



PACIJENT SIMULATOR – MAJČIN I FETALNI SIGNAL GENERATOR NEINVAZIVNIH ABDOMINALNO SNIMLJENIH EKG I EHG BIOPOTENCIJALA

PATIENT SIMULATOR – MATERNAL & FETAL SIGNAL GENERATOR OF NON-INVASIVE ABDOMINALLY RECORDED ECG & EHG BIOPOTENTIALS

Nemanja Čabrilo, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELETROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – Ovaj rad opisuje proces dizajniranja i razvoja višekanalnog generatora elektrofizioloških signala zasnovanog na LabVIEW programskom okruženju i merne kartice za akviziciju podataka (DAQmx). Posebna pažnja posvećena je rekonstrukciji realističnih neinvazivnih signala u smislu električne aktivnosti majčinog i fetalnog srca i mišića materice. Ideja je bila da se predstavi funkcionalni prototip koji može da generiše sintetički signal i da se prema zahtevima korisnika koriguje u realnom vremenu bez gubitaka u kvalitetu signala, a sve to u cilju da bi se pridao značaj razvoju novih dijagnostičkih metoda.

Ključne reči: DAQ, EKG, EMG, EHG, obrada signala, višekanalni simulator, Matlab, LabVIEW, analogna elektronika, merno-akvizicioni sistem

Abstract – This paper describes the design and development process of a multi-channel electrophysiological signals generator based on LabVIEW programming environment and its associated data acquisition measurement cards (DAQmx). Special attention is paid to the reconstruction of realistic non-invasive signals in terms of maternal and fetal cardiac and uterine electrical activity. Main concern was to build a functional prototype that is able to generate and module synthetical signal in real-time without any losses of the signal's quality, which ultimately can produce a contribution to the development of new diagnostic methods.

Keywords: DAQ module, signal processing, EMG, EHG, Artefacts, multichannel simulator, non-invasive ECG, LabVIEW, Matlab, real-time, data acquisition, mixed signals, systems engineering, analog electronics,

1. UVOD

Visoko rizične trudnoće su sve više preovladavajuće zbog progresivno veće starosne dobi u kojoj žene započinju trudnoću. Danas oko dvadeset posto svih trudnoća se vode kao komplikovane u određenoj meri. Npr, u vidu prevremenog porodaja, nedostatka kiseonika fetusa, ograničenosti rasta, hipertenzije, itd. Rana detekcija ovih komplikacija je od vitalnog značaja za blagovremene lekarske intervencije, ali je sputana od strane trenutnih tehnoloških ograničenja u monitoringu.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Platon Sovilj, red. prof.

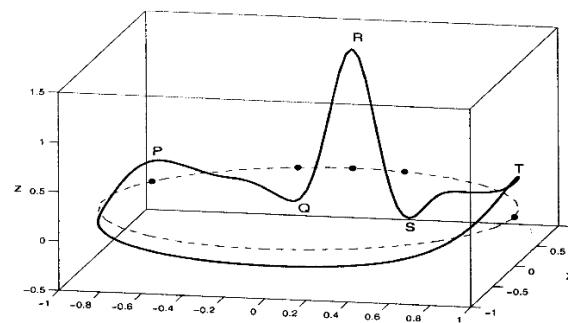
Najistaknutija metoda za praćenje zdravstvenog stanja fetusa je monitoring *heart rate variability*-a (HRV), u odnosu na odziv mišićnih aktivnosti uterusa (*cardiotocography* – CTG).

Ipak praktična primena fetalnog ECG-a nailazi na brojne nedostatke u akušerskoj dijagnostici, i trenutno teško može da parira još uvek pouzdanim invazivnim metodama, pa se češće koriste kao njihov dodatak (CTG i ECG). Da bi se prevazišla ograničena primenljivost, različite metode obrade signala su testirane kako bi se pouzdano analizirao neinvazivni fECG sa abdomena trudnice, ali ovi pokušaji još uvek nisu doveli do ustanovljenih pristupa koji omogućavaju široku kliničku primenu.

