

LATVIJAS UNIVERSITĀTE



Edgars Kviesis-Kipge

OPTISKO METOŽU UN IERĪČU IZSTRĀDE
KARDIOVASKULĀRĀ STĀVOKĻA KONTROLEI REĀLĀ
LAIKĀ

Promocijas darbs

Mag. phys. Edgars Kviesis-Kipge

Darba vadītājs
Prof., Dr. hab. phys. Jānis Spīgulis

Rīga, 2013

Promocijas darbs izstrādāts LU Atomfizikas un spektroskopijas institūtā laika posmā no 2006. gada līdz 2012 gadam.



Eiropas sociālā fonda projekti „Atbalsts doktora studijām Latvijas Universitātē” Nr. 2009/0138/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/004 un „Biofotonikas pētījumu grupa”, Nr. 1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/077.

Darbs sastāv no ievada, sešām nodaļām, nobeiguma, literatūras saraksta un pielikumiem.

Darba forma: disertācija fizikas nozarē, medicīniskās fizikas apakšnozarē

Darba zinātniskais vadītājs: prof. Dr. habil. phys. Jānis Spīgulis

Darba recenzenti:

prof. Dr. phys. Aleksejs Kataševs, Rīgas Tehniskā universitāte

Dr. sc. comp. Modris Greitāns, Elektronikas un datorzinātņu institūts

prof. Kalju Meigas, Tallinas Tehniskā universitāte

Promocijas padomes priekšsēdētājs: *Dr. habil. phys.* Ivars Tāle

Promocijas darba aizstāvēšana notiks 2013. gada 10. aprīlī plkst. 15.00 Latvijas Universitātes Fizikas, astronomijas un mehānikas nozares promocijas padomes atklātā sēdē Rīgā, Zeļļu ielā 8, 233. telpā. Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Universitātes Bibliotēkā Rīgā, Kalpaka bulvārī 4.

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Universitātes Bibliotēkas Daudznozaru bibliotēkā: datorika, juridiskās zinātnes, teoloģija (Raiņa bulv. 19), Latvijas Akadēmiskajā bibliotēkā (Rūpniecības ielā 10) un LU Fizikas un matemātikas fakultātē (Zeļļu ielā 8), F210. telpā.

© Latvijas Universitāte, 2013

© Edgars Kviessis-Kipge, 2013

ANOTĀCIJA

Promocijas darbā izstrādātas divas jaunas optiskas metodes cilvēka veselības stāvokļa novērtēšanai reālā laikā - fotopletizmogrāfijas (PPG) signālu digitālās detektēšanas metode un metode rekapilarizācijas procesa izsekošanai pēc PPG signālu izmaiņām spektra zilajā daļā. Piedāvāti jauni tehniskie risinājumi arī bezvadu PPG, vairākkāņu PPG un multispektrālās PPG realizācijā. Jaunās un pilnveidotās metodes realizētas praksē, izstrādājot un eksperimentāli pārbaudot piecas oriģinālas mērierīces fizioloģisko parametru noteikšanai un monitoringam. PPG signālu bezvadu detektēšanas, apstrādes un pārraides iekārtās izmantota *Bluetooth* datu pārraide un mūsdienīgu raidītājmoduļu piedāvātās iespējas. Vairāki bezvadu PPG sensori iestrādāti ikdienā lietojamos apģērbos, nodrošinot ilgstošu (līdz 5 stundām) un ērtu sirdsdarbības parametru monitoringu.

Darba pārskata daļā sniegts apskats par ādu un tās uzbūvi, kā arī par fotopletizmogrāfijas metodi un bezvadu datu pārraides moduļiem, to darbības principu un pielietojumiem.

Praktiskajā daļā aplūkotas jaunizstrādātās PPG signālu mērīšanas metodes, kā arī elektronisko mēriekārtu prototipi un to realizācija, sniegts šo ierīču darbības apraksts un eksperimentālo izmēģinājumu rezultāti.

Iegūtie rezultāti liecina, ka izstrādās mērīšanas metodes un ierīces ir sekmīgi izmantojamas cilvēka kardiovaskulārā stāvokļa ērtai un operatīvai novērtēšanai, kā arī sirds un asinsvadu problēmu agrīnai diagnostikai.

Darba galvenie rezultāti prezentēti 18 referātos starptautiskās konferencēs un publicēti 16 rakstos, no kuriem 13 citēti starptautiskās datu bāzēs. Saņemti 2 Latvijas patenti.

Atslēgvārdi: Fotopletizmogrāfija, bezvadu pārraide, rekapilarizācija, multispektrālā fotopletizmogrāfija.

ABSTRACT

In the doctoral thesis developed two new optical methods for assessing human health in real time - photoplethysmography (PPG) signal digital detection method and the method of capillary refill tracking process in real time by PPG signal changes in the blue part of the spectrum. Proposed innovations in wireless PPG, PPG and multichannel multispectral PPG implementation. New and improved methods tested in practice by developing five experimental measuring physiological parameters, and monitoring. PPG wireless signal detection, processing and transmission equipment using Bluetooth data transmission and selected RF module opportunities. Several wireless PPG sensors embedded in everyday clothes, ensuring long-lasting (up to 5 hours) and convenient heart rate monitoring parameters.

Review part of the Doctoral thesis provides an overview of the skin and its structure as well as photoplethysmography and wireless transmission modules, the operating principles and applications.

In the practical part there is discussed about PPG signal newly developed measurement methods of PPG signal, as well as an electronic measuring device prototypes and the realization of these devices provides a description of the experimental test results.

The results show that the developed measurement methods and devices have been successfully used in human cardiovascular conditions for comfort and operational assessment, as well as heart and blood vessel problems early diagnosis.

The main results presented at 18 international conferences and published in 16 articles, 13 of which cites the international databases. Received 2 Latvian patents.

Keywords: Photoplethysmography, wireless transmission, capillary refill, multispectral photoplethysmography.

SATURS

	lpp.
1. IEVADS.....	7
2. PĀRSKATA DAĻA.....	9
2.1. Ādas uzbūve un asinsvadu izvietojums ādas slāņos	9
2.2. Remisijas un absorbcijas fotopletizmogrāfija.....	12
2.3. Biosignālu bezvadu pārraides veidi	14
2.4. Programmējamie raidītāja-uztvērēja moduļi	17
2.5. Reālā laikā strādājošas fotopletizmogrāfijas sistēmas	20
3. PRAKTISKĀ DAĻA.....	22
3.1. Izstrādātās metodes PPG biosignālu detektēšanai reālā laikā	22
3.1.1. Digitālā PPG signāla reģistrācijas metode.....	22
3.1.2. Metode rekapilarizācijas atspoguļojumam reālā laikā.....	26
3.1.3. PPG signālu apstrādes pilnveidojumi	28
3.2. Jaunizveidotās eksperimentālās mērierīces	30
3.2.1. Trīskanālu digitālā PPG mērīšanas ierīce	31
3.2.2. Ierīce rekapilarizācijas kinētikas mērījumiem (I versija)	36
3.2.3. Ierīce rekapilarizācijas kinētikas mērījumiem (II versija)	37
3.2.4. Ierīce PPG signālu mērījumiem pie trim viļņu garumiem	41
3.2.5. Bezvadu uzpirkstenis (I versija)	44
3.2.6. Bezvadu uzpirkstenis (II versija).....	46
3.2.7. Tekstilizstrādājumi ar iestrādātiem PPG sensoriem (I versija)	51
3.2.8. Tekstilizstrādājumi ar iestrādātiem PPG sensoriem (II versija).....	54
3.3. Izstrādāto metožu un ierīču eksperimentālā pārbaude	59
3.3.1. Digitālās PPG metodes tehnisko parametru mērījumi.....	60
3.3.2. Rekapilarizācijas kinētikas mērījumi.....	62
3.3.3. Dažāda dziļuma asinsvadu pulsāciju mērījumi	66
3.3.4. Mērījumi ar trīskanālu digitālo PPG ierīci.....	69
3.3.5. Bezvadu PPG ierīču kalibrācijas mērījumi	71
4. Galvenie promocijas darba rezultāti.....	74
5. Izmantotās literatūras saraksts.....	79
6. Pielikumi	82

IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI

- AC – maiņkomponente
- ACP – analogais ciparu pārveidotājs
- ADC – analogais ciparu pārveidotājs (*Analog-to-digital converter*)
- ARM – mikroprocesoru arhitektūra (*Advanced RISC Machine, RISC - Reduced instruction set computing*)
- CAP – ciparu analogais pārveidotājs
- COM – komunikācijas ports
- CPU – centrālais vadības kontrolieris (*Central processing unit*)
- DC – līdzkomponente
- DE9 – elektriskais kontaktu savienojums ar 9 izvadiem
- DIP – elektroniskās komponentes korpusa tips (*Dual in-line package*)
- DSP – digitālais skaņas procesors (*Digital signal processor*)
- EKG – elektrokardiogramma
- FF – laika intervāls starp PPG signāla „pēdām” (*Foot – to Foot*)
- FFT – ātrā Furjē pārveidošana (*Fast Fourier transform*)
- FHSS – paplašinātā spektra frekvenču pārslēgšanas metode (*Frequency-hopping spread spectrum*)
- FIR – galīgas impulsa rekācijas filtrs (*Finite impulse response*)
- FR-4 – auzs stiklšķiedras un epoksīdsveķu kompozītmateriāls no kā izgatavo elektronikas plates
- FTDI – kompānija, kas specializējusies USB tehnoloģiju izmantošanā (*Future Technology Devices International*)
- GND – sazemējums, parasti barošanas mīnuss (*Ground*)
- HR – sirdsdarbības frekvence (*Heart Rate*)
- IRLD – infrasarkanā lāzerdiodē (*Infrared Laser Diode*)
- ISM – radiofrekvenču joslas (*industrial, scientific and medical*)
- LDO – zema sprieguma krituma regulators (*Low-dropout regulator*)
- LED – starojošā diode (*Light-emitting diode*)
- Li-ion – litija jonu akumulators
- NP0 – keramisko kondensatoru dielektriskais materiāls (*Negative-Positive zero*)
- PCB – elektronikas plate (*Printed circuit board*)
- PIC – firmas Microchip mikrokontrolieris (*Peripheral Interface Controller*)
- PP – Sirdsdarbības pulsa periods
- PPG – fotopletizmogrāfija (*Photoplethysmograph*)
- RCA – „banāna” tipa savienojums (*Radio Corporation of America*)
- RI – atstarošanās indekss (*Refractive index*)
- RKL – rekapilarizācijas laiks
- RLD – sarkanā spektra lāzerdiodē (*Red Laser Diode*)
- RMSSD – kvadrātsakne no vidējo kvadrātu summas no blakus RR intervālu starpības (ms)
- RR – sirds cikla ilgums – laiks starp elektrokardiogrammas R-pīķiem
- RS232 – datoros, seriālā komunikācijas porta nosaukums
- SI – asinsvadu elastības/neelastības indekss (*Stiffness Index*)
- SPI – seriāls datu komunikācijas veids (*Serial Peripheral Interface*)
- SPIE – starptautiska fotonikas un optikas biedrība (*Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*)
- SPP – seriālā komunikācijas porta profils (*Serial Port Profile*)
- SPPG – vienperioda signāls
- SRV – sirds ritma variabilitāte
- ARM7TDMI-S – mikroprocesora arhitektūras veids (*ARM7+Thumb+Debug+Multiplier+ICE*)
- UART – universālais asinhronais raidītāj-uztvērējs (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*)
- USB – universālā seriālā kopne (*Universal Serial Bus*)
- VLD – violetā spektra lāzerdiodē (*Violet Laser Diode*)
- X7R – keramisko kondensatoru dielektriskais materiāls

1. IEVADS

Sirds un asinsvadu slimības raksturīgas ar ilgstošu klīnisko norisi, mirstības ziņā ir pirmajā vietā Latvijā. Tāpēc ļoti svarīgi informēt cilvēkus par šo slimību sekām, savlaicīgu diagnosticēšanu un veselības stāvokļa kontroli. Šim nolūkam var izmantot elektrokardiogrāfiju, bet tās lietošana ir diezgan sarežģīta, elektrodu pareiza pievienošana prasa zināšanas un vadu daudzums apgrūtina kustības, tāpēc galvenā uzmanība doktora darbā tika pievērsta ātrai augstas efektivitātes mērīšanas metodei – fotopletizmogrāfijai (PPG), kas dod nekavējošu diagnostisko informāciju. Fotopletizmogrāfija ir viena no populārākajām, neinvazīvām optiskās mērīšanas metodēm. Metode mēra asins apgādes optiskās īpašības, izmantojot sarkano un infrasarkano starojuma diapazonu. Fotopletizmogrāfa uztvertie signāli attēlo asinsspiediena maiņas izraisīto asinsvadu izplešanos un saraušanos.

LU ASI Biofotonikas laboratorijā ir izstrādātas vairākas PPG sensoriekārtas, kas izmantojamas asinsrites un sirdsdarbības nepārtrauktam monitoringam reālā laikā. Tās ir daudz vienkāršāk lietojamas, nekā tradicionālās elektrokardiogrāfijas iekārtas – pietiek ar vienu kontaktpunktu, piemēram, pirksta galu. Pašlaik aktuālākais ir izveidot medicīnas aparatūras tirgū konkurētspējīgas mērierīces, kas darbojas atbilstoši jaunākām metodikām un tendencēm. Par PPG ierīcēm un to izmantošanu fizioloģiskiem mērījumiem ievērojama interese ir jauniešu vidū – par to liecina PPG demonstrāciju iekārtu popularitāte „Zinātnieku naktīs” un izstādēs. PPG mērījumu ierīces, kas darbojas bezvadu pārraides režīmā, ir diezgan maz, ievērojami vairāk ir dažāda veida elektrokardiogrāfijai veselības stāvokļa monitoringam.

Viena no darba aktualitātēm ir inovatīvu medicīnas diagnostikas iekārtu izstrāde. Svarīgi rast jaunus pielietojumus jau pārbaudītām metodēm un izpētīt jaunas, piemēram, „viedais apģērbs” ar iebūvētiem PPG sensoriem un bezvadu datu pārraidi.

Otra problēma, kas ir pagaidām maz pētīta – rekapilarizācija jeb asins plūsmas atjaunošanās kapilāros pēc to īslaicīgas iztukšošanas: kā izsekot šim procesam reālā laikā.

Uzskatu, ka esmu pievērsies nozīmīgai tēmai – cilvēka kardiovaskulārā stāvokļa diagnostikas vadu un bezvadu aparatūras izstrādei un pilnveidošanai, izmantojot mūsdienīgas medicīnas fizikas aparatūras un analīzes metodes.

Promocijas darbs galvenokārt ir balstīts uz jaunu fotopletizmogrāfijas signālu mērīšanas prototipu iekārtu un metožu izstrādi un pielietojumu. Darbā ir sniegta informācija par izstrādātajām un izveidotajām ierīcēm, to darbības principu un prezentēti iegūtie mērījumu rezultāti. Tas ietver PPG signālu reģistrēšanu no dažādām cilvēka ķermeņa daļām (roku pirkstiem, plaukstas locītavas, pieres, kakla), iegūto datu apstrādi reālā laikā un pārraidi uz datoru – aprēķinu veikšanai, attēlošanai un saglabāšanai. Izveidotajās bezvadu PPG ierīcēs datu pārraide realizēta, izmantojot Bluetooth savienojumu, kas nosūta mērījumu datus uz datoru. Darba izstrādes laikā tika sekmīgi izveidotas un pārbaudītas 5 dažādas PPG mērījumu iekārtas. Izstrādes procesā iepazinos arī ar citu inženieru izstrādātajām shēmām, iekārtām un to darbības principu, kā arī apkopāju pieejamās publikācijas.

Darbs izstrādāts Latvijas Universitātes Atomfizikas un spektroskopijas institūta Biofotonikas laboratorijā. Rezultātā secināts, ka izstrādāto fotopletizmogrāfijas signālu mērīšanas ierīces iespējams veiksmīgi izmantot kardiovaskulārā stāvokļa noteikšanai.

Promocijas darba **mērķis** ir izstrādāt jaunas optiskas metodes un ierīces ātrai un neinvazīvai sirds darbības un asinsrites parametru noteikšanai un kontrolei.

Mērķa sasniegšanai izvirzīti sekojoši **uzdevumi**:

1. Izpētīt digitālo tehnoloģiju iespējas pilnveidotai PPG signālu mērīšanai.
2. Izpētīt iespējas izsekot ādas rekapilarizācijas kinētikai, izmantojot PPG signālu analīzi.
3. Izstrādāt optimizētu 3-kanālu PPG signālu mērierīci.
4. Izstrādāt multispektrālās PPG mērierīci, izmantojot trīs viļņu garumu lāzerdiodi.
5. Izstrādāt miniatūru bezvadu PPG signālu mērīšanas maketierīci un izpētīt iespējas to integrēt pulsoksīmetra uzpirkstenī un tekstilizstrādājumos.
6. Veikt laboratorijas un klīniskos mērījumus un sniegt slēdzienu par izstrādāto metožu un ierīču izmantošanas iespējām agrīnai kardiovaskulārai diagnostikai un ilgstošam sirds darbības monitoringam.

Darbā ir sniegts pārskats par pašreizējo situāciju fotopletizmogrāfijas jomā, aprakstītas izstrādātās metodes un izveidotās ierīces, kā arī prezentēti iegūtie mērījumu rezultāti. Eksperimentāli reģistrēti PPG signāli no dažādām cilvēka ķermeņa daļām (roku pirkstiem, plaukstu locītavas, pieres, kakla), veicot iegūto datu apstrādi reālā laikā. Izveidotajās bezvadu PPG ierīcēs datu pārraide realizēta, izmantojot *Bluetooth* savienojumu, kas nosūta mērījumu rezultātus uz datoru. Darba izstrādes laikā tika sekmīgi izveidotas un pārbaudītas piecas dažādas PPG mērījumu iekārtas. Rezultāti apliecina, ka izstrādātās biosignālu mērīšanas ierīces ir labi piemērotas kardiovaskulārā stāvokļa noteikšanai un kontrolei gan veselības aprūpes stacionāros (slimnīcās, klīnikās), gan paaugstinātas fiziskas un emocionālas slodzes apstākļos (treniņos, sacensībās), gan arī sirds un asinsvadu veselības paškontrolei mājās apstākļos.

Darbā izmantotā pamatmetode sirds darbības un asinsrites parametru kontrolei ir fotopletizmogrāfija (PPG). Piedāvātas divas jaunas metodes PPG iespēju un pielietojumu paplašināšanai – biosignālu detektēšanas digitālā metode un metode rekapilarizācijas procesa izsekošanai reālā laikā. Piedāvātas arī inovācijas vairākanālu, multispektrālās un bezvadu PPG realizācijā.

Tēmas aktualitāti nosaka šādi faktori:

- Ir svarīgi novērot un novērtēt cilvēku sirds darbības un asinsrites stāvokļa raksturojošus parametrus neinvazīvā un bezvadu veidā;
- Bezvadu mērījumu priekšrocības ir vienkāršāka lietošana, iegūto signālu kvalitāte un pacienta pārvietošanās brīvība;
- Ir nozīmīgi izstrādāt jaunas optiskas metodes un ierīces dažādu kardiovaskulāro slimību agrīnai diagnostikai, kā arī izveidot īpašas PPG reģistrēšanas iekārtas un sensorus zinātnisko pētījumu veikšanai.

Darbs sastāv no sešām nodaļām, kopējais apjoms ir 81 lappuse, darbā ir 70 attēli, izmantotās literatūras sarakstā iekļauts 51 literatūras avots, darba pielikumā ir publikācijas.

Promocijas darba pārskata daļā ir sniegta informācija par fotopletizmogrāfijas veidiem, PPG signālu un tā komponentēm, raksturoti bezvadu pārraides principi, kā arī sniegts īss ieskats par fotopletizmogrāfijas izmantošanu dažādos ārzemju rūpnieciskos izstrādājumos.

Praktiskajā daļā ir prezentētas piedāvātās divas metodes un doktorantūras studiju laikā izgatavotās piecas neinvazīvās optiskās monitoringa un mērījumu prototipu iekārtas. Sniegts to izstrādes mērķis, īss un darbības aprasts. Dažas ierīces tika izstrādātas vairākās versijās ilgākā laika periodā, tāpēc izveidotas atsevišķas nodaļas, kur katrā ir apskatītas jaunās iekārtas priekšrocības un jaunievedumi salīdzinājumā ar iepriekšējām versijām. Darba beigu daļā sniegti mērījumu un testu rezultāti ar izstrādātām ierīcēm.

Promocijas darba rezultāti publicēti 16 zinātniskos rakstos (no tiem 13 citēti *SCOPUS* un 1 *IndexCopernicus*TM datubāzē) un 2 patentos. Darba rezultāti ziņoti 18 starptautiskās konferencēs.

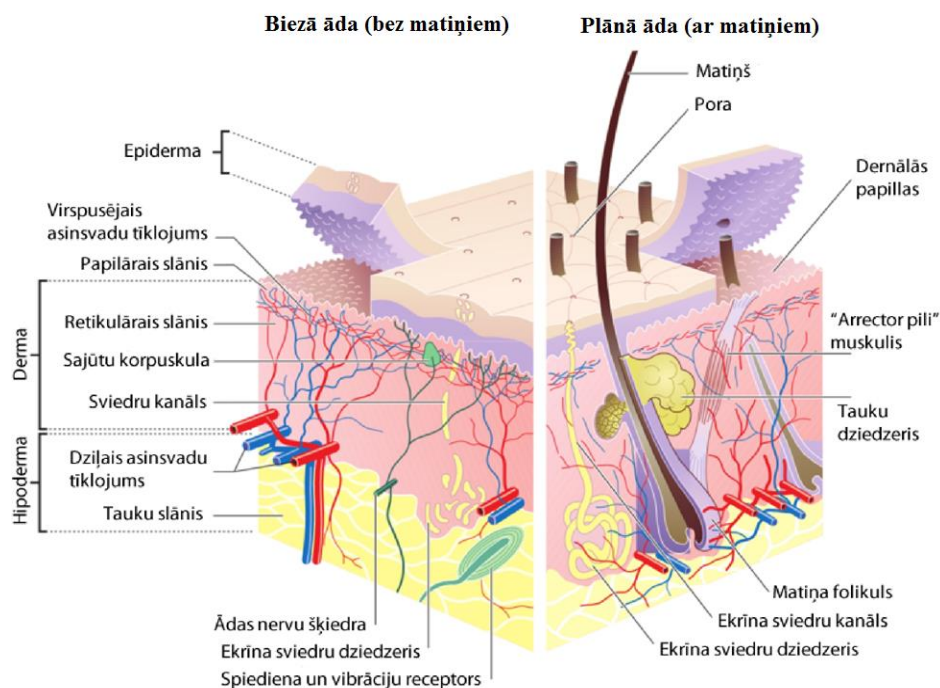
2. PĀRSKATA DAĻA

2.1. Ādas uzbūve un asinsvadu izvietojums ādas slāņos

Āda ir ķermeņa ārējā audu sega, kas pārklāj visu ķermeņa virsmu, un tās kopējais laukums pieaugušam cilvēkam ir $\sim 2 \text{ m}^2$. Ādu dažkārt arī sauc par segaudu orgānu sistēmu. Āda darbojas kā aizsargslānis, kas aizsargā un atdala iekšējos audus un orgānus no ārējās vides kaitīgiem faktoriem. Tajā atrodas matu saknes, sviedru un tauku dziedzeri (1.att.). Vesela āda nelaiž cauri mikroorganismus, tai piemīt arī baktericīdas īpašības. Āda piedalās vitamīnu uzņemšanā, ūdens un sāļu apmaiņā, kā arī nodrošina ķermeņa temperatūras regulāciju. Diennakts laikā caur ādu izdalās 1% no visa organisma ūdens daudzuma. Ādā var atrasties līdz pat 20% no ķermeņa kopējā asins daudzuma. Ādā atrodas daudzi temperatūras un sāpju jušanas nervgali [1].

Āda ir vislielākais cilvēka orgāns, tās biezums vidēji ir 1-2 mm, bet ādas kopējā masa (bez zemādas) ir aptuveni 6% no ķermeņa masa, bet kopā ar zemādu – 16%.

Mikroskopiski cilvēka āda sastāv no trijiem slāņiem – epidermas jeb virsādas, dermas jeb īstās ādas un hipodermas jeb zemādas [2]. Detalizēts ādas sastāvs un struktūra attēlota 1. attēlā.



1. att. Ādas uzbūve, un to veidojošie slāņi [3].

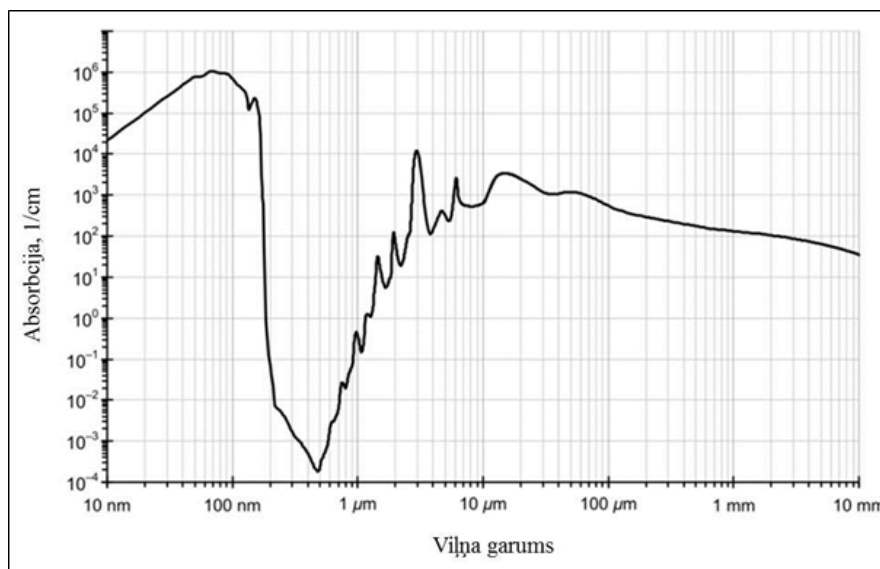
Viršāda jeb epiderma sastāv no vairākām epitēlija šūnu kārtām – virspusē esošās šūnas ir nedzīvas, pārragojušās - tās pakāpeniski lobās nost. Raga slānis ir elastīgs, slikti vada siltumu. Tā biezums 8 – 15 μm . Zem nedzīvajām šūnām atrodas dzīvās šūnas, kas nepārtraukti vairojas, pakāpeniski uzkrāj ragvielu un atmirst. Epidermas biezums variē no 0,03 – 1,5 mm atkarībā no anatomiskās vietas – plānāka āda ir uz acu plakstiņiem, bet biezāka – uz plaukstām un pēdām. Īstā āda jeb derma sastāv no daudzām dzīvu šūnu kārtām. Dermas biezums ir 0,5 – 2 mm. Tajā ir izvietojusies brīvie nervgali, tie uztver sāpes, spiedienu, aukstumu un siltumu. Dermas slāņa saistaudos, atrodas daudz asins kapilāri un sviedru dziedzeri. Dermas slāni, kas sastāv no blīviem saistaudiem sauc par tīklaino slāni. Tajā atrodas kolagēna šķiedru kūlīši, tie ir izvietoti divos virzienos – paralēli ādas virsmai un slīpi, šādi veidojot tīklojumu. Vietās, kur mēdz būt liels spiediens, piemēram, plaukstas un pēdas, kolagēna šķiedru veidotajā tīklā brīvie laukumi ir plaši. Šajā slānī atrodas matu

saknes, sviedru un tauku dziedzeri.

Zemādu veido tauku šūnas. Tā darbojas kā termoizolators un uztur tauku rezerves organismā. Ādā atrodas ļoti daudzas atsevišķas struktūrvienības – asinsvadi, nervi, sviedru dziedzeri, tauku dziedzeri, matu saknes. Šo kārtu un struktūru cieša saistība nodrošina visu funkciju izpildi un vienotu reakciju uz ārējās vides iedarbību, kā arī iekšējās vides pārmaiņām. Ādas aizsargfunkciju nodrošina, galvenokārt, virsādas raga slānis. Āda piedalās visu ķermeņa funkciju norisēs.

Zemādas saistaudu slānis ir pats dziļākais ādas slānis un ar dermas slāni tam krasu robežu nav, to caurauž blīvi saistaudu šķiedru kūlīši. Lielāko daļu zemādas audu veido zemādas tauku kārtā, kas darbojas kā siltumizolācijas slānis un kā rezerves barības vielu krātuve. Zemādā atrodas artērijas un vēnas, kas nodrošina asinsapgādi ādas augšējiem slāņiem.

Āda ir optiski nehomogēna vide. To veido dažādu veidu šūnas, molekulas, šķiedras, kuras visas izvietotas neregulāri. Šajās struktūrās gaisma tiek absorbēta, atstarota un arī izkliedēta. Gaismas izkliedes lielums atkarīgs no izkliedējošo daļiņu izmēriem. Visdziļāk optiskais starojums iespiežas audos tieši terapeitiskā loga diapazonā, kas ir 600 – 1200 nm. (2. att.), tas notiek tāpēc, ka šajā spektrālajā apgabalā ūdens audos vismazāk tiek absorbēts (ūdenim ir vismazākais absorbcijas koeficients). Tieši šajā spektra diapazonā parasti tiek veikti dažāda veida diagnostiskie mērījumi un medicīniskās procedūras, kas iekļauj optiskā starojuma izmantošanu [4].



2. att. Ūdens absorbcijas koeficienta atkarība no viļņa garuma [5].

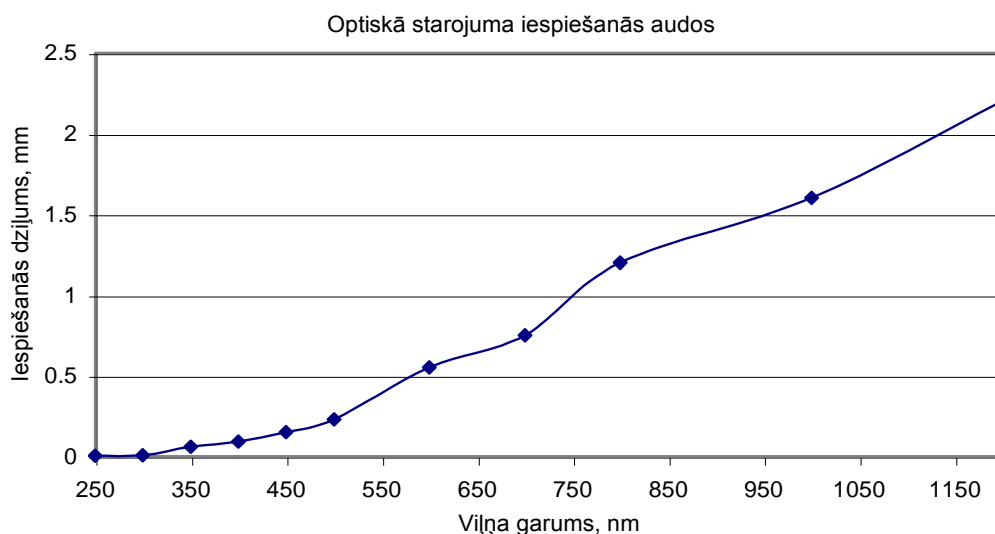
Starojuma fotonus absorbē šūnu sastāvdaļas (ūdens, proteīni) un ārpusšūnu pigmenti. Āda sastāv no vairākām audu kārtām, kur katrai ir savas optiskās īpašības, Raga slānis, kas atrodas pašā ādas virspusē, ļoti labi absorbē ultravioleto starojumu, jo tajā atrodas melanīns. Vielas, kas absorbē optisko starojumu ādā, sauc par hromoforām. Jo vājāka ir hromoforu kopējā absorbcija pie konkrēta viļņa garuma, jo dziļāk optiskais starojums iespiežas ādā un zemādā. Ādas optiskās īpašības nosaka arī ķermeņa vieta, kas tiek apstarota. Jāpiebilst, ka daļa starojuma atstarojas no gaisa robežvirsmas ar ādu [6].

No ādas atstaroto optisko starojumu var iedalīt divās daļās – starojums, kas atstarots tieši no ādas virsmas (virsmas refleksija), un starojums, kas atgriežas uz ādas virsmu gaismas izkliedes dēļ (tilpuma difūzā refleksija jeb remisija).

Vides atšķirīgo refrakcijas koeficientu dēļ gaisma audos tiek izkliedēta. Tā kā šūnu un dažādu bioloģisko objektu izmēri lielākoties ir lielāki par gaismas viļņa garumu, tad notiek “baltā” jeb Mī izkliede, tas ir, gaismas fotonu novirzīšanās no sākotnējā virziena.

Audu absorbciju lielā mērā ietekmē ūdens absorbcijas spektrs, jo audi un šūnas lielākoties sastāv no ūdens. Optiskā starojuma iespiešanās dziļums ir atkarīgs no starojuma viļņa garuma

(3. att.). Par vidējo starojuma iespiešanās dziļumu audos pieņemts uzskatīt dziļumu, kurā starojuma intensitāte ir samazinājusies e reizes.



3. att. Optiskā starojuma vidējie iespiešanās dziļumi ādā pie dažādiem viļņu garumiem [7, 8].

Ādas asins apgādi nodrošina zemādā esošās artērijas, kuru diametrs ir aptuveni 100 μm . Ieejot dziļākajā dermas slānī tās sadalās vienu vai divas reizes, un to zari līdz vidējiem dermas slāņiem izvietojas gareniski vai slīpi attiecībā pret ādas virsmu. Sasniedzot vidējo dermas slāni, notiek nākošā artēriju atzaru dalīšanās. Tā rezultātā vidējo dermas slāni caurvij artērijas ar diametru līdz 50 μm , šāda diametra asinsvadi tiek saukti par arteriolām. Pēc vairākkārtējas dalīšanās, sasniedzot augšējos dermas slāņus, arteriolu izmērs ir samazinājies līdz 15 μm diametrā un tie ir kļuvuši par kapilāriem - asinsvadu sienīņu veido tikai viens endotēlijšūnu slānis [9].

Arteriolu dalīšanās rezultātā veidojas kapilāru tīkls, kuru veidojošie 4 – 10 μm diametra asinsvadi ieņem ādas virsmai perpendikulāru pozīciju. Normālā veselā ādā augšējo asinsvadu slāni parasti veido tikai kapilāri. Katrā augšējā dermālā slāņā kvadrātmilimetrā ir izvietotas aptuveni 60 līdz 70 kapilāru cilpas [10]. Speciāls kapilāru tīkls apņem sviedru dziedzerus, matu sīpoliņus, tauku dziedzerus un jušanas nervu galus. Arteriolu un vēnulu savienotājkānāli atrodas tajā pašā slānī, kur izvietoti ādas sviedru dziedzeri. Vēnulas lielākoties ir izvietotas horizontālākā attiecībā pret ādas virsmu nekā arteriolas. Augšējā un vidējā dermas slānī vēnulu diametrs mainās no 40 - 60 μm , bet dziļākos audu slāņos no 100 – 400 μm .

2.2. Remisijas un absorbcijas fotopletizmogrāfija

Fotopletizmogrāfija ir viena no populārākajām, nesāpīgām, audus nesagraujošām optiskām mērīšanas metodēm, kas dod nekavējošu diagnostisko informāciju. Metode mēra ādas optiskās īpašības, izmantojot sarkano vai infrasarkano starojuma diapazonu. Asinīm un ādai šajā diapazonā raksturīga neliela absorbcijas spēja. Parasti sensora izstarotā sarkanā vai infrasarkanā starojuma iespiešanās dziļums ādā ir pietiekošs, lai fiksētu mikroskopiskas asins absorbcijas izmaiņas ādas dermālajā slānī. Fotopletizmogrāfija nodrošina kvalitatīvu asins apjoma pieauguma mērīšanu, tā var tikt izmantota fizioloģiskos mērījumos un lieliski papildina ultraskaņas, EKG un citas metodes.

Fotopletizmografijas signāli satur fizioloģiska rakstura informāciju - pēc laika intervāliem starp PPG signālu maksimumiem nosaka sirdsdarbības ātrumu jeb pulsu, bet signāla formas parametri raksturo katra indivīda asinsrites īpatnības.

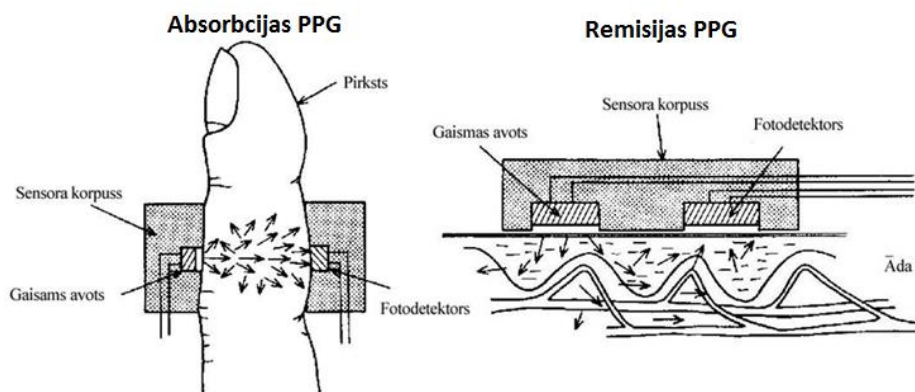
Izdala divu veidu fotopletizmogrāfus – absorbcijas un remisijas (4. att.).

