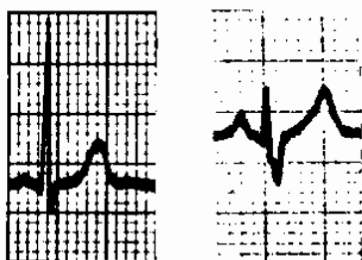


11 Osnove elektrokardiografije

Spoznali bomo lastnosti električnega dipola in se seznanili z opisom srca kot električnega dipola. Opisali bomo, kakšno električno polje ta ustvarja v telesu, kako ga merimo, in predstavili preprost model za merjenje elektrokardiograma.

Merjenje EKG (ElektroKardioGram) je v medicini ena izmed osnovnih preiskav. S to metodo lahko opazujemo delovanje srca in iz nenormalnih potekov EKG sklepamo na različne nepravilnosti (obolenja) srca (slika 11.1).

Pri tej vaji se bomo zato seznanili s fizikalnimi osnovami elektrokardiografije.



Slika 11.1: Primer EKG, kjer merimo časovni potek električnih napetosti med levo nogo in desno roko, pri zdravem (levo) in pri bolnem (desno) srcu.

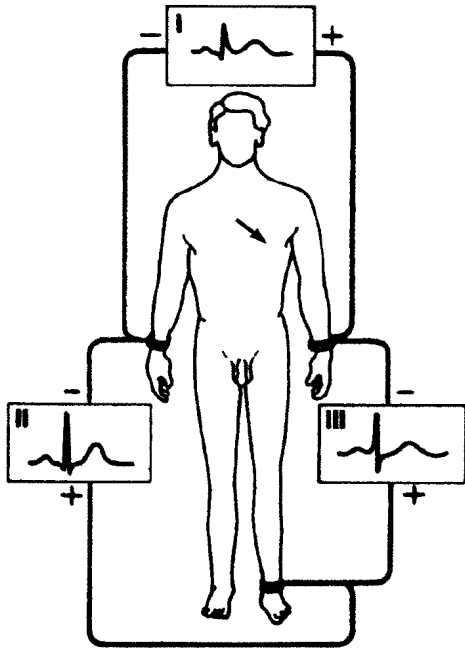
11.1 Osnove EKG

Pri merjenju EKG merimo časovno spreminjanje električne napetosti med določenimi deli telesa (npr. levo roko – desno roko, levo nogo – levo roko, levo nogo – desno roko), glej sliko 11.2. Izmerjene napetosti so odvisne od trenutnih faz v delovanju srca (npr. sistola – skrčenje srca, diastola – razširitev srca). Ker je delovanje srca periodično (s periodo okoli ene sekunde), je tudi potek teh napetosti periodičen. Razlike v časovnem poteku EKG nastanejo, ker se bolno srce vzdraži ter kot posledica krči in širi drugače kot zdravo.

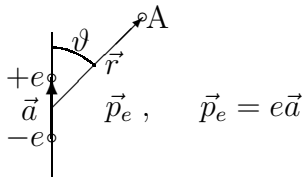
Za razumevanje EKG in napetosti med posameznimi deli telesa moramo poznati pojem električnega dipola in električnega polja, ki ga tak dipol ustvarja v okolici. Pri razlagi EKG lahko namreč električne lastnosti srca v grobem približku ponazorimo z električnim dipolom, ki se mu periodično spreminjata smer in velikost. Človeško telo predstavlja okolico električnega dipola.

11.2 Električni dipol

O električnem dipolu govorimo, kadar sta električna naboja enake velikosti a različnega predznaka ($+e$, $-e$) na določeni razdalji (a)(slika 11.3). Velikost vektorja električnega (\vec{p}_e) dipola je enaka produktu naboja in medsebojne razdalje, smer pa določa veznica med negativnim in pozitivnim nabojem.



Slika 11.2: Shematski prikaz elektrokardiografije: merjenje osnovnih treh napetosti in njihov potek. Pri EKG imenujemo izmerjeno električno napetost med levo in desno roko bipolarni standardni odvod I, med levo nogo in desno roko bipolarni standardni odvod II ter med levo nogo in levo roko bipolarni standardni odvod III. Puščica predstavlja električni dipol srca v določenem trenutku (prirejeno po: S. Silbernagl in A. Despopoulos, Taschenatlas der Physiologie, Thieme, Stuttgart 1983).



