

# **Jednozvodový elektrokardiograf**

Praktická časť odbornej zložky maturitnej skúšky

# Praktická časť odbornej zložky maturitnej skúšky

a Zadanie úlohy pre komplexnú maturitnú skúšku:

<b>Meno a priezvisko:</b>	András Zemes
<b>Trieda:</b>	4. IT
<b>Konzultant:</b>	Mgr. Peter Hudec
<b>Skolský rok:</b>	2018/2019
<b>Odbor:</b>	Informačné a sieťové technológie
<b>Názov témy:</b>	Jednozvodový elektrokardiograf
<b>Úloha:</b>	Zhotoviť prístroj, <i>elektrokardiograf</i> , na snímanie a zachytenie elektrických potenciálov srdca.

## Špecifikácia 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

**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 13.01.2019

## 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

## Poďakovanie

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

<b>1</b>	<b>Ciele</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Teória elektrokardiografie</b>	<b>6</b>
2.1	Elektrofyziológia srdca . . . . .	6
2.2	Akčný potenciál . . . . .	7
2.3	Prehľad prístrojov EKG . . . . .	8
2.3.1	Druhy funkčných vyšetrení . . . . .	8
2.3.2	Časti klasického prístroja EKG . . . . .	9
2.3.3	Výdobytky modernej elektrokardiografie . . . . .	9
2.4	Umiestnenie elektród . . . . .	10
2.5	Signál a jeho spracovanie . . . . .	11
2.5.1	Sieťový brum . . . . .	11
2.5.2	Potlačenie driftu . . . . .	11
2.5.3	Myopotenciály . . . . .	11
2.5.4	Voľba filtrov . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Návrh a konštrukcia hardvéru</b>	<b>13</b>

## 1 Ciele

Kľúč úspešného elektrotechnického projektu spočíva v dokonalnej 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 z AA článkov a ochranou malým napätím sa zabránilo výskytu nečakaných a potenciálne rizikových situácií.

Pomocou jednovodového EKG vieme určiť pulz, srdcový rytmus, ba aj odhaliť prítomnosť srdcových arytmii 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 Teória elektrokardiografie

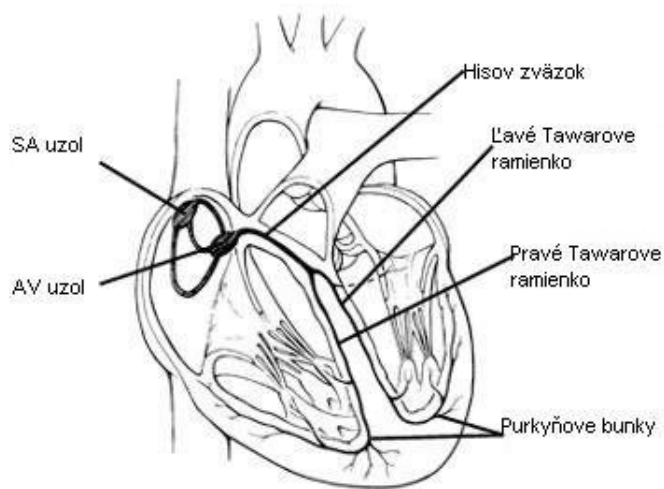
### 2.1 Elektrofyziológia srdca

Základom vnútorného fungovania srdca je jeho elektrická aktivita. Srdce je jedinečný orgán z hľadiska, že jeho elektrická činnosť nie je nervovo založená. Je riadená špecializovanými vodivými svalovými bunkami. Zväzky takýchto buniek podmieňujú čerpaciu schopnosť srdca.

Zdrojom elektrických 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 vysíla do Hisovho zväzku.

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



Obr. 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).

