

Ing. Martin Jagelka

Autoreferát dizertačnej práce

**NÁVRH, PRÍPRAVA A CHARAKTERIZÁCIA
ORGANICKÝCH ŠTRUKTÚR PRE SENZORICKÉ
APLIKÁCIE**

na získanie akademického titulu: „doktor“ („philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“)
v doktorandskom študijnom programe: Elektronika a fotonika
v študijnom odbore: 5.2.13 Elektronika
Forma štúdia: denná

Miesto a dátum: V Bratislave, Apríl 2017

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Martin Jagelka

Autoreferát dizertačnej práce

NÁVRH, PRÍPRAVA A CHARAKTERIZÁCIA
ORGANICKÝCH ŠTRUKTÚR PRE SENZORICKÉ
APLIKÁCIE

na získanie akademického titulu: „doktor“ („philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“)
v doktorandskom študijnom programe: Elektronika a fotonika
v študijnom odbore: 5.2.13 Elektronika
Forma štúdia: denná

Miesto a dátum: V Bratislave, Apríl 2017

Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Ústave elektroniky a fotniky
Slovenskej technickej univerzity v Bratislave
Fakulte elektroniky a informatiky

Predkladateľ: Ing. Martin Jagelka

Ústav elektroniky a fotoniky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ilkovičová 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ:

doc. Ing. Martin Weis, PhD.

Ústav elektroniky a fotoniky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ilkovičová 3, 812 19 Bratislava

Oponenti:

Doc. RNDr. Pavol Vitovič, PhD.

Ústav simulačného a virtuálneho
medicínskeho vzdelávania
Univerzita Komenského, Lekárska fakulta
Sasinková 4, 811 04 Bratislava

Doc. Ing. Vladimír Scholtz, PhD.

Ústav fyziky a mēřící techniky
Vysoká škola chemicko-technologická v Praze
Fakulta chemicko-inženýrská
Technická 5, 166 28 Praha 6 – Dejvice
Česká republika

Autoreferát bol rozoslaný:

.....

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa **11.5.2017**
o **9:30 h** na **Slovenskej technickej univerzite v Bratislave,**
Fakulte elektrotechniky a informatiky, Ilkovičová 3, 812 19,
Bratislava

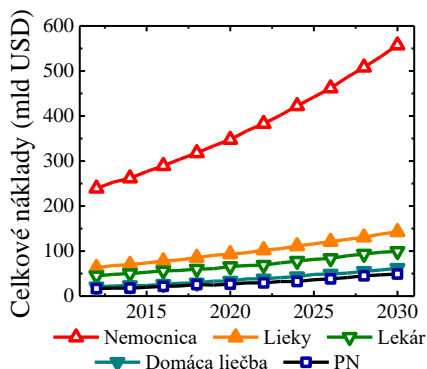
Prof. Dr. Ing. Miloš Oravec
dekan fakulty

Obsah

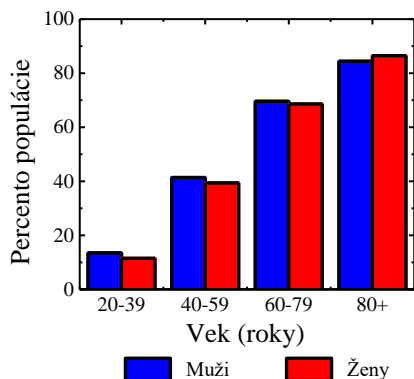
1	ÚVOD	2
1.1	TÉZY DIZERTAČNEJ PRÁCE	6
2	TENKOVRSŤOVÉ BIOELEKTRÓDY	7
2.1	ODOLNOSŤ VOČI OTERU	8
2.2	CHEMICKÁ ODOLNOSŤ	9
3	GÉLOVÉ ELEKTRÓDY	10
3.1	MERNÝ ODPOR	11
3.2	ELEKTRICKÉ PARAMETRE PODĽA FDA A AAMI	12
3.2.1	<i>AC impedancia</i>	<i>12</i>
3.2.2	<i>DC ofset + kombinácia nestability ofsetu a šumu</i>	<i>13</i>
3.2.3	<i>Zotavenie po preťažení počas defibrilácie</i>	<i>14</i>
3.2.4	<i>Prúdová odolnosť</i>	<i>15</i>
3.3	OVERENIE SYSTÉMU NA PACIENTSKÝCH SIMULÁTOROCH	16
4	ZHODNOTENIE	19
5	RESUMÉ	22

1 Úvod

So zvyšujúcim sa priemerným vekom obyvateľstva [1] sa zväčšujú aj nároky na medicínu, čo sa v konečnom dôsledku prejavuje aj zvyšovaním nákladov (Obr. 1) [2]. Rovnako pribúdajú aj chronicky chorí ľudia, pričom až 52% ľudí v produktívnom veku má chronické problémy so zdravím, pričom najčastejšie ide o kardiovaskulárne ochorenia (Obr.2) [3] Nie všetkých to limituje, no nezanedbateľné percento (27%) z nich je svojim ochorením obmedzovaných [4]. Práve ľudia s fyzickým obmedzením musia mať k dispozícii medicínske zariadenia, ktoré by dokázali pokryť ich potreby [5]. Jedným z riešení by bolo výrazné rozširovanie siete kliník alebo nemocníc, avšak to nie je možné kvôli výrazným finančným nákladom. Ďalším riešením by mohli byť konzultácie so zdravotníckym personálom počas limitovaného času s následnou kontrolou pomocou jednoduchých nositeľných systémov [6]. Dnes sa už bežne používajú monitorovacie systémy pre sledovanie činnosti srdca, alebo kardiostimulátory. Používajú sa aj inzulínové pumpy, ktoré monitorujú hladinu cukru a dávkujú potrebné množstvo inzulínu. Všetky tieto zariadenia sú, alebo donedávna boli, veľmi robustné a neposkytovali užívateľovi príliš veľký komfort, preto sa v súčasnosti výskumné tímy z celého



Obr. 1: Predpokladané náklady vynaložené v USA na kardiovaskulárne ochorenia [2]



Obr. 2: Prevalencia kardiovaskuarných ochorení v USA v rokoch 2011 až 2014 pre dospelých nad 20 rokov rozdelených podľa veku a pohlavia. [3]

sveta snažia pracovať na menších a jednoduchších zariadeniach. Sú to väčšinou jednoúčelové zariadenia ako napríklad monitor glukózy [7], EKG [8], EEG [9, 10], EMG [11], teploty a mnohých ďalších. Motiváciou všetkých je aby tieto zariadenia mohli byť jednoduchšie, dostupnejšie, lacnejšie, užívateľsky prívetivé, ale zároveň stále presné, aby mali dobrú výpovednú hodnotu a poskytl lekárskemu personálu kvalitné informácie o stave monitorovaného pacienta.

Záujem o zariadenia monitorujúce fyzický stav má aj úplne zdravá časť populácie ktorá ich využíva pre zlepšenie fyzickej kondície. Trh je presýtený rôznymi fitness trekermi, meračmi pulzu na ruku, či na hrudník. Dokonca existujú komplexné riešenia, ktoré pomocou aplikácie dokážu kontrolovať kvalitu vykonaných cvikov, či asymetrické zaťaženie svalov [12]. Dlhodobé preťažovanie organizmu však môže viesť k zvyšovaniu počtu únavových zranení či dokonca smrti počas výkonu. Niektoré spoločnosti sa preto snažia zaviesť akýsi štandard diagnostických zariadení a výmeny údajov medzi nimi a zdravotníckym personálom [13, 14]. Každodenné monitorovanie fyzického a fyziologického stavu sa vďaka takémuto štandardu stáva jednoduchším a dostupnejším. Niektorí výrobcovia inteligentných telefónov dokonca pristúpili k integrácii vybraných senzorov biosignálov do ich hardvéru. Vďaka tejto

iniciatíve majú možnosť sledovať svoj zdravotný stav v reálnom čase aj bežní ľudia. Je možné určiť hraničné hodnoty fyzickej a psychickej záťaže a upozorniť tak na hrozbu zhoršenia stavu. Tieto údaje bude možné vďaka štandardu zdieľať nie len so zdravotným personálom, ale napríklad aj s trénerom, či ďalšími osobami. Vďaka viacnásobnej kontrole tak bude možné zlepšovať svoj fyzický stav bez strachu zo zranenia.

Posledné desaťročie sa začína rozsiahle využívanie organických materiálov v elektronike, v súčasnosti označovanej ako organická elektronika. Organické vodiče a polovodiče našli uplatnenie v elektronických prvkoch a zariadeniach ktoré poskytujú nové vlastnosti ako je ohybnosť, priehľadnosť, alebo nízke výrobné náklady. Aj keď súčasné komerčné využitie sa zameriava hlavne na displeje z organických elektroluminiscenčných diód, tak senzorické zariadenia sú ďalšou perspektívnou aplikačnou oblasťou.

