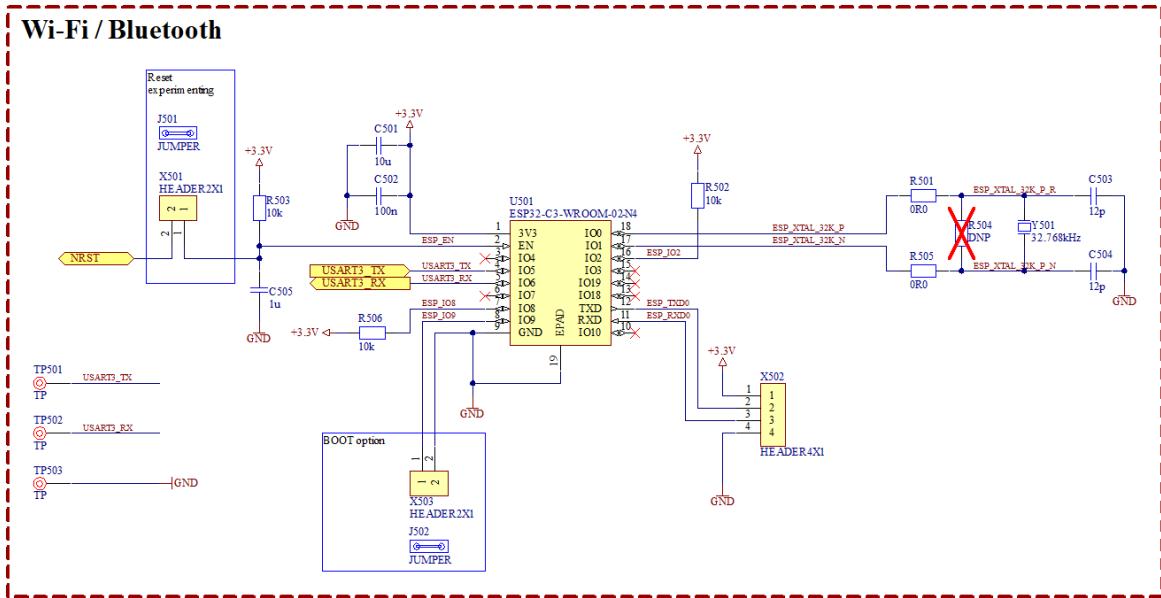


Slika 2.5. Shema RTC-a

napaja cijeli uređaj, može isprazniti, otkopčati ili na neki drugi način se može prekinuti

napajanje s vanjske baterije, RTC se napaja iz litijске baterije kako praćenje vremena ne bi bilo izgubljeno. S obzirom na to da je napon litijске 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 čipa tijekom komunikacije s mikrokontrolerom.

2.3. Bežična komunikacija

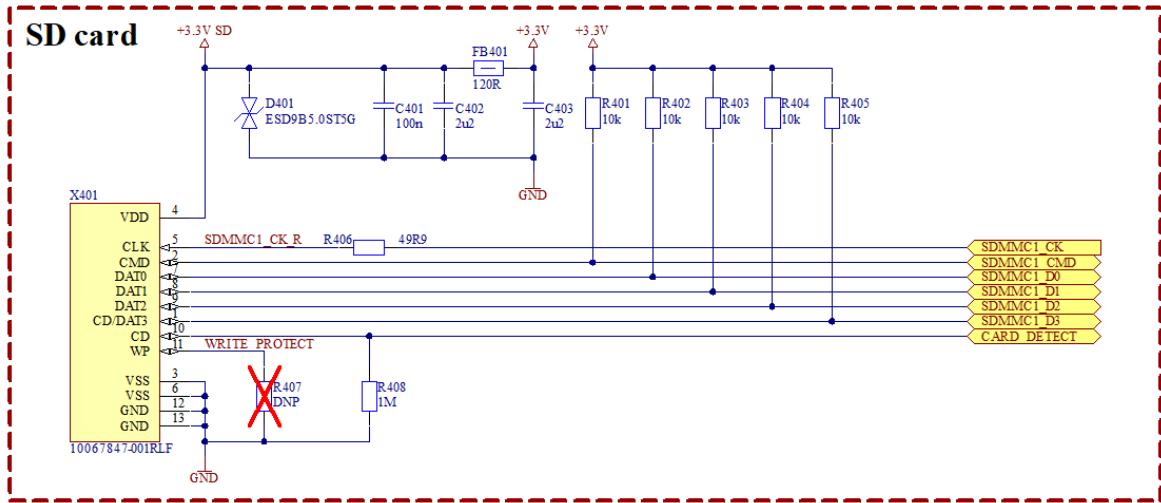


Slika 2.6. Shema podsustava za bežičnu komunikaciju

Shema podsustava za bežičnu komunikaciju prikazana je na slici 2.6. Radi lakšeg razvoja odabran je razvojni sustav ESP32-C3-WROOM-02 proizvođača Espressif Systems. Shema je razvijena prema preporukama proizvođača [4]. Dodan je još jedan kratkospojnik za ispitivanje funkcionalnosti reseta sustava.

2.4. SD kartica i konektori

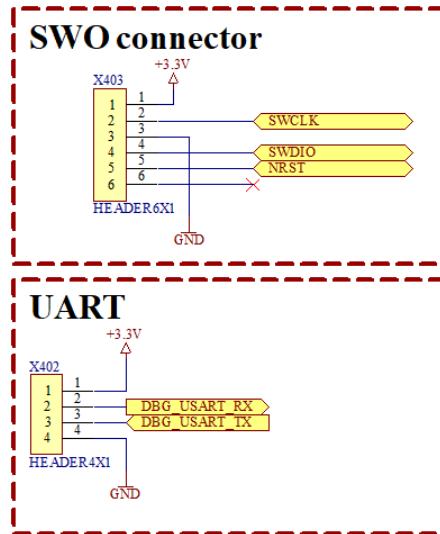
Za pohranu podataka na uređaju se nalazi SD kartica standardne veličine. Razlog oda-bira ove veličine jest taj da uređaj onda podržava i standardnu SD karticu i adapter za SD kartice manje veličine. Shema SD konektora prikazana je na slici 2.7. Konektor ima ESD zaštitu u obliku diode D401 i filtriranje napajanja preko mreže koja se sastoji od kondenzatora i feritne perle. Na svim komunikacijskim linijama se nalaze pritezni otpornici, a linija za takt ima terminacijski otpor od 49.9Ω kako bi se suzbilo odzvanjanje. Kako



Slika 2.7. Shema konektora SD kartice

CD stezaljka za detekciju spojene kartice ne bi ostala plutajuća dodan je pritezni otpornik od $1\text{ M}\Omega$. Razlog odabira tako velikog otpora je unutarnji pritezni otpornik prema napajanju na SD karticama, pa se velikim otporom suzbija efekt naponskog djelila.

Za prženje korisničkog programa na mikrokontroler 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 2.8.



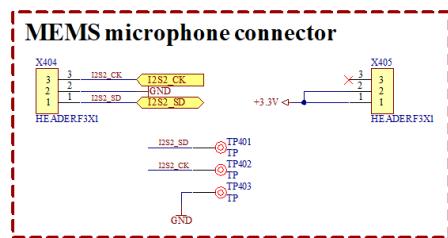
Slika 2.8. Shema konektora za UART i SWO sučelje

Za mikrofon se koristi evaluacijska pločica STEVAL-MIC003V1 (slika 2.9.) na kojoj se nalazi MEMS mikrofon IMP34DT05 proizvođača STMicroelectronics [5]. 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 2.10.). Kraj



Slika 2.9. STEVAL-MIC003V1



Slika 2.10. Konektori za MEMS

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

2.5. Potrošnja

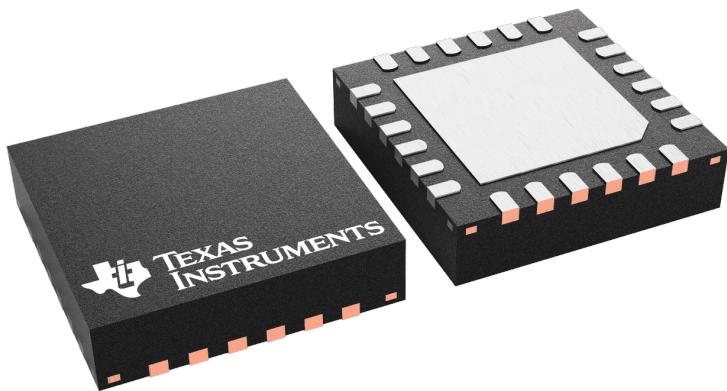
Sada kada su sve komponente odabrane, moguće je napraviti proračun potrošnje kako bi se mogao dizajnirati sustav napajanja. Napravljena je tablica potrošnje za sustave koji se napajaju sa 3.3 V (tablica 2.1.). Za maksimalne i minimalne vrijednosti potrošnje uzeti su podaci iz dokumentacije komponenata, a prosječna potrošnja je uzeta odokativno jer je nemoguće znati prosječnu potrošnju bez mjerjenja. Sada je moguće odabrati prikladne komponente za napajanje.

