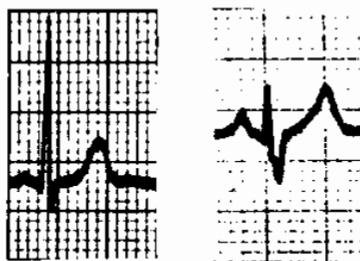


## 10 Osnove elektrokardiografije

*Spoznali bomo lastnosti električnega dipola in se seznanili z opisom srca kot električnega dipola. Opisali bomo, kakšno električno polje ta ustvarja v telesu in kako ga merimo. Meritve bomo najprej izvedli na preprostem modelu, nato bomo izmerili EKG še med levo in desno roko (bipolarni standardni odvod I).*

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



Slika 10.1: Primer EKG, kjer merimo časovni potek električnih napetosti med levo nogo in desno roko, pri zdravem (levo) in pri bolnem (desno) srcu.

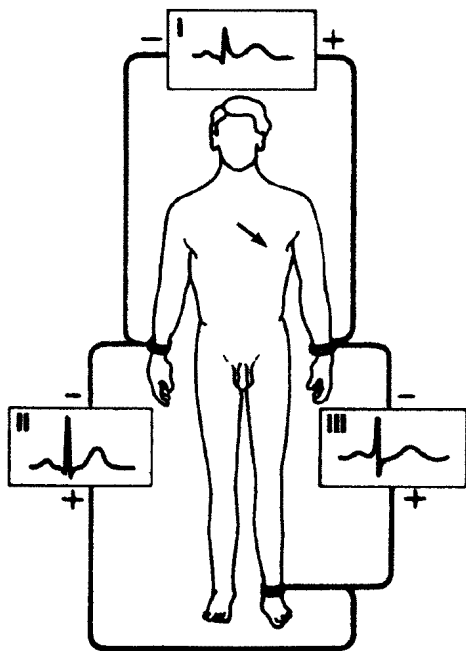
### 10.1 Osnove EKG

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 10.2. 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.

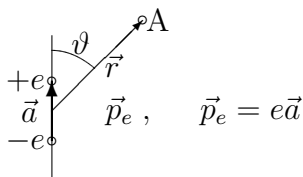
Za razumevanje EKG in napetosti med posameznimi deli telesa moramo poznati pojem električnega dipola in električnega polja, ki ga tak dipol ustvarja v okolici. Pri razlagi EKG lahko namreč električne lastnosti srca v grobem približku ponazorimo z električnim dipolom, ki se mu periodično spreminjata smer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

### 10.2 Električni dipol

O električnem dipolu govorimo, kadar sta električna naboja enake velikosti a različnega predznaka ( $+e, -e$ ) na določeni razdalji ( $a$ ) (slika 10.3). Velikost vektorja električnega



Slika 10.2: 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 10.3: 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 ( $\vartheta$ ).

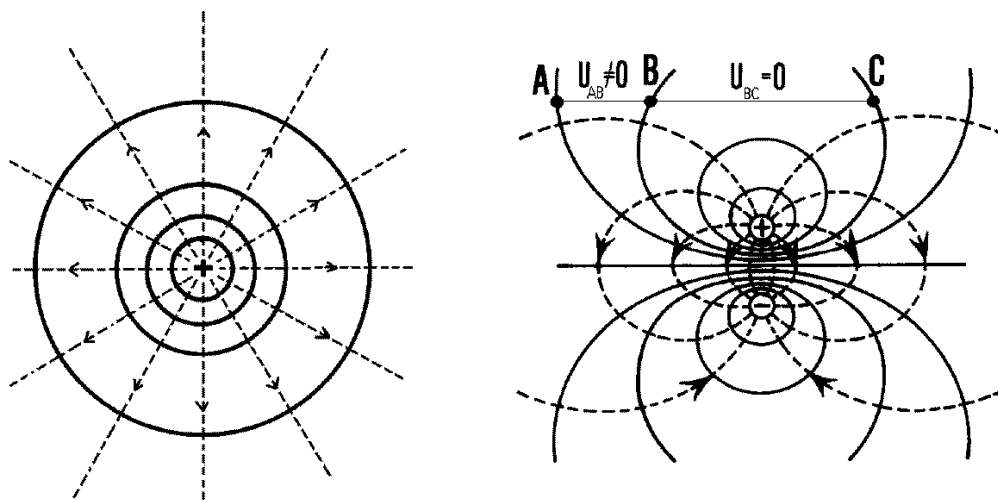
dipola ( $\vec{p}_e$ ) je enaka produktu naboja in medsebojne razdalje, smer pa določa veznica med negativnim in pozitivnim nabojem.

