

Mjerenje zasićenosti krvi kisikom

Teorijske napomene:

Pulsna oksimetrija (*pulse oximetry*) je neinvazivna metoda mjerenja oksigenacije ili postotka hemoglobina koji je zasićen kisikom (*saturation of peripheral oxygen* - SpO₂). Slično fotopletizmografu senzor se postavlja na vrh prsta ili na ušnu resicu. Senzor se sastoji od dva izvora svjetla valnih duljina 650nm i 805nm, koji se djelomično apsorbiraju u hemoglobinu u ovisnosti o zasićenosti ili nezasićenosti kisikom. Računajući apsorpciju na dvjema valnim duljinama moguće je odrediti zasićenost hemoglobina kisikom. Ova metoda ovisi o protoku krvi koji je nužan za njeno funkcioniranje jer kada ga nema ili je oslabljen moguće je da oksimetar neće raditi.

Točni su rasponu od 70 do 100% (±2%) zasićenosti kisikom ali ispod 70% točnost je manja. Obično imaju alarm kada zasićenost padne ispod 90% što je znak oksidivnog stresa ili hipoksije jer koncentracija bi uvijek trebala biti veća od 95%..

Uređaj je pogodan za mjerenje koncentracije kisika u krvi i broja otkucaja srca tokom anestezije, tijekom oporavka nakon operacija.

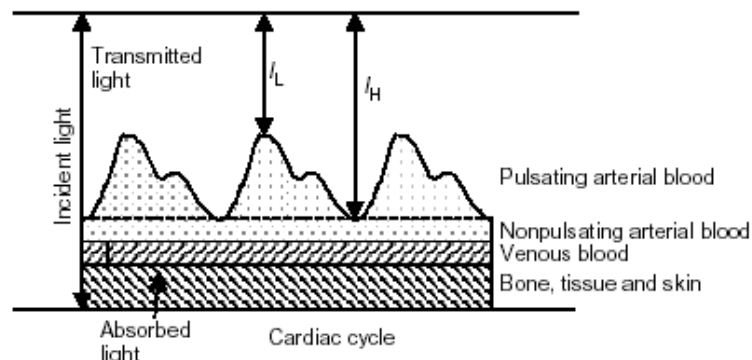
Pulsni oksimetri omogućavaju i mjerenje brzine otkucaja srca. Primjenjuju se u bolnicama i vojsci kao indikator vitalnih funkcija vojnika. Svaki od valova (650nm i 805nm) dobiven u fotiododi sadrži DC vrijednost koja je proporcionalna apsorpciji u tkivu i venskoj krvi čime se dobiva informacija o zasićenosti kisika u krvi i AC vrijednost koja ovisi o arterijskoj krvi iz koje se dobiva informacija o broju otkucaja srca. Zasićenost kisika se dobiva formulom:

$$S = A - B * \left(\frac{Y_{650}}{Y_{805}} \right)$$

$$Y_{650} = \text{Log} \left(\frac{I_{650}}{I_{o650}} \right)$$

$$Y_{805} = \text{Log} \left(\frac{I_{805}}{I_{o805}} \right)$$

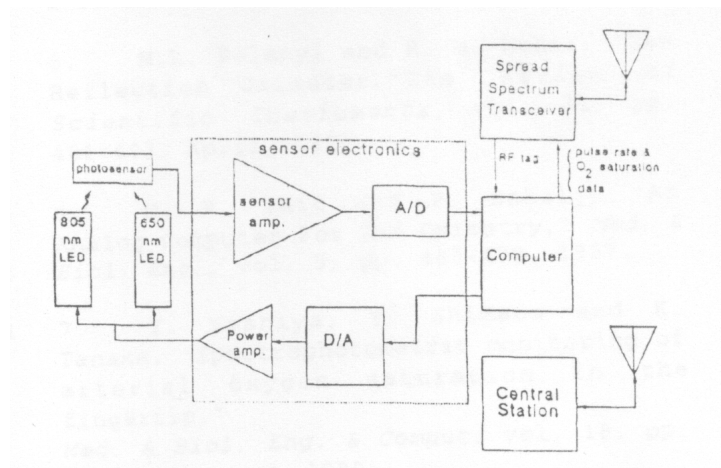
Gdje su S zasićenost kisika u krvi, A i B empirijske konstante, I₆₅₀ i I₈₀₅ AC i DC intenziteti dobivenog svijetla i I_{o650} i I_{o805} DC vrijednosti intenziteta dobivenog svijetla. Slika 1 prikazuje navedenu ovisnost. Blok dijagram jednog takvog sustava prikazan je Slika 2.