Základnou myšlienkou tejto práce je vytvorenie senzorického systému na dlhodobé monitorovanie elektrických biosignálov ľudského tela s využitím elektród z materiálov používaných v organickej elektronike. Meranie elektrických biosignálov kladie špecifické požiadavky na bioelektrody. Pri bioelektrodách sú dôležité nielen elektrické vlastnosti, ale aj biokompatibilita a mechanické vlastnosti ktoré poskytujú organické vodivé materiály. Táto práca sa zaoberá využitím kopolyméru poly(3,4-etylene dioxytioén):poly(styrén sulfonát) (PEDOT:PSS) pre prípravu bioelektrod. Ako prvé sa vytvárali tenkovrstvové bioelektrody a následne sa prešlo na objemové kompozitné z PEDOT:PSS a polyakrylamidu (PAA). Následne sa charakterizovali vlastnosti pripravených bioelektrod ktoré boli integrované do komplexnejšieho senzorického systému, ktorý mal byť pohodlnejší, presnejší, lacnejší, a musí spĺňať predpísané normy. Práve na splnenie štandardov sa v práci kládol veľký dôraz. Elektrody musia spĺňať prísne normy ANSI/AAMI EC12:2000/R(2015) stanovené americkou Asociáciou pre potraviny a liečivá (FDA – z ang. Food and Drug Administration) a Americkým národným

inštitútom pre normalizáciu (ANSI – z ang. American National Standards Institute). Tieto štandardy sú platné aj v Európskej únii. Vykonané merania na pripravených elektródach preukázali splňanie noriem pre EKG elektródy.

Nakoniec sa celý navrhnutý systém verifikoval na patientskych simulátoroch, pričom sa využili patientske simulátory HAL S3201 a Newborn HAL S3010, ktoré umožňujú simulovať rôzne štandardné priebehy EKG signálov. Vykonané merania dokázali že vyvinuté organické bioelektródy sú možnou alternatívou ku komerčne dostupným hydrogélovým bioelektródam.

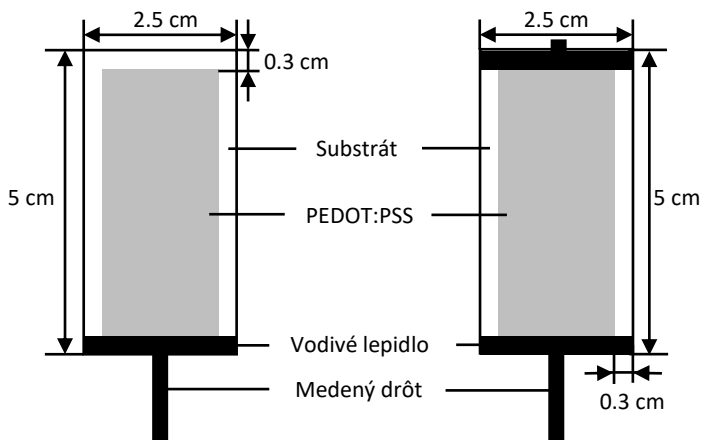
1.1 Tézý dizertačnej práce

Na základe získaných poznatkov o súčasnom stave organickej elektroniky, jej využitia v senzorických aplikáciách a možnosti spojenia s bežnými integrovanými obvodmi boli ciele dizertačnej práce sformulované do nasledovných téz:

1. Nadobudnúť nové poznatky a vedomosti o organickej elektronike a vlastnostiach nových organických materiálov (PEDOT:PSS) so zameraním na elektródové štruktúry senzorov.
2. Oboznámiť sa s experimentálnymi metódami prípravy tenkých vrstiev organických vodivých materiálov a návrhom výroby elektród. Na základe získaných poznatkov navrhnuť a zrealizovať vybrané typy pasívnych a aktívnych elektródových senzorických systémov.
3. Aplikovať získané poznatky v návrhu komplexného senzorického systému na meranie biosignálov EKG, založeného na báze organických senzorov a smart-systémov na zber dát.
4. Využiť nadobudnuté poznatky a skúsenosti pre optimalizáciu vyvíjaného senzorického systému na monitorovanie EKG v medicínskej technike.

2 Tenkovrstvové bioelektrody

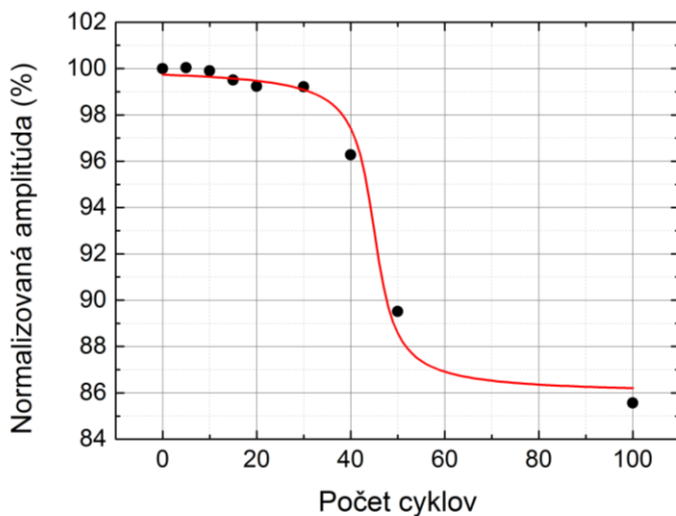
Na začiatku sa skúmali tenkovrstvové bioelektrody, ktoré sa pripravovali z 1 hm.% roztok PEDOT:PSS (Heraeus, Nemecko), ktorý sa prefiltraval cez 0,25 μm filter na injekčnú striekačku, aby sa odstránili zhluky nerozpustených častí. Následne sa pridali do tohto roztoku 4 hm.% sorbitolu aby sa zvýšila vodivosť výslednej tenkej vrstvy [15]. Výsledný roztok sa odstredením (2000 rpm počas 40 s) naniesol na substrát z polyesterovej fólie s rozmermi 2,5 \times 5,0 cm a následne sa nechal vyžihať pri 200 $^{\circ}\text{C}$ počas 5 minút pre odstránenie vody a zmenu kryštalinity vrstvy PEDOT:PSS. Vzniknutá vrstva PEDOT:PSS mala hrúbku 100 nm a plošný odpor približne 100 Ω/\square . Takto pripravená tenká vrstva sa následne vytvarovala tak, aby vodivá vrstva končila 0,3 cm od okraja elektródy, aby sa zabránilo nechceným zvodom počas experimentov. Následne sa vytvorili kontakty pre meracie sondy, na jednej kratšej hrane pre meranie odolnosti voči oteru, a na oboch kratších hranách pre meranie chemickej odolnosti (Obr. 3).



Obr. 3: Narys tenkovrstvových bioelektrod pre experimenty

2.1 Odolnosť voči oteru

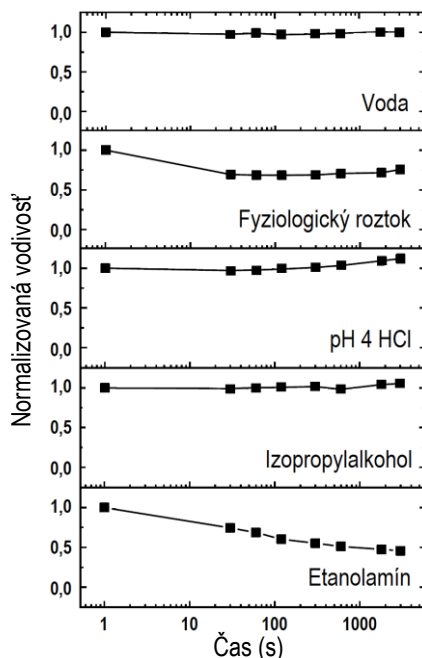
Pre účely tohto experimentu bol vytvorený nástroj na otieranie z acetál kopolyméru (POMC) a filtračného papierika, aby sa zabezpečilo rovnomerné otieranie všetkých pripravených elektród. Výsledná závislosť (Obr. 4) poukazuje na nevhodnosť tenkovrstvových bioelektrod pre použitie na dlhodobé monitorovanie EKG počas bežného dňa. Je však zaujímavé, že napriek vrstve hrubej len 100 nm sa amplitúda počas experimentu znížila iba o 15% a ďalej neklesala. Dá sa predpokladať, že na niektorých častiach polyesterového substrátu sa vrstva neprichytila dostatočne, ale na väčšine plochy držala dokonalejšie. Miesta so slabšou adhéziou sa počas otierania delaminovali a miesta s vyššou adhéziou sa otierali len minimálne. Skoková zmena v amplitúde pozorovaného signálu sa dá vysvetliť spojením menších trhlín vo vrstve, ktoré postupne vznikali počas testu, a následným prerušením väčšej plochy bioelektrody.



