



Биомедицинска електроника

Бранислав Геразов

Факултет за електротехника и информациски технологии
Универзитет Св. Кирил и Методиј во Скопје, Македонија

Биомедицинска електроника ~ Предавања и вежби v0.55

©Бранислав Геразов, 19 февруари 2019 г.

Скрипта од предавањата и вежбите по предметот Биомедицинска електроника

Институт за електроника

Факултет за електротехника и информациски технологии

Универзитет Св. Кирил и Методиј во Скопје, Македонија

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



Сликата на насловната страна е логото на **Open Hand Project** <http://www.openhandproject.org/>

Содржина

1 Вовед	4
1.1 Историја на биомедицинското инженерство	4
2 Основи на човековата анатомија и физиологија	8
2.1 Структура на клетка	8
2.2 Деполаризација на клетка	11
2.3 Нервни импусли	13
2.4 Контракција на мускулите	17
2.5 Електрокардиограм	20
3 Електронски кола за мерење на биопотенцијалите	28
4 Обработка на биомедицинските сигнали	29
4.1 Слободен и отворен софтвер во научните истражувања	29
4.2 Употреба на Python за истражување	30
4.3 Основи на Python	30
4.4 Основи на NumPy и Matplotlib	31
4.5 Воведни материјали за Python, NumPy, Matplotlib, SciPy	31
4.6 Процесирање на ЕКГ сигнали	31

Поглавје 1

Вовед

Биомедицинската електроника е дел од областа биомедицинско инженерство која се занимава со примената на инженерските принципи и концепти на дизајнирање во медицината и биологијата во здравствени цели. Главната цел е да се употребат познавањата од електротехничката и информациските технологии, како и инженерските вештини за решавање на проблеми, за уапредување на здравството, вклучувајќи ја дијагнозата, набљудувањето и терапијата (Endecker et al., 2005). Биомедицинското инженерство е изразено **мултидисциплинарна област**. Инженерите кои работат во оваа област мора да имаат еднакво цврсти познавања од биологијата и медицината и обратно – лекарите и биолозите во оваа област мора да се и добри инженери. Биомедицинското инженерство е и изразено **хумана област** поради тоа што резултатите од работата на ова поле имаат директен удел во подобрувањето на здравјето, а со тоа и животите на лубето. Така, едни од најизразените достигнувања во биомедицинското инженерство се развојот на биокомпабилни протези за лицата со хендикеп, најразлични уреди за набљудување на човековото тело како што се ултразвукот, ЕКГ (електрокардиограм), ЕЕГ (електроенцефалограм) и МР (магнетната резонанса), пејсмејкери, машини за дијализа, вештачки органи, како вештачкото срце, како и цела низа на медицински уреди за дијагностицирање и терапија. Според статистичките податоци на Националната академија за инженерство, во светот денес работат околу 32.000 биомедицински инженери.

1.1 Историја на биомедицинското инженерство

Биомедицинското инженерство постоело со векови, дури и милениуми. Првата вештачка **протеза** е вештачкиот палец на ногата направен од дрво и кожа најден на мушија од средовечна жена близу античкиот град Теба во Египет која датира од периодот меѓу **1070 – 670 г. п.н.е.**, Сл. 1.1. Уште еден важен показател за историјата на биоинженерството е бронзената нога од Капуа¹ најдена во Капуа, Италија, која потекнува од **300 г. п.н.е.**, чија реплика е прикажана на Сл. 1.2.

Во модерното време биомедицинското инженерство доживува забрзан развој. Во **1816** г. скромноста го натерала францускиот лекар **Рене Лаенек**² да употреби весник завиткан во фишек да ѝ го слушне срцето на една дама што подоцна го навело да го создаде првиот **стетосткоп**, Сл. 1.3.

Во **1848** германскиот лекар и физичар **Херман фон Хелмхолц**³ првпат ги употребил инженерските принципи на физиолошки проблем идентификувајќи ја електричната отпорност на мускулите и нервните ткива. Во **1895** германскиот физичар **Вилхелм Рентген**⁴ случајно открил дека катодна цевка можела да направи хартија покриена со слој од бариум платиноцијанд да

¹Wikipedia: Capua Leg https://en.wikipedia.org/wiki/Capua_Leg

²Wikipedia: René Laennec https://en.wikipedia.org/wiki/René%C3%A9_Laennec

³Wikipedia: Hermann von Helmholtz https://en.wikipedia.org/wiki/Hermann_von_Helmholtz

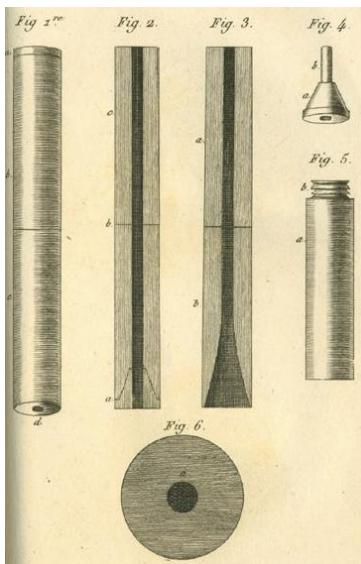
⁴Wikipedia: Wilhelm Röntgen https://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_R%C3%BCntgen



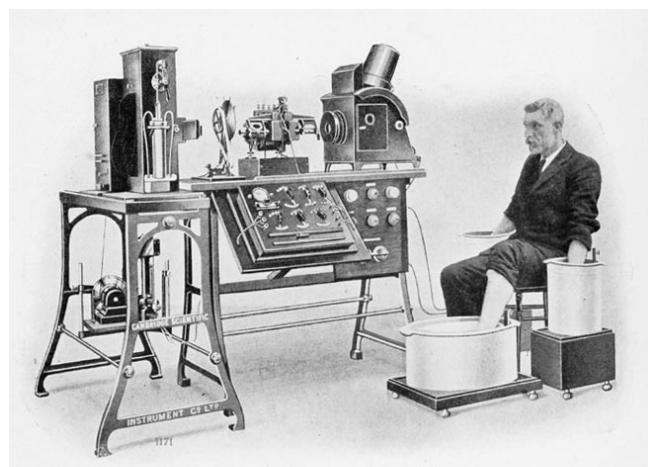
Сл. 1.1: Првата протеза – вештачки палец најден на мумија од стариот Египет.⁵



Сл. 1.2: Копија од ногата од Капуа од 300 г. п.н.е. пронајдена во Италија.⁶



Сл. 1.3: Првиот начин на стетоскоп од 1819 г.⁷



PHOTOGRAPH OF A COMPLETE ELECTROCARDIOGRAPH, SHOWING THE MANNER IN WHICH THE ELECTRODES ARE ATTACHED TO THE PATIENT, IN THIS CASE THE HANDS AND ONE FOOT BEING IMMESED IN JARS OF SALT SOLUTION

Сл. 1.4: Еден од најраните ЕКГ апарати направен во 1911 г. компанијата за научни инструменти од Кембриџ – *Cambridge Scientific Instrument Company*.⁸

свети, дури и кога тие се поставени во различни простории. Тој заклучил дека цевката мора да еmitува некој вид на зраци кои ги нарекол „X“ зраци. По ова открытие, научната заедница започнува во голема мера да ги истражува пробивачките, но и уништувачките, својства на X-зраците. Овие истражувања резултираат со развојот на нивната примена за неинвазивно набљудување на човековото тело, речиси во целост елиминирајќи ја потребата од истражувачка хирургија. Брзиот напредок бил овозможен и од одлуката на Рентген да не ги патентира своите пронаоѓања. За нив, тој ја добива првата Нобелова награда по физика во 1901 г.

⁵A prosthetic toe in the Cairo Museum by Jacky Finch <http://www.livescience.com/4555-world-prosthetic-egyptian-mummy-fake-toe.html>

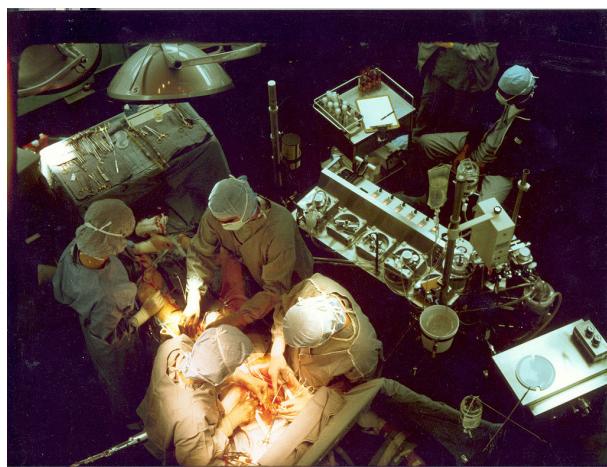
⁶By http://wellcomeimages.org/indexplus/ofb_images/9a/e9/fd5080571b64c69ab0dc7e574b82.jpg Gallery: <http://wellcomeimages.org/indexplus/image/M0012307.html>, CC BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=36352216>

⁷By René-Théophile-Hyacinthe Laennec - Cropped from Image:Rene-Theophile-Hyacinthe Laennec (1781-1826) Drawings stethoscope and lungs.jpg, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5443542>

⁸By http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Willem_Einthoven_ECG.jpg, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1153294>



Сл. 1.5: Оддел од респиратори за луѓе со детска парализа во 1953 г.¹¹



Сл. 1.6: Употреба на машина за кардиопулмонарен бајпас во коронарна хирургија.¹²

Иако Александар Муирхед за првпат во 1872 поврзал жици на раката на еден пациент за да му ги сними отчукувањата на срцето, првиот практично употреблив **електрокардиограм** (ЕКГ) го измислува во **1903** холандскиот лекар **Вилијам Ајнховен**⁹ за што ја добива Нобеловата награда за медицина во 1924 г. Еден таков уред е прикажан на Сл. 1.4. Неговиот изум – жичаниниот галванометар, му овозможил за првпат да ги детектира и сними многу малите електрични струи произведени од човековото срце. Неговата машина давала точност која и ден денес е тешко достиглива од модерните ЕКГ апарати (Barold, 2003).

Биомедицинското инженерство за првпат се појавило како област во високото образование во **1921** г. при **Освалт Институтот за физика и медицина** во Франкфурт, Германија, а во **1969** г. е направена првата комбинирана **докторска програма** за доктор по медицински науки и филозофија (MD/PhD), при одделот за Биомедицинско инженерство во Универзитетот Кејс Вестерн Резерв во Кливленд, Охajo, САД.

Германскиот психијатар **Ханс Бергер**¹⁰ го измислува **електроенцефалограмот** (ЕЕГ) во **1924**. Тој е првиот што ги изучува различните бранови и ритми присутни кај нормалниот и абнормалниот мозок, кај луѓе кои страдаат од епилепсија, како што се α -брановите со опсег на фреквенции $7,812 - 13,28$ Hz. Првин тој вметнувал две електроди, една од предната страна и една од задната, под скалпот, за потоа да ги прицврсти на кожата со помош на гумени ластици. За своите мерења тој го користел жичаниот галванометар на Ајнховен, а подоцна и галванометарот за снимање на Сименс, кој му овозможил снимање на напони од редот на $100 \mu V$.

