

Jednozvodový elektrokardiograf

Praktická časť odbornej zložky maturitnej skúšky

Nové Zámky, 2019

riešiteľ: **András Zemes**
ročník štúdia: **štvrtý**

konzultant: Mgr. Peter Hudec

Praktická časť odbornej zložky maturitnej skúšky

a Zadanie úlohy pre komplexnú maturitnú skúšku:

Meno a priezvisko:	András Zemes
Trieda:	4. IT
Konzultant:	Mgr. Peter Hudec
Školský rok:	2018/2019
Odbor:	Informačné a sieťové technológie
Názov témy:	Jednozvodový elektrokardiograf
Úloha:	Zhotoviť prístroj, <i>elektrokardiograf</i> , na snímanie a zachytenie elektrických potenciálov srdca.
Praktický charakter úlohy:	Návrh plošného spoja, programovanie mikrokontroléra, vytvorenie grafickej aplikácie.

András Zemes, riešiteľ

Mgr. Peter Hudec, interný konzultant

Zástupkyňa riaditeľa školy

V Nových Zámkoch dňa 25.02.2019

Čiastkové úlohy

1. Naštudovanie a spracovanie potrebnej teórie
 - Elektrický potenciál srdca
 - Prehľad prístrojov EKG
 - Signál a jeho spracovanie
2. Vytvorenie a konštrukcia prístroja na meranie EKG
3. Vytvorenie elektronickej časti, práca s mikrokontrolérom
4. Vytvorenie PC aplikácie na grafické zobrazenie spracovaných údajov
5. Webové rozhranie ku spracovaným dátam

Čestné vyhlásenie

Ja, dolupodpísaný András Zemes, študent 4. IT triedy Strednej priemyselnej školy S. A. Jedlika v Nových Zámkoch, týmto vyhlasujem, že som túto prácu vyhotovil sám, s použitím uvedenej literatúry a podľa rád môjho konzultanta.

András Zemes

Podakovanie

Touto cestou by som sa chcel poďakovať všetkým, ktorí mi akýmkoľvek spôsobom pomohli a povzbudzovali ma pri vypracovaní mojej komplexnej maturitnej práce. Predovšetkým však patrí moja vďaka konzultantovi, Mgr. Petrovi Hudecovi, za jeho všestrannú pomoc, za vedenie a cenné pripomienky pri záverečnom spracovaní práce.

Obsah

0 Úvod	7
1 Ciele	8
2 Problematika a prehľad literatúry	9
2.1 Elektrofyziológia srdca	9
2.2 Akčný potenciál	10
2.3 Prehľad prístrojov EKG	11
2.3.1 Druhy funkčných vyšetrení	11
2.3.2 Časti klasického prístroja EKG	12
2.3.3 Výdobytky modernej elektrokardiografie	12
2.4 Umiestnenie elektród	13
2.5 Signál a jeho spracovanie	14
2.5.1 Sieťový brum	14
2.5.2 Potlačenie driftu	14
2.5.3 Myopotenciály	14
2.5.4 Číslkové filtre	15
3 Metodika práce	16
3.1 Návrh a konštrukcia hardvéru	16
3.1.1 Zosilňovací obvod na vývojovej doske	16
3.1.2 Spájkovaný obvod	17
3.1.3 Finálny obvod a rozširovacie moduly	18
3.1.4 Konštrukcia zariadenia	20
3.2 Tvorba softvéru	21
3.2.1 Hardvérové programovanie	21
3.2.2 Grafické používateľské rozhranie (GUI)	21
4 Výsledky a diskusia	23
5 Závery práce	27
6 Zoznam použitej literatúry	28
7 Prílohy	29

0 Úvod

Ľudské telo je zázračný živý organizmus, ktorý sa správa podľa zákonitostí prírody a biológie. Dnes známa podoba Homo sapiens je výsledkom prirodzeného evolučného výberu, ktorým prechádza už milióny rokov. Vďaka nemu sú naše orgány vyspelé a odolné, dokonale slúžia prežitiu. Ich rola a presný spôsob fungovania však dlho zostávali záhadou pred lekármi a vedcami v minulosti. Revolučné objavy a výdobytky v medicíne viedli k podrobnému zmapovaniu a poznaniu ľudského tela, i keď mnoho fenoménov je doposiaľ nevysvetlených. Choroby sa stali liečiteľnými a predĺžil sa predpokladaný vek dožitia.

V modernej dobe sa výrazne zmenil štýl, akým žijeme. Jeho dôsledky nesú naše telá, ktoré neboli stavané na rušný, uponáhľaný spôsob života a na zvládanie každodenného stresu. Nesprávna životospráva, zlé návyky a degradácia životného prostredia majú záporný vplyv na zdravotný stav obyvateľstva a prispievajú k šíreniu civilizačných ochorení. Jedná sa o degeneratívne ochorenia, ktoré patria medzi najpálčivejšie globálne zdravotnícke problémy. V rebríčkoch najčastejších príčin smrti sa často vyskytujú na prvých priečkach.

Škodlivé zvyklosti ako nezdravé stravovanie, nedostatok fyzickej aktivity, fajčenie a nadmerná konzumácia alkoholu sa odzrkadľujú aj na srdci a obehovej sústave. Tieto a mnoho ďalších faktorov zvyšujú riziko srdcovocievnych ochorení vrátane kôrnatenia tepien, infarktu myokardu, vysokého krvného tlaku, atď. Ľudia si veľakrát ani neuvedomujú, že sa u nich vyvíja takáto choroba, alebo si to uvedomia neskoro.

Riešenie môže poskytnúť bioinformatika a biomedicínske inžinierstvo. Sú to vedné disciplíny, ktoré sa zaoberajú zhromažďovaním a vyhodnocovaním biologických dát a konštrukciou klinických zariadení. Vo veľkej miere uľahčujú prácu lekárom vo včasnom rozpoznaní a liečbe zdravotných problémov. Klasickým príkladom biomedicínskeho prístroja je elektrokardiograf, alebo skratkou EKG.

V roku 1903 Willem Einthoven zostrojil prvý funkčný elektrokardiograf. Použil strunový galvanometer na snímanie elektrických potenciálov z končatín pacienta. Jeho vynález sa stal základným kameňom elektrokardiografie, za ktorý neskôr získal Nobelovu cenu za fyziológiu alebo medicínu. Vďaka Einthovenovi lekári dostali prvýkrát v histórii možnosť nahliadnuť hlboko do srdca a odhaliť skryté defekty prevodového systému.

Myslím si, že najväčším nepriateľom ľudstva je neinformovanosť. Pokiaľ chceme predísť chorobám a žiť zdravý, plnohodnotný život, musíme poznať možné následky rizikového správania. Zámerom tejto práce je šíriť povedomie o dôležitosti starostlivosti o zdravie a preukázať, že pozorovanie vnútrotelových javov nemusí byť tak zložitý ako sa na prvý pohľad zdá.

1 Ciele

Kľúč úspešného elektrotechnického projektu spočíva v dokonalej spolupráci jeho elektronických a informačných zložiek. Zámerom tejto práce je poukázať na to, že aj pomerne jednoduchými komponentmi sa dajú vyriešiť komplexné problémy.

Dôležité aspekty výslednej práce sú univerzálnosť, portabilita a intuitívny dizajn. Prístroj by mal dokázať použiť každý bez špeciálneho vybavenia a bez podrobnej znalosti jeho fungovania. Riešenie má byť taktiež prenosné, aby bolo neobmedzene využiteľné.