Tokom eksperimentisanja sa ovakvim algoritmima, neophodno je imati odgovarajući signal pogodan za testiranje. Za ovu svrhu razvijan je prototip simulatora biofizioloških signala koji se mogu meriti najsavremenijim neinvazivnim metodama, i na taj način doprinetu razvoju novih dijagnostičkih metoda.

Ovaj model se može lako prilagoditi tehničkim zahtevima mernih uređaja. Moguće je i dodavanje smetnji ECG-a (biološke i tehničke artefakte), kao i određenih osobina fECG signala. Treba naglasiti da je krajnji uređaj demonstrator, odnosno dokaz koncepta, koji je razvijan za interne potrebe kompanije *Nemo Healthcare*, stoga nije namenjen za tržišnu proizvodnju i neće biti komercijalno dostupan.

2. MORFOLOGIJA ECG-a



Slika 1. Tipična trajektorija koju generiše dinamički model u 3-D ravni, data sa (x,y,z).

Dužina trajanja jednog PQRST kompleksa ~ 200 ms

Visina naponskog raspona (Vpp) ~ 1 mV

Svaki otkucaj srca može se posmatrati kao niz izvijanja signala dalje od osnovne linije na ECG-u. Ovi otkloni odražavaju vremensku evoluciju električne aktivnosti u

srcu koja inicira mišićne kontrakcije srca. Jedan sinusni (normalni) ciklus ECG-a, predstavlja suksesivnu atrijalnu depolarizaciju/repolarizaciju i ventrikularnu depolarizaciju /repolarizaciju koja se javlja sa svakim otkucajem srca. Tradicionalno je označen sa slovima P, Q, R, S i T (*Willem Einthoven 1893*, Slika. 1).

3. MODEL

Realni snimci ECG-a uvek su kontaminirani artefaktima; stoga osim modeliranja srca kao izvora i medujima kojim se propagira signal, vrlo je važno imati i realne modele za različite izvore šuma. Ovi šumovi su tipično veoma nestacionarni u vremenu i spektralno prošarani (imaju dugoročne korelacije). Najčešći oblici šuma su: udaljavanje od osnovne linije signala, mišićni artefakti, pomeranje elektroda. Za fetalni ECG sa majčinog abdomena takođe se dotiraju i: majčin ECG, kretanje fetusa tokom snimanja, kontrakcije uterusa, promenljiva otpornost majčinskog volumena provodljivosti zbog *vernix caseosa* sloja oko fetusa.

Već tokom ranih faza razvoja ovog projekta napisan je model simulatora u Matlab programskom okruženju, na osnovu koje je koncipiran dalji razvoj „Pacijent simulatora“. Ovu Matlab skriptu je sastavio profesor sa TU/e-a i jedan od osnivača gore pomenute firme iz Eindhoven dr. *Rik Vullings*.

Rešenje se oslanja na kombinaciju najsavremenijih dostignuća u metodama modelovanja biosignalata zajedno sa već prikupljenim snimljenim podacima stvarnih pacijenata iz bolnice *Máxima Medisch Centrum*. Njegov istraživački radovi umnogome su doprineli su razvoju novih dijagnostičkih metoda merenja fECG-a, uz pomoć modelovanja vektora jediničnog električnog polja stacionarnog porekla, opisanih kao *vectorcardiogram* (VCG).

Abdominalni ECG predstavlja projekciju VCG-a na vektor koji opisuje poziciju merne elektrode u odnosu na referentnu elektrodu, što omogućava da se bilo koji ECG signal izračunava poznavajući VCG. Slično važi i obrnuto kada su barem tri nezavisna ECG-a poznata, čime se postupkom može izbeći pojava viška šuma u signalu. Osim opisivanja električne aktivnosti u tri dimenzije, fVCG predstavlja i okvir za računanje fetalne orientacije u materici. Izvorni kod u Matlabu predstavlja intelektualnu svojinu, i u interesu firme je da se sadržaj iste ne objavljuje u javnosti, zbog čega neće biti detaljno opisan.

