

**Oponentský posudok dizertačnej práce
"AUTOMATICKE ROZMĚŘENÍ SIGNÁLŮ EKG"**

Dizertant:	Ing. Martin Vítek
Školiteľ:	doc. Ing. Jirí Kozumplík, CSc.
Školiace pracovisko:	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně
Pracovisko dizertanta:	Ústav biomedicínského inženýrství
Odbor:	Biomedicínská elektronika a biokybernetika

a) Príslušnosť zvolenej témy k odboru dizertácie a jej aktuálnosť

Dizertačná práca je venovaná metódam na automatické spracovanie EKG, menovite na detekciu QRS komplexov, ich rozmeranie a rozmeranie vln P a T. Metódy sú založené predovšetkým na diskretnej realizácii spojitaj vlnkovej transformácie a na zhlukovej analýze spracovaných viacanálových meraní s cieľom zvyšovania citlivosti a robustnosti týchto metód. Spracovaná téma dobre zapadá do študijného odboru Biomedicínska elektronika a biokybernetika. Napriek tomu, že problematika spracovania EKG signálov je veľmi široko rozpracovaná, značné množstvo publikácií v posledných rokoch svedčí o tom, že táto problematika zďaleka nie je vyčerpaná a použitie nových metodických prístupov poskytuje možnosti zlepšenia existujúcich algoritmov, zvýšenia ich presnosti a spoľahlivosti. Predložená práca pristupuje k riešeniu vytýčených cieľov inovatívnym spôsobom a popri aktuálnosti témy za jej pozitívum práce považujem aj fakt, že sa dôsledne venuje overeniu navrhnutých postupov na reprezentatívnej databáze EKG signálov a kritickému porovnaniu získaných výsledkov s výsledkami iných publikovaných metód.

b) Ciele dizertácie a ich splnenie

Ciele svojej dizertačnej práce formuloval dizertant explicitne v kapitole 7 na strane 40. V práci je vytýčených 6 základných cieľov:

1. návrh a realizácia metód na detekciu QRS komplexu a rozmeranie EKG signálov založených na vlnkových transformáciách,
2. modifikácia navrhnutých metód na použitie pre viacvzvodové EKG záznamy,
3. overenie navrhnutých algoritmov na štandardnej medzinárodnej databáze CSE a ich porovnanie s inými metódami,
4. optimalizácia pravidiel a parametrov metód s cieľom splniť požadované kritériá pri hodnotení štandardných aj ortogonálnych vzvodov,
5. overenie robustnosti navrhnutých algoritmov na signáloch po kompresii a filtrácii,
6. použitie rozmeriavacieho algoritmu na stanovenie miery diagnostického skreslenia signálov po kompresii a filtrácii.

Ciele práce sú orientované na teoretický rozbor a návrh metód, na ich dôsledné overenie a tiež na ich použitie v autorizovaných programových produktoch.

Na základe preštudovania práce môžem konštatovať, že práca je prehľadne usporiadaná a veľmi jasne a zrozumiteľne formulovaná. Na základe zhodnotenia výsledkov práce uvedených v kapitolách 8 až 11 a zosumarizovaných v kapitole 12, ako aj na základe preštudovania niektorých publikovaných článkov autora citovaných v práci **konštatujem, že výsledky uvedené v dizertačnej práci dokumentujú, že ciele práce, tak ako boli formulované v kapitole 7, boli bezo zbytku splnené.**

c) Zvolené metódy spracovania

Práca má celkový rozsah 129 strán a je rozdelená do 9 kapitol, za ktorými nasleduje zoznam použitej literatúry, zoznam použitých skratiek a symbolov a životopis autora.

V úvodnej kapitole autor vymedzil miesto predkladanej práce z hľadiska možných klinických a výskumných aplikácií, z hľadiska použitých metód na báze vlnkovej transformácie a predstavil obsah práce.

Druhá kapitola práce je venovaná stručnému pohľadu do histórie elektrokardiografie a popisu elektrickej aktivity srdca a jej súvisu s jeho mechanickou činnosťou. V ďalšej časti sú popísané techniky štandardných a ortogonálnych záznamov EKG a samotnému priebehu EKG krivky.

Tretia kapitola podáva prehľad metód detekcie QRS komplexov v EKG signále, je uvedený ich obecný princíp a sú prehľadne vyložené ich základy počnúc historicky najstaršími metódami založenými na diferenciách, cez metódy založené na číslicovej filtrácii, na neurónových sieťach, až po metódy založené na vlnkových transformáciách. Sú definované parametre na hodnotenie QRS detektorov a je uvedené porovnanie 26 publikovaných metód s uvedením spôsobu ich testovania, ich senzitivity a pozitívnej prediktivity.