Pri návrhu plošného spoja sa muselo prihliadať i na bezpečnosť pri použití prístroja. Elektrokardiograf sleduje pulz snímaním elektrických potenciálov srdca z povrchu tela elektródami. Napájaním obvodu batériami a ochranou malým napätím sa zabránilo výskytu nečakaných a potenciálne rizikových situácií.

Pomocou jednozvodového EKG vieme určiť pulz, srdcový rytmus, ba aj odhaliť prítomnosť srdcových arytmií a fibrilácie predsiení. Projekt môže taktiež slúžiť ako pomôcka pri výučbe elektroniky, programovania či informatiky. Znázorňuje fungovanie signálových filtrov, operačných zosilňovačov, mikrokontrolérov a grafických počítačových aplikácií.

2 Problematika a prehľad literatúry

Dovoľujem si vás oboznámiť s teoretickými východiskami a informovať o základných poznatkoch, ktoré sa týkajú nastolenej problematiky. Princípy elektrokardiografie tvoria kmeň tejto práce a sú jej neoddeliteľnou súčasťou.

2.1 Elektrofyziológia srdca

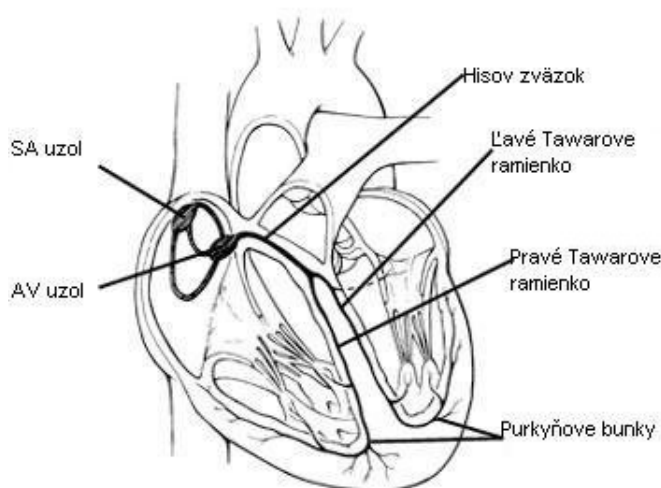
Základom vnútorného fungovania srdca je jeho elektrická aktivita. Srdce je jedinečný orgán z hľadiska, že jeho elektrická činnosť nie je nervovo založená. Vykonávajú ju špecializované vodivé svalové bunky. Zväzky takýchto buniek podmieňujú čerpaciu schopnosť srdca.

Svalové kontrakcie sú riadené elektrickými impulzmi, ktoré sa šíria po prevodovom systéme a pracovnom myokarde. Menia elektrické potenciály na rôznych bodoch pokožky približne o tisícinu voltu (1 mV). Táto elektrická aktivita skrýva v sebe neuveriteľné množstvo informácií, prostredníctvom ktorých získame náhľad do fungovania tohto zázračného orgánu.

Zdrojom týchto impulzov je sinoatriálny (SA) uzol, ktorý sa nachádza v stene hornej časti pravej predsene. Udáva frekvenciu kontrakcií myokardu (srdcového svalstva), ktorá je nominálne 70 tepov za minútu.

Signály sa ďalej šíria vodivými dráhami predsiení a stimulujú svalové kontrakcie. Pokračujú po srdcovej priehradke, septe, ktorá oddeľuje dve polovice srdca. Blízko bodu spojenia štyroch dutín srdca sa nachádza zhluk špeciálnych buniek - atrioventrikulárny (AV) uzol. Uzol AV postup vzruchov mierne inhibuje a následne ich vysiela do Hisovho zväzku.

Hisov zväzok sa delí na dve vetvy, tzv. Tawarove ramienka. Obidve vetvy vedú do siete Purkyňových vlákien, ktoré aktivujú pracovný myokard.



Obrázok 1: Prevodový systém srdca

2.2 Akčný potenciál

Ako vyrába a prenáša srdcové tkanivo elektrické impulzy? Aby sme si priebeh tohto deja mohli vysvetliť, musíme sa preniesť až na úroveň atómov.

Atóm je neutrálny, ak má rovnaký počet protónov (kladne nabitých častíc) a elektrónov (záporne nabitých častíc).

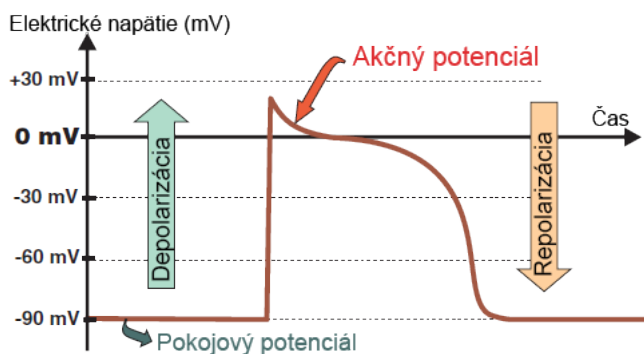
Ióny vznikajú z elektricky neutrálnych atómov pridaním resp. ubráním elektrónov.

V pokoji je srdcová bunka v *polarizovanom stave*:

- mimobunkový priestor je elektricky pozitívny pre vysokú koncentráciu kladných iónov sodíka a vápnika
- vnútro bunkový priestor je oproti vonkajšej strane negatívny
- rozdiel potenciálov je -90mV

Keď pokojový membránový potenciál dosiahne určitú prahovú hodnotu (cca. 15 mV), tzv. *akčný potenciál*, tento pokojový stav sa náhle zmení. V membráne bunky sa otvoria prieduchy a kladne nabité ióny prúdia späť do bunky. Táto náhla strata polarizácie sa volá depolarizácia a vzniká pri nej elektrický prúd.

Po depolarizácii nastáva protikladný dej, repolarizácia, keď sa ióny znovu prečerpávajú von mimo membránu. Depolarizačná vlna vyvolávaná uzlom SA sa šíri po prevodovom systéme srdca a uvádza svaly do pohybu. Proces, ktorý začal pumpovaním iónov takto končí pumpovaním krvi.



Obrázok 2: Akčný potenciál v grafickom vyobrazení

2.3 Prehľad prístrojov EKG

2.3.1 Druhy funkčných vyšetrení

Elektrokardiografia je jedným zo základných lekárskeho vyšetrení. Najčastejšie sa využíva v núdzových situáciách pri podozrení na srdcový infarkt, na zistenie poruchy súvisiacej s kardiovaskulárnym systémom alebo ako preventívne vyšetrenie so zámerom odhaliť možný srdcový defekt.

Vyšetrenie EKG je neinvazívne a nevyžaduje žiadnu špeciálnu prípravu. Pri klasickej EKG sa elektródy pripevnia na hrudník, zápästia a členky pacienta. Elektrické signály zachytené z povrchu tela, ktoré sú spravidla veľmi slabé, v rádoch milivoltov, prístroj zosilní a zaznamená. Následne ich lekár vyhodnotí.

Existuje niekoľko rôznych druhov vyšetrení:

Štandardné 12-zvodové EKG

Je najčastejšie používaný zo všetkých typov EKG. Pozostáva zo 6 končatinových zvodov a 6 hrudných zvodov. Každý zvod je samostatne zapisovaný na priebežne sa posunujúci špeciálny záznamový papier, prípadne zobrazuje hodnoty na monitore.