4. IMPLEMENTACIJA

4.1. Opis sistema

Predviđen je razvoj sistema koji se sastoji od nekoliko nezavisnih celina: Definisanje tehničkih i sistemskih specifikacija, odabir tehnologije za generisanje i reprodukciju analognog signala uzimajući u obzir budžetska, vremenska i druga ograničenja (prototipovanje); razvoj algoritma, softverska implementacija, dizajn grafičko-korisničkog interfejsa (GUI) na front panelu, skaliranje analognog signala na opseg realnih (očekivanih) vrednosti napona, optimizacija, integracija, testiranje i verifikacija. Zbog specifičnosti okvira rada, validacija simulatora ne ulazi u obim ovog rada, ali će se naknadno izvršiti.

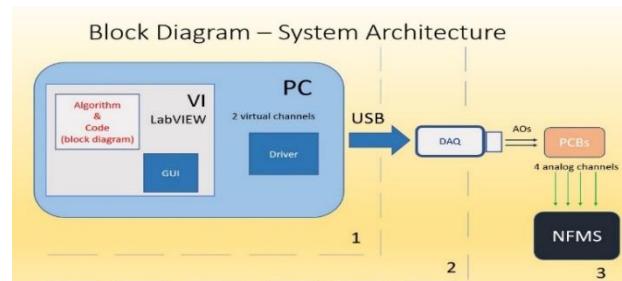
4.2. Tehničke i sistemske specifikacije

Specifikacije su bazirane na prikupljenim informacijama krajnjih korisnika inženjera i istraživačkog kadra Nemo Healthcare firme, praćenjem publikacija od interesa, kao i prostom analizom nedostataka postojećih simulatora na trenutnom tržištu. Za neke od osnovnih tehničkih zahteva ustanovljeno je da simulator treba da poseduje unapredene sledeće funkcije: simulacija aktivnosti uterusa mišića, ECG signal različitih oblika, prilagođavanje vrednosti napona prema NFMS-u (*Nemo Fetal Monitoring System*), dinamična promena srčanog ritma majčinog i fetalnog ECG-a, širi opseg srčanog ritma, multikanalno generisanje signala, itd.

4.3. Izbor tehnologije

Prvobitno je bilo u planu da se simulator implementira uz pomoć eksterne zvučne kartice (*Focusrite Scarlett 2i4*), što se ubrzo pokazalo kao komplikovanje rešenje u tom momentu. Usled ograničenosti resursa, izbor je vrlo brzo spao na hardverskom rešenju *USB DAQ 6002* modula razvijen od strane kompanije *National Instruments*, sa kojim je prvo ozbiljnije prototipovanje započeto. Zbog visoke kompatibilnosti ovog uređaja sa programom za razvoj virtuelnog instrumenta LabVIEW, proizведен iz iste firme kao i DAQmx, odlučili smo se da faza implementacije bude zasnovana na ovom programskom okruženju.

4.4. Sistem arhitekture



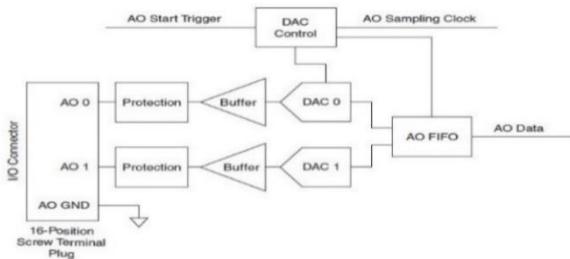
Slika 2. Blok šema sistem arhitekture

4.5. Hardver

Hardverski deo čini prvobitno personalni računar, idealno u baterijskom režimu rada, preko kojeg se upravlja simulacijom. Zatim se signal šalje u digitalnom formatu preko USB protokola ka DAQ uređaju gde se ujedno vrši digitalno-analogna konverzija. Potom se generiše signal na analognim izlazima uređaja. Praktičnost ovog uređaja ogleda se u tome što može da vrši akviziciju u simultanom procesu, bez potrebe za dodatnim uredajima. Jednostavno se prespoje izlazni sa ulaznim kanalima, gde se vrši A/D konverzija i prosleđuju dalje podaci nazad na računar posredstvom FIFO integrisanog baferskog bloka. Na taj način može se vršiti samo-provera generisanog signala i u okviru iste aplikacije (LabVIEW, Python, C++).