Remisijas PPG – starojošā diode PPG sensorā izvietota blakus fotodetektoram, tas nozīmē, ka gan fotodetektors, gan starojošā diode atrodas sensora vienā pusē, un sensors reģistrē no audiem izkliedēto un uzmodulēto signālu.

Absorbcijas PPG – starojošā diode novietota vienā PPG sensora pusē, bet fotodetektors otrā pusē. Šādā gadījumā signāls labāk tiek uzmodulēts, bet ir nedaudz vājākas intensitātes.

Ar remisijas metodi, iegūtais signāls, galvenokārt, atspoguļo ādas augšējos slāņos esošo asinsvadu un kapilāru asins cirkulācijas. Bet absorbcijas gadījumā, liela nozīme ir visai, starp starojošo diodi un fotodetektoru, esošai audu tilpuma mikrocirkulācijai. Remisijas fotopletizmogrāfijā svarīga ir audu gaismas izkliedes spēja. Tas ir parametrs, ko veido ādas virsmas reljefs. No ādas atstarotā gaisma sastāv no divām komponentēm: viena rodas, gaismai tieši atstarojoties no ādas virsmas, bet otra ir no audu tilpuma atstarotais starojums.

Fotopletizmogrāfisko mērījumu rezultāti parāda visa audu tilpuma asins izmaiņas. Izmantojot infrasarkano starojumu nav iespējams izšķirt, piemēram, kapilāru asins plūsmu no dziļāk esošo asinsvadu asins plūsmas.



4. att. Absorbcijas un remisijas fotopletizmogrāfijas pamatprincipi [11].

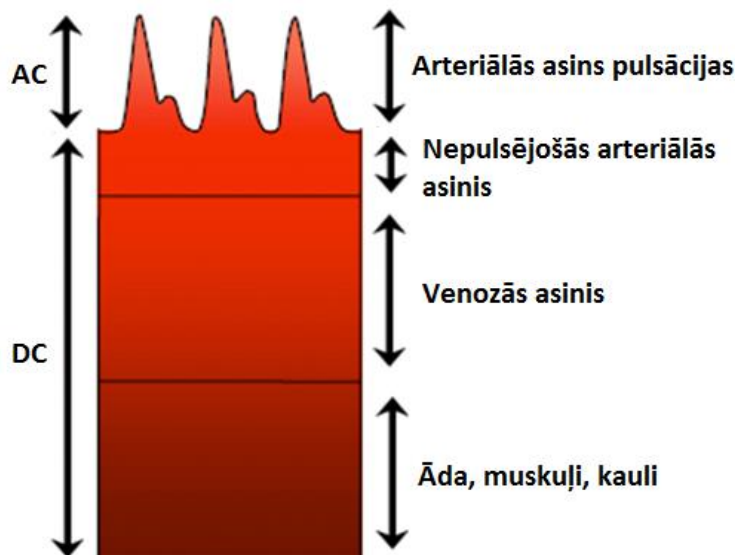
Mūsdienās fotopletizmogrāfiskiem mērījumiem ir izstrādāti daudz un dažādi sensoru veidi. Vienkāršākie sastāv no gaismas diodes, kura izstaro starojumu, kas labi iespiežas dzīvajos audos, un fotodiodes, kas uztver no audiem atstaroto vai caurizgājušo starojumu un pārveido to mainīgā elektriskā signālā. Sarežģītākie sensori sastāv no vairākām gaismas diodēm un foto diodēm, kas apvienotas un iebūvētas vienā korpusā.

Attālums starp gaismas avotu un detektoru ir parametrs, kas ietekmē signāla maiņkomponentes amplitūdu. Jo lielāks attālums ir starp uztverošo un raidošo sensora elementu, jo veiksmīgāk izdodas uztvert signālu no dziļākesošiem asinsvadiem. Savukārt iegūtais signāls ir vājākas intensitātes, bet var būt informatīvāks. Tas nozīmē, ka ir jāstaro ar

lielāku jaudu, vai jābūt jutīgai fotodiodei, vai pastiprinātājam ar lielu pastiprinājuma koeficientu. Bieži vien tiek atrasts optimāls, sabalansēts vidusstāvoklis.

PPG signāls sastāv no divām atšķirīgām komponentēm (5.att.):

- lēni mainīga līdzkomponente (DC) – atspoguļo ādas mikrocirkulācijas kopējā asins tilpuma izmaiņas,
- ātra maiņkomponente (AC) – tā sastāv no vairākām mainīgām svārstībām, kuras radušās dažādu fizioloģisko procesu rezultātā.



5.att. Fotopletizmogrāfiskā signāla komponentes [12, 13].

Līdzkomponente sastāda lielāko daļu no PPG signāla, tā parāda kopējo asins apjomu audos un ir atkarīga no ādas, asinsvadu, un kaulu absorbcijas. Maiņkomponentes lielums sastāda 0,5 - 2 % no līdzkomponentes. Katra no šīm komponentēm ir svarīga un izmantojama, tomēr maiņkomponente sniedz vairāk informācijas. PPG ātrās maiņkomponentes signāls satur arī komponenti, kas atkarīga no elpošanas. Tādēļ var teikt, ka elpošana piedalās asins plūsmas modulēšanā. PPG signāla amplitūda ir tieši proporcionāla šajā apgabalā cirkulējošo sarkano asins ķermenīšu tilpumam un tiek mērīta relatīvās vienībās. No audiem atpakaļ atstarotās gaismas intensitāte ir atkarīga no asinsvados esošās asins daudzuma izmaiņām.

Līdzkomponente ir atkarīga no kopējā asins daudzuma ādā un tās optiskajām īpašībām mērījuma vietā. Tā mainās lēni un ir atkarīga no ādas temperatūras, atstarošanas koeficienta u.c. parametriem. Maiņkomponente ir pulsējoša ar frekvenci, kas ir vienāda ar sirds darbības ritmu. Līdzkomponente ir atkarīga no kopējā audu asins tilpuma. Fotopletizmogrāfiskā sensora reģistrētās gaismas intensitātes izmaiņas atspoguļo asins tilpuma izmaiņas katrā sirds darbības ciklā un asins plūsmas ātrumu.

2.3. Biosignālu bezvadu pārraides veidi

Šajā nodaļā ir apskatīti un salīdzināti populārākie maza darbības rādiusa bezvadu raidītāju veidi. Izvērtētas priekšrocības, trūkumi un piemērotība cilvēka fizioloģisko parametru pārraidei un iestrādāšanā miniaturā portatīvā ierīcē. Bezvadu pārraidei tiek pievērsta diezgan liela nozīme ierīces korektas darbības nodrošināšanai un vēlamu rezultātu sasniegšanai, tāpēc ir svarīgi orientēties raidītāju – uztvērēju piedāvājuma klāstā.

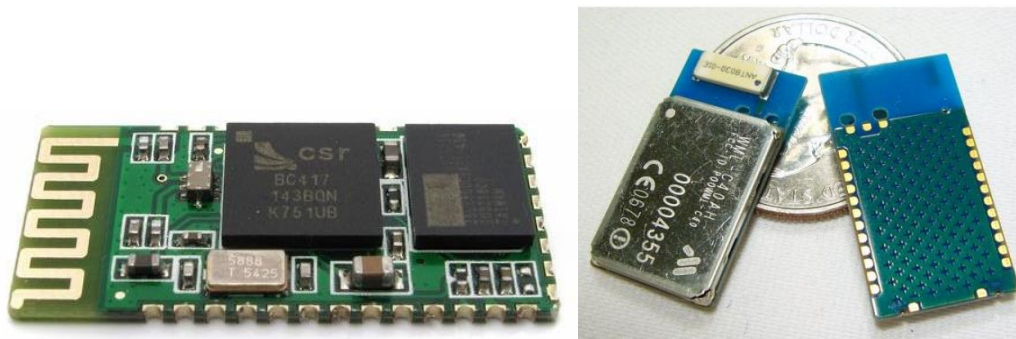
Bluetooth

Dibināts 1998. gada februārī, Bluetooth ir standarts, ko izstrādāja inženieri no tādām lielām kompānijām, kā Ericsson, Intel, Toshiba, Nokia un IBM, kas ļauj savienot dažāda veida elektroniskās ierīces bez vadiem. Šodien Bluetooth standartu ir apstiprinājušas un lieto vairāk nekā 2100 firmas visā pasaulē [14].

Bluetooth ir lēts, mazjaudīgs, drošs un izdevīgs standarts priekš mazas darbības rādiusa komunikācijām [15]. Tehnoloģija tika izstrādāta, lai varētu lietot vienlaicīgi gan balsi, gan datu pārraidi. Bluetooth darbības rādiuss ir 10 metri, ko var palielināt līdz pat 100 metriem, ja izmanto pastiprinātāju.

Jebkura Bluetooth sistēma sastāv no četrām galvenām daļām:

- Augstfrekvences radio, kas uztver un pārraida datus un balsi;
- Baseband (*jebkāds šī vārda tulkojums noved pie nesaprašanas par ko vispār ir runa aut. piez.*), kas apstrādā nosūtītos un saņemtos datus;
- Savienojuma apstrādes programma – kontrolē saņemto un nosūtīto pakešu izmēru un veic laika sinhronizāciju. Atbild par savienojumu uzstādīšanu starp Bluetooth iekārtām, kas iekļauj arī drošības pārbaudi un savienojumu kriptēšanu.
- Lietojumprogrammatūra, kas nosaka ierīces galveno funkcionalitāti paredzētajam mērķim, piemēram, bezvadu pele vai brīvroku sistēma.



6. att. Bluetooth moduļu izskats.

Bluetooth darbojas 2,45GHz frekvenču diapazonā, kā izmantošanai nav vajadzīga darbības licence, šo frekvenci izmanto arī daudzas citas iekārtas un sistēmas, piemēram, arī mikroviļņu krāsnis. Lai izvairītos no frekvenču pārklāšanās, Bluetooth specifikācija paredz FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) tehnikas izmantošanu. FHSS modulācija ir pārraides process, kur dati vai balss ziņojumi, tiek pārsūtīti pa radio frekvenču kanāliem, kas regulāri mainās, atbilstoši iepriekš noteiktam kodam. Uztvērējam ir jāsaņem dati tieši tajā pašā kanālā, kurā tie tiek noraidīti, izmantojot to pašu frekvenču maiņas secību. Šāda radio kanālu maiņa pirmo reizi tika izmantota militārajā sakaru elektronikā, kas ilgu laiku bija slepena. Vienā kanālā radio sakari notiek tikai ļoti īsu laiku, tad atbilstoši raidītājs un uztvērējs pārskaņojas uz citu kanālu. Tādā veidā tiek realizēti droši sakari, tos ir grūti pārtvert vai noklausīties, jo nav zināmi kanāli, kuros notiek pārraide.

Datu pārraides maksimālais ātrums ir 1Mb/s, bet izmantotais protokols to mazliet ierobežo samazinot līdz 721Kb/s. Ar protokola ierobežošanu saprot – lietotājam neredzamu datu pārsūtīšanu, piemēram, tas var būt pakešu garuma un skaita identifikators, pakešu

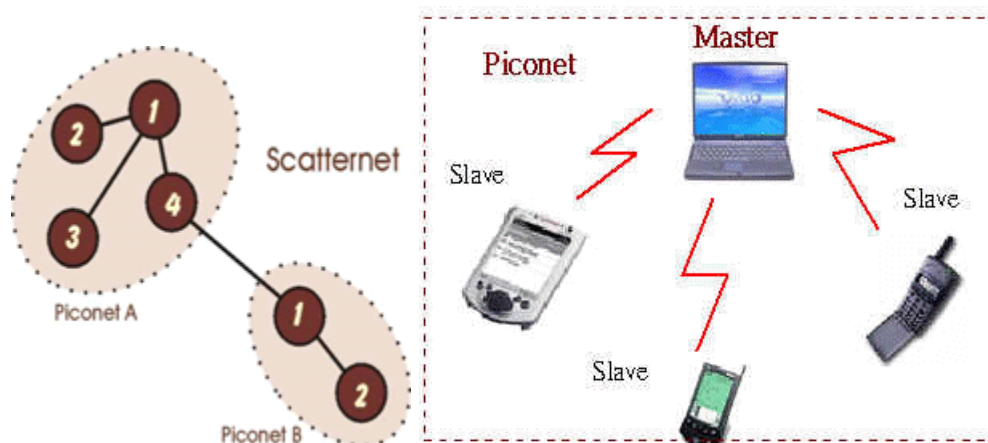
kontrolsummas, kodēšanas informācija, izmantotais kanāls u.c. informācija, kas nepieciešama Bluetooth datu protokola nodrošināšanai [16]. Signālu pārklāšanās vai iziešana no darbības zonas (signāla pavājināšanās), var ievērojami sazināt datu pārraides ātrumu.

Baseband ir aparatūra, kas pārveido uztvertos radiosignālus ciparu formātā, tā lai tos varētu apstrādāt galvenā programmatūra. Tā arī pārveido ciparu vai balss signālu, lai tos varētu pārraidīt pa radioviļņiem. Baseband procesors nodrošina datu konvertēšanu no analogā uz ciparu un otrādi, to kompresēšanu, salikšanu paketēs, izņemšanu no paketēm, identifikatoru piešķiršanu, kļūdu labošanu, tas viss tiek veikts gan sūtāmajiem, gan saņemtajiem datiem. Baseband procesorā ir iestrādāta speciāla „savienojumu apstrādes programmatūra”. Tā nodrošina komunikāciju starp Bluetooth iekārtām. Katrai Bluetooth iekārtai ir šāda savienojumu apstrādes programma, kas „atrod” otru attālināto programmu citā Bluetooth modulī un komunicē ar to, lai sāktu savienojuma uzstādīšanu, pārbauda kādas funkcijas nodrošina (atbalsta), otra puse un vai tās ir savienojamas.

Lietojumprogrammatūra ir iestrādāta iekārtā un nodrošina Bluetooth darbības protokolu. Tā ir vienu līmeni augstāk par savienojumu apstrādes programmu. Bluetooth protokola programma nodrošina pilnīgi patstāvīgu Bluetooth darbību, kas ļauj, piemēram, plaukstdatoram, mobilajam tālrunim vai klaviatūrai darīt savu darbu neiejaucoties Bluetooth komunikācijas nodrošināšanā. Visām Bluetooth iekārtām ir jābūt savietojamai lietojumprogrammai, lai tās varētu viena ar otru komunicēt.

Jebkuras divas Bluetooth ierīces, kas nonākušas viena otras darbības rādiusā var tik savienotas, izveidojot pīkotīklu (piconet). Tas var arī sastāvēt no 8 Bluetooth ierīcēm. Pīkotīklā vienmēr viena ir galvenā ierīce, bet visas pārējās vadāmās ierīces (slave). Iekārta, kas nodibina savienojumu, kļūst par galveno ierīci. Galvenā ierīce var tik nomainīta pret citu, bet tīklā vienlaicīgi galvenā ierīce var būt tikai viena.

Vienā laukā var atrasties vairāki pīkotīkli, šādu savienojumu sauc par scatternet (att. 7). Šajā tīklā visas Bluetooth iekārtas komunikācijai izmanto vienādu frekvenču diapazonu (2,4 – 2,4835 GHz), bet katrs pīkotīkls izmanto dažādu frekvenču pārslēgšanās secību un raida dažādos 1 MHz platuma nobīdes kanālos.



7. att. Bluetooth pīkotīklu un scatternet ilustrācija.

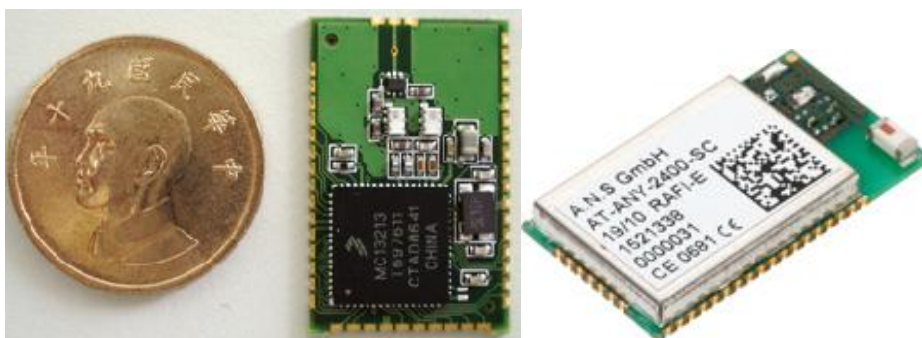
Bluetooth ietekme uz veselību. Bluetooth izmanto mikroviļņu radiofrekvenču spektru no 2,402 GHz līdz 2,480 GHz diapazonā. Maksimālā raidīšanas jauda ir 100mW (1 klases Bluetooth), kas nodrošina darbības rādiusu ~100 metrus. 2,5mW (2 klases Bluetooth), darbības rādiuss ~10 metri. Salīdzinājumam ikdienā lietoto mobilo tālrunu raidītāja izstarotā jauda ir GSM1800/1900 tīklā ir 1000mW un GSM850/900 ir 2000mW.

ZigBee

ZigBee tika izstrādāts kā mazjaudīgs, lēts, maza pārraides ātruma raidītāja risinājums [17]. ZigBee ir izstrādāts tā, lai varētu darboties no sešiem mēnešiem līdz pat diviem gadiem no divām AA tipa baterijām [18]. Tik mazs enerģijas patēriņš ir iespējams izmantojot „gulēšanas” režīmu starp radiopārraidēm. Turpretī Bluetooth visu laiku atrodas darba režīmā, tāpēc tam ir īsāks reakcijas laiks, bet no baterijām var darboties tikai dažas dienas. ZigBee tika izstrādāts, kā mazjaudīga alternatīva Bluetooth un nodrošina 30mW izejas jaudu salīdzinot ar Bluetooth 100mW [19]. ZigBee darbības rādiuss ir 10 – 20 metriem.

ZigBee datu pārraides ātrums ir ierobežots līdz 250 Kb/s, bet var būt arī zemāks, kas izskaidrojams ar biežāku „gulēšanu” starp pārraidēm. Īss „pamošanās” un „gulēšanas” laiks ir lielākā ZigBee uzvara pār Bluetooth. ZigBee ierīces var „pamosties” un saņemt savienojuma datu paketes aptuveni 15 milisekundēs, bet Bluetooth to pašu paveic apmēram 3 sekundēs.

ZigBee ļauj veidot un uzturēt komunikāciju vairākos tīklu veidos režģtīkla (Mesh) un zvaigznes (Star), kur sakari var tikt uzturēti ar 65000 vadāmām ierīcēm (slave), kamēr Bluetooth spēj komunicēt vien ar 8 ierīcēm. ZigBee atbalsta daudz savienojumu standartus, tajā skaitā arī veselības aprūpes profilu (servisu).



8. att. ZigBee moduļa izskats.

ZigBee veselības aprūpe ir globāls standarts, kas ļauj savienot vairākus līdzīgus moduļus nekritisku, zemas prioritātes veselības aprūpes pakalpojumiem. Mērķauditorija ir pacienti ar hroniskām slimībām, vispārējā veselības stāvokļa novērtēšanā, un fitnesā [20].

ZigBee parasti nav iebūvēts datoros, mobilos tālruņos līdz ar to izstrādājot, ierīci, kas izmanto minēto datu pārraides veidu ir jāreķinās, ka otrā galā būs vajadzīgs arī uztvērējs. Tāpēc šajā darbā Bluetooth tika izvēlēta kā plašai lietotāju auditorijai piemērotākā bezvadu tehnoloģija.

2.4. Programmējamie raidītāja-uztvērēja moduļi

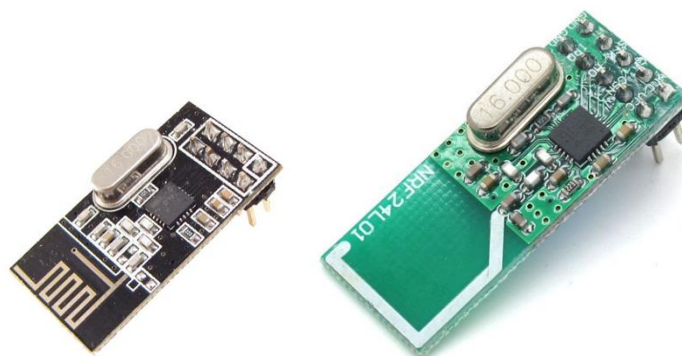
Apskatīti divi populārākie.

NRF. Nordic nRF24L01+ ir īpaši mazas jaudas radiofrekvenču raidītāja-uztvērēja mikroshēma, kas nodrošina datu pārraidi ar ātrumu 2Mb/s un darbojas 2,4GHz frekvenču diapazonā [21]. Raidītāja jauda ir ļoti maza ~1mW, attiecīgi patērētā strāva arī ir minimāla <14mA. Izstrādājot gudru vadības programmatūru šī mikroshēma var darboties vairākus mēnešus vai pat gadu no AA tipa baterijām.

Mikroshēmā ir iebūvēts pilnīgs 2,4GHz radiofrekvenču raidītājs un uztvērējs, frekvences sintezators, baseband loģika, kas iekļauj automātisku datu pakešu kontroli un vadību. Mikroshēma ir samērā vienkārši izmantojama (*priekš elektronikas inženieriem aut. piez.*), jo nav vajadzīgas papildus shēmas (filtri, varikapī u.c. komponentes) vai īpaša kalibrēšana. Jāpievieno tikai kvarca kristāls, salāgošanas shēma un antena.

Viena no tehniskām atšķirībām, salīdzinājumā ar Bluetooth un ZigBee ir tāda ka nRF24L01+ ir tikai viena maza izmēra (4 x 4 mm) mikroshēma, bet abi augšminētie visbiežāk ir kompleksi moduļi. Mikroshēmas izmantošanas gadījumā inženieris pats var izvēlēties, kā savā prototipa shēmā izvietot komponentes (cik plaši vai cieši), protams, ir jāievēro ražotāja rekomendācijas un mazliet jāorientējas augstfrekvenču shēmu projektēšanā. Turpretī Bluetooth un ZigBee izvēles gadījumā ir jāpiemēro prototipa shēmplāksne tā lai uz tās vēl varētu uzmontēt lielāku vai mazāku moduli (atkarībā no ražotāja).

nRF24L01+ mikroshēma pasaulē ir ļoti populāra tāpēc daži ražotāji, lai atvieglotu darbu citiem produktu izstrādātājiem un samazinātu izstrādes laiku ir izveidojuši nRF24L01+ moduļus (9. att.).



9. att. nRF24L01+ mikroshēmas datu pārraides moduļi.

Šādu moduļu cena bieži vien ir pat lētāka par nRF24L01+ mikroshēmas mazumtirdzniecības cenu. Modulis sastāv no visām mikroshēmas pilnīgai darbībai nepieciešamām komponentēm un arī antenas. Šāda moduļa priekšrocība ir prototipa ierīces izstrādes sākumstadijā un režīmu testēšanā. Piemēram, lai izmēģinātu cik liels ir datu plūsmas ātrums realitātē, kāds ir raidīšanas attālums, patērētā strāva un programmēšanas un vadības īpatnības.

Šīs mikroshēmas izvēles priekšrocības varētu būt zemā cena ~\$2, shēmas izstrādes elastība, mazs enerģijas patēriņš un pilnīga kontrole pār visiem režīmiem.

Izvēloties izmantot šo mikroshēmu savā projektā, piemēram, iebūvēt elektrokardiogrāfā datu pārsūtīšanai uz datoru, ir jāreķinās ar to ka nāksies arī būvēt uztvērēju. Respektīvi, otrā galā ir vajadzīgs otra tieši tāda pat mikroshēma vai modulis, kas uztvers pirmās raidītos signālus. Tas mazliet sarežģī un sadārdzina gala produktu, kā arī jāapmāca lietotājs. Pie tam šis otrs modulis (uztvērējs) vienmēr jānēsā līdzi, ja lietotājs gribēs pārsūtīt un saglabāt mērījumu datus datorā.

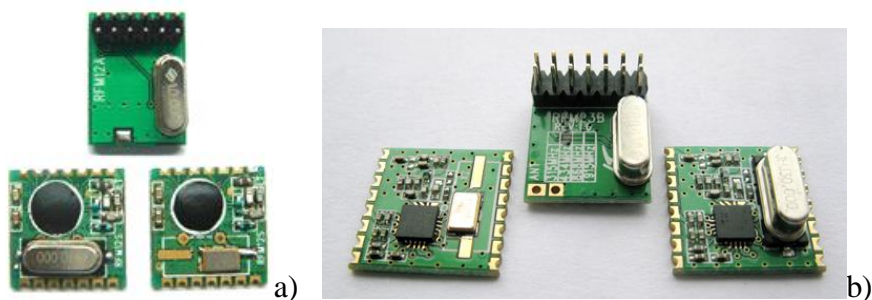
Protams neviens no šeit apskatītajiem dažādiem moduļiem un shēmām nekādā veidā nav savstarpēji savienojami un komunikācija starp tiem nav iespējama. nRF24L01+ nevar

komunicēt ar Bluetooth, NRF nevar komunicēt ar ZigBee. Šīs visas ir pilnīgi dažādas shēmas un protokoli viens otru nesaprot kaut gan izmanto vienu un to pašu komunikācijas frekvenci. Komunikācija ir iespējama tikai starp vienādiem moduļiem vai shēmām.

RFM. Hope RF ir viena no populārām firmām dažāda līmeņa elektronikas inženieru vidū, kas izstrādā un ražo radiofrekvenču moduļus. Piedāvājuma klāsts ir gana plašs no pašiem vienkāršākajiem un mazākajiem (izmēru ziņā), gan arī sarežģītāki moduļi ar 500mW izejas jaudu [22]. Ar visiem piedāvātajiem moduļiem, katrs var iepazīties ražotāja mājas lapā internetā, bet šajā apskatā piedāvāju apskatīt vienu populārāko un pieejamāko raidītāj-uztvērēju RFM12B.

RFM12B ir cieši integrēts, lēts, 433/868/915MHZ bezvadu ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) raidītāj-uztvērēj modulis [23]. Uztvērēja jutība tiek datēta -120dB un raidītāja jauda var sasniegt +30dBm, kas ir ļoti labi rādītāji un var nodrošināt palielinātu pārraides lauku. Modulī ir iestrādāti dažādi režīmi, kas ļauj komunikācijai ar šo moduli izmantot pašus vienkāršākos mikrokontrolierus. Piemēram, automātiskais taimera pamošanās režīms, baterijas izlādes indikators, 64 baitu sūtīšanas/ saņemšanas buferis, automātiskā pārraides pakešu apstrāde, saņemto pakešu detektēšana, šie visi papildus režīmi arī samazina kopējo ierīces enerģijas patēriņu. Iebūvētais temperatūras sensors, brīvi izmantojams ACP (Analogais Ciparu Pārveidotājs) bloks un papildus izvadi ļauj vēl samazināt kopējās iekārtas izmaksas un izmērus.

RFM12B modulī izmantota digitālā uztvērēja arhitektūra un augstas veiktspējas ACP un DSP (Digital Signal Processing) bloki, kas veic augstfrekvences signālu demodulēšanu, filtrēšanu un pakešu apstrādāšanu. Raidītāja digitālā modulācijas kontrole, automātiskā pastiprinājuma regulēšana nodrošina precīzu signāla starojumu, samazina nevēlamās harmoniskās svārstības blakus diapazonā tādējādi ievērojot pasaulē vispārpieņemtos standartus FCC un ETSI. Ražotājs nodrošina pieeju vienkārši lietojamam kalkulatoram, kas dod iespēju iekārtas izstrādātājam ātri konfigurēt radio raidītāja uzstādījumus, vienkāršojot pasūtītāja ierīces izstrādi un samazinot izstrādes laiku.



10. att. RFM12B (a) RFM22B (b) raidītāj-uztvērēj moduļu izskats.

Moduļi ir diezgan vienkārši programmējami un vadāmi ar mikrokontroliera palīdzību, izmantojot SPI (*Serial Peripheral Interface*) datu apmaiņas protokolu. Ražotāja mājas lapā pat ir pieejams bezmaksas programmatūras kods, kas ir konfigurēts darbam ar atbilstošo moduli, tādējādi, palīdzot izstrādātājiem ātrāk pabeigt iekārtas izstrādi.

Praksē no šo moduļu lietošanas ierobežojošie faktori varētu būt moduļa izmērs un neliels datu pārraides ātrums. RFM12B izmērs ir 15,9 x 16,1 mm, bet jaudīgākam RFM23B izmērs ir 18 x 33 mm. Abos gadījumos tas uz elektronikas plates aizņem diezgan daudz vietas un zem šī moduļa atbilstošs plates laukums netiek izmantots. Otra lieta ir mazs datu pārraides ātrums. Visos moduļos tas ir konfigurējams no 2,4Kb/s līdz 256Kb/s. Vairumā gadījumu, ja nav jāpārsūta lieli datu apjomi, šāds ātrums ir pieņemams, bet ja ir vajadzība straumēt datus no kādas mērījumu iekārtas ar vairākiem kanāliem, tad pat 256kb/s ir daudz par maz. Salīdzinot Bluetooth un piemēram NRF (kas apskatīti augstāk), tiem attiecīgi ir 721kb/s un

2Mb/s. Jāpiemin, ka palielinot datu plūsmas ātrumu samazinās uztvērēja jutība. RFM12B uztvērēja jutību ražotājs norāda -109dB @1,2Kb/s, kas ir diezgan laba jutība, bet pie ļoti lēna datu pārraides ātruma. Tāds var būt piemērots izmantošanā, kādās bezvadu rotaļlietās bērniem vai garāžas vārtu pults raidītājā. Attiecīgi jutība ļoti strauji samazinās, palielinoties datu pārraides ātrumam. Līdz ar to, lai pārraidītu lielākā attālumā datus raidītāja jauda ir jāpalielina, kas nozīmē enerģijas patēriņa palielināšanos. Šie ir būtiskākie iemesli, kāpēc ne vienmēr ir iespējams izmantot šo moduļus.

Izvēloties kādu no Hope RF raidītāja-uztvērēja moduļiem joprojām paliek aktuāla problēma ar sūtīto datu uztveršanu (tā pat kā nRF izvēles gadījumā). Tas nozīmē, lai datus varētu uztvertu un saglabāt datorā ir vajadzīgs otrs tāds pats modulis, elektronikas plate, mikrokontrolieris un USB vai RS232 atbalstoša mikroshēma.

RFM12B moduļa cena ir aptuveni \$7 par vienu gabalu.

2.5. Reālā laikā strādājošas fotopletizmogrāfijas sistēmas

Firma Nonin ir izstrādājusi un medicīniski pārbaudījusi uz PPG bāzētu pulsoksimetra ierīci ar PureSAT® tehnoloģiju (11. att.). PureSAT® - ir Nonin izstrādāta pulsoksimetra mērījuma tehnoloģija, kas izmanto katra pulsa filtrēšanu, lai iegūti precīzus oksimetra mērījumu datus pat pie kustībām un vājas asinsapgādes. Nolasot visu pletizmogrāfijas signāla līkni PureSAT® signāla apstrādes algoritms veic priekšfiltrēšanu kā rezultātā tiek noņemti nevajadzīgie signāli, tad īpašs programmas algoritms atdala pulsa signālu no artefaktiem un traucējumiem atstājot tīru pulsa formu.

WristOx2™ 3150 modelis uzrāda augstu mērījumu precizitāti lielākai pacientu daļai [24]. Ideāli lietojams gan slimnīcā, gan mājās WristOx2™ var tikt izmantos diennakts sirdsdarbības novērojumos, attālinātos bezvadu sirdsdarbības novērošanā. Modernais uz rokas valkājama pulsa oksimetrs uzlabota veiktspēja un Bluetooth savienojuma nodrošinājums, kā arī palielināta iebūvētā atmiņa.



11. att. Firmas Nonin PPG pulsoksimetrs ar iebūvētu Bluetooth moduli un atmiņu.

Bluetooth 2.0 bezvadu tehnoloģija nodrošina bezvadu savienojumu un tikai svarīgas informācijas apmaiņu. Ierīci vienkārši var savienot ar mobilo tālruni, plaukstdatoru, stacionāro datoru. Pulsoksimetrā lietotājs var mainīt mērījumu saglabāšanas ātrumu, piemēram, ar izšķiršanas spēju 1 sekunde tas var darboties 270 stundas, bet izvēloties 4 sekunžu intervālu – 1080 stundas. Visi mērījumu dati tiek saglabāti energoneatkarīgā pastāvīgā atmiņā, lai tos vēlāk varētu pārsūtīt uz datoru veikt analīzi un sniegt slēdzienu par rezultātiem.

Iebūvēts I klases Bluetooth, kas nodrošina darbības rādus līdz 100 metriem. Izstrādāta speciāla enerģijas taupīšanas shēma, atšķirībā no parastām Bluetooth ierīcēm WristOx2™ var automātiski regulēt raidītāja jaudu, atkarībā no attāluma līdz otrai ierīcei.

Pulsoksimetrs automātiski ieslēdzas, kad tajā tiek ievietots pirksts. Izstrādāts stabils korpuss, kas paredzēts lietošanai ikdienā. Ierīce darbojas tikai ar speciāliem PureLight® sensoriem. To precizitāte ir klīniski pārbaudīta.

Pašam personīgi šāda ierīce nebija pieejama, tāpēc nav iespēju to notestēt darbībā un pārbaudīt specifiskācijas parametrus.

Firma Contec Medical Systems piedāvā pulsoksimetru CMS50E (12. att.) [25]. Oksimetrs ir izmantojams PPG mērījumu iegūšanai tikai no rokas pirkstiem. Tas ir divdaļīgs, pašizverošs ar iebūvētu atsperi. Oksimetrs var tikt izmantots pulsa frekvences un skābekļa piesātinājuma asinīs mērījumiem. Iekārta ir piemērota lietošanai ģimenē, slimnīcā,

sabiedrības veselības uzraudzībai un pirms/pēc sporta nodarbībām. Fizisku aktivitāšu laikā ražotājs nerekomendē lietot šo ierīci.



12. att. Firmas Contec Medical Systems ražots PPG uzpirkstenis.

Pulsoksimetrs ir samērā vienkārši lietojams, tam ir 1,3 collu liels, grafisks, 65 000 krāsu organisko starojošo diožu displejs ar izšķiršanas spēju 128 x 96 pikseli un tikai viena spiedpoga. Displejā tiek attēlota visa svarīgākā informācija (pulsa frekvence, skābekļa piesātinājums asinīs, baterijas izlādes indikators). Ir iebūvēta skaņas informācija, kas sinhronizēta ar pacienta sirdsdarbību. Ir maināmi displeja uzstādījumi, apgaismojuma intensitāte un orientācija. Fizioloģisko parametru mērījumi tiek saglabāti iebūvētā atmiņā, šie dati var tikt pārsūtīti uz datoru reālā laikā izmantojot mini USB savienojumu. Ierīce automātiski izslēdzās līdz ko ir izņemts pirksts no sensora.

Ražotāja dotā specifikācijā skābekļa piesātinājuma mērījumu diapazons ir 0%~100%, (izšķiršanas spēja 1%). Precizitāte 70%~100% : ±2%, zem 70% nenoteikts. Pulsa frekvences mērījumu diapazons 30 – 250 bpm (izšķiršanas spēja 1bpm). Precizitāte ±2 bpm.

Strāvas patēriņš: zem 100mA, barošanas spriegums – iebūvēta litija jonu akumulators 3,6V – 4,2V. Akumulatora darbības laiks 20 stundas. Uzlādes-izlādes cikli ~500. Oksimetra izmēri: 57 x 32 x 30 mm, svars 50 grammi.

Šis minētais pulsoksimetrs bija pieejams LU ASI laboratorijā, tāpēc varēju to notestēt. Kopumā ierīce darbojās stabili, bet pie trūkumiem varētu pieskaitīt – bezvadu pārraides neesamību un ļoti lēno mērījumu ātrumu (kas pēc aprēķiniem ir 80 – 100 mērījumi sekundē). Ražotāja piedāvātā programmatūra ir ļoti shematiska un tur attēlotie mērījumi ir diezgan grūti apstrādājami. Iekārta pilnībā atbilst paredzētajai mērķauditorijai. Tā nav piemērota, mērījumu analizēšanai, augstas precizitātes mērījumu veikšanai laboratorijās vai zinātnisko atklājumu veikšanai, to nevar arī izmantot kā references ierīci citu mērījumu iekārtu precizitātes salīdzināšanai.

Firma Biocom Technologies piedāvā uz PPG metodes balstītu sirdsdarbības un veselības stāvokļa noteikšanas ierīci - Inner Balance Scan 2.0. Tā ir neliela izmēra iekārta ar vadu savienota ar PPG sensoriekārta, kas pievienojama pie datora USB porta mērījumu datu nosūtīšanai. Programmatūra nosaka sirdsdarbības variabilitātes parametrus, pulsu un uzkrāj datus ilgstošiem mērījumiem [26]. Pie trūkumiem varētu minēt bezvadu pārraides neesamību, sensora savienojošais vads izskatās nepārliciecināšs un tievs.