Záťažové EKG (ergometria)

Ukáže správanie srdca a obehového systému pri námahovej aktivite. Na simuláciu sa väčšinou používa stacionárny bicykel alebo bežecký pás. Monitoruje sa záznam EKG v súvislosti s krvným tlakom. Na zázname sa pátra po zmenách, ktoré na EKG urobenom v pokoji nie sú viditeľné.

Dynamické EKG

Umožňuje sledovať srdcovú činnosť pri bežných aktivitách počas 12-48 hodín. Zvýšením doby monitorovania sa zvyšuje pravdepodobnosť nálezu nepravidelností rytmu alebo námahových ischemií myokardu v zázname.

Tlakový Holter

Ambulantné 24-hodinové sledovanie krvného tlaku je jednoduché vyšetrenie často indikované pri diagnostikovaní hypertenzie. Sníma sa tlak krvi v domácom prostredí pri každodenných činnostiach pomocou nafukovacej manžety.

EKG určuje základné fyziologické hodnoty ako sú frekvencia srdcovej činnosti, rytmus, elektrická os srdca, prevodové časy a morfológia segmentov EKG krivky. Na základe týchto parametrov môže byť stanovená diagnóza a rozpoznaná porucha srdcového rytmu (arytmia), porucha prevodu elektrických vzruchov, ischemická choroba srdca a iné patologické zmeny v myokarde.

2.3.2 Časti klasického prístroja EKG

Tepelná tlačová hlava

Kreslí EKG krivku generovaním tepla.

Termopapier

Prichádza do kontaktu s tlačovou hlavou. Na mieste dotyku sa farba papiera mení na čiernu, takto vzniká krivka EKG. Papier je tiež citlivý na tlak.

Elektródy

Elektródy sú vyrobené z vodivého materiálu, ktorý dokáže zachytiť elektrické impulzy zo srdca. Signály odosielajú na spracovanie do meracieho prístroja cez pripojené káble.

Zosilňovač

Zosilňovač je zariadenie, ktoré sa nachádza v elektrokardiografe a zvyšuje amplitúdu elektrického signálu. Signály prichádzajúce zo srdca sú relatívne slabé (0,0001V až 0,003V) a je potrebné ich zosilniť.

Galvanometer

Premieňa prúd na mechanický pohyb.

Sada EKG káblov

Slúžia na spojenie zvyčajne desiatich elektród s hlavnou jednotkou prístroja EKG. Takáto konfigurácia umožňuje monitorovať srdce z 12 „pohľadov“.

2.3.3 Výdobytky modernej elektrokardiografie

Moderné prístroje EKG disponujú zabudovanými mikroprocesormi, ktoré ich riadia a rozširujú ich diagnostické schopnosti. Vďaka sofistikovaným matematickým algoritmom a modelom sú schopné previesť zložitú analýzu signálu a automaticky ho vyhodnotiť. Sú kompaktné, prenosné a vhodné i na monitorovanie mimo zdravotníckeho zariadenia.

Prepojitelnosť s počítačom je v dnešnej dobe takmer samozrejmosťou, niektoré dokonca komunikujú bezdrôtovo a aj na diaľku. Digitalizácia údajov môže byť výhodná napríklad z hľadiska archivácie alebo v prípade potreby zdieľať záznam so špecialistom.

Kardiologický monitor je častým rozšírením zariadenia EKG a umožňuje dlhodobo sledovať srdcovú aktivitu pacienta. Údaje zobrazuje v reálnom čase a ponúka náhľad kriviek ešte pred ich zápisom na papier.

2.4 Umiestnenie elektród

Tri končatinové elektródy (pravá ruka, ľavá ruka, ľavá noha) vytvárajú Einthovenov trojuholník. Vzniknú 3 *bipolárne* zvody reprezentované stranami trojuholníka. Každý zvod pozostáva z dvoch elektród, z pozitívneho a z negatívneho. Pozitívny a negatívny pól spolu tvoria elektrický vektor, ktorý sa premieta na papier.

$$\text{Zvod I: } V_I = \phi_L - \phi_R$$

$$\text{Zvod II: } V_{II} = \phi_F - \phi_R$$

$$\text{Zvod III: } V_{III} = \phi_F - \phi_L$$

, kde:

V_I = napätie zvodu I

V_{II} = napätie zvodu II

V_{III} = napätie zvodu III

ϕ_L = potenciál na ľavej ruke

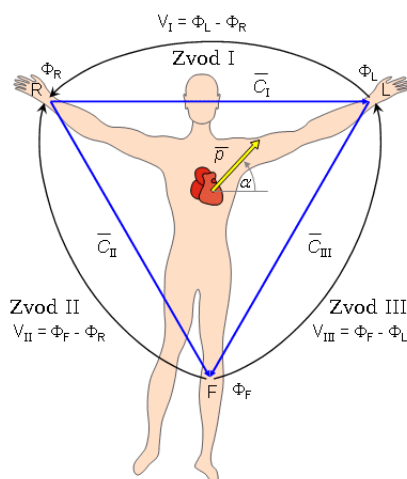
ϕ_R = potenciál na pravej ruke

ϕ_F = potenciál na ľavej nohe

Podľa Kirchhoffovho zákona platí, že veľkosť potenciálov (amplitúd na EKG zázname) vo zvode V_{II} je sumou potenciálov v zvodoch V_I a V_{III} :

$V_I + V_{III} = V_{II}$, z čoho vyplýva, že iba dva z troch zvodov sú nezávislé.

Einthoven definoval rozdiely potenciálov medzi troch páromi horeuvedených bodov ako základné končatinové zvody v elektrokardiografii.



Obrázok 3: Einthovenove končatinové zvody a Einthovenov trojuholník

2.5 Signál a jeho spracovanie

Po úspešnom zmeraní a zosilnení signálu čelíme zložitej prekážke v snahe zachytiť srdcový rytmus. Signál je síce zosilnený, ale naďalej obsahuje mnoho nežiaducich elementov vplyvom rušivých faktorov z okolia. Výsledkom je skreslený biosignál, ktorý je v tejto fáze nepoužiteľný.

Nepresnosti v meraniach odborne nazývame *artefakty*. Artefakty sa môžu prejavovať v menšej či väčšej miere v závislosti od nedokonalostí v priebehu vedenia signálu z pacienta do aparatury (prístroja). V elektrokardiografii rozoznávame tri základné druhy artefaktov:

- sieťový brum
- kolísanie nulovej línie (drift)
- myopotenciály

V minimalizácii nežiaduceho šumu nám napomáha súbor špecializovaných hardvérových i digitálnych filtrov.

2.5.1 Sieťový brum

Prvým krokom spracovania signálu je základná hardvérová filtrácia. Elektromagnetická interferencia (EMI) vzniká pôsobením elektromagnetického poľa z elektrickej siete. Pri tomto jave dochádza k vzniku indukovaného napätia (U_i) a indukovaného prúdu na vodiči. Šum opísaného druhu môžeme charakterizovať pri frekvencii 50 Hz sínusového rušenia. Na potlačenie sieťového brumu je účinná kombinácia hardvérového RC článku s digitálnym filtrom.

2.5.2 Potlačenie driftu

Drift alebo kolísanie nulovej línie opisuje skupinu elektrochemických a mechanických javov. Príkladmi elektrochemických sú potenie pod elektródami, nedostatočné odmastenie pokožky, malé množstvo kontaktného gélu. Dýchanie (do 0,8 Hz) a pomalé pohyby klienta (do 2 Hz) sú mechanické javy. Na odstránenie nízko-frekvenčnej rušivej zložky použijeme hornopriepustný filter.