Tablica 2.1. 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

2.6. Napajanje i punjač baterije

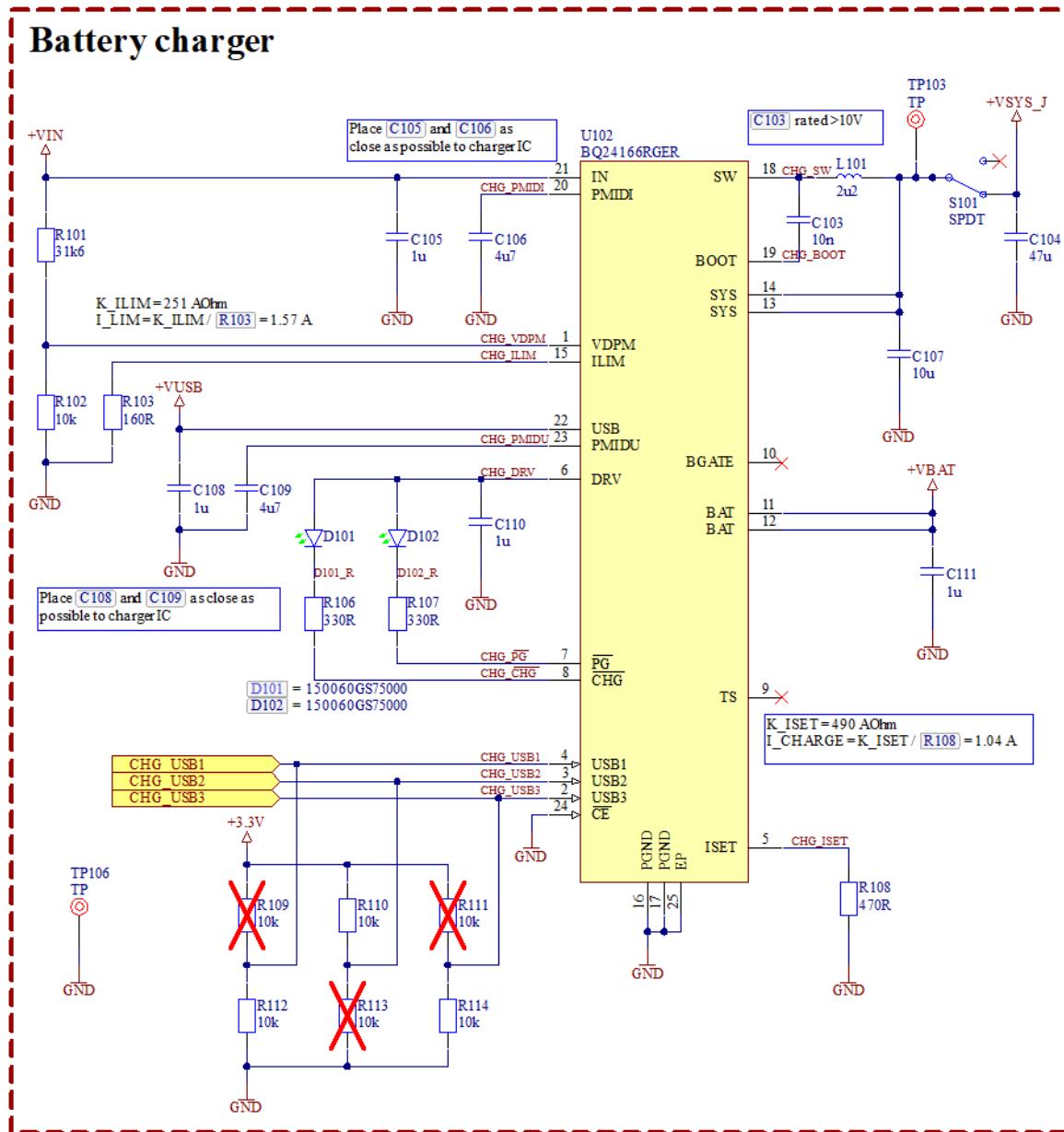
Za punjač baterije odabran je BQ24166 proizvođača Texas Instruments (slika 2.11.). Ovaj integrirani krug u sebi ima integriran sustav za upravljanje tokom snage [6]. BQ24166 se može napajati s dva ulaza; ulaz za USB ili ulaz za druge vrste napajanja (AC/DC adapter, DC laboratorijski izvor napajanja, 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 čip 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 čipa nije spojeno ništa, onda se na izlaz direktno proslijeđuje 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 prednapona, 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 2.12. Blokadni kon-



Slika 2.11. BQ24166 u QFN kućištu

denzatori 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 odgovarajuć način, potrebno je znati izlaznu struju iz punjača.



Slika 2.12. Shema baterijskog punjača

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 2.14.). Imajući na umu da je ulazna struja linearnog regulatora otprilike ista kao i izlazna struja, dobiva se izlazna struja baterijskog punjača, što odgовара proračunu iz tablice 2.1., 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 dvostrukе izlazne struje, što je slučaj najveće valovitosti.

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 2.2. Uobičajeno ograničenje u ovom slučaju je 1.5 A.

Tablica 2.2. Ograničenja struje USB-a [6]

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

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 se nalazi silazni pretvarač, dakle vrijedi:

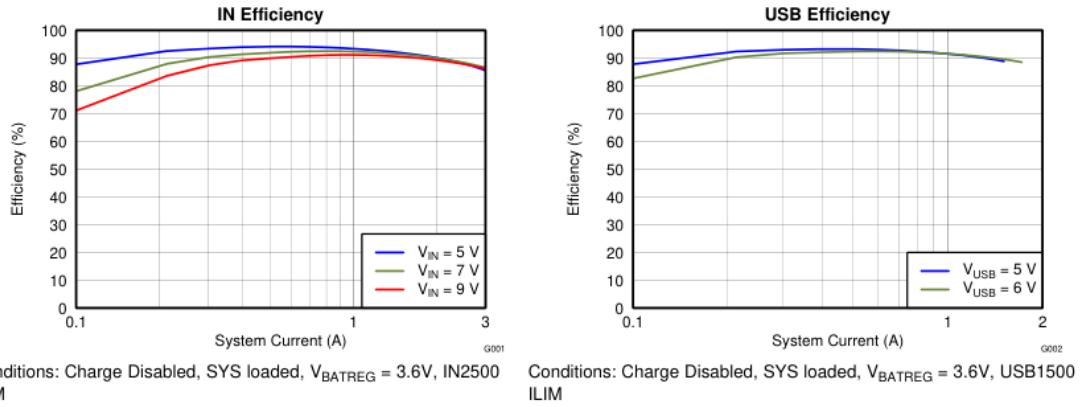
$$P_{IZ} = \eta \cdot P_{UL} \quad (2.5)$$

$$U_{IZ} \cdot I_{IZ} = \eta \cdot U_{UL} \cdot I_{UL} \quad (2.6)$$

gdje je U_{IZ} i I_{IZ} izlazni napon, odnosno struja, U_{UL} i I_{UL} , ulazni napon, odnosno struja, a η učinkovitost. Bacajući pogled u dokumentaciju proizvođača, može se uzeti efikasnost od 90 % (slika 2.13.). Iz jednadžbe 2.6 se sada može dobiti izraz za ulaznu struju:

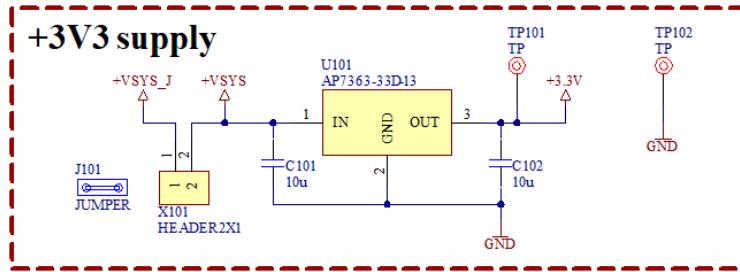
$$I_{UL} = \frac{\eta \cdot U_{IZ} \cdot I_{IZ}}{U_{UL}} \quad (2.7)$$