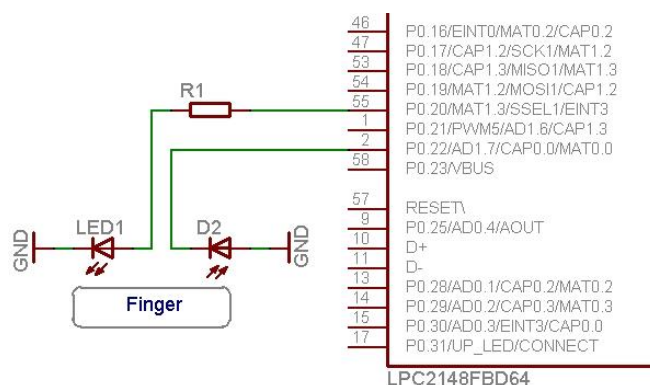
Firma Binar piedāvā plašu PPG sensoru klāstu. Modelis HRS-08WE ir pievienojams pie auss lipiņas un ar iebūvētu Bluetooth raidītāju. Ierīce nosaka pulsa vērtības un nosūta tās uz datoru. Uzrādītais darbības laiks ir 4 stundas no vienas iebūvētā akumulatora uzlādes reizes. Ražotājs norāda, ka iespējams septiņas ierīces savienot tīklā. Mērījumu ātrums ir 300 mēr./sek. [27].

3. PRAKTISKĀ DAĻA

3.1. Izstrādātās metodes PPG biosignālu detektēšanai reālā laikā

3.1.1. Digitālā PPG signāla reģistrācijas metode

Darba gaitā tika piedāvāta un realizēta jauna PPG signālu detektēšanas metode, kuras priekšrocības ir shēmas un darbības principa vienkāršība - nav vajadzīgi sarežģīti un dārgi operacionālie pastiprinātāji, analogi-digitālie konvertori, īpaši filtri, divpolārā barošana, sarežģīta plate. Princips balstās uz gaismas diodes impulsu modulāciju 1 kHz diapazonā un uztverošās fotodiodes izlādes laika digitālu reģistrēšanu katrā impulsā (13. attēls). Shēma, kas realizē metodi, sastāv tikai no divām fotodiodēm, vienas strāvu ierobežojošas pretestības un ātrdarbīga mikrokontroliera [28].

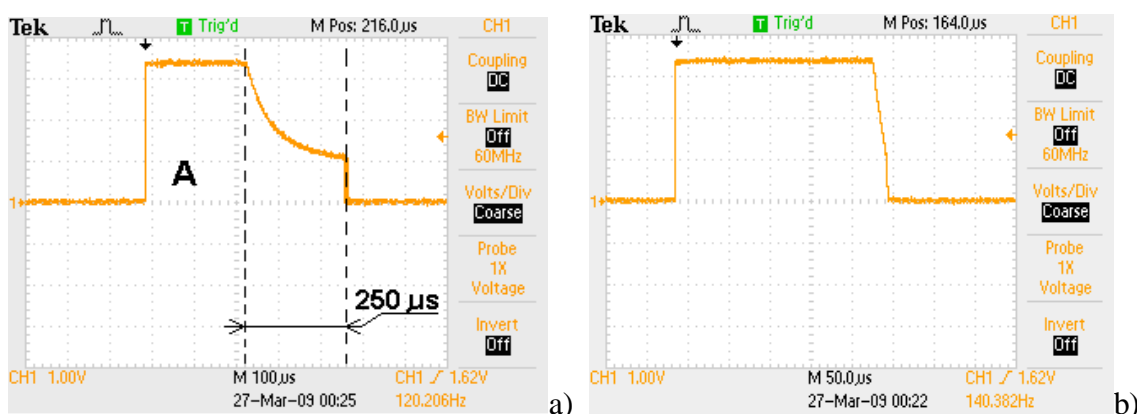


13. att. Fotopletizmogrāfijas signāla detektēšanas shēma.

Shēmas darbības testēšanai tika izmantotas divas Ø5mm infrasarkanā starojuma (940 nm) gaismas diodes. Tās tika pieslēgtas pie mikrokontroliera LPC2148. Tieši šajā laikā sāku apgūt pilnīgi jaunu (priekš manis) mikrokontrolieri ar ARM (*Advanced RISC Machine*, kur RISC - *Reduced Instruction Set Computer*) arhitektūru. Tas ir jaudīgs 32 bitu ARM7 TDMI-S kontrolieris ar maksimālo ātrdarbību 60MHz un iebūvētiem diviem 32 bitu taimeriem.

Shēma darbojas šādi: viena gaismas diode LED1 ir starojošā, bet otra tieši tāda pat diode D2 uztver pirmās starojumu. Diodes ir novietotas cieši blakus viena otrai. Gaismas diode LED1 periodiski tiek ieslēgta mikrokontroliera portā P0.20 uzstādot „1” (augstu līmeni) un izslēgta ar pretējo (tiek modulēts starojums). Tajā pat laikā portā P0.22 arī tiek uzstādīts augsts līmenis, kas uzlādē diodi D2 uzlādes laiks ir 200µs (14. att. (A)). Tad porta izvads P0.22 tiek pārslēgts uz ieeju (tādējādi uzstādot procesora izvadu augstas pretestības režīmā), tas ir tāpēc, lai strāva no diodes nenoplūstu caur porta izvodu. Signāla formas augša (krītošās frontes sākums) tiek uzskatīta par augstu līmeni „1”, t.i. 3,3V. Tad uz diodi krītošais starojums sāk to izlādēt. Tajā mirklī mikrokontrolierī tiek ieslēgts taimeris, kas uz portu P0.22 mēra līmeņa pāreju no „1” uz „0”, respektīvi diodes izlādi. Kad fotodiode ir izlādējusies – līmenis ir nokritis līdz loģiskai „0”, t.i. ~0,8V, to nosaka mikrokontroliera porta tehniskie parametri (par zemu līmeni tiek uzskatīts spriegums ~0,8V). Tādā veidā taimera izmērītais laiks veido vienu punktu PPG signālā. Izlādes laiks ir apgriezti proporcionāls, starojuma intensitātei. Attiecīgi veicot, piemēram, 100 mērījumus sekundē, iegūstot PPG signāla formu no 100 punktiem. Rezultātā tiek iegūts PPG signāls, neizmantojot analogo ciparu pārveidotāju.

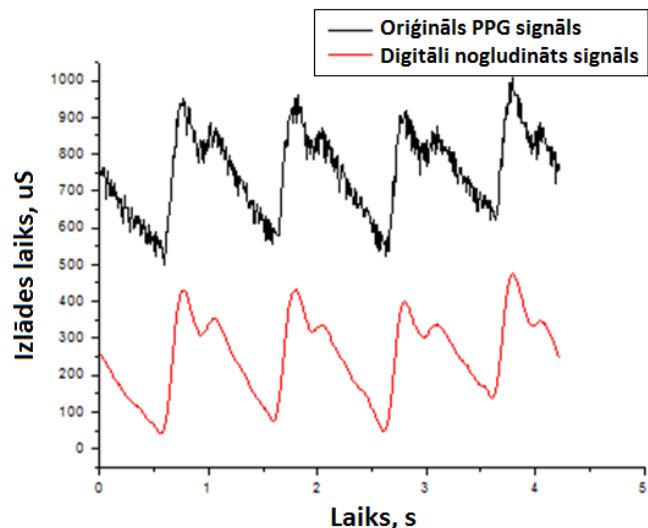
Attēlā 14 (a). Parādīts normāls diodes izlādes laiks ($\sim 250\mu\text{s}$). Šis izlādes laiks mainās (pulsē) ar sirds darbības frekvenci, kas ļauj redzēt PPG signālu.



14. att. Diodes izlādes laiks (mērīts uz kontroliera porta P0.22). Normāls izlādes laiks $\sim 250\mu\text{s}$ (a) un ātra izlāde $\sim 20\mu\text{s}$ (b). A - parāda diodes uzlādi un pēc tam sekojošu izlādi (atzīmēta ar raustītu svītru).

Izlādes laika mērīšanai tika izmantots speciāls kontrolierī iebūvēts modulis. To sauc par „reģistrēšanas” jeb „iegūšanas” moduli (*capture module*). Tas darbojas kopā ar kontrolierī iebūvēto taimerī. Modulis pirms darba uzsākšanas ir jākonfigurē, parasti tam ir atvēlēti vairāki reģistri. Moduļa galvenā izmantošanas priekšrocība ir tāda ka laiks tiek iegūts automātiski, bez programmatūras iejaukšanās un vadības. Taimera reģistrēšanas modulis darbojas paralēli, tas ir kā perifērijas iekārta, kas nav atkarīga no procesora noslodzes vai uzdevumiem. Šo moduli darbu sākot nokonfigurē un startē, tālāk tas darbojas pilnīgi patstāvīgi. Var uzstādīt, ka taimera reģistrēšanas modulis informē, kontrolieri, tad kad ir noticis viens mērījums. Tas ir būtiski, jo šajā momentā galvenajai kontroliera vadības programmai ir jānolasa un jā saglabā viena vērtība. Kontrolierī ir iebūvēti četri taimera laika reģistrācijas moduļi, katra vērtību garums ir 32 biti. Tātad skaitlis ko šis modulis var saturēt ir ļoti liels (2^{32}), mūsu gadījumā maksimālā skaitliskā vērtība kas var tikt izmērīta ir 32000, tas atkarīgs ar kādu takts frekvenci darbojas kontrolieris ($32\text{MHz} = 32000$).

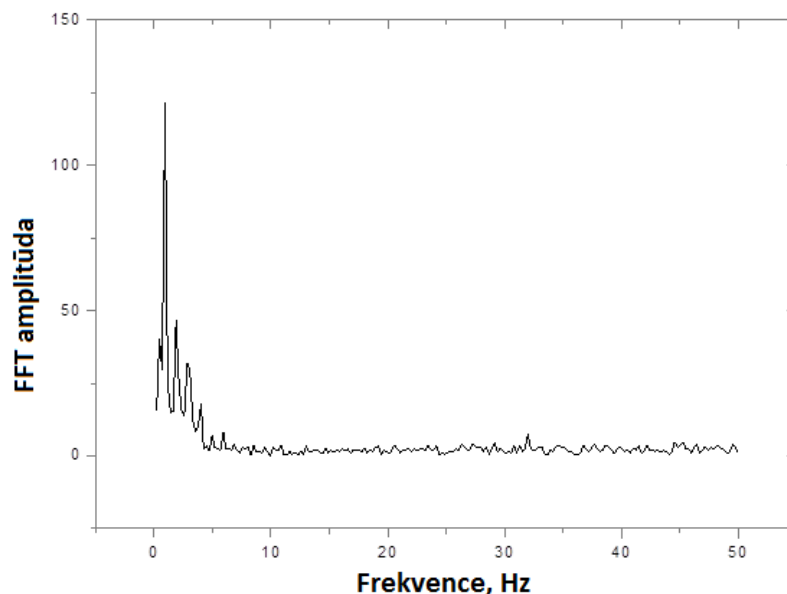
Ar jaunizveidoto ierīci tika veikti pirmie PPG signālu mērījumi. Fotopletizmogrāfijas līkni iegūt izdevās, bet pirmā lieta, kas likās ļoti nepraktiska, bija diode D2. Tā tiek izmantota kā fotosensors. Pirmkārt tai ir ļoti liels korpuss, kas turpmāk varētu radīt problēmas iebūvējot miniatūros, portatīvos PPG sensoros. Otrkārt iegūtais PPG signāls bija ļoti mazas amplitūdas. Treškārt diode ir izgatavota no caurspīdīgas plastmasas, kas nozīmē, ka signālu var ietekmēt traucējošā apkārtējā gaisma. Un visbeidzot gaismas diodes korpusa augšdaļā ir lēca, kas izejas starojumu fokusē un lielā mērā tā nav paredzēta ienākošajam starojumam, pie tam diodes kristāls ir ļoti maziņš $\sim 0,5\text{mm} \times 0,5\text{mm}$. Visu šo parametru kopsumma rezultātā dod ļoti mazas amplitūdas PPG signālu. Tāpēc tika nolemts, ka starojošā diode D2 jāaizstāj ar īstu fotodiode. Tālāk mērījumiem tika izmantota fotodiode $\Phi\text{D}269$ ar aktīvās virsmas laukums (5mm^2), un augstu jutību īpaši sarkanajā un infrasarkanajā spektra reģionā. Šādā konfigurācijā iegūtais PPG signāls ir parādīts 15. attēlā (melns), tas ir apstrādāts un līdzkomponente ir nogriezta, bet signāla amplitūda ir oriģināla. Sarkanais signāls ir nogludināts izmantojot 20 punktu Savitzky–Golay līdzināšanas filtru [29], kas iebūvēts Origin Pro 8 datorprogrammā. Eksperimenti parādīja, ka 20 punktu gludināšana priekš šāda trokšņu līmeņa dod optimālus rezultātus. Var redzēt, ka apstrādātais signāls nav nobīdīts fāzē un signāla maksimumi un minimumi pilnīgi sakrīt.



15. att. Digitāli iegūts PPG signāls izmantojot divas gaismas diodes (940nm) un ātrdarbīgu mikrokontrolieri.

Nelielais troksnis PPG signālā var būt skaidrojams ar gaismas diodes pārslēgšanos vai taimera kļūdu.

Attēlā 16 ir parādīts oriģinālā PPG signāla (15. attēls) spektrs. Var redzēt, ka signāla amplitūda galvenokārt ir koncentrēta zemās frekvences reģionā (apmēram 1Hz), kas atbilst mērāmā pacienta sirds darbībai.

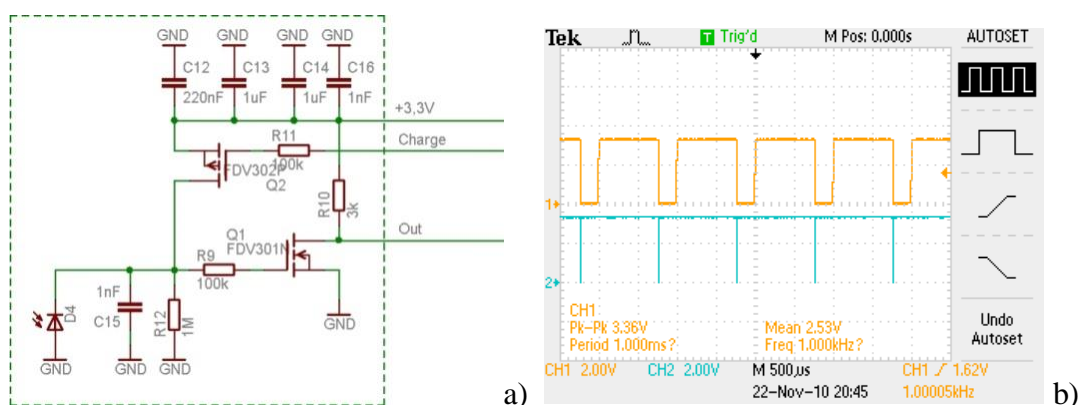


16. att. Digitālā PPG signāla spektrs.

Darba gaitā rezumējot jauno fotopletizmogrāfijas signālu iegūšanas metodi, tika secināts, ka tā darbojas apmierinoši, bet gribējās to cik vien iespējams uzlabot. Viens iemesls bija ļoti šaurais mērījumu diapazons. Tas nozīmē, lai iegūtu PPG signālu bija diezgan precīzi jāsabalansē starojošās diodes intensitāte ar fotodiodes novietojumu. Ja gaismas intensitāte, kas krīt uz fotodiodes ir pārāk liela, tad tā izlādējas ātri, ja gaismas ir par maz, tad fotodiode neizlādējas un PPG signālu nevar iegūt. Otrs iemesls bija mikrokontroliera porta zemā līmeņa detektēšana pie 0,8V. Tas nozīmē, ka tiek zaudēts vēl daļa no diapazona. Attiecīgi daudz tika strādāts, lai izveidotu jaunu uzlabotu shēmu un pilnībā tiktu novērsta šīs augšminētās nepilnības.

Tika uzprojektēta signāla līmeņa konvertēšanas shēma (17. att.), kur galvenie vadošie elementi ir diviem lauka tranzistori. Tranzistors Q2 darbojas „atslēgas” režīmā, kā slēdzis,

kas atveroties uzlādē kondensatoru C15 un fotodiodei D4 ar barošanas spriegumu 3,3V. Tas tiek vadīts ar loģisko līmeni no mikrokontroliera porta – signāls „charge” (uzlādēt). Barošanas spriegums 3,3V tiek pievadīts no galvenās vadības shēmas plates. Savukārt tranzistors Q1 konvertē signāla līmeni no analogā uz ciparu. Pretestība R12 nodrošina kondensatora C15 un diodes D4 lēnu izlādēšanu gadījumā, ja uz fotodiodei nekrīt nekāda gaisma. Pretestība R10 notur sensora izejas līmeni stāvoklī „1”, t.i. ja tranzistors Q1 ir aizvērts, tad izejā „Out” ir +3,3V līmenis, bet tad kad tranzistors atveras R10 tiek pievienota pie barošanas mīnusa, tas nozīmē, ka izejas līmenis ir „0”. Paralēli fotodiodei D4 ir pievienots kondensators C15, kura kapacitāte ir 1nF. Fotodiodes kapacitāte pēc ražotāja sniegtās specifikācijas ir 72pF, kas ir ļoti maz salīdzinot ar C15, kas shēmā darbojas, kā balasts. Attēlā 17 b parādīti signāla līmeņi, kas novērojami uz sensora izvadiem „charge” (zilais) un „Out” (oranžais).



17. att. Izstrādātā digitālā PPG reģistrācijas shēma (a), uzlādes impulsi (zilā signālforma) un digitalizēts izejas PPG signāls (oranžā signālforma) mērījumi iegūti ar oscilogrāfu (TDS2002B).

Jau sākotnēji shēma tika projektēta, lai spētu darboties ar salīdzinoši lielu mērījumu ātrumu 1000 mērījumi sekundē. Tik ir nepieciešams, lai ierīces PPG signāla mērījumi būtu izmantojami fizioloģiskos pētījumos un PPG signāla formas analizē. Attēlā 17 b zilais signāls parāda kondensatora C15 un diodes D4 uzlādes laiku, kas atbilst 30µs. Uzlādes laiks tika noskaidrots eksperimentāli.

Izmantojot arī šo papildināto shēmas variantu darbojas nosacījumi, jo vairāk gaismas nokļūst uz fotodiodes D4, jo ātrāk izlādējas kondensators C15. Un otrādi, ja gaismas ir par maz, tad izlāde nenotiek un viss process apstājas. Šo efektu var uzskatīt par iekārtas nepilnību. Jo ja vēlamies iegūt PPG signālu no dziļākiem asinsvadiem tradicionālā PPG mērīšanas ierīcē tiek palielināta sensora starojošās diodes intensitāte. Bet digitālajā PPG signāla mērīšanas metodes gadījumā PPG signāla amplitūda samazinās. Vienīgais risinājums ir piemeklēt kondensatora C15 vērtību, lai atbilstu vajadzīgai signāla intensitātei. Mazākas kapacitātes kondensators var tik izmantots priekš mērījumiem no maziem un sekliem asinsvadiem, bet lielākas priekš dziļākiem asinsvadiem un artērijām. Parasti kondensatorus piemeklē atkarībā no mērījumu metodes un pētījuma prasībām.

Apskatītā mērīšanas metode strādā tikai ar atstarojošiem PPG sensoriem, jo starojošās diodes jauda ir nepietiekoša, lai starojums caur audiem sasniegtu fotodiodes izlādei nepieciešamo līmeni. Jaudu nelielās robežās var palielināt, bet pārāk augstas intensitātes starojums var sabojāt pētāmos audus. Izlādes shēmā tiek izmantots kondensators C15 ar dielektriķi X7R, iespējams, ka ir nepieciešams veikt papildus pētījumus izmantojot kondensatorus ar citiem dielektriķiem (NPO, polistirēns, polipropilēns un citiem).

3.1.2. Metode rekapilarizācijas atspoguļojumam reālā laikā

Doktora studiju laikā tika attīstīts jauns pētījumu virziens – rekapilarizācijas laika noteikšana. Rekapilarizācija ir process, kas raksturo laiku kurā asins atgriežas kapilāros, pēc to mehāniskas saspiešanas un atlaišanas procedūras. Ādas rekapilarizācijas laiks (RKL) var kalpot kā kvantitatīvs diagnostikas parametrs [30, 31]. Piemēram, infekcijas izraisīta sepse ir viens no biežākajiem nāves cēloņiem bērniem un zīdaiņiem visā pasaulē. Jaunākie pētījumi par bērnu sepsi liecina, ka agrīna slimības atpazīšana un atbilstoša ārstēšana būtiski ietekmē saslimstību un mirstību no sepse. Sepse, asinssaindēšanās ir vispārēja smaga slimība, kuras cēlonis ir strutas radošo mikroorganismu un to toksīnu cirkulācija asinīs. Sepsi ierosina stafilokoki un zarnu nūjiņas. Mikroorganismi asinīs parasti nokļūst no primāra infekcijas perēkļa (bojāti zobi, strutojošas mandeles, urīnceļu infekcijas, dzimumorgānu iekaisums sepse attīstībā nozīme ir novājinātai organisma reaktivitātei. Ārstēšana kompleksa likvidē primāro infekcijas perēkli, lieto antibakteriālus līdzekļus, stimulē organisma aizsargspēju [32]. Neinvazīva mērīšanas ierīce perifēriālās asinsrites novērošanai reālā laikā ir būtiska loma vairākās medicīnas jomās [33].

Veseliem bērniem RKL ir īsāks par 2 sekundēm, bet slimības gadījumā tas ievērojami paildzinās (>5 sek.) [34]. Ilgāks RKL var norādīt uz dehidratāciju, šoka stāvokli, perifēriālās asinsrites slimībām vai hipotermiju (pastāvīga siltuma zaudēšana apkārtējās vides ietekmē). RKL var tikt izmantots arī kā papildparametrs kardiovaskulārā stāvokļa novērtēšanai.

Tā kā pašlaik nav pieejamas komerciālas iekārtas RKL mērīšanai, ārsti to nosaka subjektīvi, novērtējot ādas krāsas atjaunošanās laiku pēc spiediena noņemšanas ar pulksteni vai hronometru. Objektīviem kapilāru iztukšošanās un aizpildījuma kinētikas mērījumiem šajā darbā ir piedāvāta zilā starojuma PPG metode. Zilajā (~420nm) spektra rajonā vidējais starojuma iespiešanās dziļums ir ap 0.1-0.2mm, kas atbilst dermas augšējo kapilāru dziļumam, līdz ar to dziļāko asinsvadu pulsācijas PPG mērījumus neietekmē. Tradicionāli PPG mērījumi tiek veikti 600-900nm spektra intervālā, tāpēc spektra zilā diapazona PPG izmantošanu RKL novērtējumam ir novitāte.

Pētījumi par RKL tēmu ir salīdzinoši maz, un nav īstas ticamas metodes, kā tieši noteikt kapilāru piepildīšanas laiku. Bieži vien tas variē ārstu subjektīvā novērojuma dēļ. Biežāk lietotā metode kapilāru piepildīšanās laika aprēķināšanai tiek saukta „Naga saspiešanas tests”. Metodes pamatā - pirksta gals parasti pie naga tiek mazliet saspīests (ādas krāsa paliek gaišas saspiešanas vietā, jo asinis no asinsvadiem tiek izspiestas), bet pēc atlaišanas ārsts novēro dabiskās ādas krāsas atgriešanos pirkstā). Nav pieejama nekāda tehnisku ierīču, kas noteiktu tieši „krāsas atgriešanos”, parasti tas tiek noteikts vizuāli novērojot tāpēc rezultāti ir ļoti aptuveni, atkarīgi no apgaismojuma telpā, ārsta pieredzes un subjektīvā novērojuma. Kapilāru piepildīšanās laiks var mainīties atkarībā no apkārtējās vides temperatūras, cilvēka ķermeņa temperatūras un fizioloģiskā stāvokļa.

Šī darba mērķis bija izstrādāt un notestēt vienkāršu un lietotājam draudzīgu zilā starojuma PPG pirksta sensoru, ko varētu izmantot kapilāru oklūzijas un atjaunošanas dinamikas neinvazīvu mērījumu veikšanai reālā laikā.

Jaunas kvantitatīvas metodikas un atbilstošas aparatūras izstrāde var palīdzēt agrīni diagnosticēt bērna dzīvībai bīstamu stāvokli un samazināt bērnu mirstību Latvijā. Par visefektīvāko metodiku, šīs problēmas risināšanai, varētu kalpot ādas asinsrites pulsāciju neinvazīvs optisks monitorings.

Šī pētījuma novitāte ir: atrasts un pētīts fotopletizmogrāfijas metodes jauns pielietojums medicīnas diagnostikā ieviešot ierīci, kas var noteikt kapilāru piepildīšanās laiku. Īpaši izceļot, ka pašlaik pasaulē nav šādas komerciālas iekārtas. Jāpiebilst, ka tieši ārsti izteica vēlmi un nepieciešamību pēc šādas specializētas iekārtas, kas rezultātu noteiktu pēc stingri kontrolēta programmas algoritma.

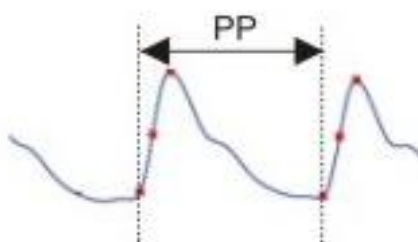
Jaunākie pētījumi vairāku viļņa garumu fotopletizmogrāfijas jomā [35, 36] skaidri parāda iespēju raksturot hemodinamiku no dažādiem asinsvadu dziļumiem izmantojot optisku neinvazīvu mērīšanas tehniku.

Selektīva spiediena izraisīta oklūzija ādas virsmas kapilāros izmantojot 405 nm viļņa garuma PPG signālus, jau tikusi veikta iepriekš – citu autoru darbos [37, 38], bet rekapilarizācijas kinētika nav pētīta.

3.1.3. PPG signālu apstrādes pilnveidojumi

Visas izstrādātās ierīces ir savienojamas ar datoru – mērījumu datu nosūtīšanai, attēlošanai un saglabāšanai datora cietajā diskā. Lai to varētu izdarīt ir nepieciešama speciāla datorprogramma. „Viedā apģērba” rekapularizācijas un multispektrālās ierīces vajadzībām tika izstrādāts jauns PPG signāla apstrādes algoritms un uzrakstīta oriģināla datorprogramma, kas analizē fotopletizmogrāfijas signāla formu un meklē minimālās vērtības katrā pulsa periodā. Sirdsdarbības pulsa perioda (PP) noteikšanai tiek mērīts laiks no viena pulsa viļņa „pēdas” līdz nākamā pulsa viļņa „pēdai” (18. attēls). Programma izšķir un ievāc datu paketes no virtuālā seriālā porta, atkodē tās un attēlo uz datora ekrāna.

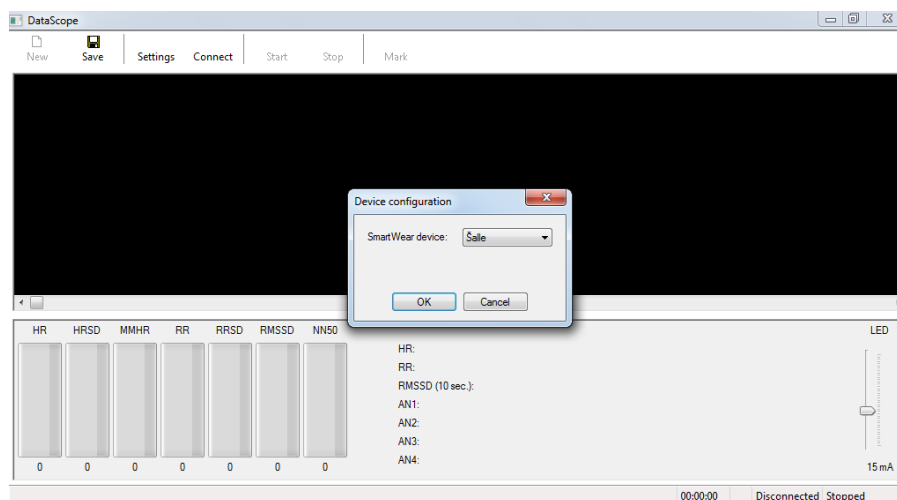
Programma tika izstrādāta tā, lai varētu apstrādāt un parādīt vairākus signālu kanālus un būtu universāli lietojama. Programmai pat tika dots nosaukums „DataScope”, kas nozīmē „DatuApskatītājs”.



18. att. Pulsa intervāla noteikšanas metode.

Darbības ar DataScope programmu:

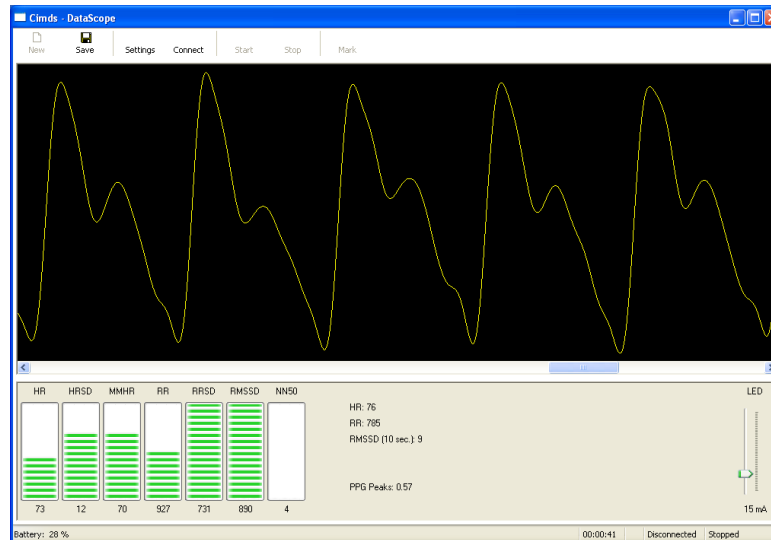
- 1) Aktivizē programmu „DataScope”.
- 2) Nospiežot pogu „Settings” izvēlas un no piedāvātā saraksta ierīci, ar kuru tiks veikti mērījumi. Apstiprina izvēli ar „OK”. Šajā gadījumā parādīts, ka Bluetooth savienojums un datu reģistrācija notiks ar „viedo apģērba” – šalli.



19. att. Izveidotās datorprogrammas DataScope logs ar viedā apģērba savienojuma izvēli.

- 3) Ieslēdz izvēlēto viedā apģērba iekārtu. Par sekmīgu ieslēgšanas procesu liecina zila mirgojoša gaismas diode (ja akumulators ir uzlādēts).
- 4) Programmas logā izvēlas „Connect” pogu. Pēc neliela brīža (~2 sek.) loga labajā apakšējā stūrī parādās ziņojums, ka Bluetooth savienojums ir izdevies.
- 5) Lai sāktu mērīšanu jānospiež poga „Start”. Sākas datu reģistrēšana, programmas logā no labās puses parādās uzņemtais PPG signāls. Kvalitatīvāka signāla iegūšanai iespējams

regulēt starojošās diodes intensitāti sensorā (rīks labajā pusē ir kalibrēts un uzrāda diodes patērēto strāvu miliampēros). Kreisajā pusē, apakšā, iespējams redzēt aktīvās ierīces akumulatora stāvokli, reālā laikā (norādīts %).



20. att. Izveidotās programmas DataScope logs, kas attēlo un aprēķina PPG signālu parametrus reālā laikā no bezvadu ierīcēm.

Ar stabiņiem tiek attēlota sirds ritma variabilitātes (SRV) parametru mainība (vidējā vērtība no ieraksta pēdējām piecām minūtēm) (pēc artefaktu atlases, ja vēl nav pagājušas piecas minūtes, tad no ieraksta sākuma) [39]. Dati tiek atjaunoti ar katru sirdsdarbības ciklu, zem katra stabiņa tiek norādīta konkrētā SRV parametra vērtība. Stabiņiem ir informatīvs raksturs, kas atspoguļo SRV parametru mainības dinamiku, tās nav SRV rādītāju normas. Blakus stabiņiem var redzēt sirdsdarbības frekvences (HR) un secīgas sirdsdarbības cikla garuma (RR) vērtības, kas iegūtas no pēdējā noteiktā pulsa viļņa un pēdējo 10 sekunžu RMSSD (kvadrātsakne no vidējo kvadrātu summas no blakus RR intervālu starpības (ms)) vērtības [40]. Programma analizē PPG signāla formu un automātiski katrā sirdspukstu ciklā nosaka minimālo vērtību – kas tiek izmantota tālākos parametru aprēķinos. Ir ļoti būtiski novērot un analizēt šos parametrus, tie raksturo autonomās nervu sistēmas (parasimpatiskās un simpātiskās) līdzsvara stāvokli. To ietekmē stresa līmenis un dažādas autonomās nervu sistēmas saslīmšanas.

- 6) Ierakstu apstādina ar „Stop” komandas pogu. Datu saglabāšanu veic ar „Save” komandu. Izvēlas faila nosaukumu un vietu, kur to saglabāt.
- 7) Ja ieraksta laikā ir vēlēšanās uzsākt jaunu pierakstu, nesaglabājot iepriekšējos datus, var izvēlēties „Restart” komandu.
- 8) Ja ieraksta laikā ir nepieciešams ielikt marķieri, to var izdarīt ar „Mark” komandu. Labajā apakšējā stūrī starp ieraksta laiku un programmas procesu raksturojumu tiks parādīts skaitlis, kas apzīmē ielikto marķieru skaitu.

Rezultāti tiek saglabāti 2 failos (“nosaukums” ir lietotāja piešķirtais failu nosaukums datu saglabāšanas brīdī).

3.2. Jaunizveidotās eksperimentālās mērierīces

Doktora darba izstrādes laikā tika izstrādātas un izgatavotas piecas dažādas neinvazīvas optiskas fotopletizmogrāfijas signāla mērīšanas ierīces. Visas ierīces ir miniatūras, portatīvas, darbojas no iebūvēta akumulatora un paredzētas kardiovaskulārās sistēmas parametru reģistrēšanai.

Fotopletizmogrāfija (PPG) un elektronisko ierīču izstrāde

Tas ietver:

- Uzdevums (ideja),
- Tehniskais risinājums,
- Iekārtas elektroniskās shēmas izveidošana,
- Elektroniskās plates rasēšana (PCB),
- PCB izgatavošana,
- Detaļu (komponentu) salodēšana,
- Shēmas moduļu savienošana,
- algoritmu izstrādāšana un programmēšana,
- Jaunizveidotās iekārtas testēšana,
- Shēmas pilnveidošana,
- Iestrāde korpusā, tekstilizstrādājumos,
- Testēšana.

Kopīgā iezīme visām konstruētam iekārtām ir augstāko prasību un uzdevumu izstrāde, zemāk ir uzskaitītas svarīgākās:

1. Jānodrošina vismaz 5 stundu ilgu darbību no iebūvētā akumulatora.
2. Ierīces nomērītā signāla trokšņu līmenim ir jābūt minimālam.
3. Iekārtai ir jānodrošina PPG signāla pārraide bez vadiem vai ar USB savienojumu (atkarībā no projekta idejas), tai jābūt vienkārši savienojamai ar jebkuru datoru, plaukstdatoru vai mobilo tālruni.
4. Sensora shēmai un konstrukcijai ir jābūt pietiekami izturīgai un piemērotai atbilstošiem mērījumiem.
5. PPG signālu ir jānoraida vismaz 10 metrus (ja izvēlēts bezvadu pārraides princips).
6. Iekārtai jābūt pietiekoši mazai un kompaktai, lai to varētu iestrādāt apģērbā (šallē, cimdā u.c.) viedā apģērba izstrādes gadījumā.
7. Mērījumu iekārtas lietošanai jābūt pēc iespējas vienkāršākai.
8. Jābūt darbības režīma indikācijai.
9. Jābūt akumulatora uzlādes shēmai un indikatoram.
10. Mērījumu datu un rezultātu vizualizēšanai jānotiek uz datora ekrāna ar iespēju mērījumus saglabāt.

3.2.1. Trīskanālu digitālā PPG mērīšanas ierīce

Uzsākot darbu pie šīs ierīces sākumā tika izvirzīts augsts mērķis: izstrādāt un notestēt jaunu PPG signālu mērīšanas ierīci, kas varētu tik izmantota zinātniskos pētījumos.

Lai veiktu fizioloģiskos mērījumus nepieciešama ļoti precīza vienkārši lietojama ierīce ar zemu trokšņu līmeni un augstu signāla mērījumu ātrumu (vismaz 1KHz). Tādas iekārtas komerciāli netiek ražotas vai arī ir ļoti grūti pieejamas un dārgas. Tāpēc tika nolemts šādu iekārtu izgatavot pašiem, kas atbilstu fizioloģiskiem mērījumiem piemērotām specifiskām prasībām.