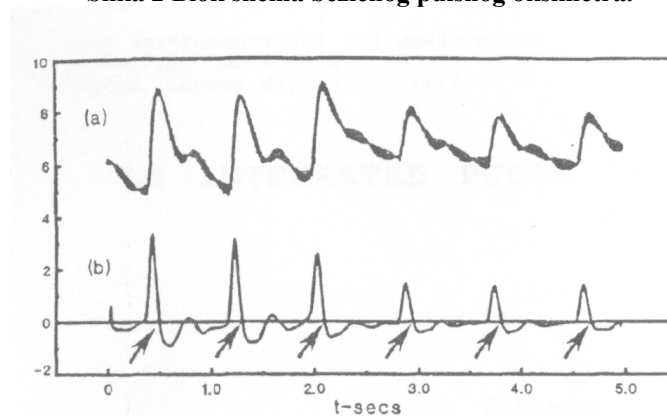
Slika 1 Apsorbirano i reflektirano svjetlo u krvi.

Računalo unutar prijenosnog modula kontrolira intenzitet LED dioda te vrši proračun zasićenosti kisika i broja otkucaja srca. Spread spectrum odašiljač prenosi signal od 350MHz koji sadrži informacije o SpO_2 i srčanu frekvenciju centralnoj stanici na kojoj se vrši prikaz.

Signali dobiveni uređajem prikazani su Slika 3 prvi signal prikazuje struju fotodiode, a drugi prvu derivaciju tog signala. Maksimum prvog signala odgovara prolasku kroz nulu drugog signala. Broj otkucaja srca proračunava se mjerenjem intervala između dva prolaska kroz nulu drugog signala.

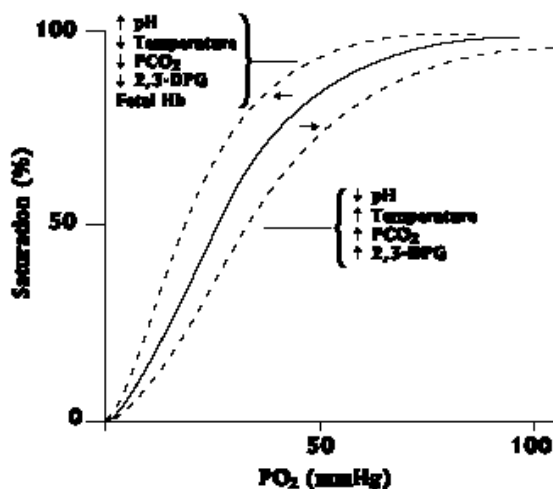


Slika 2 Blok shema bežičnog pulsog oksimetra.



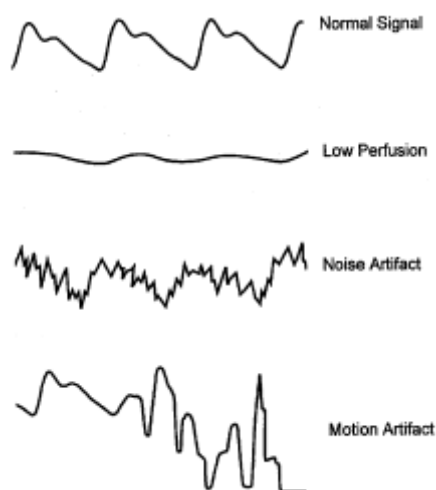
Slika 3 Signal A prikazuje intenzitet primljenog svjetla ili struju fotodiode, Signal B prikazuje prvu derivaciju signala A

Izračunata vrijednost zasićenog kisika ovisi o nekim čimbenicima. što je prikazano Slika 4.

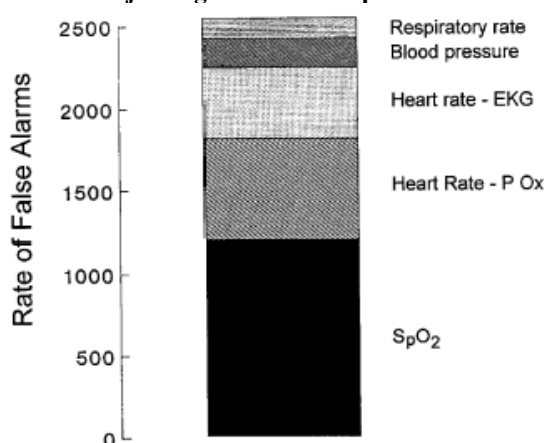


Slika 4 Ovisnost zasićenosti o parcijalnom tlaku kisika u krvi

Dobiveni signali mogu sadržavati i različite artefakte (Slika 5). Prikazana je usporedba pulsni oksimetara sa drugim uređajima (Slika 6), gdje se vidi broj lažnih alarma.



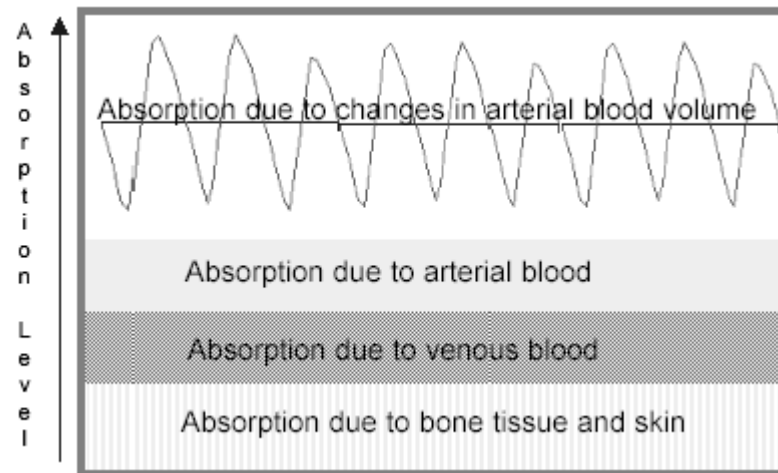
Slika 5 Uobičajeni signali dobiveni pulsni oksimetrom