Obr. 4: Závislosť normalizovanej amplitúdy od počtu cyklov. Sigmoidná funkcia je zakreslená len pre znázornenie trendu.

2.2 Chemická odolnosť

Test prebiehal ponorením zahnutých vzoriek elektród do pripravených roztokov, tak aby bola ponorená iba vrstva PEDOT:PSS a sledovala sa časová závislosť vodivosti počas vystavenia vzorky jednotlivým roztokom. Z testu je vidieť (Obr. 5), že tenká vrstva PEDOT:PSS pri vode a simulovanom pote vykazovala dobrú stabilitu, pri fyziologickom roztoku síce došlo k poklesu vodivosti, ten však nebol výrazný. Väčším problémom s hľadiska dlhodobého použitia je výrazný pokles vodivosti v roztoku etanolamínu, ktorý sa bežne používa v čistiacich prostriedkoch a géloch na umývanie pokožky. Pri manipulácii alebo po aplikácii na nedokonale opláchnutú pokožku by mohlo dôjsť k degradácii bioelektródy. Pokles vodivosti je pritom spôsobený tým, že vodný roztok etanolamínu je rozpúšťadlom PEDOT:PSS, ktorý sa jednoducho odplavil.

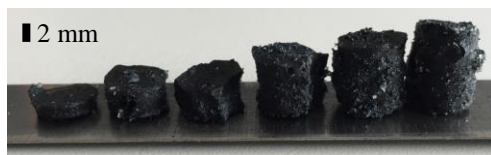


Obr. 5: Časová závislosť normalizovanej vodivosti tenkovrstvovacej bioelektródy z PEDOT:PSS v rôznych roztokoch.

3 Gélové elektródy

Pre dlhodobé monitorovanie bolo po testoch tenkovrstvových elektród potrebné vymyslieť niečo iné. Najvhodnejšie sa javili gélové elektródy podobné štandardným komerčne dostupným elektródam, ktoré však obsahovali glycerín, ktorý má vyšší tlak nasýtených pár ako voda, čo zabránilo vysychaniu. Najoptimálnejší technologický postup prípravy gélu sa ukázal ten s pomerom hmotností 1,2 : 20 : 39,4 : 39,4 v tomto poradí: PEDOT:PSS, akrylamid s metylénbisakrylamidom (AAM + MBAAM), demi. voda a glycerín. Takýto pomer totiž zabezpečí nielen potrebnú elektrickú vodivosť vďaka mierne vyššej koncentrácii PEDOT:PSS ale vďaka kombinácii demi. vody a glycerínu sa tiež eliminuje podráždenie tkaniva v dôsledku hygroskopických vlastností glycerínu. Demi. voda navyše napomôže rozpusteniu AAM, MBAAM, a PEDOT:PSS. Bola pripravená zmes glycerínu a demi. vody v pomere 70 : 30 hm.%, ktorá bola základom pre vytváraný gél. Do zmesi sa pridal lyofilizovaný PEDOT:PSS, ktorý sa rozmiešal pomocou valcového mlynu a ultrazvukového homogenizéru. Následne sa pridal 50 hm.% roztok AAM + MBAAM, vďaka ktorému sa dosiahla konečná koncentrácia roztoku podľa navrhovaného postupu. Následne sa pridali polymerizačné činidlá, 0,1% APS a 0,1% TEMED, ktoré finálnu koncentráciu výrazne nezmenili. Zmes sa následne homogenizovala miešaním a ultrazvukovým kúpeľom po dobu 5 minút. Do 20-tich minút od pridania polymerizačných činidiel bola polymerizácia ukončená a hotový gél sa ponechal na vzduchu pri izbovej teplote 20 minút a následne sa umiestnil na 20 minút do pece s teplotou 50°C. Potom sa gél umiestnil do 50 hm.% roztoku glycerínu pre odstránenie rezíduí rozpusteného monoméru. V tomto kúpeli bol gél umiestnený 15 hodín. Následne sa opláchol v demi. vode a umiestnil opäť do pece na 4 hodiny pri teplote 50 °C. Celková hmotnosť pripravenej vzorky bola pred umývaním 15,5 g a po umytí a vysušení nakoniec 8,5 g. Po 24 hodinách od posledného váženia

boli s pripraveného gélu vyrazené valčeky (Obr. 6) s priemerom 7 mm, ktoré sa nakrájali na hrúbky 1, 2, 4, 6, 8 a 10 mm potrebné pre ďalšie testy.

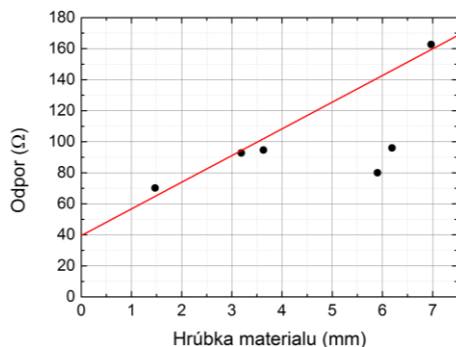


Obr. 6: Vzorky gélu pripravené na ďalšie testovanie elektrických parametrov

3.1 Merný odpor

Na zmeranie merného odporu pripraveného gélu sa použila metóda rozložených parametrov (z angl. Transmission Line Method, TLM), ktorá sa najčastejšie využíva pri určovaní odporu kontaktu, avšak z výsledkov merania je možné určiť aj merný odpor materiálu. Princíp TLM metódy spočíva v meraní úbytku napätia na meraných kontaktoch pri budení konštantným prúdom, pričom kontakty musia byť rovnaké a mení sa iba ich vzájomná vzdialenosť.

Meranie prebiehalo za pomoci špeciálne navrhnutého prípravku na kontaktovanie, ktorý zabezpečil konštantnú silu prítlaku 5 kN. Na meranie a budenie sa použil prístroj Keysight2612A, ktorý umožňuje prúd nastavený na prúdovom zdroji aj merať. Namerané dáta sa prepočítali na odpor a vyniesli sa do grafu (Obr. 7), kde je vidieť vzorky s hrúbkou 5,9 a 6,2 mm, ktoré sa z vyhodnocovania vynechali pre ich výraznú odchýlku od ostatných vzoriek. Zvyšné dáta sa preložili priamkou, z rovnice (2) ktorej sa určil odpor kontaktu ako aj merný odpor gélu. Odpor kontaktu bol $R_C = 39,5 \Omega$ čo koreluje s výsledkami merania impedancie kde sa tento odpor v simuláciách pohyboval okolo 35Ω . Merný odpor sa určil vynásobením plochy elektródy kontaktu, ktorá bola $38,5 \text{ mm}^2$, a sklonu preloženej priamky. Výsledný merný odpor vyšiel $\rho = 662,2 \Omega \text{ mm}^{-1}$.



Obr. 7: Graf závislosti odporu od hrúbku gélu

3.2 Elektrické parametre podľa FDA a AAMI

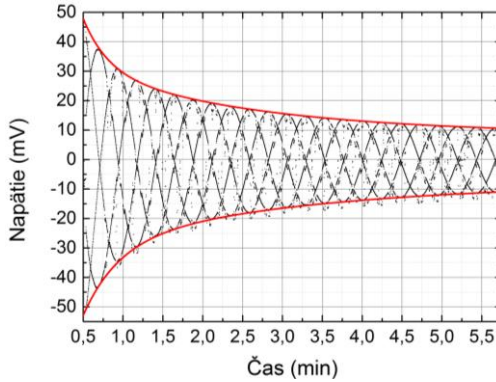
Na určenie elektrických parametrov FDA odporúča použiť normu ANSI/AAMI EC12, ktorá popisuje presné požiadavky na elektrické parametre EKG elektród. Okrem toho presne popisuje aj metodiku testovania jednotlivých parametrov.

3.2.1 AC impedancia

Namerané výsledky pre PEDOT:PSS (Obr. 8) dokázali, že bioelektródy spĺňajú predpísané parametre ešte pred ustálením impedancie, keď táto maximálna impedancia dosiahla hodnotu $Z_{MAX} = 951,35 \Omega$. Po piatich minútach merania impedancia klesla na $Z = 244,41 \Omega$ avšak ešte nebola úplne ustálená, keď exponenciálny pokles amplitúdy meraného signálu poukazuje na minimálnu hodnotu impedancie na úrovni približne $Z_{MIN} = 170 \Omega$. K minimálnej hodnote s odchýlkou 5% sa však priblíži až za čas $4 \times \tau_2$, nakoľko τ_2 bolo určené z odchýlkou a je predpoklad že v oboch rovniciach (1 a 2) je τ_2 rovnaké, bude sa pohybovať od 130 do 140 sekúnd, čo znamená, že $4 \times \tau_2$ bude v intervale 8,5 – 9,5 minúty.

$$V_+(t) = 87,98 \cdot e^{-\frac{t}{18,49}} + 27,51 \cdot e^{-\frac{t}{131,89}} + 8,6 \quad (1)$$

$$V_-(t) = -74,22 \cdot e^{-\frac{t}{26,46}} - 25,5 \cdot e^{-\frac{t}{167,21}} - 7,73 \quad (2)$$

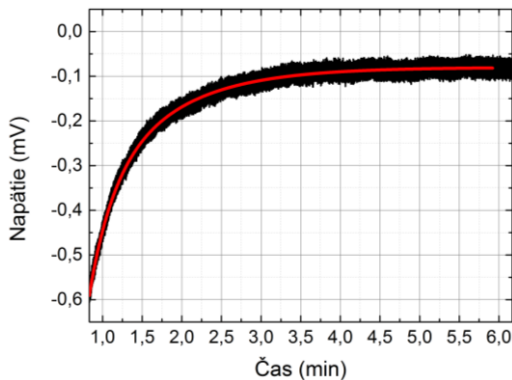


Obr. 8: Priebehy meraného napätia počas AC merania na PEDOT:PSS elektródach.