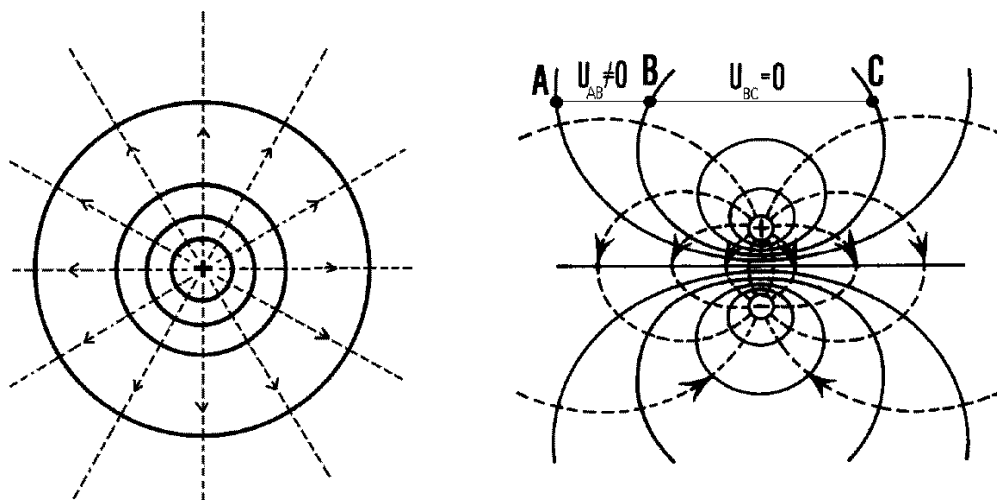
Slika 11.3: Električni dipol, njegova velikost in smer. Velikost električnega polja v točki A je odvisna od oddaljenosti te točke od dipola (r) in kota med smerjo dipola in veznico med dipolom in točko A (ϑ).

V okolici električnega dipola je električno polje, ki ga v vsaki točki v prostoru opišemo z električno poljsko jakostjo (\vec{E}) oziroma z električnim potencialom (φ). Električna poljska jakost je povezana z električnim potencialom z zvezo $\vec{E} = -\text{grad}\varphi$. Električni potencial točkastega dipola (φ) pa je enak:

$$\varphi = \frac{p_e \cos \vartheta}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad (11.1)$$

kjer je r velikost vektorja \vec{r} , ki povezuje dipol in točko A v prostoru, ϑ pa je kot med smerjo dipola in vektorjem \vec{r} (slika 11.3). Dipol lahko obravnavamo kot točkasti dipol, kadar je $a \ll r$. Električno polje lahko predstavimo s silnicami električnega polja ali z ekvipotencialnimi ploskvami. Ekvipotencialne ploskve so ploskve, ki povezujejo točke z istim električnim potencialom. Silnice so črte, ki so pravokotne na ekvipotencialne ploskve, tangenta na silnice kaže v vsaki točki smer električne poljske jakosti, gostota silnic pa določa njeno velikost.

Ekvipotencialne črte, ki so presek ekvipotencialnih ploskev in ravnine, so pri točkastem naboju koncentrični krogi s središčem v naboju (slika 11.4 levo), oblike ekvipotencialnih črt pri električnem dipolu pa so prikazane na sliki 11.4 desno. V neposredni bližini obeh



Slika 11.4: *Ekvipotencialne črte (polno) in silnice (črtkano) električnega polja pri pozitivnem točkastem naboju (levo) in električnem dipolu (desno). Električna napetost med dvema točkama (A,B ali B,C) je enaka razliki med potencialoma ekvipotencialnih črt, ki potekata skozi ti dve točki ($U_{AB} = \varphi(A) - \varphi(B)$ ali $U_{BC} = \varphi(B) - \varphi(C)$).*

nabojev so krogi, premico dobimo v sredini med nabojema, kjer je potencial enak nič.