Slika 6 Broj lažnih alarma uzrokovanih navedenim uređajima

Fotoelektrična pletizmografija (*Photo Plethysmography - PPG*) je neinvazivna metoda, zasnovana na mjerenju intenziteta infracrvene zrake koja prolazi kroz vrh prsta ili ušne resice. Infracrvene LED diode su pogonjene sinusnim signalom vrlo stabilne amplitude. Koža dobro provodi infracrvene valne duljine. Apsorpcija je najveća u krvnim žilama, a

najmanja u tkivu, što prikazuje Slika 7. Signal dobiven u fotodetektoru proporcionalan je promjeni volumena krvnih žila. Dobiva informacija također ovisi o krvnom tlaku.

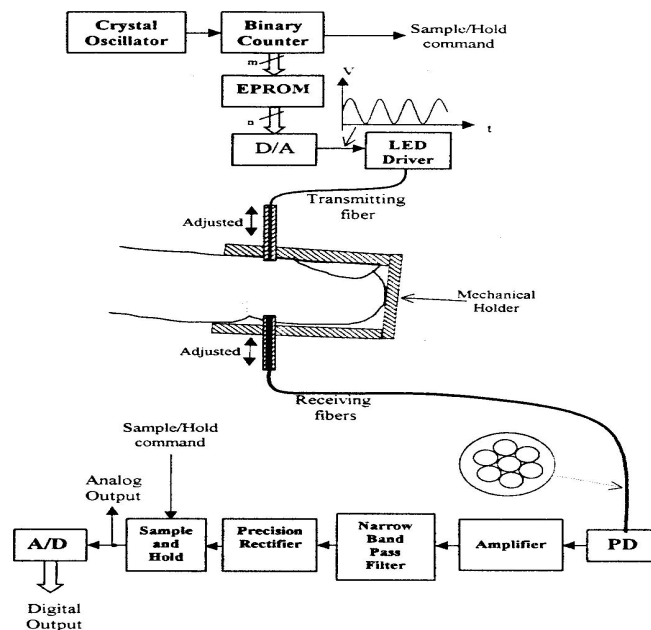


Slika 7 Prikaz nivoa apsorpcije u ovisnosti o mediju kroz koji prolazi

Primjena modulacije intenziteta zahtjeva da ne postoji promjena intenziteta izvora sinusnog signala. Informacija o promjeni volumena sadržana je u amplitudi signala koji primi fotodetektor.

Osim sinusnog signala koriste se i dc-napon, i pravokutni napon određene frekvencije da bi se izbjegao utjecaj ambijentalnog svjetla i toplinskog pomaka optičkog prijemnika. Jedan od kriterija za odabir frekvencije pravokutnog signala je raspon promjene mjerene varijable. Konvencionalna metoda - upotreba pravokutnih napona u modulaciji i analognih filtra u amplitudnoj demodulaciji ima neke nedostatke kao npr. šum pri demodulaciji, utjecaj frekvencijskih komponenti pravokutnog signala pri filtraciji itd.

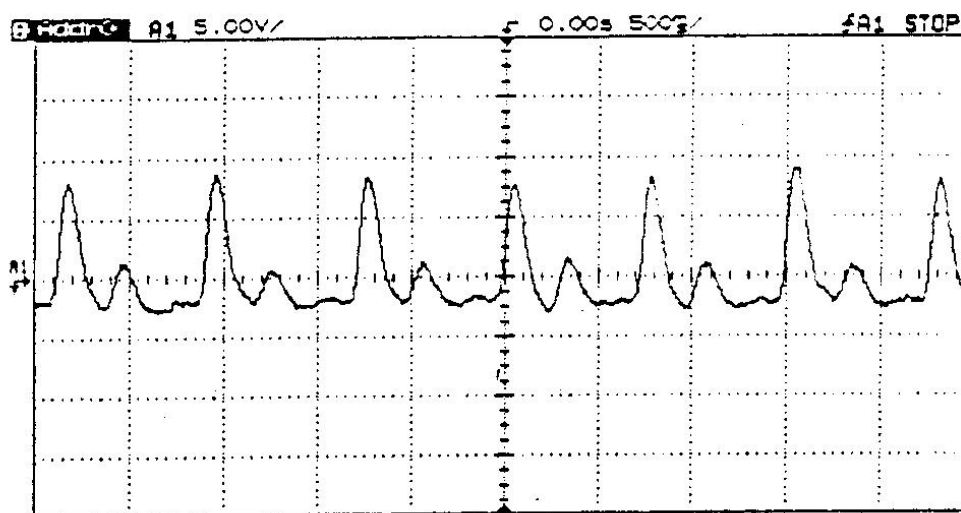
Slika 8 prikazuje implementaciju fotoelektričnog pletizmografa. Koristi se digitalna sinteza sinusnog napona koji nakon slijedila pogoni infracrvenu LED diodu (800nm). Intenzitet svjetla proporcionalan je struji koja teče kroz LED. Postavljanjem LED u povratnu vezu operacijskog pojačala izvodi se naponsko – strujna pretvorba.