Iz jednadžbe 2.7 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



Slika 2.13. Ovisnost efikasnosti o izlaznoj struji punjača [6]

$$I_{UL,BATOFF} = 627.48 \text{ mA.}$$



Slika 2.14. Linearni regulator napona

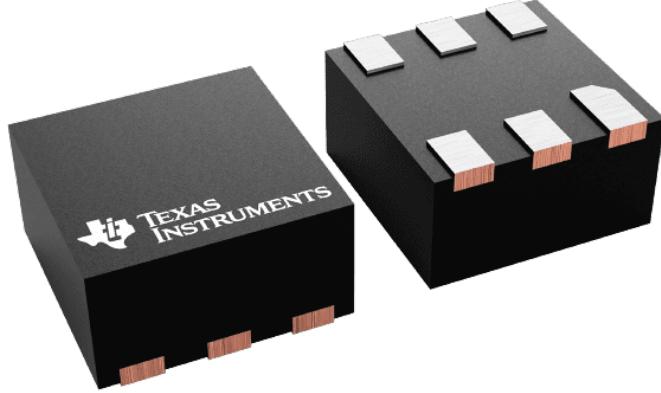
Imajući na umu da će do maksimalne potrošnje doći rijetko kada, ako uopće, i činjenicu da će sustav imati mogućnost ulaska u način rada mirovanja, može se uzeti kapacitet baterije od 2 Ah, čime se postiže balans trajanja baterije i cijene. U tom slučaju dovoljno je ograničiti punjenje baterije na 1 A, a izračun otpornika je vidljiv na shemi (slika 2.12.). Odgovarajuće konstante za izračun otpornika su dobivene iz dokumentacije proizvođača. Sada je isto pomoću jednadžbe 2.7 moguće izračunati ulazni struju; $I_{UL,BATCHG} = 756 \text{ mA}$. Ukupna maksimalna ulazna struja je stoga:

$$I_{UL,MAX} = I_{UL,BATCHG} + I_{UL,BATOFF} = 1.38 \text{ A} \quad (2.8)$$

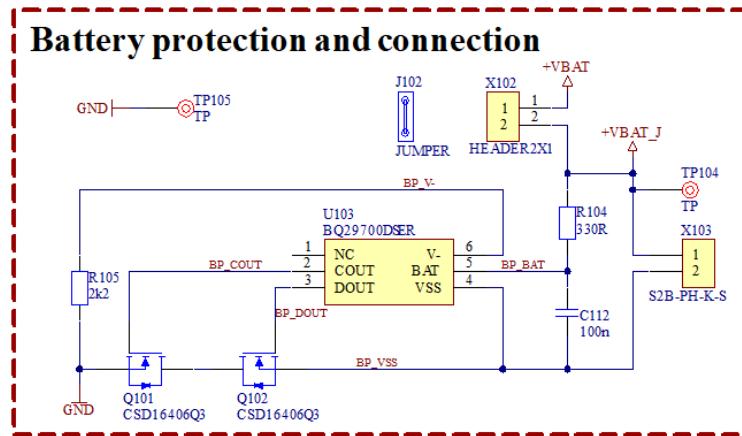
Dodajući malo sigurnosne margine, za prekostrujnu zaštitu se onda uzima 1.5 A. Za potrebe testiranja i otklanjanje eventualnih grešaka na ulaz linearog regulatora dodan je kratkospojnjk.

S obzirom na mnoge opasnosti koje litij-ionske baterije nude, potrebno je dizajnirati prikladnu zaštitu za bateriju. U tu svrhu odabran je BQ29700 proizvođača Texas

Instruments, prikazan na slici 2.15. Ovaj integrirani krug ima zaštitu baterije od preniskog i previsokog napona, prejake struje pražnjenja i punjenja i kratkog spoja. Shema sklopa za zaštitu baterije prikazana je na slici 2.16. Otpornici i kondenzatori su oda-



Slika 2.15. BQ29700



Slika 2.16. Shema sklopa za zaštitu baterije

brani prema preporukama proizvođača, dok tranzistore bira korisnik [7]. 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.

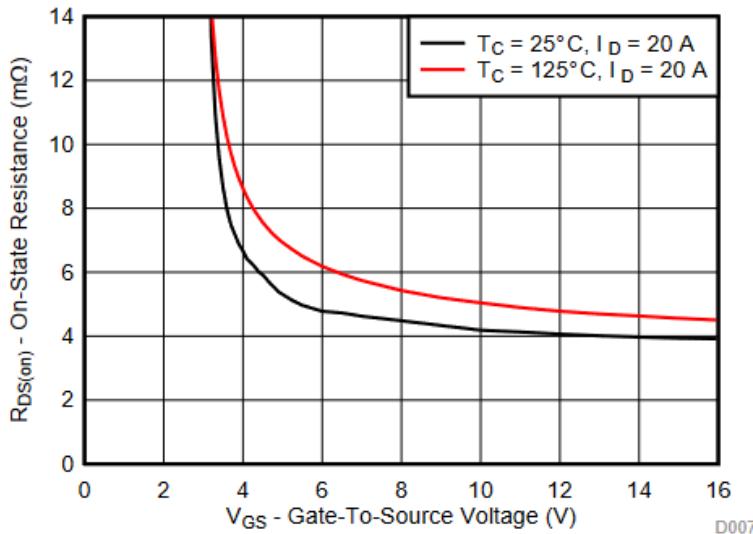
U tablici 2.3. navedeni su pragovi napona na kojima se aktivira zaštita baterije. Ako su oba tranzistora jednaka, onda za struju kroz tranzistor vrijedi:

$$I_Q = \frac{U_{TH}}{2 \cdot R_{DS(on)}} \quad (2.9)$$

Tablica 2.3. Pragovi aktiviranja zaštite za bateriju [7]

	Prevelik napon	Premali napon	Prejaka struja punjenja	Prejaka struja pražnjenja	Struja kratkog spoja
Prag [V]	4.275	2.800	-0.100	0.100	0.5

gdje je U_{TH} napon praga, a $R_{DS(on)}$ otpor jednog tranzistora. Iz dokumentacije proizvođača navodi se da tranzistor mora podržavati napon između upravljaće elektrode i uvoda u iznosu od $U_{GS} = 3.5 \text{ V}$. Iz grafa ovisnosti $R_{DS(on)}$ o U_{GS} prikazanog na slici može se isčitati vrijednost otpora od $R_{DS(on)} = 12.5 \text{ m}\Omega$. Zaštita baterije će se aktivirati u sljede-



Slika 2.17. Graf ovisnosti otpora o naponu između upravljaće elektrode i uvoda tranzistora CSD16406Q3 [8]

ćim uvjetima:

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

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 je prevelika, i može doći do oštećenja sklopoljja ili baterije podje li nešto po zlu. Ispravan način proračuna i odabira tranzistora bit će demonstriran u poglavljiju vezan uz izradu narukvice.

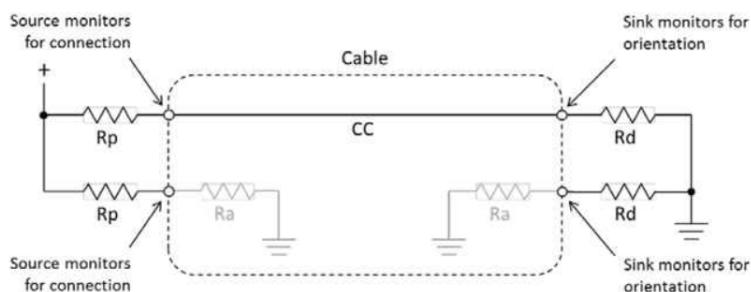
2.7. USB napajanje

Evolucijom USB sučelja rasla je snaga koju USB izvor može dati. Tablica 2.4. prikazuje snage koje razne verzije USB sučelja mogu dati. Korisnik obično ne razmišlja na koju

Tablica 2.4. Maksimalni naponi, struje i snage raznih verzija USB sučelja [9]

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 CC linije preko kojih uređaj i izvor mogu iskomunicirati potrebnu snagu. Način na koji CC linije funkcioniraju je prikazan na slici 2.18. 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. Radi toga je potrebno projektirati