2.5.3 Myopotenciály

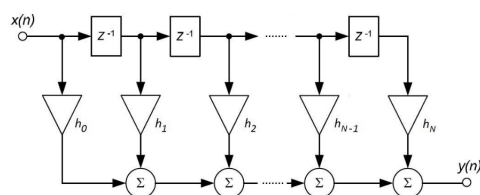
Ďalší rušivý faktor pri vyšetrení EKG predstavuje svalová aktivita, najmä pri záťažovom EKG. Svaly počas pohybu vytvárajú elektrické impulzy, ktoré sa potom prejavujú vo forme musku-loskeletálneho artefaktu. Najväčším problémom v zdaní účinku myopotenciálov je vzájomné prekrývanie frekvenčného pásma svalovej aktivity a užitočného pásma EKG. Na odstránenie tohto artefaktu nie je účinná pásmová priepusť. Vyžaduje sa pokročilejšie riešenie, napríklad pomocou adaptívnej filtrácie.

2.5.4 Číslicové filtre

Konečná impulzná odozva - FIR

„Filtre s konečnou impulznou charakteristikou (FIR – Finite Impulse Response) sú filtermi matematicky jednoduchšie opísateľnými ako IIR filtre, pretože sú väčšinou realizované nerekurzívne (nemajú spätnú väzbu). Pri nerekurzívnej realizácii má filter všetky póly v počiatku, čo mu zaručuje stabilitu. Medzi základné vlastnosti FIR filtrov je okrem stability aj možnosť získať lineárnu fázovú kmitočtovú charakteristiku v celom kmitočtovom rozsahu.”

(Tuka, 2015)

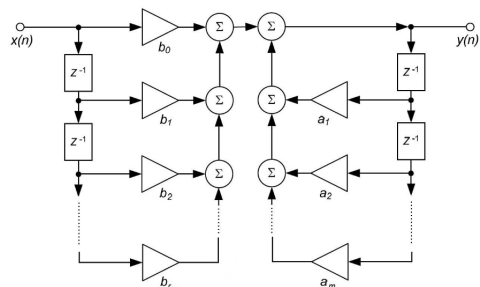


Obrázok 4: Bloková schéma FIR filtra

Nekonečná impulzná odozva - IIR

„Filtre s nekonečnou impulznou charakteristikou (IIR – Infinite Impulse Response) vznikli ako číslicové varianty analógových filtrov. Sú matematicky zložitejšie ako FIR filtre, pretože sú realizované rekurzívne (vždy obsahujú spätnú väzbu). Oproti FIR filtrom však nie je treba tak veľký počet oneskorovacích členov a preto je možné ho použiť aj na kratšie dáta (inicializácia nie je tak dlhá). IIR filtre majú všeobecne väčší počet zapojení ako FIR práve pre ich rekurzívnu časť.”

(Tuka, 2015)



Obrázok 5: Bloková schéma IIR filtra

3 Metodika práce

3.1 Návrh a konštrukcia hardvéru

Proces návrhu hardvérových komponentov som si rozdelil do niekoľkých fáz kvôli systematickosti. Takýto spôsob práce mi umožnil priebežné testovanie a odhaľovanie možných chýb počas vývoja. Od začiatku až po finálny dizajn som prešiel tromi iteráciami projektu.

Na návrh elektroniky a dizajn plošných spojov som používal grafický počítačový editor Eagle (verzia 9.1.3).

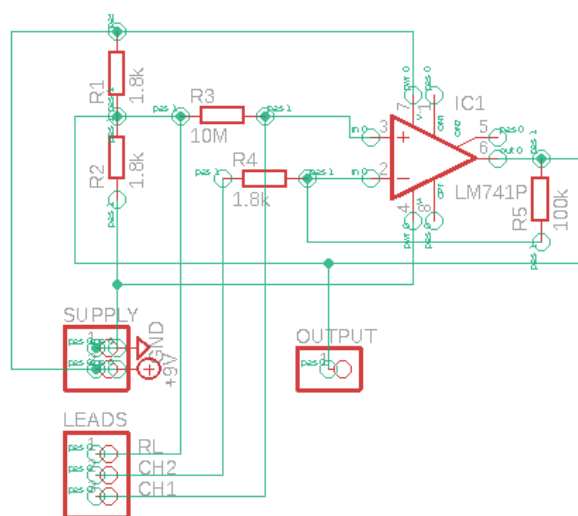
3.1.1 Zosilňovací obvod na vývojovej doske

Prvý prototyp obvodu bol vyrobený podľa jednoduchej schémy. Pozostávala iba z jedného operačného zosilňovača a zopár rezistorov. Z bezpečnostných dôvodov bola namiesto laboratórneho zdroja použitá 9V batéria na napájanie obvodu.

Operačný zosilňovač LM741 slúži na zosilnenie nízkonapäťového vstupu z elektród priložených na povrch tela. Je zapojený v diferenčnej konfigurácii, jeho invertujúci a neinvertujúci vstup predstavujú rozdielne napätia. Výstup je teda funkciou napäťovej diferencie medzi dvoma hrudnými elektródami. Faktor zisku je približne 50 podľa pomeru $R_5:R_4$. Z dôvodu, že zosilňovač funguje optimálne pre stredové hodnoty (medzi maximom a minimom), je nutné jeho vstupy dostať do použiteľného pásma. Na tento účel slúži napäťový delič R1-R2.

Analógový výstup bol pripojený do 3,5 mm mikrofónového rozhrania zvukovej karty počítača. Signál prešiel základnou softvérovou filtráciou a bol graficky zobrazovaný pomocou počítačovej aplikácie.

Hlavnou problematikou tohto návrhu bola všeobecná nespoľahlivosť a výskyt elektromagnetickej interferencie a iných artefaktov v meraných hodnotách.



Obrázok 6: Schéma zosilňovacieho obvodu

3.1.2 Spájkovaný obvod

Ďalším krokom bolo navrhnuť plošný spoj v Eagli podľa vyššej uvedenej schémy zosilňovacieho obvodu. Na základe počítačového návrhu bol zhotovený druhý prototyp na spájkovateľnej vývojovej doske. Elektrické súčiastky boli osadené a pospájané vodivými cestami z cínu. Doska mala celkovo 6 vývodov:

- VCC (+5V) napájanie
- GND - zem
- OUT - analógový výstup
- Hrudný zvod č. 1
- Hrudný zvod č. 2
- Pravá noha

Signál bol meraný a spracúvaný za pomoci Arduina UNO. Výstup zo zosilňovača bol spojený s analógovým pinom Arduina A0 (ADC). Vykresľovanie krivky EKG sa zrealizoval zabudovaným nástrojom programu Arduino IDE, ktorý sa nazýva Serial Plotter.

Zobrazovaný signál bol do veľkej miery znečistený, preto bolo nutné použiť softvérový filter. Najjednoduchší filter vhodný na úlohu bol súčasťou oficiálnej knižnice Filters.h.¹

Nasledovný kód je implementáciou dolnopripustného filtra RC, ktorý slúži na vyhladenie signálu. Filter je nastavený na frekvenciu 50 Hz. Obsahuje deklaráciu premenných a inicializáciu triedy FilterOnePole.

```
float filterFrequency = 5.0;
```

```
FilterOnePole lowpassFilter (LOWPASS, filterFrequency);
```

```
while (true) {  
    lowpassFilter.input (analogRead (INPUT_PIN));  
}
```

Filter funguje na báze nekonečnej impulznej odozvy (IIR). Hlavnou výhodou je, že riešenie kladie veľmi nízke nároky na pamäť a výpočtovú kapacitu. Veľké pozitívum znamená tak tiež jednoduchosť implementácie do projektu. Onedlho sa však prejavili seriózne problémy spôsobené vlastnosťami spomínaného filtra. Po úvodnom zachytení impulzov amplitúda postupne klesala, až kým nedosiahla nulu. Takéto správanie je nepriaznivým vedľajším účinkom IIR filtrov.