Vo štvrtej kapitole autor podáva prehľad najvýznamnejších existujúcich prístupov k rozmeraniu EKG signálov. Po popise obecného princípu rozmerania sú prezentované typy metód rozdelené na nevlnkové a vlnkové. V závere kapitoly sú porovnané výsledky testovania 6 metód na databáze QT a 7 typov metód na databáze CSE.

Piata kapitola popisuje štandardnú databázu EKG signálov CSE (z projektu Common Standards for Quantitative Electrocardiography), jej obsah, súvisiace kritériá hodnotenia obsiahnutých záznamov a ich parametre.

Šiesta kapitola je venovaná popisu spojitých a diskretných vlnkových transformácií (CWT a DWT), možnosti ich použitia na spracovanie a analýzu EKG. Je najmä zdôraznený rozdiel medzi krátkodobou Fourierovou transformáciou (STFT) a vlnkovými transformáciami a tiež sú diskutované výhody a nevýhody použitia DWT resp. diskretizovanej aproximácie CWT ako aj problémy okolo konečnej dĺžky signálov a výberu vhodnej vlnky.

Ciele práce sú explicitne uvedené v **siedmej kapitole**, jadro vlastnej práce dizertanta tvoria kapitoly 8 až 11, závery práce sú sformulované v kapitole 12.

V **kapitole osem** je predstavený vlastný prístup autora k detekcii QRS komplexov založený na diskretnej realizácii CWT s použitím antisymetrickej vlnky z rodiny biortogonálnych vlniek - bior1.5 a len jednej vhodnej mierky, ktorou je pre frekvenciu vzorkovania signálu 500 Hz mierka 15. Amplitúdová frekvenčná charakteristika vlnky vtedy spadá prevažne do rozsahu 0 až 50 Hz. Je uvedený spôsob úpravy konečného signálu predĺžením jeho koncov a spôsob výpočtu transformácie priamou konvolúciou EKG s príslušne rozťahnutou reverznou vlnkou. Príslušný extrém signálu v komplexe QRS zodpovedá prechodu nulou v transformovanom signále medzi dvomi extrémami, ktorých úrovne presahujú prahy

definované na základe smerodajnej odchýlky transformovaného EKG signálu. Z výsledkov detekcie v každom zvode sú pomocou zhlukovej analýzy získané globálne pozície QRS komplexov pre skupinu ortogonálnych alebo štandardných zvodov EKG. V kapitole sú uvedené viaceré príklady detekcie, vrátane problematických signálov, a výsledky testovania metódy na databáze signálov CSE, ktoré ukázalo veľmi dobrú senzitivitu (Se) aj pozitívnu prediktivitu (Pp) algoritmu, porovnateľnú a lepšiu ako u publikovaných algoritmov, zlepšenie výsledkov pre globálne detekcie ako aj prijateľnú rýchlosť realizácie výpočtov.

V **kapitole deväť** je podrobne predstavený prístup dizertanta k rozmeraniu EKG signálov, menovite k určeniu hraníc QRS komplexu a P vlny a konca vlny T. Princíp je opäť založený na vlnke bio1.5, pričom sa využívajú jej mierky 15 (pre QRS) a 41 (s frekvenčným spektrom v oblasti 0 až 16 Hz, pre P a T). Po zadefinovaní vlastných pravidiel detekcie a vhodných prahov a časových intervalov (väčšinou závislých od konkrétneho signálu) boli pri testovaní metódy na databáze CSE opäť dosiahnuté veľmi dobré výsledky, najmä pre globálne detekcie. Autor sa venuje aj špecifickým problémom detekcie konca vlny P (pomocou eliminácie QRS komplexu) a univerzálnemu nastaveniu parametrov algoritmov pre ľubovoľný počet zvodov.

Desiata kapitola je venovaná problematike prepočtu (syntézy) zvodov s hlavným cieľom, aby sa aj pri použití malého počtu elektród ale viacerých zvodov dala získať informácia postačujúca na presnejšiu a spoľahlivejšiu analýzu EKG signálov (na globálne detekcie). Výsledkom tejto časti práce je konštatovanie, že použitím (väčšieho počtu) signálov transformovaných metódou Dower, Dawson-HC, Dawson-MI alebo aj gaussovskou transformačnou maticou sa oba tieto ciele dajú dosiahnuť a výsledky sú porovnateľné s tými, ktoré sa dosiahli s reálne meranými viacerými signálmi.