3.2.2 DC offset + kombinácia nestability offsetu a šumu

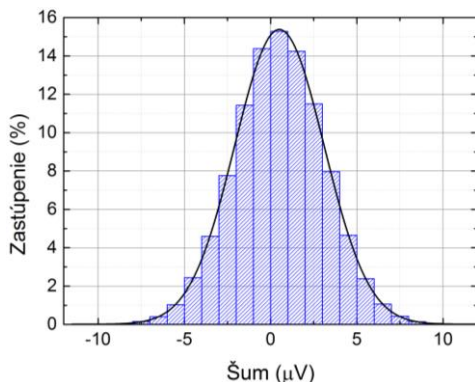
Výsledky merania DC offsetu (Obr. 9) ukázali, že gélové elektródy z PEDOT:PSS vyžadujú síce dlhší čas na úplnú stabilizáciu, ale spĺňajú predpísané normy. Tento čas je možné určiť pomocou exponenciálneho fitu podobne ako pri AC meraní, a z výslednej rovnice (3) vychádza tento čas na 3,5 minúty. Maximálny offset pre PEDOT:PSS bioelektródu sa podľa predpisu určil ako absolútna hodnota napätia po minútovej stabilizácii čo vychádza $V_{\text{PEDOT:PSS}} = 0,45 \text{ mV}$.

$$V_{\text{offset}}(t) = -4,1 \cdot e^{-\frac{t}{16,82}} - 0,74 \cdot e^{-\frac{t}{55,57}} - 0,08 \quad (3)$$



Obr. 9: Priebehy nameraného napätia počas merania DC offsetu a šumu na PEDOT:PSS elektródach.

Šum sa určoval z celého 5 minútového intervalu merania, pásmovo priepustný filter (0,15 – 100 Hz) sa na namerané dáta aplikoval v programe Labchart, určenom na spracovanie biosignálov. Dáta sa na ďalšie spracovanie exportovali do programu Origin, ktorý umožnil štatistické spracovanie. V celom intervale merania sa vypočítalo percentuálne zastúpenie hodnôt šumu po intervaloch a následne sa toto zastúpenie vykreslilo ako histogram, z ktorého je vidieť, že nameraný šum v danom frekvenčnom rozsahu je náhodný, lebo podliehal Gaussovmu normálnemu rozdeleniu. Tento krok sa realizoval, aby sa určil pôvod šumu, ktorý nemusí byť vždy náhodný. Zo šumových dát sa odčítala maximálna amplitúda, pričom pre PEDOT:PSS elektródu (Obr. 10) to vyšlo 23 μV p-p, čo spĺňa predpis, ktorý je určený na 150 μV p-p.

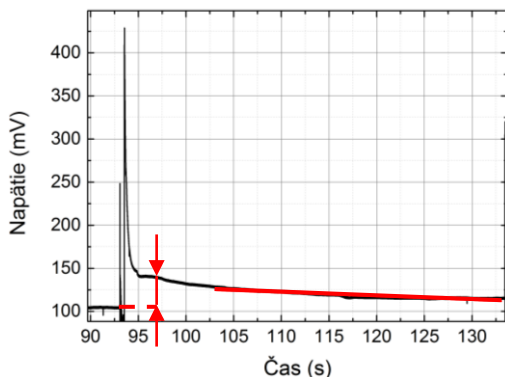


Obr. 10: Percentuálne zastúpenia šumu podľa jeho hodnoty pre PEDOT:PSS elektródy

3.2.3 Zotavenie po preťažení počas defibrilácie

Bioelektródy z PEDOT:PSS, ktoré sme podrobili tomuto testu splnili požiadavky normy, keď maximálny nameraný ofset dosiahol pri prvom cykle, a to 77,6 mV. Následný pokles sa určil pomocou lineárneho fitu na špecifickom intervale (10 – 40 sekúnd od defibrilácie) a pre PEDOT:PSS to bolo maximálne 0,85 mV/s a minimálne 0,18 mV/s. Norma v tomto prípade určuje hodnotu

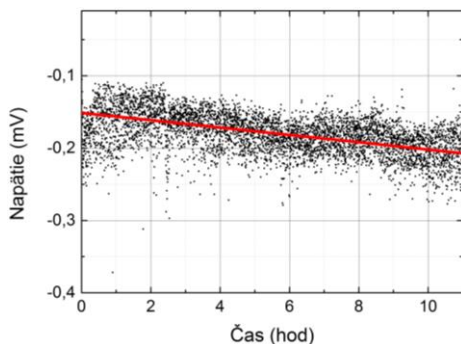
ofsetu na maximálne 100 mV a rýchlosť poklesu na ± 1 mV/s. Na zázname jedného cyklu testu je naznačený princíp odčítania potrebných dát (Obr. 11).



Obr. 11: Priebeh jedného cyklu defibrilačného testu pre 3M PEDOT:PSS elektródy s naznačenými spôsobmi odčítania hodnôt pre určenie splnenia normy.

3.2.4 Prúdová odolnosť

Gélové bioelektródy z PEDOT:PSS bez problémov splnili požiadavku na prúdovú odolnosť, ktorá je stanovená tak, že maximálny ofset pri aplikovaní prúdu 200 nA nesmie počas celej doby používania presiahnuť 100 mV. Počas celého merania (Obr. 12) sa ofset menil so sklonom iba 5 μ V/hod, pričom takýmto tempom by požiadavke nevyhovelo za približne 2,3 roka. Bolo to spôsobené najmä vďaka vodivosti PEDOT:PSS, ktorý je v gély prítomný a zabráňoval výraznejšej polarizácii.



Obr. 12: Priebeh dlhodobého merania vplyvu prúdového zaťaženia na elektródu z PEDOT:PSS. Červená čiara predstavuje pohyblivý priemer.

3.3 Overenie systému na patientských simulátoroch

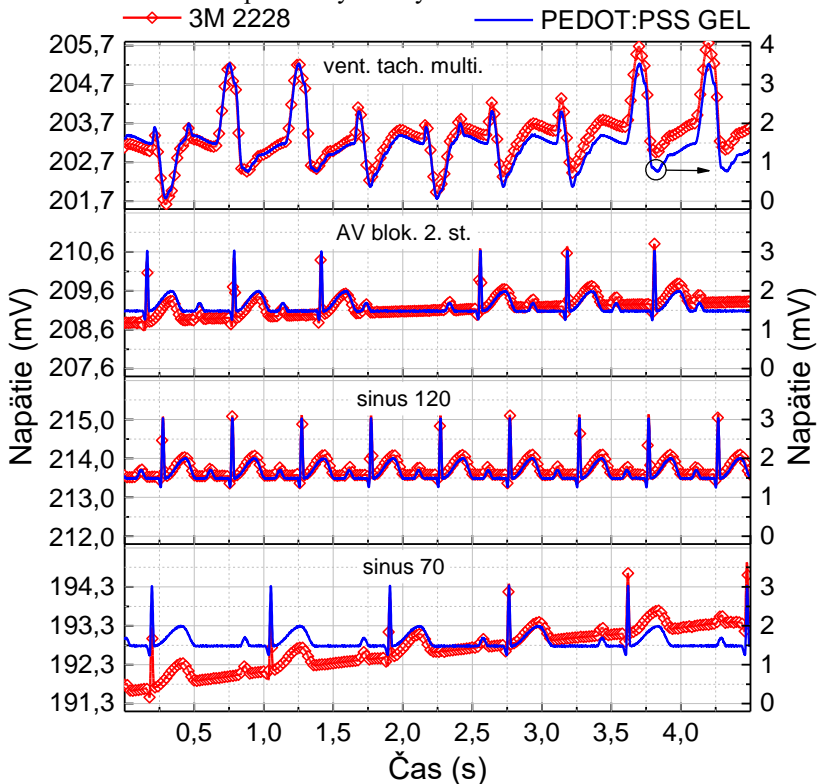
Pre overenie systému sa vybrali dva patientské simulátory, ktoré umožňujú kombinovaním parametrov (kardiovaskulárne, respiračné, neurologické) a funkcií (sekrécia biologických tekutín, nastavenie dýchacích a zvukových fenoménov, kŕče, cyanóza a pod.) nastaviť ľubovoľný (pato)fyziologický stav pacienta. Následným spájaním stavov a ich prepojením možno vytvoriť patientsky scenár, ktorý je buď lineárny alebo rozvetvený (kladie dôraz na zvládnutie rozhodovacích procesov), a pri tvorbe ktorých sa vychádza z reálnych kazuistík prispôbených pre dané potreby. Výhodou použitia takýchto simulátorov je, že daný stav, alebo signál sa dá opakovať dovtedy kým sa nezrealizujú všetky potrebné experimenty a tento signál je stále rovnaký. Konkrétne sa použili simulátory, dospelého človeka HAL S3101 (Obr. 13a) a novorodenca HAL S3010 (Obr. 13b) (Gaumard Scientific, Miami, FL, USA).



