

EKG

Osnutek zapiskov s predavanj iz biofizike
za študente medicine in dentalne medicine

Jure Derganc

Komentarje, pripombe in napake prosim sporočite na
jure.derganc@mf.uni-lj.si

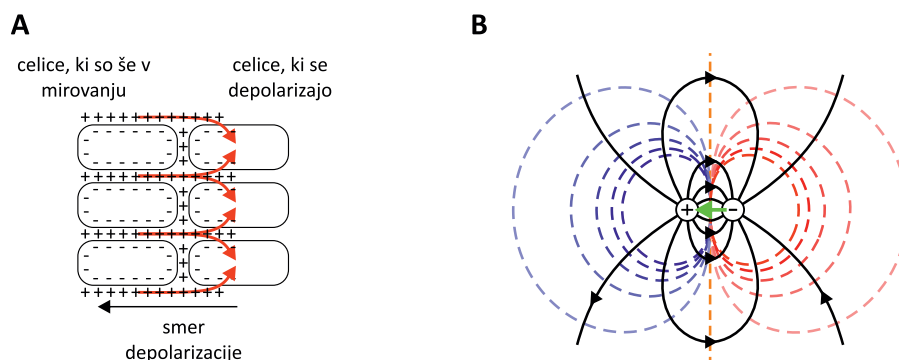
ver. 6.12.2018

Tkiva kot izvori električnega toka

Depolarizacija celice (nastanek akcijskega potenciala) povzroči nastanek majhnega električnega toka v njeni okolici. Pri delovanju mišic in živcev se sinhrono depolarizira veliko število celic, zato se ti tokovi seštevajo in povzročijo majhne, a merljive spremembe električnega potenciala v okoliških tkivih in tudi na površini telesa. V medicini to dejstvo izrablja vrsta diagnostičnih metod, pri katerih z merjenjem električne napetosti na površini telesa dobimo informacijo o delovanju organov v telesu: z elektrokardiografijo (EKG) analiziramo delovanje srca, z elektroencefalografijo (EEG) delovanje možganov, z elektromiografijo (EMG) pa delovanje mišic.

Preden se posvetimo posameznim metodam, si oglejmo preprost opis električnih tokov in potencialov, ki nastanejo ob sinhroni depolarizaciji celic v telesu. Ko se po tkivu širi depolarizacijski val, steče električni tok iz območja ne-vzbujenih celic proti območju celic, ki se depolarizirajo (slika 1A). Podobno steče električni tok tudi pri re-polarizaciji celic, le da so spremembe toka v tem primeru počasnejše, električno polje pa je manjše. V primeru depolarizacije si lahko prvem približku ne-vzbujeno stran tkiva predstavljamo kot izvor, območje depolarizacij pa kot ponor električnega toka, pri čemer električni tok steče tudi po okoliškem tkivu. Tokovnice električnega toka v tkivu imajo ob tem podobno obliko kot silnice v okolici električnega dipola (slika 1B). Podobno kot pri elektrostatiki lahko torej tudi v primeru depolarizacije celic definiramo vektor dipola, ki ga v tem primeru imenujemo *tokovni dipol*. Če izvor toka označimo s $+$, ponor pa z $-$, kažejo tokovnice od $+$ proti $-$, vektor tokovnega dipola pa kaže od $-$ proti $+$, kar je analogno definiciji električnega dipola pri elektrostatiki. Velikost vektorja tokovnega dipola je sorazmerna z velikostjo toka, ki ga izvor in ponor poganjata po telesu.

Na osnovi dipolne slike si lahko nazorno predstavljamo električni potencial, ki ga izvor in ponor toka ustvarita v okoliškem tkivu. Podobno kot v navadnem električnem krogu tudi pri tokovnem dipolu električni potencial pada vzdolž vsake tokovnice, pri čemer je najvišji v izvoru, najnižji pa v ponoru. Ekvipotencialne črte okoli tokovnega dipola bodo imele torej enako obliko kot ekvipotencialne črte okoli dipola pri elektrostatiki (slika 1B). Ob spreminjanju območja depolarizacije in re-polarizacije celic v tkivu, se spreminjajo položaj, usmerjenost in velikost vektorja tokovnega dipola, ob tem pa se se ustrezno spreminja tudi potencial v telesu in na njegovi površini.