Trīskanālu digitālā PPG mērīšanas ierīce ir viena no pirmajām nopietnajām mēriekārtām, kas bija paredzētas tikai un vienīgi fizioloģiskiem mērījumiem un mērījumiem no artērijām. Visi mērījumi tika veikti LU Bioloģijas fakultātē, cilvēka fizioloģijas katedras laboratorijā Zbigņeva Marcinkeviča vadībā. Izstrādājot iekārtu jau sākotnēji uz to tika liktas lielas cerības, jo līdz šim LU Bioloģijas fakultātes laboratorijā nebija iespējams veikt mērījumus no kāju artērijām. Šī arī ir viena no pirmajām iekārtām, kuru uzbūves pamatā izmantota jaunattīstītā, digitālā PPG signāla ieguves metode, kas pavēra vēl nebijušas iespējas signālu mērījumos no dažādām cilvēka ķermeņa vietām. Sākuma stadijā provizorisks mērījumu rezultāti uzrādīja ļoti labus rezultātus, kādus līdz šim LU ASI elektronikas izstrādes grupā nevarēja iegūt izmantojot analogās signāla ieguves un apstrādes tehnoloģijas.

Izstrādājot iekārtu tika izvirzītas ļoti augstas prasības pret šo mērījumu iekārtu:

- ierīcei jābūt trīs identiskiem PPG mērījumu kanāliem,
- nepieciešams stabils fiksēts mērījumu ātrums – 1000 mērījumi/sekundē uz katru kanālu,
- jābūt iespējai regulēt starojošās diodes intensitāti, katram kanālam atsevišķi,
- individuāla PPG signāla pastiprinājuma regulēšana, katram kanālam,
- jābūt vienkārši saprotamam un intuitīvi lasāmam displejam,
- jādarbojas no iebūvēta litija jonu akumulatora apmēram 20 – 30 stundas,
- ierīcei jābūt portatīvai – neliela izmēra,
- vienkārši, bet stabili pievienojamiem PPG sensoriem,
- obligāti jābūt analogai signāla izejai.

Tieši pēdējais prasību punkts izraisīja vislielākās diskusijas, jo iekārtā PPG signāla iegūšanai plānots izmantot digitālo tehnoloģiju, kur ciparu signāls jau ir sensora daļā, bet pēc tam to atkal vajag pārveidot analogā formātā. Tas tika pamatots ar to ka visām profesionālām medicīnas iekārtām ir analogā signāla izeja. Plānotie mērījumi bija apjomīgi un tajos paredzēts izmantotas vēl arī citas cilvēka fizioloģisko parametru mērošanas iekārtas, piemēram, finometru (*Finometer MIDI*) [41], kuram arī ir analogā signāla izeja. Tāpēc vispareizākais veids ir visas šīs iekārtas, pieslēgt pie vienas daudzkanālu ACP (Analogais Ciparu Pārveidotājs) ierīces. Tādā veidā nerastos dažādas signāla neprecizitātes, kropļojumi, nobīdes laikā vai citas problēmas. Datu savākšanu un nosūtīšanu uz datoru kontrolētu tikai viena mērījumu personālam jau zināma un apgūta programmatūra.

Tā kā plānotā PPG signālu mērīšanas iekārta būtu digitāla, tad skaidrs ka tai neder neviens no iepriekš izmantotiem sensoriem. Tāpēc kopā ar šīs iekārtas izstrādi vajadzēja izveidot jaunus refleksijas PPG sensorus, kas būtu piemēroti mērījumiem praktiski no jebkuras ķermeņa vietas.

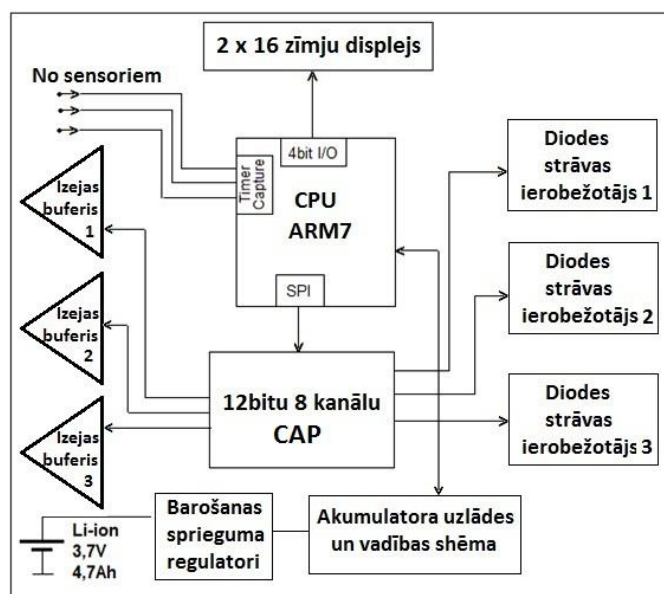
Parametri, ko sākotnēji jau bija plānots mērīt ar šo ierīci ir fotopletizmogrāfijas signāla pulsa forma un izmantojot divus sensorus, - signāla aizkaves laiks artērijās. Lai iegūtu šādus mērījumus sensora zonde ir jānovieto uz kāju artērijas dažādās vietās (piemēram, pie potītes, pacelī, un pie kājas augšstilba), un tad jāsalīdzina iegūto signālu aizkaves laiks. Pulsa viļņa pārvietošanās laiks var tikt aprēķināts izmantojot datorprogrammatūru – reālā laikā vai

pēcapstrādē. Šāda informācija par pulsa viļņa aizkavēšanos dod ļoti vērtīgu informāciju par pacienta kardiovaskulāro stāvokli un iespējamiem asinsvadu aizsprostojumiem. Lai noskaidrotu pulsa signāla aizkaves laiku nepieciešams precīzi noteikt PPG signāla „pēdu” jeb minimumu. Tas savukārt nozīmē, ka signālu nedrīkst apstrādāt un filtrēt, jo filtrs izmaina signāla formu un rada fāzu nobīdi.

Galvenais jaunās trīskanālu ierīces plānotais pielietojums ir augstas izšķiršanas spējas ar zemiem trokšņiem fotopletizmogrāfijas signāla reģistrēšana no kāju artērijām. Ierīci ir paredzēts lietot stacionāros mērījumos, kad pacients atrodas guļus stāvoklī bez kustībām.

Iekārta tika projektēta izmantojot jaunizstrādāto digitālo fotopletizmogrāfijas signāla iegūšanas metodi. Visas komponentes tika izvēlētas, lai atbilstu augstākām prasībām. Iepriekš nevienā iekārtā vēl nebija jāizmanto CAP (Ciparu Analogais Pārveidotājs), tāpēc pareiza tā izvēlē, bija diezgan laikietilpīga.

Iekārtā ir izmantots 32 bitu procesors ARM7 LPC2148 no NXP, kurš tika darbināts ar 48MHz takts frekvenci. Digitālā PPG signāla iegūšanai un taimera laika automātiskai noteikšanai tika izmantots laika reģistrēšanas modulis, kas ir iebūvēts procesorā.



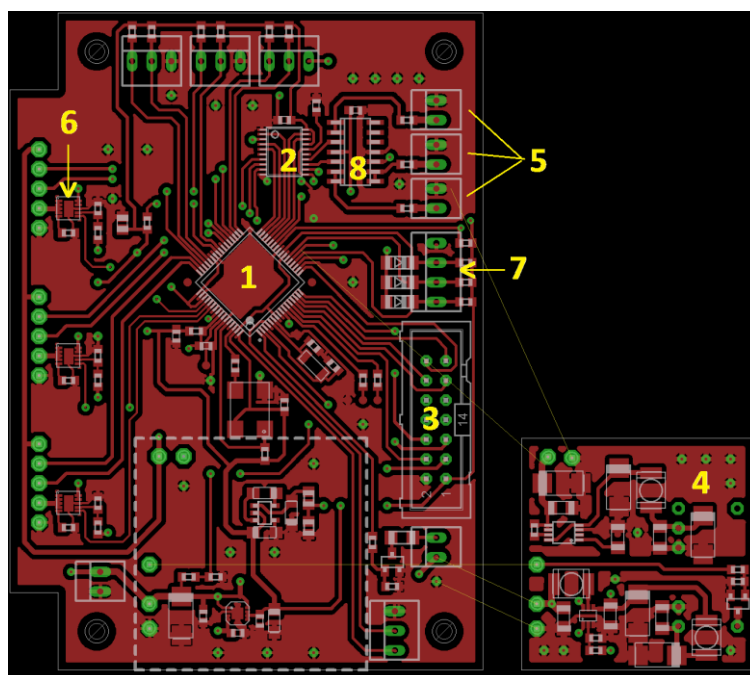
21. att. Trīskanālu digitālās fotopletizmogrāfijas ierīces darbības blokshēma.

Vienīgais filtrs, kas tika iebūvēts shēmā ir digitālais otras kārtas Butterworth augsto frekvenču filtrs [42] ar griešanas frekvenci 42Hz @ 3dB. Šis filtrs nekropļo fotopletizmogrāfijas signāla formu un negroza tā fāzi, jo tipiskais PPG signāla joslas platums ir 0,05 – 40 Hz. Izmērītais trokšņu līmenis, ko dod iekārta ir -30 līdz -40dB salīdzinājumā ar PPG signālu. Par fizioloģisko troksni uzskata signālu no sensora, kas atrodas uz ādas ar pilnīgi apstādinātu asins plūsmu.

Ierīcē tika izmantots 255 punktu FIR filtrs. Tas atfiltrēja trokšņus no elektriskā 50 Hz tīkla un slāpēja apkārtējās gaismas ieviestos traucējumus. Būtiski atzīmēt, ka šis filtrs strādāja reālā laikā ar 64 ms aizkavi pret ieejas signālu. Filtrs izstrādāts tā, ka neievieš laika nobīdi signālā starp izslēgtu filtru un ieslēgtu. Gadījumā, ja ir nepieciešams veikt kādus speciālus mērījumus, un filtrs nav vajadzīgs to var vienkārši ar vienas pogas spiedienu izslēgt.

Attēlā 22 ir parādīts izstrādātās trīskanālu digitālās PPG iekārtas elektronikas shēmas rasējums (viens slānis). Ar ciparu 1 atzīmēts – galvenais iekārtas mikrokontrolieris LPC2148, 2 – 12bitu CAP TLV5610, 3 – divrindu šķidrā kristāla pievienošanas ligzda, 4 – izolētās barošanas un sprieguma pārveidotāju shēmas bloks, 5 ir digitālā PPG signāla izejas ligzdas, 6

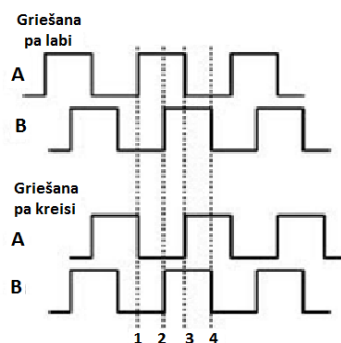
– LM3595 infrasarkanās starojošās diodes (sensorā) strāvas regulators, 7 ir trīs spiedpogu pievienošanas vieta, 8 – digitālā PPG signāla izejas buferis.



22. att. izstrādātās trīskanālu digitālās PPG fizioloģisko mērījumu iekārtas galvenās plātes rasējums.

Iekārtas izmēri ir 90 x 47 x 145 mm, svars 300 grami, tajā ir iebūvēts 2x16 rakstzīmju šķidro kristālu displejs ar trīs rotācijas slēdži (*rotary encoder*) un trīs spiedpogas.

Šī bija pirmā LU ASI izstrādātā konstrukcija, kur izmantoti rotācijas slēdži. To izmantošanai ir vairākas priekšrocības: grozīšana notiek pa soļiem, līdz ar to lietotājs precīzi, var sajust, kad poga ir pagriezta par vienu pozīciju uz priekšu vai atpakaļ, pogai nav gala atdures, to var griezt uz riņķi, līdz ar to programmas izstrādātājs var pats izvēlēties pagriezienu soļa vērtību (var grozīt pa ļoti smalkām pozīcijām, kā arī pa lielām). Vienai pogai var piešķirt daudzas funkcijas, kur pogas pozīcijas izmaiņš neietekmē, nākošajā funkcijā maināmā parametra vērtību. Rotācijas slēdzis var būt apvienots ar spiedpogu, izskats parādīts 23 attēlā (a). Slēdzis shematiski sastāv no diviem neatkarīgiem pastāvīgi atvērtiem slēdžiem. Pogas pagriešana savieno attiecīgo slēdzīti, izejas signālfoma parādīta 23 attēlā (b). Visvienkāršāk šādus signālus ir apstrādāt kontroliera programmatūrā pēc signāla fāzes nobīdes atšifrēt uz kuru pusi tika pagriezta poga. Rotācijas slēdžiem var būt no 12 līdz par 1024 pozīcijām (impulsiem) veicot vienu 360° pagriezienu. Pie trūkumiem varētu pieskaitīt – nolietošanos. Ļoti daudz grozīt slēdzis var nodilt. Izmantojot šos slēdzus jāņem vērā, ka tie dzirksteļo grozot, līdz ar to ir jāizveido shēma, kas slāpē kontaktu dzirksteļošanu.



23. att. Rotācijas slēdzis (a), rotācijas slēdža izejas impulsi (b) [43].

PPG sensori ir pievienoti izmantojot trīs DE9 9-pin D-sub RS232 savienojumus. Par izejām izmantotas 3 augstas kvalitātes apzeltītas RCA tipa ligzdas. Signāla izejas līmenis ir vienpolārs 0 – 5V. Signāla pastiprinājumu var regulēt pa desmit diskrētiem līmeņiem. Ierīces kopskats ar sensoriem parādīts 24. attēlā.



24. att. Pilnīgi pabeigtas trīskanālu digitālās fotopletizmogrāfijas iekārtas kopskats ar sensoriem.

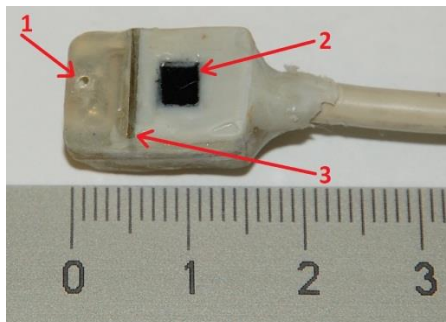
Programmatūras rakstīšanai tika veltīts ļoti daudz laika, tika ievēroti visi pareizas programmēšanas nosacījumi, kā rezultātā tika izveidota ļoti optimizēta un stabila programmatūra. Optimālas programmēšanas priekšnosacījums ir: vajadzīgo darbu izdarīt ļoti ātri un ieiet gulēšanas režīmā (sleep), izslēdzot visas tajā brīdī nevajadzīgās kontroliera perifērijas. Atkarībā no izveidotās programmatūras un veicamajiem uzdevumiem šis gulēšanas režīms var būt pat ļoti īss, piemēram, 1 milisekunde, bet tomēr tas ir ļoti nozīmīgi, enerģijas taupīšanas nodrošināšanai. Iekārtā izmantojot visas iespējamās enerģijas samazināšanas iespējas – procesora vidējā patērētā strāva ir $\sim 15\text{mA}@48\text{MHz}$. Tas ir uzskatāms par ļoti labu rezultātu, jo neoptimizēta programmatūra var likt procesoram patērēt pat 90 mA pie 60MHz. Kas, protams, ir ļoti daudz, pie tam ja iekārtai ir jādarbojas no baterijām.

Sensora konstrukcija

Projekta laikā tika izveidoti trīs pielāgoti atstarojošie PPG sensori, kas īpaši piemēroti mērījumu veikšanai no artērijām.

Tika ieviesta arī neliela, bet ļoti nozīmīga inovācija, kas iepriekš nevienā ierīcē netika izmantota tā ir tiešā starojuma izolējošā barjera, kas ir novietota starp fotodiodes un starojošo diodes 25 att. (3). Eksperimentos tika novērots, ka izveidojot nelielu „nožogojumu” PPG signāls kļūst ievērojami kvalitatīvāks (lielāka izejas amplitūda, mazāk trokšņu pie tā paša pastiprinājuma un starojošās diodes intensitātes). Līdz ar šādu atklājumu visos turpmāk izveidotos sensoros tiešā starojuma barjera ir uzstādīta.

Sensora kopskats redzams 25 attēlā, tā izmēri ir 10 x 15 x 8 mm. Sensoriem tika izvēlēta silikona PIN fotodiode BPW34-FA (2) no *OSRAM* ar dienas gaismas filtru, aktīvo virsmas laukumu 7 mm² un spektrālo jutības maksimumu pie 880 nm. Starojošā diode ir SIR91-21C/F7 (1) no *Everlight Electronics Co.*, starojuma viļņa garums ir maksimums 875 nm, spektrālais platums 80 nm un šaurs starojuma leņķis - 20°, kas ir būtiski artēriju mērījumos jo nepieciešams, lai starojums tik ātri neizkliedējās, bet šaurā leņķī nokļūst līdz artērijai.



25. att. Izveidotais digitālā fotopletizmogrāfijas remisijas sensors, skats no priekšas.

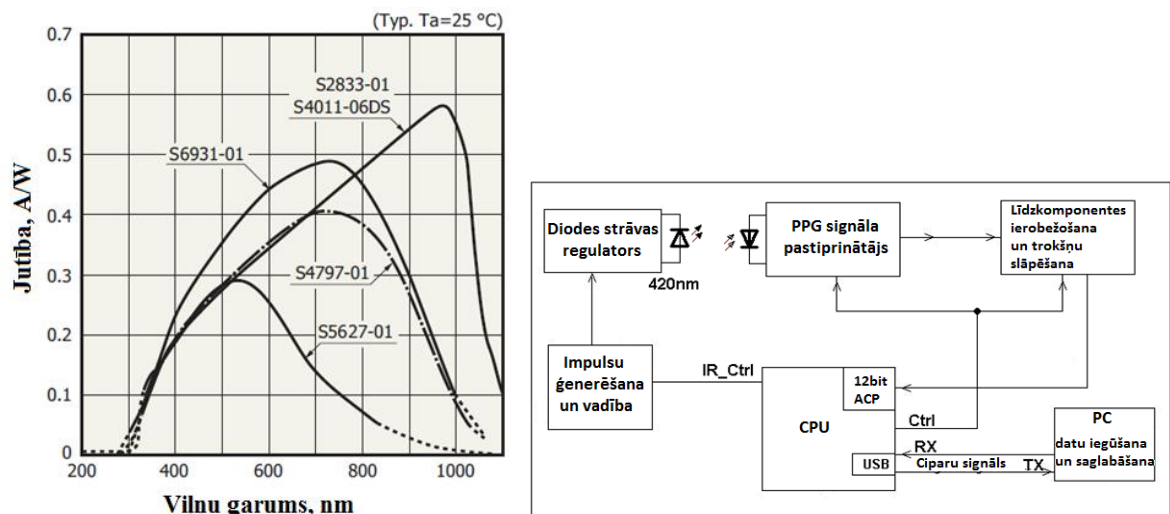
Sensors ir izveidots uz divslāņu spiestās plates FR4 (elektronikā izmantotās plates ir kompozītmateriāls, kas sastāv no austa stiklšķiedras auduma ar epoksīdsveķu saistvielu un ir ugunsdrošas). Sensora korpuss tika izgatavots no poliuretāna hermētiķa, kas ir piemērots elektronisko komponentu pārklāšanai, tas nesatur skābes vai kādas citas kaitīgas vielas, kas varētu sabojāt elektronikas platīti un alvas lodējumus. Pirms hermētiķa uzklāšanas platīte ar visiem uz tās esošiem elektroniskiem komponentiem tika lakota.

3.2.2. Ierīce rekapilarizācijas kinētikas mērījumiem (I versija)

Neskatoties uz to ka rekapilarizācijas process iepriekš bija ļoti maz pētīts, ierīci, kas rekapilarizāciju mēra bija jāprojektē un jāizgatavo.

No elektronikas viedokļa shēma ir ļoti līdzīga jau iepriekš izstrādātajām fotopletizmogrāfijas ierīču shēmām. Galvenais starojumu uztverošais elements ir fotodiode, kuras jutība ir pavirzīta uz spektra zilo pusi. Tātad netika vairs neizmantoja fotodiode, kuras spektrālais jutības pīķis ir ~940nm, bet gan ~700nm.

Daudz laika tika veltīts atbilstošas fotodiodes meklējumiem, jo uz spektra zilo daļu pieejamu fotodiodu ir ļoti maz. Rezultātā tika izvēlēta S6931-01 no *Hamamatsu*, jo fotodiodei ir visaugstākā jutība 405 nm spektrā. Fotodiodes aktīvais laukums (virsmas ar kuru uztver starojumu) 2,4 x 2,8 mm, spektrālā jutība 320 – 1000 nm, spektrālās jutības pīķis 720 nm (26. att.).



26. att. Rekapilarizatorā izmantotās fotodiodes S6931-01 [44] spektrālā jutība un izveidotās rekapilarizācijas laika mērīšanas ierīces blokshēma.

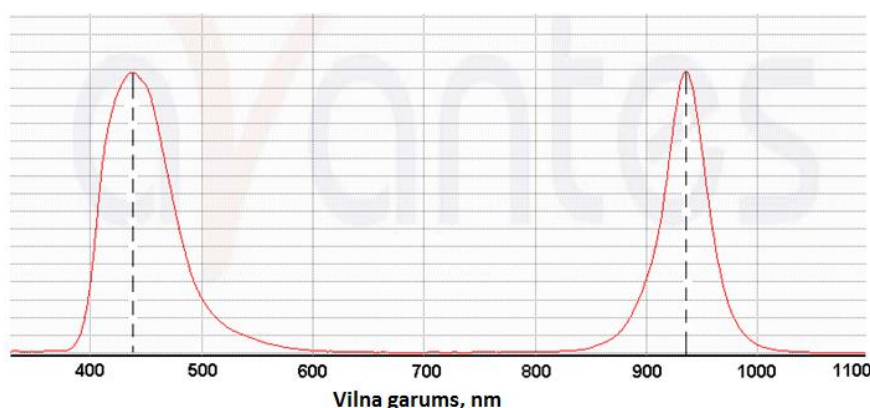
Sensors ir viena no svarīgākajām daļām ierīcē, lai iegūtu kvalitatīvus mērījumu rezultātus tam ir jābūt profesionāli izveidotam. Tāpēc vienkāršākais risinājums bija pārtaisīt komerciālu pulsoksimetra sensoru. Tajā tika iemontēta zilā starojošā diode (*Everlight Electronics*, mod. EL204UBD, starojuma viļņu garuma maksimums – 420 nm, spektra joslas platums 65 nm, korpusa diametrs 3 mm). Atstarotais PPG signāls tika detektēts ar uzlabotu zilā spektra jutīgu fotiodi (Hamamatsu mod. S6931-01), kas novietota 2 mm attālumā no starojošās diodes. Atstarotais signāls tika izfiltrēts un pastiprināts, izmantojot operacionālo pastiprinātāju. Centrālā vadības kontrolierī ir iebūvēts 12 bitu (t. i. 4096 fiksēti līmeņi) ACP uz kura ieeju tika padots analogais signāls. Digitalizētie mērījumu dati izmantojot USB savienojumu tika nosūtīti uz stacionāro datoru, apstrādei, attēlošanai un saglabāšanai. Centrālais kontrolieris nodrošina arī zilās starojošās diodes strāvas regulēšanu kā arī ieslēgšanas un izslēgšanas vadību. Izstrādātās rekapilarizācijas iekārtas blokshēma ir parādīta 26. attēlā.

3.2.3. Ierīce rekapilarizācijas kinētikas mērījumiem (II versija)

Rekapilarizācijas laika mērīšanas iekārtas otrajā versijā tika attīstīta un uzlabota mērīšanas tehnika, izstrādāts jauns uzlabots rezultāta aprēķināšanas algoritms un pilnībā nomainīta PPG mērīšanas elektroniskā shēma, kas tika izstrādāta uz jaunizveidotās digitālā signāla ieguves bāzes.

Šī pētījuma mērķis bija izstrādāt vienkāršu, lietotājam draudzīgu neinvazīvu mērīšanas ierīci, ar kuru var noteikt kapilāru piepildīšanās laiku. Iepriekš izstrādātā ierīce tika būtiski uzlabota, to papildinot ar infrasarkano starojošo diodi ($938 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$), kuras starojuma iespiešanās dziļums audos ir $\sim 1,5 \text{ mm}$. Šāds būtisks uzlabojums, ļauj iegūt informāciju no dziļāk esošiem asinsvadiem, ne tikai no kapilāriem, kā arī ar tā palīdzību var kontrolēt sensora (attiecīgi arī pirksta) saspiešanas spēku. Rekapilarizācijas mērījumu sensors sastāv no divām gaismas diodēm (zilā un infrasarkanā) un vienas fotodiodes.

Gaismas diožu starojuma spektrs parādīts attēlā 27, tas tika mērīts ar *Avantes* spektrometru AvaSpec-2048.

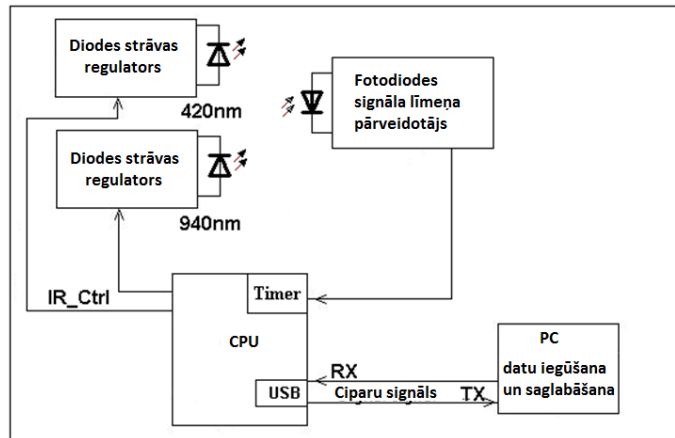


27 att. Rekapilarizācijas iekārtas sensora spektrālais sadalījums no starojošām diodēm.

Izstrādātās ierīces prototipa blokshēma ir parādīta 28. attēlā. Līdzīgi kā iepriekšējā rekapilarizācijas iekārtas versijā, tika izmantots komerciāls PPG pirksta sensors, kurš tika pārtaisīts. Tajā tika iebūvētas divas gaismas diodes (zilā un infrasarkanā) un tāda pat fotodiode kā iepriekšējā projekta versijā (S6931-01 no *Hamamatsu*), kuras spektrālā jutība ir nobīdīta uz zilā starojuma spektra pusi. Tika izmantota 3 mm zilā gaismas diode EL204UBD no *Everlight Electronics*, spektra pīķis pie 428 nm, spektra joslas platums 65 nm. Infrasarkanā gaismas diode tika izvēlēta virsmas montāžas tipa (izmērs 1206), lai sensors saglabātu miniatūrus izmērus. Diodes modelis IR11-21C no *Hamamatsu*, viļņa garuma pīķis 940 nm, un spektra joslas platums 45 nm. Tā kā zilā starojuma iespiešanās dziļums audos ir ļoti mazs, tad lai iegūtu kaut cik samērāmu PPG signālu fotodiode tika novietota 2 mm no zilās gaismas diodes, t.i. praktiski tiešā tuvumā.

Rekapilarizācijas signāla iegūšanai no diviem starojuma viļņu garumiem vienlaicīgi tika izmantota jaunattīstītā digitālā PPG tehnoloģija. Tas ir būtisks shēmas uzlabojums attiecībā pret pirmo rekapilarizācijas ierīci, kur PPG signāla iegūšanai tika izmantots sarežģīts operacionālo pastiprinātāju bloks ar vairākiem filtriem.

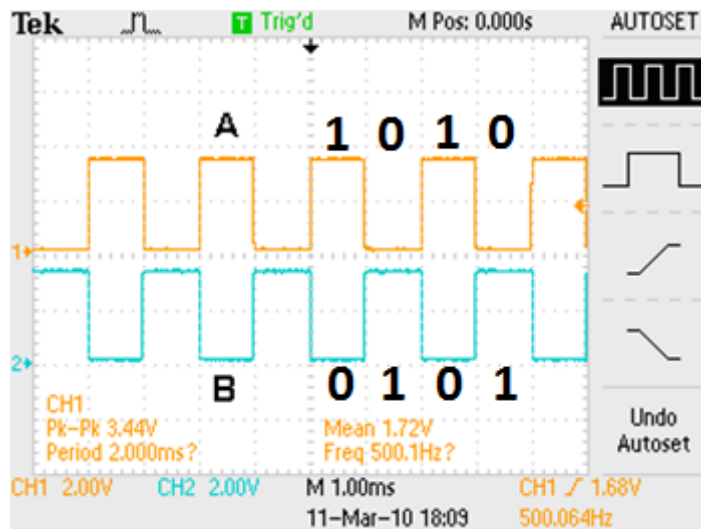
Iegūtie mērījumu dati izmantojot USB kabeli tika nosūtīti uz datoru, attēlošanai, apstrādei un saglabāšanai.



28 att. Izstrādātā rekapilarizācijas laika noteikšanas ierīces II, blokshēma.

Lai iegūtu vienlaicīgi divus fotopletizmografijas signālus no vienas fotodiodes, tika izmantota laika dalīšanas jeb pārslēgšanas tehnika. Gaismas diodes starojums tika modulēts (29. att.). Signāla forma „A” parāda zilās diodes pārslēgšanos, bet „B” infrasarkanās. Redzam ka vienā laika momentā ir ieslēgta tikai viena gaismas diode, (augsts signāla līmenis) t.i spīdēšanas laiks ir 1 ms katrai diodei. Kopējais mērījumu ātrums ir 1000 mērījumi sekundē, bet tā kā izmantotas divas starojošās diodes, tad laiks ir jāsadala uz katru diodi, rezultātā iegūstam 500 mērījumus sekundē, kas ir pilnīgi pietiekoši, lai novērotu PPG signālu un rekapilarizācijas procesu.

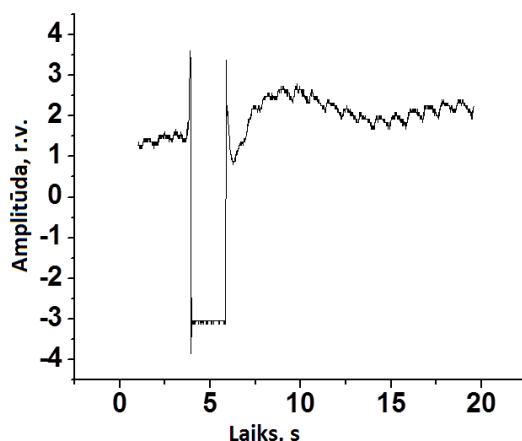
Pārslēgšanās procesu un mērījumu reģistrēšanu veica ierīces centrālais procesors (ARM7TDMI-S LPC2148 no NXP), kas darbojās ar takts frekvenci 48 MHz.



29. att. Zilās starojošās diodes (A) un infrasarkanās (B) diodes ieslēgšanas un izslēgšanas kontroles signālu secība rekapilarizācijas iekārtā.

Atkārtoti izvērtējot un izanalizējot rekapilarizatora iekārtas pirmajā versijā iegūtos rezultātus, tika secināts ka sarežģītai analogai daļai ir ļoti daudz nepilnības, tāpēc iepriekš iegūtos mērījumu rezultātus var uzskatīt par nepilnīgiem. Attēlā 30 redzami lielie signāla pīķi sensora saspiešanas un atlaišanas brīdī, radās no analogā signāla pastiprinātāja un filtra ķēdē esošiem kondensatoriem. Galvenais signāla neprecizitātes iemesls ir kondensatoru izlāde. Analogā signāla ķēdē nedrīkstēja būt kondensatori, jo tie uzkrāj elektrisko lādiņu. Bet savukārt signāla filtri, kas bija shēmā nav iedomājami bez kondensatoriem. Ja to nebūtu, tad nebūt iespējams izfiltrēt un ieraudzīt PPG signālu, šādā salīdzinoši vienkāršā veidā. Tāpēc tika nonākts pie secinājuma, ka jāmaina visa analogā signāla ķēde un pēc iespējas jāvienkāršo. Tāpēc tika izvēlēts izmantot jaunattīstīto digitālo PPG signāla iegūšanas shēmu,

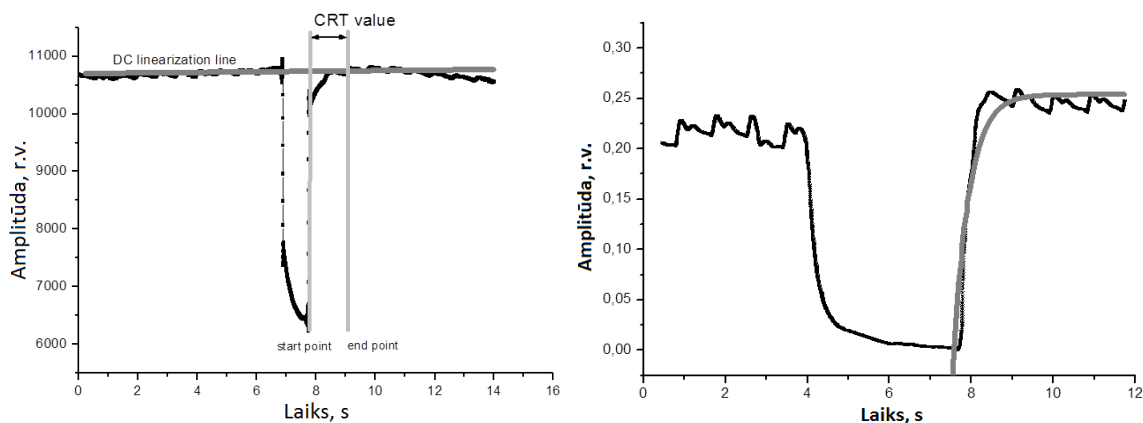
jo tā ir vienkārša un darbojas nevainojami. Par sensora vadu garumu un ekranējumu vairs nav jāsatraucas, jo signāls jau sensora daļā ir ciparu formātā.



30. att. Rekapilarizācijas signāla forma, iegūta izmantojot zilā starojuma diodi. Mērījums veikts ar rekapilarizācijas laika mērīšanas ierīces I versiju.

Kad ierīces prototips tika izgatavots un pārbaudīts praksē un arī veikti mērījumi, problēmas sākās ar datu interpretāciju. Kā jau iepriekš tika uzsvērts – nav skaidras metodes kā precīzi aprēķināt rekapilarizācijas laiku. Tāpēc tika izstrādātas divas metodes, kas varētu līdzēt kapilāru piepildījuma aprēķināšanai un novest pie objektīvākiem rezultātiem.

Vienkāršākā metode „Direct current linearization”, pēc kā rekapilarizācijas laiku nosaka piemeklējot lineāru tuvinājumu. Attēlā 31 var redzēt, ka īsu brīdi (apmēram 6 sekundes), signāla līdzkomponente ir gandrīz konstanta, tātad caur signāla maiņkomponenti var novilkt gandrīz taisnu līkni. Šo līniju var uzskatīt par pamatu rekapilarizācijas laika aprēķinam. Lai aprēķinātu rekapilarizācijas laiku vispirms jāpaskaidro divas galvenās vērtības – sākumpunkta vērtību un beigu punkta vērtību laika skalā. Sākumpunkts ir skaidri definēts – tas ir punkts, kur sensors tiek atlaists. Izmantojot „Direct current linearization” metodi rekapilarizācijas beigu punkta vērtība tiek noteikta atrodot punktu, kur signāla dati šķērso pamata līkni. Rekapilarizācijas laiks tiek aprēķināts atņemot sākumpunkta vērtību no beigu vērtības.



31. att. „Direct current linearization” modelis un rekapilarizācijas laika eksponenciālais modelis.

Cita pieeja tiek izmantota „Dynamics of capillary refill process” metodē. Galvenā ideja ir rekapilarizācijas laika līknei piemeklēt precīzāko eksponenciālo līkni. Kā var redzēt attēlā 31 kapilāru piepildīšanās laiks rada strauji pieaugošu amplitūdu. Tika izveidota eksponenciālā funkcija, lai raksturotu šīs izmaiņas. Parametrs „ y_0 ” apzīmē līdzkomponenti (attālums no nulles līmeņa līdz signālam).

Parametrs „A” nosaka eksponenciālās funkcijas atrašanos uz x ass. Tā ir reāla vērtība, bet ir nepieciešami papildus pētījumi, lai noskaidrotu.

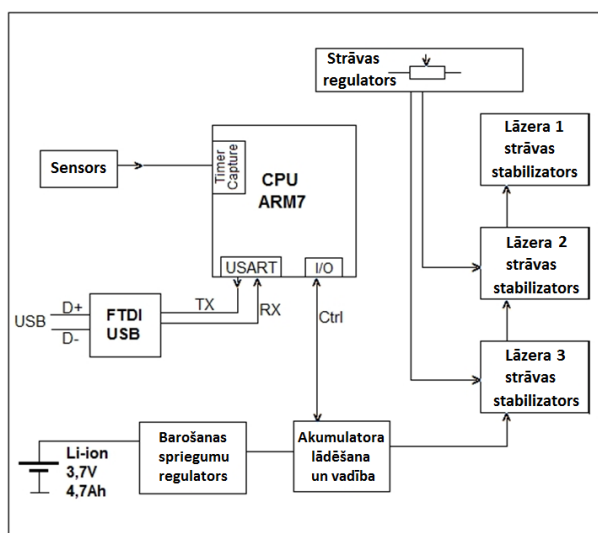
$$y = y_0 - A \cdot \exp\left[\frac{t}{T}\right]$$

Eksponenciālu datu piemērošanai eksponenciālam modelim (funkcijai) tika veikta izmantojot Origin 8 ar nesvērto Simplex iteration funkciju.