Во **1928** г. бил измислен **Дринкер респираторот**, којшто претставува еден тип на вентилатор со негативен притисок наречен и „челичен бел дроб“. Овој уред служи за овозможување на процесот на дишење кога човекот не може тоа да го направи тоа со сопствена сила. Првата примена на Дринкер респираторот била кај 8 годишно девојче заболено од детска парализа во Клиниката за деца во Бостон, САД. На Сл. 1.5 е прикажан еден цел оддел со вакви машини за луѓе со детска парализа во болницата Ранчо Лос Амигос во Калифорнија, САД во 1953 г.

Во **1950** г. бил измислен **електронскиот микроскоп**¹³ којшто можел да постигне многу големи резолуции поради тоа што електроните имаат 100.000 пати пократка бранова должина од видливата светлина. Во периодот **1950 – 1960** биле постигнати големи напредоци во

⁹Wikipedia: Willem Einthoven https://en.wikipedia.org/wiki/Willem_Einthoven

¹⁰Wikipedia: Hans Berger https://en.wikipedia.org/wiki/Hans_Berger

¹¹By Food and Drug Administration - <http://www.fda.gov/cber/summaries/cent092302pp.htm>, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3227578>

¹²By Jerry Hecht - <http://fmp.cit.nih.gov/hi/> - Image ID: 657 C, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=780261>

¹³Wikipedia: Electron microscope https://en.wikipedia.org/wiki/Electron_microscope



Сл. 1.7: Уред за магнетна резонанса.¹⁹



Сл. 1.8: Вештачко срце SynCardia.²⁰

нуклеарната медицина. Во 1953 била направена машината за **кардиопулмонарен бајпас**¹⁴ која првото времено може да ја превземе работата на срцето и белите дробови пред се за време на операции на срцето, и може да се искористи за воспоставување на контролирана хипотермија.

Во 1970 г. биле воведени техниките на **компјутерска томографија (CT)**¹⁵ во која компјутерски се обработуваат повеќе Рентген слики за добивање на напречни пресеци на скенираниот дел од телото, како и **магнетна резонанса (MRI)**¹⁶ која преку употреба на силни магнетни полинија може да ја опфати дистрибуцијата на молекулите на водата во телото, па со тоа да се набљудува неговата анатомија и физиолошките процеси, Сл. 1.7.

Техниката на **томографија со позитронска емисија (PET)**¹⁷ била воведена во 1980. Со која може да се снимат физиолошките процеси во телото преку анализа на гама зрачењето кое се внесува во телото преку биолошки активна молекула.

Првото **вештачко срце**¹⁸ успешно вградено во човек било срцето Јарвик-7, чиј наследник е прикажан на Сл. 1.8, во 1982 на Универзитетот во Јута. Срцето било вградено во 61-годишниот човек кој живеел со него 112 денови. Најдолготрајна успешна употреба на вештачко срце е 620 денови. Најчесто тоа се користи како првото времено решение пред да е можна трансплантирања на истинско срце.

¹⁴Wikipedia: Cardiopulmonary bypass https://en.wikipedia.org/wiki/Cardiopulmonary_bypass

¹⁵Wikipedia: Computer Tomography - CT scan https://en.wikipedia.org/wiki/CT_scan

¹⁶Wikipedia: Magnetic resonance imaging https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_resonance_imaging

¹⁷Wikipedia: Positron emission tomography https://en.wikipedia.org/wiki/Positron_emission_tomography

¹⁸Wikipedia: Artificial heart https://en.wikipedia.org/wiki/Artificial_heart

¹⁹By Jan Ainali - Own work, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3546051>

²⁰By SynCardia Systems, Inc. - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=22097831>

Поглавје 2

Основи на човековата анатомија и физиологија

Разбирањето на човековата анатомија и физиолошките процеси кои се одвиваат во човековиот организам е од големо значење за дизајнирањето на биомедицинските електронски системи. Од анатомски аспект потребно е познавање на структурата на различните ткива, односно нивните електрични карактеристики, за да може да се дизајнираат системи за нивно набљудување, како и стимулација. Од физиолошки аспект, пак, најзначајни се процесите кои генерираат промени во електричното поле во телото, а со тоа можат да бидат детектирани преку електроди. Со овие процеси се занимава областа **електрофизиологија**, а нивното познавање е важно за дизајнот на системи како што се електромиограмот (ЕМГ), електрокардиограмот (ЕКГ) и електроенцефалограмот (ЕЕГ).

2.1 Структура на клетка

Клетката е основната структурна и функционална единица на сите живи организми.¹ Таа е најмал жив биолошки систем.² Клетките се способни за саморепродукција, бидејќи го содржат целокупниот наследен материјал. Типичната градба на една клетка е дадена на Сл. 2.1.³ Иако основната градба на сите клетки во организмите е иста, сепак, во зависност од местото и функцијата клетките можат да се разликуваат по својата големина и облик. По големина клетките кај повеќеклеточните организми се движат помеѓу 10 и 100 μm , но можат да бидат и многу поголеми како што се мускулните клетки и невроните. По својот облик клетките исто така можат да бидат топчети, плочести, коцкасти, вртеновидни или пак разгранети. На пример: неврните клетки со своите долги продолжетоци многу се разликуваат од мускулните клетки или од прозирните клетки во очната леќа. Според местоположбата и функцијата во организмот, разликуваме епителна, неврна, мускулна, полова клетка итн.

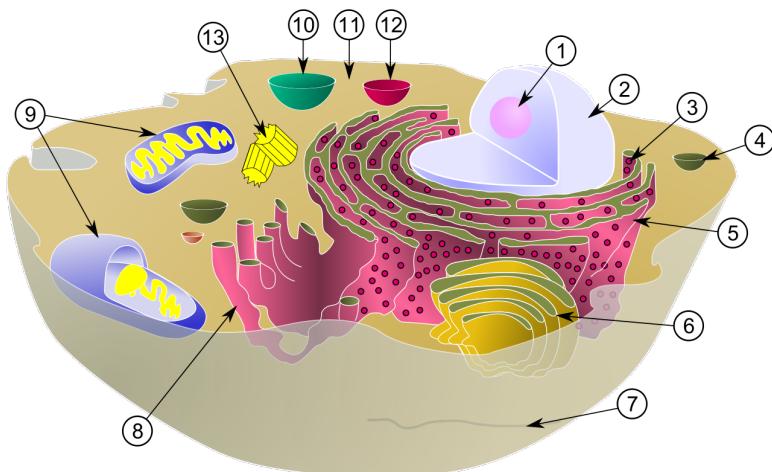
Онадвор клетката е обвиткана со **клеточна мембра**.⁴ Ваквата мембра е составена од два слоја на масти во кои се вметнати различни белковини и мало количество на шеќери. Клеточната мембра е многу важна, бидејќи таа одредува што може да влезе, а што да излезе од клетката. Клеточната мембра е многу тенка и е составена од фосфолипиди кои имаат еден хидрофобичен и еден хидрофиличен крај. Фосфолипидите се распоредени во бимолекуларен слој описан според течно-мозаичниот модел, а разните протеини се вметнати на различни места во овој бимолекуларен слој, види понатаму Сл. 2.3.

¹Текстот во делот 2.1 користи исечоци од Wikipedia: Клетка <https://mk.wikipedia.org/wiki/Клетка>

²Интересно видео за тоа колку ние сме клетките кои ги содржиме и обратно може да видите овде: Kurzgesagt – In a Nutshell: What Are You?<https://www.youtube.com/watch?v=JQVmDkZT4>

³Поучно видео за структурата на клетката може да видите овде: Biology: Cell Structure I Nucleus Medical Media <https://www.youtube.com/watch?v=URUJD5NEXC8>

⁴Wikipedia: Клеточна мембра https://mk.wikipedia.org/wiki/Клеточна_мембра



Сл. 2.1: Градба на клетката: 1) јадренце, 2) клеточно јадро, 3) рибозом, 4) везикула, 5) Груб ендоплазматичен ретикулум (ЕР), 6) Голциев систем, 7) цитоскелет, 8) Мазен ЕР, 9) митохондрија, 10) вакуола, 11) лизозом, 12) цитоплазма, 13) центриоли.⁷

Цитоплазмата е полутечна маса со зрнеста структура, изградена од вода и минерални соли, неоргански и органски материји: шеќери, масти и белковини. Таа содржи цитоскелет кој и го одржува обликот и овозможува транспорт на метии низ неа. Зрнестата структура на цитоплазмата ја сочинуваат посебни делчиња наречени органели во кои се вршат животните процеси. Познати органели се:

- **јадрото** е органела која ја има во секоја клетка. Јадрото е обвиткано со јадрена обивка со пори. Во јадрото се сместени хромозомите, а во нив гените кои во дезоксирибонуклеинската киселина (ДНК) ја носат генетската информација. Во гените се сместени и контролните механизми за управување со различните животни процеси кои се одвиваат во клетката,
- **рибозомите** се органелите кои се одговорни за произведување на протеините врз база на генетската информација⁵,
- **митохондриите** се клеточни органели во кои се врши аеробното разградување на материите и се ослободува енергија во вид на аденоzin трифосфат (АТФ)⁶. Митохондриите содржат свои гени и се способни сами да синтетизираат протеини и да се размножуваат,
- **вакуоли** претставуваат мали торбички што служат за складирање на резервни материји како вода, масти кај масните клетки и други органски материји. Вакуолите, воедно, служат и за исфрлање на непотребните материји од клетката,
- **гликоген** е сложен шеќер кој се складира како резервен шеќер во цитоплазмата на клетката,

Сите клетки се изградени од хемиски елементи кои се среќаваат и во неживата природа. Од над 100 познати хемиски елементи, околу 60 влегуваат во составот на клетките. При тоа, овие елементи количински не се застапени еднакво, па се разликуваат:

- **Макроелементи** – јаглерод С, кислород О, водород Н и азот N,
- **Микроелементи** – фосфор P, сулфур S, натриум Na, калциум Ca, магнезиум Mg,カリум K и хлор Cl,
- **Елементи во трагови** – јод I, флуор F, железо Fe, цинк Zn, манган Mn и др.

⁵Овој процес е претставен преку анимација во видеото: From DNA to protein - 3D <https://www.youtube.com/watch?v=gG7uCskUOrA>

⁶На английски Adenosine triphosphate (ATP).

⁷Од MesserWoland и Szczepan1990 — сопствено дело (создадена со Inkscape), CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1279365>

Табела 2.1: Застапеност на елементите во клетките на човекот.

Елемент	%	Елемент	%	Елемент	%
Водород	9,5	Сулфур	0,3	Железо	траги
Јаглерод	18,5	Калциум	1,5	Натриум	0,2
Азот	3,3	Магнезиум	0,1	Калиум	0,4
Кислород	65,0	Манган	траги	Јод	траги
Фосфор	1,0	Цинк	траги	Хлор	0,2

Процентната застапеност на некои од нив во клетките од човековиот организам е дадена во Табелата 2.1. Во составот на клетките, хемиските елементи се јавуваат во форма на соединенија - органски и неоргански. Биолошкото значење на овие хемиски елементи е големо, независно од нивната процентна застапеност. Недостигот на кој и да е елемент предизвикува нарушување во нормалното функционирање на клетките и на организмот.