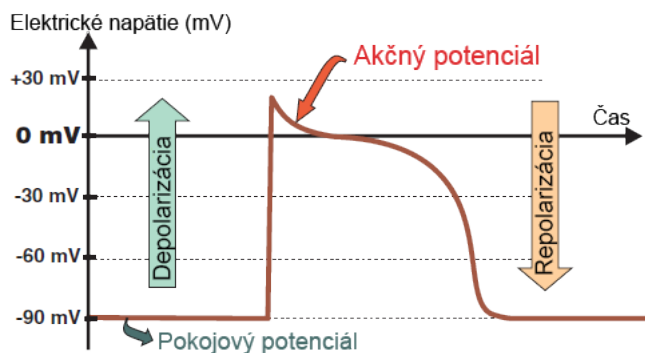
*Ióny vznikajú* z elektricky neutrálnych atómov pridaním resp. ubráním elektrónov.

V pokoji je srdcová bunka v *polarizovanom stave*:

- mimobunkový priestor je elektricky pozitívny pre vysokú koncentráciu kladných iónov sodíka a vápnika
- vnútrobunkový 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.



Obr. 2: Akčný potenciál v grafickom vyobrazení



## 2.3 Prehľad prístrojov EKG

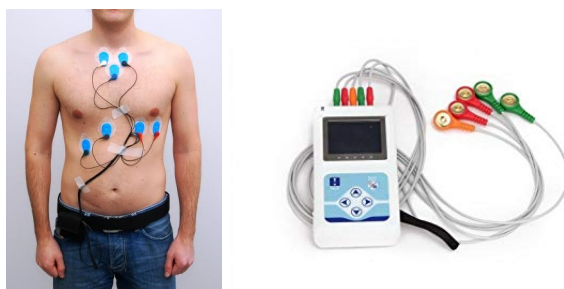
### 2.3.1 Druhy funkčných vyšetrení

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 klasickom 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.
- **Zaťažové 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.



Obr. 3: Príprava pacienta na 24-48 hodinové monitorovanie a Holterov monitor

### 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 odosielaajú 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

$\phi_L$  = potenciál na ľavej ruke

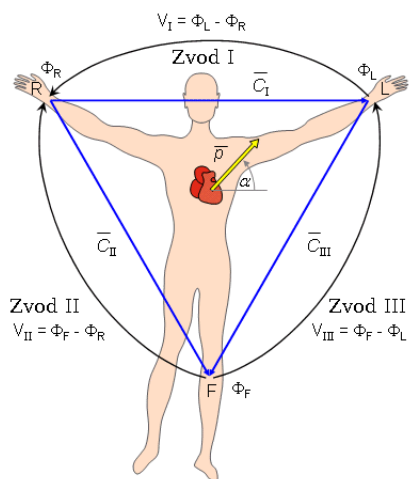
$\phi_R$  = potenciál na pravej ruke

$\phi_F$  = potenciál na ľavej nohe

Podľa Kirchhoffovho zákona platí, že veľkosť potenciálov (amplitúd na EKG zázname) v 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 troma párami horeuvedených bodov ako základné končatinové zvody v elektrokardiografii.



Obr. 4: 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 potenovanie 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 nízkofrekvenčnej rušivej zložky použijeme hornopriepustný filter.

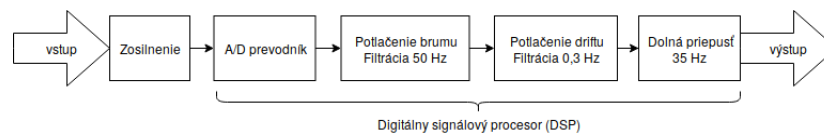
### 2.5.3 Myopotenciály

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 muskuloskeletálneho artefaktu. Najväčším problémom v zdolaní 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 Voľba filtrov

Nekonečná impulzná odozva - **IIR**

Konečná impulzná odozva - **FIR**



Obr. 5: Bloková schéma spracovania EKG

### 3 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.

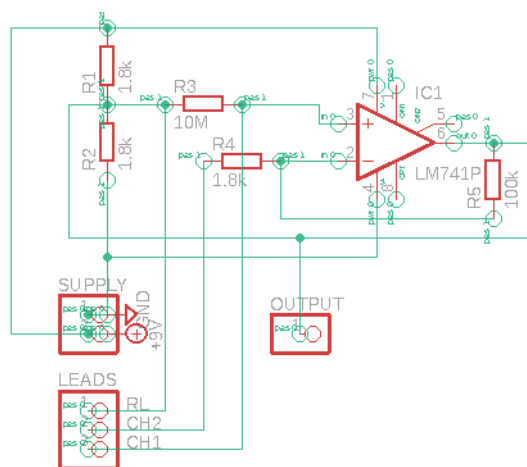
Na návrh elektroniky a dizajn plošných spojov som používal grafický počítačový editor Eagle (verzia 9.1.3).