Obr. 13: Patientske simulátory použité na porovnanie EKG elektród (a) HAL S3101 (b) HAL S3010 [oficiálne fotografie výrobcu]

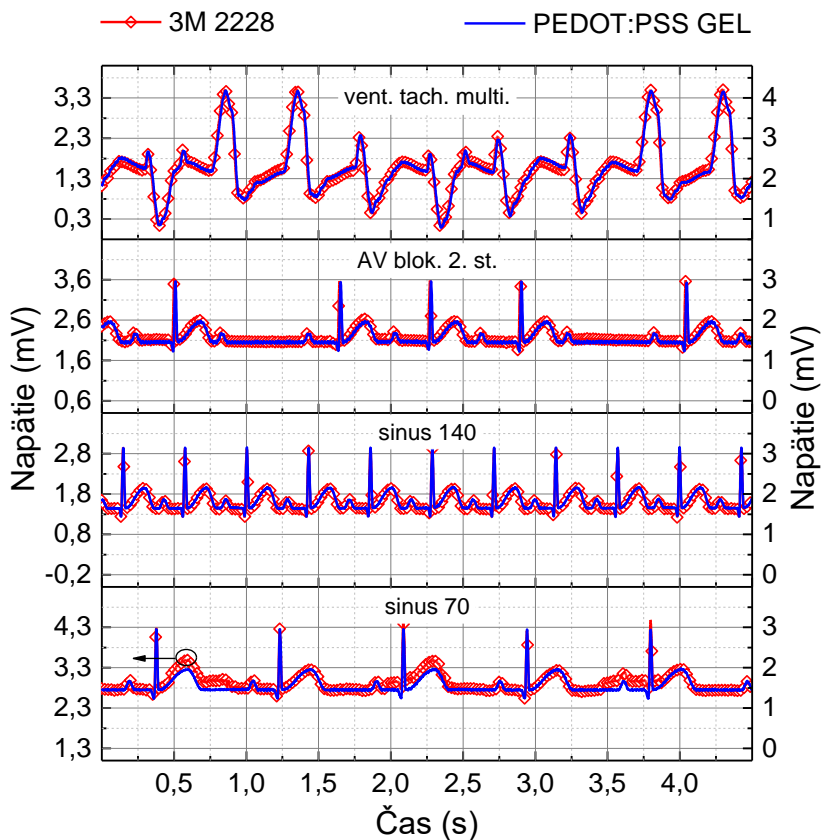
Vyrobené bioelektródy s navrhnutým systémom sa na spomínaných simulátoroch testovali pre štyri rôzne srdcové rytmy volené tak, aby bolo možné preukázať, že pripravené bioelektródy sú schopné nahradiť konvenčné. Konkrétne boli zvolené rytmy: sinus 70, sinus 120, alebo 140, AV blokáda 2. stupňa a ventrikulárna tachykardia multifokálna. Pre porovnanie boli všetky merania realizované aj štandardnými EKG elektródami 3M 2228.

Prvá séria meraní realizovaných na HAL S3101 (Obr. 14) poukazuje na fakt, že navrhnutý senzoričný systém bol optimalizovaný pre PEDOT:PSS bioelektrody. Hydrogélové elektrody vykazovali vyššie ofsetové napätie ako aj jeho nestabilitu ako pri meraní pomocou PEDOT:PSS bioelektrod. Vysoké ofsetové napätie pri hydrogélových elektrodách bol spôsobený zošúchanou elektrodou na simulátore, kde už nebola homogénna vrstva zlata. To spôsobilo nesúlad medzi elektrodovým párom a rozdiel napätí na rozhraní na úrovni 214 mV. Nakoľko v pripravených PEDOT:PSS bioelektrodách prevláda elektrónová vodivosť bol podstatnejší odpor kontaktu PEDOT:PSS a elektrod simulátora. Tento kontaktný odpor je niekoľko desiatok k Ω a vďaka tomu sa neprejavil rozdiel napätí na rozhraní zmenou ofsetu výsledného signálu. Na zobrazené dáta nebol aplikovaný žiadny filter.



Obr. 14: Porovnanie nameraných dát zo simulátora HAL S3101 pomocou elektrod 3M 2228 (červená) a navrhnutých PEDOT:PSS gélových elektrod (modrá)

Druhá séria meraní (Obr. 15) na novorodeneckom simulátore, ktorý mal elektródy v poriadku vykazuje už podobné ofsetové napätia pre obidva typy testovaných elektród. Avšak pri hydrogélových je nestabilita tohto napätia stále pozorovateľná, pričom PEDOT:PSS bioelektródy majú stále rovnakú odozvu. Nestabilitu ofsetového napätia v tomto prípade mohli spôsobiť nepatrné zmeny na elektródach spôsobené ich čistením medzi meraniami. Pri bioelektródach z PEDOT:PSS je situácia rovnaká ako na predchádzajúcom simulátore, preto sú namerané dáta totožné.



Obr. 15: Porovnanie nameraných dát zo simulátora HAL S3010 pomocou elektród 3M 2228 (červená) a navrhnutých PEDOT:PSS gélových elektród (modrá)

4 Zhodnotenie

Predložená dizertačná práca sa zameriava na návrh a vytvorenie senzorického systému na dlhodobé monitorovanie elektrických biosignálov ľudského tela s využitím elektród z materiálov používaných v organickej elektronike. Meranie elektrických biosignálov kladie špecifické požiadavky na bioelektródy, preto práca postupne rozoberá pôvod elektrických biosignálov, štandardne používanými bioelektródami, návrhom a optimalizáciou nových materiálov bioelektród, návrhom komplexného senzorického systému na meranie elektrických biosignálov s následným testovaním a porovnaním so štandardnými komerčne dostupnými bioelektródami. Práca tak predstavuje ucelený prístup od definovania požiadaviek aplikácie, cez štúdium materiálov a vývoj elektronického systému, až po zostrojenie senzorického systému a jeho testovanie.

Organické vodivé materiály predstavujú progresívnu oblasť výskumu s perspektívou uplatnenia za hranicami oblasti elektroniky. Vzhľadom na vysokú biokompatibilitu a mechanickú ohybnosť sú prirodzeným kandidátom na využitie v senzorických systémoch. Avšak elektrická vodivosť týchto materiálov je ešte stále limitujúcim faktorom pre ich uplatnenie v širšej oblasti. Nedávno publikované vedecké práce naznačili možnosť zvýšenia vodivosti kopolyméru PEDOT:PSS druhotnou dopáciou na úroveň vyžadovanú aplikáciami v elektronike a senzoričke, avšak mikroskopický pôvod tejto zmeny elektrických vlastností nebol známy. Nami vykonané merania jednoznačne preukázali fáзовú separáciu vodivého polyméru PEDOT od izolačného PSS. Výsledkom tejto časti práce je komplexný pohľad na mikroskopické vlastnosti vedúce ku zvýšeniu elektrickej vodivosti polymérnych materiálov. Nové poznatky v oblasti základného výskumu vlastností organických materiálov boli súčasťou vedeckej práce v časopise Applied Surface Science.

Získané poznatky o zvýšení elektrickej vodivosti druhotnou dopáciou kopolyméru PEDOT:PSS napomohli pre využitie tohto materiálu pre prípravu

bioelektrod. Boli navrhnuté viaceré technologické postupy prípravy bioelektrod využívajúcich PEDOT:PSS ako elektricky vodivý materiál. Tenkovrstvové štruktúry sa preukázali byť nevhodné pre ich nedokonalú mechanickú a chemickú stabilitu. Pre zvýšenie odolnosti sa využilo zabudovanie kopolyméru PEDOT:PSS do polymérnej gélovej matrice PAA. Vzhľadom na časovú nestabilitu vytvoreného hydrogélu sa navrhol vlastný inovovaný technologický postup s náhradou vody pomocou glycerínu. Optimalizáciou postupu sa dosiahla vyššia stabilita ako pri známych hydrogélach. Pripravené gélové bioelektrody sa testovali podľa štandardov FDA a AAMI a vo všetkých bodoch splnili požiadavky alebo dosiahli lepšie výsledky ako štandardne používané komerčné bioelektrody 3M 2228.