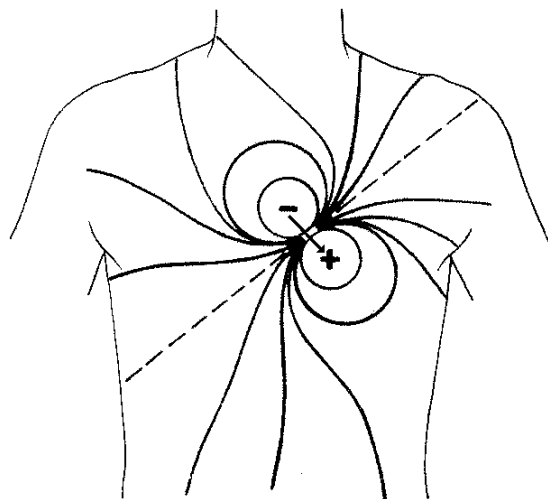
Električna napetost med dvema točkama je enaka razliki med električnima potencialoma, ki pripadata izbranim točkama. če torej merimo električno napetost med dvema točkama, ki ležita na različnih ekvipotencialnih črtah (točki A in B, slika 11.4), dobimo napetost različno od nič in enako razliki potencialov teh dveh ekvipotencialnih črt. če pa jo merimo med dvema točkama na isti ekvipotencialni črti (točki B in C, slika 11.4), dobimo seveda električno napetost enako nič.

11.3 Srce kot električni dipol

Delujoče srce lahko v vsakem trenutku ponazorimo z električnim dipolom*. Določa ga vsota električnih dipolov posameznih srčnih mišičnih celic (glej dodatek na strani 111). Električni dipol srca ustvarja v svoji okolici (človeško telo) električno polje, ki ga lahko opišemo z ekvipotencialnimi ploskvami (slika 11.5). Točke na telesu, kjer merimo EKG, so na različnih ekvipotencialnih ploskvah in izmerjene električne napetosti ustrezajo razliki potencialov teh ekvipotencialnih ploskev (slika 11.2).

V različnih fazah delovanja srca se v srcu vzdražijo različne mišične celice, skladno s tem se spreminjata tudi velikost in smer električnega dipola srca (slika 11.6 levo). Spreminjajoč se električni dipol pa pomeni, da potekajo skozi točke na telesu, med katerimi merimo EKG, različne ekvipotencialne ploskve v različnih trenutkih. Tako dobimo spreminjajoče se električne napetosti v času ene srčne periode (slika 11.6 desno) in periodično funkcijo,

*Zaradi nazornejše razlage bomo obravnavali srce kot električni dipol, človeško telo pa kot neprevodno snov. O upravičenosti te slike, kajti človeško telo je prevodno, bomo razpravljali v naslednjem razdelku.



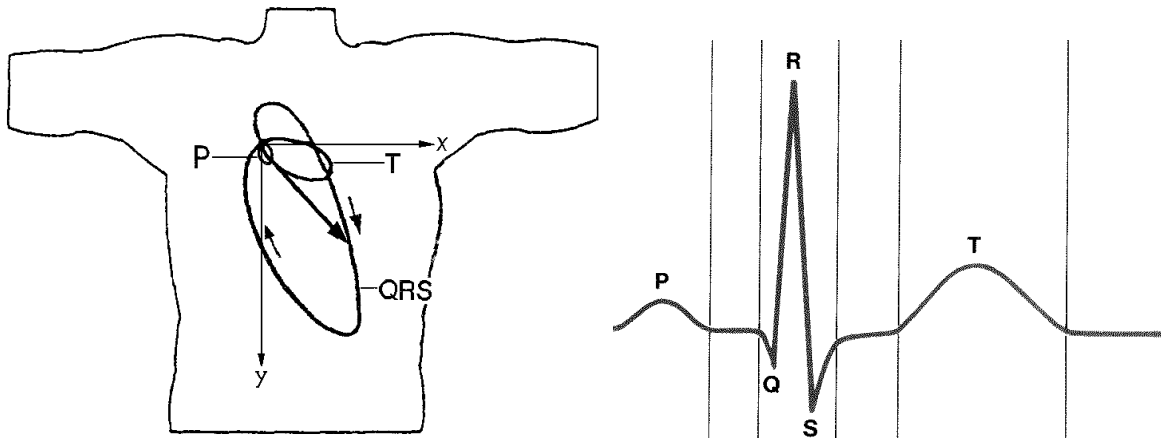
Slika 11.5: Trenutni električni dipol srca ustvarja v človeškem telesu električno polje. Na sliki so prikazane ekvipotencialne črte v koronarni ravnini, ki so preseki ekvipotencialnih ploskev in te ravnine. Ker je človeško telo končno in nehomogeno, ekvipotencialne črte daleč od srca niso identične s tistimi iz slike 11.4. (povzeto po: R.F. Schmidt in G. Thews, *Human Physiology*, Springer Verlag, Berlin 1989).