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

$$\varphi = \frac{p_e \cos \vartheta}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad (10.1)$$

kjer je  $r$  velikost vektorja  $\vec{r}$ , ki povezuje dipol in točko A v prostoru,  $\vartheta$  pa je kot med smerjo dipola in vektorjem  $\vec{r}$  (slika 10.3). 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



Slika 10.4: 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  $U_{BC} = \varphi(B) - \varphi(C)$ ).

naboju koncentrični krogi s središčem v naboju (slika 10.4 levo), oblike ekvipotencialnih črt pri električnem dipolu pa so prikazane na sliki 10.4 desno. V neposredni bližini obeh nabojev so krogi, premico dobimo v sredini med nabojev, kjer je potencial enak nič.

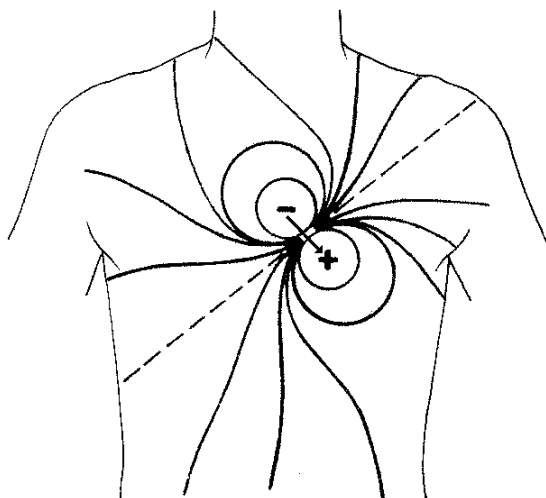
Električna napetost med dvema točkama je enaka razliki med električnima potencialoma, ki pripadata izbranim točkama. Če torej merimo električno napetost med dvema točkama, ki ležita na različnih ekvipotencialnih črtah (točki A in B, slika 10.4), dobimo napetost različno od nič in enako razliki potencialov teh dveh ekvipotencialnih črt. Če pa jo merimo med dvema točkama na isti ekvipotencialni črti (točki B in C, slika 10.4), dobimo seveda električno napetost enako nič.

### 10.3 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 114). Električni dipol srca ustvarja v svoji okolici (človeško telo) električno polje, ki ga lahko popišemo z ekvipotencialnimi ploskvami (slika 10.5). Točke na telesu, kjer merimo EKG, so na različnih ekvipotencialnih ploskvah in izmerjene električne napetosti ustrezajo razliki potencialov teh ekvipotencialnih ploskev (slika 10.2).

V različnih fazah delovanja srca se v njem vzdražijo različne mišične celice, skladno s tem se spreminjata tudi velikost in smer električnega dipola srca (slika 10.6 levo). Spreminjajoč se električni dipol pa pomeni, da potekajo skozi točke na telesu, med katerimi

\*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.



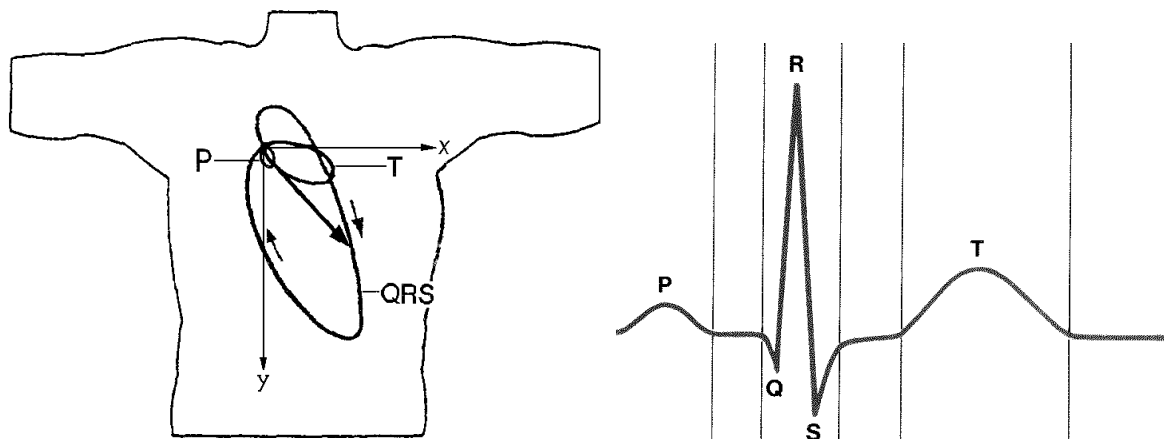
Slika 10.5: Trenutni električni dipol srca ustvarja v človeškem telesu električno polje. Na sliki so prikazane ekvipotencialne črte v koronarni ravnini, ki so presek ekvipotencialnih ploskev in te ravnine. Ker je človeško telo končno in nehomogeno, ekvipotencialne črte daleč od srca niso identične s tistimi iz slike 10.4. (povzeto po: R.F. Schmidt in G. Thews, *Human Physiology*, Springer Verlag, Berlin 1989).