3.2.4. Ierīce PPG signālu mērījumiem pie trim viļņu garumiem

Doktorantūras studiju laikā, tika izgatavota vēl viena nozīmīga iekārta ādas bojājumu un pataloģiju novērtēšanai dažādos ādas dziļumos. Metode balstīta uz fotopletizmogrāfijas signālu mērījumiem no dažādiem ādas veidojumiem, piemēram, dzimumzīmēm. Multispektrālā fotopletizmogrāfijas sensora iekāra ir paredzēta perifēriālās asins plūsmas analizēšanai no dažādiem asinsvadu dziļumiem. Starojuma iespīšanās dziļums ādā mainās atkarībā no viļņu garuma, piemēram, zaļā gaisma iespīēžas tikai līdz epidermas slānim (~0,2 mm), bet sarkanās un infrasarkanās gaismas iespīēšanās dziļums var sasniegt 2 – 3 mm, kas atbilst dermas slānim. Tāpēc, vizuāli vienlaicīgi punktveida PPG signāla mērījumi izmantojot dažādu viļņa garuma starotāju var sniegt noderīgu informāciju par ādas pataloģijām.

Tāpēc tika projektēta speciāla multispektrāla PPG signāla mērīšanas iekārta. Inovācija šajā ierīcē ir saistīta tieši ar dažādu viļņa garuma starotāju izmantošanu. Šim nolūkam tika izmantots miniatūrs trīskrāsu lāzers, kuram galā pievienota 5mm gara optiskā šķiedra. Tika izgatavots vēl nebijis fotopletizmogrāfijas sensors, kurā iebūvēta plaša spektrālās jutības fotodiode un trīskrāsu lāzers (405nm, 660nm un 780nm). Shēmas darbības pamatā ir digitālā PPG signāla iegūšanas metode – kuras izmantošana būtiski atviegloja izstrādi. Šī bija pirmā iekārta, kurā tika izmantota signāla multipleksēšanas shēma, tas ir ar vienu fotodiodei uztvert trīs dažādus starojumus. Saprotams, ka vienlaicīgi to nevar izdarīt, jo fotodiode nav spektrometrs kas izšķirtu dažādos viļņu garumus. Tāpēc tika izmantota laika nobīdes mērījumu tehnika. Tas nozīmē, ka uz īsu brīdi (1ms) tiek ieslēgta viena viļņa garuma lāzera diode (pārējās nedarbojas) un veikts mērījums, kas uz laika ass sastāda vienu punktu (tiek iegūta viena mērījuma vērtība). Tad šī lāzera diode tiek izslēgta, bet tiek ieslēgta otra un arī iegūta mērījuma vērtība. Tas pats notiek ar trešo viļņa garuma lāzeru, pēc tam process atkārtojās. Mērījumu vērtības tiek saglabātas trīs dažādos programmatūras buferos kontroliera operatīvajā atmiņā un pēc noteikta laika izsūtītas uz datoru.

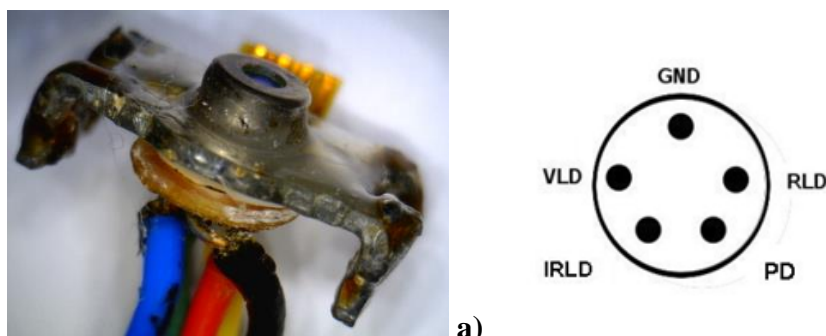


32. att. Trīskrāsu lāzera PPG signāla mērīšanas iekārtas blokshēma.

Mērījumu iekārtu un shēmu darbina un vada iebūvētais 32bitu mikrokontrolieris LPC2148 no *NXP*, kas jau tika izmantots arī vairākās citās LU ASI elektronikas izstrādēs.

PPG signāls uz datoru tiek pārsūtīts reālā laikā izmantojot USB porta savienojumu. Tam nolūkam ir izmantota speciāla mikroshēma FT232 no *Future Technology Devices International*, kas seriālo datu plūsmu no mikrokontroliera UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) protokola konvertē uz USB. Tas nepieciešams, tādēļ, jo mūsdienu datoros praktiski vairs netiek izmantots RS232 (UART) protokols.

Sensorā izmantota trīs viļņu garumu pusvadītāja lāzera diode (33 a att.). Tās izmēri ir 5,6 x 4,4 mm. Tā ir speciāla diode, kur vienā korpusā ir iebūvēti trīs viļņu garumu atsevišķi kristāli, kas var darboties vienlaicīgi. Attēlā 33 (b) ir parādīti lāzera moduļa izvadi.



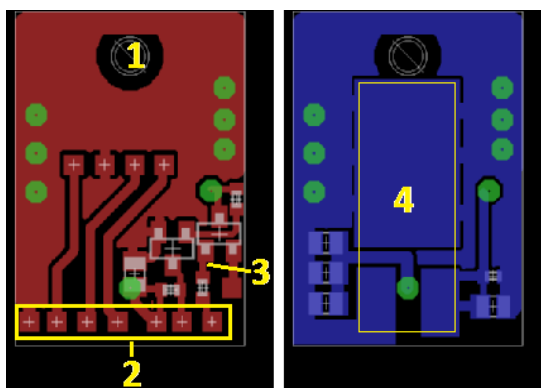
33 att. a) Trīskrāsu lāzera diode. b) Lāzera moduļa izvadi (skats no apakšas), kur VLD – violetās (405nm) lāzerdiodes anods, RLD – sarkanās (660nm) lāzerdiodes anods, IRLD – infrasarkanās (780nm) lāzerdiodes anods, GND – barošanas mīnuss, PD – atbalsta fotodiodes anods.

Shēmā ir iebūvēts lāzera diožu strāvas stabilizators (LM3595), kas nodrošina stabilitu lāzera starojumu un pasargā no pārdegšanas. Katram lāzeram ir savs strāvas stabilizators. Sarkanā 660 nm un infrasarkanā 780 nm lāzera starojuma intensitāte ir regulējama ar iebūvētiem potenciometriem robežās no 90 - 280 μ W. Zilā 405 nm lāzera jauda visu laiku ir konstanta. Tas darīts tāpēc, ka zilā starojuma iespiešanās dziļums ādā ir ļoti mazs (~200 μ m), tādējādi iegūt stabilu PPG signālu šajā spektra diapazonā ir grūti un reālos mērījumos vienmēr vajadzēja paaugstināt intensitāti. Līdz ar to efektīvais regulēšanas diapazons ir ļoti niecīgs, tāpēc regulācija 405 nm lāzeram netika veikta.

Ierīces shēma darbojas no lielas ietilpības iebūvētā litija jonu akumulatora 3,7V, 4,7Ah. Ierīcē tika iebūvēta arī li-ion akumulatora lādēšanas shēma, kas lielās ietilpības akumulatoru var uzlādēt ~ 8 stundās. Tas nav īpaši ātri, bet taisīts ar nolūku saudzēt akumulatoru to lādējot ar ~1/10 ampēru no akumulatora ietilpības.

Tā kā PPG signāla iegūšanai tika izmantota digitālā mērījumu metode un izmantots zilā starojuma lāzers, tas nosaka, ka tikai refleksijas sensora konstrukcija ir pieļaujama.

PPG sensors ar mērījumu iekārtu ir savienots ar 1 metru garu kabeli. Sensora plates izmērs ir: 22 x 15,5 mm. Galvenais aktīvais PPG signālu detektējošais elements ir fotodiode ФД269 (34 att. (4)) (jutības diapazons 0,4 – 1,1 μ m), aktīvās virsmas laukums ir 5 mm². Spektrālā jutība ir nobīdīta uz infrasarkanā starojuma pusi – 850 nm. Sensora konstrukcijā tika izmantota speciāli pulēta 5mm gara optiskā šķiedra ar apvalku (Ø3mm) (lāzera diode ir novietota plates otrā pusē (34. att. (1)) ir rasējuma caurums priekš šķiedras). Optiskā šķiedra novērš lāzera diodes tiešu saskari ar ādu. Ar 2 atzīmēts lāzera vadības kontaktu savienojums.



34. att. izveidotais trīskrāsu lāzera PPG signāla sensora rasējums (divslāņu plate).

Projekta izstrādes gaitā tika izstrādāta speciāla datorprogramma multispektrālo PPG signālu apstrādei un analīzei [45].

Tā kā lāzera diodes tiek laikā „modulētas”, tad attiecīgi starp mērījumiem ir neliela nobīde. Starp zilo un infrasarkano ir 2 ms, jo vispirms tiek ieslēgts zilais lāzers (mērījums ilgst 1ms), tad sarkanais un tikai pēc tam infrasarkana. Analizējot mērījumu datus šī laika nobīde tiek ņemta vērā.



35. att. Izveidotā multispektrālā PPG signāla mērīšanas iekārta – kopskats.

Prototipa iekārtas izmērs ir: 140 x 90 x 35 mm, svars 250 grami (akumulatoru ieskaitot). Ierīces priekšpanelī ir izvietotas divas gaismas diodes, kur viena parāda ierīces ieslēgtu stāvokli, bet otra brīdina par izlādējušos akumulatoru. Sensora korpuss ir izgatavots no vienkomponta gumijas veida hermētiķa masas *Silicone Gasket Sealant 1K*.

3.2.5. Bezvadu uzpirkstenis (I versija)

Doktora studiju sākumā tika turpināts darbs pie jau iesāktas izstrādes – bezvadu fotopletizmogrāfijas signāla mērīšanas ierīces. Galvenais mērķis bija uztaisīt vienkāršu iekārtu, kas no pirksta detektētu PPG pulsācijas un izmantojot Bluetooth savienojumu pārraidītu datus uz bāzes datoru. Uzdevums bija elektronikas shēmu savienot ar pulsoksimetrijas sensoru, izveidojot bezvadu PPG uzpirksteni (36. att.).

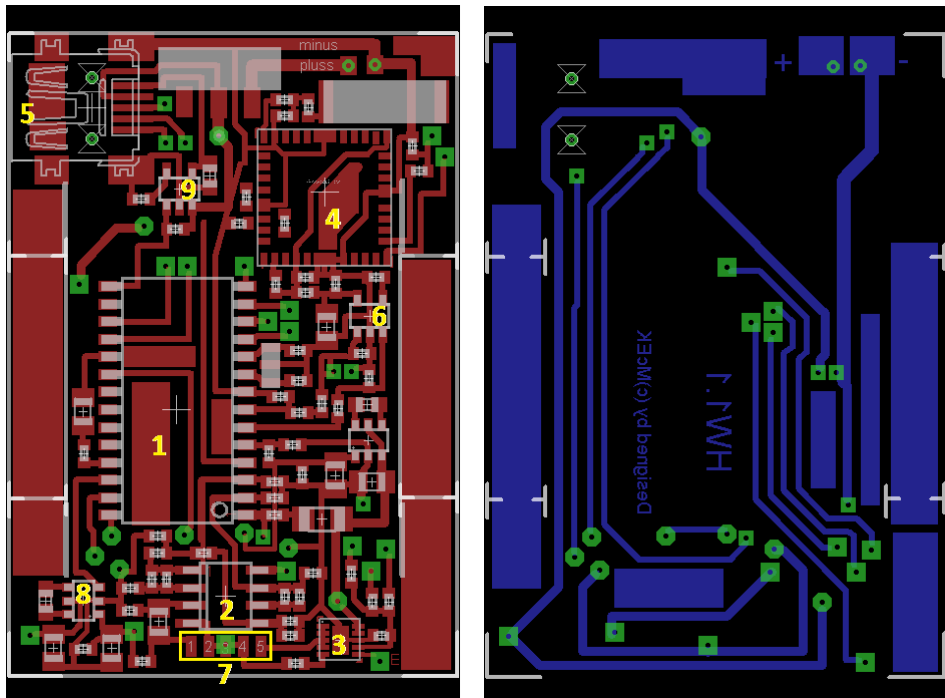


36. att. Bezvadu uzpirksteņa pirmās versijas prototips.

Uzpirkstenis sastāv no divslāņu elektronikas plates (37. att.) uz kuras uzmontētas visas komponentes 8 bitu procesors PIC18F2620 (1) no *Microchip*, zema sprieguma krituma 3,3V regulators LP2985 (6) no *Texas Instruments*, akumulatora uzlādes shēma LTC4054ES5-4.2 (9) no *Linear Technology*, II jaudas klases (~2,5mW) Bluetooth modulis BTEZ1702FA (4) no *Samsung*, starojošās diodes strāvas stabilizators LM3595 (3) no *Texas Instruments*, operacionālais pastiprinātājs LM358 (2) no *Texas Instruments*, līdzsprieguma paaugstināšanas shēma priekš operacionālā pastiprinātāja LTC1754-5 (8) no *Linear Technology*). Uz plates ir montēta miniUSB ligzda (37. att. (5)) caur, kuru var uzlādēt ierīces akumulatoru NOKIA BL-5B.

Infrasarkanā starojošā diode un uztverošā fotodiode tika iemontēta standarta pulsoksimetrijas sensorā (ražotājs *Nellcor*). Savienojošie kontakti (37. att. (7)) rasēti uz plates un nodrošina savienojumu ar fotiodiodi un infrasarkano starojošo diodi (940nm).

Fotopletizmogrāfijas signāla pastiprināšanu veic dubultais operacionālais pastiprinātājs LM358, tā izeja ir pievienota pie PIC mikrokontroliera 10 bitu ACP ieejas. Tas veic signāla digitalizēšanu, lai to varētu pārsūtīt caur Bluetooth izmantojot SPP (Seriālā Porta Profilu).



37. att. Bezvadu PPG ierīces elektronikas shēmas plates rasējums divos slāņos.

Fotopletizmografijas signālu mērījumi tika veikti LU ASI Biofotonikas laboratorijā uz brīvprātīgiem. Mērījumu rezultāti ar izveidoto ierīci ļāva iegūt fotopletizmografijas signālu no pirksta. Profesionālais pulsoksimetra sensora korpuss nodrošināja labu kontaktu ar ādu, attiecīgi arī pulsācijas detektējošo fotodiodi. Ietilpīgais litija jonu akumulators (800mAh) nodrošināja ierīces nepārtrauktu darbību līdz pat 8 stundām (varēja manīties no uzstādītās starojošās diodes strāvas). PPG signālu datu pārraidi ~ 8 m rādiusā nodrošināja iebūvētais Bluetooth modulis. Dati tika sūtīti uz stacionāro datoru – PPG signālu attēlošanai un saglabāšanai.

Apkopojot šīs nelielās ierīces iegūtos PPG mērījumu rezultātus varēja secināt, ka ievērojami, jāpilnveido analogā signāla iegūšanas un pastiprināšanas daļa (operacionālais pastiprinātājs). Izveidotā PIC mikrokontroliera programmatūra neļāva iegūt lielu mērījumu ātrumu (maksimāli 100 mērījumi/sekundē). Tas nav pietiekoši optimālai signāla analīzei. Mērījumu rezultāti nav prezentēti šajā darbā, jo līdz pilnībai vēl bija tāls ceļš ejams, bet uzskatu, ka šī iekārtas izstrāde bija ļoti nozīmīga un deva man daudz jaunu izaicinājumu un zināšanas, tāpēc iekļāvu to darba aprakstā. Dažādu nepilnību ietekmē diezgan ātri tika pieņemts lēmums izstrādāt uzpirkšteņa II versiju.

3.2.6. Bezvadu uzpirkstēnis (II versija)

Bezvadu uzpirkstēņa otra versija tika izveidota balstoties uz zināšanām, kas iegūtas projektējot pirmo versiju. Tika izmēģināti un testēti arī jauni elementi ar kuriem līdz šim nebiju darbojies (piemēram, fotodiode ar iebūvētu pastiprinātāju). Lielā mērā arī šis uzpirkstēņa versijas variants bija tests, bet jau nopietnākā tehniskā līmenī.

Sākot darbu viens no uzstādījumiem bija vienkārša lietošana un ātrdarbība. Izstrādes mērķis un lietotāju mērķauditorija, bija plānota diezgan plaša:

- Varētu lietot prezentācijās mācību iestādēs,
- Studentu pētnieciskajos laboratorijas darbos,
- Sporta ārsti, fiziologi, sportistu fiziskās slodzes novērošanā.
- Izmantojot iekārtu lekcijās, izstādēs, prezentācijās,ursos un konferencēs varēs ērti demonstrēt cilvēka sirdsdarbību, tādējādi aicinot cilvēkus vairāk domāt par savu veselību,
- Tiktu izstrādāta jauna veida veselības monitoringa ierīce,
- Veicinās skolēnu un studentu interesi par medicīnu un elektroniku,
- Veicinās pieredzes iegūšanu saistībā ar jaunu informācijas tehnoloģiju apgūšanu,
- Tiks parādīts, ka Latvijas Universitātē tiek veikti ne tikai teorētiski pētījumi, bet arī praktiska iekārtu izstrāde, izmantojot jaunākās pašlaik pieejamās digitālās tehnoloģijas,
- Vienkāršā veidā informēs cilvēkus par iespējamajām asinsvadu un sirdsdarbības slimībām un to diagnosticēšanu,
- Aicinās cilvēkus vairāk rūpēties par savu sirdsdarbību un asinsriti,
- Sportistu fizisko aktivitāšu uzlabošana.
- Izgatavot portatīvu efektīvu un neinvazīvu cilvēka asinsrites monitoringa iekārtu,
- Izveidot programmatūras algoritmus, kas spētu reālā laikā iegūt un apstrādāt PPG signālus,
- Izmantojot bezvadu datu pārraidi, izveidot vienkārši lietojamu iekārtu monitoringa sistēmu.

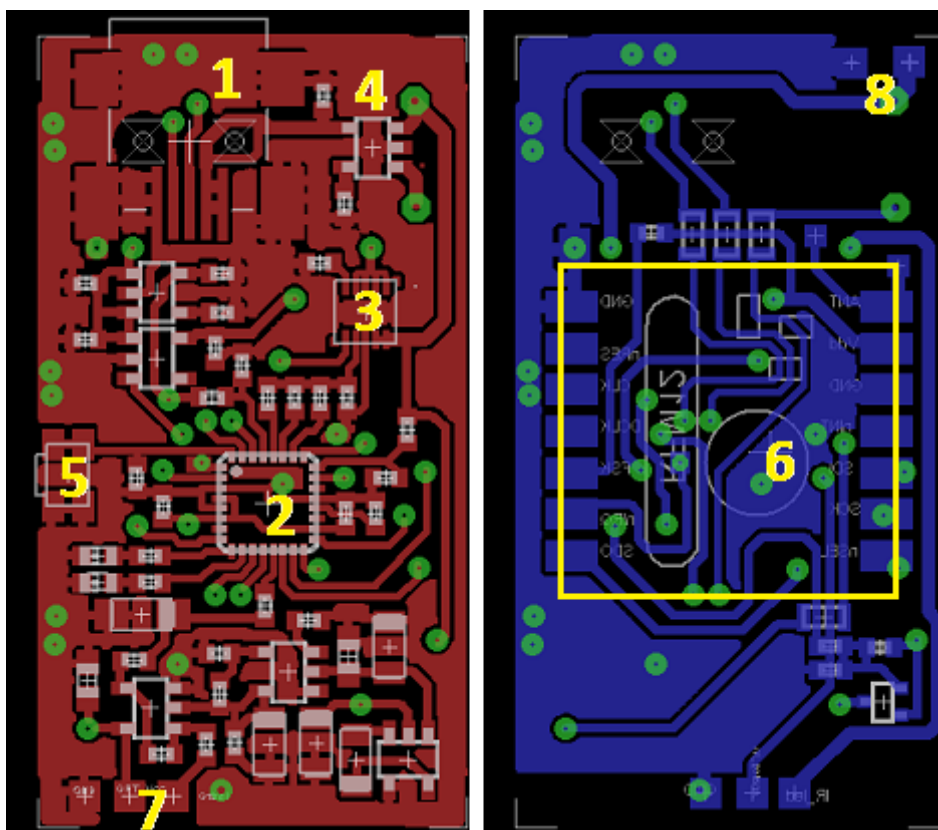
Jauninājums bija – izmantot jaunu bezvadu datu pārraides moduli, atsakoties no Bluetooth. Kā zināms, tad Bluetooth savienošana ar datoru prasa zināmu laiku un mazliet arī iemaņas, kā to darīt. Sapārojot Bluetooth ierīces bieži vien ir jāievada PIN kods un jāpārlicinās kādu virtuālo COM portu dators uzģenerēja. Visas šīs darbības zināmā mērā var traucēt veiksmīgu ierīces parametru uzstādīšanu. Tāpēc nosacījums bija – ierīcei ir jādarbojas uzreiz to ieslēdzot, bez jebkādas sapārošanas. Vistuvāk uzstādījumam atbilda „brīvi programmējamie raidītāji”. Izpētot dažādus ražotāju piedāvājumus uzmanību piesaistīja RFM12B no *HopeRF* Darbības frekvence 868MHz, darbības rādiuss var sasniegt 50 metrus, tiešā redzamībā.

Izpētot elektronikas komponentu ražotāju mājas lapas šajā gadījumā Texas Instruments tika uzņemta plaša spektra fotodiode ar iebūvētu operacionālo pastiprinātāju OPT101 (38. att.).



38. att. PPG uzpirksteņa sensora fotodiode ar iebūvētu pastiprinātāju OPT101 [46].

Tas bija, kas jauns un vēl neizmēģināts. Tehniskā specifikācija atbilda uzpirksteņa shēmas projekta uzstādījumiem: vienpolāra barošana no 2,7V līdz 36V, zems strāvas patēriņš 120 μ A, fotodiodes spektrālās jutības maksimums infrasarkanajā spektra daļā 850nm, fotodiodes aktīvās virsmas izmēri 2,28 x 2,28 mm, korpuss DIP-8. Tāpēc tika nolemts PPG signāla detektēšanai sensora daļā izmantot tieši šo augšminēto mikroshēmu (fotodiode). Projektējot shēmu tika izmantotas jau iepriekšējā versijā testētas komponentes – akumulatora lādēšanas shēma LTC4054ES5-4.2 (4), infrasarkanās starojošās diodes strāvas regulators LM3595 (3), divi zema sprieguma krituma 3,3V regulatori LP2985, viens mikrokontroliera ATMEGA168-20M (2), otrs raidītāja RFM12B (6) barošanai. Shēmas plāte tika rasēta ļoti rūpīgi un ievērojot elektronikas komponentu ražotāju noteiktās prasības (39. attēls).

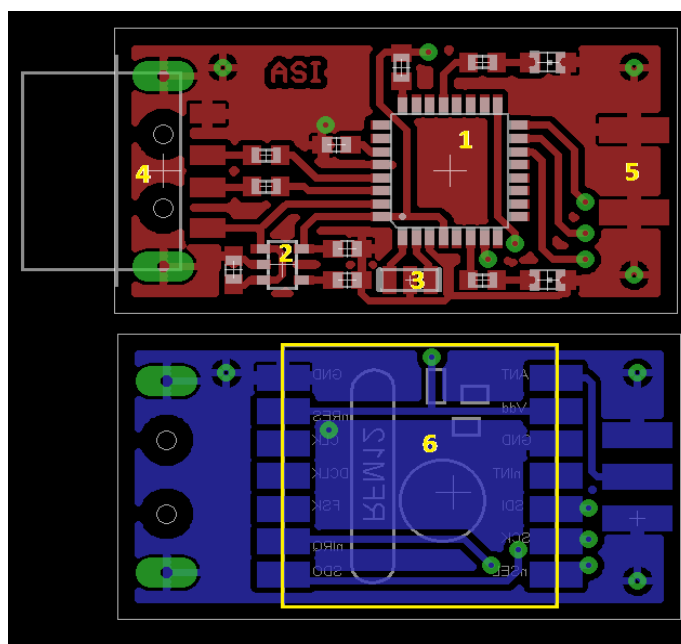


39. att. Bezvadu PPG uzpirksteņa II versijas shēmas divslāņu plātes rasējums.

Uz plates tika montēts miniUSB savienojuma ligzda (1), akumulatora lādēšanai un kontroliera programmēšanai. Attēlā 39 ar 7 un 8 parādītas attiecīgi sensora OPT101 un akumulatora pieslēguma vietas. Plates malā novietots mikroslēdzītis (5), ar kuru iekārtu var ieslēgt un paturot nospiestu divas sekundes izslēgt. Plates izmērs ir 20 x 38 mm. Šī bija pirmā reize, kad izstrādātā shēmas plate tiek izgatavota rūpnieciski. Līdz šim visas projektētās shēmas tika izgatavotas pašu spēkiem. Rūpnieciski izgatavotas plates priekšrocības ir augstā kvalitāte, slāņu savienojošo caurumu metalizācija, visas plates ir pilnīgi vienādas, kontaktvirsmas ir apalvotas un celiņi ir pārklāti ar ļoti izturīgas aizsarglakas kārtu, kas pasargā no oksidēšanās un bojājumiem lodējot.

Ar uzpirksteņa raidītāja daļu vien ir par maz, lai ierīci uzskatītu par pabeigtu. Lai notiktu komunikācija ir jābūt gan raidītājam, gan uztvērējam. Tāpēc tika projektēta arī uztvērēja daļa ar USB datu pārsūtīšanu uz datoru. Tas, iespējams, lietotājam var radīt nelielas neērtības, jo visu laiku ir jānēsā līdzī ne tikai bezvadu uzpirkstenis, bet arī uztvērējs, kas pievienojams pie datora USB porta. Bet šīs nelielās neērtības atsver ierīces savienojuma un uzstādīšanas ātrdarbība. Uztvērējs ir gatavs darbam praktiski uzreiz pēc pievienošanas USB portam.

Uztvērēja daļa tika izgatavota uz neliela izmēra (33 x 17 mm) divsplāņu platītes (40. att.) Vienā pusē atrodas USB kontrolieris AT90USB162 (1), sprieguma stabilizators no USB 5V uz 3,3V LP2985 (2), 8MHz kvarca rezonators - stabilas USB darbības nodrošināšanai (3), USB kontaktligzdas (4) un 868MHz antenas spraudnis (5). Plates otrā pusē ir novietots tikai uztvērēja modulis RFM12B (6). Uztvērēja elektronikas plate ir diezgan vienkārša tāpēc tika izgatavota pašu spēkiem un pārklāta ar caurspīdīgu poliuretāna laku, kas pasargā elektronikas komponentes no ārējas vides iedarbības.

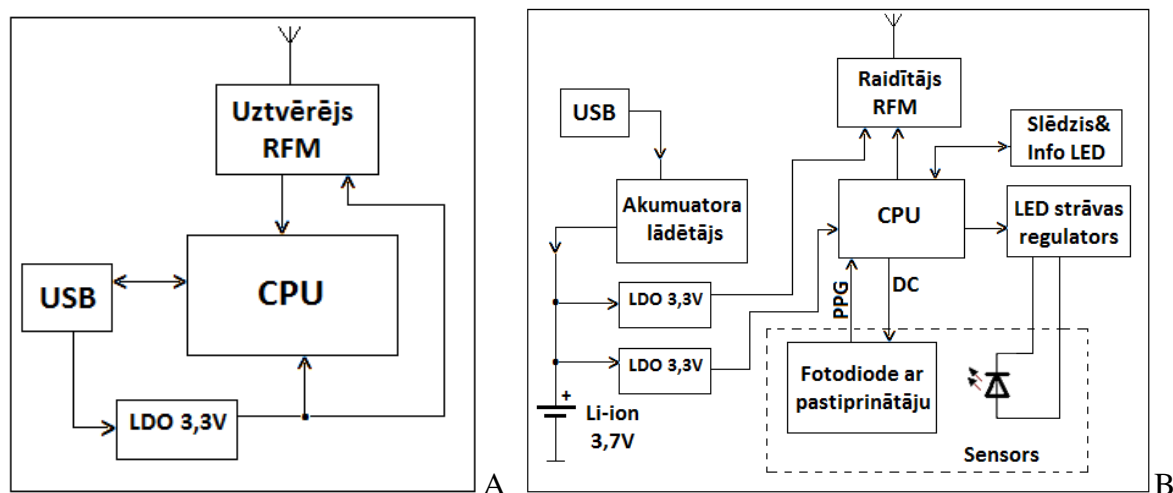


40. att. Uzpirksteņa uztvērēja USB plates rasējums, divos slāņos.

USB uztvērēja daļas darbība ir sekojoša: tika izvēlēts vadības kontrolieris AT90USB162 no *Atmel*, ar iebūvētu USB protokola atbalstu. Tas ievērojami atvieglo izstrādi, programmēšanas ziņā, jo USB datu komunikācija ir ļoti sarežģīta. Lai elektronikas izstrādātājiem un programmētājiem nav jāiegulda milzīgs darbs, pašas nepieciešamākās USB konfigurācijas komandas un atbalsts ir integrēts mikrokontrolierī, kas arī pilnībā tika izmantotas.

Uztvērējam nav nepieciešams ārējais barošanas avots, strāva tiek ņemta no datora USB porta. Standarta gadījumā USB nodrošina 100mA lielu strāvu. Vienkāršoti runājot standarta gadījums ir USB vadu savienojums, pie kura pievienojot jebkādu 5V patērētāju var tikt iegūta 100mA strāva. Otrs gadījums ir konfigurējams izmantojot USB protokolu, kad kādas ierīces darbības nodrošināšanai nepietiek ar 100mA, tad nosūtot atbilstošu ziņojumu datora USB kontrolieris var pārslēgt strāvas ierobežojumu uz 500mA. Tā kā uztvērēja modulis nepatērē tik daudz strāvas, tad varēja iztikt bez speciālas konfigurācijas.

Uztvērēja datu apmaiņa ar kontrolieri notiek izmantojot SPI (Serial Peripheral Interface) protokolu. Tas ir salīdzinoši vienkārši programmējams – seriāla datu apmaiņa. Ierīcē ir divas informatīvas gaismas diodes, kas parāda aktīvu savienojuma datu plūsmu un USB barošanas sprieguma esamība. Uztvērēja elektronikas darbības blokshēma ir parādīta (41. attēlā (A)).



41. att. Uzpirksteņa (versija II) datu uztvērēja elektronikas darbības blokshēma.

Uzpirksteņa programmatūrā ir iestrādāta funkcija, kas kompensē fotopletizmogrāfijas signāla līdzkomponenti.

Patērētā strāva raidīšanas režīmā 40 mA, 3 fiksēti starojošās diodes intensitātes līmeņi. Tos regulē kontrolierī iebūvētā programmatūra.

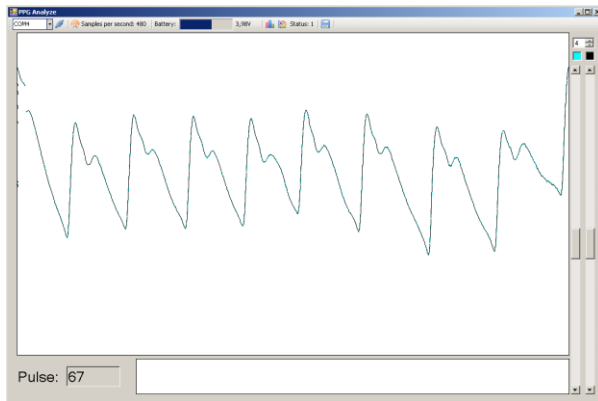
Akumulatora piemeklēšana galvenokārt balstījās uz minimālu izmēru. Tāpēc tika atrasts neliela izmēra 20 x 5 x 25 mm, Li-ion tehnoloģijas 3,7V 240mAh akumulators. Nelielā elektronikas shēmas plate kopā ar akumulatoru, tika iekausēti caurspīdīgā polimēra izolācijā, kas nodrošināja, savienojuma ar uzpirksteņa korpusu, stabilitāti un pasargāja komponentes no iespējamiem ārējiem mehāniskiem bojājumiem. Korpusā nebija brīvas vietas, lai iebūvētu speciālu raidītāja moduļa antenu, tāpēc šo funkciju pildīja paralēli shēmas platei novietots izolēts vadiņš.

Darba izstrādes gaitā, lai attēlotu detektētās fotopletizmogrāfijas signālu pulsācijas tika izveidota vienkārši lietojama un pārskatāma datorprogramma (42. att.). Tai ir tikai viens logs ar informatīvām sadaļām augšpusē un apakšpusē. Loga vidū tiek rādīts reālā laikā saņemtais PPG signāls no uzpirksteņa. Apakšā kreisajā pusē tiek attēlota datorprogrammas izrēķinātā pulsa vērtība, kas atjaunojas katrā pulsācijas ciklā. Loga augšdaļā tiek attēloti tikai nepieciešamākie informatīvie ziņojumi (uzpirksteņa akumulatora uzlādes līmenis, mērījumu ātrums, informācija par aktīvu savienojumu un izmantoto komunikācijas portu). Šeit arī ir novietota datu saglabāšanas poga. Pirmoreiz izstrādātajā programmā tika integrēts, FIR (*Finite Impulse Response* - galīgas impulsa reakcijas) filtrs, kas veic PPG signāla filtrēšanu reālā laika režīmā [47]. Filtra izstrāde bija nopietns izaicinājums, jo nekad iepriekš tas nebija darīts un nevienā LU ASI izstrādātajā programmā tāds nav bijis. FIR filtrs bija nopietna inovācija, kas apvienota un izmantota PPG signāla filtrēšanā pirms tā attēlošanas.

Galīgas impulsa reakcijas filtri ir filtri, kuru reakcija uz impulsu ir galīga. Tas nozīmē, ka,

ja ieejā padod signālu, kurā visas ir nulles, izņemot vienu vienīgu vērtību (to sauc par impulsa reakciju – impulse response), tad arī izejā parādīsies galīgs signāls. Šāda veida filtri ieejas signālu vienkārši pārvērš izejas signālā, tam piemērojot attiecīgus koeficientus. Mainot koeficientu vērtības un skaitu ar FIR filtriem var iegūt jebkādu frekvenču raksturlīkni. Koeficientu skaitu filtrā sauc arī par filtra garumu [48].

Programmas loga augšējā labajā stūrī ir neliels lauks, kurā ievadot skaitļus no 1 – 9 iespējams mainīt FIR filtrēšanas pakāpi. Tā mainās reālā laikā, līdz ar to lietotājs uzreiz var redzēt izmaiņas. Programma ir rakstīta Microsoft Visual Studio C# vidē.



42. att. PPG signāls no bezvadu uzpirksteņa un izveidotā bezvadu PPG uzpirksteņa (II versija) un USB uztvērēja kopskats.

Galvenās priekšrocības:

- Vienkārši lietojams
- Iebūvēts standarta pulsoksimetra sensorā
- Integrēts Li-ion akumulators ar uzlādes shēmu
- Mērījumu ātrums 500 mēr./sek.
- Pārraides attālums 10 metri telpās (50m tiešā redzamībā)
- Izveidota programmatūra un digitālie filtri (FIR)
- Izmantošana: sirdsdarbības monitorings, prezentācija, apmācība, analīze

3.2.7. Tekstilizstrādājumi ar iestrādātiem PPG sensoriem (I versija)

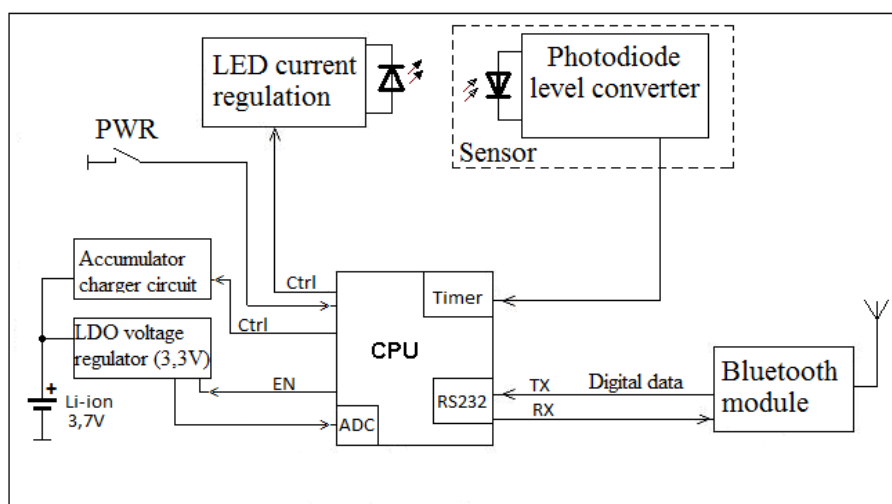
Projekta ietvaros tika izveidota miniatūra elektronikas shēma ar bezvadu datu pārraidi, kas paredzēta integrēšanai „viedā apģērbā”. Mērķis bija izstrādāt vienkanāla fotopletizmogrāfijas signālu mērīšanas prototipa iekārtu un izmantojot Bluetooth datu pārraidi reālā laikā pārsūtīt mērījumus uz datoru. PPG signālu reģistrēšana bija plānota galvenokārt no mazkustīgām ķermeņa daļām (piere, auss u.c.).