Komerčne dostupné systémy na meranie biopotenciálov majú prispôbené analógové, alebo digitálne spracovanie meraného signálu štandardným hydrogélovým Ag/AgCl elektródami. Vzhľadom na využitie nových bioelektrod s elektrickými vlastnosťami odlišnými od štandardných komerčných elektrod sa vytvoril vlastný návrh elektronickej časti senzorickeho systému. Po viacnásobnej optimalizácii návrhu sa všetky komponenty umiestnili na jedinú DPS, čo vďaka štvorvrstvovému návrhu a precíznemu rozmiestneniu komponentov a uzemňovacích polygónov, neovplyvnilo šumové vlastnosti celého systému, ktoré ostali na úrovni samotného AD prevodníka. Namerané údaje bolo možné v komprimovanej verzii prenášať cez USB alebo bezdrôtovo cez Bluetooth (BT). Nový elektronický systém tak zabezpečil spoľahlivé meranie elektrických biosignálov aj pri použití novovytvorených organických senzorov z gélových bioelektrod.

Komplexný senzorickeý systém pozostávajúci z pripravených organických senzorov na monitorovanie EKG a navrhutej elektronickej časti senzorickeho systému sa testoval na patientskych simulátoroch pre zabezpečenie reprodukovateľných meraní a štandardných prístupov v medicínskej technike. Kvalita snímania EKG signálu pomocou organických

senzorov bola testovaná pre štyri rôzne srdcové rytmy a porovnávaná s meraním pre štandardne používanými komerčnými bioelektrodami 3M 2228. Vykonané nerania jednoznačne preukázali možnosť použitia organických senzorov pre monitorovanie EKG s využitím v medicínskej technike a snímaný EKG signál dokonca vykazoval menšiu nestabilitu napätia ako komerčné bioelektrody 3M 2228.

Prínosom tejto práce sú nové poznatky o organických vodivých materiáloch, vlastné návrhy technologických postupov prípravy gélových bioelektrod a vlastné návrhy elektronickej časti sensorického systému. Pôvodný príspevok tejto práce v základnom výskume organických materiálov je využitý pre vývoj organických vodivých bioelektrod a následnej aplikácii v sensorickom systéme. Výsledkom tejto práce tak nie sú len nové poznatky, ale aj ich reálne uplatnenie v aplikovanom vývoji komplexných sensorických systémoch spĺňajúcich prísne štandardy ANSI/AAMI EC12:2000/R(2015) platnými aj v Európskej únii.

Hlavné prínosy dizertačnej práce:

1. Získanie nových poznatkov o organickej elektronike a vlastnostiach organických vodivých materiálov vhodné pre elektrodové štruktúry senzorov
2. Získanie zručnosti v príprave tenkých vrstiev organických vodivých materiálov a návrhom výroby elektrod.
3. Získanie poznatkov v návrhu a optimalizácii elektronickeho riešenia komplexného sensorického systému na meranie biosignálov EKG založeného na báze organických senzorov.
4. Charakterizácia pripravených EKG elektrod podľa štandardov ANSI/AAMI EC12:2000/R(2015).
5. Porovnanie pripravených EKG elektrod báze organických vodivých materiálov so štandardne používanými komerčnými bioelektrodami na patientských simulátoroch ako referenčných zdrojoch EKG signálu.

5 Resumé

Submitted dissertation thesis is focused on the design and fabrication of a sensor system for long-term monitoring of electrical biosignals of the human body using electrodes based on materials commonly used in organic electronics. Measurement of electrical biosignals places specific requirements on bioelectrodes. The thesis analyzes the origin of the electrical biosignals, common used bioelectrodes, design and optimization of novel materials of bioelectrodes and designing of comprehensive sensor system for measuring electrical biosignals. The sensor system testing and its comparison with commercially available was performed. The thesis represents a comprehensive approach form defining application requirements, through the study of materials and development of an electronic system to fabrication of the sensor system and its testing.

Organic conductive materials represent a progressive area of research with the perspective of application beyond the field of electronics. Because of the high biocompatibility and mechanical flexibility, they are the best candidate for use in human body sensory systems. However, the electrical conductivity of these materials is still a limiting factor for their use in a wider area. Recent publications have suggested the possibility of increasing the conductivity of the copolymer PEDOT:PSS by the secondary doping. This doping can increase conductivity up to the level required by the application in electronics and sensors. The origin of this changes in electrical properties was still unknown. Our measurements prove the phase separation of conductive polymer PEDOT from insulating polymer PSS. The result of this study is a comprehensive look at the microscopic properties leading to increased electrical conductivity of polymeric materials. This discovery belongs to the fundamental research of properties of organic materials and it was a part of the research paper in the peer-reviewed journal *Applied Surface Science*.

These findings in increasing of electrical conductivity of the secondary doped copolymer PEDOT: PSS led us to use this process for the bioelectrodes preparation. There are various technological methods of bioelectrodes preparation using PEDOT:PSS as an electrically conductive material. Thin-film structures have been proved to be unsuitable because of their mechanical and chemical instability. To avoid these weaknesses, the copolymer PEDOT:PSS was built in a polymer matrix of PAA. Due to changes in mechanical properties of hydrogel there were suggested innovative technological processes with glycerin as water replacement. Optimization of the process increased temporal stability of prepared PEDOT:PSS gel in comparison with other known hydrogels. Prepared gel bioelectrodes were tested according to FDA and AAMI standards and met the requirements at all points. Actually, in some tests PEDOT:PSS bioelectrodes achieved even better results than the standard commercial available electrodes 3M 2228.

Commercially available systems for measurement of biopotentials are adapted for hydrogel standard Ag/AgCl electrodes. Due to use of novel bioelectrodes with different electrical characteristics than standard electrodes, custom design of electronic part of the sensor system had to be created. After multiple optimizations steps, all electronic components were placed on a single PCB. This step forced to use four-layer PCB design and precise deployment of components and ground polygons to reduce noise of the whole system down to properties of AD converter itself. The measured data can be transmitted, through USB or wirelessly via Bluetooth (BT), in compressed form. Designed electronic system ensure reliable measurement of electrical biosignals, even with newly created organic gel bioelectrodes.

Comprehensive sensor system consisting from prepared organic bioelectrodes and designed electronic part was tested on a patient simulator to ensure reproducibility and standards in medical technology. The ability of recording ECG using organic sensors were tested for four different heart

rhythms. This ECG records were compared with the records measured with standard commercial bioelectrodes 3M 2228. Performed measurements clearly demonstrated the possibility of using organic sensors for monitoring ECG. ECG signal provided by this bioelectrodes showed less voltage instability than commercial bioelectrodes 3M 2228. Prepared bioelectrodes are capable to be used in medical technology.

The benefits of this thesis are new knowledge in organic conductive materials, custom design of technology process of preparation of the gel bioelectrodes, as well as custom design of electronic part of the sensor system. The primary contribution of this work in fundamental research of organic materials is used for development of organic conductive bioelectrodes and its application in the sensor system. The results of this work are not only new knowledge, but also their actual use in applied development of complex sensor systems meeting the standards of ANSI / AAMI EC12: 2000 / R (2015) also applicable in the European Union.

The main benefits of dissertation thesis:

1. Acquiring new knowledge about organic electronics, properties of organic conductive materials suitable for electrode structures.
2. Acquiring new skills in the preparation of thin-films organic conductive materials and designing of electrodes fabrication process.
3. Acquiring new knowledge in designing and optimization of the complex electronic sensor system for measuring ECG biosignals based on organic bioelectrodes.
4. Characterization of prepared ECG electrodes according to ANSI/AAMI EC12:2000/R (2015) standards.
5. Comparison of prepared ECG electrodes base on organic conductive materials and normally used commercial bioelectrodes on patient simulator as a reference for ECG signal.