merimo EKG, različne ekvipotencialne ploskve v različnih trenutkih. Tako dobimo spreminjajoče se električne napetosti v času ene srčne periode (slika 10.6 desno) in periodično funkcijo, če merimo več srčnih period (slika 10.7).

## 10.4 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 ustreznejša razlaga naslednja. Med depolarizacijo mišične celice se naboji na membrani prerazporedijo (slika 10.11) 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 10.1).

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-



Slika 10.6: 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).

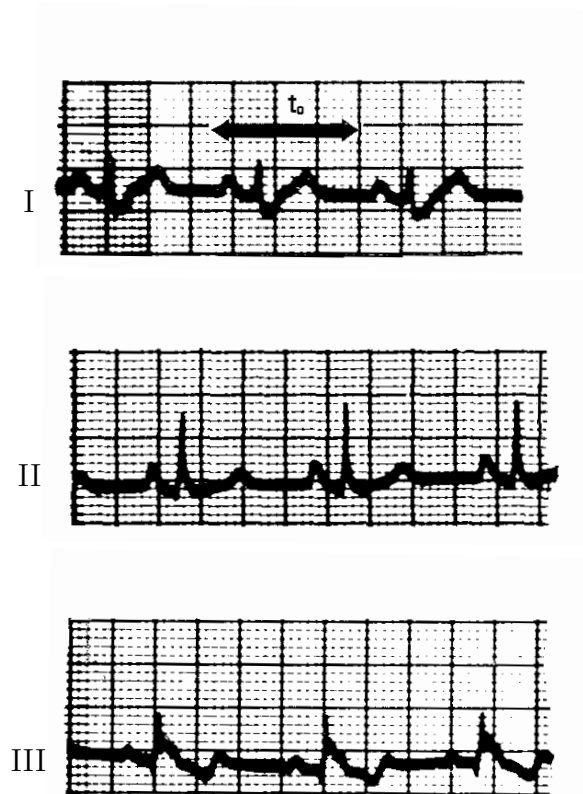
kajo od tokovnega izvora na vse strani enakomerno, je gostota električnega toka ( $j$ ) na oddaljenosti  $r$  od točkastega izvora na vseh mestih te oddaljenosti enaka in sicer taka, da je celotni tok skozi krogelno ploskev površine  $4\pi r^2$  enak naboju na časovno enoto ( $I$ ), ki se pojavi v točkovnem izvoru ( $j 4\pi r^2 = I$ ). Gostota toka na oddaljenosti  $r$  od izvora je torej enaka

$$j = \frac{I}{4\pi r^2}. \quad (10.2)$$

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

$$E = \frac{j}{\sigma} = \frac{I}{\sigma 4\pi r^2}, \quad (10.3)$$

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 10.7: 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

$$E = \frac{e^*}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad (10.4)$$

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 10.4), 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

$$p^* = \frac{\epsilon_0 I_+}{\sigma} a. \quad (10.5)$$

Zato lahko električni potencial tokovnega dipola opišemo z enačbo (10.1), 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.