Jedan od glavnih nedostataka ovog DAQ modula je nemogućnost reprodukcije više od dva analogna kanala, pa je samim tim i generisanje biosignalata bilo ograničeno na simulaciju samo dva fizička kanala preko ovog uređaja. Za uspešnu reprodukciju četiri kanala, koristio

sam dodatnu analognu elektroniku, kao i muzičku karticu računara.



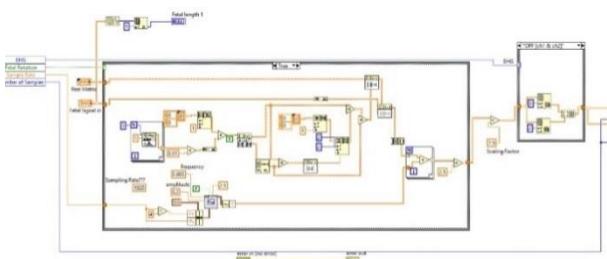
Slika 3. Analogno izlazno kolo - NI USB DAQ 6002

Smanjivanje napona do realnih vrednosti amplituda napona postignuto je povezivanjem atenuatorskog bloka na izlazne kanale DAQ uređaja. Atenuator je sačinjen od aktivnih i pasivnih komponenti analogne elektronike, koristeći prosti naponski razdelenik sa odgovarajućim odnosom vrednosti otpornika, kao i operacionim pojačavačem (op270G) sa odgovarajućim karakteristikama (npr. *Input offset voltage* tipično od oko $75 \mu\text{V}$). Ovaj opAmp zajedno sa otpornicima u kolu neinvertujućeg pojačavača uveden je zbog pojačanja vrednosti napona (nakon smanjivanja) na dovoljno visoki naponski opseg kako bi merni instrument poput osciloskopa mogli to da izmere i prikažu. Na taj način sam uspeo da verifikujem prethodni korak smanjivanja napona na red μV .

4.6. Softverski razvoj

Za razvoj ovog simulatora korišćeni su razni programski alati. Od posebnog značaja je i svakako najčešće korišćen LabVIEW u kojem je razvijan algoritam modela simulatora i implementiran izvršni kod za upravljanje signalima preko korisničkog interfejsa. U samoj aplikaciji su sprovedena i dodatna, ali ne i neophodna svojstva, poput monitoring dial box-a, error handling, merna akvizicija podataka, mogućnost reprodukovanja i slušanja ECG-a u audio formatu preko integrisane zvučne kartice računara, itd. U LabVIEW programskom paketu korišćeni su još i posebni dodaci (biblioteke) kao npr. blokovi za akviziciju i kontrolu podataka i za obradu audio signala.

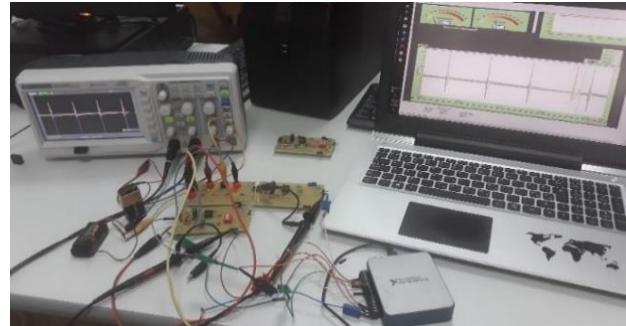
Hijerarhijska organizacija izvršnog koda je implementirana koristeći neke od standardnih postavki za organizaciju blok dijagrama. Master/Slave (producer/consumer) postavka omogućila je, pored efektivnije strukture koda, jasnu sledivost izvršavanja različitih sekvenci koda, tako što glavna petlja (*state machine*) komunicira sa ostalim sekvencama i upravlja redosled njihovih izvršavanja, koristeći operacije redova čekanja (*queue operations*).



Slika 4. Primer jedne petlje iz Blok Dijagrama

U programu sam koristio funkcionalne globalne varijable (FGV) za komuniciranje između dve ili više paralelnih procesnih petlji sadržane unutar različitih virtualnih

instrumenata (VI-a). "Funkcionalna" priroda FGV znači da možete stvoriti dodatnu funkcionalnost izvan one osnovne globalne varijable, što mi je omogućilo upisivanje u, i čitanje iz iste globalne promenljive na različitim mestima u toku izvršavanja jednog ili više VI-a.