Slika 8 Fotoelektrični pletizmograf (verzija1)

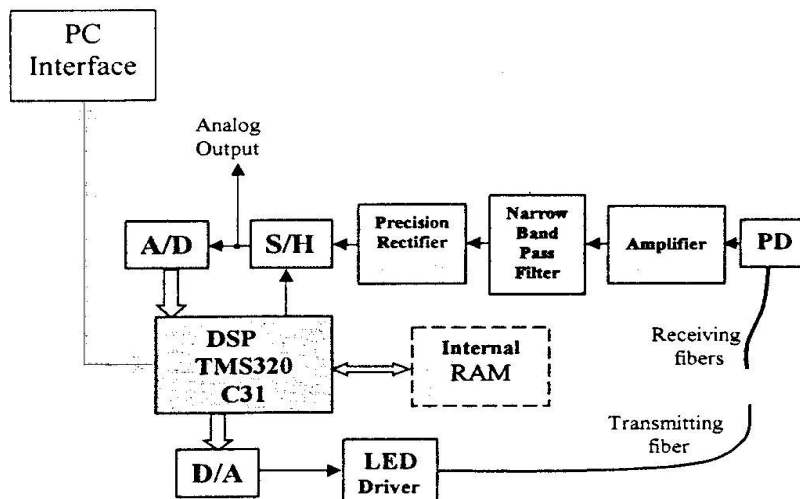
U konkretnoj realizaciji korišteno je otipkavanje od 307.2 kHz (256 uzoraka po periodu sinusa), u 8 bitnoj amplitudnoj razlučivosti, čime je dobiven sinusni signal frekvencije 1200 Hz.

Atenuacija infracrvenog signala ovisi o svjetlosnim karakteristikama medija. Signal dobiven u fotiododi se pojačava, filtrira kroz uskopojasni filtar te se ispravlja. Uobičajeno do ovog stupnja analogni filtar je prilagođen amplitudnoj demodulaciji. Ovdje se vrši sinkrona amplitudna demodulacija upotrebom sample & hold sklopa. Kako je dobiveni signal ispravljen, frekvencija otipkavanja se može udvostručiti. Dobiveni signal prikazan je slikom (Slika 9).



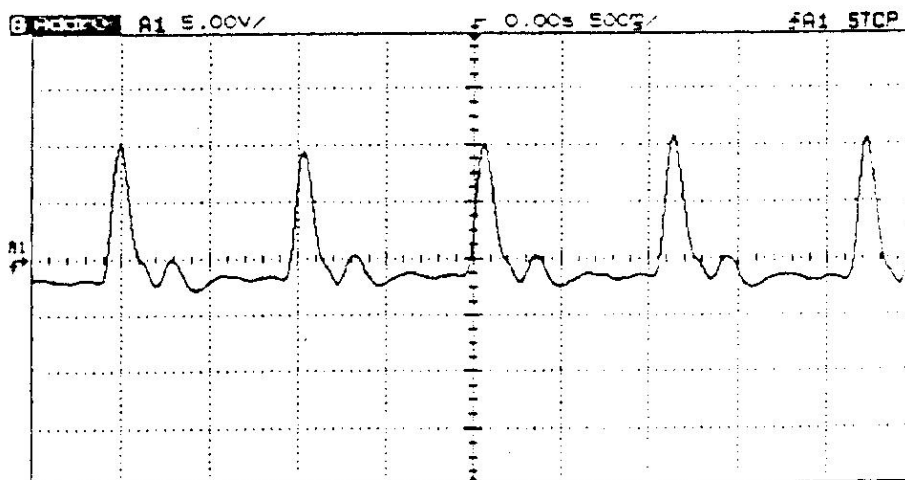
Slika 9 Signal dobiven fotopletizmografom prikazanog slikom (Slika 8).

Drugi način implementacije prikazan je slikom (Slika 10) gdje je korišten je DSP, te 12 bitna A/D konverzija uz ponovljeni sinusni signal od 1200 Hz. Rezultati ove realizacije prikazani su Slika 11. Pojasno-propusni filter ima centralnu frekvenciju 1200Hz i granične frekvencije 1100 Hz i 1300 Hz.



