

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko

Merilnik srčnega utripa z uporabo prsnega traku

Projektna naloga pri predmetu Seminar

Avtor: Tomo Krivc, 64070284

Mentor: doc. dr. Marko Jankovec, univ. dipl. inž. el.

Ljubljana, februar 2013

Kazalo vsebine

1	Ključne besede.....	3
2	Uvod	3
3	Delovanje.....	3
3.1	Oddajnik – prsni trak	4
3.2	Sprejemnik.....	5
4	Specifikacije	5
5	Časovni in finančni plan.....	6
5.1	Časovni plan	6
5.2	Finančni plan	6
6	Zasnova naprave.....	6
6.1	Analogni del.....	7
6.2	Digitalni del.....	8
6.3	Napajalni del.....	9
7	Simulacija.....	10
8	Tiskano vezje	12
9	Programski del.....	12
10	Kosovnica.....	15
11	Rezultati načrtovanja.....	16
12	Časovna in finančna rekapitulacija	17
12.1	Časovna rekapitulacija.....	17
12.2	Finančna rekapitulacija.....	17
13	Reference	18
14	Priloge.....	18

1 Ključne besede

merilnik srčnega utripa, oddajni pas, prsni trak, sprejemnik, mikrokontroler, msp430, filter, ojačevalnik

heart rate monitor, HRM, chest strap, receiver, microcontroller, msp430, filter, amplifier

2 Uvod

Pri športnih dejavnostih se čedalje več uporabljajo merilniki srčnega utripa, s katerimi lahko spremljamo naše telo ter tako prilagajamo zahtevnost vadbe in zagotovimo najboljše rezultate. S povečano uporabo pa se je povečalo tudi število izdelovalcev ter število protokolov po katerih delujejo, od najbolj osnovnih analognih, do bolj kompleksnih digitalnih. Sam sem merilnik kupil še pred časom in tako deluje po najbolj osnovnem, analognem principu, kar je še dodatno pritegnilo mojo pozornost. Tako sem se odločil, da si izdelam lasten sprejemnik in prikazovalnik srčnega utripa, ki bo deloval s komercialnim, analognim prsnim trakom.

3 Delovanje

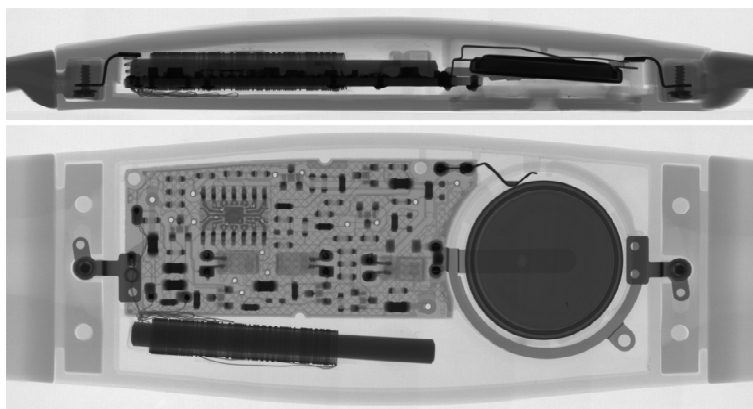
Športni merilniki srčnega utripa delujejo po principu enokanalnega EKG merilnika. Merjenec si na prsni koš pritrdi dve elektrodi v obliki prevodnega pasu, na katerih merilnik zaznava električne signale, ki jih nato brezžično pošilja na prikazovalnik, ponavadi oblikovan v obliki ročne ure.



Slika 1 – Primer komercialnega merilnika

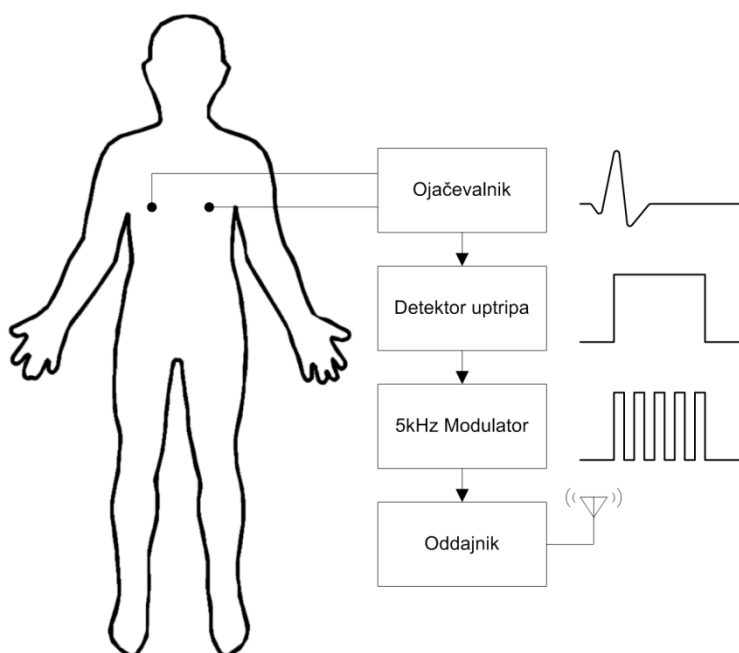
3.1 Oddajnik – prsni trak

Merilni trak, ki je pritrjen na prsnem košu uporabnika, poleg dveh elektrod vsebuje tudi majhno vezje za detekcijo utripa.