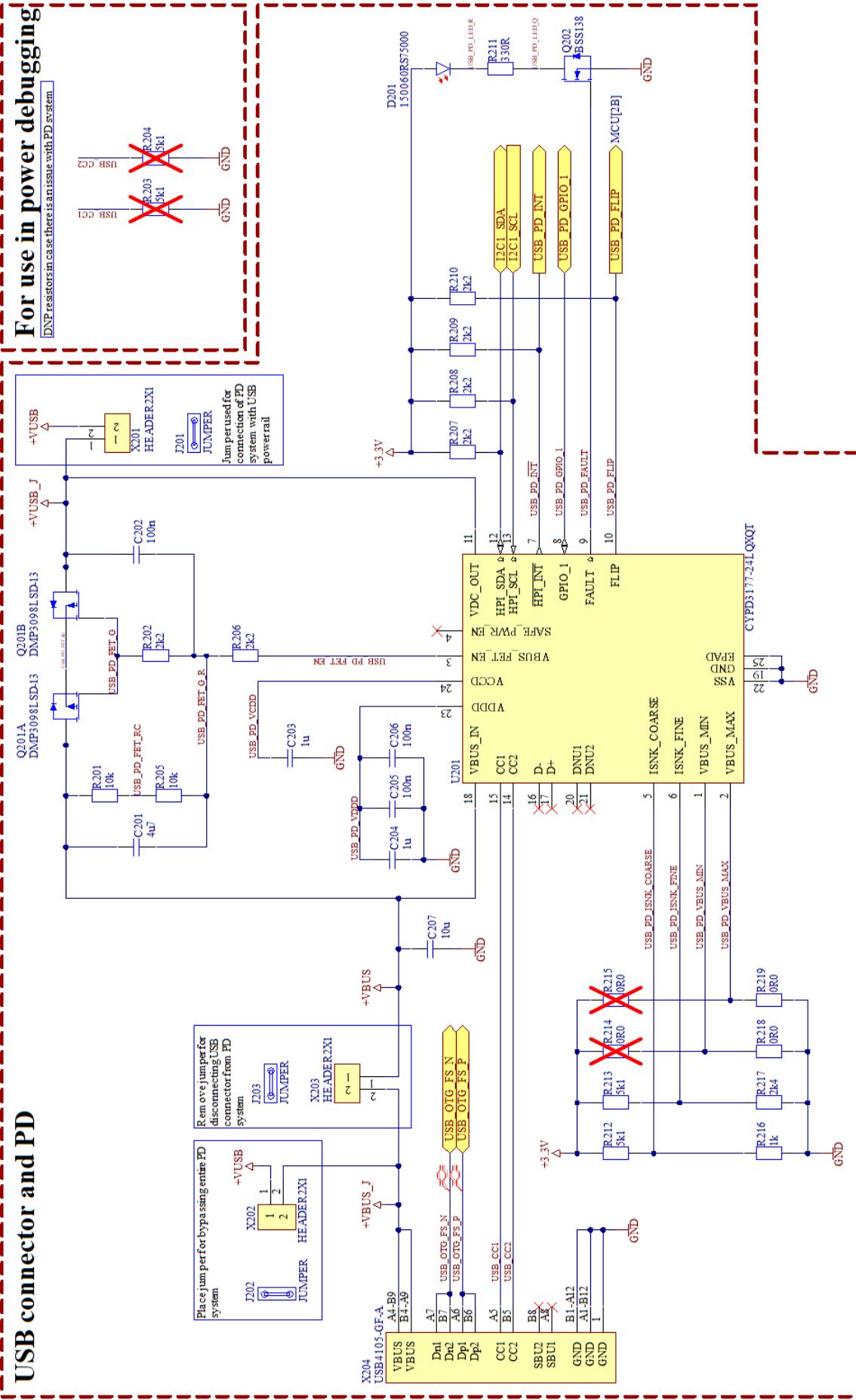


Slika 2.18. Prikaz načina rada CC linija [9]

sklopovlje koje može ispregovarati snagu koju izvor može dati kako ne bi došlo do neželjenog ponašanja. Postoji niz integriranih krugova koji to mogu napraviti, a ovdje je odabran CYPD3177 tvrtke Cypress Technologies. Shema USB napajanja prikazana je

na slici 2.19. 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 stezaljki ISNK_COARSE, ISNK_FINE, VBUS_MIN i VBUS_MAX. Vrijednosti otpornika na shemi odabrane su prema savjetima proizvođača [10]. 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 okolo tranzistora služe s 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 sklopoljja. 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).

USB connector and PD



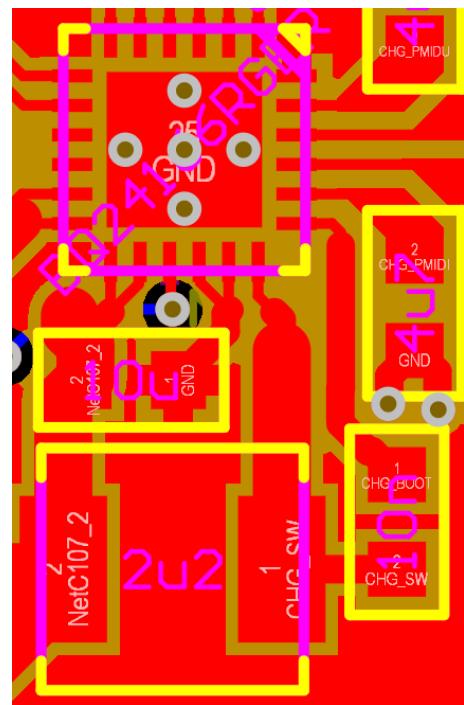
2.8. PCB

Raspored slojeva tiskane pločice prikazan je na slici 2.20. 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.

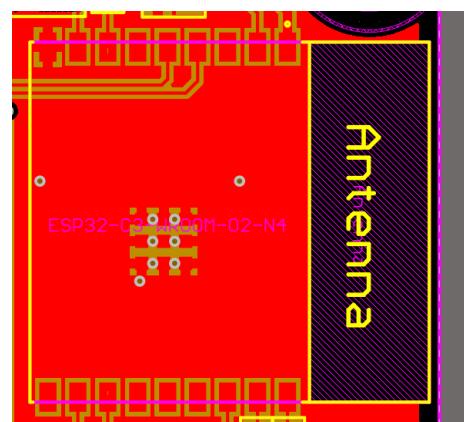
Stack Up		Layer Stack			
Layer	Board Layer Stack	Name	Material	Thickness	Constant
1		Top Overlay		0mm	
2		Top Mask	Solder Resist	0.015mm	38
3		Top Copper		0.035mm	
4		Dielectric 1	7628	0.2mm	46
5		GND		0.0175mm	
6		Core	FR-4	1.065mm	45
7		Signal Layer 2		0.0175mm	
8		GND	7628	0.2mm	46
9		Bottom Copper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

Slika 2.20. Raspored slojeva PCB-a

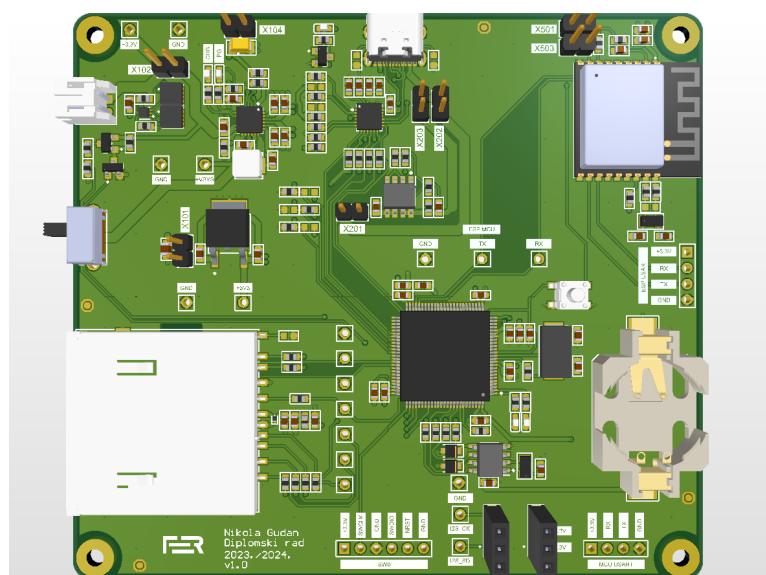
Tijekom projektiranja pločice bilo je potrebno posebno obratiti pažnju na smanjene površine komutacijske petlje kod punjača (slika 2.21.) kojega čine zavojnica L101 te kondenzatori C103 i C107 (slika 2.12.) kako bi se smanjile emitirane smetnje. Također je bilo potrebno obratiti pažnju na pozicioniranje antene i ravnine uzemljenja oko nje (slika 2.22.). 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 2.23.