Од неорганските соединенија најзастапена е водата, која е неопходна за животот. Таа во просек, во клетките е застапена со околу 80%, но некои клетки содржат повеќе, на пр. ембрионалните клетки содржат до 95%. Водата за клетката е значајна од неколку причини:

- метаболизмот во клетките е можен само во водна средина,
- таа е дисперзно средство за клеточните колоиди, т.е. мешавините од соединенија со една, две или повеќе фазни состојби,
- учествува во транспортот на материите,
- има голем топлински капацитет.

Други неоргански соединенија во клетката се минералните соли. Тие најчесто се јавуваат растворени, дисоциирани на јони, и тоа:

- **катјони** – Натриум Na^+ , Калиум K^+ , Калциум Ca^{2+} , и Магнезиум Mg^{2+} ,
- **анјони** – хлорид Cl^- , сулфат SO_4^{2-} , HCO_3^- , и фосфат PO_4^{3-} .

Јоните имаат важни функции во клетката. Тие учествуваат во одржувањето на осмотската хомеостаза, или рамнотежа, меѓу клетката и нејзината околина, одговорни се за ацидобазичната хомеостаза на клетката, а исто така ја регулираат и активноста на некои ензими.

Во клетките се јавуваат четири типа органски соединенија: јаглеидрати, липиди, протеини и нуклеински киселини.

- **Јаглеидратите**, или шеќерите, се органски соединенија изградени од јаглерод, водород и кислород. Од моносахаридите, најпознати соединенија во клетката се пентозите рибоза и деоксирибоза и хексозите глукоза, која клетките ја користат најчесто за добивање енергија, и фруктоза. Од дисахаридите значајна е сахарозата, или трсчен шеќер, додека од полисахаридите најзначајни се гликогенот во животинските клетки и скробот во растителните клетки, и целулозата кај растенијата. Ошто земено, јаглеидратите се извор на енергија на клетките. Со нивното разложување, како краен производ се добива јаглероден диоксид и вода и се ослободува енергија.⁸ Освен тоа, тие влегуваат во составот на мембраниите, клеточниот сид и други клеточни структури.
- **Липидите**, или масните материји, се група органски соединенија за кои е карактеристично што се хидрофобни, односно нерастворливи во вода, а се раствораат во органски растворувачи, на пр. етер, ацетон, бензин и др. Липидите се извор на енергија и затоа во

⁸Фруктозата, која заедно со глукозата влегува во составот на сахарозата, не може директно да се метаболизира во човековиот организам, туку мора првин да биде претворена во масти во црниот дроб кои потоа можат да бидат искористени за енергија или наталожени. Robert H. Lustig – Sugar: The Bitter Truth <https://www.youtube.com/watch?v=dBnniuab-oM>

клетките најчесто се јавуваат како резерви. По потреба, особено при подолгото гладување, тие се разложуваат до CO_2 и H_2O , ослободувајќи притоа големо количство енергија. Освен енергетска, овие соединенија имаат и структурна и заштитна функција, бидејќи учествуваат во изградбата на клеточната мембра и другите мембрани системи во клетката. Разликуваме прости липиди кои во својот состав содржат виши масни киселини кои се делат на незаситени и заситени⁹, и сложени липиди кои содржат и нелипидно соединение. Еден пример за сложени липиди се фосфолипидите кои содржат фосфорната киселнина која им дава хидрофиличен крај. Попознати липиди во составот на клетката се неутралните масти и липоидите.

- **Протеините**, или белковините, имаат огромно биолошко значење, како за клетката, така и за организмот. По водата, количински се најзастапени во клетката. Тие не можат лесно да бидат искористени за добивање енергија но од нив зависат основните особини на клетката, метаболизам и градба:

- учество во градбата на клеточните структури: мембрани, органели и др.,
- учество во различни движења на клетката – главно во мускулните клетки, тоа се протеините актин и миозин,
- антителата, кои се протеини, имаат заштитна функција,
- протеините во вид на ензими, ги убрзуваат биохемиските процеси во клетката итн.

- **Нуклеинските киселини** се соединенија со големо биолошко значење, бидејќи го изградуваат наследниот материјал и имаат централна улога во синтезата на протеините, а преку нив ги определуваат главните особини и карактеристики на клетката. Има два типа нуклеински киселини: ДНК (деоксирибонуклеинска киселина) и РНК (рибонуклеинска киселина).

2.2 Деполаризација на клетка

Во основата зад електричните промени кои настануваат во организмот, којшто може да бидат детектирани преку соодветни сензори, стои процесот на деполаризација на една клетка. **Деполаризацијата**¹⁰ во биолошки смисол, подразбира кога во клетката настанува ненадејна и драматична промена во електричен домен, Сл. 2.2. Во својата стационарна состојба, клетките ја одржуваат својата внатрешност на негативен електричен потенцијал, споредено со нивното опкружување, преку одржувањето на различна концентрација на позитивните и негативните јони.

Во ошт случај, без влијание на надворешното електрично поле, непосредно од внатрешната страна на клеточната мембра се натрупува вишок негативни јони, а позитивните јони се натрупуваат на надворешната страна на мембраната. На тој начин во близина на мембраната доаѓа до формирање на двоен електричен слој. По своите електрични својства клетката и нејзината околина може да се прикажат како кондензатор. Џитоплазмата и течноста што ја опколува, кои имаат висока спроводливост, се двете електроди, а клеточната мембра со својата мала спроводливост ја има улогата на диелектрик кој ги разделува електродите.¹²

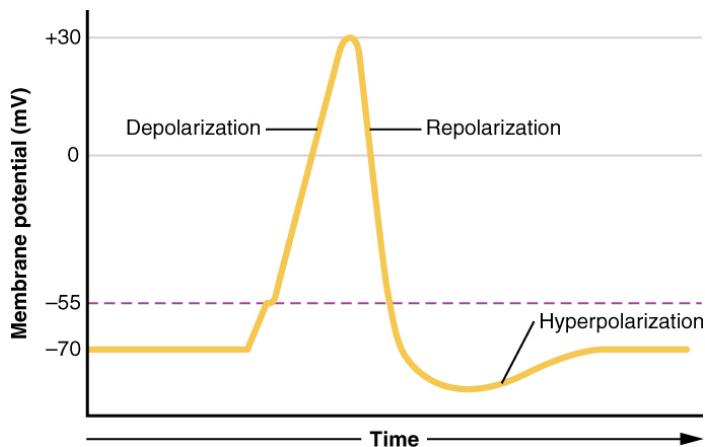
Разликата во потенцијалите помеѓу внатрешноста и надворешноста на клетката се нарекува **потенцијал на клеточната мембра** или **биоелектричен потенцијал во**

⁹Заситените масти кои претежно се од животинско потекло се посебно штетни за човековиот кардиоваскуларен систем. Michael Greger M.D. – Low-Carb Diets & Coronary Blood Flow <https://nutritionfacts.org/video/low-carb-diets-and-coronary-blood-flow/>.

¹⁰Wikipedia: Depolarization <https://en.wikipedia.org/wiki/Depolarization>

¹¹By OpenStax College - Anatomy & Physiology, Connexions Web site. <http://cnx.org/content/col11496/1.6/>, Jun 19, 2013., CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30147928>

¹²Текстот во овој поднаслов користи исчеоци од Wikipedia: Биоелектричен потенцијал https://mk.wikipedia.org/wiki/Биоелектричен_потенцијал



Сл. 2.2: Деполаризација на една клетка.¹¹

мирување. Сите електрични процеси во човековото тело се должат на промената на овие потенцијали (Гершановски). Големината на биоелектричниот потенцијал може да се мери со помош на специјална микро-електрода со која се пробива клеточната мембра на и таа се внесува во нејзината внатрешност. Втората електрода се поставува во течноста на меѓуклеточниот простор. Биоелектричните потенцијали се движат околу -70 mV , но немаат секогаш иста големина.

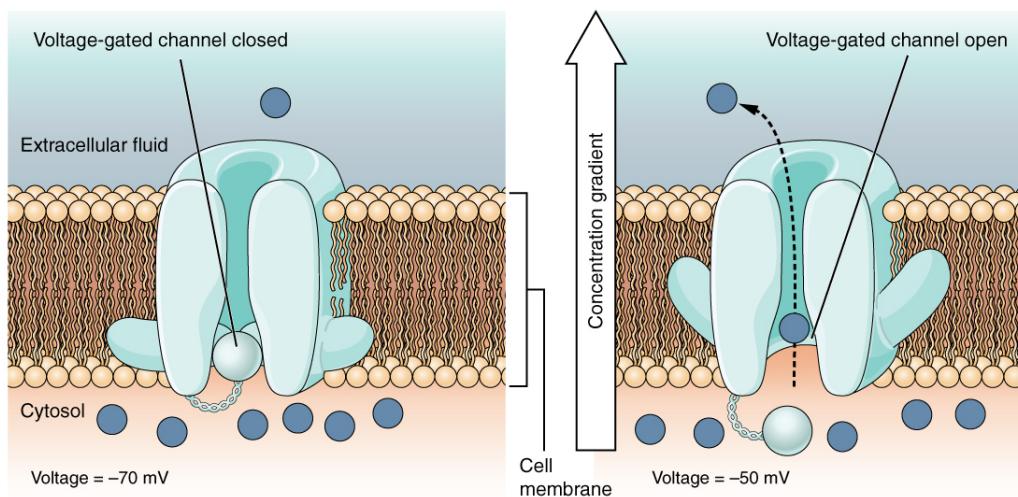
Најважна улога во создавањето на биоелектричниот потенцијал има дифузијата на натриумовите Na^+ и калиумовите K^+ јони преку клеточната мембра, која е резултат на дејството на таканаречените **натриум-калиумови пумпи**. Преку нив за секои два внесени K^+ јони, од клетката се испуштуваат три Na^+ јони со употреба на еден молекул на АТФ.¹³ На овој начин не само што се намалува електричниот потенцијал на клетката, туку и се создаваат услови за нејзина брза деполаризација. Така, екстрацелуларната течност содржи голема концентрација на Na^+ јони кои не можат да продрат во клетката поради тоа што пропустливоста на мембраната на Na^+ јони е 100 пати поголема од пропустливоста за K^+ јони. Оваа нерамнотежка ја одржуваат и **напонски регулираните јонски канали** кои биоелектричниот потенцијал ги држи затворени, Сл. 2.3. И покрај високата концентрација на K^+ во внатрешноста на клетката, таа вообичаено содржи и негативно наелектризирани честички кои ја воспоставуваат негативната поларизација.

Откако клетката ќе го воспостави биолектричниот потенцијал на мирување, таа може да биде побудена и да оствари деполаризација. Побудувањето на клетките може да се оствари на повеќе начини и тоа под:

- механичко дејство,
- хемиско дејство,
- електрично дејство и друго.

При деполаризацијата, за време помало од 1 ms, надворешната страна на клеточната мембра станува негативна во однос на внатрешната, Сл. 2.2. Промената на мембранныот потенцијал при побудување на клетките се нарекува **акционен потенцијал**. Во почетниот стадиум на деполаризација, преку отворање на напонски регулираните јонски канали предизвикано од електричната побуда, Сл. 2.3, се зголемува пропустливоста на мембраната на јоните на натриумот Na^+ па тие во голем број навлегуваат во клетката поларизирајќи ја позитивно нејзината внатрешност. Ова се случува поради отворање на напонски регулираните јонски канали предизвикано од побудата на клетката, Сл. 2.3. Деполаризацијата завршува кога внатрешноста на клетката ќе постигне позитивна поларизација. Ваквата прераспределба на електричните полнежи трае се додека трае и побудената состојба на клетките, после која повторно се воспоставува мембранныот потенцијал на мирување.