če merimo več srčnih period (slika 11.7).

11.4 Električno polje v telesu

Ugotoviti moramo, ali enačba za električni potencial dipola v praznem prostoru, ki smo jo uporabili pri razlagi EKG, ustreza tudi za prevodno človeško telo. V prevodni snovi lahko teče električni tok, zato je ustrežnejša razlaga naslednja. Med depolarizacijo mišične celice se naboji na membrani prerazporedijo (slika 11.10) in električni tok, ki teče v nekem trenutku v okolico, lahko, kot bomo pokazali v naslednjem odstavku, opišemo s trenutnim tokovnim dipolom, ki ima isto smer kot električni dipol celice. Vsota vseh trenutnih tokovnih dipolov celic da trenutni tokovni dipol srca. V nadaljevanju tega razdelka bomo pokazali, da lahko njegove ekvipotencialne ploskve opišemo z enačbo za električni potencial v praznem prostoru (enačba 11.1).

Poglejmo najprej, kako se električna poljska jakost pri točkastem tokovnem izvoru razlikuje od električnega polja zaradi naboja e , ki se nahaja v praznem prostoru. Izpeljati moramo torej enačbo, ki velja za električno poljsko jakost stalnega točkastega tokovnega izvora v prevodni snovi. Točkasti tokovni izvor je točka v prostoru, v kateri se pojavljajo novi pozitivni naboji na časovno enoto. Ker so naboji enako nabiti, novi naboji odri-vajo prejšnje, v prostoru pa dobimo prostorsko spreminjajoči se električni potencial. Po določenem času se v prostoru vzpostavi stacionarno stanje. Kolikor naboja v enoti časa priteče v nek prostorski element snovi, ga tudi odteče. Ker naboji zaradi simetrije odte-kajo od tokovnega izvora na vse strani enakomerno, je gostota električnega toka (j) na oddaljenosti r od točkastega izvora na vseh mestih te oddaljenosti enaka in sicer taka, da



Slika 11.6: Vektor električnega dipola srca opiše prostorsko krivuljo v času ene srčne periode, spreminjanje njegove projekcije na frontalno (koronarno) ravnino je narisano na sliki levo. Srčne faze so označene z velikimi tiskanimi črkami. Vektor kaže iz izhodišča koordinatnega sistema in ponazori spreminjanje velikosti in smeri električnega dipola srca (njegove projekcije na frontalno ravnino) v različnih srčnih fazah: vektor opiše v začetni fazi P najmanjšo zanko v bližini izhodišča koordinatnega sistema, sledi faza QRS, kjer vektor srčnega dipola doseže največjo velikost in največje spremembe, njegovo spreminjanje pa se konča s srednje veliko zanko v fazi T (povzeto po: R.K. Hobbie, *Intermediate Physics for Medicine and Biology*, J. Wiley & Sons, New York 1978). Vpliv spreminjanja vektorja električnega dipola srca na časovni potek bipolarnega standardnega odvoda II pokaže slika desno. Skladno s spreminjanjem velikosti in smeri vektorja srčnega dipola se spreminja tudi merjena električna napetost. Na desni sliki, kjer je podana električna napetost v odvisnosti od časa, vidimo, da se napetost spremeni najbolj v fazi QRS, manj v fazi T in najmanj v fazi P (povzeto po: R.F. Schmidt in G. Thews, *Human Physiology*, Springer Verlag, Berlin 1989).

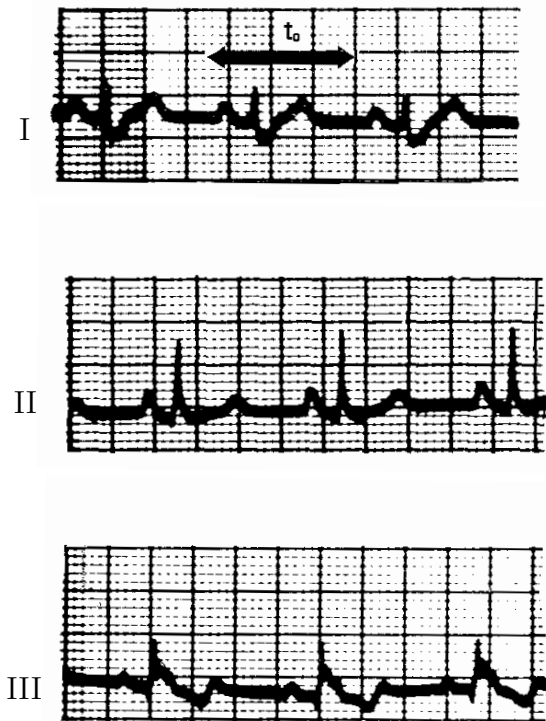
je celotni tok skozi krogelno ploskev površine $4\pi r^2$ enak naboju na časovno enoto (I), ki se pojavi v točkovnem izvoru ($j 4\pi r^2 = I$). Gostota toka na oddaljenosti r od izvora je torej enaka