Slika 2 – Rentgenska slika oddajnega pasu

Analogna različica merilnika ob vsakem srčnem utripu generira pravokotni impulz, ki ga nato modulira z nosilno frekvenco 5,1kHz ter preko antene odda sprejemniku.



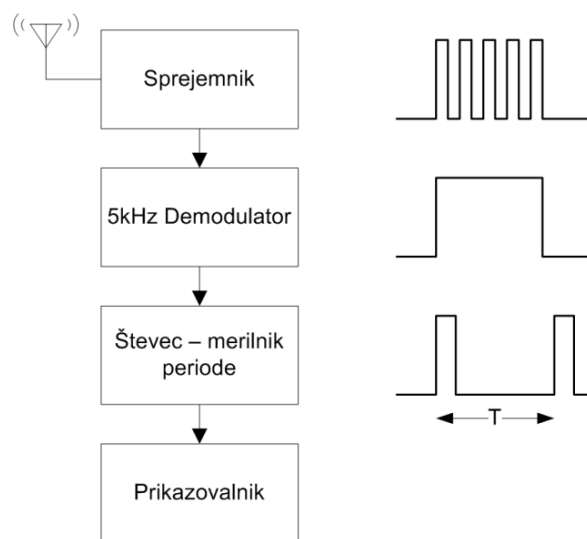
Slika 3 – Shema delovanja oddajnika

3.2 Sprejemnik

Sprejemni del, ki je hkrati tudi osrednji in prikazovalni del, sprejema signal oddajnika, ga demodulira in meri njegovo periodo. Izmerjeno periodo nato pretvori v utripe na minuto, ki jih prikazuje na zaslonu. Enačba za izračun udarcev na minute je enaka:

$$f[bpm] = 1000 \frac{60}{T[ms]}$$

pri čemer je f frekvenca utripa, izražena v utripih na minuto (bpm – beats per minute), T pa perioda sprejetega signala, merjena v milisekundah.



Slika 4 – Shema delovanja sprejemnika

4 Specifikacije

Zahteve za izdelavo sprejemnika so bile:

- delovanje z že obstoječimi oddajniki,
- majhna velikost,
- sprejemanje na razdalji vsaj 50cm,
- napajanje iz ene Li-Po ali Li-ion baterije,
- nizka poraba,
- prikazovalnik z lastno osvetlitvijo,
- možnost domače izdelave.

5 Časovni in finančni plan

5.1 Časovni plan

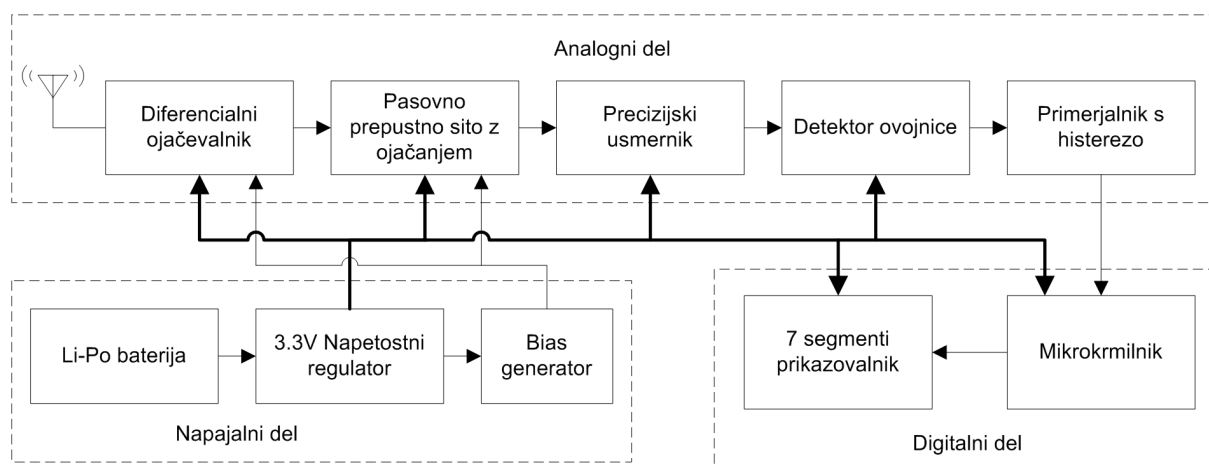
Št.	Opis	Čas [ur]
1	Pregled virov in obstoječih rešitev	5
2	Zasnova koncepta naprave	2
3	Načrtovanje električne sheme	5
4	Računalniška simulacija	3
5	Nabava materiala	1
6	Načrtovanje tiskanega vezja	5
7	Izdelava in sestava tiskanega vezja	4
8	Testiranje in optimizacija analognega dela	2
9	Izdelava programske kode	6
10	Končno testiranje	2
11	Izgradnja ustreznega ohišja	1
	Skupaj	36

5.2 Finančni plan

Št.	Opis	Cena [€]
1	Prsni trak - oddajnik	14
2	Elektronske komponente	10
3	Tiskano vezje	2
4	Ohišje	2
	Skupaj	28