¹Dokumentácia k spomínanej knižnici je dostupná na webovom sídle playground.arduino.cc/Code/Filters

3.1.3 Finálny obvod a rozširovacie moduly

Výsledný produkt zahŕňa niekoľko dôležitých komponentov. Ústrednú časť štruktúry zariadenia tvorí osobitne navrhnutý a na mieru vyrobený plošný spoj. Táto doska priamo spája analógovú časť aplikácie dovedna s digitálnym signálovým procesorom. Ďalej je doplnená o dva rozširovacie moduly a batérie.

Mikroprocesor

Mikroprocesor je centrálnym prvkom zariadenia. Zodpovedá za digitalizáciu a spracúvanie príchodzieho signálu, riadenie a koordináciu jednotlivých elektrických článkov v rámci aplikácie a odovzdáva informáciu počítaču.

Pri výbere mikroprocesora sa prihliadalo na výkon, úspornosť, počet vývodov a na veľkosť dostupnej programovej pamäte. Nakoniec sa uprednostnil 8-bitový mikroradič Atmega328P z rodiny megaAVR od firmy Atmel. Vyhovel všetkým požiadavkám projektu, je vhodný na úlohu DSP a disponuje kvalitnou dokumentáciou i komunitnou podporou zo strany vývojárov. Podrobnosti o mikroprocesore sú opísané v tabuľke nižšie.²

Parameter	Hodnota
Typ programovej pamäte	Flash
Veľkosť programovej pamäte (KB)	32
Max. rýchlosť CPU (MIPS)	20
Komunikačné periférie	1-UART, 2-SPI, 1-I2C
Tepelná tolerancia (C)	-40 do 85
Napájacie napätie (V)	1,8 do 5,5
Počet vývodov	28

Tabuľka 1: Parametre mikroprocesora

Napaľovanie zavádzača

Zavádzač (angl. bootloader) mikroprocesora je prvý program, ktorý sa spustí pri každom štarte. Asistuje pri nahrávaní kódu do flash pamäte a čip sa stáva samoprogramovacím, čím zaniká potreba programátora.

Samostatný čip Atmega328P sa dodáva bez zavádzača, tým pádom sa priamo nedá programovať. Proces napaľovania bootloadera riadi medzičlánok zvaný in-system program (ISP). Na túto rolu vyhovuje aj doska Arduino UNO.

Prvým krokom je nahráť šablónu ArduinoISP na dosku. Potom sa prepojí mikročip s Arduino podľa špecifickej schémy zapojenia. V nastaveniach sa zvolí typ dosky „Arduino Duemilanove alebo Nano” pre 16 MHz konfiguráciu. Za programátor sa vyberie možnosť „Arduino as ISP”.

Po dôkladnej kontrole všetkých nastavení sa môže spustiť nahrávanie zavádzača (Tools → Burn Bootloader).

²Informácie boli čerpané zo stránky výrobcu www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328p

FT232RL programátor s Mini USB

Adaptér USB–serial zabezpečuje programovanie čipov a komunikáciu s nimi. Komunikácia prebieha cez UART, tj. cez Rx a Tx piny. Úspešné nahratie programu má jednu podmienku: na čipe sa musí nachádzať zavádzač. Modul je kompatibilný s napätiami 3.3V a taktiež 5V, ladenie sa umožňuje pomocou prepínača. Zapojenie musí byť doplnené o kondenzátor (0.1 μ F) a o pull up rezistor na vývode DTR, aby resetovanie mohlo správne prebehnúť.

FT232RL	Atmega328
DTR	RESET
TXD	RX
RXD	TX
5V	VCC
CTS (clear to send)	patrí do štandardu FT232, nie je nutné ho použiť
GND	GND

Tabuľka 2: Definície pinov

Slot pre Micro SD kartu

Slot umožňuje čítanie a zapisovanie údajov na Micro SD kartu. Prenos údajov sa uskutočňuje cez štandardné SPI rozhranie. Modul funguje s logickým napätím 3.3V, avšak vďaka zabudovaného regulátora toleruje aj 5V. Tým pádom je plne kompatibilný so všetkými Arduino doskami a s príslušnou natívnou knižnicou *SD.h* z ponuky Arduino IDE.

Výroba integrovaného plošného spoja

Hotový digitálny návrh skompletizovaného plošného spoja bol odoslaný do výroby profesionálnemu výrobcovi. K objednávke bol priložený súbor *.brd* vyexportovaný z projektu Eagle (viď. prílohu). Špecifikácie objednanej dosky:

Jednostranný plošný spoj so spájkovateľným ochranným lakom

Hrúbka dosky a medenej vrstvy: 1.5 mm, 35 μ m

Rozmery PCB: 65x50 mm

Počet otvorov: 87 ks

Po doručení objednanej dosky nasledovalo manuálne osadenie súčiastok. Ako prvé boli prispájkované päťice integrovaných obvodov: DIP28 pre mikroprocesor a DIP8 pre operačný zosilňovač. Použitie päťíc sa odporúča v prípade citlivých komponentov z dôvodu, aby sa predišlo ich možnému poškodeniu pri vysokých teplotách počas spájkovania.

Ďalej boli postupne osadené ostatné súčiastky ako kryštál 16 MHz, cievka, rezistory a keramické kondenzátory. Pri osadzovaní bipolárnych súčiastok (napr. svetelné diódy, elektrolytické kondenzátory) sa nesmie zabúdať na správne smerovanie kladných, resp. záporných pólov.

Naposledy boli prispájkované napájacie a vstupnovýstupné piny pre rozširovacie moduly a elektródové vodiče.

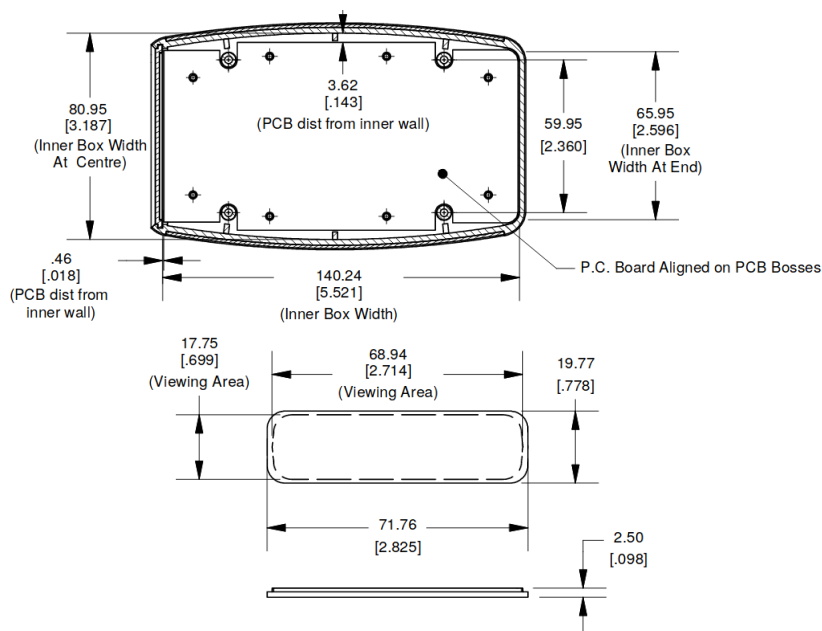
3.1.4 Konštrukcia zariadenia

Posledným krokom v práci s hradvérom bolo umiestniť všetky komponenty do škatuľky. Na tento účel padla voľba na univerzálny kryt HM-1553DGY³ od Hammondu s rozmermi 89x147x24 mm v tmavosivom prevedení. Výrobný materiál je plast ABS. Kryt sa skladá z troch častí: z predného panelu a z vrchnej a spodnej časti, ktoré sa uzatvárajú štyrmi skrutkami.