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  $R5:R4$ . 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.



Obr. 6: Schéma zosilňovacieho obvodu

Na minimalizáciu rušivých faktorov sa môže použiť pasívny RC dolnopriepustný filter.

Ďalším krokom je osamostatniť AD prevod signálu prostredníctvom mikrokontroléra. Aby sa to mohlo uskutočniť, zosilnený signál s negatívnou napäťovou zložkou sa musí premapovať na rozsah kompatibilný s prevádzkovým rozsahom napätia mikrokontroléra.

Srdcovú činnosť umožňujú malé elektrické impulzy, 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 v sebe skrýva neuveriteľné množstvo informácií, prostredníctvom ktorých môžeme získať náhľad do fungovania tohto zázračného orgánu.

K zachyteniu a odhaleniu signálu sa žiadne špeciálne vybavenie nevyžaduje. Odmerať ho dokážeme aj pomerne jednoduchým prístrojom.

Výzvou pokusu je spoľahlivo zosilniť a rozoznať pomerne slabý, milivoltový signál meniaci sa každú stotinu sekundy.



## Zoznam použitej literatúry

- 1991. Ľudské telo - Komplexný sprievodca po ľudskom tele a jeho funkciách. Bratislava. GEMINI, spol. s.r.o. ISBN 80-85265-12-5.
- IAIZZO, Paul A. 2005. Handbook of Cardiac Anatomy, Physiology, and Devices. New Jersey. Human Press, Inc. ISBN 1-59259-835-8.
- HANÁČEK, Ján, PLEVKOVÁ, Jana. 2009. Elektrokardiografia - Základné mechanizmy porúch elektrickej funkcie srdca a ich manifestácia na Ekg krivke. Martin. Ústav patologickej fyziológie JLF UK.
- MALMIVUO, Jaakko, PLONSEY, Robert. 1995. Bioelectromagnetism - Principles and Applications of Bioelectric and Biomagnetic Fields. Oxford. Oxford University Press.
- BÓRIKOVÁ, Ivana. 2016. Funkčné vyšetrenie respiračného, kardiovaskulárneho a močového systému. Portál Jesseniovej lekárskej fakulty Univerzity Komenského. ISSN 1337-7396.
- MIŠČÍK, Peter. 2011. Zpracování elektrokardiogramu. Vysoké učení technické v Brně.
- [www.kardiolog.sk/o-srdci/](http://www.kardiolog.sk/o-srdci/)
- [www.techmed.sk/akcny-potencial/](http://www.techmed.sk/akcny-potencial/)
- [www.wikiskripta.eu/w/Rušení\\_biosignálů\\_a\\_artefakty](http://www.wikiskripta.eu/w/Rušení_biosignálů_a_artefakty)
- [www.swharden.com/wp/2016-08-08-diy-ecg-with-1-op-amp/](http://www.swharden.com/wp/2016-08-08-diy-ecg-with-1-op-amp/)
- [www.arduino.cc/en/Tutorial/ArduinoToBreadboard](http://www.arduino.cc/en/Tutorial/ArduinoToBreadboard)
- [images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/51jDS6PVO6L.\\_SX355\\_.jpg](https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/51jDS6PVO6L._SX355_.jpg)
- [cardiocenter.az/uploads/posts/2017-06/1498069942\\_4-holter.jpg](http://cardiocenter.az/uploads/posts/2017-06/1498069942_4-holter.jpg)
- [github.com/tttapa/Filters](https://github.com/tttapa/Filters)