V **jedenástej kapitole** sa autor venuje možným aplikáciám algoritmov detekcie QRS a rozmerania EKG. Prvou je aplikácia na hodnotenie zmien diagnostických parametrov EKG pri použití kompresie EKG signálu. Analýza ukázala, že tieto parametre sa málo menia pri kompresii do 20:1 a tiež, že predstavené algoritmy sú dostatočne robustné aj pre spracovanie komprimovaných signálov. Ďalšou aplikáciou je použitie detektora QRS na optimalizáciu parametrov wienerovskej vlnkovej filtrácie EKG, ktoré ukázalo malý vplyv nastavenia prahov filtra na zmenu diagnostických parametrov EKG. Praktickou aplikáciou predstavených algoritmov sú tiež ich implementácie do programových produktov ECG Quantum a Asklepios.

Dvanásta kapitola je krátkym zhrnutím výsledkov práce, v ktorom dizertant dokumentuje splnenie všetkých cieľov práce a zdôrazňuje je pôvodné prínosy.

Celkove je práca spracovaná veľmi prehľadne, s jasným stanovením celkových aj dielčích cieľov v úvode kapitol 8 až 11, s jednoznačnými závermi ako sa ich podarilo splniť. Výsledky práce sú veľmi dobre graficky dokumentované na rozmeraných EKG signáloch aj v grafoch získaných závislostí vyšetrovaných parametrov, kvantitatívne porovnanie výsledkov je v prehľadných tabuľkách. O rozsahu výsledkov svedčí 76 obrázkov a 24 tabuliek. Pozitívne hodnotím, že autor dôsledne a presne cituje použité práce a práce, s ktorými svoje výsledky porovnáva. Oceňujem tiež, že autor dôsledne pracuje s jednotkami spracúvaných veličín a systematicky používa označenia veličín a škál v obrázkoch a grafoch.

K práci a použitým postupom nemám výhrady, sú formulované jednoznačne a veľmi zrozumiteľne. K práci mám nasledovné otázky a komentáre:

1. Ku kap. 8.1., 9.1.: základom navrhnutých algoritmov je vlnka bio1.5. Boli testované aj ďalšie vlnky. Do akej miery bol výber vlnky z danej triedy kritický a ako kvantitatívne ovplyvňuje dosiahnuté výsledky. Ako prípadne vidí autor možnosť „syntézy na mieru“ vlnky s optimálnymi vlastnosťami pre použitie v oblasti analýzy EKG.

2. V algoritmoch je použitých množstvo rozhodovacích prahov a intervalov, pevných ale najmä závislých na signáloch (tab. 9.1, 9.2, 9.3). Do akej miery bol spôsob ich určenia a ich hodnoty systematicky vyberané testovaním, resp. do akej miery boli určené len skusmo - empiricky. Možno uviesť príklady ?
3. V kapitole 9 bola výkonnosť algoritmov hodnotená porovnaním so 14 programami a tento krok bol aj zdôvodnený. Pokúsil sa napriek tomu autor zhodnotiť svoje algoritmy aj porovnaním s referenčnými hodnotami získanými od 5 kardiológov ? Ak áno, líšili sa tieto výsledky významnejšie ?
4. V kapitole 10 sa zlepšenie výkonnosti globálnej identifikácie dosiahlo syntézou (lineárnou transformáciou) ďalších zvodov, pričom ani tak nebol dôležitý spôsob transformácie ale skôr počet získaných zvodov. Je zrejmé, že táto transformácia nedáva novú informáciu, len umožňuje lepšiu extrakciu existujúcej. Ako vidí autor možnosť aj iného prístupu, napr. že namiesto väčšieho počtu (syntetizovaných) zvodov by sa na hodnotenie signálov použili viaceré vlnky alebo viaceré mierky ?
5. Ako sa v kap. 10 dá logicky zdôvodniť lepší výsledok rozmeriavania po transformácii do 12 štandardných zvodov než do 12 zvodov cez náhodnú transformačnú maticu ?
6. Obr. 9.5. Sú v obrázku vyznačené čiarkovane hranice QRS ? Ak áno, ako súvisí začiatok QRS v prvom cykle s pôvodnou mierkou 41 (očakával som prechod nulou)?
7. Str.58 označenie v (9.1) je iné ako v texte.
8. Ako (a či vôbec) vidí dizertant možnosť ďalšieho zlepšenia výkonnosti rozmeriavacích algoritmov na navrhnutom princípe, prípadne ako vidí celkovú perspektívu v tejto oblasti.

d) Pôvodné výsledky dizertácie

Práca obsahuje nové teoretické (metodické) výsledky ako aj experimentálne overené výsledky testovania navrhnutých algoritmov na reálnych signáloch z databázy CSE. Výsledky práce sú tiež kriticky porovnané s publikovanými prácami a v tomto porovnaní obstáli celkovo lepšie.