$$j = \frac{I}{4\pi r^2}. \quad (11.2)$$

Električna poljska jakost, ki poganja ta tok, je po Ohmovem zakonu ($\vec{j} = \sigma \vec{E}$, σ je specifična prevodnost snovi) enaka

$$E = \frac{j}{\sigma} = \frac{I}{\sigma 4\pi r^2}, \quad (11.3)$$

Ker električni tok v prevodni snovi teče v smeri silnic električnega polja, je električna poljska jakost v prostoru v okolici točkastega tokovnega izvora enako odvisna od razdalje od izvora kot električna poljska jakost naboja v praznem prostoru. Električno polje v



Slika 11.7: Elektrokardiogram (bipolarni standardni odvodi I, II in III) je ponavljajoča se funkcija s periodo delovanja srca t_0 .

prevodni snovi, ki nastane zaradi točkastega tokovnega izvora, lahko zato opišemo z enačbo

$$E = \frac{e^*}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad (11.4)$$

kjer je $e^* = \epsilon_0 I / \sigma$ navidezni naboj. Vidimo, da lahko za električno poljsko jakost pri točkastem tokovnem izvoru v prevodniku uporabimo enačbo, ki jo poznamo za prazen prostor, le vpeljati moramo navidezen naboj.

Kako pa je pri tokovnem dipolu? Opisati hočemo električno poljsko jakost, kjer je v prostoru točkasti tokovni izvor (I_+) in od njega za določeno razdaljo (a) odmaknjeni točkasti ponor (I_-). Ponor je mesto, na katerem naboji izginjajo. Vsi naboji, ki so se pojavili v izvoru, v ponoru tudi poniknejo, če sta absolutni vrednosti (I_+) in (I_-) enaki. Ker lahko električno poljsko jakost točkastega izvora v prevodni snovi opišemo z enačbo, ki ima enako obliko kot enačba za naboj v praznem prostoru (enačba 11.4), lahko tudi električno poljsko jakost sistema točkastih izvorov v prevodni snovi opišemo z enačbo, ki ima enako obliko kot enačba za sistem nabojev v praznem prostoru. Po analogiji s točkastim tokovnim izvorom sklepamo, da se v okolici sistema izvor – ponor vzpostavi enako električno polje, kot da bi imeli v praznem prostoru navidezni električni dipol z

vrednostjo

$$p^* = \frac{\epsilon_0 I_+}{\sigma} a. \quad (11.5)$$

Zato lahko električni potencial tokovnega dipola opišemo z enačbo (11.1), kjer nadomestimo p_e s p^* .

Zaključimo lahko, da je opis EKG z enačbami, ki veljajo za prazen prostor, zadovoljiv, saj oblike ekvipotencialnih ploskev točkasih tokovnih izvorov v prevodni snovi sovpadajo z oblikami ekvipotencialnih ploskev, ki jih v praznem prostoru ustvarijo ustrezni naboji.