Slika 2.21. Komutacijska petlja punjača



Slika 2.22. Antena na PCB-u



Slika 2.23. 3D prikaz pločice

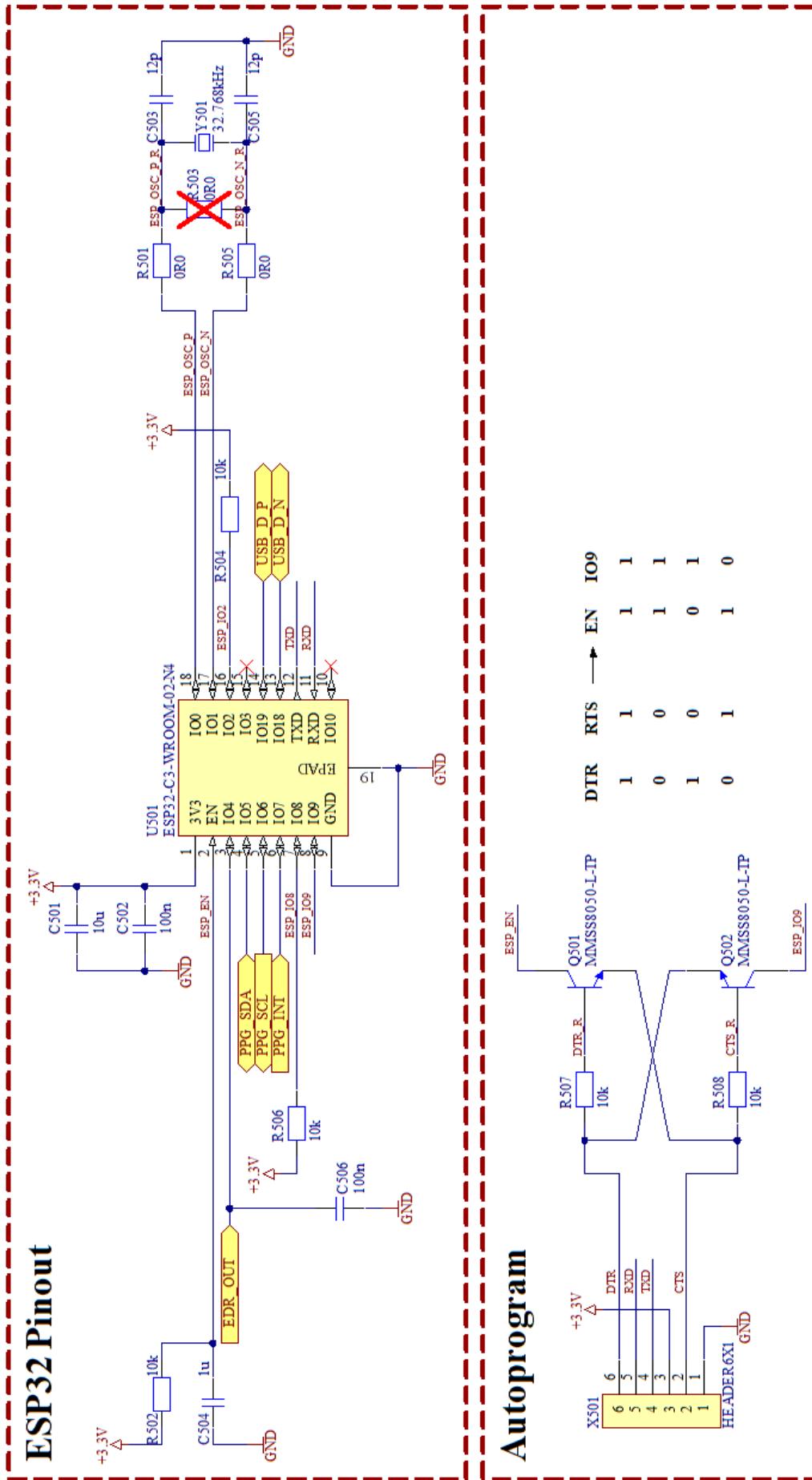
3. Narukvica

Svrha narukvice je prikupljanje biomedicinskih parmetara 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. Promjena elektrodermalna aktivnost je dobar pokazatelj stresa u korisnika [11], a osobe sa poremećajem tečnosti govora pokazuju značajno smanjenje brzine otkucaja srca u stresnim situacijama u odnosu na osobe bez takvih poremećaja [12].

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.

3.1. Bežična komunikacija

Shema bežične komunikacije na narukvici (slika 3.1.) je veoma slična onoj na glavnoj ploči (slika 2.6.), uz nedostatak kratkospojnika, dodatak signala za upravljanje I₂C sučeljem i korištenje analogno-digitalnog pretvornika za mjerjenje impadancije 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.



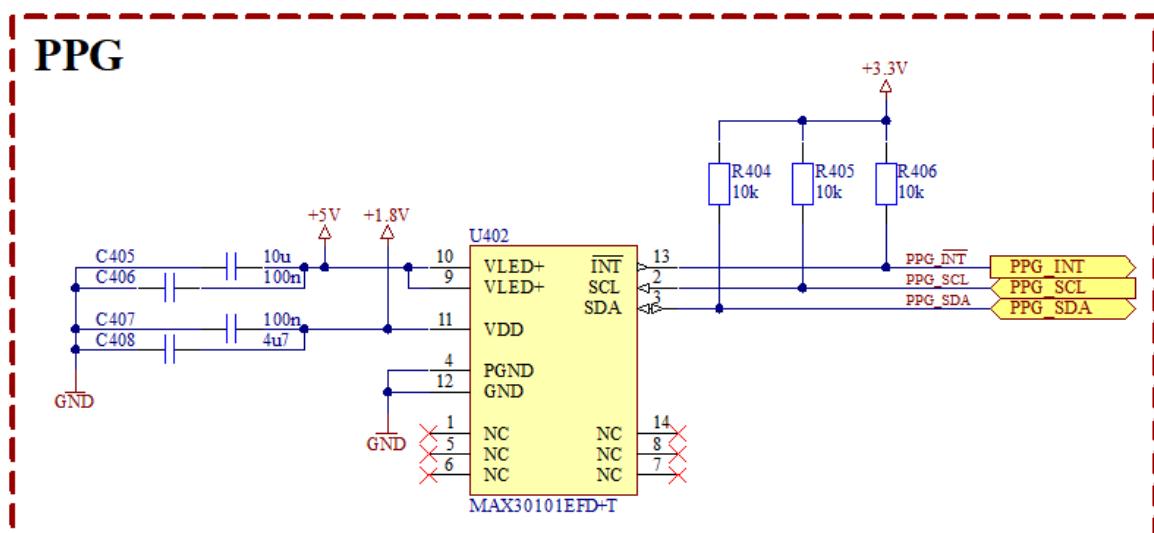
Slika 3.1. Shema bežične komunikacije nanukvice

3.2. Fotopletizmografski senzor

Za mjerjenje brzine otkucaja srca koristi se PPG senzor MAX30101 tvrtke Analog Devices (slika 3.2.). 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 3.3. 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.