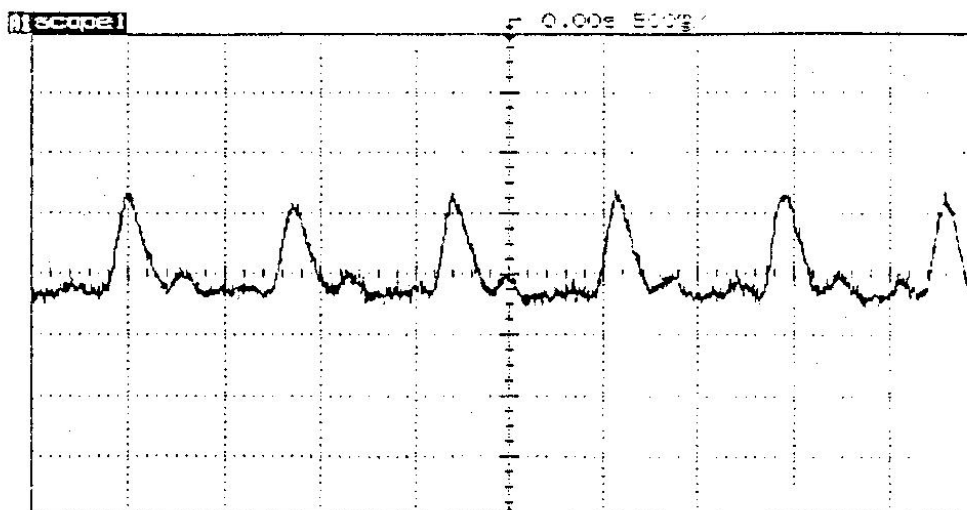
Slika 10 Fotoelektrični pletizmograf (verzija2)

(a)



Slika 11 Signal dobiven fotopletizmografom prikazanog Slika 10

Rezultati se mogu usporediti sa slikom (Slika 12), tradicionalnim načinom mjerenja pravokutnim naponom i korištenjem NP filtra sa $f_g=100\text{Hz}$ za amplitudnu demodulaciju. Signal sadrži mnogo više šuma.

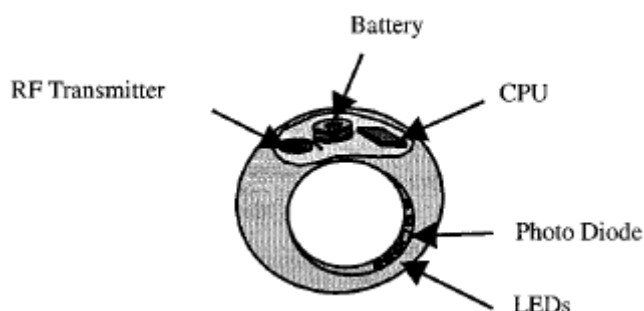


Slika 12 Signal dobiven tradicionalnom fotopletizmografijom.

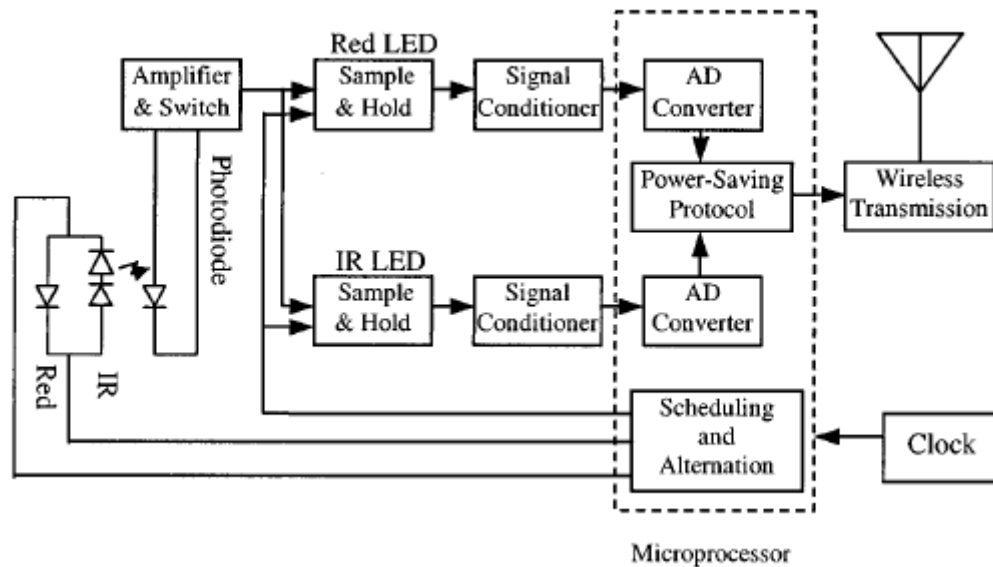
Bitno je da zraka između suprotno postavljenih LED i foto diode ne prolazi kroz kost. Također udaljenost između dioda mora ostati fiksna i tokom mjerenja ne smije se mijenjati. Dioda moraju dobro prianjati uz kožu. Odabir frekvencije od točno 1200Hz nije nužan, ona mora biti samo dosta udaljena od najviše frekvencije u spektru signala a to je oko 40Hz.

Oblik signala ovisi o temperaturi okoline, disanju, poziciji senzora, vježbi, razini hormona, stanju srca. Ako se valni oblici žele uspoređivati, ovi faktori moraju biti kontrolirani. Često je drugi val koji se pojavljuje u fotopletizmografskom signalu posljedica refleksije na grananju unutar arterijske mreže i sa godinama postaje sve manje izražen. To se objašnjava stenozama (sužavanjem).