Napájacie puzdro na tri AA batérie bolo uložené pozdĺžne v zadnej časti krytu. K nemu bol pripojený zvisle polohovaný USB—Serial modul. Na zadnej stene bol taktiež vytvorený otvor na rozhranie Micro USB.

Okraje hlavného plošného spoja boli upravené a tvarované tak, aby sa doska mohla prichytiť o jeden z podporných stĺpikov. Následne bola vyvŕtaná diera pre svetelnú indikačnú diódu a vytvorený obdĺžnikový otvor pre vypínač. Na prednom paneli boli vyvŕtané diery s väčším priemerom na vsadenie troch laboratórných konektorov.

Nakoniec boli všetky komponenty upevnené obojstrannou lepiacou páskou. Rozširovacie moduly, vypínač a konektory boli zapojené do riadiacej dosky či už priamo alebo prepojovacími káblami. Prepojovacie káble museli byť vyrobené na mieru kvôli nevšedným požiadavkám na dĺžku a počet vodičov a tvar prípojky.



Obrázok 7: Nárys a pôdorys škatuľky s rozmermi

³Technický výkres krytu so špecifikáciami a rozmermi sa nachádza na stránke distribútora <https://www.tme.eu/sk/Document/bd6787db93f837d8972974413558d5cd/HM-1553DBK.pdf>

3.2 Tvorba softvéru

Softvérová zložka tvorí druhú navýznamnejšiu časť tejto práce. Z hľadiska spracúvania, zobrazovania, vyhodnocovania a eventuálnej použiteľnosti signálu zohrávajú programové prostriedky dôležitú a nenahraditeľnú úlohu. Vývoj softvéru predstavoval komplexný proces, ktorý zahŕňal zužitkovanie možností rôznych programovacích jazykov a prostredí.

Každý stupeň práce so signálom má za úlohu riešiť samostatný problém a zároveň komunikovať s ostatnými jednotkami. Aplikačná vrstva projektu sa delí na tri hlavné časti:

1. Hardvérové programovanie
2. Grafické používateľské rozhranie (GUI)
3. Webová aplikácia

3.2.1 Hardvérové programovanie

Prvá fáza sa zaoberá primárnym filtrovaním na úrovni mikroprocesora. Pozostáva z potláčania sieťovového brumu, kolísania nulovej línie a iných artefaktov (viď. podkapitolu 2.5 *Signál a jeho spracovanie*). Na tento účel boli použité zdrojové kódy z voľne dostupného internetového repozitára ⁴, keďže návrh filtrov nespadá do sféry pôsobnosti tejto odbornej práce. V kóde sú implementované knižnice filtrov FIR a IIR. Obsahuje taktiež matematicky odvodené koeficienty, ktoré určujú charakteristiky filtrov zvlášť prispôsobené k elektrokardiografii. Softvér bol doplnený o algoritmus, ktorý popri filtrovaní súčasne riadi vysokorýchlostné zaznamenávanie údajov na pripojenú pamäťovú kartu MicroSD.

3.2.2 Grafické používateľské rozhranie (GUI)

Na zobrazenie zmeranej krivky EKG existujú tri možnosti. Jedna z nich je mechanický spôsob, čiže tepelná tlač na papier. Ďalšie sú integrovaná obrazovka alebo externé zariadenie s displejom. Najuniverzálnejšie a najekonomickejšie riešenie je signál spracovať na počítači. Pri voľbe vhodného prostredia na tvorbu softvéru sa prihliadalo i na multiplatformovosť.

Processing 3 je voľne dostupná grafická knižnica a vývojové prostredie (IDE), ktoré disponuje prostriedkami umožňujúcimi vykresľovanie grafov a priamu komunikáciu s mikrokontrolérom. Processing funguje na základe programovacieho jazyka Java a obsahuje ďalšie rozšírené technické a matematické nástroje.

Sériová komunikácia prebieha pomerne vysokou prenosovou rýchlosťou 115200 bps pre dosiahnutie čo najväčšieho rozlíšenia. Prichádzajúce údaje odchyťáva **sledovač udalostí (event listener)**, ktorý má za úlohu ich transformovať do rozsahu zobraziteľného.

O samotné vykresľovanie grafu sa stará natívna funkcia **draw()**, ktorá sa opakovane vykonáva počas behu programu. Definuje nové súradnice krivky grafu a spája ich s posledným známym bodom grafu.

Grafické užívateľské rozhranie zabezpečuje knižnica ControlP5 zvlášť určená pre vývojové prostredie Processing. Úpravou a rozšírením jej tried boli na mieru vytvorené ovládacie prvky.

⁴Repozitár sa nachádza na adrese <https://github.com/ttapa/Filters> a vlastníkom je Pieter Pas.

Funkcie programu zahŕňajú výber vstupného portu, ukladanie snímok grafu a exportovanie zaznamenaných hodnôt. Výber portu funguje pomocou rozotváracej ponuky (dropdown menu), ktorá obsahuje všetky dostupné rozhrania. Po zvolení portu, ak bol úspešne otvorený, sa začne vykresľovať graf na obrazovke. Naľavo od tejto lišty sa nachádza tlačidlo na zosnímanie obrazovky. Snímka sa následne uloží do predvoleného adresára. Tretia možnosť je nahrávanie meraných hodnôt prostredníctvom prepínača „REC“. Po ukončení záznamu - opätovným kliknutím na prepínač - sa vygeneruje súbor CSV.

4 Výsledky a diskusia

Komplexná odborná práca sa zaoberá získavaním, zhromažďovaním a spracúvaním somatických ukazovateľov, presnejšie elektrických impulzov srdca. Prezentuje funkčné riešenie prejednáwanej problematiky a vzťahujúcej sa teórie. Výstupy projektu sú výsledkom niekoľkomesačného výskumu, dizajnu, prototypovania a testovania rôznych technických alternatív.