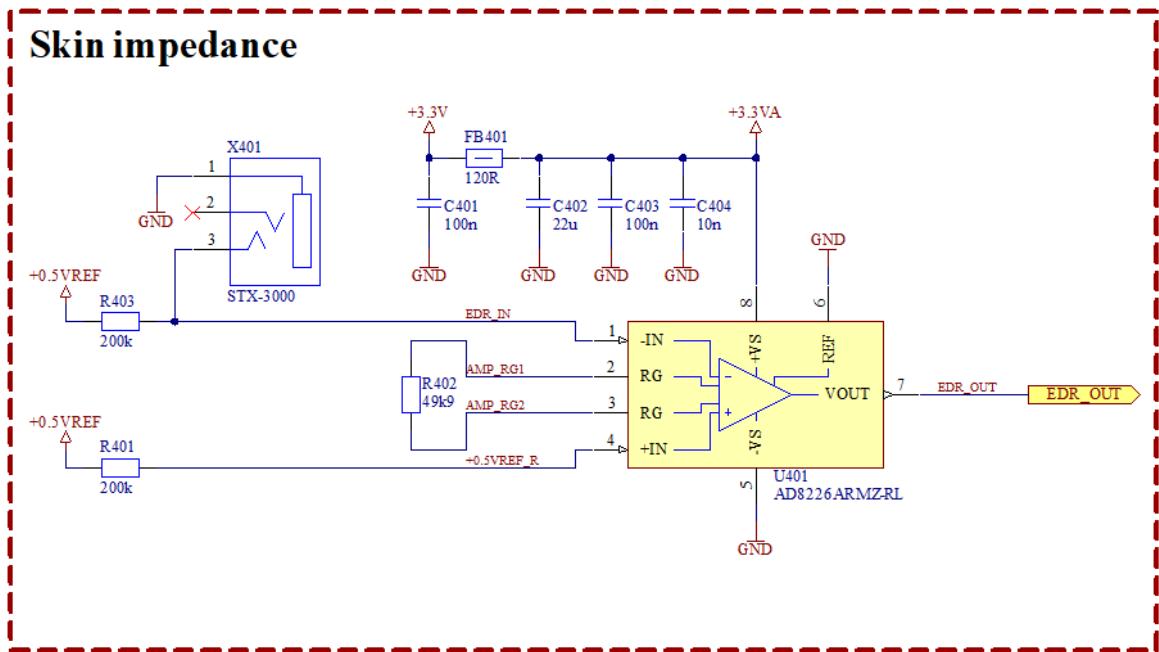
Slika 3.2. MAX30101 PPG senzor



Slika 3.3. Shema PPG senzora

3.3. Impedancija kože

Impedancija kože mjerit će se pomoću instrumentacijskog pojačala. Shema mjernog kruga prikazana je na slici 3.4. Odabrano je instrumentacijsko pojačalo AD8226 tvrtke Analog Devices zbog svog velikog ulaznog otpora, malog šuma i dobrog potiskivanja za jedničkih smetnji [13]. Napajanje pojačala je filtrirano pasivnom mrežom kako ne bi došlo do smetnji od digitalnog dijela sklopovlja. Za mjerjenje impedancije koristi se re-



Slika 3.4. 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:

$$U_{IZ} = A \cdot U_{REF} \cdot \frac{R_{403}}{R_{403} + R_{skin}} \quad (3.1)$$

Impedancija kože mjeri se u stotinama kilooma (maksimalno cca. 250 kΩ [14]), 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 3.5.) koje se montiraju na kabel prikazan na slici 3.6. Ovaj kabel se spaja na narukvicu putem 3.5 mm audio priključka.



Slika 3.5. Samoljepljiva elektroda



Slika 3.6. Kabel za elektrode

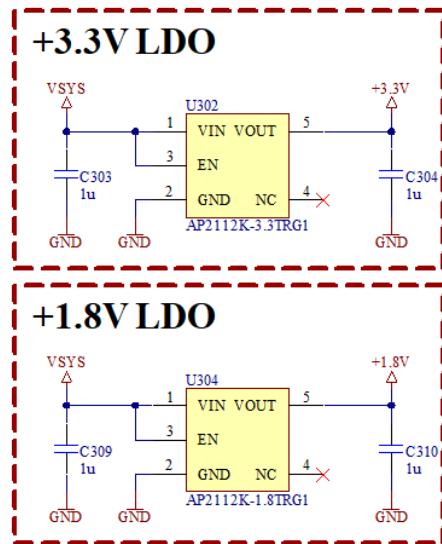
3.4. Napajanje

3.4.1. 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 $20 \mu\text{A}$ [13]. Za potrošnju sustava bežične komunikacije uzima se vrijednost prikazana u tablici 2.1. 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 [15].

3.4.2. Napajanje od 3.3 V i 1.8 V

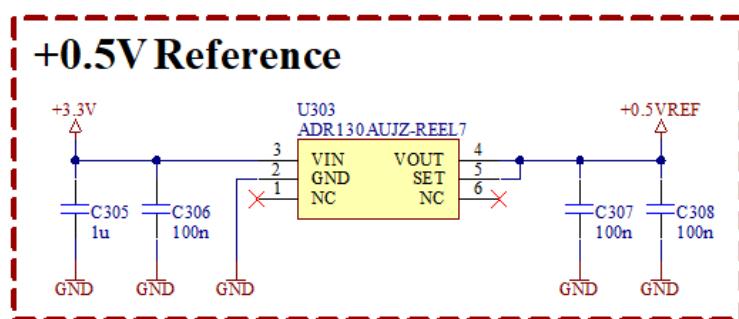
Shema napajanja od 3.3 V i 1.8 V prikazana je na slici 3.7. U oba slučaja koristi se LDO AP2112K proizvođača Diodes Incorporated. Ovaj LDO je odabran radi svoje male veličine u SOT-25 s obzirom na ograničenje veličine PCB-a.



Slika 3.7. Napajanje od 3.3 V i 1.8 V za narukvicu

3.4.3. Referentni napon

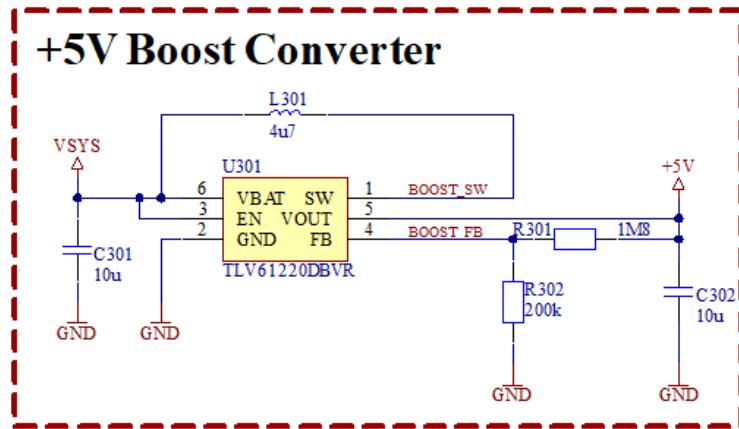
Shema izvora referentnog napona prikazana je na slici 3.8. Koristi se ADR130 referencia tvrtke Analog Devices. Iznos referentnog napona se može namjestiti na 1 V ili 0.5 V, a veličina kućišta je ista kao i kod linearnih regulatora prikazanih u dijelu 3.4.2.



Slika 3.8. Referentni izvor napona od 0.5 V

3.4.4. Napajanje od 5 V

Za napajanje od 5 V bilo je potrebno dizajnirati uzlazni prekidački regulator. Shema regulatora prikazana je na slici 3.9. Odabran je TLV61220 proizvođača Texas Instruments jer je idealan za napajanje sa baterije. Regulator može raditi na ulaznom naponu od 0.7 V do 5.5 V i potrebno je malo komponenata za rad [16]. Također je pogodan radi svoje male veličine u SOT-23 kućištu. Zavojnica je odabrana prema preporukama proizvođača,



Slika 3.9. Uzlazni prekidački regulator

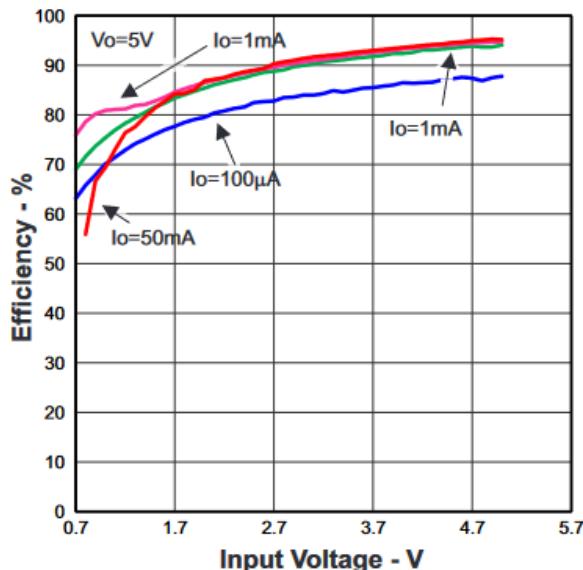
a naponsko djelilo je proračunato imajući na umu da donji otpornik ne bi trebao biti veći od $500\text{ }\Omega$ kako bi vrijednost struje koja teče u FB stezaljku bila što bliže $0.01\text{ }\mu\text{A}$ [16]. Efikasnost za izlazne struje od 1 mA do 50 mA je skoro ista na ulaznom naponu u rasponu baterije i može se uzeti efikasnost od 90 %. 3.10. Uz minimalni ulazni napon od 3V, potrošnja, prema jednadžbi 2.7 iznosi 75 mA.