¹³Овој процес, како и целиот процес на деполаризација кај нервните импулси се претставени како анимација во видеото Nerve Impulse Molecular Mechanism [3D Animation] <https://www.youtube.com/watch?v=fHRC8S1LcHO>



Сл. 2.3: Напонски регулирани јонски канали.¹⁴

Брзата дифузија на натриумовите јони трае од 0,1 до 1 ms. Создадениот позитивен полнеж во внатрешната страна на мемраната го забавува натамошното навлегување на натриумовите јони. Тој исто така ги активира и каналите за K^+ со што калиумовите јони започнуваат да ја напуштаат клетката. Како последица од ова повторно се воспоставува биоелектричниот потенцијал на мирување. Овој процес се нарекува **реполаризација**. Низ целиот овој процес на деполаризација и реполаризација натриум-калиумовите пумпи постојано работат.¹⁵

Процесот на реполаризација предизвикува натфрлање, всушност потфрлање, бидејќи калиумовите јони продолжуваат да излегуваат од клетката снижувајќи го нејзиниот потенцијал под оној во мирување. Ова потфрлање се нарекува **хиперполаризација**. Хиперполаризацијата престанува со затворањето на сите напонски контролирани јонски пумпи, со што на натриум-калиумовите пумпи, кои работат целото време, им се дава простор да го воспостават потенцијалот на мирување.

Веднаш по хиперполаризацијата напонски-контролираните натриумови пумпи се во состојба во која не можат да бидат побудени, дури и при доаѓање на нов надворешна побуда, како на пример надворешен акционен потенцијал. Ова време се нарекува **време на непобудливост** и тоа игра клучна улога во еднонасочното простирање на акционите потенцијали.

Промената на биоелектричниот потенцијал за време на деполаризацијата го овозможува преносот на електрични импусли во клетките, како кај невроните, но и помеѓу нив. Со тоа деполаризацијата како начин на комуникација е од особено значење за работата на многу видови на клетки, но и на човековиот организам во целина.

2.3 Нервни импусли

2.3.1 Градба на неврон

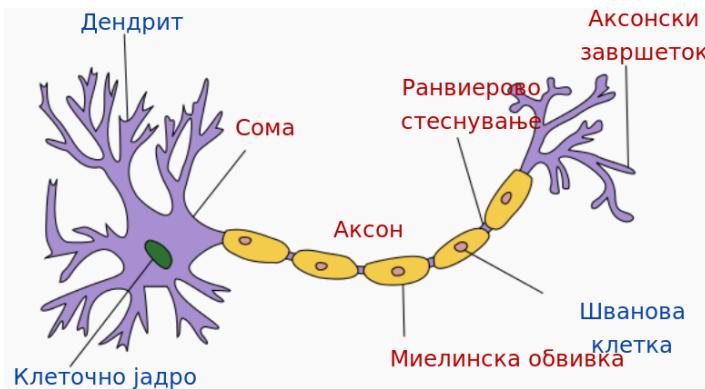
Нервните клетки или **невроните** се основните градбени единки на нервниот систем.¹⁶ За разлика од другите клетки во телото, невроните се карактеризираат со надразливост, осетливост и спроводливост. Овие карактеристики се во согласност со нивната специфична функција. Градбата на невроните е прикажана на Сл. 2.4 и содржи:

- тело на нервната клетка или невроцит,

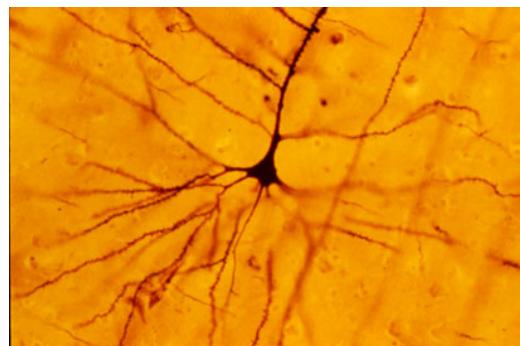
¹⁴By OpenStax College - Anatomy & Physiology, Connexions Web site. <http://cnx.org/content/col11496/1.6/>, Jun 19, 2013., CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30147924>

¹⁵Уште една убава претстава на целиот процес на деполаризација и реполаризација е дадена во видеото Action Potential Animation https://www.youtube.com/watch?v=-h_kWFM2faQ

¹⁶Текстот во овој параграф користи исечоци од Wikipedia: Неврон <https://mk.wikipedia.org/wiki/Неврон>



Сл. 2.4: Градба на невроните.¹⁷



Сл. 2.5: Човечки неврон виден под микроскоп.¹⁸

- дендрити (влезови), и
- нервно влакно или аксон (излез).

На Сл. 2.5 е прикажан неокортикален пирамидален неврон обоеан по методот на Голци. Се забележуваат многубројните дендрити кои излегуваат, всушност водат кон невроцитот.

2.3.2 Побудување и движење на нервните импулси

Побудите кај невроните можат да бидат физички, електрични и хемиски, но тие освен што можат да извршат побудување на невронот, можат и да го инхибираат истиот. Така, инхибиторската побуда наместо да предизвика промени во невронот во насока на деполаризација, таа врши негова хиперполаризација. Оваа хиперполаризација предизвикува пад на биоелектричниот потенцијал на невронот под овој на мирување. Оваа додатна негативна поларизација мора да се надмине за да настане деполаризација, со што таа е отежната. Позитивните побуди пак, го зголемуваат напонот во невронот, што предизвикува невронот да може полесно да биде однесен во деполаризација во однос на неговата состојба во мирување.

Без разлика од поларитетот на побудите, тие секогаш патуваат од дендритите кон телото на невронот и конвергираат кон коренот на аксонот, Сл. 2.6. Тука се врши нивно сумирање, односно еден вид на биолошка интеграција, за да се одреди одсивот на невронот. Ако сумата на побудите достигне одреден напон наречен **напон на праг**, доаѓа до деполаризација којашто започнува да се простира од коренот на аксонот кон неговиот врв. Овој бран на деполаризација долж аксонот се нарекува **акциски потенцијал** или **нервен импулс**.

Простирањето на деполаризацијата долж невронот е прикажана на Сл. 2.7, а фазите во простирањето на Сл. 2.8.²⁰ Таа се одликува со попречна струја насочена навнатре кон клетката на местото на простирање.

По пристигнувањето на нервните импулси на крајот од аксонот, тие предизвикуваат ослободување на неуротрансмитери од невронот. Овие неуротрансмитери претставуваат побуда за дендрити на други неврони или пак за мускулни клетки. По простирањето на нервниот импулс низ аксонот на невронот, невронот мора повторно да го воспостави биолектричниот потенцијал

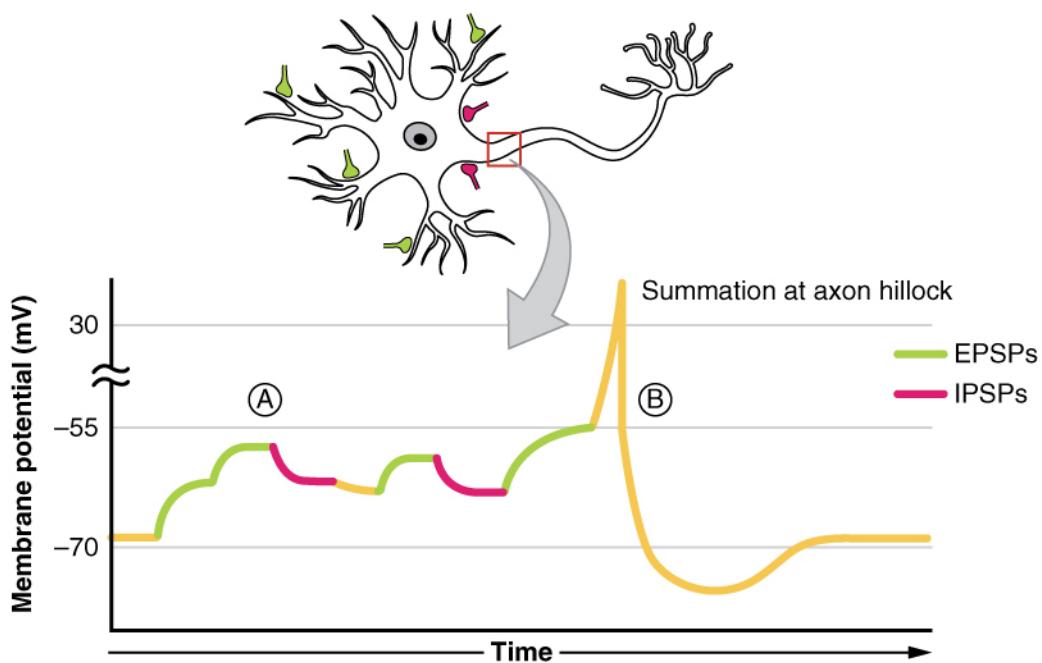
¹⁷ Wikipedia: Неврон <https://mk.wikipedia.org/wiki/Неврон>, оригинал од Quasar Jarosz на Википедија на англиски, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7616130>

¹⁸ Original uploader was Cahass at en.wikipedia — Transferred from en.wikipedia, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=651365>

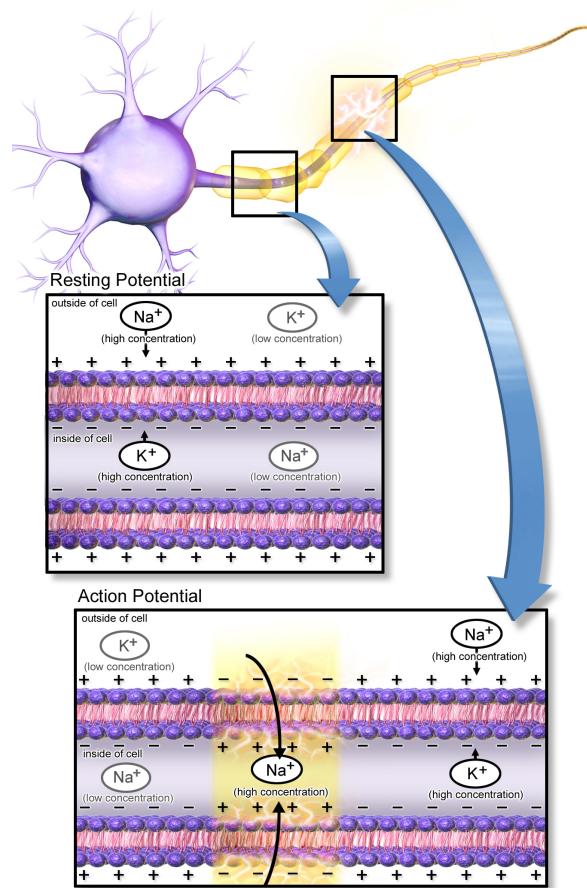
¹⁹ By OpenStax College - Anatomy & Physiology, Connexions Web site. <http://cnx.org/content/col11496/1.6/>, Jun 19, 2013., CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30147931>