6 Zasnova naprave

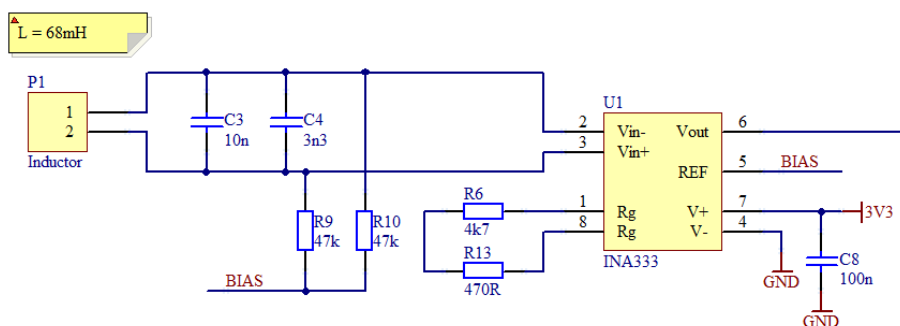
Napravo lahko v grobem razdelimo na tri dele: analogni sprejemni del, digitalni del s prikazovalnikom in napajalni del. Vsak od njih pa je sestavljen iz posameznih blokov. Bločni diagram celotne naprave je viden na spodnji sliki.



Slika 5 – Blokovna shema naprave

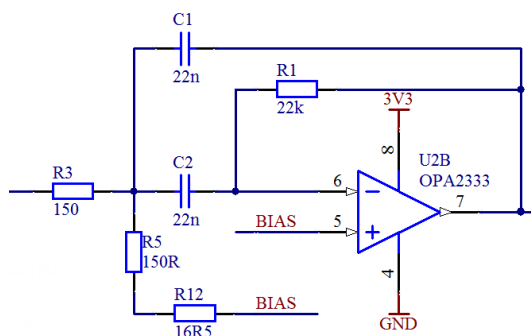
6.1 Analogni del

Analogni del je sestavljen iz petih sklopov. Vhod v vezje predstavlja nihajni krog sestavljen iz tuljave s feritnim jedrom ter dvema kondenzatorjema – C3 in C4, s katerima nastavimo ustrezno resonančno frekvenco. Ker ima vhodni signal nizko amplitudo – nekje 10mV, ga najprej ojačimo z instrumentacijskim ojačevalnikom U1 z ojačenjem 10. Izbral sem precizni ojačevalnik INA333 podjetja Texas Instruments (TI), ki ima vhod za referenčno napetost in možnost nastavitve ojačenja z upori ter lahko deluje z enosmernim napajanjem.



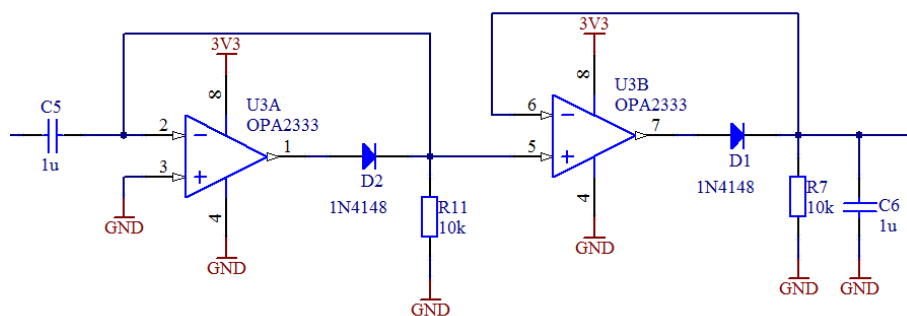
Slika 6 – Vhodna stopnja z instrumentacijskim ojačevalnikom

Od tod signal peljemo do pasovno prepustnega sita drugega reda in srednjo frekvenco 5,1kHz. To sito signal še dodatno ojači za faktor 13. Povsod v vezju so uporabljeni operacijski ojačevalniki OPA333 ali OPA2333, ki zagotavljajo veliko natančnost z malo dodanega šuma. Omogočajo pa tudi enojno napajanje ter »rail-to-rail« vhode in izhode. Tako kot INA333 so tudi ti ojačevalniki narejeni v podjetju TI.



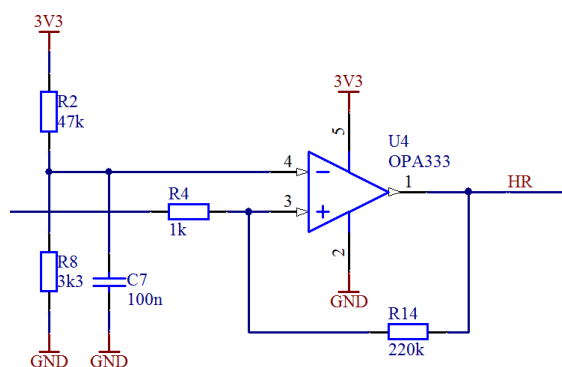
Slika 7 – Pasovno prepustno sito z ojačanjem

Do sedaj smo imeli signal še vedno premaknjen za napetost V_{BIAS} s prisotno nosilno frekvenco 5,1kHz. Zato signal najprej s precizijskim usmernikom usmerimo ter mu odstranimo srednjo vrednost in ga nato demoduliramo. Pri tem uporabimo detektor ovojnice. Pri tem delu vezja potrebujemo dve diodi, ki morata biti sposobni sledenju naglim spremembam signala. Za ta namen sem uporabil hitri silicijevi epitaksialni planarni diodi 1N4148.



Slika 8 – Precizijski usmernik in detektor ovojnice

Na izhodu analognega dela je napetostni primerjalnik s histerezo, ki demoduliran signal pretvori v digitalni signal. Z izbiro uporov R2 in R8 nastavimo srednjo vrednost preklopa, z uporoma R4 in R14 pa histerezo. Izračunan preklap se v mojem vezju zgodi pri napetostih 0,203V v padajoči in pri 0,218V v naraščajoči smeri signala.