3.5. Baterija i punjač baterije

Uvezši u obzir potrošnju svih podsustava ukupna struja koju punjač mora moći dati je 426.12 mA. Uz struju punjenja baterije od 1 A i uvezši u obzir jednadžbe 2.7 i 2.8 ukupna struja koju USB sučelje mora moći dati iznosi 1.08 A, dakle uzet će se ograničenje na ulaznu struju od 1.5 A. Uvijeti su, dakle, veoma slični onima kao kod glavne ploče.

3.5.1. Punjač baterije

Shema punjača narukvice na slici 3.11. veoma je slična shemi sa slike 2.12. Promijenjena je svjetleća dioda za indikaciju punjenja u žutu, kako bi se jasnije mogla razlikovati in-



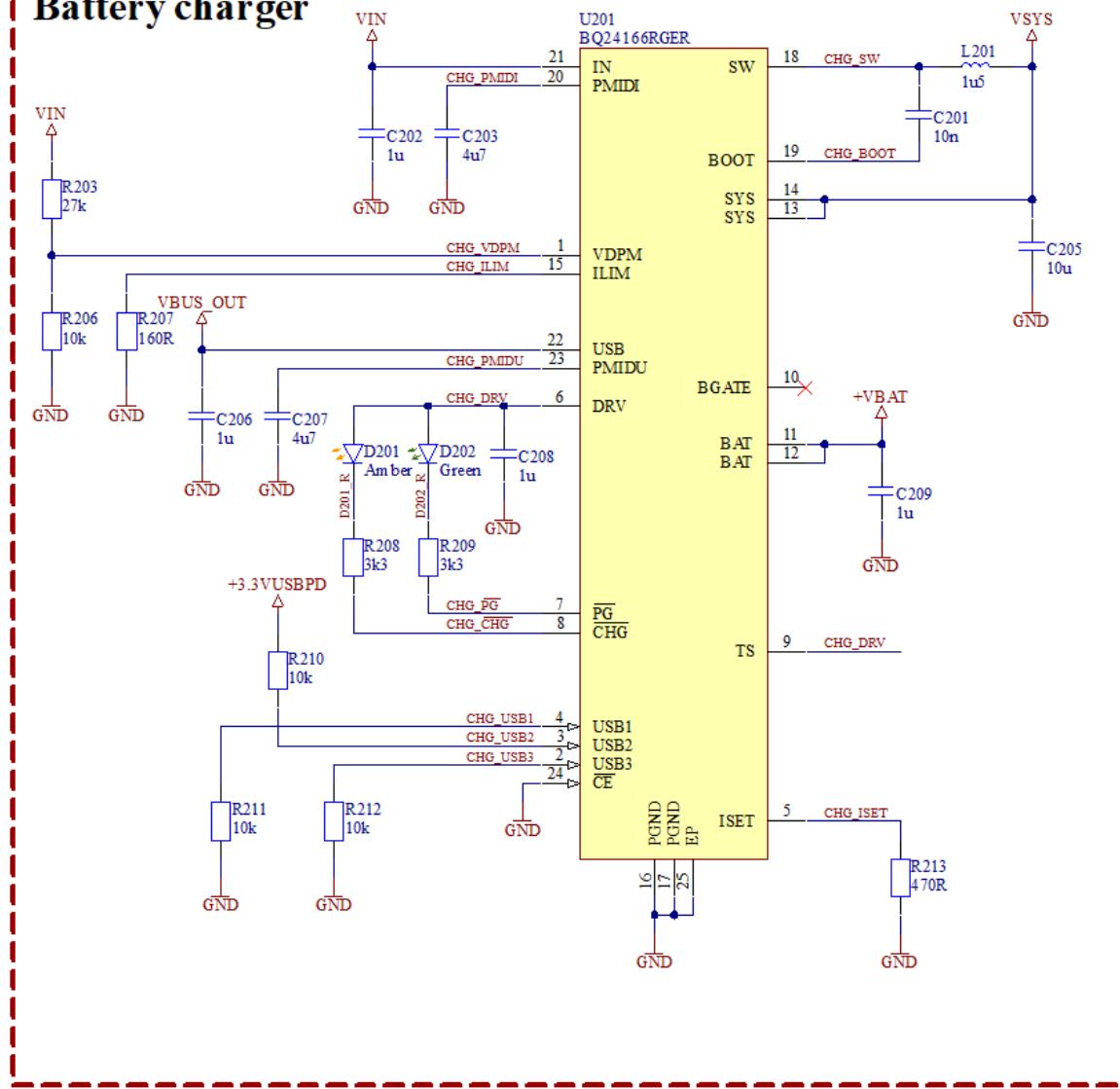
Slika 3.10. Efikasnost regulatora [16]

dikacija između indikacije punjenja i indikacije statusa dobrog napajanja. Također su dodani veći otpornici u seriju sa diodama jer je svjetlina bila prevelika.

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 subtilna, ali veoma ključna za ispravan rad punjača. Pogledom na shemu na slici 2.12. 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 3.12. 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 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 preporuča kratko spajanje stezaljka TS i DRV kako bi punjenje cijelo vrijeme bilo omogućeno.

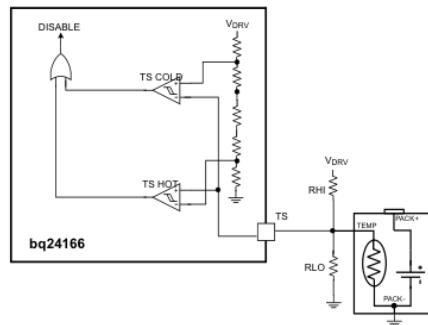
Battery charger



Slika 3.11. Shema punjača baterije na narukvici

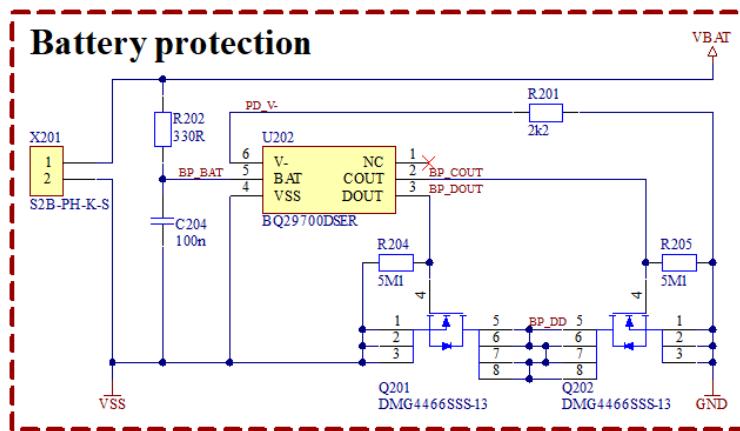
3.5.2. Baterijska zaštita

Shema baterijske zaštite na narukvici je prikazana na slici 3.13. Shema je slična onoj sa glavne ploče na slici 2.16., a ovdje su tranzistori pažljivije odabrani. Maksimalna struja pražnjenja iznosi, prema 3.5., iznosi 426.12 mA. Za aktivaciju zaštite uzet će se struja od $I_{OCD} = 1.5$ A, dakle otpor obaju FET-ova prema jednadžbi 2.9 iznosi $2R_{DS(on)} = 66.67$ mΩ. Na temelju toga, struja na kojoj će se aktivirati zaštita za punjenje iznosi $I_{OCC} = 1.5$ A. Dakle, tranzistor treba imati otpor $R_{DS(on)} = 33.33$ mΩ. Struja na kojoj će se aktivirati zaštita od kratkog spoja iznosi $I_{SCD} = 7.5$ A, tako da tranzistor mora moći podnijeti tu struju. Prikaz promjene otpora u ovisnosti o naponu i struji odabranog tranzistora prikazana je na slici 3.14. Vidljivo je da će otpor biti veći sa

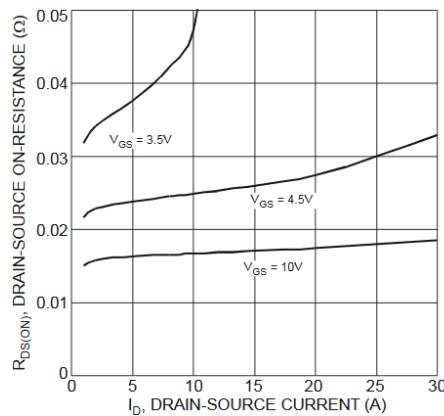


Slika 3.12. Mjerenje temprature senzora

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 sa perspektive sigurnosti. Očito je da je ovo bolje projektirana zaštita u odnosu na onu na



Slika 3.13. Baterijska zaštita na narukvici



Slika 3.14. Graf ovisnosti otpora o naponu između upravljačke elektrode i uvoda tranzistora DMG4466SSS-13 [17]

glavnoj ploči.