Elektronikas shēmas izstrāde balstījās uz vairākām jau citos projektos un darbos izgatavotām, pārbaudītām lietām un shēmu elementiem. Tas viss tika apvienots un papildināts izstrādājot šo pieres lentes prototipa shēmu. Shēma tika izveidota divās līdzīgās versijās, kurās atšķiras tikai elektronikas shēmas rasējums (tas tika ievērojami uzlabots II versijā). Tāpēc darbā apskatītas tikai būtiskākās atšķirības.

„Viedā apģērbā” kā arī pieres lentes darbības blokshēma ir parādīta 43 attēlā. Elektronikas shēma ir samēra vienkārša – centrālais vadības mikrokontrolieris LPC2148 ir ierīces „sirds”.

Īpaši daudz pūles tika veltītas miniatūrās plates rasēšanai, tas nozīmē, ka elektronikas komponenti jāizvieto pēc iespējas optimālāk, savienojošo celiņu garumiem ir jābūt īsiem un optimizētiem un galvenais saņemējuma (mīnusa) celiņa platībai jābūt vislielākai. To ir diezgan grūti un nevienmēr iespējami nodrošināt, ja ir maza izmēra platīte vai arī ir atvēlēti tikai divi slāņi. Parasti tā arī ir, jo četrus slāņu plates var izgatavot tikai rūpnieciski, tās ir ļoti dārgas un Latvijā nav nevienas firmas, kas to varētu izdarīt. Tuvākā ir Igaunijā.

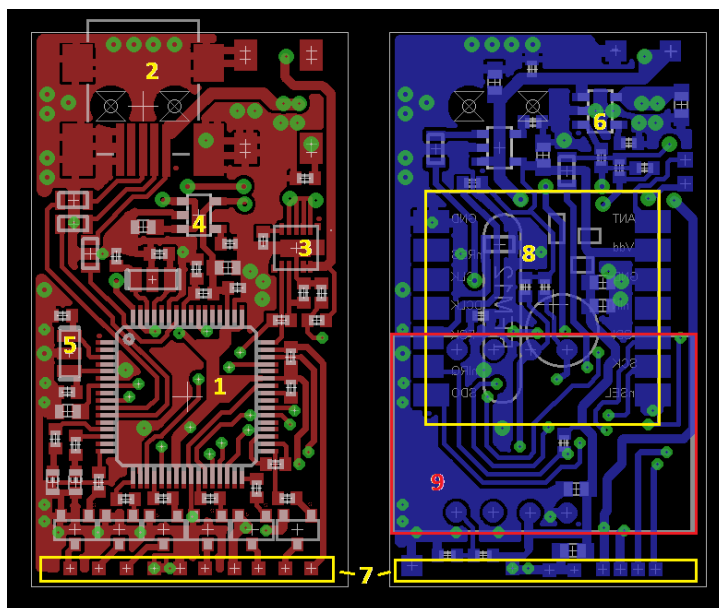
Otra lieta, kas projektējot shēmu bija svarīgi – elektroenerģijas taupīšana. Tāpēc tika izveidots īpašs shēmas elementu slēgums, kas nodrošināja pilnīgu nulles patēriņu, kad ierīce ir izslēgta. Tas tika panākts elektroniski atvienojot visas komponentes tai skaitā mikrokontrolieri (CPU). Kad lietotājs nospiež ieslēgšanas pogu „PWR” (43 attēlā), barošanas spriegums tiek pieslēgts pie CPU. Pogas nospiešana ilgst apmēram 150 ms un vairāk, tad ir pilnībā pietiekoši, lai vadības mikrokontrolieris saņemis 3,3V barošanas spriegumu varētu uzsākt programmatūras izpildi un padodot augstu līmeni uz sprieguma stabilizatora izvadu „EN” nodrošinātu tā pastāvīgu darbību. Gadījumā, ja programmatūra „uzkaras” vai pārstartējās (attiecīgi uz „EN” parādās 0V līmenis), ierīce izslēgsies.



43. att. Bezvadu PPG „viedā apģērbā” blokshēma.

Iekārtas izstrādes pirmajā stadijā tika uzprojektēta divslāņu shēmas plate, kas satur visus pilnvērtīgai darbībai vajadzīgos komponentus: mikrokontrolieri (1), miniUSB ligzda (2) (akumulatora lādēšanai), sensora infrasarkanās starojošās diodes strāvas stabilizators LM3595 (3), mikrokontroliera barošanai zema sprieguma krituma 3,3V regulators LP2985 (4), 5 – Kvarca oscilators 8MHz, kontroliera takts frekvences nodrošināšanai, 6 – litija jonu

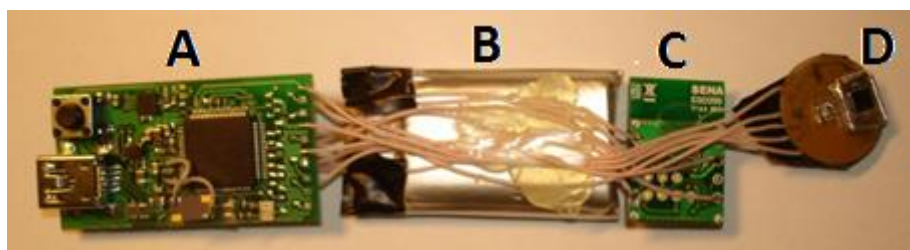
akumulatora uzlādes shēma, 7 – PPG sensora pieslēgvietas, 8 – bija paredzēts programmējams raidītāj/uztvērējs RFM12B (kas tā arī netika izmantots), 9 – Bluetooth modulis Parani-ESD100 no *SENA*. Dažādu tehnisku nepilnību dēļ tas arī tur netika uzmontēts, bet savienots ar vadiņiem ārpus plates.



44. att. Bezvadu PPG pieres lentas elektronikas divslāņu plates rasējums I versija.

45 attēlā parādīts, jau pilnībā salodēta un samontēta pieres apsēja elektroniskā shēma PPG signāla detektēšanai. A – galvenā plate ar mikrokontrolieri, B – 240mAh litija jonu akumulators, C - ESD100 Bluetooth modulis, D – PPG sensors ar fotodiodei (apkārt aplikta metāliska gaismu norobežojoša barjera) un infrasarkanā starojošā diode.

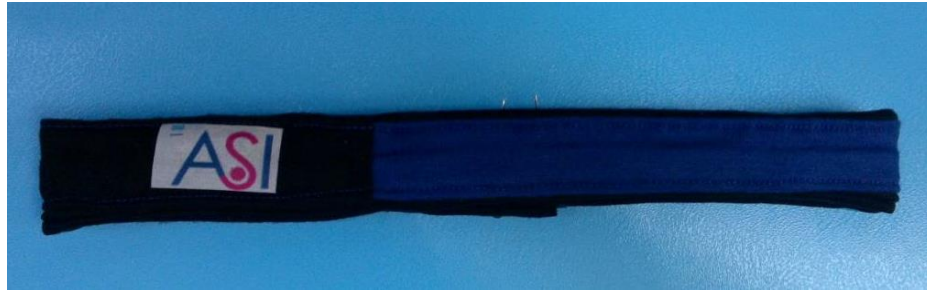
Trauslākā vieta šajā konstrukcijā bija vadiņu savienojuma vieta ar plati (jo tie ir mīksti un lokani). Shēma tika iesūta pieres apsējā (46 attēls). Lietošanas un kustību dēļ vadiņi vienmēr lūza.



45. att. Pieres apsēja lentes elektroniskā shēma pirms iestrādes tekstilmateriālā.

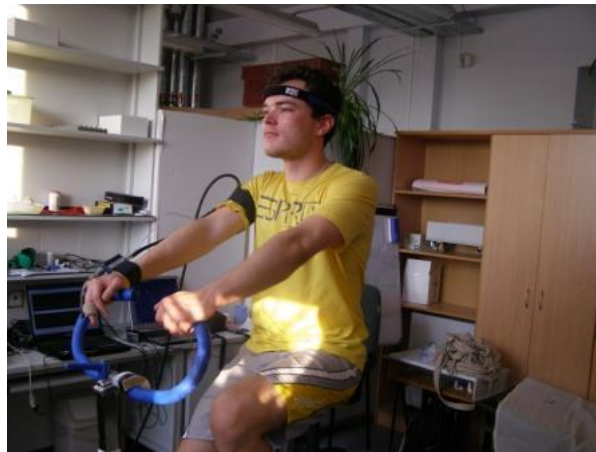
Atsevišķa problēma ar ko bija jāsaskaras miniUSB ligzda, ierīces ieslēgšanas poga un divas informatīvās gaismas diodes (norāda ieslēgtu stāvokli un trīs akumulatora izlādes stāvokļus) integrēšana apsējā, tā lai lietotājs var ērti uzlādēt pievienojot miniUSB spraudni, ērti ieslēgt un izslēgt ierīci neplēšot vaļā tekstilizstrādājumu. Daļēji šī problēma tika risināta atstājot neaizsūtu lentes galu, kas aizdarīts ar lipīgo velkro materiālu un virs gaismas diodēm no plānas silikona kārtiņas izveidots neliels caurspīdīgs lodziņš. Šāds risinājums nav ļoti ērts no lietotāja viedokļa, bet pieņemams pirmajam prototipa variantam.

Iekārtas mikrokontroliera programmatūra tika izveidota tā, ka nejaušs ieslēgšanas pogas nospiediens nepārtrauc mērījumu datu plūsmu (tas attiecas arī viedā apģērba shēmas II versiju).



46. att. Pieres apsēja lente – pabeigta kopskats.

Pieres apsēja pirmais prototips tika testēts LU Bioloģijas fakultātē uz brīvprātīgiem. PPG sensors tika novietots deniņu pusē pie artērijas. Pieres apsējā netika izveidotas īpašas norādes, kurā vietā uz galvas jānovieto PPG sensors. Ideālais ierīces modelis bija plānots, tāds, ka lietotājam nebūtu jādomā par šīm niansēm. Lai gan realitātē, šajā variantā tā tas nestrādāja. Tā kā PPG sensors vienmēr ir optisks, tad fotodiodei un starojošai diodei, ir cieši jāpieguļ pie ķermeņa vietas kur tiek veikts mērījums. Jo labāks kontakts un ierobežots sensora piespiediena spēks, jo labākus rezultātus iespējams iegūt. Ierīce tika testēta fiziskas slodzes apstākļos – viens no testiem tika veikts uz velo trenāžiera. Pirmie testa rezultāti uzrādīja, ka PPG signāla pulsācijas iespējams detektēt, bet sensora uzlikšana un pareiza piespiešana prasa rūpīgu pieeju. Ādas virsmas kustības ievērojami traucēja kvalitatīva PPG signāla pierakstīšanu. Tāpēc tika nolemts izveidot ierīces II versiju un censties maksimāli novērst apzinātās nepilnības.

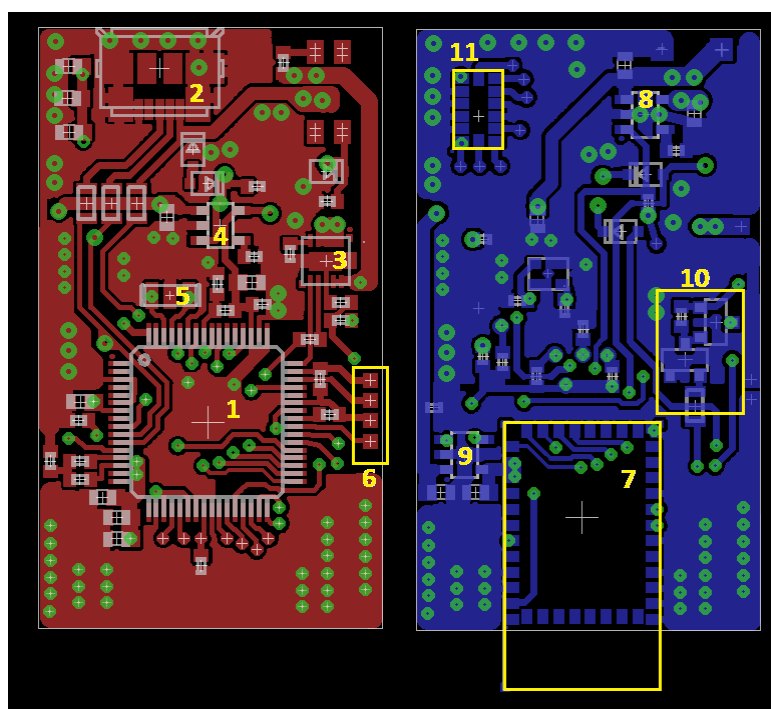


47. att. Fizioloģisko mērījumu veikšana LU Bioloģijas fakultātē uz velo trenāžiera izmantojot spiediena mērītāju un pieres apsēju.

3.2.8. Tekstilizstrādājumi ar iestrādātiem PPG sensoriem (II versija)

Miniatūrās bezvadu PPG signāla mērīšanas ierīces II versija tika izgatavota drīz vien kad tika apjaustas nepilnības pirmajā versijā. Viens no svarīgākajiem iemesliem bija vēlme ierīci uztaisīt kvalitatīvāku, pilnvērtīgāku stabilāku darbībā un drošāku. Ar to domājot, piemēram, Bluetooth moduļa novietošanu uz plates, jo kā pierādījās no pirmās versijas lietošanas, tad savienojošie vadi ātri salūzt. Tas ir īpaši nepieņemami, ja shēmiņa ir iestrādāta kādā apgērbā. Līdz ar to viens no nosacījumiem bija, ka uz plates ir jābūt pēc iespējas vairāk komponentēm.

Tieši tad apmeklēju SPIE konferenci Minhenē (Vācijā) un ieguvu daudz jaunas informācijas un tai skaitā arī uzzināju par jaunu Bluetooth moduli LMX9838 no *National Semiconductor*. Šis modulis ievērojams bija ar saviem maziem izmēriem (10 x 17 x 2 mm), vienkāršo pieslēgšanu un programmēšanu, kā arī ar pilnībā integrētu 2,4 GHz antenu. Tas bija, kas jauns un likās ļoti piemērots integrēšanai apgērbā, kur tieši ir būtiski, lai komponenti būtu pēc iespējas mazāki un pilnīgāki. Tāpēc II versijā tika izmantots šis Bluetooth modulis. Plate tika pārveidota un papildināta (48. att.). Elektroniskā shēma praktiski palika bez lielām izmaiņām.

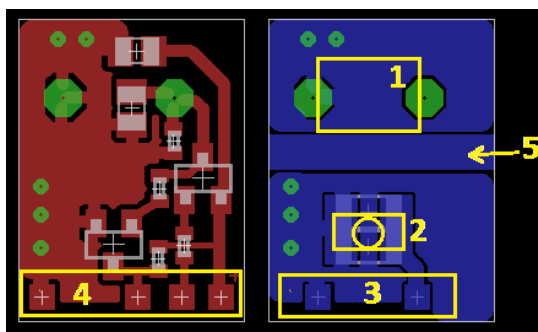


48. att. Bezvadu PPG „viedā apgērba” elektronikas plates rasējums (2 slāņos).

48 attēlā parādīts „viedā apgērba” elektronikas plates rasējums. Plates izmērs ir 44 x 22 x 5mm. Ar numuru 1 apzīmēts centrālais mikrokontrolieris LPC2148, 3 – LM3595 infrasarkanās diodes (PPG sensorā) strāvas stabilizators, 4 – LP2985-3,3 zema sprieguma krituma 3,3V regulators mikrokontroliera barošanai, 5 – 8 MHz kvarca oscilators, stabilas darbības frekvences nodrošināšanai (kontrolierī izmantots frekvences reizinātājs x4, lai takts frekvenci (vienlaicīgi arī ātrdarbību) paaugstinātu līdz 32MHz), 6 – PPG sensora pieslēgvietā, 7 – Bluetooth modulis LMX9838, sniedzas 4,5 mm ārpus plates kopējiem izmēriem, tas darīts speciāli, jo šajā apgabalā atrodas iebūvētā 2,4GHz antena un tai tuvumā nedrīkst atrasties nekādi metāliski elementi. 8 – litija jonu akumulatora lādētājs, barošanas spriegumu saņem no mikro USB ligzdas (2), uzlādes strāva ~50mA. 9 – LP2985-3,3 zema sprieguma krituma 3,3V regulators Bluetooth moduļa barošanai. Miniaturizēšanas nolūkā shēmā tika izmantots mikro USB savienojuma ligzda (2). Uz plates tika uzprojektēta vieta trīsasu paātrinājuma mērīšanas sensoram (11) un ierīces pilnveidošanas nolūkā shēma tika papildināta ar diviem tranzistoriem (10), ar kuru palīdzību var atslēgt akumulatora izlādes

līmeņa pretestību dalītāju, kas pievienots pie ACP, lai caur to neplūst strāva, kad ierīce ir izslēgta.

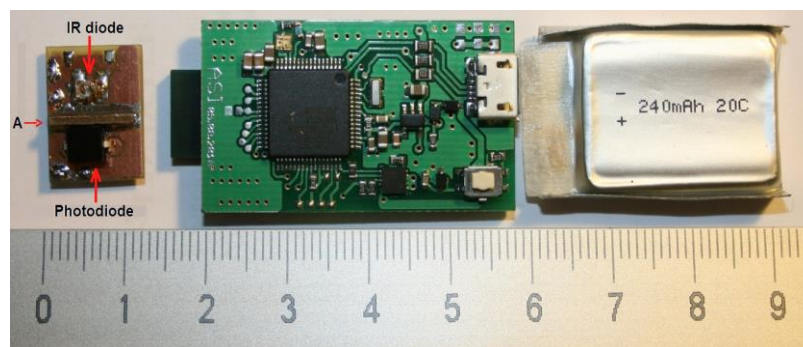
Paātrinājums mērīšanas sensors šajā versijā tā arī netika izmantots. Tas bija paredzēts kustību detektēšanai un PPG signāla filtrēšanai no cilvēka kustību izraisītiem artefaktiem.



49. att. „Viedā apģērba” PPG sensora elektronikas shēmas plates rasējums (2 slāņos).

Viedā apģērba PPG sensora plates rasējums parādīts 49. attēlā. Apzīmējums ar numuru 1 – fotodiode ar dienas gaismas filtru BPW34-FA. 2 ir infrasarkanā starojošā diode SIR91-21C/F7 (atrodas uz sensora 6mm no fotodiodes centra), tās diametrs 2mm. 3, 4 – barošanas, ieejas un izejas kontroles signālu pieslēgvietas. 5 – fotodiodi atdalošā starojuma barjera (50. att. (A)). Sensora izmērs ir 15x11x4mm, tas tiek pievienots ar sešiem mīkstiem izolētiem vadiņiem pie vadošās plates.

Pirms integrēšanas apģērbā ierīces visu trīs daļu (50. att.) elementi tika kombinēti un novietoti dažādos veidos un pielāgoti katram apģērba prototipam individuāli. Tika ievēroti šādi nosacījumi: USB porta ligzdai vienmēr ir jābūt atvērtai, jo caur to tiks lādēts akumulators. ~ 10mm uz leju (attēlā) no USB ligzdas centra atrodas ieslēgšanas poga (2x3mm balta). To var spiest caur apģērbu, tai nav jābūt atvērtai, bet vajag norādi (piem., citā krāsā) ka šajā vietā atrodas poga. Uz ierīces shēmas platītes atrodas divas gaismas diodes, tās norāda darbības režīmus un akumulatora uzlādes stāvokli. Tām vienmēr jābūt redzamām.



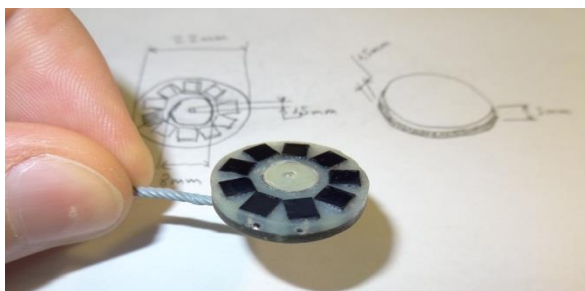
50. att. Viedā apģērba (II versijas) elektronikas plates, sensora un akumulators kopskats pirms integrēšanas apģērbā.

Litija jonu akumulatora izmērs 20x30x5mm. Nodrošina iekārtai enerģiju un ir lādējams no galvenās plates caur USB savienojuma ligzdu. Elektronikas plates biezums 1,5 mm ir izvēlēts speciāli, lai nodrošinātu detaļu ar lielāko laukumu (mikrokontrolieris un Bluetooth modulis) stabilitāti uz plates. Šādā gadījumā var izgatavot viedā apģērba shēmas korpusu no viegla un salīdzinoši mīksta materiāla, vai pat iekausēt gumijā, nebaidoties ka neliela plates deformācija var atlauzt pielodētās komponentes (lodējuma vietas).

Iekārtas mērījumos uzrādīja kādu būtisku nepilnību, kas iepriekš netika novērota. Problēma bija ar Bluetooth datu pārraidi. Tika novērots, ka signālu datu plūsma datora ekrānā dažos gadījumos aizkavējas, nedarbojas stabili vai „raustās”. Viens no iemesliem tika noskaidrots ļoti ātri. Bluetooth darbība notiek 2,4GHz, kas ir ļoti augsta frekvence (viļņa

garums ir ~12,2 cm) un to ļoti ietekmē dažādi šķēršļi arī cilvēka audi, kuros tā labi absorbējās pārvēršoties siltumā. Attiecīgi tika novērots, ka tiešā redzamībā, PPG signāla datu plūsma, piemēram, no cimda var tikt traucēta, ja mēramā persona pagriežas ar muguru pret Bluetooth uztvērēju datorā. Jo šajā gadījumā daļa starojuma absorbējas cilvēka ķermenī, veidojot radiofrekvenču barjeru. Daļēji novērst šo efektu varētu palielinot Bluetooth jaudu vai arī izvēloties konstrukcijā labāku antenu. Lai gan neviens no šiem risinājumiem iespējams īsti nav piemērots integrēšanai apģērbā. Tāpēc pagaidām nekāds risinājums netika piemeklēts.

Ierīču testēšanas laikā tika novērots, ka PPG sensors labi nepiespiežas pie ādas, līdz ar to pulsācijas nevarēja detektēt vispār vai arī tās bija ļoti vājas un trokšņainas. Mērījumu rezultāti nebija apmierinoši. Galvenais, kas to noteica bija PPG sensora mazie izmēri tādējādi veidojās nestabils kontakts ar ādas virsmu. Tekstilizstrādājuma papildināšana ar dažādiem mīksti polsteriem zem fotodiodes deva ļoti maz uzlabojumus. Tad tika pieņemts lēmums uztaisīt jaunu PPG sensoru, bet tādu kurš sastāvētu no deviņām fotodiodēm, nevis vienas. Tad tika izveidots rasējums un izprojektēts jauns multidiožu sensors (51. att.).



51. att. „Viedā apģērba” daudzdiožu PPG sensors.

Jaunā sensora konstrukcijā tika izmantotas tās pašas fotodiodes, starojošā diode un elektronikas shēmas slēgums. Izmainījās tikai diožu skaits un sensora forma. Fotodiodes tika savienotas paralēli. Sensora diametrs ir 22 mm, biezums 3 mm. Centrā ir novietota infrasarkanā starojošā diode. Apkārt tai ir 1,5 mm augsta apaļa metāliska barjera, kas nodrošina, lai tiešais starojums nenokļūtu uz fotodiodēm.

PPG sensoru un shēmas integrēšana apģērbā arī bija liels izaicinājums, jo to izdarīt ļoti kvalitatīvi ir diezgan grūti.



52. att. Vieda cimda un pieres apsēja prototipa kopskats (ar integrētu elektronisko shēmu).

Tika izvēlēts ritenbraucēju cimds ar vaļējiem pirkstu galiem (lai cimdu vieglāk uzvilkt un novilk). PPG sensors tika iesūts cimda rādītājpirksta vidusdaļā un ar nelieliem vadiņiem savienots ar galveno elektronikas plati, kas atrodas uz cimda virspuses piešūtā nelielā kabatiņā. Turpat ir novietots arī akumulators.

Šalle, rokas apsējs, pieres apsējs tika pilnībā uzšūti no „nulles”. Savienojuma daļās ir iešūta lipīgā velkro aizdare. Apsēji vidusdaļā ir maisveidīgi tukši un tajos ir iešūta elektronikas plate un PPG sensors.

Jāpiebilst, ka šie izstrādātie apģērba varianti ir pirmie prototipi, kas nav paredzēti izjaukšanai un mazgāšanai arī mitrums nenāks par labu šīm ierīcēm. Jāuzsver, ka ja vēlētos šīs ierīces integrēšanu apģērbā novest līdz pilnīgi veiksmīgam iznākumam, to būtu jā dara, kādam profesionālam apģērbu inženierim, kas labi pārzina tekstilmateriālus, šūšanu, kam ir pieejama speciāla tehnika un citas lietas.



53. att. Izstrādātie „viedā apģērba” prototipi, no kreisās puses – pieres lente, šalle, plaukstu locītavas lente, cimds, ar bultiņu norādītas PPG sensoru vietas.



53. att. Viedā apģērba prototipi darbībā.

„Viedā apģērba” ierīces tehniskais apraksts

Patērētāja jauda: 0,165W

Akumulatora tehnoloģija, kapacitāte: Li-ion, 240mAh

Izmēri sensora shēma: 20 x 38 mm

Svars sensora shēma (ar akumulatoru): 11 grami

Mērījumu ātrums (izšķirtspēja): 1000 mēr./sek, 1ms

Bluetooth tehnoloģija: Bluetooth 2.0

Bluetooth frekvence: 2400-2480 MHz

Bluetooth klase, profils: 2, seriālais ports

Gaisa mitrums: 85 – 90%

Darba temperatūra: 10 - 40° C

Pārraidē attālums: līdz 10 metriem

Optiskā starojuma jauda, viļņa garums: 5mW@20mA, 875 nm

Sensora fotodiodes spektrālais maksimums: 900 nm

Darba ilgums no akumulatora (vismaz): 3,5h

Uzlādes ligzda: microUSB

Uzlādes strāva no USB: 100mA

Uzlādes laiks: ~2h

3.3. Izstrādāto metožu un ierīču eksperimentālā pārbaude

Izstrādājot darbā apskatītās ierīces tika veikti un ievēroti dažādi pasākumi, lai samazinātu iespējamās mērījumu kļūdas un lai galarezultātā tiktu iegūti un analizēti tikai augstvērtīgākie signāli. Daudzas lietas tika rūpīgi ievērotas jau iekārtas izstrādes dažādās fāzēs. Tikai ar pareizas shēmas izprojektēšana iespējams, jau sākotnēji novērst daudz mērījumu kļūdu faktoros. Darbā apskatītā digitālā PPG iegūšanas shēma ir būtiskākā izstrādes daļa uz kā pamata veiksmīgi tika izveidotas vairākas veiksmīgas ierīces.

Trokšņi ir viens no galvenajiem PPG signāla bojājošiem faktoriem. Trokšņi var būt dažādu veidu, bet visos gadījumos un visās ierīcēs tas tika ņemts vērā, jo apstrādāt un analizēt PPG pulsāciju datus var tikai tad kad tie ir attīrīti no trokšņiem. Neviena grafika vai tabulas izveidē netika izmantoti bojāti vai trokšņaini PPG signālu dati.

Izstrādātajās iekārtās nav izmantoti spriegumu paaugstinošie konvertori, kas ir viens no augstfrekvences trokšņu avotiem un to lietošana prasa rūpīgu testēšanu un sprieguma filtrēšanu. No otras puses tas, ka nav izmantoti šie pārveidotāji ir slikti, no enerģijas taupīšanas viedokļa.

Ierīcēs galvenokārt ir augstfrekvences trokšņu avoti – mikrokontroliera takts frekvences ģenerators (8MHz, kas paaugstināts līdz 32MHz), Bluetooth raidītāja antena (2,45GHz), komunikācijas datu līnijas, digitālā PPG impulsveida signāla iegūšana 1KHz. Fotopletizmogrāfijas signāls ir izteikti zemfrekvences (līdz 40Hz), tāpēc arī netika novērots, ka augstākminētās frekvences ietekmētu PPG signālu.

Svarīgi piebilst, ka mērījumu datu skaitlisko vērtību precizitāti (piemēram, pulss) tikai pastarpināti nosaka izstrādātās ierīces. Tas ir tāpēc, ka iekārta iegūst tikai PPG signāla pulsācijas un neveicot nekādu apstrādi pārsūta uz datoru. Tālāk datorprogrammā iekļautie FIR filtri, atfiltrē no trokšņiem, noņem līdzkomponenti, seko līdz pulsācijām un veic vēl citas darbības līdz kamēr speciāli izstrādāts algoritms nosaka PPG pulsa viļņa minimumu (sauktu arī par pēdu). Visi pulsāciju aprēķini balstās uz šī minimuma precīzu atrašanu. Ja programmatūras algoritms, kaut vai pa milisekundi kļūdās – aprēķini (iegūtās pulsa vērtības) nebūs precīzas. Tāpēc šīs problēmas risināšanai (datorprogrammatūras izstrādei, filtru un to koeficientu atrašanai) tika veltīts ļoti daudz laika.

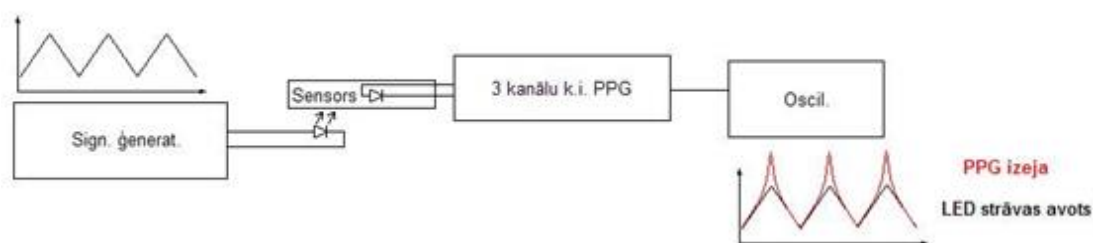
Tā kā shēmas konstrukcija nesatur analogos pastiprinātājus, analogos filtrus (kondensatorus un pretestības), kuru parametri var mainīties atkarībā no sprieguma un temperatūras, tad šādi mērījumu kļūdu avoti nepastāv. Stabīlu PPG signāla iegūšanu nodrošina mikrokontroliera takts frekvences stabilitāte ko nodrošina kvarca oscilators. Tā frekvences nobīde temperatūras ietekmē ($-20^{\circ}\text{C} - +80^{\circ}\text{C}$) ir $\pm 0,3\%$, novecošanās ietekmē $\pm 0,3\%$ un kopējā precizitāte ir $\pm 0,5\%$. Redzams ka šīs novirzes ir ļoti mazas, lai nopietni ietekmētu PPG signāla formu vai vērtības.

Viens nozīmīgs trokšņu avots gan vēl jāpiemin – apkārtējā gaisma ko uztver PPG sensora fotodiode. Mākslīgais telpu apgaismojums (ekonomiskās spuldzes), kā arī neiezemēti elektro tīkla kabeļi var radīt 50Hz troksni, kas ir ļoti tuvs PPG signāla mērīšanas robežai. Tāpēc praktiski darba sākumā, jau tika izdomāts, kā daļēji novērst šos signāla traucējumus – ap vai pie fotodiodes tika izvietotas barjeras, kas neļāva uz fotodiodes nokļūt tiešajam starojumam no sensora infrasarkanās starojošās diodes un arī apkārtējās gaismas.

Rezumējot var piebilst, ka izstrādāto ierīču precizitāte un mērījumu atkārtojamība ir augsta, kas pilnībā atbilst laboratorijas un klīnisko mērījumu prasībām.

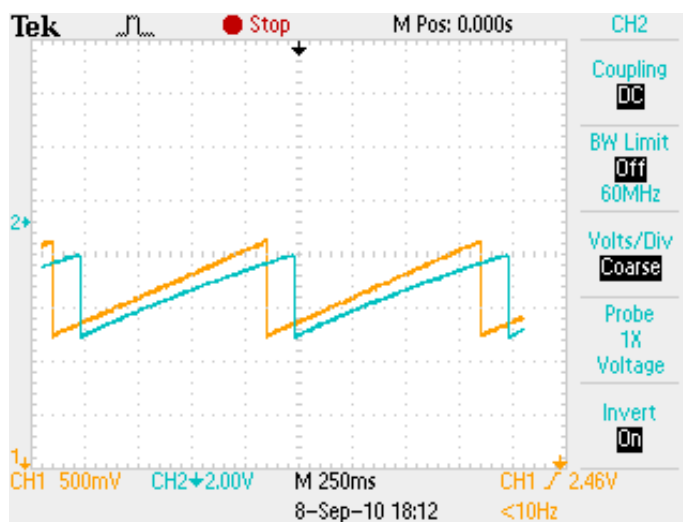
3.3.1. Digitālās PPG metodes tehnisko parametru mērījumi

Izstrādes gaitā tika testēti vairāki digitālās PPG reģistrēšanas shēmas tehniskie parametri. Tika noteikts signāla trokšņu attiecības līmenis, mērījumu skalas linearitāte un dinamiskais diapazons. Iekārtas linearitātes pārbaudei tika izmantots signālu ģenerators (TTi TG4001) un digitālais oscilogrāfs (TDS2002). Pārbaudes veikšanai tika izveidots iekārtas slēgums, kas parādīts 54 attēlā.



54. att. Izstrādātās digitālās PPG mērījumu metodes linearitātes pārbaudes testa slēgums.

Signāla ģeneratora izejā tika padots trīsstūra veida signāls (amplitūda 5V, nobīde 7V, 1Hz). Ķēdē ar infrasarkano gaismas diodi tika slēgts rezistors 300 Ω , iegūstot reāliem apstākļiem līdzvērtīgu darbības režīmu. Izmantotā gaismas diode un fotodiode atradās reāli izmantojamās iekārtas sensoros.



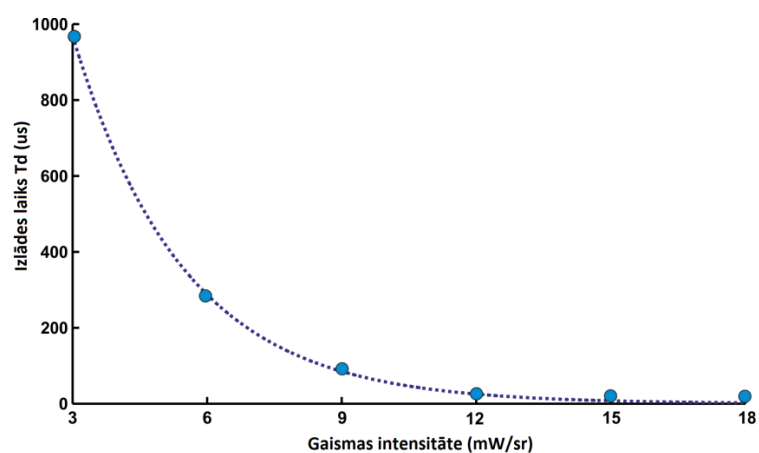
55. att. Starojošās infrasarkanās diodes (oranžā līkne) un digitālā testa signāla iekārtas izejā (zilā līkne) mērījums.

Attēlā 55 redzams, ka ar signālu ģeneratoru modulētās gaismas strāvas avots (CH1 - oranžs) izsauc gaismas diodes intensitātes izmaiņas, kas redzamas fotopletizmogrāfa iekārtas izejas signālā (CH2 - zils). Novirzes no lineārās CH1 ieejas uzskatāmas par nenozīmīgām, ko lielā mērā rada arī starojošās diodes izejas intensitātes nelineārā atkarība no strāvas stipruma.

Kopējā skala ir nelineāra, to nosaka fotodiodes iekšējā pretestība un izlādes kondensatora kapacitāte. Kondensators vienmēr tiek izlādēts caur pretestību, attiecīgi tā izlāde caur pretestību vienmēr ir eksponenciāla. Praksē visu skalu nav iespējams izmantot, jo PPG signāla amplitūda labākajā gadījumā ir tikai 2% no DC komponentes, attiecīgi darbības diapazons ir samērā šaurš tādējādi tas uzskatāms par lineāru apgabalu līdz ar to PPG signāla mērījumu (signāla formu) ietekmē nenozīmīgi. Skalas dinamiskais diapazons ir nemainīgs t.i. 89,84dB.