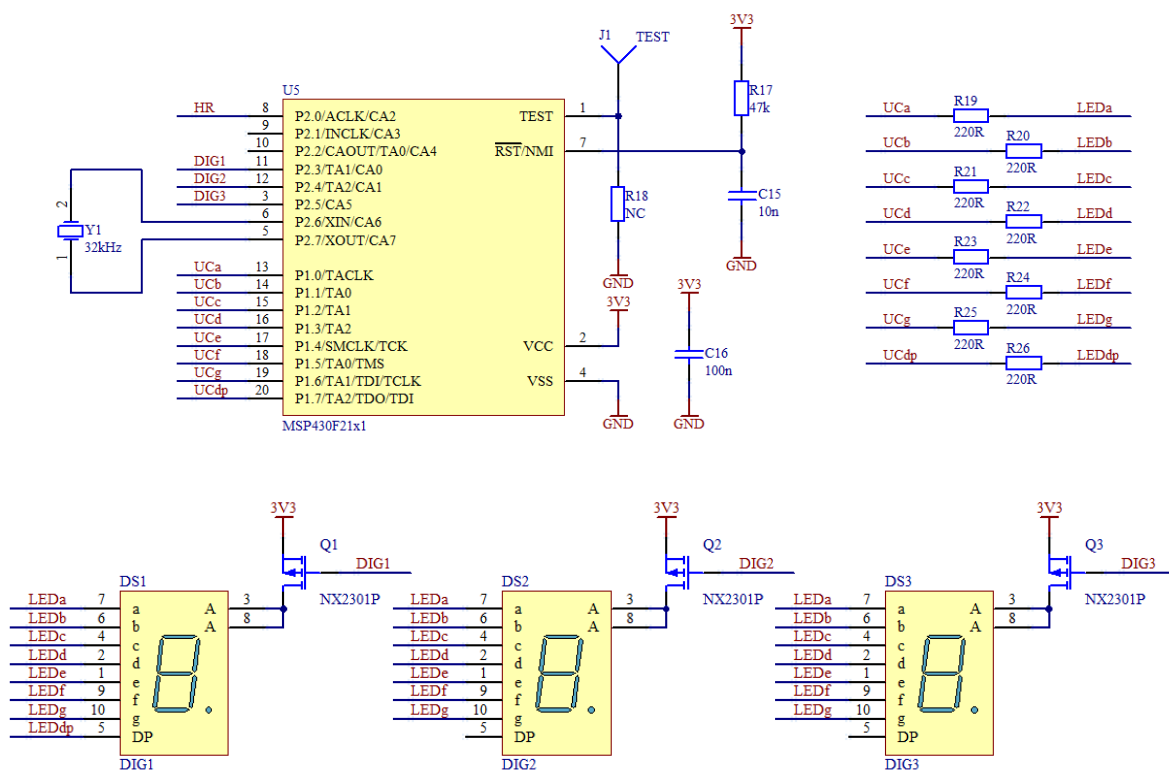


Slika 9 – Napetostni primerjalnik

Izhod primerjalnika nato peljemo do mikrokrmilnika v digitalni del vezja.

6.2 Digitalni del

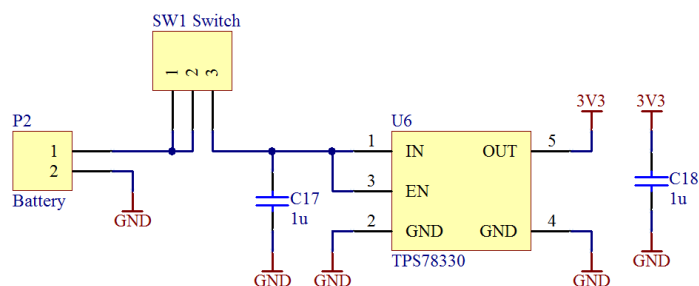
Za merjenje periode ter izračun utripa na minuto skrbi mikrokrmilnik MSP430. Rezultat meritve pa se sproti prikazuje na treh sedem segmentnih LED zaslonih s skupno anodo. Prikazovanje na vseh treh zaslonih hkrati izvedemo z multipleksiranjem tako, da jim preko P-MOS tranzistorjev izmenično vklapljam in izklapljam napajanje. Diode zaslona za stabilno delovanje potrebujejo omejevalnik toka, ki jo zagotovimo z zaporedno vezanim uporom z upornostjo 220Ω. Za delovanje mikrokrmilnik potrebuje še upor in kondenzator na reset vходу ter kvarčni kristal. Pri izbiri krmilnika sem se osredotočil predvsem na ustrezno število pinov ter ceno, saj razen enega časovnika in zunanjih prekinitev ni potrebna nobena dodatna periferija.



Slika 10 – Mikrokrmilnik skupaj s prikazovalniki

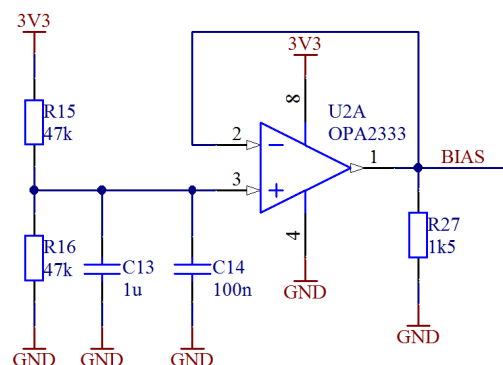
6.3 Napajalni del

Napajalnik je sestavljen iz linearnega napetostnega regulatorja z nizkim padcem napetosti in dvema kondenzatorjema in stikalom za vklop ter izklop naprave. Izbrani regulator ima dovolj nizek padec napetosti, da zagotavlja stabilno napetost vse do 3,5V baterijske napetosti.