Zoznam použitej literatúry

- [1] United Nations, „World Population Prospects 2015 - Data Booklet,“ 2015.
- [2] P. A. Heidenreich, J. Trogdon, O. Khavjou, J. Butler, K. Dracup, M. Ezekowitz, E. Finkelstein, Y. Hong, S. Johnston, A. Khera, D. Lloyd-Jones, S. Nelson, G. Nichol, D. Orenstein, P. Wilson a Y. Woo, „Circulation,“ pp. 933-944, 2011.
- [3] National Center for Health Statistics and National Heart, Lung, and Blood Institute, „National Health and Nutrition Examination Survey“.
- [4] S. P. Gulley, E. K. Rasch a L. Chan, „If we build it, who will come? Working-age adults with chronic health care needs and the medical home.,“ *Medical Care*, zv. 49, %1. vyd.2, pp. 149-155, 2011.
- [5] S. P. Gulley, E. K. Rasch a L. Chan, „Ongoing coverage for ongoing care: access, utilization, and out-of-pocket spending among uninsured working-aged adults with chronic health care needs.,“ *American Journal of Public Health*, zv. 101, %1. vyd.2, pp. 368-375, 2011.
- [6] T. Harris, S. M. Kerry, C. R. Victor, U. Ekelund, A. Woodcock, S. Iliffe a e. al, „A Primary Care Nurse-Delivered Walking Intervention in Older Adults: PACE (Pedometer Accelerometer Consultation Evaluation)-Lift Cluster Randomised Controlled Trial,“ *PLoS Medicine*, zv. 12, %1. vyd.2, pp. 1-23, 2015.
- [7] J. Kojima, S. Hosoya, C. Suminaka, N. Hori a T. Sato, „An Integrated Glucose Sensor with an All-Solid-State Sodium Ion-Selective Electrode for a Minimally Invasive Glucose Monitoring System,“ *Micromachines*, zv. 6, %1. vyd.7, pp. 831-841, 2015.
- [8] C. A. Teron, A. P. Rivera a A. M. Goenaga, „ECG Holter monitor with alert system and mobile application,“ rev. Proc. SPIE 9842, Signal

- Processing, Sensor/Information Fusion, and Target Recognition XXV, Baltimore, 2016.
- [9] V. Sandulescu, S. Andrews, D. Ellis, N. Bellotto a O. Mozos, „Stress Detection Using Wearable Physiological Sensors,“ rev. IWINAC, Elche, 2015.
- [10] V. D. Poltavski, „The Use of Single-Electrode Wireless EEG in Biobehavioral Investigations,“ rev. Mobile Health Technologies, New York, Springer New York, 2015, pp. 375-390.
- [11] C. J. De Luca, M. Kuznetsov, L. D. Gilmore a S. Roy, „Inter-electrode spacing of surface EMG sensors: Reduction of crosstalk contamination during voluntary contractions,“ Journal of Biomechanics, zv. 45, %1. vyd.3, p. 555–561, 2011.
- [12] J. Berg, H. Butt, D. Jayalath a C. Wiebe, „System and Method for Monitoring Biometric Signals“. Patent US 20150148619 A1, november 2014.
- [13] A. Bakir, „Tracking Fitness with HealthKit and Core Motion,“ rev. Beginning iOS Media App Development, Apress, 2014, pp. 343-374.
- [14] V. Morabito, „Wearable Technologies,“ rev. The Future of Digital Business Innovation, Springer International Publishing, 2016, pp. 23-42.
- [15] A. M. Nardes, M. Kemerink, M. M. de Kok, E. Vincken, K. Maturova a R. A. J. Janssen, „Conductivity, work function, and environmental stability of PEDOT:PSS thin films treated with sorbitol,“ Organic Electronics, zv. 9, %1. vyd.5, pp. 727-734, 2008.

Zoznam publikačnej činnosti autora

ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

ADC01 DONOVAL, Martin - MICJAN, Michal - NOVOTA, Miroslav - NEVRELA, Juraj - KOVACOVA, Sona - PAVUK, Milan - JUHASZ, Peter - JAGELKA, Martin - KOVAC, Jaroslav Jr - JAKABOVIC, Jan - CIGAN, Marek - WEIS, Martin. Relation between secondary doping and phase separation in PEDOT:PSS films. In *Applied Surface Science*. Roč. 395 (2017), s.86-91. ISSN 0169-4332.

ADE Vedecké práce v ostatných zahraničných časopisoch

ADE01 DAŘÍČEK, Martin [50 %] - JAGELKA, Martin [25 %] - SLÁDEK, Ľubomír [10 %] - HORÍNEK, František [10 %] - MIKLOVIČ, Peter [5 %]. Wireless Probe for Human Body Biosignals. In *Lékař a technika*. Roč. 42, č. 2 (2012), s.42-45. ISSN 0301-5491.

ADE02 JAGELKA, Martin [80 %] - DAŘÍČEK, Martin [10 %] - DONOVAL, Martin [10 %]. Simple pulse oximetry for wearable monitor. In *EDN [elektronický zdroj]*. Vol. 39, Iss. 9 (2014), online, s. 23. ISSN 0012-7515.

ADM Vedecké práce v zahraničných časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

ADM01 JAGELKA, Martin [20 %] - JELEŇ, Michal [20 %] - VAVRINSKÝ, Erik [20 %] - DAŘÍČEK, Martin [20 %] - DONOVAL, Martin [20 %]. Implementation of pulse oximetry measurement to wireless biosignals probe. In *Lékař a technika*. Roč. 44, č. 3 (2014), s. 37-40. ISSN 0301-5491.

ADM02 JAGELKA, Martin [30 %] - NOVÁKOVÁ, Tereza [10 %] - UHRÍK, Ján [30 %] - WEIS, Martin [30 %]. Preliminary testing of flexible electrodes for biosignal measurement: Abrasion resistance. In *Lékař a technika*. Roč. 45, č. 1 (2015), s. 16-20. ISSN 0301-5491. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-84944753096.

ADM03 VAVRINSKÝ, Erik [40 %] - DONOVAL, Martin [15 %] - DAŘÍČEK, Martin [15 %] - HORÍNEK, František [5 %] - POPOVIČ, Marián [5 %] - HANIC, Michal [15 %] - JAGELKA, Martin [5 %]. Monitoring of EMG to force ratio using new

designed precise wireless sensor system. In *Lékař a technika*. Roč. 44, č. 3 (2014), s. 17-22. ISSN 0301-5491. V databáze: SCOPUS.

AFB Publikované pozvané příspěvky na domácích vedeckých konferenciách

AFB01 JAGELKA, Martin [20 %] - DONOVAL, Martin [16 %] - TELEK, Peter [16 %] - HORÍNEK, František [16 %] - WEIS, Martin [16 %] - DAŘÍČEK, Martin [16 %]. Wearable healthcare electronics for 24-7 monitoring with focus on user comfort. In *Radioelektronika 2016 : 26th International conference. Košice, Slovakia. April 19-20, 2016*. Košice : Technical University of Košice, 2016, S. 5-9. ISBN 978-1-5090-1674-7. V databáze: IEEE ; SCOPUS: 2-s2.0-84977605601.

AFD Publikované příspěvky na domácích vedeckých konferenciách

AFD01 HANIC, Michal [50 %] - JAGELKA, Martin [50 %]. Výskumné a vývojové laboratórium riadenia LED technológií. In *Fotonika 2012 : 7.výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra. Bratislava, 9. 2. 2012*. Bratislava : STU v Bratislave, 2012, s.36-39. ISBN 978-80-970493-3-1.

AFD02 HANIC, Michal [15 %] - SLÁDEK, Ľubomír [15 %] - HORÍNEK, František [15 %] - JAGELKA, Martin [15 %] - DONOVAL, Martin [15 %] - DAŘÍČEK, Martin [15 %] - DONOVAL, Daniel [10 %]. BIO-monitoring system with conductive textile electrodes integrated into T-shirt. In *Radioelektronika 2014 : Proceedings of 24th International Conference. Bratislava, Slovak Republic, April 15-16, 2014*. 1.vyd. Bratislava : FEI STU, 2014, s. 275-278. ISBN 978-1-4799-3714-1.

AFD03 HORÍNEK, František [20 %] - JAGELKA, Martin [20 %] - DAŘÍČEK, Martin [20 %] - SLÁDEK, Ľubomír [20 %] - HANIC, Michal [10 %] - ŠATKA, Alexander [10 %]. Design of electromyography classification system using artificial neural network. In *Radioelektronika 2014 : Proceedings of 24th International Conference. Bratislava, Slovak Republic, April 15-16, 2014*. 1.vyd. Bratislava : FEI STU, 2014, s. 279-282. ISBN 978-1-4799-3714-1.

AFD04 JAGELKA, Martin [45 %] - HORÍNEK, František [15 %] - JELEŇ, Michal [5 %] - SLÁDEK, Ľubomír [30 %] - DONOVAL, Martin [5 %]. Smart Electronic System for Measurement of

Reaction Times in Sport Science and Physiotherapy. In *ADEPT 2013 : 1st International Conference on Advances in Electronic and Photonic Technologies. Nový Smokovec, High Tatras, Slovakia, June 2-5, 2013*. 1. vyd. Žilina : University of Žilina, 2013, s.181-184. ISBN 978-80-554-0689-3.