Kopējās skalas nelinearitātes koeficients ir ~ 4 t.i. izmērītā vērtība skalas vienā galā ir 10, attiecīgi otrā galā tā pati vērtība būs 4x lielāka – 40. Vienlaicīgi mērīt skalas abās pusēs vai

izmantot visu skalu nav iespējams augstāk minēto iemeslu dēļ. Izstrādātās iekārtas signāla trokšņa attiecība ir $86.56 \pm 3.00 \text{ dB}$.



56. att. Digitalās PPG metodes fotodiodes izlādes laika grafiks.

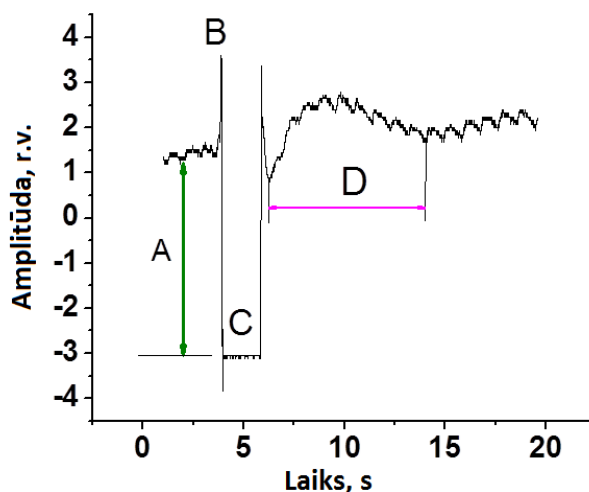
Reālos fizioloģiskajos mērījumos, ādas vai dziļāko audu slāņu asinsrites pulsāciju radītā gaismas modulācija ir daudz vājāka, tādēļ sensora fotodiode strādā salīdzinoši daudz šaurākā intensitātes diapazonā, kurā tai pielāgoto kondensatoru tādēļ izlādes process uzskatāms par lineāru. Var secināt, ka iekārta ar eksistējošiem sensoriem un LED barošanas strāvas vērtībām uzskatāma par lineāru.

3.3.2. Rekapilarizācijas kinētikas mērījumi

Ar izstrādāto rekapilarizācijas ierīci tika iegūti mērījumi no 18 brīvprātīgajiem vecumā no 18 – 31 gadam. Katrai personai mērījumi tika atkārtoti 8 reizes. Visi brīvprātīgie bija veseli un bez asinsvadu slimībām. Mērījumi tika veikti no labās rokas pirkstiem (rādītājpirksts un mazais pirksts), katram cilvēkam desmit reizes. Iegūtie mērījumi uzrādīja dažādus rezultātus, labāka atkārtojamība tika novērota no mērījumiem, kas iegūti no mazā pirksta.

Lai aizspiestu kapilārus tika pielikts ārējs fizisks spēks un saspiegts pulsoksimetra pirksta sensors tik daudz, kamēr zilais PPG signāls vairs nebija novērojams un pulsācijas bija izzudušas. Sensors tika atlaists pēc 4 – 5 sekundēm, kā rezultātā pēc brīža tika novērota rekapilarizācijas aina un PPG signāla parādīšanās.

Tipiskākie rekapilarizācijas mērījumi parādīti (57. att.). Sensora zondes saspiešana (kopā ar pirkstu) pazemināja zilā fotopletizmografiskā signāla līmeni (A) līdz nulles līmenim (C). Tas notika tāpēc, ka saspiežot sensoru, fotodiode iespiešas mazliet dziļāk audos un mainījās uz tās krītošā starojuma intensitāte. Sensora saspiešanas momentā uz fotodiodes krītošā starojuma izmaiņas radīja pīķi B, tāds pats pīķis rodas sensora atlaišanas momentā.



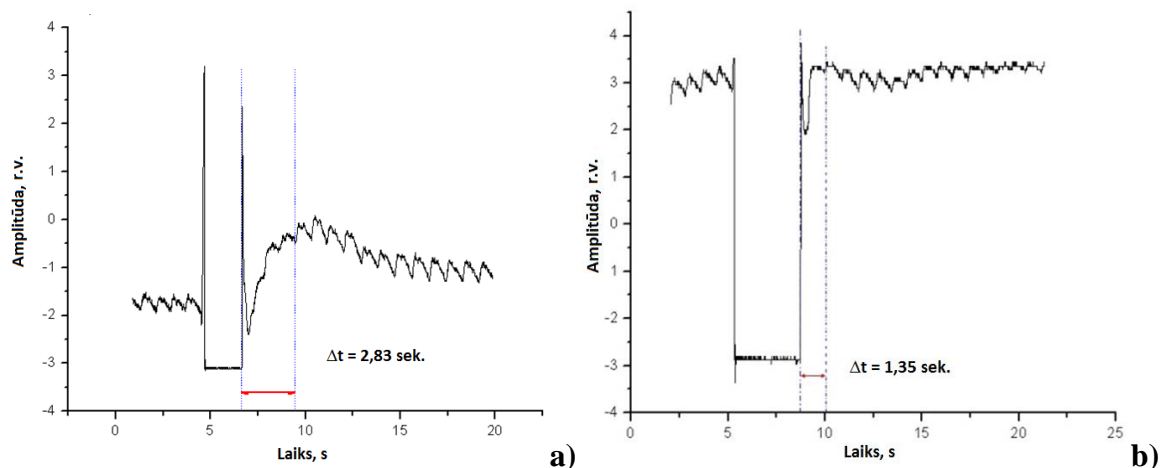
57 att. Rekapilarizācijas mērījumu laika grafiks.

Kamēr sensors kopā ar pirkstu tika turēts saspiegts, PPG pulsācijas vairs netika novērotas un līdzkomponente pazeminājās līdz nullei, jo asinis no kapilāriem tika izspiestas. Pēc atlaišanas tika novērota strauja asiņu pieplūde kapilāros, to var novērot kā līdzkomponentes viļņveidīgu pieaugumu un pulsācijas kapilāros atkal parādījās pēc dažām sekundēm.

Vairākiem cilvēkiem tika novērotas būtiskas atšķirības rekapilarizācijas laikos. Mērījumi apstiprināja, ka rekapilarizācijas laiks ir atkarīgs arī no pirksta saspiešanas spēka, kā arī no katra cilvēka fizioloģiskā stāvokļa.

Vairumā gadījumu pēc pirksta atlaišanas tika novērots līdzkomponentes pieaugums līdz sākotnējam stāvoklim, sasniedzot maksimumu apmēram pēc 5 sekundēm. Tālāk seko līknes pakāpeniska atgriešanās sākotnējā stāvoklī (tāds kā tas bija pirms sensora saspiešanas), kas arī ilgst, apmēram, 5 sekundes (58. att. (a)). Lai gan dažām novērotajām personām pēc sensora atlaišanas no saspiegta stāvokļa vispār netika novērots līdzkomponentes pieaugums (58 att. (b)). Acīmredzot šādu atbildes reakciju nosaka indivīda asinsrites un fizioloģiskie regulēšanas mehānismi.

Apskatot PPG signāla mainīkomponenti var redzēt, ka pulsācijas atjaunojas (parādās) jau pēc 1 – 2 sekundēm.

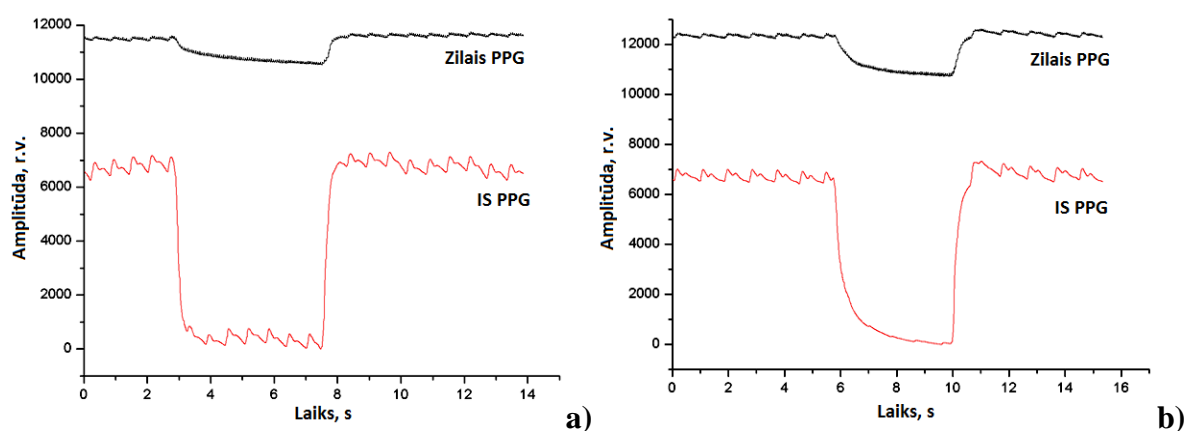


Veicos šos rekapilarizācijas mērījumus visām personām tika ievērots vienāds mērījumu protokols:

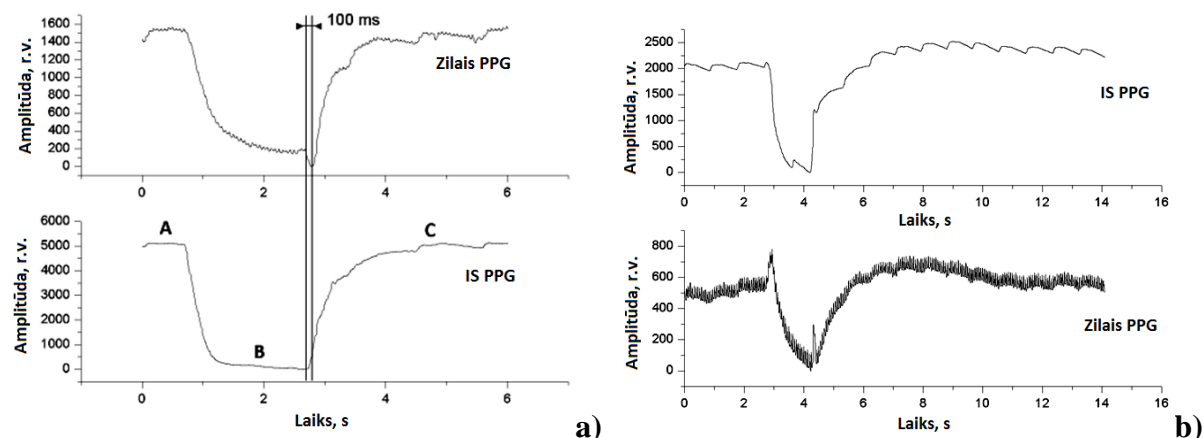
- 1) Tika lūgts personai apsēsties.
- 2) Labā roka tika uzlikta uz galda un pie rādītājpirksta piestiprināts sensors. Personai tika lūgts atslābināties un ieņemt ērtāko sēdpozciju, tā lai roka atrastos brīvi uz galda.
- 3) Sensors tika pieregulēts, līdz kamēr uz datora monitora parādījās vajadzīgais PPG signāls.

4) Rekapilarizācijas mērījums tika veikts līdz ko PPG signāls bija nostabilizējies. Tad sensora zonde tika saspiesta (kopā ar pirkstu), līdz kamēr izzuda PPG signāla pulsācijas zilajā spektra kanālā (infrasarkanā kanālā nekas nemainījās). Tad spiediens tika noņemts un datora ekrānā varēja novērot asiņu atgriešanos kapilāros. Šeit būtisks faktors bija saspiežot sensoru pielikt tieši tik lielu spiedienu, lai aizspiestu tikai kapilārus, uz ko norādīja zilā kanālā PPG signāla samazināšanās. Izmantojot divus viļņu garumus varēja pārliecināties, ka tiek aizspiesti tikai virsējie kapilāri. Būtiski, ka visus mērījumus veica viens cilvēks lai samazinātu iespēju, ka netiek ievērota vienota mērījumu procedūra. Mērījumu laikā laboratorijā tika izslēgta gaisma, lai samazinātu apkārtesošo troksni no dienas gaismas lampām.

Lai pārliecinātos ka tika aizspiesti tikai augšējie asinsvadi, neskarot dziļāk esošos tika izmantots infrasarkanais starojums 928 nm, kas tika mērīts vienlaicīgi ar to pašu sensora zondi 59. att.



Oklūzijas un atjaunošanās reakcijas piemēri, kas mērīti izmantojot divu viļņu garumu diodes ir parādīti 60. attēlā (a). „A” parāda normālu līdzkomponentes signāla līmeni (AC komponente sastāda tikai 2% no DC un šajā skalā nav redzama).



60. att. Rekapilarizācijas mērījumi – iegūti izmantojot divu viļņu garumu (928 nm un 420 nm) starojošās diodes un parādīts signālu aizkaves laiks.

Sensora saspiešanas (kapilāru aizspiešanas) rezultātā līdzkomponentes signāls samazinājās līdz līmenim „B”. „C” daļa uzskatāmi parāda asiņu pieplūdumu un cirkulāciju asinsvados. Attēlā 60 (a) ir redzams, ka starp zilo un infrasarkanā signālu minimumiem ir aizkave 100 ms, kas norāda, ka dziļākajos asinsvados asins plūsma atjaunojās ātrāk nekā mazajos kapilāros.

Kapilāru piepildīšanās aizkaves laiks katrai personai bija individuāls – tas variēja no 80 – 160 ms. Novērots, ka zilā PPG signāla amplitūda bija ievērojami mazāka, kā infrasarkanajā spektra daļā mērītā amplitūda un tas bija diezgan nestabils. Tas skaidrojams ar to ka zilā starojuma iespiešanās dziļums audos ir ļoti mazs (~170 mikroni), tas ir ļoti jutīgs uz kustībām, istabas temperatūru un citiem parametriem. Infrasarkanais PPG signāls bija ievērojami stabilāks.

SECINĀJUMI

Pētījuma ietvaros tika izstrādāta jauna zilā starojuma fotopletizmogrāfijas detektēšanas metode, ar kuras palīdzību var noteikt, izmērīt un analizēt rekapilarizācijas laiku. Šim mērķim tika izstrādāta atbilstoša mēriekārta, kas pārbaudīta laboratorijas apstākļos. Pirmie rezultāti rāda, ka abas fotopletizmogrāfijas komponentes (maiņkomponente un līdzkomponente) ir jutīgas uz asins izmaiņām kapilāros. Rekapilarizācijas process un tā interpretācija ir daudz sarežģītāka, nekā apskatīts šajā sākotnējā pētījumā.

Tika novērots, ka saspiežot sensoru ar dažādu spēku un turot to saspiestu ar mainīgu ilgumu – rekapilarizācijas laiks mazliet mainās ~0,5 – 1,5 sekundēm.

Tā kā rekapilarizācija ierīce ir paredzēta lietošanai jaundzimušiem bērniem, būtu nepieciešams izstrādāt speciālu ļoti maza izmēra pirkstu sensoru.

Sākotnējie rezultāti liek domāt, ka rekapilarizācijas procesu nevar apskatīt tikai kā signāla lineāru atgriešanos sākotnējā fizioloģiskā stāvoklī. Realitātē, lai raksturotu šo procesu ir jāievieš vēl kāds parametrs. Tāpat ir nepieciešams papildus sīkāk izpētīt rekapilarizācijas procesu un mērījumu grafiskās līknes, jo pagaidām nav skaidrs, kad uzskatīt ka asinis ir atgriezušās kapilāros (vai tad kad ir parādījies PPG signāls, varbūt asiņu pieplūdes maksimuma punktā vai izmantot kādu citu parametru). Uz šo jautājumu nespēja atbildēt arī pieredzējuši ārsti.

Apkopojot datus tika secināts ka eksponenciālais rekapilarizācijas modelis ir vairāk piemērots kapilāru piepildījuma raksturošanas procesam. Katrs brīvprātīgais tika mērīts

astonas reizes, kas kopā prasīja sešas minūtes (vienam cilvēkam). Iegūtie rekapilarizācijas laika rezultāti sakrīt ar citu autoru [49] mērījumiem, kas norāda ka izstrādāto eksperimentālo rekapilarizācijas laika mērīšanas ierīci potenciāli var izmantot, lai novērtētu kapilāru piepildīšanās laiku.

Tika novērots, ka rekapilarizācijas laiks pēc pirksta saspiešanas un atlaišanas abos spektra reģionos (zilā un infrasarkanā) bija līdzīgs, vienīgi zilais signāls kavējās par 80 – 160 ms atkarībā no cilvēka fizioloģijas.

Mērījumos piedalījās tikai veseli cilvēki, tāpēc lai pilnībā novērtētu ierīces darboties spēju un rezultātu precizitāti būtu nepieciešams iegūt mērījumus no pacientiem, kas sirgst ar asinsvadu slimībām. Mērījumus jāveic tikai ārstu uzraudzībā un ar atbilstošam atļaujām. Mērījumu laikā tika novērots, ka istabas temperatūras izmaiņas ievērojami izmaina zilā PPG signāla amplitūdu. Ir ļoti grūti detektēt pulsācijas pie zemas apkārtējās temperatūras. Kaut gan tika veikti vairāki sensora saspiešanas spēka un laika pētījumi un testi, ar to bija par maz, lai precīzi saprastu kā šie parametri ietekmē rekapilarizācijas laiku. Tam būtu nepieciešami papildus pētījumi.

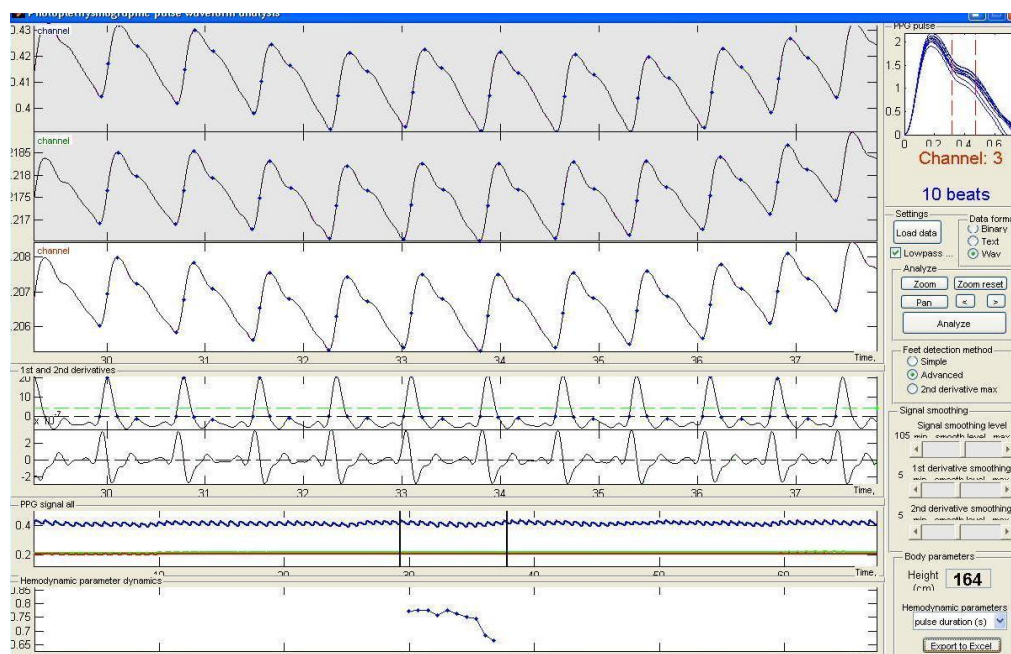
Apkopojot visus veiktos mērījumus var secināt, ka vidējais laiks starp sensora atlaišanas laiku un līdzkomponentes maksimumu bija robežās no 2 līdz 5 sekundēm, kas vērtējams, kā labs rezultāts. Tika novērots, ka rekapilarizācija no rādītājpirksta vienmēr bija lēnāka, nekā no mazā pirksta.

Nākotnē būtu nepieciešams veikt papildus mērījumus, lai precīzāk raksturotu rekapilarizācijas procesu. Svarīgi ir uzkrāt daudz vairāk mērījumus un statistiski tos izanalizēt, lai varētu sniegt kvalitatīvākus rezultātus.

Rezumējot var piebilst, ka: tika izstrādāta pilnīgi jauna metode un iekārta kapilāru asins plūsmas atjaunošanās novērošanai. Līdz šim tādas iekārtas LU ASI nekad nebija izstrādātas. Tika iegūti pirmie rekapilarizācijas rezultāti un novērtētas to skaitliskās vērtības. Tā kā nebija īpaši daudz zināšanas par šādiem pētījumiem, tad izgatavot šādu iekārtu bija liels izaicinājums ar kuru centos tikt galā. Kā arī tika ielikts liels pamatakmens tehnoloģijas un metodes tālākiem pētījumiem un izstrādāšanām.

3.3.3. Dažāda dziļuma asinsvadu pulsāciju mērījumi

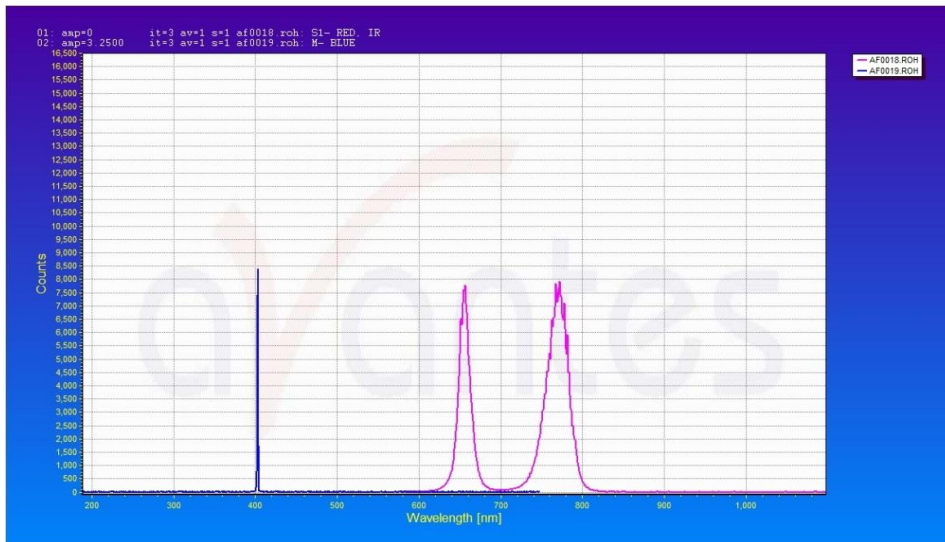
Multispektrālie PPG mērījumi tika veikti no 11 brīvprātīgiem vīriešiem bez kardiovaskulāro slimību simptomiem vecuma grupā no 22 – 40 gadiem. Mērījumi tika veikti laboratorijā komfortablos apstākļos 20°C temperatūrā. Pirms mērījumu veikšanas katra persona varēja 10 minūtes atpūsties un nomierināties. Mērījumu ilgums bija 2 minūtes, mērīšana tika atkārtota piecas reizes ievērojot divu minūšu pauzi.



61. att.. Izstrādātās programmatūras PPG-analysis logs – multispektrālo PPG mērījumu analīze pēcstrādē.

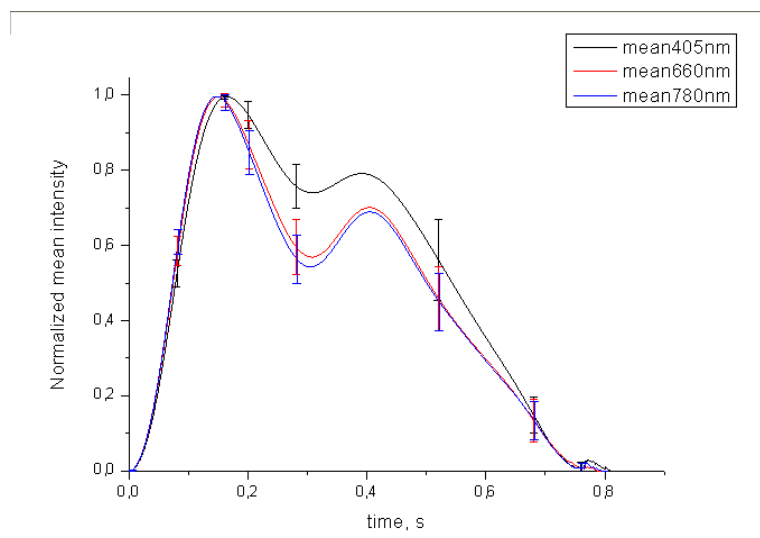
Vispirms eksperimentālie dati tika analizēti ar *PPG-analysis* programmas palīdzību, kura tika speciāli izveidota šādu datu analīzei.

Pielietojot šo programmu bija iespējams iegūt svarīgus hemodinamiskos paramentrus kā piemēram, maksimālais izviedes ātrums, asinsvadu elastības/neelastības indekss (SI) un atstarošanās indekss (RI). Lai iegūtu precīzus parametrus bija nepieciešams iedot programmai aprēķināšanai brīvprātīgā augumu centimetros īpaši tam paredzētā vietā pirms hemodinamisko parametru aprēķināšanas. Programma arī sadalīja visu nomērīto signālu vienperioda signālos (SPPG). Izvēlētais laika intervāls no eksperimentālo datu visa mērījuma laika tālāk tiek apstrādāts ar Origin 8.0 programmas palīdzību. No iepieš iegūtajiem SPPG tiek izrēķināts vidējais SPPG, kurš tiek arī nonormēts. Šīs darbības tika izdarītas pie visiem izmantotajiem viļņu garumiem. Lai pārbaudītu eksperimentālo datu atkārtojamību tika izrēķināta vidējā no vidējās vērtības pie katra viļņu garuma.



62. att. Multispektrālās PPG mērījumu iekārtas lāzera starojuma spektrs (405 nm, 660nm, 780nm) iegūts ar Avantess spektrometru AvaSpec-2048.

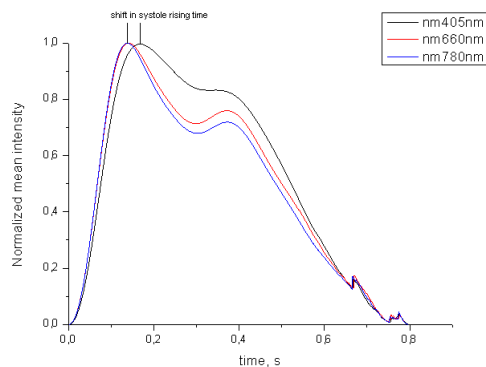
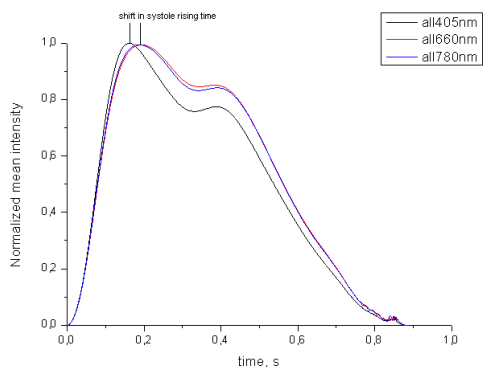
Pirms mērījumu testu veikšanas tika pārbaudīta lāzera moduļa starojuma intensitāte un viļņu garuma atbilstība ražotāja noteiktai. 62 attēlā parādīts mērījumu spektrs.



63. att. PPG signāla forma (vidējota).

Attēlā 63 ir parādītas normalizētas vidējās iegūto multispektrālo PPG mērījumu signālu līknes pēc to apstrādes ar specializētu PPG analīzes programmatūru [45]. Redzams, ka 405 nm viļņa garuma PPG signāls ir stabili nobīdīts laikā, iespējams, ka tas ir saistīts ar personas kapilāru fizioloģisko stāvokli, bet vēl ir nepieciešami papildus pētījumi, lai precīzi raksturotu šo īpašību.

Vairumā gadījumu tika novērota sistoles laika nobīde 660 nm un 780 nm viļņu diapazonā, bet dažos gadījumos 405 nm diapazonā PPG nobīdījās (64. att.).



a)

b)

64. att. Reģistrētā multispektrālā PPG signāla laika nobīdes grafiki: a) 405 nm ir nobīdīts attiecībā pret 660nm un 780nm, b) 660 nm un 780 nm nobīde pret 405 nm.

Jaunizstrādātā trīskrāsu lāzera PPG signāla mērīšanas ierīce, uzrādīja labus rezultātus un iespēju vienlaicīgi detektēt PPG pulsācijas no dažādiem ādas slāņiem izmantojot mazjaudīgu lāzera moduli.

SECINĀJUMI

Jaunizveidotā iekārta un sensors pierādīja savu spēju vienlaicīgi detektēt PPG signālus pie trim lāzera viļņu garumiem un atklāt īslaicīgas atšķirības signāla formā pie izmantotajiem viļņa garumiem, kuri atbilst dažādiem iespīšanās dziļumiem ādā.

No iegūtajiem rezultātiem ir noprotams, ka ir nepieciešami tālāki eksperimentālie testi, lai izprastu dažādo signālu formu pie 405 nm viļņa garuma un arī sistoles sasniegšanas (rising time) maksimuma laika nobīdi attiecībā pret pārējiem diviem viļņa garumiem. Laika intervālam no pēdas līdz incezurai (ieleja starp sistoles un diastoles maksimumiem) bija tāda pati neatkarīgi no PPG pulsa ilguma.

Multispektrālā PPG signālu formas un pamatformas variācijas pie trim viļņu garumiem deva informāciju par hemodinamiskajiem parametriem dažādos ādas slāņos (dziļumos). Var secināt, ka jaunizveidoto metodi būtu iespējams pielietot dermatoloģijā ādas veselības novērtēšanai.

3.3.4. Mērījumi ar trīskanālu digitālo PPG ierīci

Apkopojot rezultātus tika iegūti augstas kvalitātes fotopletizmogrāfijas mērījumi, izmantojot jaunizstrādāto trīskanālu mērīšanas ierīci ar digitālo signāla iegūšanas principu.

Mērījumi tika veikti Latvijas universitātes, Bioloģijas fakultātē, cilvēku un dzīvnieku fizioloģijas katedrā. Ierīce tika izmantota kāju artēriju parametru mērījumos. Tāpēc tika izvirzītas augstas prasības uz signāla – trokšņu attiecību, jo kvalitatīvu PPG signālu iegūt no artērijām ir ļoti grūti. Ir būtiski, lai mērīerīce neievieštu lielas kļūdas mērījumos. Svarīgi, lai iekārtas kļūda ir daudz mazāka par fizioloģisko parametru mērījumu kļūdu.

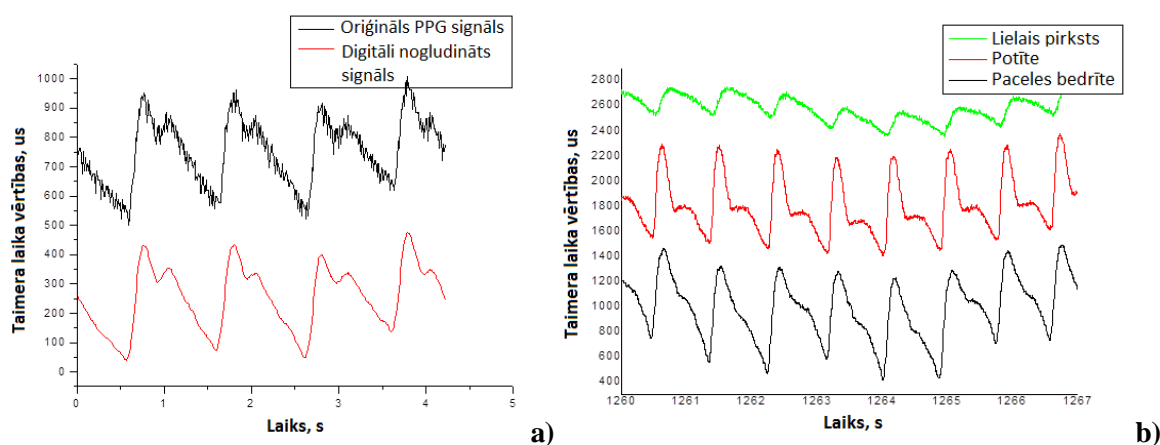
Pētījumā piedalījās brīvprātīgie: 4 sievietes un 2 vīrieši (18 līdz 26 gadus jauni) ar veselīgu dzīvesveidu, ķermeņa masas indeksu no 16.2 - 25.9 kg/m² un bez kardiovaskulāro slimību pazīmēm. Visas mērāmās personas deva piekrišanu piedalīties mērījumos. LU Zinātnisko pētījumu ētikas komisija un LU Eksperimentālās un klīniskās medicīnas institūts apstiprināja pētījumu protokolu.

Katrs brīvprātīgais tika mērīts trīs reizes, kur katrs mērījums ilga 5 minūtes. Eksperimentu laikā mērāmā persona atradās guļus stāvoklī uz ergonomiska un ērta matrača, klusā un komfortablos apstākļos, telpas temperatūrā 24°C. Pirms mērījumu uzsākšanas kamēr tiek uzlikti PPG sensori persona varēja adaptēties un atslābināties. Brīvprātīgie tika brīdināti neēst un nedzert kofeīnu saturošus dzērienus divas stundas pirms mērījumu sākuma.

PPG sensori tika izvietoti sekojoši: virs paces artērijas, virs mazās lielkauka artērijas potītes rajonā un uz kājas lielā pirksta. Izmērot attālumu starp secīgi novietotiem sensoriem un nomērot pulsa izplatīšanās laiku, tika aprēķināts reģionālais pulsa izplatīšanās ātrums.

Mērījumu rezultāti ar jauno ierīci ir parādīti 65 attēlā (b), un salīdzinājums ar pašu pirmo izstrādāto digitālo PPG ierīci 65. attēlā (a) [XII].

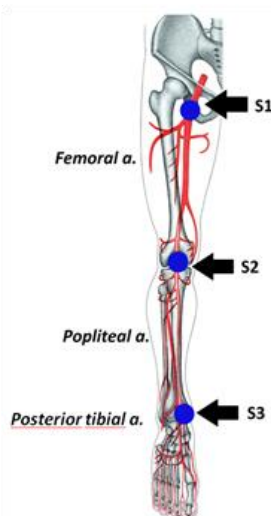
Signālu grafiki parāda, ka iegūtais PPG signāls ar jaunizveidoto ierīci, vērtējams kā ievērojams metodes un shēmas uzlabojums. Izejā iegūts maztrokšņu PPG signāls, bez pirmsapstrādes un bez pēcapstrādes parāda augstvērtīgo risinājuma kvalitāti. Signāla izšķiršanas spēja, lai veiktu datu apstrādi un analīzi un izdarītu secinājumus par artērijām, ir augsta. PPG signāla maiņkomponentes amplitūda ir 800 – 1500 μs, kas ir uzskatāms par ļoti labu rezultātu. Kontrolieris darbojas ar 48MHz takts frekvenci, kas nozīmē, ka PPG signāls ir apmēram 1/48 no visas skalas, kas ir ~2%, pārējais ir līdzkomponentes. Attiecīgi mērījums pilnīgi sakrīt ar literatūras [50] datiem.



65. att. Fotopletizmogrāfijas signālu mērījumi, kas iegūti izmantojot infrasarkanā starojuma spektru (875 nm). Grafikā „a” – ir parādīts PPG signāla formas mērījuma fragments no pirksta izmantojot iepriekšizstrādāto digitālā PPG signāla mērījumu ierīci, grafikā „b” – var redzēt PPG signālu mērījumu, kas iegūti izmantojot jauno trīskanālu digitālā PPG mērīšanas ierīci un uzlaboto metodi. Signāls ir oriģināls nefiltrēts un iegūts tieši no iekārtas izejas.

PPG sensori tika novietoti uz kāju maģistrālajām artērijām 66.att. [51]. Ierīces signāla izšķiršanas spēja ir 1 ms, kas ļaut arī mērīt un analizēt pulsa pārvietošanās un aizkaves laiku.

Fizioloģisko mērījumu veikšanai nepieciešamas vairākas ierīces, piemēram, PPG, EKG, spiediena mērītājs, ultrasonogrāfs tās visas ir jāpieslēdz pie vienota datus iegūšanas moduļa (ACP), jo ir nepieciešams vienota sistēmas takts frekvence.



66. att. Kāju artēriju vietas no kurām tika veikti mērījumi.

Analogie signāli no PPG ierīces un Finometra (spiediena mērīšana katrā sirds pulsa ciklā), tika ievākti vienlaicīgi, izmantojot 12 bitu ACP USB datu iegūšanas moduli un saglabāti datora cietajā diskā. Vēlāk signāliem tika veikta pēcapstrāde ar speciāli izstrādātu Matlab programmatūru.

SECINĀJUMI

Veiksmīgi tika izveidota un notestēta jauna metode un iekārta fotopletizmogرافijas signālu iegūšanai. Ierīce uzrādīja ļoti labu mērījumu precizitāti, kas pat ir izmantojama veicot zinātniskos pētījumus. Mērījumu ātrums 1000 mēr./sek. ir pietiekošs fotopletizmogرافisko signālu formas analīzei. Ciparu signāls iegūts jau PPG sensorā ir labs veids kā pārraidīt zema līmeņa PPG signālu vismaz divus metrus uz mērījumu iekārtu, neieviešot trokšņus vai traucējumus mērījumu datus. Šāds risinājums neprasa dārgus operacionālos pastiprinātājus, maztrokšņu barošanas bloku, analogos slēdžus vai augstas precizitātes ACP shēmu.