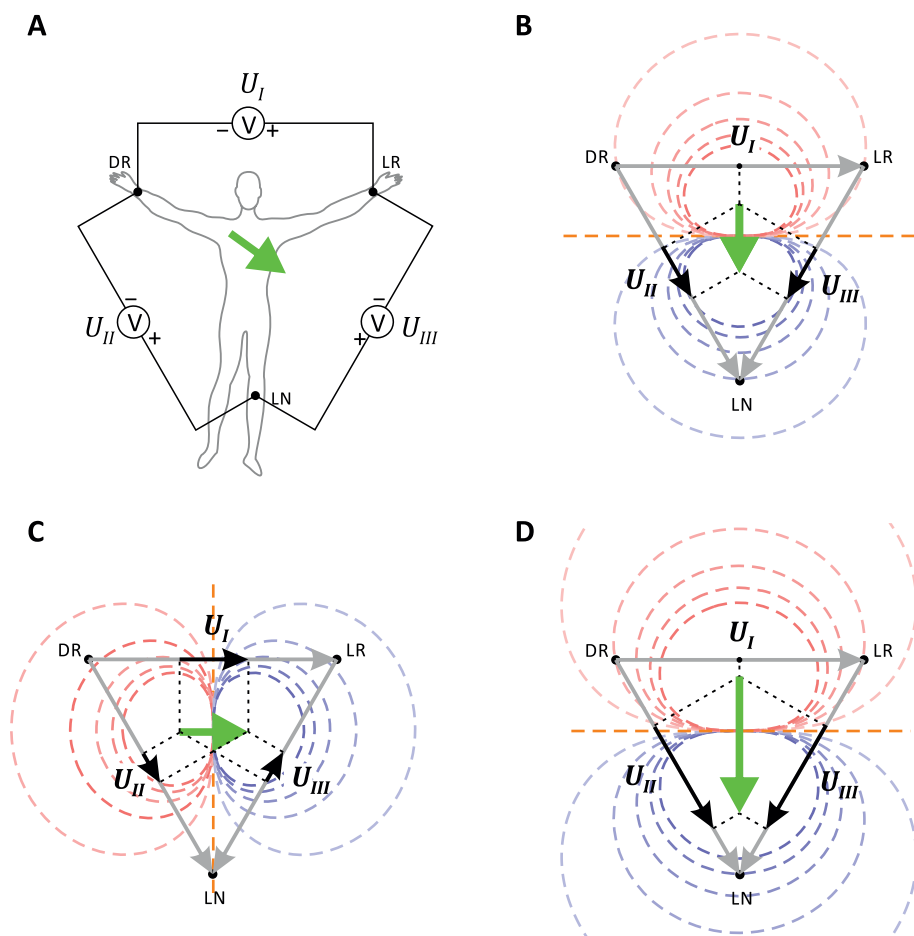


Slika 1: Depolarizacija celic v mišicah in živcih je izvor električne napetosti, ki jo lahko zaznamo tudi na površini telesa. A) Shematični prikaz nastanka električnega toka v tkivu ob sinhroni depolarizaciji večjega števila celic. Depolarizacija povzroči električni tok, katerega izvor je v ne-vzbujenem delu tkiva, ponor pa v tkivu, ki se depolarizira. Pri tem je smer električnega toka nasprotna smeri širjenja depolarizacije. B) Prikaz električnega potenciala in toka v homogenem tkivu, v katerem sta izvor in ponor toka. Izvor (+) in ponor (-) električnega toka predstavljata t.i. električni tokovni dipol. Vektor tokovnega dipola je označen zeleno in kaže od - proti + (v smer premikanja depolarizacijskega vala v tkivu), tokovnice električnega toka pa so narisane črno in tečejo od izvora proti ponoru. Skupaj z električnim tokom se v tkivu pojavi tudi električni potencial, ki se niža vzdolž tokovnic (najvišji je v pri + in najnižji pri -). Ekvipotencialne črte so na sliki označene črtkano (pri višjih potencialih so bolj modre, pri nižjih pa bolj rdeče barve, potencial 0 V je na sredini in je označen z oranžno). Električni potencial okoli tokovnega dipola ima enako obliko kot pri dipolu, ki smo ga srečali pri elektrostatiki. Velikost vektorja tokovnega dipola je tem večja, čim večji tok in potencialne razlike ustvarjata izvor in ponor.