11.5 Model za merjenje elektrokardiograma (EKG)

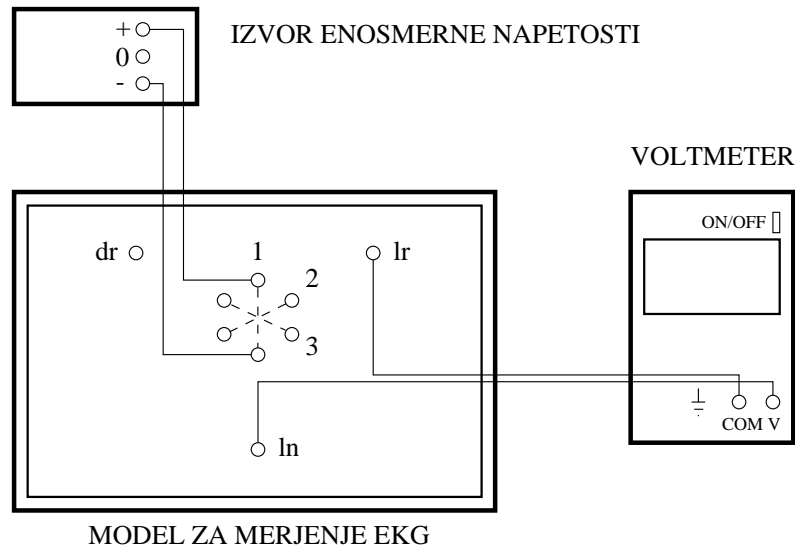
Kot dvodimenzionalen model človeškega telesa uporabimo prevodno plastično folijo (črne barve). Trenutni električni dipol srca lahko ponazorimo tako, da na izvor enosmerne električne napetosti priključimo posamezni par kontaktov iste barve, ki se nahaja v sredini plošče (slika 11.8). S preklapljanjem izvora enosmerne električne napetosti med tremi pari kontaktov različnih barv (1-modra, 2-rdeča, 3-rumena) ponazorimo spreminjanje električnega dipola srca (le njegove smeri, ne pa tudi velikosti), kar predstavlja različne faze srca. Zunanji kontakti (črn, siv in zelen) pa predstavljajo točke na človeškem telesu (leva roka-lr in desna roka-dr, leva noga-ln), med katerimi merimo EKG.

Podobno kot pri človeku, kjer pri EKG merimo različne električne napetosti med posameznimi pari točk telesa zaradi spreminjanja električnega dipola srca, merimo tudi pri našem modelu različne električne napetosti med posameznimi pari točk na foliji pri različnih dipolih. Za razliko od srca, kjer električni dipol v eni periodi opiše zapleteno krivuljo na sliki 11.6, v našem modelu dipol v eni “periodi” opiše le en krog*. Ker pri modelu lahko preklapljammo le med šestimi smermi dipola (\uparrow , \nearrow , \searrow , \downarrow , \swarrow in \nwarrow), izmerjeni EKG ni zvezna funkcija, pač pa dobimo le šest napetosti med posameznima točkama v eni “srčni periodi”.

- Naloge:**
1. izmerite in narišite ekvipotencialne črte okoli prvega položaja dipola
 2. narišite ekvipotencialne linije okoli drugega položaja dipola
 3. izmerite osnovne tri napetosti (bipolarne standardne odvode I, II in III) pri različnih “trenutnih električnih dipolih srca”
 4. narišite EKG

Potrebščine: model za merjenje EKG
izvor enosmerne električne napetosti
voltmeter (multimeter)
vezne žice

*Spreminja se le smer, ne pa velikost dipola.

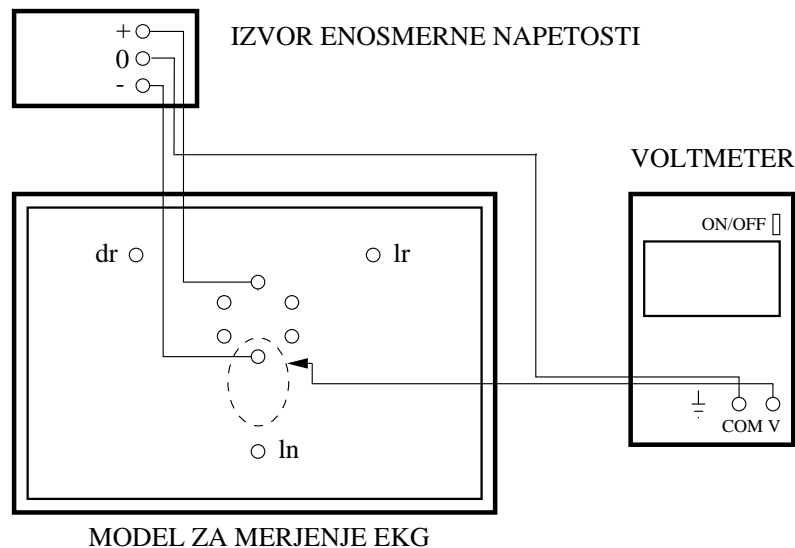


Slika 11.8: Model elektrokardiograma (EKG): črna folija predstavlja prevodno človeško telo, trije pari kontaktov različnih barv v sredini ponazarjajo trenutne položaje električnega dipola srca v različnih srčnih fazah (1-modra, 2-rdeča, 3-rumena) in zunanji kontakti točke na človeškem telesu (lr-črn, dr-siv in ln-zelen), kjer merimo EKG.