Izstrādātās iekārtas priekšrocības – maztrokšņu PPG signāla iegūšana, patērē maz elektroenerģijas – darbināms no akumulatora, viegls, ciparu signāls jau PPG sensorā (tuvu pie mērījumu avota) un profesionāli izgatavoti remisijas (atstarošanās) PPG sensori. Iekārtu nav nepieciešams kalibrēt.

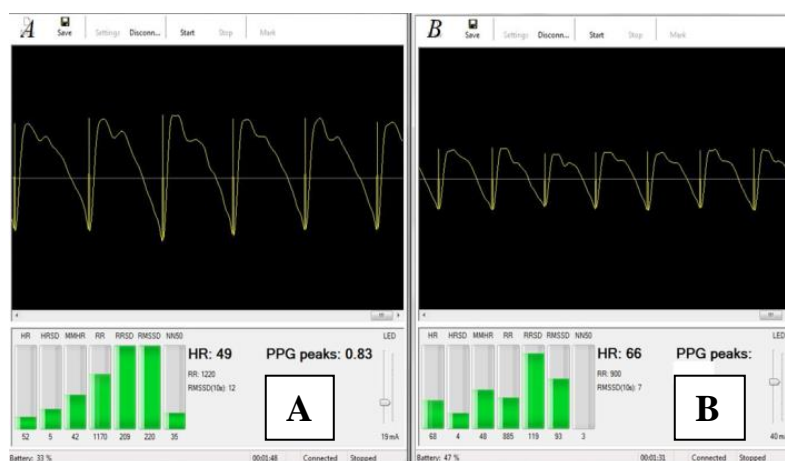
Sensoru uzlikšana mērījumu iegūšanai no artērijām nepieciešamas speciālas zināšanas un prakse. Kvalitatīvi izstrādātiem sensoriem ir būtiska nozīme mērījumu veikšanā un labu rezultātu iegūšanā. Tiešo starojumu izolējošā barjera starp starojošo diodi un fotodiodi, kā arī fotodiode ar dienas gaismas filtru ir būtiski elementi sensorā.

Iekārtas tehniskās analīzes dati uzrāda nelielu signāla trokšņu līmeni izejā ~30mV pie 1KHz frekvences. Tā kā fotopletizmogرافijas signāls ir izteikti zemfrekvences, tad var uzskatīt, ka šāds trokšņu līmenis praktiski neietekmē PPG signāla mērījumu kvalitāti (ne signāla formu, ne amplitūdu).

3.3.5. Bezvadu PPG ierīču kalibrācijas mērījumi

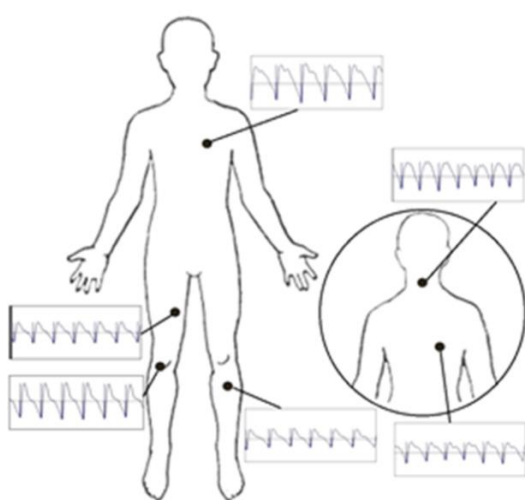
Ar izveidotām bezvadu „viedā apģērba” ierīcēm tika veikti apjomīgi mērījumi. Vispirms svarīgi bija noskaidrot cik ievērojami labākus rezultātus var iegūt ar daudzdiožu PPG sensoru salīdzinājumā ar vienas fotodiodes sensoru. Tāpēc tika uzsākta PPG mērījumu sērija. Mērījumi tika veikti no 24 – 29 gadus jaunām sešām sievietēm, Mērījumi tika veikti laboratorijā, komfortablos apstākļos, 25°C temperatūrā.

Mērījumu dati reālā laikā tika sūtīti uz datoru, kur tos apstrādāja, attēloja un saglabāja izstrādātā datorprogramma DataScope. 67 attēlā ir parādīti šīs programmas divi logi (salikti kopā no diviem mērījumiem), kas uzskatāmi parāda pirmos veiksmīgos rezultātus izmantojot jauno daudzdiožu PPG sensoru (A). Redzams, ka PPG pulsāciju amplitūda ir ~2 reizes lielāka, nekā mērījumos ar viendiožu sensoru. Šāds sākotnējais rezultāts uzskatāms par ļoti pozitīvu.



67. att. PPG signāla paraugi no mērījumiem ar daudzdiožu sensoru (A) un vienas fotodiodes sensoru (B). mērījumi veikti no krūškurvja.

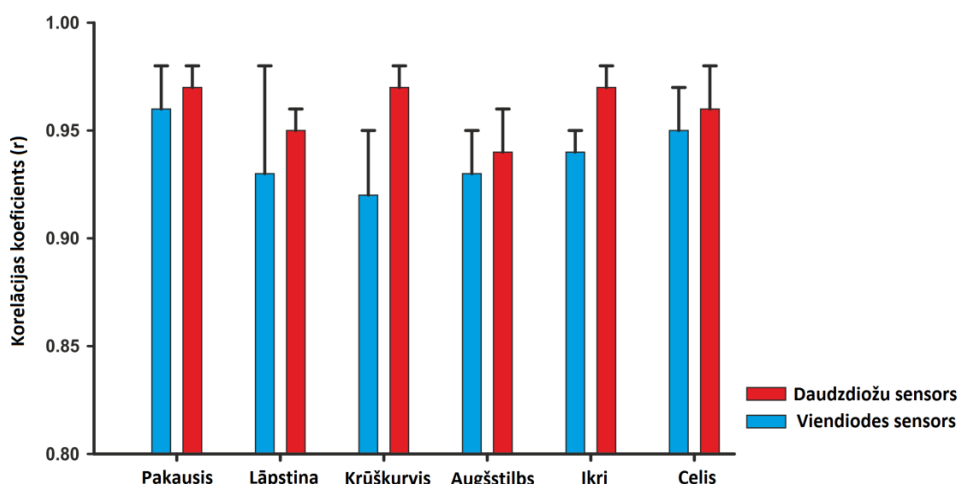
Mērījumu gaitā tika mēģināts noskaidrot no kurām cilvēka ķermeņa vietām ir iespējams iegūt labākos PPG pulsāciju signālus, lai turpmākā nākotnē varētu izstrādāt labākus un piemērotākus viedā apģērba sensorus. Testa mērījumi tika veikti no sešām ķermeņa vietām (68. att.) vispirms ar viendiožu PPG sensoru un pēc tam ar daudzdiožu sensoru – tajās pašās vietās.



68. att. Attēlotas sešas mērījumu vietas, no kurām tika iegūti PPG signālu mērījumi izmantojot „viedā apģērba” iekārtu ar vienu fotodiodes sensoru un daudz diožu sensoru. Lodziņos parādīts tipiskais PPG signāls (forma un amplitūda) konkrētā mērījumu vietā.

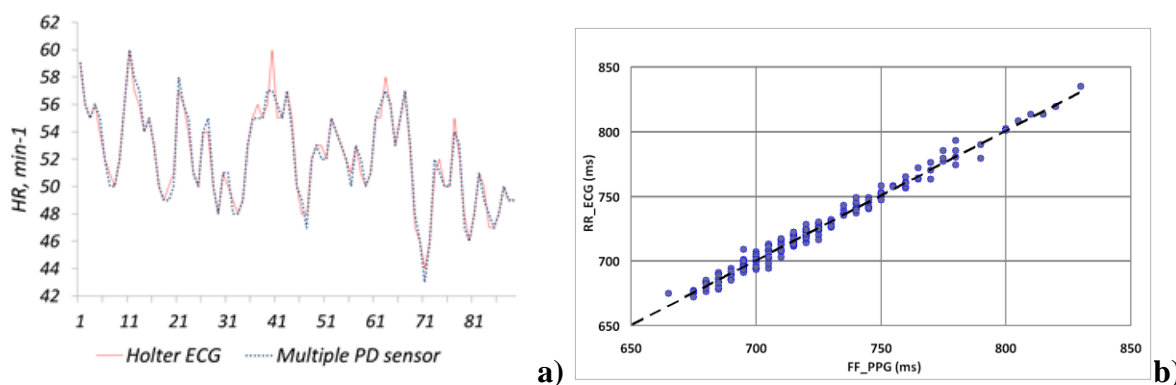
Katrs mērījums ilga 2 minūtes un tika atkārtots 3 – 4 reizes, lai noskaidrotu korelācijas

koeficientu starp dažādām mērījumu vietām. Visi iegūtie dati tika statistiski apstrādāti un salīdzināti korelācijas koeficienti. Rezultāti tika attēloti kā vidējo vērtību standarta novirze (69. att.). Grafiks uzskatāmi parāda daudzdziožu sensora priekšrocību augstākas mērījumu kvalitātes iegūšanā.



69. att. PPG pulsa korelācijas koeficienti (vidējās un standarta novirzes), kas iegūti mērījumos no sešām dažādām cilvēka ķermeņa vietām izmantojot izstrādātās „viedā apģērba” iekārtas viendiodes un daudzdziožu PPG sensorus.

Mērījumu precizitātes novērtēšanai tika izmantota profesionāla 12 kanālu elektrokardiogrammas (TLC5000, *Contec Medical Systems*) references iekārta, mērījumi tika veikti vienlaicīgi. 70 attēlā parādīts pulsa vērtību salīdzinājums, mērījumus veicot ar references EKG ierīci un „viedā apģērba” daudzdziožu PPG sensoru. Redzams, ka aprēķinātās vērtības sakrīt labi, bet ir arī vērojamas nelielas neatbilstības.



70. att. Pulsa vērtību izmaiņas, salīdzinot daudzdziožu PPG sensorierīces un EKG references ierīces mērījumus no krūškurvja apvidus (a) un korelācija starp izmērītajiem EKG RR intervāliem un PPG FF intervāliem (b).

Rezultāti uzrāda, ka pastāv augsta korelācija ($r=0,98$) starp izstrādātās daudzdziožu PPG sensorierīces mērījumiem un profesionālā elektrokardiogrāfija rezultātiem. Nelielās neatbilstības 17 attēlā (a), varētu būt skaidrojamas ar PPG sensora kustību izraisītiem artefaktiem vai piespiediena spēka nevienmērīgu sadalījumu. Daudzdziožu sensora izmantošana un iegūtie rezultāti viennozīmīgi uzrāda augstu mērījumu precizitāti un spēju detektēt PPG signālu no cilvēka ķermeņa vietām ar izteikti vājām pulsācijām.

SECINĀJUMI

Tika izstrādātas miniatūras vienkanāla PPG ierīces ar bezvadu Bluetooth datu pārraidi un veiksmīgi integrētas apģērba prototipos (šallē, velobraucēja cimdā, rokas un pieres apsējos) un mērījumos uzrādīja labus rezultātus. Tika iegūts augstas izšķiršanas PPG pulsāciju signāls izmantojot digitālo PPG mērījumu metodi.

Izstrādātās bezvadu ierīces ir vienkārši lietojamas – ieslēgšana/ izslēgšana ar vienu spiedpogu. Integrētas divas informatīvas gaismas diodes, kas parāda darbības režīmu un akumulatora uzlādes līmeni. Bluetooth savienojuma konfigurācija ir īpaši pielāgota vienkāršam lietotājam.

Izstrādāta augsti efektīva „viedā apģērba” programmatūra, kas optimizēti uzrauga un kontrolē ierīces darbības režīmus un maksimāli taupa akumulatora enerģiju.

Izstrādāts efektīvs daudzdižu PPG sensors, kas īpaši piemērots mērījumiem no dažādām ķermeņa daļām un praksē uzrādīja ļoti labus rezultātus.

Iegūtie mērījumu rezultāti ar izstrādātām „viedā apģērba” prototipa ierīcēm lielākā mērā arī atspoguļo digitālās PPG mērījumu metodes precizitāti, ko var attiecināt arī uz iepriekš izstrādātajām mērījumu ierīcēm.

Kopsavilkums

Promocijas darbā izvirzītais mērķis - izstrādāt metodes un iekārtas ātrai un neinvazīvai asinsrites parametru kontrolei, kas mērījumu rezultātā attēlotu cilvēka kardiovaskulārā stāvokļa parametrus un dotu tā kvantitatīvu novērtējumu reālā laikā - ir sekmīgi realizēts. Iegūtie rezultāti liecina, ka izstrādās mērīšanas metodes un iekārtas ir veiksmīgi izmantojamas cilvēka kardiovaskulārā stāvokļa ērtai un operatīvai novērtēšanai, kā arī sirds un asinsvadu problēmu agrīnai diagnostikai.

Galvenie promocijas darba rezultāti

1. Piedāvāta jauna metode fotopletizmogrāfijas signālu reģistrēšanai reālā laikā ciparu formātā, neizmantojot analogo ciparu pārveidotāju. Metode eksperimentāli realizēta četrās oriģinālās maketierīcēs fizioloģisko parametru mērījumiem.
2. Piedāvāta jauna metode rekapilarizācijas kinētikas atainošanai reālā laikā, izmantojot fotopletizmogrāfijas signālus spektra zilajā daļā. Metodes realizācijai konstruēta un sekmīgi pārbaudīta attiecīga mērierīka.
3. Izstrādāta un eksperimentāli pārbaudīta trīskanālu fotopletizmogrāfijas signālu mērierīce, kuras darbība balstīta uz 1.p. piedāvāto metodi.
4. Izstrādāta un eksperimentāli pārbaudīta multispektrālās fotopletizmogrāfijas mērierīce ar trīs viļņu garumu lāzerdiodi dažāda dziļuma asinsvadu pulsāciju izpētei.
5. Izstrādātas un eksperimentāli pārbaudītas uzpirkstenī un apģērbos integrētas miniatūras bezvadu PPG mērierīces attālinātam kardiovaskulārā stāvokļa monitoringam.
6. Veikto laboratorijas un klīnisko mērījumu rezultāti apliecina divu piedāvāto metožu un piecu izstrādāto maketierīču piemērotību agrīnai kardiovaskulārai diagnostikai un ilgstošam sirdsdarbības monitoringam.

REZULTĀTU PUBLICITĀTE

1. Raksti žurnālos un rakstu krājumos

(ar BOLD izcelti nosaukumi rakstiem, kas citēti starptautiskās datu bāzēs)

- I. J. Spigulis, R. Erts, V. Nikiforovs, **E. Kviēsis-Kipge**. **Wearable wireless photoplethysmography sensors**. *Proc. SPIE*, vol. 6991, 6991120 (2008).
- II. **E. Kviēsis-Kipge**, E. Čurkste, J. Spigulis and D. Gardovska. **Optical studies of the capillary refill kinetics in fingertips**, *Proc. IFMBE 25/VII*, Springer, pp. 377-379 (2009).
- III. **E. Kviēsis-Kipge**, E. Čurkste, J. Spigulis, L. Eihvalde. **Real-time analysis of skin capillary-refill processes using blue LED**. *Proc. SPIE*, Vol.7715, 7715231-5 (2010).
- IV. R. Erts, **E. Kviēsis-Kipge**, J. Zaharans, E. Zaharans, J. Spigulis. **Wireless photoplethysmography finger sensor probe**, *IEEE Explore*, 10.1109/BEC.2010.5630194, p. 283-284 (2010).
- V. L. Asare, **E.Kviēsis-Kipge**, A.Grabovskis, U.Rubins, R.Erts, J.Spigulis. **Multi-spectral photoplethysmography biosensor**. *Proc. SPIE*, v. 8073, 80731Z (2011).
- VI. L. Asare, **E. Kviēsis-Kipge**, U. Rubins, O. Rubenis, J. Spigulis. **Multi-spectral photoplethysmography technique for parallel monitoring of pulse shapes at different tissue depths**. *Proc. SPIE*, v. 8087, 80872E (2011).
- VII. **E. Kviēsis-Kipge**, J. Zaharans, O. Rubenis, A. Grabovskis. **A photoplethysmography device for multipurpose blood circulatory system assessment**. *Proc. SPIE*, 8090, 80900W (2011).
- VIII. A. Grabovskis, **E. Kviēsis-Kipge**, Z. Marcinkevics, V. Lusa, K. Volceka, M. Greve. **Reliability of hemodynamic parameters measured by a novel photoplethysmography device**. *Proc. IFMBE*, Springer, v.34 pp. 199-202 (2011).
- IX. L.Asare, **E.Kviēsis-Kipge**, M.Ozols, J.Spigulis, R.Erts. **Multi-spectral Optoelectronic Device for Skin Microcirculation Analysis**. *Lith. J.Phys.*, v.52, No.1, pp. 59-62 (2012).
- X. **E. Kviēsis-Kipge**, V. Mečņika, O. Rubenis. **Miniature wireless photoplethysmography devices: Integration in garments and test measurements**, *Proc. SPIE*, 8427, 84273H (2012).
- XI. Z. Marcinkevics, V. Mecnika, **E. Kviēsis**, U. Rubins, I. Krievins. **Wearable photoplethysmography device for telemetric monitoring of pulse wave parameters**. *LASE J. Sport Sci.* pp. 77- 92 (2012).
- XII. **E.Kviēsis-Kipge** A new technique for optical detection of biosignals. *Latv. J. Phys. Tehn. Sci.*, v. 46, No3, pp. 64 – 69 (2009).
- XIII. V. Mečņika, **E. Kviēsis**, Z. Macinkevičs, R. Erts, I. Krievinš. Fotopletizmogrāfijas ierīces izmantojamība biomedicīniskajā apgērbā. *Sci.J. RTU*, ser.9, v.5., pp 188-193 (2010).
- XIV. M.Greve, **E.Kviēsis-Kipge**, O.Rubenis, U.Rubins, V.Mecnika, A.Grabovskis, Z.Marcinkevics. Comparison of pulse rate variability derived from digital photoplethysmography over the temporal artery with the heart rate variability derived from a polar heart rate monitor. *Proc. 7th ESGCO* (Kazimierz Dolny, PL), pp. 1-3 (2012).
- XV. K.Volceka, D.Jakovels, Z.Arina, J.Zaharans, **E.Kviēsis**. **Development of a non-invasive multispectral LED device for adipose tissue thickness measurements in vivo**. *Proc. SPIE* Volume 8427, 84273N, doi:10.1117/12.922704, (2012).
- XVI. A. Grabovskis, Z. Marcinkevics, U. Rubins, **E. Kviēsis-Kipge**. **Effect of probe contact pressure on the photoplethysmographic assessment of conduit artery stiffness**. *J. Biomed. Opt.* 18 (2), 027004 (2013).

2. Patenti:

1. Metode un ierīce arteriālā asinsspiediena neinvazīvai un nepārtrauktai noteikšanai. (Z. Marcinkevics, **E. Kviēsis Kipge**, J.I. Aivars, J. Spīgulis), patents LV 13791 (2009).
2. Portatīva elektrokardiogrāfiskā ierīce. (R. Erts, A. Ļihačovs, Z. Marcinkevičs, M. Ozols, **E. Kviēsis Kipge**), patents LV 13790 (2009).

3. Konferenču tēzes:

1. R. Erts, J. Spigulis, M. Ozols, **E. Kviēsis**, R. Andersson. Wireless multi-channel photoplethysmography device. *Abstr. Int. Conf. AOMD-5*, Vilnius, 2006, p. 56.
2. R. Erts, **E. Kviēsis-Kipge**, J. Spigulis. Photoplethysmographic wireless device based on the Bluetooth technology. *Abstr. Int. Conf. "Biomedical Engineering"*, Kaunas, 2006, p. 119.
3. R. Erts, V. Nikiforovs, M. Ozols, **E. Kviēsis**, J. Spigulis. Wireless photoplethysmography sensors in wearable computing. *Abstr, 14th Nordic-Baltic Conf. Biomed. Eng. Med. Phys.*, Riga, Latvia, p. 52, 2008.
4. **E. Kviēsis-Kipge** and J. Spigulis, Wireless optical sensing of fingertip blood pulsations. *Abstr. Int. Conf. "Northern Optics 2009"*, p. 102, Vilnius (2009).
5. **E. Kviēsis-Kipge**, E. Curkste, J. Spigulis and L. Eihvalde. Development of capillary refill device using two wavelengths. *Abstr. Int. Conf. Development in Optics and Communications (DOC-2010)*, Riga, Latvia, 2010.
6. J.Zaharans, E.Zaharans, **E.Kviēsis-Kipge**. Development of optical wireless photoplethysmography sensor probe. *Abstr. Int. Conf. Development in Optics and Communications (DOC-2010)*, Riga, Latvia, 2010.
7. V. Mečnika, **E.Kviēsis**, Z.Macinkevičs, I. Krievins, R. Erts. Usability of a Photoplethysmography Device for a Biomedical Garment. *Abstr. Int. Conf. Biomedical Engineering 2010*, Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania, 2010.
8. Grabovskis, **E. Kviēsis-Kipge**, Z. Marcinkevics, U. Rubins. Usability of PPG parameters in quantitative assessment of artery stiffness. *Abstr. Int. Conf. "New Approaches to Improving Health Care Education: Today and Tomorrow"*, University of Latvia, Riga, Latvia, 2010.
9. J. Spigulis, R. Erts, V. Nikiforovs, **E. Kviēsis-Kipge** „Apģērbos integrēti bezvadu fotopletizmogrāfiskie sensori”. Fotonikas sekcija, *Latvijas Universitātes 67. konference*, Rīga, Latvija 2009, p. 61.
10. R. Erts, V. Nikiforovs, M. Ozols, **E. Kviēsis**, J. Spigulis. „Bezvadu fotopletizmogrāfiskie sensori datorizētos apģērbos”, Fotonikas sekcija, *Latvijas Universitātes 67. konference*, Rīga, Latvija 2009, p. 62.
11. V. Mečnika, M. Grēve, **E. Kviēsis-Kipge**, O. Rubenis, & U. Rubīns. Wireless Photoplethysmography Sensor Body Area Network for Cardiovascular Monitoring. *Abstr. Int. Conf. Biophotonics In Dermatology And Cardiology*, Riga, Latvia, 2012.
12. **E. Kviēsis-Kipge**, O. Rubenis, V.Mechnika. Wireless Cardiovascular Monitoring Device and Its Clinical Tests. *Abstr. Int. Conf. Biophotonics In Dermatology And Cardiology*, Riga, Latvia, 2012.
13. V.Mechnika, M.Greve, **E.Kviēsis-Kipge**, O.Rubenis, U.Rubins. Implementation of a Wireless Photoplethysmography Sensor Body Area Network for Cardiovascular Monitoring. *Abstr. Int. Conf. Biophotonics In Dermatology And Cardiology*, Riga, Latvia, 2012.
14. K.Volceka, L.Ozolina-Moll, **E.Kviēsis-Kipge**, J.Zaharans, E.Zaharans, D.Jakovels, Z.Marcinkevics. Determination of Subcutaneous Adipose Tissue with an Optical Method. *Abstr. Int. Conf. Biophotonics In Dermatology And Cardiology*, Riga, Latvia, 2012.

15. M.Greve, **E.Kviesis-Kipge**, V.Mechnika, U.Rubins, Z.Marcinkevics. Accuracy of the Wireless Digital Photoplethysmography System in Estimation of Heart Rate Variability. *Abstr. Int. Conf. Biophotonics In Dermatology And Cardiology*, Riga, Latvia, 2012.
16. E.Zaharans, J.Zaharans, U.Rubins, **E.Kviesis-Kipge**, O.Rubenis. Development of Portable Non-contact Photoplethysmography Device. *Abstr. Int. Conf. Biophotonics In Dermatology And Cardiology*, Riga, Latvia, 2012.
17. L.Asare, **E.Kviesis-Kipge**, A.Grabovskis, U.Rubins, J.Spigulis, R.Erts. Multi-spectral photoplethysmography device comprising blue-red-infrared laser diode. *Development in Optics and Communications*, Riga, Latvia, 2011.
18. Z.Marcinkevičs, **E. Kviesis-Kipge**, J.Aivars, J.Spigulis. Determination of relationship between arterial pressure and pulse wave velocity using sphygmography and photoplethysmography during post – exercise recovery period, International Conference:Physical Education, Sport and Health; section- Kinesitherapy and sport medicine, University of Pitesti, Pitesti, Romania, November 21 - 23, p. 202 – 203, 2008.
19. **E. Kviesis-Kipge**, E. Curkste, J. Spigulis and D. Gardovska. Optical Studies of the Capillary-Refill Kinetics in Fingertips. World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, Munich, Germany, September 7 - 12, 2009.
20. **E.Kviesis-Kipge**. A new technique for optical detection of biosignals, *Developments in Optics and Communications*, Riga, Latvia, April 24 – 26, 2009
21. **E. Kviesis-Kipge**, E. Čurkste, J. Spigulis, L. Eihvalde. Real-time analysis of skin capillary-refill processes using blue LED. *Biophotonics: Photonic Solutions for Better Health Care*, Brussels Belgium, April 12 – 16, 2010.
22. R. Erts, **E. Kviesis-Kipge**, J. Zaharans, E. Zaharans, J. Spigulis. Wireless photoplethysmography finger sensor probe. *Baltics Electronics Conference 2010*, Tallinn, Estonia, October 4 - 6, 2010.
23. **E. Kviesis-Kipge**, J. Zaharans, O. Rubenis, A. Grabovskis. A photoplethysmography device for multipurpose blood circulatory system assessment. *Int. Conf. European Conferences on Biomedical Optics 2011*, Munich, Germany, May 22 – 24, 2011.
24. L.Asare, **E.Kviesis-Kipge**, U.Rubins, O.Rubenis, J.Spigulis. Multi-spectral photoplethysmography technique for parallel monitoring of pulse shapes at different tissue depths. *Int. Conf. European Conferences on Biomedical Optics 2011*, Munich, Germany, May 22 – 24, 2011.
25. L.Asare, **E.Kviesis – Kipge**, A.Grabovskis, U.Rubins, J.Spigulis, R.Erts. Multi-spectral photoplethysmography biosensor. *Optical sensors 2011 and, Photonic crystal fibers V*, Prague, Czech Republic, 18-20 April, 2011.
26. **E. Kviesis-Kipge**, V.Mečņika, O. Rubenis. Miniature wireless photoplethysmography devices: integration in garments and test measurements. *Biophotonics: Photonic Solutions for Better Health Care III*, Brussels Belgium, April 12 – 16, 2012, Best Biophotonics Poster 2012.
27. L.Asare, **E.Kviesis-Kipge**, M.Ozols, J.Spigulis, R.Erts. Multi-spectral Optoelectronic Device for Skin Microcirculation Analysis. *Advanced Optical Materials and Devices 2011*, Vinius, Lithuania, August 28 – 31, 2011.
28. M.Greve, V.Mecnika, **E.Kviesis-Kipge**, O.Rubenis, U.Rubīns, A.Grabovskis. Photoplethysmography system for wireless heart rate variability monitoring during static exercise. *VII International Baltic Sports Medicine Congress*, Riga, Latvia, November 24 – 26, 2011.
29. A. Grabovskis, **E. Kviesis-Kipge**, Z. Marcinkevics, V. Lusa, K. Volceka and M. Greve. Reliability of Hemodynamic Parameters Measured by a Novel Photoplethysmography Device. *Nbc15 Nordic-Baltic Conference on Biomedical Engineering*, Aalborg, Denmark, June 14 – 17, 2011.

30. M.Greve, **E.Kviesis-Kipge**, O.Rubenis, U.Rubins, V.Mecnika, A.Grabovskis, Z.Marcinkevics. Comparison of pulse rate variability derived from digital photoplethysmography over the temporal artery with the heart rate variability derived from a polar heart rate monitor. ESGCO 2012: 7th Conference of the European Study Group on Cardiovascular Oscillations., KazimierzDolny, Poland, April 22-25, 2012.
31. V.Mečņika, Z.Marcinkevičs, **E.Kviesis**, I.Krieviņš. Wearable photoplethysmography device for telemetric monitoring of pulse wave parameters. Starpt. zin. konf. Sporta zinātnē LSPA, Rīga, Latvija, Aprīlis 25 – 26, 2012.
32. **E.Kviesis-Kipge**, O.Rubenis. Development of new photoplethysmography mini-device integrated in garment. Advanced Optical Materials and Devices, Vilnius, Lithuania, August 28-31, 2011.
33. J.Zaharans, E.Zaharans, U.Rubins, **E.Kviesis-Kipge**, O.Rubenis. Development of non-contact photoplethysmography device and its application for blood vessel occlusion detection and pulse oximetry. Advanced Optical Materials and Devices, Vilnius, Lithuania, August 28-31, 2011.
34. K.Volceka, D.Jakovels, Z.Arina, J.Zaharans, **E.Kviesis**. Development of a non-invasive multispectral LED device for adipose tissue thickness measurements in vivo. European Conferences on Biomedical Optics 2012, Brussels, Belgium, April 16 - 19 2012.
35. M.Greve, **E.Kviesis-Kipge**, V.Mecnika, U.Rubīns, Z.Marcinkevics. Accuracy of the wireless photoplethysmography system in estimation of heart rate variability. Biophotonics in Dermatology and Cardiology 2012, Riga, Latvia, March 30-31 2012.
36. **E. Kviesis-Kipge**. A new technique for optical detection of biosignals. 5th International Student Conference "Developments in Optics and Communications", Riga, Latvia, April 24 - 26, p. 64 – 69, 2009.

Izmantotās literatūras saraksts

1. Apinis P. *Cilvēks. Anatomija, fizioloģija, patoloģijas pamati*. Nacionālais Medicīnas apgāds & Apgāds Jāņa sēta, 1998, lpp. 429 – 501.
2. Liang X, Boppart SA. *Biomechanical properties of in vivo human skin from dynamic optical coherence elastography*. IEEE Trans Biomed Eng. 2010 Apr; 57(4):953-9.
3. <http://en.wikipedia.org/wiki/Skin>
4. Wang LV., Wu HI. *Biomedical Optics*. Wiley. 2007. ISBN 978-0-471-74304-0.
5. http://info.tuwien.ac.at/iflt/safety/section1/1_1_1.htm
6. Tuchin V. *Tissue optics: Light scattering methods and instruments for medical diagnosis*. SPIE Press, Bellingham, 2000.
7. Allen J., Murray A. *Modelling the relationship between peripheral blood pressure and blood volume pulses using linear and neural network system identification techniques*. Physiological Measurement, Vol. 20, 1999, pp. 287-301.
8. Anderson R., Parrish J. *The Optics of Human Skin*, *Journal of Investigative Dermatology*. 1981, pp. 13-18.
9. Golster H. *Regulation of Microvascular Blood Flow: a clinical and experimental study based on laser Doppler perfusion imaging*. PhD Thesis, Linköping University, 2001, pp. 9-50.
10. Lindberg G. *Photoplethysmography: Methodological Studies and Applications*. Linköping University, 1991, pp. 9- 22.
11. Ugnell, H., Öberg, P.Å. *Time variable photoplethysmographic signal: its dependence on light wavelength and sample volume*. Proc. SPIE 2331, 1995. pp. 89-97.
12. <http://www.clinsci.org/cs/103/0371/cs1030371.htm>
13. <http://www.angioscan.ru/en/angioscan-01/full>
14. <http://www.bluetooth.com/Pages/basics.aspx>
15. <http://www.bluetooth.com/Bluetooth/Technology/>
16. <http://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth>
17. Ciardiello, T. *Wireless communications for industrial control and monitoring*. Computing & Control Engineering Journal, Vol.16, No.2, 2005, pp. 12-13.
18. Evans-Pughe, C. *Bzzzz zzz [ZigBee wireless standard]*. IEE Review, Vol.49, No.3, 2003, pp. 28-31.
19. *Technical Comparison*. <http://www.bluetooth.com/Bluetooth/Technology/Works/Compare/Technical/>
20. <http://www.zigbee.org/Specifications/ZigBee/Overview.aspx>
21. <http://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24L01>
22. <http://www.hoperf.com/>
23. <http://www.hoperf.com/rf/fsk/21.htm>
24. <http://www.nonin.com/OEMsolutions/WristOx2-Model-3150-OEM>
25. http://www.contecmed.com/paypal/product_show.asp?id=23
26. <http://www.biocomtech.com/products/personal-health-monitor>
27. <http://www.heartsensor.info/we08/we08.html>
28. Stojanovic R., Karadaglic D. *A LED-LED-based photoplethysmography sensor*. 2007 Physiol. Meas. 28 N19-N27.
29. http://en.wikipedia.org/wiki/Savitzky%E2%80%93Golay_smoothing_filter
30. http://en.wikipedia.org/wiki/Capillary_refill
31. Shavit A., Brant R., Nijssen-Jordan C. *A novel imaging technique to measure capillary-refill time: improving diagnostic accuracy for dehydration in young children with gastroenteritis*. Pediatrics 2006.118:2402-2408.
32. <http://en.wikipedia.org/wiki/Sepsis>

33. Lima A., Bakker J. *Noninvasive monitoring of peripheral perfusion*. Intensive Care Med. 2005. 31:1316-1326.
34. Shavit A., Brant R., Nijssen-Jordan C. *A novel imaging technique to measure capillary-refill time: improving diagnostic accuracy for dehydration in young children with gastroenteritis*. Pediatrics 2006. 118:2402-2408.
35. Spigulis J., Gailite L., Lihachev A., Erts R. *Simultaneous recording of skin blood pulsations at different vascular depths by multi-wavelength photoplethysmography*. Appl. Opt. 2007. 46:1754-1759.
36. Gailite L., Spigulis J., Lihachev A. *Multilaser photoplethysmography technique*. Las. Med. Sci. 2008. 23:189-193.
37. Spigulis J., Gailite L., Lihachev A. *Contact probe pressure effects in skin multi-wavelength photoplethysmography*. Proc. 2007. SPIE-OSA, 6628 66281F-1 – 66281F-8.
38. Kohen E., Santus R., Hirschberg J.G. *Photobiology*. 1995. Academic Press:308.
39. Malik M. *Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use*. – Circulation, 1996. 93:1043–1065.
40. User manual, *Kubios HRV Analysis Software*, Chapter 3.
41. <http://www.finapres.com/site/catalogue/2>
42. http://en.wikipedia.org/wiki/Butterworth_filter
43. <http://www.hobbytronics.co.uk/rotary-encoder-tutorial>
44. https://jp.hamamatsu.com/products/sensor-ssd/pd218/pd232/pd233/S6931-01/index_en.html
45. Rubīns U. Promcijas darbs. „*Fotopletizmogrāfisko biosignālu formas analīze un asinsrites dinamikas modelēšana*”. Rīga, 2009.
46. <http://www.ti.com/product/opt101>
47. Litwin L. *FIR and IIR digital filters*. IEEE Potentials / IEEE – 2000.
48. Watkinson J. *An Introduction to Digital Audio*. Oxford: Focal Press, 1994.
49. Lippincott W., Wilkins [Handbook of Signs & Symptoms] (Third Edition), Springhouse. 2006.
50. Allen J. *Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement*. Physiol. Meas. Vol. 2007. 28, R1-R39.
51. Grabovskis A., Marcinkevics Z., Rubenis O., Rubins U., and Lusa V. *Photoplethysmography system for blood pulsation detection in unloaded artery conditions*. Vol. 8427, 2012. pp. 84270L–84270L–9.

Pateicības

Izsaku lielu pateicību darba vadītājam profesoram Jānim Spīgulim, par darba vadīšanu un palīdzību darba tapšanā. Liels paldies darba kolēģiem: Zbigņevam Marcinkevičam, Jānim un Ērikam Zaharaniem, Oskaram Rubenim, Lāsmai Asarei.

Paldies visiem LU Atomfizikas un spektroskopijas institūta darbiniekiem par sniegto atbalstu.

Paldies maniem vecākiem par sapratni un atbalstu.

Šis darbs izstrādāts ar Latvijas Universitātes Eiropas sociālā fonda projekta „Atbalsts doktora studijām Latvijas Universitātē” finansiālo atbalstu.

Pielikumi

1. Izraksts no SCOPUS publikāciju datu bāzes.
2. Metode un ierīce arteriālā asinsspiediena neinvazīvai un nepārtrauktai noteikšanai. (Z. Marcinkevics, **E. Kvaisis Kipge**, J.I. Aivars, J. Spīgulis), patents LV 13791 (2009).
3. Portatīva elektrokardiogrāfiskā ierīce. (R. Erts, A. Ļihačovs, Z. Marcinkevičs, M. Ozols, **E. Kvaisis Kipge**), patents LV 13790 (2009).
4. LU avīze vasaras numurs *Fotonikas gadsimta cienīgs projekts ādas un asinsrites novērtēšanai*, 3 – 5. lpp.
5. Žurnāls „Ilustrētā zinātne”, *Gaisma nosaka diagnozi*, aprīļa numurs 2010, 64 – 66. lpp. Avīze „Diena”, *Rada mazas, draudzīgas medicīnas „nokijas”*, 17. februāris 2010, 7.lpp.
6. Žurnāls „Mājas Viesis”, sadaļa zinātne: *Sirds „uz delnas”* 4. decembris 2010, 26.lpp.
7. Promocijas darba publikācijas.