Slika 11 – Napetostni regulator

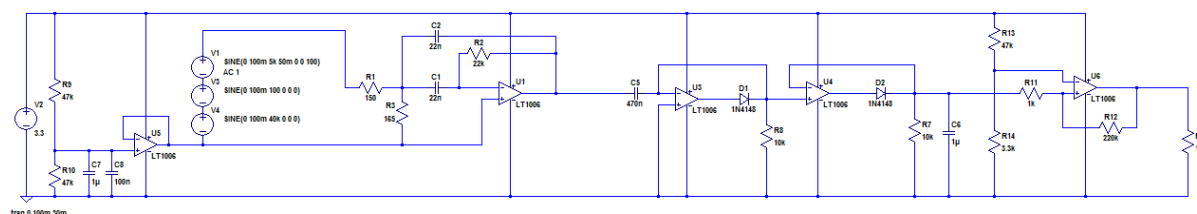
Ker imamo v vezju opravka z izmeničnimi napetostmi, moramo nastaviti tudi dodatno srednjo vrednost napetosti. To zagotovimo z operacijskim ojačevalnikom U2A, ki v vezavi napetostnega sledilnika zagotavlja napetost V_{BIAS} , ki je vedno enaka polovici napajalne napetosti in tako omogoča največji odklon signala.



Slika 12 – Generator srednje napetosti

7 Simulacija

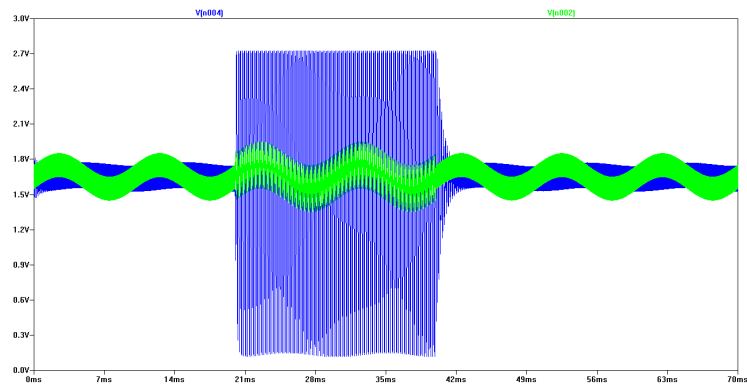
Med načrtovanjem sheme sem sproti preverjal delovanje vezja v spice-u. Tako sem ugotovil, če posamezni analogni sklopi pravilno delujejo najprej kot samostojni deli, nato pa kot gradniki celotnega vezja. Pri simulaciji je bil uporabljen brezplačni program LTspice podjetja Linear Technology.



Slika 13 – Shema vezja za simulacijo

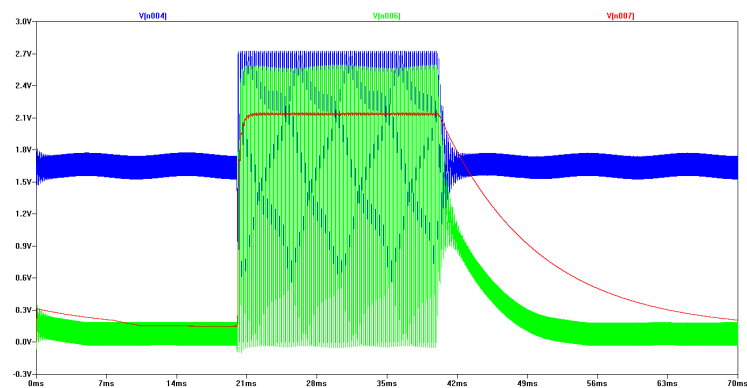
Vezje sem simuliral le od instrumentacijskega ojačevalnika dalje. Za vhodno napetost pa sem vzel vlak stotih sinusnih impulzov z frekvenco 5kHz in amplitudo 100mV. Vpliv motenj sem preizkušal tako, da sem v vezje vnašal še dva sinusna signala s frekvencama 100Hz ter 40kHz z različnimi amplitudami. Potek signala in rezultati simulacije so opisani v nadaljevanju.

Signal iz instrumentacijskega ojačevalnika (v sliki zelene barve) najprej filtriramo in ojačimo.



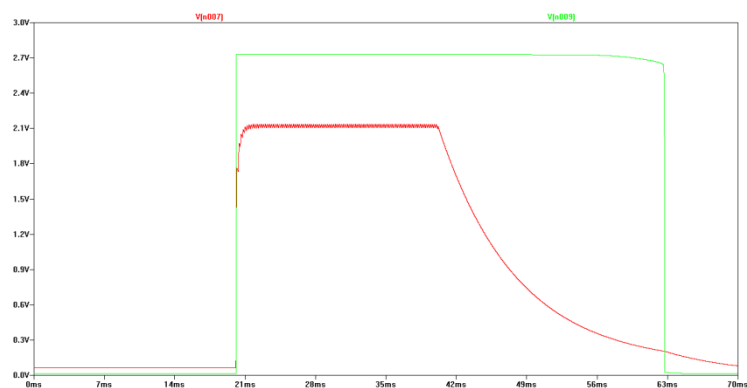
Slika 14 – Ojačanje in filtriranje

Dobljenemu ojačenemu signalu nato odstranimo enosmerno komponento (v sliki zelene barve), ter določimo njegovo ovojnico (v sliki rdeče barve).