Kao koncept pojavljuje se i minijaturna izvedba fotoelektričnog pletizmografa zamišljena kao «prstenasti» senzor. Senzor predstavlja integriranu izvedbu prethodno opisanih pletizmografa uz dodatak odašiljača koji omogućuje bežično povezivanje senzora sa pokaznikom. Osim minijaturizacije postiže se i manja potrošnja energije te se smanjuju artefakti uslijed pomicanja. Koncept je prikazan slikom (Slika 13).

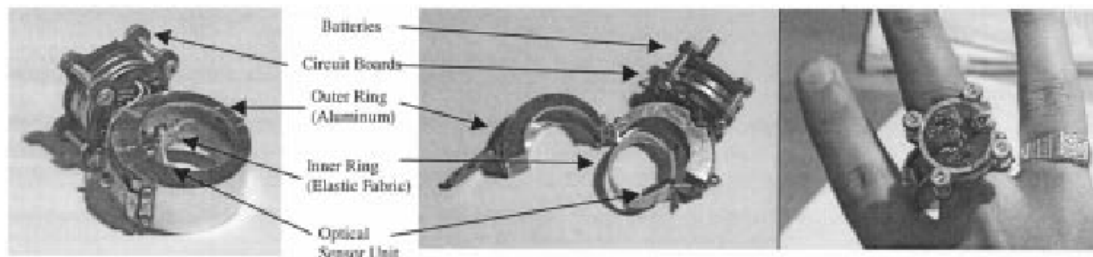


Slika 13 Koncept minijaturnog «prstenastog» senzora za praćenje broja otkucaja srca



Slika 14 Blok dijagram «prstenastog» senzora

Dvije led diode pokrivaju vidljivi i infracrveni spektar. Kako led diode troše najviše energije, radi njene uštede izvedeno je preklapanje rada dioda tako da nikada ne rade obje istovremeno. Artefakti uslijed kretanja i akceleracije izazivaju probleme pri detekciji broja otkucaja srca tako da je posebnom izvedbom sa dvostrukim prstenom ovaj problem minimaliziran.



Slika 15 Prototip «prstenastog» senzora

Rad u laboratoriju:

1. Mjerenje SpO₂.

- Senzor postaviti na kažiprst. Koliko je očitavanje SpO₂. Skicirajte valni oblik

- Prst umočiti u hladnu vodu. Nanovo izmjeriti SpO₂. Što zapažate?

- Mjerenja ponovite na ostalim prstima. Jesu li rezultati isti?

2. Mjerenje SpO₂ uz opstrukciju protoka.

- Prekrižite prste i pokušajte zaustaviti protok krvi. Što uočavate?

- Istovremeno mjerite tlak i očitavajte SpO₂.

- O čemu ovisi kvaliteta signala SpO₂?

3. Izračun srčane frekvencije iz signala SpO₂.

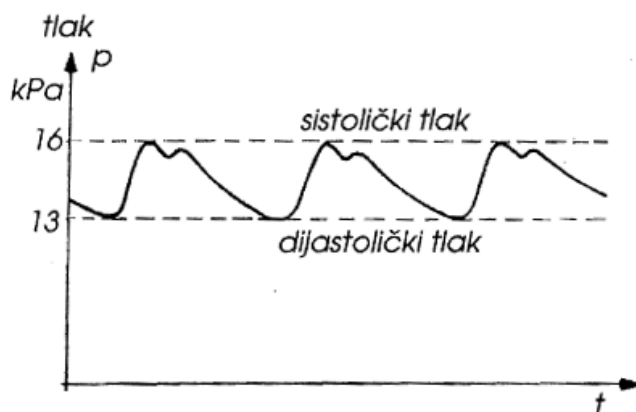
- Izmjerite srčanu frekvenciju iz grafa SpO₂ i usporedite sa očitanjem koje ispisuje instrument. Da li se rezultati poklapaju?

Mjerenje krvnog tlaka i

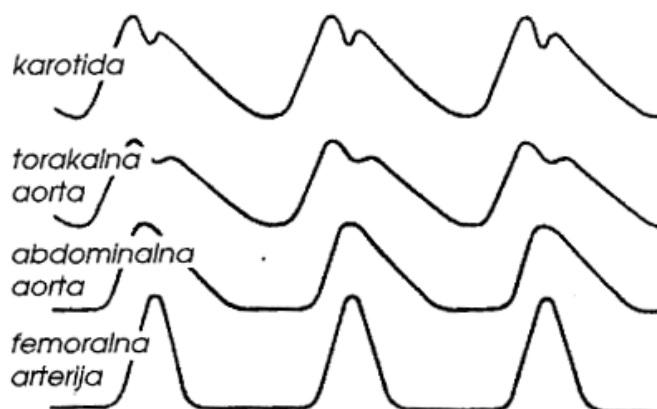
Teorijske napomene

Pri svakoj kontrakciji klijetki (ventrikula) povećava se tlak u njima što dovodi do istiskivanja krvi u arterije. Nakon pada tlaka u klijetkama opada i tlak u arterijama. No nagli pad tlaka u arterijama nije moguć unatoč naglom padu tlaka u klijetkama, jer povrat krvi u klijetku sprečavaju semilunarni zalisci, pa postupno krvni tlak (za vrijeme dijastole) pada zbog otjecanja krvi prema manjim arterijama, arteriolama i kapilarama.