EKG

Celice v srčni mišici se neprestano periodično depolarizirajo in repolarizirajo in so glavni glavni izvor električne aktivnosti telesa v mirovanju. Električna aktivnost srca lahko na površini telesa povzroči do nekaj mV velike spremembe električnega potenciala, ki jih je mogoče enostavno izmeriti. To meritev imenujemo *elektrokardiografija*, grafični prikaz spreminjanja napetosti med točkami na površini telesa v odvisnosti od časa imenujemo *elektrokardiogram*, oboje pa označimo s kratico EKG.

Pri osnovnem EKG merimo časovne odvisnosti napetosti med roka-



Slika 2: A) Pri osnovnem EKG merimo časovno spreminjanje treh napetosti med rokama in nogo, ki jih imenujemo *bipolarni standardni odvodi*: U_I je napetost med levo in desno roko, U_{II} med levo nogo in desno roko ter U_{III} med levo nogo in levo roko. Slike B, C in D prikazujejo vrednosti teh odvodov pri treh vrednostih električnega dipola v približku t.i. Einthovenovega trikotnika (dipol je v težišču, elektrode pa v ogliščih enakostraničnega trikotnika). Iz slik vidimo, da je vrednost posameznega odvoda enaka projekciji dipola na veznico med ustreznima elektrodama. A) Električni dipol kaže navzdol, zaradi česar sta roki na negativnih potencialih, noga pa na pozitivnem. Potenciala rok sta enaka, zato je $U_I = 0 \text{ mV}$. B) Električni dipol ima enako velikost kot pri sliki A, obrnjen pa je v desno. C) Električni dipol srca ima še enkrat večjo vrednost kot na sliki A in je obrnjen navzdol. Vrednosti potencialov in napetosti so v primerjavi s sliko B podvojene.

ma in levo nogo, ki jih imenujemo tudi *standardni bipolarni odvodi*¹. Napetost med levo in desno roko imenujemo prvi odvod, napetost med levo nogo in desno roko drugi odvod ter napetost med levo nogo in levo roko tretji odvod (slika 2A). Zveze med odvodi in potenciali na rokah in nogi so torej

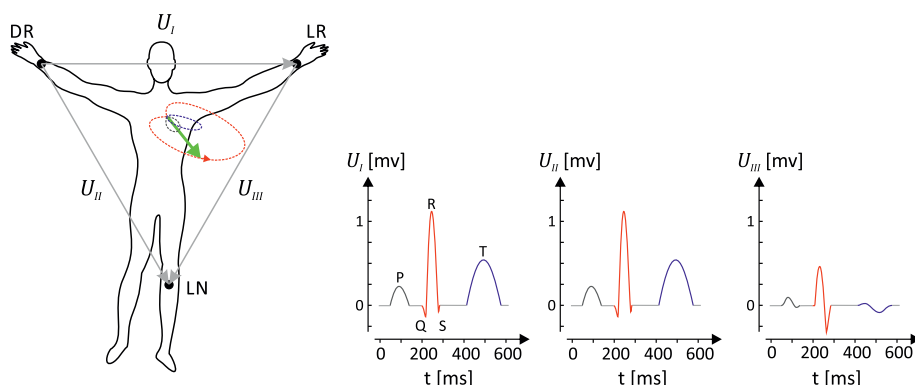
$$\begin{aligned}U_I &= \varphi_{LR} - \varphi_{DR} , \\U_{II} &= \varphi_{LN} - \varphi_{DR} , \\U_{III} &= \varphi_{LN} - \varphi_{LR} .\end{aligned}\tag{1}$$

Ker tri elektrode pri standardnih bipolarnih odvodih tvorijo zaključeno zanko, ti odvodi med seboj niso neodvisni in med njimi velja zveza $U_I + U_{III} = U_{II}$, ki jo lahko enostavno izpeljemo iz zgornjih enačb.

V prejšnjem razdelku smo videli, da lahko trenutno električno aktivnost srca opišemo z vektorjem tokovnega dipola. Odvisnost standardnih odvodov od velikosti in smeri dipola si lahko nadzorno prikažemo ob predpostavki, da elektrode ležijo približno v ogliščih enakostraničnega trikotnika s srcem v središču (slike 2 B, C in D, tak prikaz se po nizozemskem fiziologu imenuje *Einthovenov trikotnik*). Iz slik je lepo razvidno, da bosta v primeru, ko dipol kaže pravokotno na veznico med dvema elektrodama, elektrodi na isti ekvipotencialni črti in bo napetost med njima enaka nič. Po drugi strani bo napetost med elektrodama največja, če je dipol vzporeden veznici med elektrodama. Iz opisanega se nam izlušči preprosto pravilo, ki velja v približku Einthovenovega trikotnika: **napetost med elektrodama je sorazmerna s projekcijo dipola na veznico med njima**. Ob tem opazimo tudi omejitve meritve EKG na rokah in nogi: ker elektrode ležijo na frontalni ravnini telesa, tudi vrednosti odvodov predstavljajo projekcije v tej ravnini, zato celotnega 3D vektorja dipola zgolj z merjenjem na rokah in nogi ne moremo določiti.