²⁰ Wikipedia: Action potential https://en.wikipedia.org/wiki/Action_potential

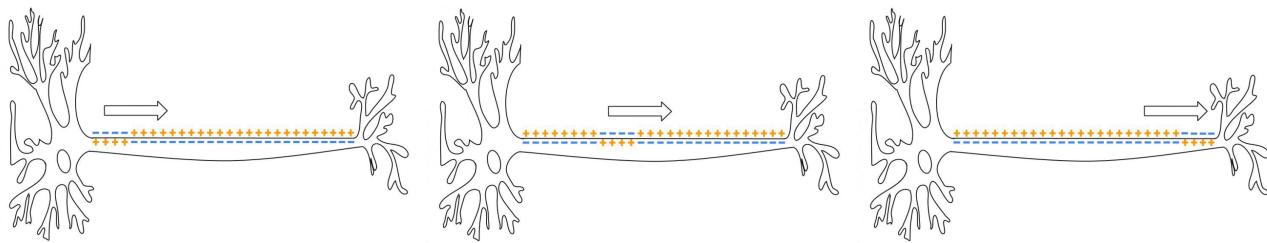
²¹ Blausen.com staff. "Blausen gallery 2014". Wikiversity Journal of Medicine. DOI:10.15347/wjm/2014.010. ISSN 20018762. - Own work, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=29452220>



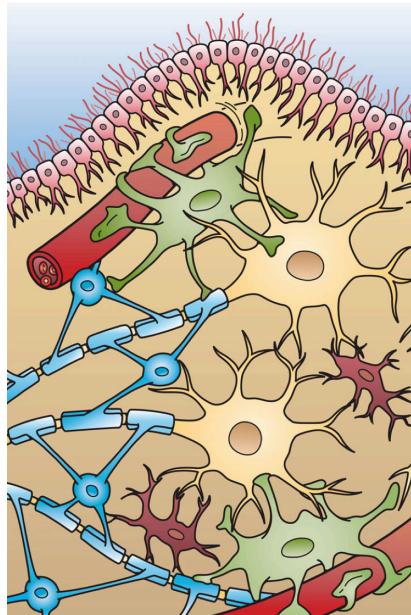
Сл. 2.6: Интегрирање на побудите во телото на невронот.¹⁹



Сл. 2.7: Простирање на нервниот импулс.²¹



Сл. 2.8: Фази од простирањето на нервниот импулс.²²



Сл. 2.9: Глиа клетки во централниот нервен систем (од горе надолу): епендимални клетки (розово), астроцити (зелено), микроглиални клетки (темно црвено) и олигодендроцити (сино).²⁵

во мирување. Пред невронот да може да проследи нов нервен импулс, треба да помине **времето на непобудливост**.²³

2.3.3 Глиа клетки

Швановите клетки преставуваат еден вид на **глиа клетки** кои се задолжени за создавање на миелинската обвивка, види подолу. Глиа клетките се од суштинско значење за правилната работа на невроните.²⁴

Уште повеќе, според некои истражувања нивното моделирање во вештачките невронски мрежи носи подобрени перформанси (Porto-Pazos et al., 2011). Некои од поважните типови на глиа клетки, претставени на Сл. 2.9, се:

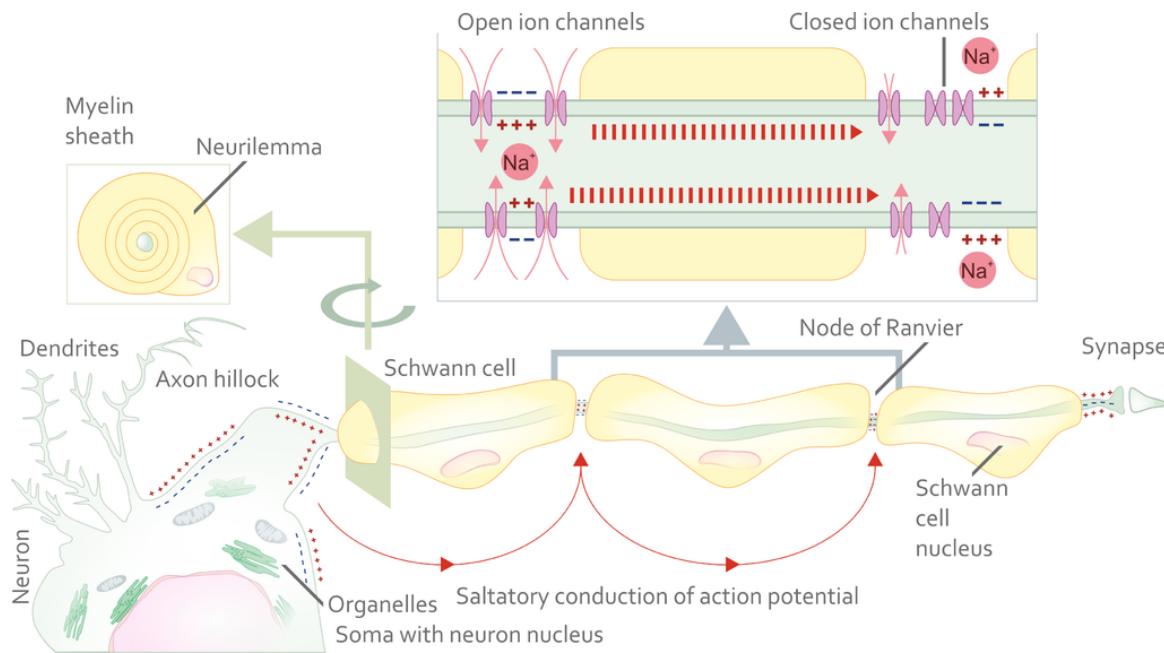
- епендималните клетки – одговорни за излачување и придвижување на мозочно-спиналната течност,
- астроцитите – задолжени за пренос на хранливите материји од капиларите до невроните и отпадните материји од невроните во спротивна насока тие се чуварите на мозочно-крвната бариера,

²³Како што кажавме погоре, добра илустрација на целиот процес на простирање на нервните импулси е дадена во видеото Nerve Impulse Molecular Mechanism [3D Animation] <https://www.youtube.com/watch?v=fHRC8S1LcH0>

²⁴By Laurentaylorj - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=26311114>

²⁵Wikipedia: Glia <https://en.wikipedia.org/wiki/Glia>

²⁵By Artwork by Holly Fischer - <http://open.umich.edu/education/med/resources/second-look-series/materials> - CNS Slide 4, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24367125>



Сл. 2.10: Простирање на нервниот импулс во миелизиран неврон со скокови.²⁶

- микроглиалните клетки – одговорни за инфраструктурно позиционирање на невроните, и
- олигодендроцитите (во периферниот нервен систем тоа се Швановите клетки) – одговорни за создавање на миелинската обвивка.

2.3.4 Миелинска обвивка

Миелинската обвивка се состои од низа на сегменти одделени со стеснувања наречени **јазли на Ранвиер**. Нејзината задача е да ја намали капацитивноста на мембраната и да ја зголеми нејзината отпорност во деловите помеѓу два соседни јазли преку попречување на движењето на јоните низ мембраната на аксонот. На тој начин, единствената размена на јони се случува во немиелизираните јазли, Сл. 2.10. Пропагацијата на акцискиот потенцијал долж деловите покриени со миелин се одвива преку струја во цитоплазмата која е доволно силна да предизвика деполаризацијата во соседниот јазол на Ранвиер. На овој начин деполаризацијата се простира со потскокнување од јазол до јазол.²⁷ Миелинот со тоа овозможува забрзан пренос на нервните импулси, како и поголема енергетска ефикасност на целиот процес. Последново е особено важно ако се има во предвид дека нервниот систем користи околу 20% од енергијата на човековиот организам.

Миелинизацијата ја зголемува средната брзина на простирање на нервните импулси која се движи од 1 m/s до преку 100 m/s и расте со зголемување на дијаметарот на аксонот. Брзината на простирање во зависност од дијаметарот на аксонот во μm и миелинизацијата е дадена на Сл. 2.11. Брзината v на миелинираните неврони зависи линеарно од дијаметарот на аксонот d , т.е. $v \propto d$, додека брзината на немиелинизираните неврони зависи од квадратниот корен на дијаметарот $v \propto \sqrt{d}$. На графикот екстраполираните вредности се прикажани со испрекинати линии.

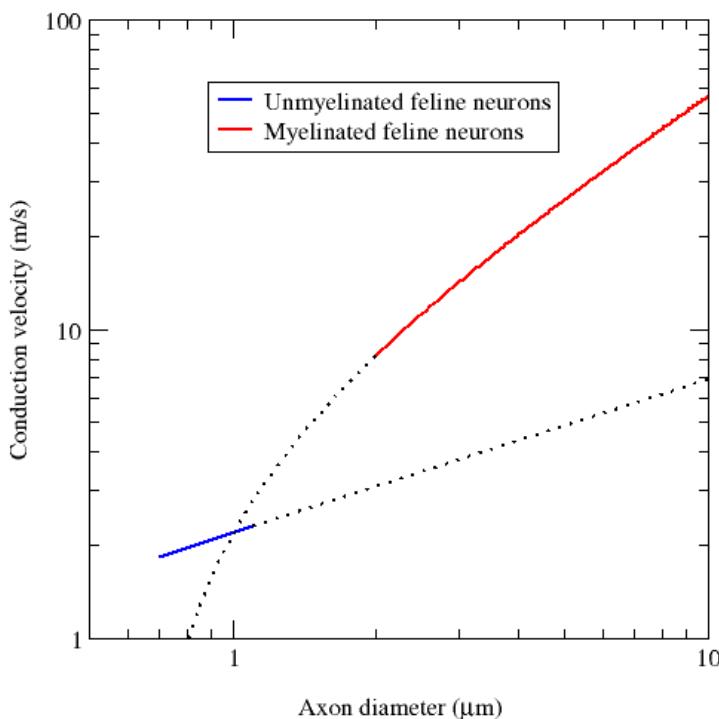
2.4 Контракција на мускулите

Мускулите претставуваат ткива составени од мноштво спонови на **мускулни влакна**, кои ја имаат способноста да генерираат сила и движење преку контракција. Постојат три типа на

²⁶By Helixitta - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=44043108>

²⁷Wikipedia: Saltatory conduction https://en.wikipedia.org/wiki/Saltatory_conduction

²⁸By WillowW - Own work, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3844705>



Сл. 2.11: Влијание на миелинската обвивка врз брзината на простирање на нервниот импулс.²⁸

мускули во човековиот организам:

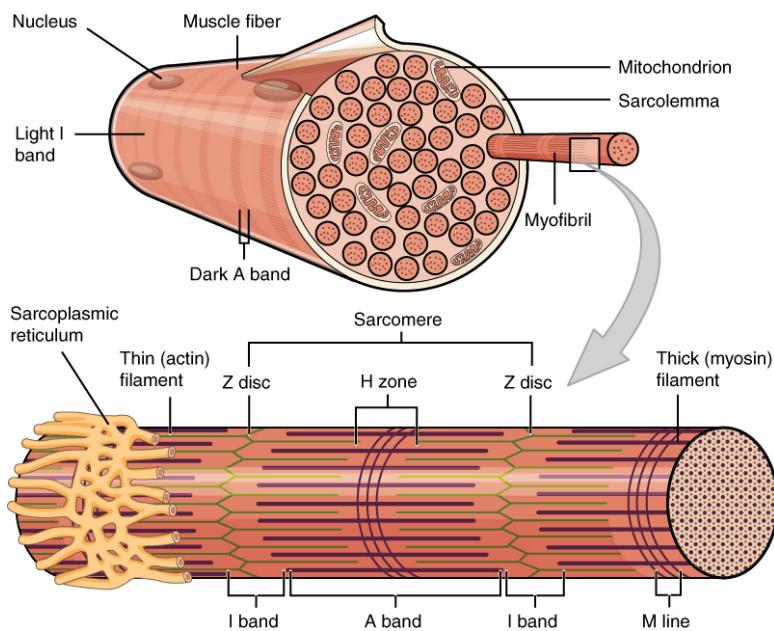
- **скелетални мускули** кои преку **тendonи** се врзани за скелетот на човекот и овозможуваат движење,
- **срцев мускул** кој е одговорен за работата на срцето, и
- **мазни мускули** кои се наоѓаат во внатрешните органи, на пр. гастроинтестиналниот тракт и уринарниот систем.