Slika 5. Laboratorijska postavka za testiranje Sistema (Osciloskop, atenuator, DAQmx, Front panel VI-a, PC)

Na taj način sam mogao da definišem mECG i fECG signale kao posebne funkcionalne globalne promenljive koje se izvršavaju u paralelnim procesima, ne narušavajući kondicijale ostalih zahteva izvršnog programa i rada samog računara.

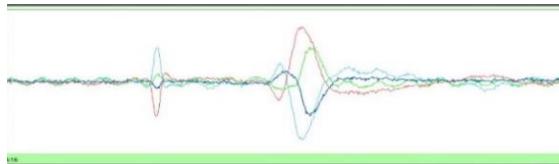
Za kraj je kreirana .exe datoteka koja otvara i pokreće izvršnu aplikaciju na svakoj platformi koristeći samo LabVIEW Run-Time Engine, bez dalje potrebe za instaliranjem čitavog LabVIEW softvera sa paketima.

4.7. majčin i fetalni ECG (mECG i fECG)

Podaci realnih snimaka pacijenta sačuvanih u MAT fajlu su prvo konvertovani u odgovarajući format, a zatim se kao takvi učitavaju u program i korste za dalju manipulaciju. Podaci sadrže informacije o majčinom i fetalnom VCG-u, koje predstavljaju diskretizovane vrednosti amplituda napona u vremenskom domenu, koje su odabirane frekvencijom od 1000 Hz. Da bi se abdominalni signal prilagodio postavci elektroda sa NFMS mernim instrumentom, nad sumplovanim odbircima primenjuje se odgovarajuća linearna transformacija (trokanalno merenje sa pravog pacijenta). Kada se vrednosti signala postave na odgovarajuće pozicije u prostoru manipulacijom matricama, primenjuju se prozorske funkcije (*Hanning* i *Tukey*) kako bi se ograničila dužina osnovne arkade PQRST kompleksa, ali i pogodno „zašiljili“ krajevi segmenta signala koji će se reprodukovati tokom generacije.

U zavisnosti od zadatog srčanog ritma, automatski se dodaje jednoznačno određen broj odbiraka (*zero padding*) između susednih segmenata PQRST kompleksa. Na dodatnim odbircima primenjuje se linearna interpolacija kako bi tranzicija između dva otkucaja srca imala verodostojniju reprezentaciju realnog signala. Ovde je implementiran algoritam za HRV koristeći raspodele Gausovog belog šuma, kojim varira dužinu trajanja između susednih otkucaja srca prema specifičnim zakonitostima. Odstupanje od osnovne trajektorije (*baseline wander*) po kojoj se signal pomiče uz pomoć ciklitičnog bafera, je simuliran kao artefakt niske učestanosti, koji se povećava usled disanja, pojave nanelektrisanja elektroda, ili pokreta pacijenta tokom snimanja. Amplitudska modulacija je

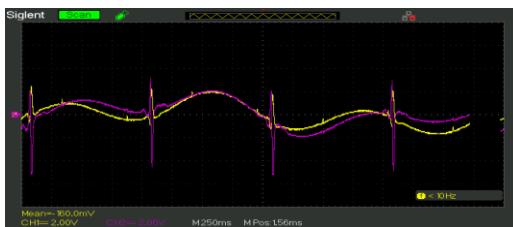
uvadena sa uniformnom raspodelom kako oblici signala PQRST kompleksa ne bi bili statične prirode. Fetalna pomeranja u materici tokom merenja su simulirani preko faktorizacija singularnih vrednosti dekomponcije, gde rotiranje matrica poseduje određenu nivo inercije.



Slika 6. Četvorokanalni mECG i fECG signal

4.8. EHG

Kontrakcije uterus mišića su prouzrokovane akcionim potencijalima koji se propagiraju duž *myometrium* ćelija. Elektrohisterografija je mera električne aktivnosti uterusa. EHG se mogu simulirati kao naleti električnih impulsu u rasponu od 0,3 Hz do 0,8 Hz koji se pojavljuju i nestaju sa kontrakcijama.