- AFD05 JAGELKA, Martin [45 %] - HORÍNEK, František [15 %] - SLÁDEK, Ľubomír [15 %] - VAVRINSKÝ, Erik [5 %] - NOVÁČEK, Martin [5 %] - MIKLOVIČ, Peter [5 %] - JELEŇ, Michal [5 %] - DONOVAL, Daniel [5 %]. Monitorovanie činnosti srdca pomocou štvoritej pulzoxymetrie a jej ďalšie využitie. In *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie : konferencia ELOSYS, Trenčín, 15.-18.10.2013*. Roč. 19, mimoriadne č (2013), s.44-46. ISSN 1335-2547.
- AFD06 JAGELKA, Martin [35 %] - HORÍNEK, František [5 %] - NOVÁKOVÁ, Tereza [25 %] - DAŘÍČEK, Martin [5 %] - MIKLOVIČ, Peter [5 %] - DONOVAL, Martin [5 %] - WEIS, Martin [20 %]. Usage of flexible conductive materials in the electrode system for biosignals. In *ADEPT 2014 : 2nd International Conference on Advances in Electronic and Photonic Technologies; Tatranská Lomnica, Slovakia; June 1-4, 2014*. 1. vyd. Žilina : University of Žilina, 2014, s. 67-69. ISBN 978-80-554-0881-1.
- AFD07 JAGELKA, Martin [40 %] - MAREK, Juraj [25 %] - DAŘÍČEK, Martin [20 %] - HORÍNEK, František [5 %] - TELEK, Peter [5 %] - DONOVAL, Martin [5 %]. Unclamped inductive switching device for testing GaN transistors. In *ADEPT 2015 : 3rd international conference on advances in electronic and photonic technologies. Štrbské Pleso, High Tatras, Slovakia. June 1-4, 2015*. 1. vyd. Žilina : University of Žilina, 2015, S. 264-267. ISBN 978-80-554-1033-3.
- AFD08 JAGELKA, Martin [15 %] - DONOVAL, Martin [15 %] - TELEK, Peter [15 %] - DAŘÍČEK, Martin [15 %] - HORÍNEK, František [14 %] - KUZMA, Anton [13 %] - VAVRINSKÝ, Erik [13 %]. Flexibilný EKG holter pre dlhodobé monitorovanie. In *Fotonika 2016 : 11. výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra. Senec, Slovakia. 11.-12. február 2016*. Bratislava : Medzinárodné laserové centrum, 2016, S. 18-20. ISBN 978-80-970493-9-3.

- AFD09 MAREK, Juraj [60 %] - JAGELKA, Martin [10 %] - CHVÁLA, Aleš [10 %] - PRÍBYTNÝ, Patrik [5 %] - DONOVAL, Martin [5 %] - DONOVAL, Daniel [10 %]. UIS capability of modern GaN power devices. In *ADEPT 2016 : 4th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Tatranská Lomnica, Slovakia. June 20-23, 2016*. 1. vyd. Žilina : University of Žilina, 2016, S. 249-252. ISBN 978-80-554-1226-9.
- AFD10 MAREK, Juraj [60 %] - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [10 %] - JAGELKA, Martin [10 %] - CHVÁLA, Aleš [5 %] - PRÍBYTNÝ, Patrik [5 %] - DONOVAL, Martin [5 %] - DONOVAL, Daniel [5 %]. Study of repetitive avalanche stress invoked degradation of electrical properties of DMOS and TrenchMOS transistors. In *ASDAM 2016 : 11th International conference on advanced semiconductor devices and microsystems. Smolenice, Slovakia. November 13-16, 2016*. Danvers : IEEE, 2016, S. 129-132. ISBN 978-1-5090-3081-1. V databáze: IEEE.
- AFD11 MAREK, Juraj [60 %] - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [10 %] - JAGELKA, Martin [10 %] - CHVÁLA, Aleš [5 %] - PRÍBYTNÝ, Patrik [5 %] - DONOVAL, Martin [5 %] - DONOVAL, Daniel [5 %]. Impact of repetitive UIS on modern GaN power devices. In *ASDAM 2016 : 11th International conference on advanced semiconductor devices and microsystems. Smolenice, Slovakia. November 13-16, 2016*. Danvers : IEEE, 2016, S. 173-176. ISBN 978-1-5090-3081-1. V databáze: IEEE.
- AFD12 NOVÁKOVÁ, Tereza [20 %] - JAGELKA, Martin [20 %] - FLICKYNGEROVÁ, Soňa [20 %] - UHRÍK, Ján [20 %] - WEIS, Martin [20 %]. Resistance of flexible electrodes for biosignal measurement to chemical exposure. In *YBERC 2014 [elektronický zdroj] : Proceedings of the 6th international young biomedical engineers and researchers conference. Bratislava, Slovak Republic, July 2-4, 2014*. 1. vyd. Bratislava : Institute of Electronics and Photonics, FEI STU, 2014, CD-ROM, s. 22-26. ISBN 978-80-971697-0-1.
- AFD13 SLÁDEK, Ľubomír [20 %] - DAŘÍČEK, Martin [20 %] - JAGELKA, Martin [20 %] - ŠATKA, Alexander [20 %] - MIKLOVIČ, Peter [20 %]. Tensometric Sensor System for Human Motion Characterization. In *ADEPT 2013 : 1st International Conference on Advances in Electronic and Photonic Technologies. Nový Smokovec, High Tatras, Slovakia, June 2-5, 2013*. 1. vyd. Žilina : University of Žilina, 2013, s.193-196. ISBN 978-80-554-0689-3.

- AFD14 SLÁDEK, Ľubomír [45 %] - DAŘÍČEK, Martin [20 %] - HORÍNEK, František [10 %] - JAGELKA, Martin [10 %] - VAVRINSKÝ, Erik [5 %] - DONOVAL, Martin [5 %] - MIKLOVIČ, Peter [5 %]. Portable two electrode ECG and respiration electronic monitoring system. In *ADEPT 2014 : 2nd International Conference on Advances in Electronic and Photonic Technologies; Tatranská Lomnica, Slovakia; June 1-4, 2014*. 1. vyd. Žilina : University of Žilina, 2014, s. 63-66. ISBN 978-80-554-0881-1.
- AFD15 VAVRINSKÝ, Erik [40 %] - DONOVAL, Martin [15 %] - DAŘÍČEK, Martin [15 %] - HORÍNEK, František [5 %] - POPOVIČ, Marián [5 %] - HANIC, Michal [15 %] - JAGELKA, Martin [5 %]. Monitoring of EMG to force ratio using new designed precise wireless sensor system. In *YBERC 2014 [elektronický zdroj] : Proceedings of the 6th international young biomedical engineers and researchers conference. Bratislava, Slovak Republic, July 2-4, 2014*. 1. vyd. Bratislava : Institute of Electronics and Photonics, FEI STU, 2014, CD-ROM, p. 93-98. ISBN 978-80-971697-0-1.

BEE Odborné práce v zahraničných zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

- BEE01 MAREK, Juraj [60 %] - JAGELKA, Martin [10 %] - CHVÁLA, Aleš [10 %] - PRÍBYTNÝ, Patrik [5 %] - DONOVAL, Martin [5 %] - DONOVAL, Daniel [10 %]. Influence of repetitive avalanche stress on electrical properties of advanced automotive power transistors. In *WOCSDICE-EXMATEC 2016 : 40th Workshop on compound semiconductor devices and integrated circuits held in Europe. 13th Expert evaluation and control of compound semiconductor materials and technologies. Aveiro, Portugal. 6-10 June 2016*. Aveiro : University of Aveiro, 2016, S. W49-W50.

BEF Odborné práce v domácich zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

- BEF01 JUHÁSZ, Peter [35 %] - STUHLÍKOVÁ, Ľubica [15 %] - JAGELKA, Martin [5 %] - DONOVAL, Martin [5 %] - DAŘÍČEK, Martin [5 %] - WEIS, Martin [35 %]. Study of charge traps in organic diodes by steady-state and transient techniques. In *WOCSDICE 2015 : 39th workshop on compound semiconductor devices and integrated circuits. Smolenice, Slovakia. 8-10 June, 2015*. Bratislava : UEF FEI STU, 2015, S. 35-36.

BEF02 WEIS, Martin [20 %] - KOVÁČOVÁ, Soňa [20 %] - JAGELKA, Martin [20 %] - DONOVAL, Martin [20 %] - DARÍČEK, Martin [20 %]. High-conductive polymer anodes for flexible OLED devices. In *WOCSDICE 2015 : 39th workshop on compound semiconductor devices and integrated circuits. Smolenice, Slovakia. 8-10 June, 2015*. Bratislava : UEF FEI STU, 2015, S. 113-114.

BFA Abstrakty odborných prác zo zahraničných podujatí (konferencie...)

BFA01 JAGELKA, Martin [34 %] - DONOVAL, Martin [33 %] - WEIS, Martin [33 %]. Application of PEDOT:PSS organogel for ECG electrodes. In *ICOE 2016 : Book of Abstracts : 12th International conference on organic electronics. Bratislava, Slovakia. June 13-15, 2016*. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2016, S. 33. ISBN 978-80-227-4571-0.