Структурата и составот на скелеталните мускули влакна е прикажан на Сл. 2.12. Може да се види дека мускулните влакна се клетки со повеќе клеточни јадра. Нивната основна градбена единка се протеинските нишки наречени **миофибрили**. Миофибрилите се обвиткани од **саркоплазмичен ретикулум (SR)** и се составени од наизменична низа на напречни структури изградени од тенки нишки на **актин** и дебелни нишки на **миозин**. Елементарниот дел на оваа повторувачка структура се нарекува **саркомер**. Поради внатрешната структура на миофибрилите, скелеталните, а и срцевите мускулни влакна имаат стриест изглед.

Контракциите на скелетните мускули се **неврогенични**, односно тие се предизвикани од нервни импулси на моторните неврони кои предизвиваат деполаризација на мускулните влакна што предизвикава **контракција на мускулот**.³⁰ При тоа, еден моторен неврон може да е поврзан за повеќе мускулни влакна, активирајќи ги истовремено. Останатите два типа на мускули се **миогенични** што значи дека тие самите се одговорни за предизвикување на сопствената контракција, иако нивната работа може да биде модулирана од автономниот нервен систем. Покрај различниот тип на влезна побуда на која реагираат, контракцијата на сите три типа на мускули се должи на истиот физиолошки механизам. Имено, при активација протеинските нишки на **актин** и **миозин** во мускулните влакна според **теорија на лизгање на нишките** лизгаат едни покрај други генерирајќи сила и придвижување, т.е. контракција. На Сл. 2.13 е

²⁹By OpenStax - <https://cnx.org/contents/FPtKizmh@8.25:fEI3C80t@10/Preface>, CC BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30015051>

³⁰Wikipedia: Muscle Contraction. https://en.wikipedia.org/wiki/Muscle_contraction



Сл. 2.12: Структура и состав на скелеталните мускулни влакна.²⁹

прикажана меѓусебната положба на протеинските нишки при релаксација, односно контракција на мускулните влакна.

Физиолошкиот процес којшто го овозможува лизгањето на нишките, односно контракцијата на мускулите, е прикажан на Сл. 2.14. Деполаризацијата на мускулното влакно, предизвикана од надворешниот акционен потенцијал, ги активира напонски контролирани калциумови пумпи во саркоплазмичниот ретикулум. Ова предизвикува ослободување на клациумови Ca^{2+} јони од SR, кој е одговорен за чување на калциумот во мускулните влакна. Синхронизираното ослободување на калциум од илјадниците SR предизвикува зголемување на калциумот во целата мускулна клетка. Ако концентрацијата на калциум се зголеми во опсег $1 - 40 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$, тој ја започнува контракцијата преку врзување за тропонин С локациите. Оваа врска предизвикува промена во положбата на тропомиозинот со што се ослободуваат локациите на актинот на којшто може да се врзе миозинот.

Во тој момент, миозинот, кој е во високо-енергетската состојба со врзан ADP молекул и неоргански фозофор P_i , резултат на хидролизата на **аденозин трифосфат (ATP)** молекула³³, се врзува за актинот. При врзувањето се ослободуваат ADP и P_i молекулите во два чекори – во првиот се ослободува P_i а потоа се ослободува останатиот ADP. Ова предизвикува виткање на миозинот кој го повлекува актинот, генерирајќи сила, како и движење, кое изнесува околу 7 nm. Со ова миозинот ја добива својата ниско-енергетската состојба.

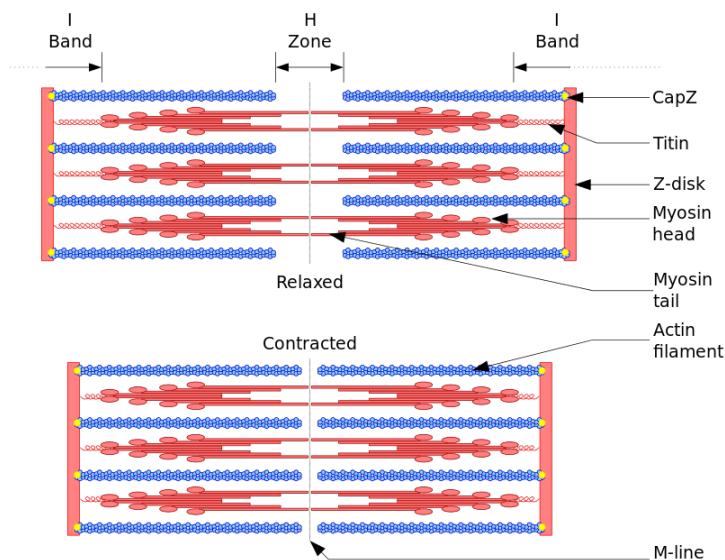
Во следниот чекор нов ATP молекул се врзува за миозинот, што го ослободува од актинот.³⁴ Неговата хидролиза на ADP и P_i го враќа во почетната високо-енергетска состојба. Ако тромиозинот се уште не го покрива актинот, целиот процес се повторува. Во целиот процес калциумот Ca^{2+} активно се впушчува во саркоплазмичниот ретикулум, па при недостиг на надворешен акционен потенцијал за активирање на неговото ослободување, неговата концентрација паѓа со што тромиозинот се враќа во првичната состојба и мускулот преминува во состојба на релаксација.

³¹By Slashme at English WikipediaWhen using this image in external works, it may be cited as follows:Richfield, David. "Medical gallery of David Richfield 2014". Wikiversity Journal of Medicine 1 (2). DOI:10.15347/wjm/2014.009. ISSN 2001-8762. - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2264027>

³²By Muskel-molekular.png: Hank van Helvete derivative work: GravityGilly - Muskel-molekular.png, CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10703870>

³³Adenosine triphosphate https://en.wikipedia.org/wiki/Adenosine_triphosphate

³⁴При недостиг на ATP, мускулите остануваат во грч.



Сл. 2.13: Меѓусебната положба на протеинските нишки при релаксација, односно контракција.³¹

Деполаризацијата на скелеталните мускули е слична со онаа на невроните.³⁵ Таа настапува поради активацијата на натриумовите канали, што предизвикува навлегување на натриумот во внатрешноста на клетката. Овој процес престанува со затворањето на овие канали, а до реполаризација на клетката доаѓа поради истекувањето на калиумовите јони нанадвор. Напонот на мирување е поголем во однос на овој на невроните и изнесува околу -90 mV, а при деполаризација може да достигне и до +75 mV. Акциониот потенцијал трае околу 2 – 4 ms, максималниот период на непобудливост околу 1 – 3 ms, а брзината на пренос на потенцијалот долж мускулот изнесува околу 5 m/s. Елементарна контракција на мускулно влакно предизвикана од единичен нервен импулс е прикажана на **миограмот** на Сл. 2.15. Може да се види дека потребно е да помине одредено време, кое е од редот на 10 ms, за побудата да пропагира во мускулното влакно пред тоа да започне неговата контракцијата.

Доколку пристигне нов нервен импулс пред мускулното влакно да се врати во неговата релаксирана состојба доаѓа до таканаречена **сумација**. Ова е прикажано на Сл. 2.16. Постојат два типа на сумација и тоа: **фреквенциска сумација** и **сумација на повеќе влакна**. Кај првата пристигнуваат поголем број на нервни импулси на истото мускулно влакно, додека кај втората доаѓа до активација на нови мускулни влакна. При максимална активација на мускулот, во фаза на контракција се околу 1/3 од мускулните влакна. На овој начин човековото тело се штити од можни оштетувања до кои може да дојде поради контракција на мускулите. Така, до оштетување на тendonите може да дојде при активирања на 95% од мускулните влакна. Ако сумацијата продолжи и се интезивира, мускулот ќе ја достигне својата врвна сила и ќе влезе во заситување. Оваа појава се нарекува **тетанус**, Сл. 2.16.

2.5 Електрокардиограм

Електрокардиограмот (ЕКГ)³⁸ е запис на електричната активност на **срцето**³⁹, Сл. 2.17, во даден временски период со помош на електроди поставени на телото на човекот. Овие електроди служат за детектирање на малите електрични промени на кожата кои настапуваат