## 10.5 Model za merjenje elektrokardiograma (EKG)

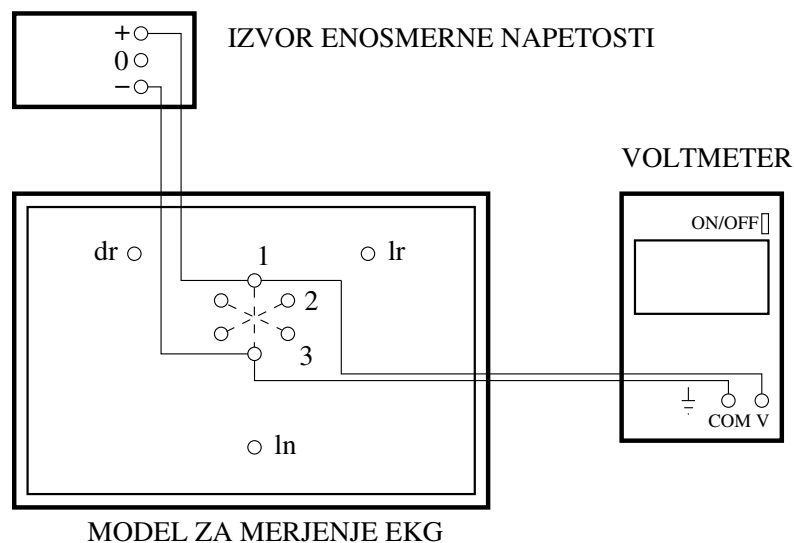
Kot dvodimenzionalen model človeškega telesa uporabimo prevodno plastično folijo (črne barve). Trenutni električni dipol srca lahko ponazorimo tako, da na izvor enosmerne električne napetosti priključimo posamezni par kontaktov iste barve, ki se nahaja v sredini plošče (slika 10.8, 10.9 ali 10.10). S 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 (slika 10.10). Za razliko od srca, kjer električni dipol v eni periodi opiše zapleteno krivuljo na sliki 10.6, v našem modelu dipol v eni “periodi” opiše le en krog\*. Ker pri modelu lahko preklapljamo 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 bipolarni standardni odvod I in II pri različnih “trenutnih električnih dipolih srca”.
  4. Narišite na modelu dobljeni EKG.
  5. Izmerite si EKG med levo in desno roko (bipolarni standardni odvod I).
  6. Narišite časovno odvisnost svojega izmerjenega bipolarnega standardnega odvoda I.

---

\*Spreminja se le smer, ne pa velikost dipola.



Slika 10.8: Model za merjenje EKG, pripravljen za nastavitev trenutnega električnega dipola srca (napetosti  $U_0$ ). 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.

**Potrebščine:** model za merjenje EKG

izvor enosmerne električne napetosti

voltmeter (multimeter)

vezne žice

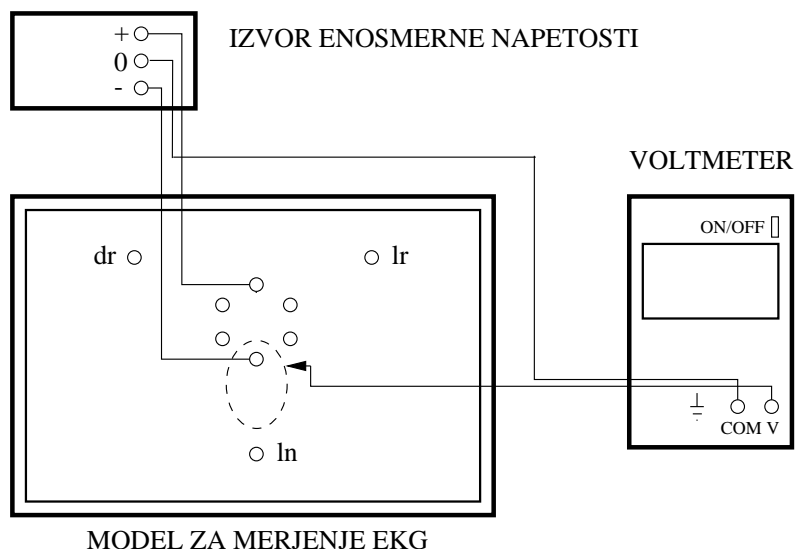
naprava za merjenje EKG na človeškem telesu

### Izvedba

- 1) Povežite par kontaktov modre barve na modelu za merjenje EKG, ki ponazarja trenutni položaj električnega dipola srca, z izvorom enosmerne napetosti (slika 10.8). Pazite na polariteto izvora, saj le-ta določa smer dipola (po dogovoru je pozitivni priključek rdeč, negativni pa črn)! Napetost med poloma dipola izmerite z voltmetrom (multimetrom), ki ga pred tem nastavite na merjenje enosmerne napetosti. Priključite ga vzporedno na par kontaktov modre barve v ista kontakta, ki sta že povezana z izvorom enosmerne napetosti. Pozitivni pol dipola povežite s "pozitivnim" vhodom voltmetra (oznaka V) z rdečim kablom, s črnim kablom pa negativni pol dipola z "negativnim" vhodom 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.