Valni oblik promjene krvnog tlaka u arterijama prikazan je na slici (Slika 16). No on se mijenja u skladu s udaljenosti od srca i na kojoj se arteriji mjeri, što se vidi na slici (Slika 17). Promjena tlaka između sistoličkog i dijastoličkog tlaka smanjuje se udaljavanjem od srca, ali ne bitno, sve dok se ne dođe do udaljenijih arterija znatno smanjenog polumjera (manjeg od 0,2 mm). U dijagnostici posebno je važno znati **sistolički** (maksimalni) i **dijastolički** (najniži) tlak, dok se cjelokupni valni oblik tlaka promatra u intenzivnoj skrbi za vrijeme operacije i kod nekih kardiovaskularnih bolesti.



Slika 16. Valni oblik promjene krvnog tlaka u glavnim arterijama.



Slika 17. Valni oblik tlaka u različitim arterijama.

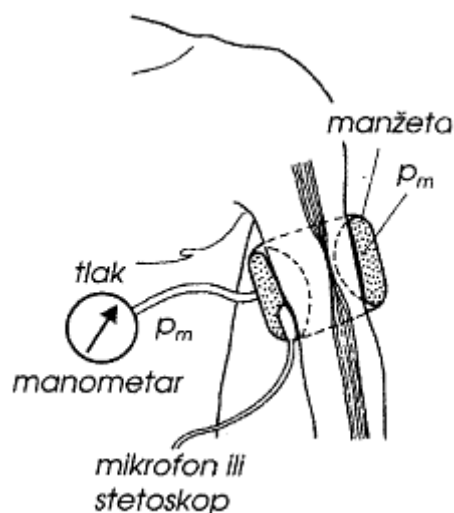
Krvne žile su elastične, tako da se njihov polumjer r mijenja razmjerno tlaku p prema izrazu:

$$\frac{dr}{dp} = \frac{r_0^2}{hE_M}$$

gdje je r_0 srednji polumjer, h debljina, a E_M modul elastičnosti stijenke arterije. Ta činjenica omogućuje vjeran prikaz valnih oblika krvnog tlaka pri mjerenju pletizmografskim metodama. Elastičnost krvnih žila bitno povećava protočnost krvožilnog sustava kad su posrijedi impulsne promjene tlaka.

Mjerenje krvnog tlaka omogućeno je na dva načina: 1. **invazivnom** (krvnom, direktnom) metodom, 2. **neinvazivnom** (beskrvnom, indirektnom) metodom. Invazivna metoda je najtočnija, s lako odredivim sistoličkim i dijastoličkim tlakom i jednostavna u mjerenju, ali za pacijenta je bolnija jer se ostvaruje ubadanjem kanile (injekcijske igle) u arteriju, dok se neinvazivna metoda ostvaruje izvana, bez uboda i oštećenja tkiva, ali je zato manje točna i složenija u mjerenju, a pogotovu u određivanju sistoličkog i dijastoličkog tlaka. U sklopu ove laboratorijske vježbe razmatra se samo neinvazivni način mjerenja krvnog tlaka i to auskultativnom metodom.

Gotovo sve neinvazivne metode mjerenja krvnog tlaka temelje se na manžeti koja se obavlja oko nadlaktice i ispunjava zrakom pod određenim tlakom koji je oko 10 do 20% veći od sistoličkog tlaka. Zatim se zrak iz manžete postupno ispušta i prate fenomeni koji se pri tome pojavljuju uz određeni tlak. Manžete se mogu staviti i oko prsta. Za neinvazivno mjerenje krvnog tlaka mogu se spomenuti tri najviše upotrebljavane metode: 1. **auskultativna** metoda, 2. **oscilometrijska** metoda i 3. **arteriokinetska (ultrazvučna)** metoda.



Slika 18. Auskultativna metoda mjerenja krvnog tlaka temeljena na Korotkovljevim šumovima imanžeti