Slika 7. Dvokanalno merenje ECG i EHG signala

Tranzicija između kontrakcija traje u napred zadatim vremenskim intervalim. Uobičajeno je da trajanje kontrakcije pre porođaja bude oko 20 sekundi, a pauza oko 40 sekundi. Takav signal je dobijen slaganjem fazno pomerenih 500 sinusnih funkcija različitih frekvencijskih vrednosti u navedenom opsegu, sa inkrementom od po 0,01 Hz, na koje je primenjena prozorska funkcija.

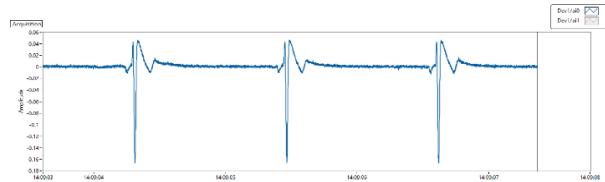
4.9. Artefakti

Da bi se modelirani signal učinio realnijim, moguće je dodati beli šum u rezultujući signal simulirajući šum instrumentacije. Takođe, može se uljučiti i signal koji simulira šum iz mreže, kao male vrednosti sinusode frekvencija 50 Hz ili 60 Hz. Disanje prouzrokuje da osnovna izoelektrična linija oko koje se kreće ECG signal počne relativno sporo-periodično da menja svoj položaj. Jednostavan način modeliranja ovog efekta je dodati sinusni oblik talasa signala respiracije, koji može varirati od oko 0,2 Hz do 0,5 Hz (otprilike 12 do 30 udisaja u minuti).

5. VERIFIKACIJA

Za potrebe testiranja signala, koristio sam postavku merenja sa diferencijalnim povezivanje kanala. Ovakva postavka smanjuje prikupljanje šuma i povećava potiskivanje zajedničkog napona šuma kao i razlike potencijala između izvora signala i uzemljenja ako se personalni računar priključuje preko napajanja na kućnu utičnicu koja je uzemljena odgovarajućim provodnikom.

Korišćena test instrumentacija: Osciloskop; DAQ kartica; Texas Instruments ADS1299 modul za evaluaciju; Generator funkcije; Sistem zvučnih kartica sa DAW softver alatima; Ostala laboratorijska oprema.



Slika 8. Jednokanalno merenje mECG-a. Vpp smanjen na $20 \mu V$ zatim pojačan na $200 mV$ i snimljen kao takav.

6. ZAKLJUČAK

Predloženi pacijent simulator modelovan je pomoću LabView softvera koji reprodukuje istaknute karakteristike fetalnog ECG-a. Ovakva rekonstrukcija realističnog ECG-a pruža standard za testiranje različitih tehnika obrade biomedicinskih signala. Učinkovitost prototipa verifikovana je i dokumentovana. S obzirom na opštost predloženog simulatora, moguće su brojne primene i jednostavna proširenja ovog simulatora. Neka od hardverskih unapređenja: Proširivanje broja simuliranih elektroda (kanala); Integracija razvijenog LabVIEW VI-a na *stand-alone* uređaj. Softverska unapređenja: Morfološka varijacija PQRST kompleksa ECG-a; simulacija abnormalnih srčanih otkucaja; Dodatne varijabilnosti izoelektrične linije.

7. LITERATURA

- [1] P. E. McSharry, G. D. Clifford, L. Tarassenko, and L. A. Smith, "A dynamical model for generating synthetic electrocardiogram signals," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 50, no. 3, pp. 289–294, 2003.
- [2] Vullings, R. (2010). "Non-invasive fetal electrocardiogram: analysis and interpretation" Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven DOI: 10.6100/IR692881

Kratka biografija:



Nemanja Čabrić rođen je u Zrenjaninu 1991. godine. Diplomirao je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, na Katedri za električna merenja. 2016. godine. Interesovanje – biomedicinsko inženjerstvo. kontakt: nemanjac@outlook.com