Slika 10.9: Model za merjenje EKG, pripravljen za merjenje ekvipotencialnih črt.

Ekvipotencialno črto dipola izmerite tako, da “negativni” vhod voltmetra povežete z ničlo na izvoru enosmerne napetosti (slika 10.9). Z vezno žico, povezano s “pozitivnim” vhodom 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 enakomerno razporejenih točk, ki približno določajo to ekvipotencialno črto. Zapišite koordinati vsake točke v razpredelnico pri izmerjeni električni napetosti in jih sproti vnesite na milimetrski papir. Skozi njih narišite ekvipotencialno črto, ki jo označite z velikostjo njenega potenciala. Na milimetrski papir vnesite tudi položaj pozitivnega in negativnega pola opazovanega dipola ter označite polariteto obeh polov.

Tako določite tri karakteristične oblike ekvipotencialnih črt za merjeni dipol pri potencialih okoli 40 mV, pri potencialih okoli 20 mV ter pri potencialu 0 V. V skladu s izmerjenimi ekvipotencialnimi linijami in s teorijo narišite (brez merjenja!) še karakteristični ekvipotencialni črte s potencialoma –40 mV in –20 mV.

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

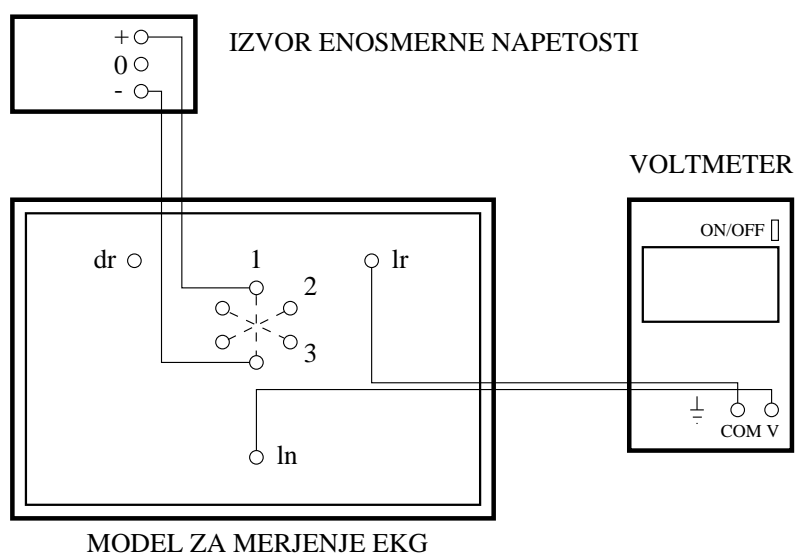
V skladu s prej izmerjenimi ekvipotencialnimi linijami in s teorijo narišite (brez merjenja!) z rdečo barvo tri karakteristične ekvipotencialne črte za ta dipol: črte s potenciali –40 mV, 20 mV ter 0 V.

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 stolpca predstavljata bipolarna standardna odvoda I in II (I – leva roka/desna roka in II – leva noga/desna roka), vrstice pa predstavljajo posamezne smeri trenutnega električnega dipola ( $\uparrow$ ,  $\nearrow$ ,  $\searrow$ ,  $\downarrow$ ,  $\swarrow$  in  $\nwarrow$ ).

Za oba bipolarna standardna odvoda (I in II, slika 10.2) izmerite napetosti za vseh šest položajev dipola (slika 10.10 – izvor napetosti preklapljaite med kontakti modre, rdeče in rumene barve; pazite na polariteto!) in izmerjene napetosti vnesite v tabelo.



Slika 10.10: Model za merjenje EKG, pripravljen za meritev standardnega bipolarnega odvoda III pri določeni smeri električnega dipola ( $\uparrow$ ).