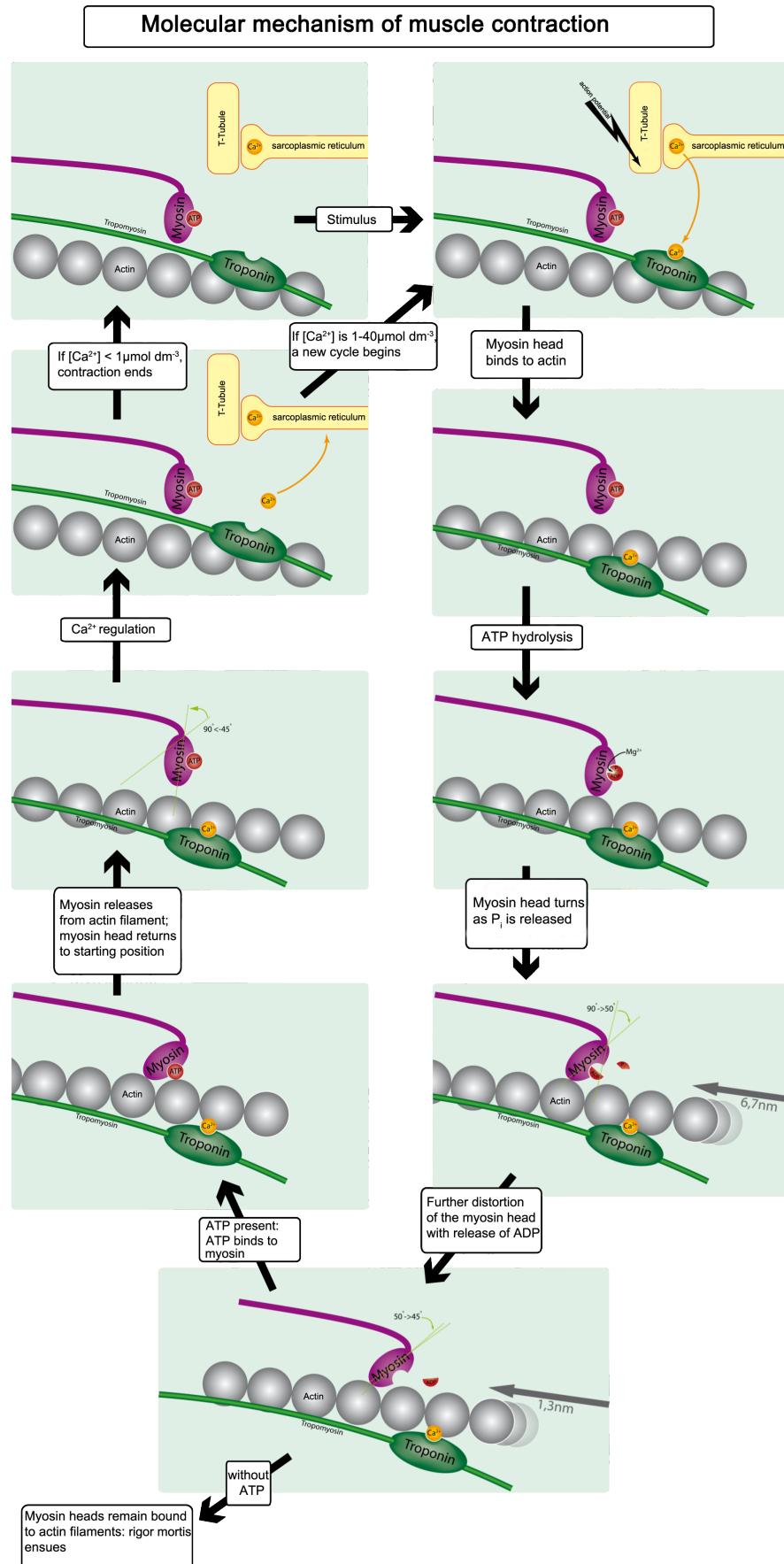
³⁵ Wikipedia: Action potential https://en.wikipedia.org/wiki/Action_potential

³⁶ By OpenStax - <https://cnx.org/contents/FPtK1zmh@8.25:fEI3C80t@10/Preface>, CC BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30015047>

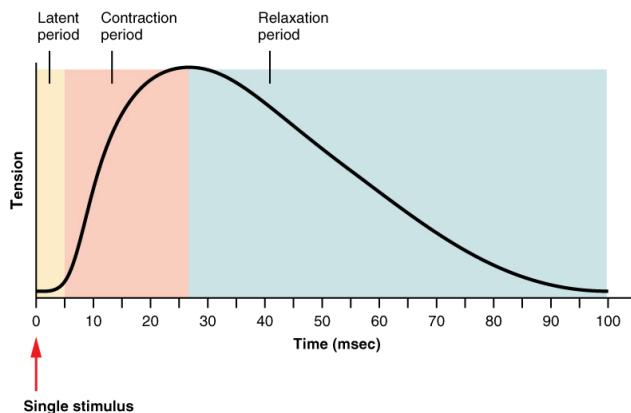
³⁷ By OpenStax - <https://cnx.org/contents/FPtK1zmh@8.25:fEI3C80t@10/Preface>, CC BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30015045>

³⁸ Wikipedia: Electrocardiography <https://en.wikipedia.org/wiki/Electrocardiography>

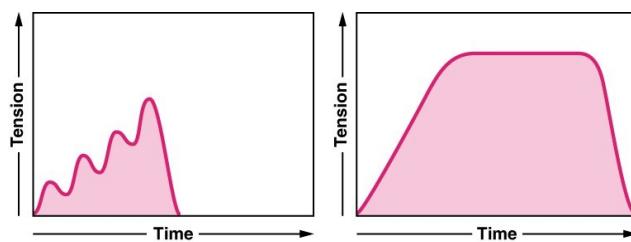
³⁹ Wikipedia: Heart <https://en.wikipedia.org/wiki/Heart>



Сл. 2.14: Чекори во контракцијата на мускулните влакна.³²



Сл. 2.15: Миограм на елементарна контракција на мускулно влакно.³⁶



Сл. 2.16: Миограм на сумација и тетанус при контракција на мускул.³⁷

поради **деполаризацијата на срцевиот мускул** за време на секое отчукување. Вообичаено за снимање на ЕКГ се употребуваат 12 изводи врзани на 10 електроди поставени на екстремитетите и на градите од човекот. Со нивна употреба се врши мерење на електричниот биопотенцијал на срцето од 12 различни агли и негово снимање во период од вообичаено 10 s. На овој начин, се забележува вкупната амплитуда и насоченост на деполаризацијата во секој момент од срцевиот циклус⁴⁰ прикажан на Сл. 2.19.

Во срцевиот циклус постојат 5 фази, во кои мскулите од **преткоморите и коморите** вршат контракција и релаксација, а **атриовентрикуларните (АВ)** и **полумесечевите (ПМ) мембрани** се отвораат и затвораат. Тие се:

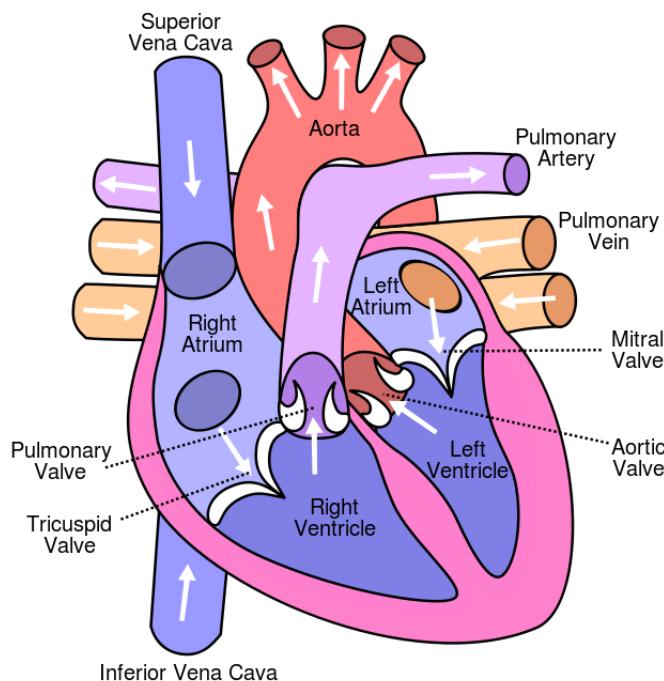
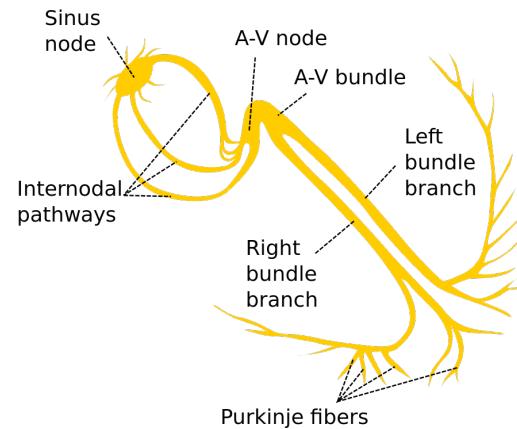
- Контракција на преткомори** – АВ затворени, ПМ отворени, преткоморите ги надополнуваат коморите со околу 30% од волуменот на крвта при мирување од 130 ml.
- Изоволумена контракција на комори** – АВ затворени, ПМ затворени, коморите започнуваат со контракција, нивниот волумен не се менува но притисокот расте.
- Контракција на комори со испумпување** – АВ затворени, ПМ отворени, притисокот во коморите го надминува оној во **аортата** (80 mmHg) и пулмонарната артерија (10 mmHg), исфрањето е ненадејно и истиснува 70 – 90 ml од секоја комора, што остава околу 50 ml за следната контракција.
- Изоволумена релаксација на комори** – АВ затворени, ПМ затворени, притисокот во коморите паѓа од 120 mmHg што ги затвора ПМ мембрани, АВ отвораат штом овој притисок падне под оној во преткоморите.
- Полнење на комори** – АВ отворени, ПМ затворени, коморите пасивно се полнат до 70% од волуменот. Истото важи и за преткоморите.

⁴⁰Wikipedia: Cardiac cycle https://en.wikipedia.org/wiki/Cardiac_cycle

⁴²By Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=830253>

⁴²By Madher088 - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6887499>.

⁴³By DanielChangMD revised original work of DestinyQx - Wikimedia Commons, File:Cardiac Cycle Left Ventricle.PNG. Source file has a serious mistake which was corrected in the new image., CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17610757>

Сл. 2.17: Анатомија на човечкото срце.⁴¹Сл. 2.18: Систем за пренос на деполаризација во срцето.⁴²

За време на секое отчукување срцето минува редоследно низ овие фази од срцевиот циклус, што е овозможено од прогресивната деполаризација на срцевиот мускул. Оваа деполаризација започнува од **пејсмејкер клетките** во **синоатриалниот јазол**, сешири низ преткоморите, поминува низ **атриовентрикуларниот јазол** надолу кон **спонот на Хис**, за на крајот да се прошири преку **нишките на Пуркинче** низ коморите. Овие ткива го сочинуваат **електричниот систем за пренос** на срцето⁴⁴, кој е одговорен за пренесување на електричните импулси на деполаризацијата низ срцевиот мускул прикажан на Сл. 2.18. АВ јазолот го внесува потребното задоцнување во простирањето на деполаризацијата за контракцијата коморите да дојде дури по постигнување на максималната контракција на преткоморите. Нишките не Пуркинче пак се шират од дното на срцето па нагоре за контракцијата на коморите да започне од затворениот крај кон отворите со што се овозможува поефикасно испумпување на крвта.