Výstupy práce sú nasledovné:

Kvantitatívne

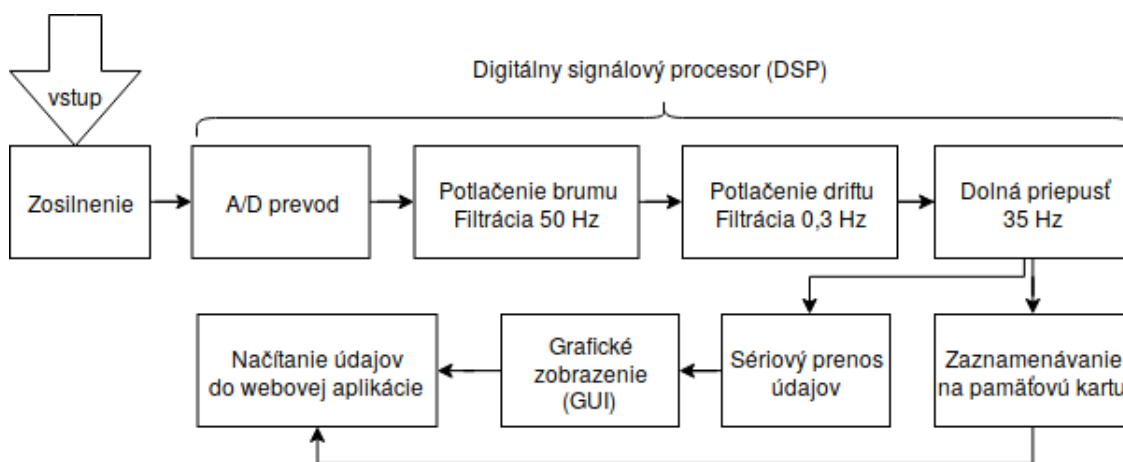
1. Tvorba a návrh nezávislého, účelového hardvéru
2. Grafická počítačová aplikácia
3. Interaktívne webové rozhranie
4. Podrobná dokumentácia problematiky a pracovného postupu

Kvalitatívne

1. Dostupné riešenie komplexného problému
2. Prospešné premostenie rôznych odborov: zdravotníctva, elektroniky a informatiky
3. Aplikácia a presadenie teórie EKG do praxe
4. Oboznámenie verejnosti s možnosťami EKG

Predmetom práce je sledovanie srdcového rytmu. Kombináciou rôznych postupov a úprav vzniká žiadaný graf. Prvotne musí zosnímaný signál prejsť niekoľkonásobným zosilnením. Následne je prevedený do digitálnej podoby na ďalšie spracovanie. Prijíma ho signálový procesor, ktorý má na starosť odfiltrovať rušivé činitele. Tento účinok sa dosahuje za pomoci číslicových filtrov a matematických modelov. Výsledok sa buď priamo zapisuje na dátový nosič alebo sa prenáša do počítača. V prípade druhej alternatívy dáta v reálnom čase vykresľuje počítačová aplikácia. Taktiež rozširuje možnosti práce so signálom vďaka dostupným programovým prostriedkom. Užívatelia budú mať príležitosť dáta prehliadať a zdieľať cez webové rozhranie.

Vizuálna schéma popísaného postupu je uvedená nižšie v podobe blokového diagramu. Vstupné údaje sú na ňom znázornené šípkou v ľavom hornom rohu. Šípka smeruje k prvému rámcu (bloku), ktorý zastupuje samostatný krok v reťazi úkonov. Tento sled úkonov zabezpečuje premenu údajov na informácie a vedie k výstupným bodom, akými sú napríklad pamäťová karta a grafické rozhranie počítačovej alebo webovej aplikácie.



Obrázok 8: Bloková schéma spracovania EKG

Bezpečnosť Zariadenie nie je určené na masové použitie, preto jeho bezpečnosť nie je oficiálne zaručená. Pri návrhu boli zohľadnené možné riziká pri prevádzke zariadenia a implementovali sa primerané bezpečnostné opatrenia.

Najdôležitejšou ochranou je vylúčenie napájania laboratórnym zdrojom. Pri nesprávnom nastavení alebo poruche zdroja by sa nebezpečný prúd mohol dostať do kontaktu s telom vyšetrovaného. Aby sa podobnému scenáru zabránilo, obvod napájajú tri AA články (4,5V).

Pri jednosmernom prúde má najväčší význam elektrolytický účinok, pretože väčšie elektrochemické zmeny dráždia pohybové nervy, čím spôsobujú kŕčovité stiahnutie svalov. Pri veľkých prúdoch sa zastavuje životná činnosť buniek.

Jednosmerné prúdy do 3 mA nevyvolávajú obyčajne žiadny pocit. Pri 5-10 mA sú sprievodné znaky svrbenie a pocit tepla. Ak prúd prechádza hrudníkom, pri prúdoch 80-100 mA je dýchanie takmer nemožné, komory srdca sa začnú kŕčovito sťahovať (fibrilácia komôr) a dochádza k zástave krvného obehu.

Prípojný miesta tela na EKG:

- Pravá noha - bod uzemnenia. Sám o sebe nepredstavuje nebezpečenstvo. Má rovnaký efekt ako napríklad použitie antistatického náramku.
- Hrudný zvod č. 1 - spojený s vysokoimpedančným vstupom zosilňovača a s batériou cez 10 MΩ rezistor (chráni pred nebezpečným prúdom).
- Hrudný zvod č. 2 - okrem vysokoimpedančného vstupu zosilňovača je tiež spojený s výstupom cez 100 kΩ rezistor. Treba si však uvedomiť, že tento prúd ani pri maximálnych hodnotách (4,5V) nepresahuje 0,045mA.

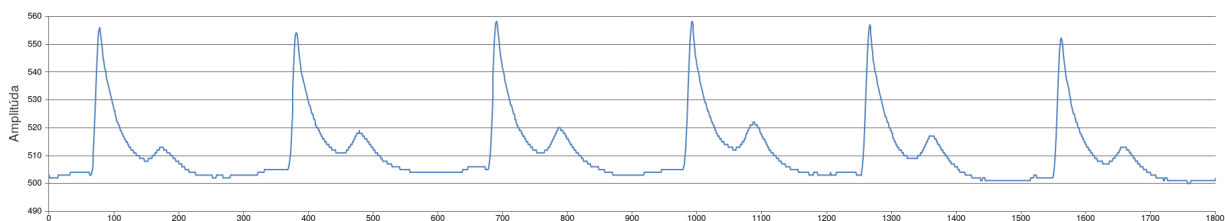
Bezpečnosť zariadenia by sa ďalej mohlo vylepšiť oddelením optočlánkom. V tom prípade by sa dosiahla úplná separácia vstupných elektród od elektrickej časti.

Očistenie signálu od nežiaducich faktorov

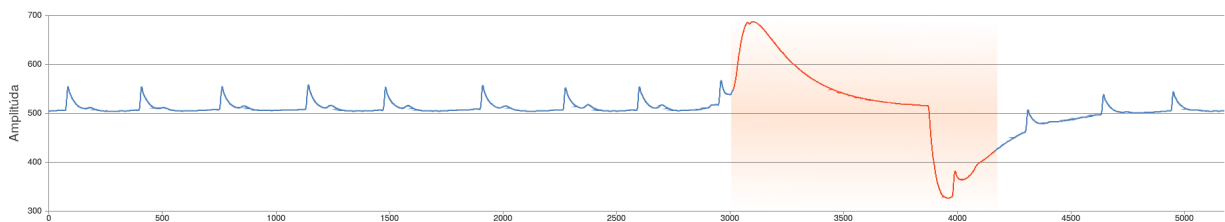
Vďaka kombinácii hardvérových a softvérových filtrov sa podarilo dosiahnuť vyhovujúci výsledok. Signál prechádza viacstupňovým filtrovaním. V rade filtrov vystupuje Butterworth, lineárny filter a dve pásmové priepuste.

Ďalšie spôsoby znižovania dopadu rušivých faktorov sú mechanického druhu. Pri meraní máme možnosť aplikovať vodivý gél, ktorý znižuje odpor medzi pokožkou a snímacími elektródami. Pokojová poloha v ľahu, dĺžka a tienenie káblov a zdroj napájania taktiež dokážu ovplyvniť konečný signál.

Spoločným efektom vymenovaných prevenčných prostriedkov je eliminácia artefaktov rôzneho pôvodu. Na grafoch nižšie sa znázorňuje podoba signálu pred procesom filtrovania a po ňom.