Slika 15 – Odstranitev enosmerne komponente in detekcija ovojnice

Dobljeno ovojnico pripeljemo na vhod primerjalnika s histerezo, ki nam generira pravokotne impulze (v sliki zelene barve)

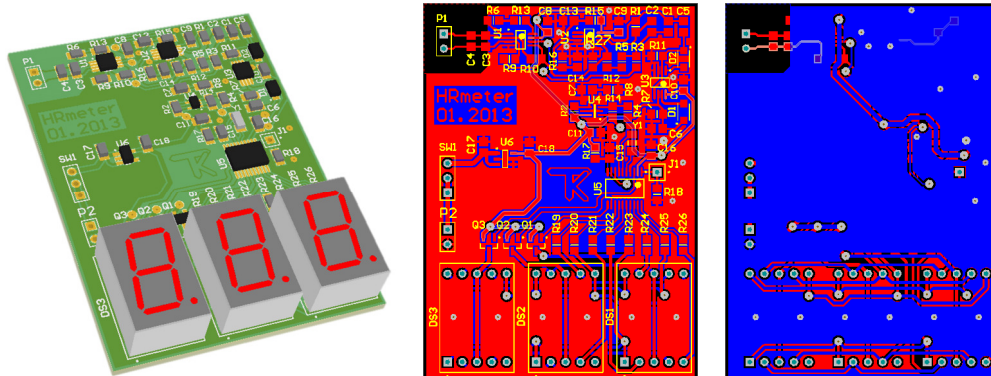


Slika 16 – Generiranje pravokotnih impulzov

S simulacijo sem odpravil osnovne načrtovalske napake ter tako preprečil, da vezje sploh ne bi delovalo. Hkrati pa sem nastavil vrednosti določenih parametrov in tako izboljšal delovanje vezja.

8 Tiskano vezje

Tiskano vezje je narejeno v dvostranski izvedbi na standardni ploščici debeline 1,6mm in velikosti 47x65mm. Večina komponent je v SMD ohišjih le prikazovalniki, antena in stikalo so v THT izvedbi. Vse komponente so postavljene na zgornjo stran. Prav tako je tudi tisk le na zgornji strani, kar zmanjša število potrebnih mask pri profesionalni izdelavi.