- 4) Za ponazoritev EKG (bipolarnih standardnih odvodov I in II) narišite enega pod drugim diagrama, kjer na abscisi ekvidistantno nanesete položaje vseh šestih dipolov (označite jih s številko ali s puščico); ordinati pa predstavljajo napetosti za posamezna odvoda. 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!
- 5) Izmerite EKG na človeškem telesu in sicer bipolarni standardni odvod I (električno napetost med levo in desno roko – slika 10.2). Za razliko od do sedaj uporabljanega modela za merjenje EKG srca, kjer je potek električnega dipola v eni periodi popisano

le z eno krožnico, imamo sedaj opraviti z že prej omenjenim zapletenim potekom spreminjanja električnega dipola, ki ga popiše krivulja na sliki 10.6 (levo).

Sledite k napravi za merjene EKG priloženim navodilom.

- 6) Skicirajte časovno odvisnost izmerjenega bipolarnega standardnega odvoda I z zaslona naprave za merjenje EKG na milimetrski papir.

Ugotovite, ali se EKG »postavi na glavo«, če zamenjamo elektrodi za levo in desno roko.

Ali je EKG, ki ga opazujemo pri različnih položajih rok glede na telo (npr. sedeči in stoječi položaj) neodvisen od položaja?

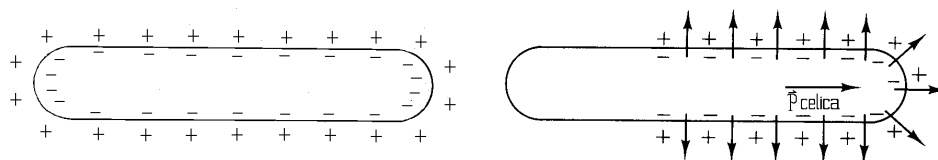
Zakaj pravi EKG ni enak sinusni krivulji, ki smo jo dobili na modelu?

Na ta odgovor nas napeljujejo vprašanja: v čem se razlikuje obnašanje dipola srca od tistega v modelu? Se velikost dipola v modelu spreminja? Kaj pa pri srcu? V kateri fazi velikost dipola srca najbolj naraste? A bi bilo mogoče, da bi bil v nekem trenutku dipol zelo velik, pa tega z meritvijo prvega, drugega ali tretjega odvoda sploh ne bi opazili?

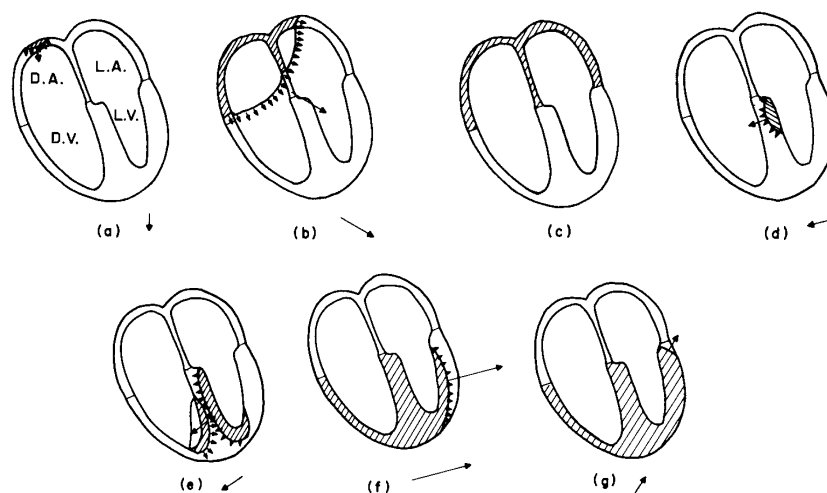
Opozoriti velja, da je v naši vaji uporabljan naprava za merjenje EKG namenjen le kot učni pripomoček in da zato na poteku EKG ne nameravamo analizirati podrobnosti ali zdravstvenega stanja!

## 10.6 Dodatek: trenutni električni dipol srca

Mišična celica, ki je osnovni delček srčne mišice, je nevtralna, vendar v relaksirani fazi polarizirana (slika 10.11 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 10.11 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 10.12).



Slika 10.11: 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 ( $\vec{p}_{\text{celica}}$ ).



Slika 10.12: 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 (depolarizacijski 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).