Oglejmo si še primer obnašanja normalnega dipola srca med enim srčnim utripom in ustrezne vrednosti standardnih bipolarnih odvodov (slika 3). V grobem ima normalni EKG tri odseke: najprej se depolarizirata atrija (P val), nato ventrikla (odsek QRS), na koncu pa se zazna tudi repolarizacijo ventriklov (T val). V vseh treh primerih se vektor dipola najprej poveča in nato zmanjša, vmes pa se mu spreminja tudi smer, zaradi česar vrh vektorja v vsakem intervalu opiše približno obliko elipse.

¹Izraz *odvod* pri EKG ni povezan z matematičnim odvodom, temveč opisuje način namestitve in vezave elektrod. V angleškem jeziku se npr. odvod pri matematiki imenuje *derivative*, pri EKG pa *lead*.



Slika 3: Shematični prikaz normalnega EKG. Leva slika prikazuje obnašanje dipola srca med enim srčnim utripom, desne slike pa ustrezne standardne bipolarne odvode. V enem utripu srca se njegov dipol trikrat izrazito poveča in pomanjša: prvi val ustreza depolarizaciji atrijev (P val, narisano sivo), drugi nastane zaradi depolarizacije ventriklov (QRS, narisano rdeče), tretji pa ob repolarizaciji ventriklov (T val, narisano modro). Iz relativne višine odvodov lahko razberemo, v kateri smeri se je dipol srca najbolj spreminjal — v prikazanem primeru je tretji odvod najmanjši, prva dva pa sta si podobna, zato lahko sklepamo, da je glavna os elipse QRS intervala pravokotna na veznico med nogo in levo roko.

Do največje električne aktivnosti pride med depolarizacijo atrijev, zato v tej fazi dipol srca najbolj naraste in so spremembe napetosti najbolj izrazite v odseku QRS. V primeru na sliki so pri vsakem odseku največje spremembe dipola srca v smeri pravokotno na veznico med levo roko in nogo, zato sta U_I in U_{II} podobna, U_{III} pa je bistveno manjši. Signal repolarizacije atrijev je šibek in se največkrat prekriva z odsekom QRS, zato ga EKG težje zazna.

Sodobne EKG naprave največkrat merijo 12-kanalni EKG: poleg treh standardnih bipolarnih odvodov na okončinah izmerijo še 9 *unipolarnih odvodov*. Pri unipolarnih odvodih ne merimo napetosti med dvema točkama na telesu ampak napetost med eno točko na telesu in nekim standardnim potencialom. Trije od unipolarnih odvodov so ponavadi t.i. *ojačani unipolarni odvodi* rok in leve noge (označimo jih z angleškimi okrajšavami aV_R , aV_L in aV_F - ojačan = augmented), šest pa je prekordialnih in imajo elektrode razporejene po prsnem košu (označimo jih z V_1 do V_6 , slika 4A). S prekordialnimi odvodi lahko bolje analiziramo nekatere

re detajle v električnem obnašanju srca, predvsem pa tudi usmerjenost dipola srca pravokotno na frontalno ravnino, česar z odvodi na rokah in nogi ne moremo. Pri 12-kanalnem EKG se torej uporablja skupaj devet elektrod (tri na okončinah in šest na prsnem košu), s katerimi izmerimo 12 odvodov ($I, II, III, aV_R, aV_L, aV_F, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$).