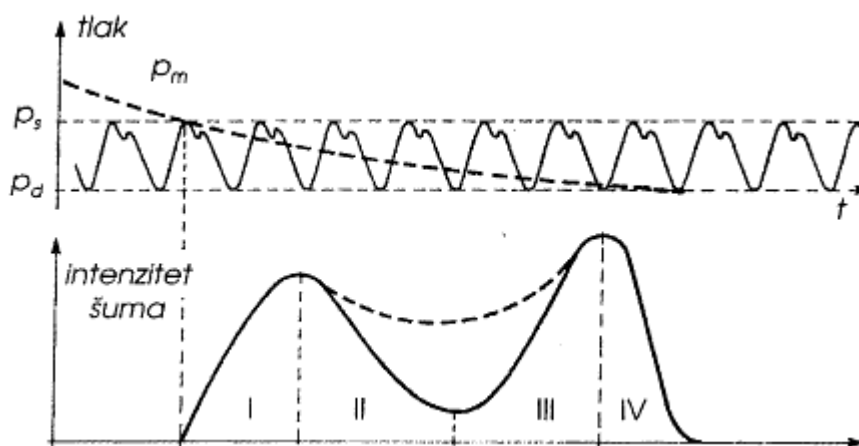
Auskultativna metoda jedna je od najstarijih i najjednostavnijih metoda koja se upotrebljava uz praćenje akustičkih šumova stetoskopom, po čemu je i ime dobila. Uz određenu praksu koju ta metoda zahtijeva mogu se dobiti dovoljno točni rezultati. Kod ove metode manžeta se stavlja na nadlakticu i napuše se na vrijednost približno 20% veću od sistoličkog tlaka p_m . Zatim se manžeta počne sporo prazniti kroz zračni ventil malog otvora. Pad tlaka zbiva se po eksponencijalnom zakonu, tako da tlak pada od maksimalne vrijednosti p_m prema izrazu:

$$p = p_m \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

gdje τ vremenska konstanta određena volumenom manžete i otporom otvora na ventilu kroz koji izlazi zrak. Tlak približno opada s 0,3 do 0,4 kPa/s. Kad bude dosegnut tlak u manžeti

jednak ili zatim manji od sistoličkog tlaka p_s , krv počinje prolaziti u početku u vrlo kratkim vremenskim intervalima kroz arteriju. Ti kratkotrajni prolazi krvi popraćeni su, zbog vrtloženja i vibracija krvi, šumovima odnosno prigušenim tonovima koje je prvi primijetio Korotkov, pa se po njemu i zovu **Korotkovljevi šumovi**. Tlak u manžeti pri kojem su se pojavili prvi Korotkovljevi šumovi jest **sistolički tlak**. Daljim smanjenjem tlaka u manžeti Korotkovljevi šumovi mijenjaju svoj sadržaj, ali i intenzitet, tako da su u području srednjeg tlaka najtiši, da bi se opet primicanjem tlaka u manžeti **dijastoličkom tlaku** ponovno počeli jačati.

Malo nakon toga što su se ti tonovi ponovno utihnuli, tlak u manžeti odgovara dijastoličkom tlaku. Na slici 21 prikazan je intenzitet Korotkovljevih šumova kao funkcija tlaka u manžeti.



Slika 19. Intenzitet Korotkovljevih šumova kao funkcija tlaka u manžeti.

Za ovo mjerenje je osim manžete s manometrom potreban i stetoskop kako bi se mogli čuti Korotkovljevi šumovi. Zbog svoje jednostavnosti i zadovoljavajuće točnosti ova je metoda više upotrebljiva. Za upotrebu u intenzivnoj skrbi, a i u slučaju upotrebe u osobne svrhe, mjerenje se može automatizirati. Mjesto stetoskopa upotrebljava se mikrofoni s pojačalom s posebnom amplitudno-frekvencijskom karakteristikom za izdvajanje najkarakterističnijih frekvencija Korotkovljeva šuma i prilagodbi akustičkim karakteristikama stetoskopa. Podaci o sistoličkom i dijastoličkom tlaku prikazuju se na kraju mjerenja u digitalnom obliku. Zato se tlak u manžeti pretvara u napon najčešće tenzometrijskim pretvornikom, a zatim u digitalni podatak analogno-digitalnim pretvornikom. Digitalni podatak o tlaku u manžeti pokazuje se kao sistolički u trenutku pojave Korotkovljeva šuma, odnosno nakon njegova nestajanja kao dijastolički. U svakom slučaju potrebni su i elementi memorije da bi se tek nakon nekoliko otkucaja srca utvrdilo da je nestao Korotkovljev šum, pa da se onda kao dijastolički tlak pokaže vrijednost koja je bila prije tih nekoliko otkucaja. Pri automatskom mjerenju Korotkovljeva šuma, vanjski šumovi i akustičke smetnje mogu utjecati na mjerenje i čak ga sasvim onemogućiti padaju li u frekvencijsko područje Korotkovljeva šuma. Pri slušanju uporabom stetoskopa opasnost je manja jer osoba koja mjeri može razlučiti smetnju od Korotkovljeva šuma.

Rad u laboratoriju

1. Postavljanje manžete i mjerenje krvnog tlaka.

- Načinite mjerenje uz opuštenu ruku i šaku.

- Ponovite mjerenje krvnog tlaka uz stisnutu šaku. Protumačite što opazate?

2. Mjerenje tlaka uz uzdignutu ruku.

- Podignite ruku tako da manžeta bude iznad razine srca. Protumačite što opazate?

3. Mjerenje tlaka uz spuštenu ruku.

- Spustite ruku tako da manžeta bude ispod razine srca. Protumačite što opazate?

4. Mjerenje tlaka na podlaktici.

- Pokušajte tlak izmjeriti na podlaktici. Da li se rezultat poklapa sa mjerenjima s nadlaktice? U čemu se ova dva mjerenja razlikuju? Protumačite.