Izvedba

- 1) Povežite par kontaktov modre barve na modelu za merjenje EKG, ki ponazarja trenutni položaj električnega dipola srca, z izvorom enosmerne napetosti. Pazite na polariteto izvora, saj le-ta določa smer dipola (po dogovoru je priključek pozitivnega pola rdeč, negativnega pola pa črn)! Napetost med poloma dipola izmerite z voltmetrom (multimetrom), ki ga pred tem nastavite na merjenje napetosti. Priključite ga vzporedno na par kontaktov modre barve. Pozitivni pol dipola povežite s “pozitivnim” polom voltmetra (oznaka V) z rdečim kablom, s črnim kablom pa negativni pol dipola z “negativnim” polom voltmetra (oznaka COM oziroma \perp). Vključite izvor enosmerne napetosti. Napetost U_0 naj bo med 190 mV in 200 mV, zato nastavite merilno območje voltmetra temu primerno (enosmerna napetost – dcV, 200 mV). Vključite voltmeter in izmerite U_0 . Po potrebi uravnajte napetost z gumbom, ki je na izvoru enosmerne napetosti.

Ekvipotencialno črto dipola izmerite tako, da “negativni” pol voltmetra povežete z ničlo na izvoru enosmerne napetosti (slika 11.9). Z vezno žico, povezano s “pozitivnim” polom voltmetra, pa potujete po foliji in poiščite točke, ki so na istem potencialu – tedaj kaže voltmeter isto napetost. S pomočjo merila ob robu folije določite koordinate najmanj sedmih točk, ki približno določajo to ekvipotencialno črto. Zapišite koordinate vsake točke v razpredelnico pri izmerjeni električni napetosti in jih sprti vnesite na milimetrski papir. Skozi njih narišite ekvipotencialno črto, ki jo označite z



Slika 11.9: Model za merjenje EKG, pripravljen za merjenje ekvipotencialnih črt.

velikostjo njenega potenciala. Na milimetrski papir vnesite tudi položaj pozitivnega in negativnega pola opazovanega dipola ter označite polariteto obeh polov.

Tako določite pet karakterističnih oblik ekvipotencialnih črt za merjeni dipol: pri potencialih okoli -40 mV in 40 mV, pri potencialih okoli -20 mV in 20 mV ter pri potencialu 0 V.

- 2) Na isti milimetrski papir narišite (z rdečo barvo) koordinate polov dipola, ki ga predstavlja par kontaktov rdeče barve. Označite pozitivni in negativni pol.

V skladu s prej izmerjenimi ekvipotencialnimi linijami in s teorijo narišite z rdečo barvo (brez merjenja!) tri karakteristične ekvipotencialne črte za ta dipol: črte s potenciali -40 mV, 20 mV ter 0 V.

Na isti milimetrski papir vnesite tudi položaj kontaktov na modelu, ki predstavljajo točke na človeškem telesu, med katerimi merimo EKG. Iz slike ocenite, kaj bi se zgodilo z električno napetostjo med kontaktoma, ki predstavljata levo nogo in desno roko, če bi spremenili dipol iz prvega v drug položaj!

- 3) Merjenje EKG: Pripravite si tabelo, v kateri stolpci predstavljajo posamezne standardne bipolarne odvode (I – leva roka/desna roka, II – leva noga/desna roka, III – leva noga/leva roka), vrstice pa predstavljajo posamezne smeri trenutnega električnega dipola (\uparrow , \nearrow , \searrow , \downarrow , \swarrow in \nwarrow).

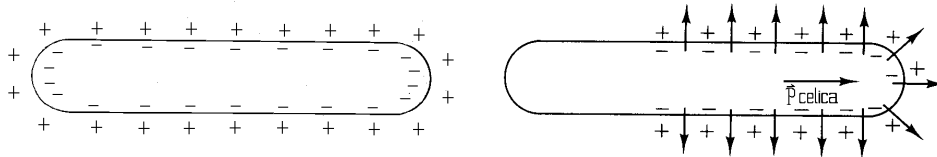
Za vse tri standardne bipolarne odvode (I, II in III, slika 11.2) izmerite napetosti za vseh šest položajev dipola (izvor napetosti preklaplajte med kontakti modre, rdeče in rumene barve; pazite na polariteto!) in izmerjene napetosti vnesite v tabelo.