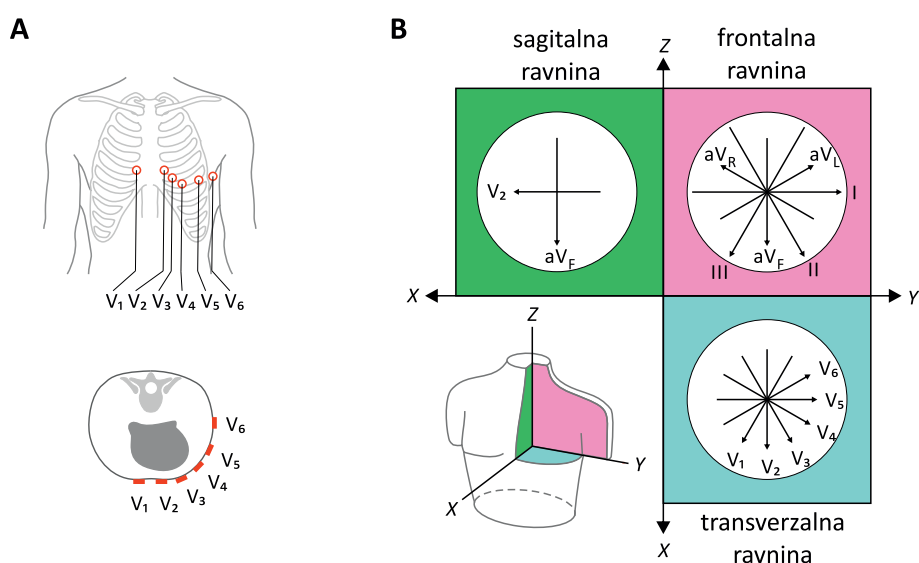
Standardni potencial, glede na katerega se meri unipolarne odvode, je po dogovoru določen kar kot povprečje potencialov na rokah in nogah, zato je mogoče unipolarne odvode rok in noge izraziti s standardnimi bipolarnimi odvodi. Definirani so kot srednje vrednosti sosednjih standardnih bipolarnih odvodov. Unipolarni odvod noge je npr. definiran kot

$$U_{aV_F} = \varphi_{LN} - \frac{(\varphi_{DR} + \varphi_{LR})}{2} = \frac{1}{2}(U_{II} + U_{III})$$

Preprosto geometrijsko predstavo EKG z Einthovenovim trikotnikom lahko sedaj dopolnimo. Videli smo, da so standardni bipolarni odvodi sorazmerni s projekcijami dipola na veznice med dvema ustreznimi elektrodami, ki ležijo na stranicah trikotnika. Podobno si lahko predstavljamo, da so unipolarni odvodi sorazmerni s projekcijami dipola na veznice med središčem srca in ustrezno unipolarno elektrodo. Ojačani unipolarni odvodi so tako sorazmerni s projekcijami na višine trikotnika v smeri okončin, prekordialni odvodi pa merijo velikost dipola v smeri od središča srca do posamezne prekordialne elektrode (slika 4B).

Zavedati se moramo, da je razumevanje EKG preko Einthovenovega trikotnika sicer zelo nazorno, a je kljub vsemu le približek in vseh detajlov z njim ne moremo razložiti (približkov je pravzaprav veliko: da je mogoče trenutno električno aktivnost srca opisati z dipolno sliko, da je središče električne aktivnosti srca vedno na sredini med elektrodami, da je telo homogena snov...). Po preprosti sliki bi moral biti npr. odvod I sorazmeren z odvodom V_5 , saj sta smeri obeh odvodov vzporedni, a v praksi ni povsem tako.

Na koncu velja opozoriti, da se lahko zaradi anatomske in funkcionalne razlike med ljudmi tudi njihovi normalni EKG do neke mere razlikujejo, spreminja pa se tudi s starostjo in fizično aktivnostjo. Poleg tega ne smemo pozabiti, da iz EKG dobimo le informacijo o električni aktivnosti srca, ki je sicer zelo povezana s njegovo mehansko aktivnostjo, vendar pa teh pojmov ne smemo kar enačiti. Izkušen zdravnik lahko na osnovi nenormalnega EKG sklepa o nepravilnosti delovanja srca, za celotno sliko njegovega delovanja in njegove zmožnosti črpanja krvi pa mora izmeriti tudi druge relevantne informacije, npr. krvni tlak in ul-



Slika 4: A) Namestitvev elektrod za prekordialne unipolarne odvode od V_1 do V_6 , ki se poleg elektrod na rokah in nogi uporabljajo pri standardnem 12-kanalnem EKG (zgoraj: frontalni pogled, spodaj: transverzalni pogled). Elektrode so nameščene v transverzalni ravnini telesa, zato lahko z njimi zaznamo tudi komponento dipola srca, ki je pravokotna na frontalno ravnino. B) Shematični prikaz smeri dipola srca, ki jih zaznavajo posameznimi odvodi.

trazvočno sliko delovanja srca.