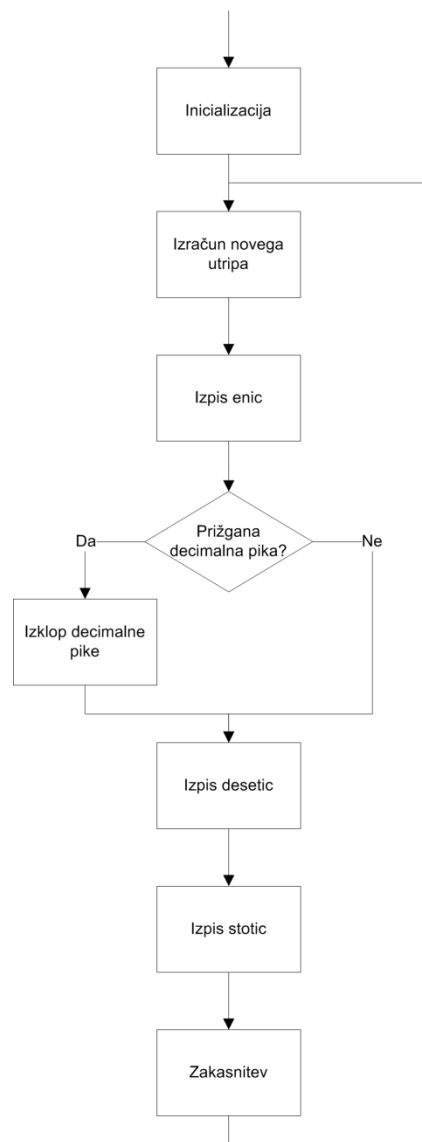


Slika 17 – Tiskano vezje v 3D pogledu ter zgornje in spodnje strani

9 Programski del

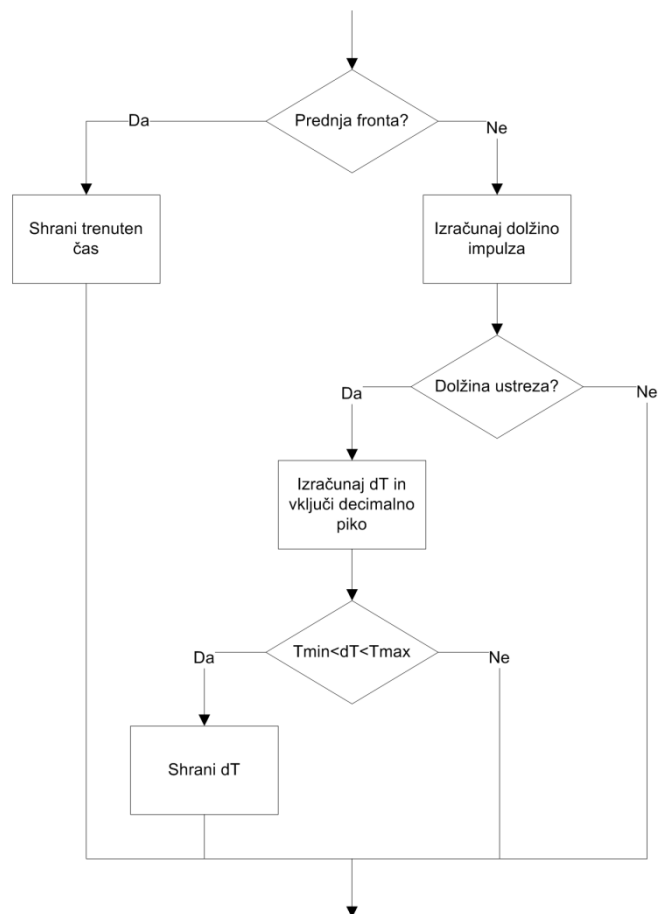
Programska koda je napisana v programskem jeziku C v razvojnem okolju IAR ter zapečena na mikrokontroler z uporabo vmesnika MSP-FET430UIF. Velikost končne programske kode znaša skromnih 799B.

Ob zagonu programa se najprej nastavijo nastavitve pinov, časovnika, ter zunanjih prekinitev, nato pa se začne glavna zanka, v kateri se izračunava srčni utrip. Trenuten srčni utrip je izračunan iz povprečja zadnjih 25 utripov. S tem sicer delno zgubimo na dinamiki merilnika vendar pa izboljšamo imunost merilnika na motnje. Vrednost utripa se nato razdeli na posamezne številke, na podlagi katerih se iz tabele prebere ustrezno bitno zaporedje, ki ga pripišemo prehodu mikrokrmilnika s priključenimi LED segmenti. Pri izrisu prve številke se uporablja tudi oznaka za decimalno piko, ki označuje zaznan utrip.



Slika 18 – Diagram osrednjega dela programa

Ob zaznanem utripu se sproži prekinitvena rutina, znotraj katere se izračuna in shrani čas med dvema utripoma. Pred shranitvijo novega časa program preveri, če je zaznan utrip veljaven. Za veljavnost mora biti vhodni impulz dovolj dolg, razlika med dvema utripoma pa ne sme biti premajhna. Dolžino utripa izmerimo tako, da prekinittev sprožimo ob prvi in zadnji fronti, ter pogledamo razliko časa med obema prekinitvama.