- 4) Za ponazoritev EKG (bipolarnih standardnih odvodov I, II in III) narišite enega pod

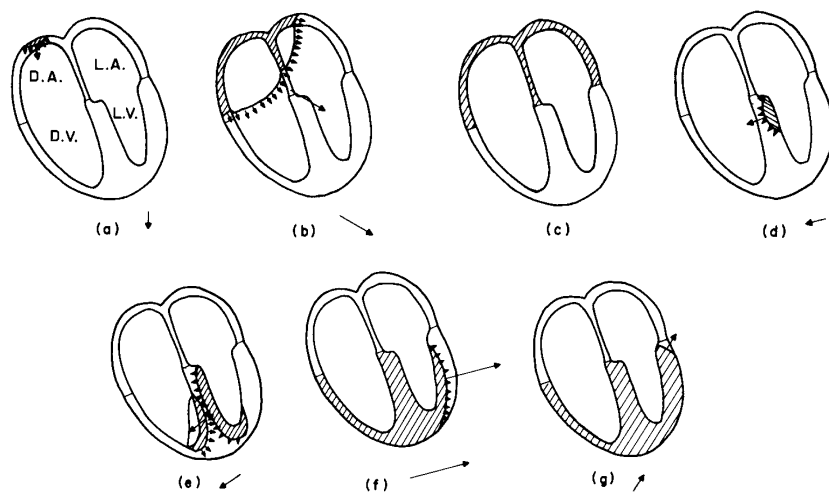
drugim tri diagrame, kjer na abscise ekvidistantno nanese položaje vseh šestih dipolov (označite jih s številko ali s puščico); ordinate pa predstavljajo napetosti za posamezne odvode. Teh šest dipolov ponazarja, kot je opisano v opisu modela za merjenje EKG, električne dipole srca pri različnih srčnih fazah. Če privzamete, da so le-te časovno enakomerno razporejene čez celo srčno periodo, lahko abscisa predstavlja časovno os. S črto povezane meritve posameznega bipolarnega standardnega odvoda na diagramu pa predstavljajo njegov potek v eni srčni periodi. S črtkano črto nadaljujte potek še za naslednjo periodo!

11.6 Dodatek: trenutni električni dipol srca

Mišična celica, ki je osnovni delček srčne mišice, je nevtralna, vendar v relaksirani fazi polarizirana (slika 11.10 levo). Tedaj kljub porazdelitvi nabojev preko membrane, celica kot celota navzven ne deluje kot električni dipol v okolici (Posamezen delček polarizirane membrane si lahko predstavljamo kot dipol, a se ti dipoli paroma izničijo). Pri krčenju mišične celice pa pride do postopne depolarizacije celice (slika 11.10 desno) – naboj na membrani celice se pri tem prerazporeja (nekateri deli membrane niso več polarizirani, drugi pa še vedno), in celotna celica deluje navzven kot električni dipol. Popolnoma depolarizirana celica prav tako ne predstavlja električnega dipola. Vsota vseh električnih dipolov srčnih mišičnih celic določa trenutni električni dipol srca (slika 11.11).



Slika 11.10: Razporeditev električnega naboja v polarizirani (levo) in v delno depolarizirani mišični celici (desno). Vidimo, da relaksirana mišična celica nima “neto” električnega dipola, pri vzdraženju pa pride do električnega dipola (\vec{p}_{celica}).



Slika 11.11: Primeri nekaj srčnih faz kažejo trenutne depolarizacije različnih mišičnih celic (osenčeno), kot posledica dobimo različne trenutne električne dipole srca (puščica). Pri (c) je vrednost trenutnega električnega dipola srca enaka 0. Črta s puščicami prikazuje dele srca, kjer se spreminja polarizacija celic (polarizacijski val). Oznaki D.A. in L.A. označujeta desni in levi atrij, oznaki D.V. in L.V. pa desni in levi ventrikel (povzeto po: R.K. Hobbie, *Intermediate Physics for Medicine and Biology*, J. Wiley & Sons, New York 1978).