Najdôležitejšie výsledky dizertácie sú zhrnuté v kapitole 12 - Záver. Z môjho pohľadu sú to:

1. Návrh nových metód na detekciu QRS komplexu a rozmeranie EKG signálov s využitím spojitých vlnkovej transformácie, pričom metódy využívajú jedinou vlnku (bior1.5) a len vhodne vybrané mierky transformácie (15, 41). Algoritmy sú dostatočne presné a robustné.
2. Návrh metód zhlukovej analýzy výsledkov jednozvodových detekcií, pomocou ktorých boli dosiahnuté veľmi kvalitné globálne detekcie a rozmeranie viaczvodových EKG signálov. Navrhnuté algoritmy sú univerzálne z hľadiska počtu analyzovaných zvodov.
3. Overenie navrhnutých algoritmov na medzinárodne dostupnej databáze signálov CSE a porovnanie výsledkov s doteraz publikovanými algoritmi, kde metódy predložené v práci viedli k preukázateľne lepším výsledkom.
4. Návrh a overenie zlepšenia výkonnosti algoritmov pri globálnom rozmeriavaní signálov s použitím syntézy (na báze lineárnej transformácie) a následného hodnotenia viacerých EKG zvodov.
5. Nové riešenie programovej implementácie algoritmov s použitím konvolúcie signálu s príslušne rozťahnutou reverznou vlnkou a praktická aplikácia algoritmov pri hodnotení kompresie a filtrácie na diagnostické parametre EKG signálov ako aj pre realizácii programových produktov EKG Kvantum a Asklepios.

Celkovo je predložená dizertačná práca je vypracovaná na veľmi dobrej odbornej úrovni, uvedené výsledky sú dizertabilné a aj prínosné pre praktické aplikácie.

V zozname publikačnej a vedeckej činnosti dizertanta je uvedených 13 prác z rokov 2007 až 2010, z nich v 9 je dizertant prvým autorom, viaceré boli prezentované na významných medzinárodných konferenciách. Bol tiež hlavným riešiteľom 2 projektov a riešil 2 softvérové produkty. To svedčí o schopnosti uchádzača tvorivo pracovať a publikovať na úrovni vyžadovanej pre vedecké publikácie.

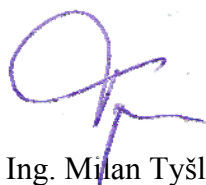
e) Prínos práce pre ďalší rozvoj vedy a techniky

Výsledky prezentované v predloženej dizertačnej práci sú podľa môjho názoru jednak prínosom k teoretickému rozboru možností použitia metód na báze vlnkovej transformácie na analýzu EKG signálov, kde práca ponúka nové metódy, ktoré pracujú na iných princípoch ako metódy publikované (CWT s vybranou vlnkou a vybranými mierkami, spôsob definovania rozhodovacích kritérií a prahov, ...) Prezentované metódy majú nielen teoretický význam, ale ako ukazuje ich overenie na reálnych dátach z databázy CSE mohli by sa stať súčasťou prakticky používaných postupov a mohli by byť implementované do príslušných diagnostických softvérov.

f) Splnenie podmienok dizertability

Na základe podrobného preštudovania a zhodnotenia predloženej dizertačnej práce Ing. Martina Víteka som prišiel záveru, že dizertant preukázal, že v rámci doktorského štúdia nadobudol potrebné teoretické aj praktické odborné vedomosti v oblasti metód záznamu, spracovania a analýzy elektrickej činnosti srdca a jej diagnostického hodnotenia. Ukázal, že ovláda metódy vedeckej práce a dokáže tvorivo riešiť vedecké úlohy a je schopný výsledky svojej práce na potrebnej úrovni publikovať. Práca podľa môjho presvedčenia spĺňa podmienky dizertability a odporúčam ju k obhajobe. Zároveň navrhujem, aby po úspešnej obhajobe práce bola Ing. Martinovi Vítekovi udelená akademická hodnosť „Philosophiae Doctor“ – PhD.

V Bratislave 10.5.2011.



Doc. Ing. Milan Tyšler, CSc.