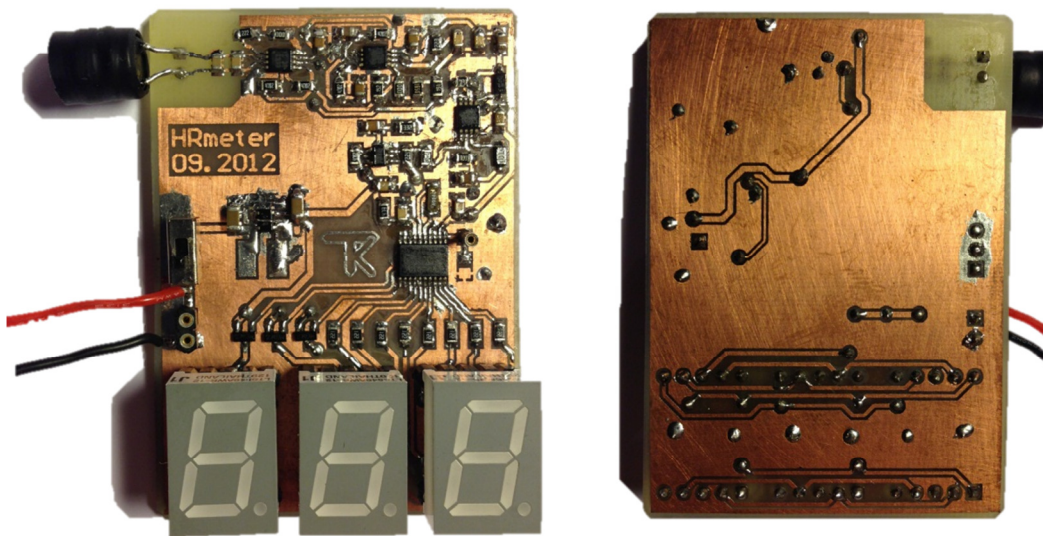
Slika 19 – Diagram poteka prekinitve

10 Kosovnica

Oznaka	Komentar	Opis	Ohišje iz knjižnice	Vrednost	Količina
C1, C2	Cap	Capacitor	CAP0805	22n	2
C3, C15	Cap	Capacitor	CAP0805	10n	2
C4	Cap	Capacitor	CAP0805	3n3	1
C5, C6, C13, C17, C18	Cap	Capacitor	CAP0805	1u	5
C7, C8, C9, C10, C11, C14, C16	Cap	Capacitor	CAP0805	100n	7
D1, D2	1N4148	Diode	sod123w		2
DS1	DIG1	14.2 mm General Purpose Blue 7-Segment Display: CA, RH DP, Gray Surface	H		1
DS2	DIG2	14.2 mm General Purpose Blue 7-Segment Display: CA, RH DP, Gray Surface	H		1
DS3	DIG3	14.2 mm General Purpose Blue 7-Segment Display: CA, RH DP, Gray Surface	H		1
Q1, Q2, Q3	NX2301P	P-Channel MOSFET	SOT95P240-3M		3
R1	Res	Resistor	RES0805	22k	1
R2, R9, R10, R15, R16, R17	Res	Resistor	RES0805	47k	6
R3	Res	Resistor	RES0805	150	1
R4	Res	Resistor	RES0805	1k	1
R5	Res	Resistor	RES0805	150R	1
R6	Res	Resistor	RES0805	4k7	1
R7, R11	Res	Resistor	RES0805	10k	2
R8	Res	Resistor	RES0805	3k3	1
R12	Res	Resistor	RES0805	16R5	1
R13	Res	Resistor	RES0805	470R	1
R14	Res	Resistor	RES0805	220k	1
R19, R20, R21, R22, R23, R24, R25, R26	Res	Resistor	RES0805	220R	8
R27	Res	Resistor	RES0805	1k5	1
SW1	Switch	Header, 3-Pin	HDR1X3		1
U1	INA333		MSOP65P490X110-8N		1
U2, U3	OPA2333		MSOP65P490X110-8N		2
U4	OPA333		SOT23127P600-8N		1
U5	MSP430F21x1	16-bit Ultra-Low-Power Microcontroller, 1-8kB Flash, 128B/256B RAM, Comparator	TSOP65P640X120-20N		1
U6	TPS78330	500nA IQ, 150mA, Ultra-Low Quiescent Current Low-Dropout Linear Regulator	SOT95P280X145-5N		1
Y1	32kHz	Crystal Oscillator	Q_32X15		1
				Skupaj:	59

11 Rezultati načrtovanja

Po končanem načrtovanju strojnega dela je bil čas za izdelavo tiskanega vezja. Ker tiskanina ni velika in ne preveč komplicirana, sem jo lahko izjedkal v domači delavnici in tako prihranil kar nekaj denarja za razvoj prototipa. Sledilo je spajkanje komponent. Odločil sem se, da najprej sestavim analogni del, saj se mi je zdela možnost za nedelovanje vezja tam največja. Po opravljenih merjenjih in popravku nekaj vrednosti elementov, sem sestavil še ostalo vezje. Umerjanja nihajnega kroga žal nisem imel možnosti opraviti, zato so vrednosti kondenzatorjev izbrane glede na opravljene izračune ter primerjave amplitud merjenega sprejetega signala pri različnih vrednostih kondenzatorjev.



Slika 20 – Sestavljeno vezje

Programsko kodo sem delno napisal že pred izdelavo strojnega dela, ta pa je omogočil še zadnje izpopolnitve in popravke. Ker je del povezav za prikazovalnike skupen s povezavami za programiranje, na vezje nisem postavil posebnega priključka. Med programiranjem sem torej moral odklopiti enega izmed prikazovalnikov in programator priključiti z žičkami. To je malce otežilo programiranje, a je prispevalo k manjši in cenejši tiskanini.

Po odpravi vseh hroščev in implementaciji filtriranja pulzov je sledilo končno testiranje. Pri tem sem si namestil oddajni pas in spremljal moj srčni utrip z originalnim sprejemnikom na uri ter mojim sprejemnikom. Opazil sem, da pri stabiliziranem utripu razlike med izmerjenima utripoma ni oziroma je bila ta največ 1 utrip na minuto. Pri hitrih spremembah pa je bilo spreminjanje utripa pri mojem merilniku zaradi večjega povprečja nekoliko počasnejše.

Izdelava se je zaključila z namestitvijo vezja v ustrezno ohišje.



Slika 21 – Končan izdelek v ohišju

12 Časovna in finančna rekapitulacija

Porabljen čas se je precej dobro ujemal s predvidenim. Kljub temu, da sem pri določenih delih porabil malenkost več časa, je končna razlika dokaj majhna. Pri finančnem delu je razlika malenkost večja. Vzrok za to je, da sem uspel vse čipe dobiti kot vzorce, precej ostalih stvari pa sem že imel doma.

12.1 Časovna rekapitulacija

Št.	Opis	Predviden čas	Porabljen čas
1	Pregled virov in obstoječih rešitev	5	4
2	Zasnova koncepta naprave	2	3
3	Načrtovanje električne sheme	5	7
4	Računalniška simulacija	3	2
5	Nabava materiala	1	1
6	Načrtovanje tiskanega vezja	5	7
7	Izdelava in sestava tiskanega vezja	4	4
8	Testiranje in optimizacija analognega dela	2	3
9	Izdelava programske kode	6	5
10	Končno testiranje	2	1
11	Izgradnja ustreznega ohišja	1	1
	Skupaj	36	38

12.2 Finančna rekapitulacija

Št.	Opis	Predvidena cena	Dejanska cena
1	Prsni trak - oddajnik	14€	14€
2	Elektronske komponente	10€	3€
3	Tiskano vezje	2€	2€
4	Ohišje	2€	2€
	Skupaj	28€	21€

13 Reference

1. http://en.wikipedia.org/wiki/Heart_rate_monitor
2. <http://home.swipnet.se/~w-10522/tomas/receiver/receiver.htm>
3. <http://www.maximintegrated.com/app-notes/index.mvp/id/3845>
4. <http://frm.users.sourceforge.net/electronics.html>
5. <http://www.parallax.com/tabid/816/Default.aspx>
6. Op Amps for Everyone, 3. Izdaja, B. Carter in R. Mancini

14 Priloge

1. Izvorna koda
2. Shema in tiskano vezje
3. Gerber, Drill ter Pick and place datoteke
4. Predstavitev