Ovdje su još dodani i otpori između upravljačke elektrode i uvoda tranzistora koji služe za bolje izbijanje naboja na kapacitetu između upravljačle elektrode i uvoda tranzistora [7].

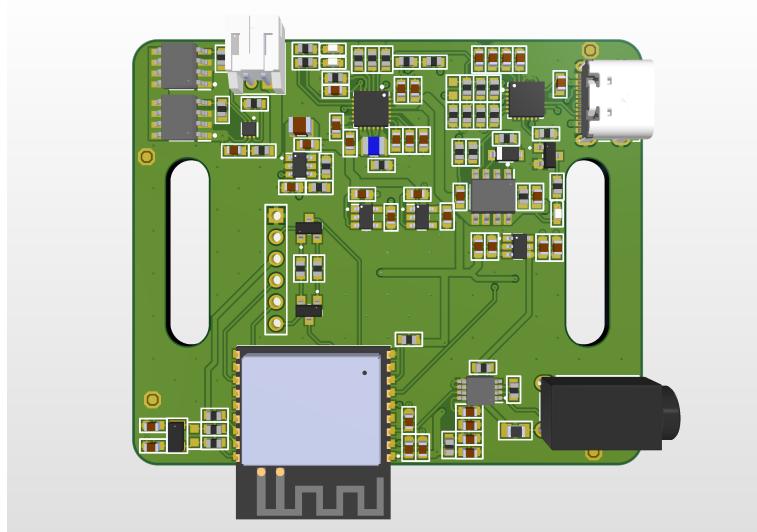
3.6. PCB

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 3.15. i 3.16. prikazan je 3D prikaz projektiranje pločice.

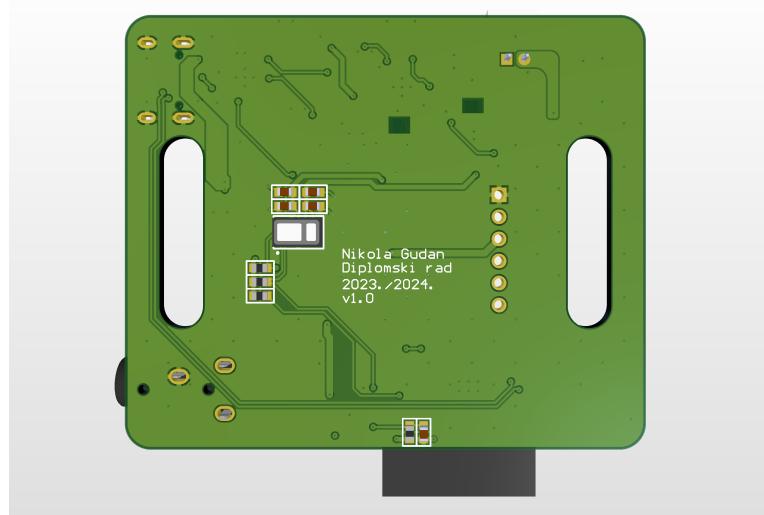
Za razliku od glavne ploče, ovdje je podsustav za bežičnu komunikaciju postavljen tako da se antena nalazi u potpunosti izvan pločice. Na taj način podsustav će bolje primati signale i stvarati manje smetnje na pločicu tijekom slanja signala.

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 plićice (slika 3.16.).

Radi ograničenja prostora maknute su sve testne točke i kratkospojnici.



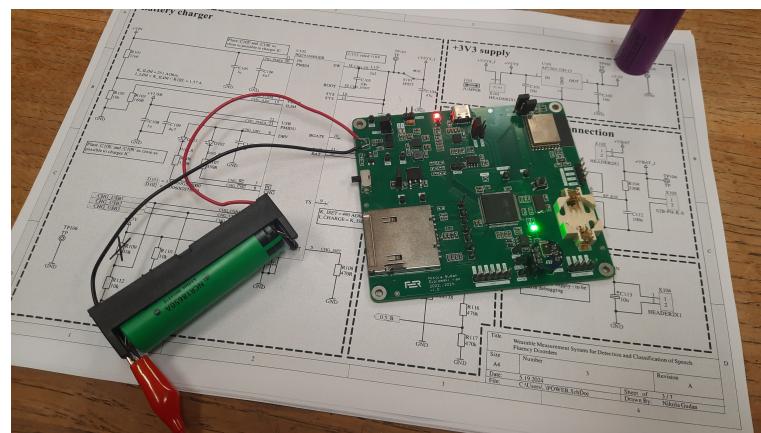
Slika 3.15. 3D prikaz gornjeg sloja pločice



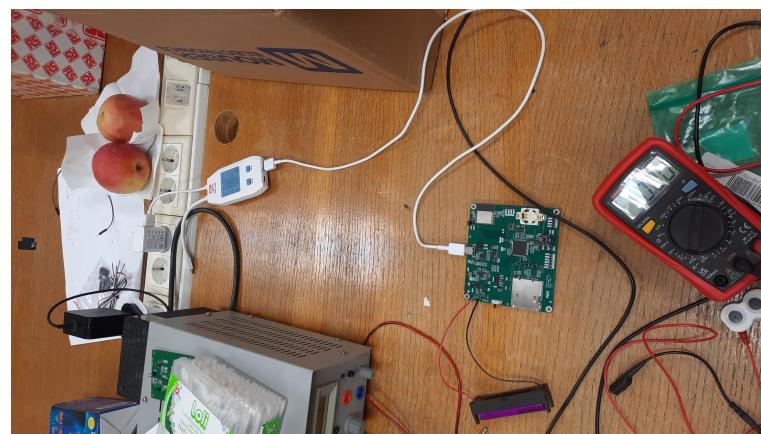
Slika 3.16. 3D prikaz donjeg sloja pločice

4. Testiranje

4.1. Glavna ploča



Slika 4.1. Testiranje glavne pločice



Slika 4.2. Postava testiranja glavne pločice

5. Zaključak

Placeholder

Literatura

- [1] *Getting started with STM32F7 Series MCU hardware development*, STMicroelectronics, Veljača 2017., rev. 5.
- [2] *Oscillator design guide for STM8AF/AL/S, STM32 MCUs and MPUs*, STMicroelectronics, Travanj 2023., rev. 19.
- [3] *PCF8563 Real-time clock/calendar*, NXP USA Inc, Listopad 2015., rev. 11.
- [4] *ESP32-C3-WROOM-02 Datasheet*, Espressif Systme, Veljača 2023., v1.3.
- [5] *Microphone coupon board based on the IMP34DT05 digital MEMS*, STMicroelectronics, Lipanj 2018., rev. 1.
- [6] *2.5A, Dual-Input, Single Cell Switch Mode Li-Ion Battery Charger with Power Path Management*, Texas Instruments, Ožujak 2013., rev. B.
- [7] *BQ297xx Cost-Effective Voltage and Current Protection Integrated Circuit for Single-Cell Li-Ion and Li-Polymer Batteries*, Texas Instruments, Lipanj 2021., rev. H.
- [8] *CSD16406Q3 N-Channel NexFET™ Power MOSFET*, Texas Instruments, Prosinac 2015., rev. B.
- [9] *A Primer on USB Type-C® and USB Power Delivery Applications and Requirements*, Texas Instruments, Ožujak 2022., rev. B.
- [10] *USB Type-C Port Controller for Power Sinks*, Cypress Technologies, Svibanj 2021., rev. B.

- [11] 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>
- [12] 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>
- [13] *Wide Supply Range, Rail-to-Rail Output Instrumentation Amplifier*, Analog Devices, Listopad 2019., rev. D.
- [14] J. Malmivuo i R. Plonsey, *Bioelectromagnetism. 27. The Electrodermal Response*, 01 1995., str. 428–434.
- [15] *High-Sensitivity Pulse Oximeter and Heart-Rate Sensor for Wearable Health*, Analog Devices, Lipanj 2020., rev. 3.
- [16] *TLV61220 Low-Input Voltage Step-Up Converter in Thin SOT-23 Package*, Texas Instruments, Svibanj 2014., rev. A.
- [17] *N-Channel Enhancement Mode MOSFET*, Diodes Incorporated, Rujan 2013., rev. 4.

Sažetak

Nosivi mjerni sustav za prepoznavanje i klasifikaciju poremećaja tečnosti govora

Nikola Gudan

Projektiranje i izrada sklopoljja 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