Obrázok 9: Krivka EKG po viacstupňovom filtrovaní



Obrázok 10: Artefakt na zázname EKG

Prínosy projektu a možnosti využitia

Projekt svedčí o tom, že aj pomerne zložité oblasti, ako elektrokardiografia, môžu byť relevantné na stredoškolskej úrovni. Jednou zo sfér, kde môže byť užitočný je práve vzdelávanie. Práca sa zaoberá teóriou EKG a jej praktickým využitím. Demonštruje základné princípy fungovania dôležitého druhu zdravotníckeho príslušenstva.

Okrem toho umožňuje laikom sledovať pulz, odhaliť prítomnosť arytmií v pohodlí domáceho prostredia. Tým otvára nové možnosti na nelekárske použitie EKG. V prípade potreby sa výsledky dajú jednoducho zdieľať s odborníkom cez internet.

Obmedzenia riešenia

Riešenie má samozrejme aj svoje nevýhody. Jedným z hlavných nevýhod je limitovanie počtu zvodov na jeden, čo výrazne obmedzuje množstvo informácií potrebných na stanovenie presnej diagnózy. Ďalej, keďže je hardvér minimalistický, rozlíšenie a kvalita merania nedosahuje úroveň komerčných lekárskeho prístrojov.

Diskusia

V akademickej sfére existuje nemálo študií a odborných prác, ktoré sa venujú práve téme elektrokardiografie. Toto medicínske odvetvie prešlo od jeho založenia pred vyše sto rokmi mnohými výraznými zmenami a vylepšeniami vďaka rozsiahlemu výskumu.

Tento projekt je praktického charakteru, nesnaží sa prekonať súčasné technológie a poznatky, ale prezentuje ich principiálnu podstatu dostupnými prostriedkami. Zadané ciele boli splnené: (1) *spracovanie vzťahujúcej sa teórie*, (2) *návrh a konštrukcia prístroja EKG*, (3) *programovanie mikrokontroléra*, (4) *digitálne spracovanie údajov*.

Opísané riešenie merania EKG úvodným požiadavkam vyhovel. Všetky nálezy sú zreprodukovateľné na základe dokumentácie pracovného postupu. Skutočnú výzvu týkajúcu sa danej problematiky však predstavuje navrhnutie prístroja spoľahlivého za každých okolností. Splnenie takéhoto nároku si vyžaduje robustné medicínske riešenie a naďalej zostáva mimo dosahu používateľských aparátov - či už smart hodín alebo dosiek Arduino.

5 Závery práce

Príležitosť na učenie sa ponúka každou ľudskou interakciou. Nové poznatky sa preverujú a ďalej utvrdzujú presadením do praxe. Je všeobecne známe, že sa človek najefektívnejšie učí skúšaním, z vlastných úspechov a chýb. Práve tieto vzostupy a pády sprevádzajúce naše pokusy nás večne žení dopredu po ceste celoživotného vzdelávania.

Táto odborná práca možno nie je jediná svojho druhu, ale je výnimočná svojou mnohostrannosťou. Zjednocuje diametrálne odlišné oblasti - zdravotníctvo a informatiku - a svedčí o prospechu ich pospolitosti. Čerpá z vedomostných rezerv obidvoch odborov a opakovane poukazuje na množstvo križovatiek, ktoré ich spájajú. Práve tieto spoločné body ustanovujú predpoklady interdisciplinárneho dialógu.

Kľúčovou motiváciou k výberu témy bola i potreba upriamiť pozornosť na dôležitú rolu, ktorú hrá prevencia v zdraví jedinca. Napriek tomu, že mnohým chorobám sa predísť nedá, správna životospráva má ďalekosiahly dopad na imunitu a obranyschopnosť tela. Nepripúšťajme si apatickosť, neoddávajme sa škodlivým návykom, veď zodpovednosť za životný štýl aký vedieme nesieme sami.

Elektrokardiografia si v medicíne za posledných sto rokov jej existencie získala nespochybiteľný rešpekt. V zdravotníckych zariadeniach, ambulanciách, nemocniciach i v teréne zachraňuje životy každý deň. Dúfajme, že snahy o odkrytie niektorých nuáns za mechanizmom jej fungovania a o nález prieniku medzi odbornosťou a praktickosťou boli v konečnom dôsledku úspešné.

Odkaz tejto práce dokonale vystihujú slová Reného Descarta: „Poznávanie pravdy je zdravie ľudského ducha.“

Resumé

The objective of this project was to create a working single lead EKG. The work process was divided into several stages to provide clarity and a productive development framework. Firstly, the hardware had to be layed out, manufactured and constructed. Then followed the phase of software design, development and deployment on different application layers. The finished product encompasses both physical and intellectual components.

The device measures biopotentials using body-surface electrodes. After amplification the signal is processed and filtered by a programmable microchip. Next, the filtered data gets transferred into the computer, where a program plots out the resulting graph. The input stream can be saved for later use either as a visual snapshot or as a data file.

A lot can be learned from such a comprehensive, theoretically and practically challanging undertaking. Let the subject of this project be a testimony to the importance of interdisciplinary research and exchange of knowledge.

6 Zoznam použitej literatúry

- [1] GEMINI, spol. s.r.o. 1991. Ľudské telo - Komplexný sprievodca po ľudskom tele a jeho funkciách. Bratislava. ISBN 80-85265-12-5.
- [2] IAIZZO, Paul A. 2005. Handbook of Cardiac Anatomy, Physiology, and Devices. New Jersey. Human Press, Inc. ISBN 1-59259-835-8.
- [3] HANÁČEK, Ján, PLEVKOVÁ, Jana. 2009. Elektrokardiografia - Základné mechanizmy porúch elektrickej funkcie srdca a ich manifestácia na Ekg krivke. Martin. Ústav patologickej fyziológie JLF UK.
- [4] MALMIVUO, Jaakko, PLONSEY, Robert. 1995. Bioelectromagnetism - Principles and Applications of Bioelectric and Biomagnetic Fields. Oxford. Oxford University Press.
- [5] BÓRIKOVÁ, Ivana. 2016. Funkčné vyšetrenie respiračného, kardiovaskulárneho a močového systému. Portál Jesseniovej lekárskej fakulty Univerzity Komenského. ISSN 1337-7396.
- [6] MIŠČÍK, Peter. 2011. Zpracování elektrokardiogramu. Vysoké učení technické v Brně.
- [7] TUKA, Marián. 2015. Potlačení aditivního šumu. Vysoké učení technické v Brně.
- [8] www.kardiolog.sk/o-srdci/
- [9] www.techmed.sk/akcny-potencial/
- [10] www.wikiskripta.eu/w/Rušení_biosignálů_a_artefakty
- [11] www.swharden.com/wp/2016-08-08-diy-ecg-with-1-op-amp/
- [12] www.arduino.cc/en/Tutorial/ArduinoToBreadboard
- [13] www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328p
- [14] techfun.sk/produkt/ft232rl-programator-s-mini-usb-5v-3-3v/
- [15] techfun.sk/produkt/slot-pre-micro-sd-kartu/
- [16] github.com/tttapa/Filters

7 Prílohy

Príloha A (obsah CD)

- Schéma zapojenia a návrh plošného spoja vyexportované z Eaglu
- Program nahratý na mikroprocesor a použité knižnice
- Zdrojový kód počítačovej aplikácie a spustiteľný súbor
- Zdrojový kód webovej stránky

Príloha B

- Fotodokumentácia projektu