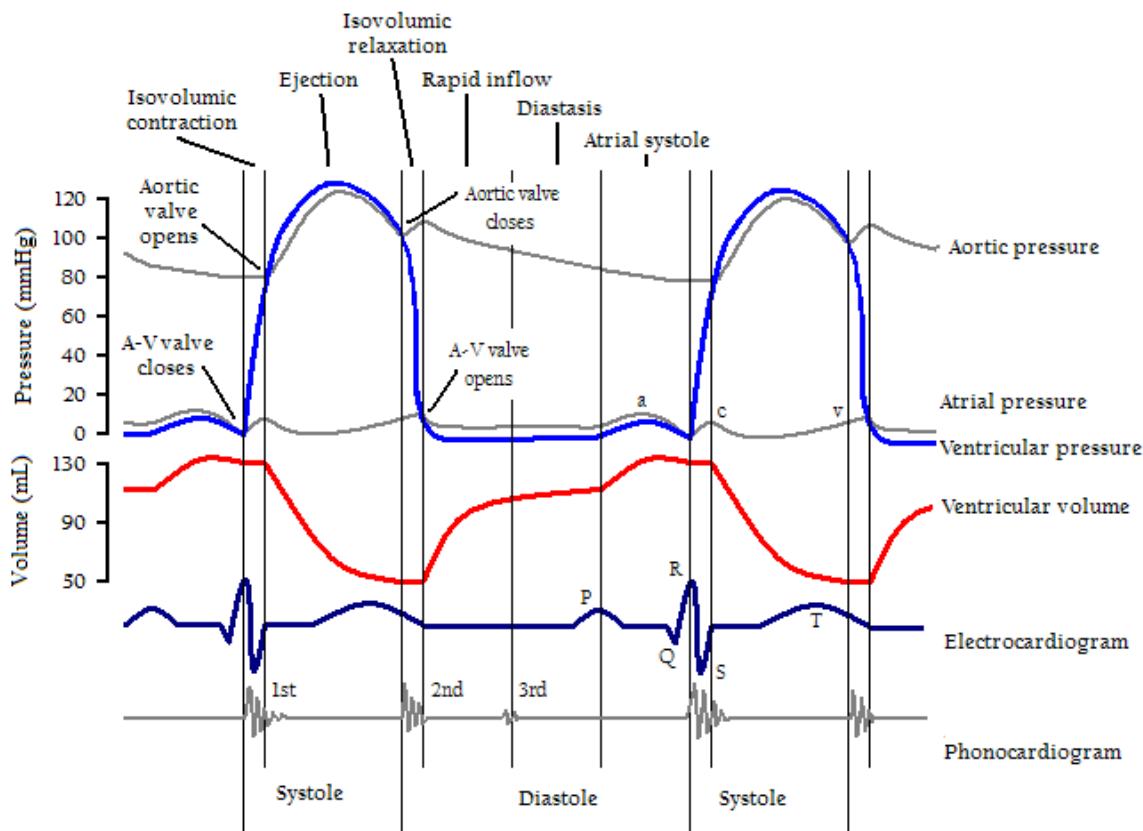
Оваа прогресија на деполаризацијата на срцето го дава карактеристичниот облик на ЕКГ сигналот. За лекарите, обликовот на ЕКГ носи големо количество на информации за структурата на срцето и функционирањето на неговиот електричен систем за пренос. Меѓу другото, ЕКГ може да се искористи за мерење на брзината на чукање на срцето, големината и поставеноста на коморите и преткоморите, присуството на оштетувања во срцевиот мускул или неговиот електричен систем за пренос, ефектот од лекарствата за срце, како и функцијата на вградените пејсмејери. Wiki

Electromyography (EMG) is an electrodiagnostic medicine technique for evaluating and recording the electrical activity produced by skeletal muscles.[1] EMG is performed using an instrument called an electromyograph to produce a record called an electromyogram. An electromyograph detects the electric potential generated by muscle cells[2] when these cells are electrically or neurologically activated. The signals can be analyzed to detect medical abnormalities, activation level, or recruitment order, or to analyze the biomechanics of human or animal movement.

Medical uses

EMG testing has a variety of clinical and biomedical applications. EMG is used as a diagnostics tool

⁴⁴Wikipedia: Electrical conduction system of the heart https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_conduction_system_of_the_heart



Сл. 2.19: Срцев циклус.⁴³

for identifying neuromuscular diseases, or as a research tool for studying kinesiology, and disorders of motor control. EMG signals are sometimes used to guide botulinum toxin or phenol injections into muscles. EMG signals are also used as a control signal for prosthetic devices such as prosthetic hands, arms, and lower limbs.

EMG then an acceleromyograph may be used for neuromuscular monitoring in general anesthesia with neuromuscular-blocking drugs, in order to avoid postoperative residual curarization (PORC).[3][4][5][6]

Except in the case of some purely primary myopathic conditions EMG is usually performed with another electrodiagnostic medicine test that measures the conducting function of nerves. This is called a nerve conduction studies (NCS). Needle EMG and NCSs are typically indicated when there is pain in the limbs, weakness from spinal nerve compression, or concern about some other neurologic injury or disorder.[7] Spinal nerve injury does not cause neck, mid back pain or low back pain, and for this reason, evidence has not shown EMG or NCS to be helpful in diagnosing causes of axial lumbar pain, thoracic pain, or cervical spine pain.[7] Needle EMG may aid with the diagnosis of nerve compression or injury (such as carpal tunnel syndrome), nerve root injury (such as sciatica), and with other problems of the muscles or nerves. Less common medical conditions include amyotrophic lateral sclerosis, myasthenia gravis, and muscular dystrophy.

Skin preparation and Risks

The first step before insertion of the needle electrode is skin preparation. This typically involves simply cleaning the skin with an alcohol pad.

The actual placement of the needle electrode can be difficult and depends on a number of factors, such as specific muscle selection and the size of that muscle. Proper needle EMG placement is very important for accurate representation of the muscle of interest, although EMG is more effective on superficial muscles as it is unable to bypass the action potentials of superficial muscles and detect deeper muscles. Also, the more body fat an individual has, the weaker the EMG signal. When placing the EMG sensor, the ideal location is at the belly of the muscle: the longitudinal midline. The belly

of the muscle can also be thought of as in-between the motor point (middle) of the muscle and the tendon insertion point.[8]

No known contraindications exist from performing needle EMG or NCS on pregnant patients. In addition, no complications from these procedures have been reported in the literature. Evoked potential testing, likewise, has not been reported to cause any problems when it is performed during pregnancy.[9]

There are two kinds of EMG: surface EMG and intramuscular EMG. Surface EMG assesses muscle function by recording muscle activity from the surface above the muscle on the skin. Surface electrodes are able to provide only a limited assessment of the muscle activity. Surface EMG can be recorded by a pair of electrodes or by a more complex array of multiple electrodes. More than one electrode is needed because EMG recordings display the potential difference (voltage difference) between two separate electrodes. Limitations of this approach are the fact that surface electrode recordings are restricted to superficial muscles, are influenced by the depth of the subcutaneous tissue at the site of the recording which can be highly variable depending of the weight of a patient, and cannot reliably discriminate between the discharges of adjacent muscles.

Intramuscular EMG can be performed using a variety of different types of recording electrodes. The simplest approach is a monopolar needle electrode. This can be a fine wire inserted into a muscle with a surface electrode as a reference; or two fine wires inserted into muscle referenced to each other. Most commonly fine wire recordings are for research or kinesiology studies. Diagnostic monopolar EMG electrodes are typically stiff enough to penetrate skin and insulated, with only the tip exposed using a surface electrode for reference. Needles for injecting therapeutic botulinum toxin or phenol are typically monopolar electrodes that use a surface reference, in this case, however, the metal shaft of a hypodermic needle, insulated so that only the tip is exposed, is used both to record signals and to inject. Slightly more complex in design is the concentric needle electrode. These needles have a fine wire, embedded in a layer of insulation that fills the barrel of a hypodermic needle, that has an exposed shaft, and the shaft serves as the reference electrode. The exposed tip of the fine wire serves as the active electrode. As a result of this configuration, signals tend to be smaller when recorded from a concentric electrode than when recorded from a monopolar electrode and they are more resistant to electrical artifacts from tissue and measurements tend to be somewhat more reliable. However, because the shaft is exposed throughout its length, superficial muscle activity can contaminate the recording of deeper muscles. Single fiber EMG needle electrodes are designed to have very tiny recording areas, and allow for the discharges of individual muscle fibers to be discriminated.

Surface EMG is used in a number of settings; for example, in the physiotherapy clinic, muscle activation is monitored using surface EMG and patients have an auditory or visual stimulus to help them know when they are activating the muscle (biofeedback). A review of the literature on surface EMG published in 2008 concluded that surface EMG may be useful to detect the presence of neuromuscular disease (level C rating, class III data), but there are insufficient data to support its utility for distinguishing between neuropathic and myopathic conditions or for the diagnosis of specific neuromuscular diseases. EMGs may be useful for additional study of fatigue associated with post-polio syndrome and electromechanical function in myotonic dystrophy (level C rating, class III data).[9]

Maximal voluntary contraction

One basic function of EMG is to see how well a muscle can be activated. The most common way that can be determined is by performing a maximal voluntary contraction (MVC) of the muscle that is being tested.[13]

Other measurements

EMG can also be used for indicating the amount of fatigue in a muscle. The following changes in the EMG signal can signify muscle fatigue: an increase in the mean absolute value of the signal, increase in the amplitude and duration of the muscle action potential and an overall shift to lower frequencies. Monitoring the changes of different frequency changes the most common way of using

EMG to determine levels of fatigue. The lower conduction velocities enable the slower motor neurons to remain active.[17]

A motor unit is defined as one motor neuron and all of the muscle fibers it innervates. When a motor unit fires, the impulse (called an action potential) is carried down the motor neuron to the muscle. The area where the nerve contacts the muscle is called the neuromuscular junction, or the motor end plate. After the action potential is transmitted across the neuromuscular junction, an action potential is elicited in all of the innervated muscle fibers of that particular motor unit. The sum of all this electrical activity is known as a motor unit action potential (MUAP). This electrophysiologic activity from multiple motor units is the signal typically evaluated during an EMG. The composition of the motor unit, the number of muscle fibres per motor unit, the metabolic type of muscle fibres and many other factors affect the shape of the motor unit potentials in the myogram.

EMG signal decomposition

EMG signals are essentially made up of superimposed motor unit action potentials (MUAPs) from several motor units. For a thorough analysis, the measured EMG signals can be decomposed into their constituent MUAPs. MUAPs from different motor units tend to have different characteristic shapes, while MUAPs recorded by the same electrode from the same motor unit are typically similar. Notably MUAP size and shape depend on where the electrode is located with respect to the fibers and so can appear to be different if the electrode moves position. EMG decomposition is non-trivial, although many methods have been proposed. EMG signal processing

Rectification is the translation of the raw EMG signal to a single polarity frequency (usually positive). The purpose of rectifying a signal is to ensure the raw signal does not average zero, due to the raw EMG signal having positive and negative components. It facilitates the signals and process and calculates the mean, integration and the fast fourier transform (FFT). The two types of rectification of signals refer to what happens to the EMG wave when it is processed. These types include full length frequency and half length. Full length frequency adds the EMG signal below the baseline (usually negative polarity) to the signal above the baseline making a conditioned signal that is all positive. This is the preferred method of rectification because it conserves all signal energy for analysis, usually in the positive polarity. Half length rectification deletes the EMG signal below the baseline. In doing so, the average of the data is no longer zero therefore it can be used in statistical analyses. The only difference between the two types of rectification is that full-wave rectification takes the absolute value of the signal array of data points.[18][19]

Limitations

Needle EMG use in clinical settings has practical applications such as helping to discover disease. Needle EMG has limitations, however, in that it does involve voluntary activation of muscle, and as such is less informative in patients unwilling or unable to cooperate, children and infants, and in individuals with paralysis., Surface EMG can have limited applications due to inherent problems associated with surface EMG. Adipose tissue (fat) can affect EMG recordings. Studies show that as adipose tissue increased the active muscle directly below the surface decreased. As adipose tissue increased, the amplitude of the surface EMG signal directly above the center of the active muscle decreased. EMG signal recordings are typically more accurate with individuals who have lower body fat, and more compliant skin, such as young people when compared to old. Muscle cross talk occurs when the EMG signal from one muscle interferes with that of another limiting reliability of the signal of the muscle being tested. Surface EMG is limited due to lack of deep muscles reliability. Deep muscles require intramuscular wires that are intrusive and painful in order to achieve an EMG signal. Surface EMG can only measure superficial muscles and even then it is hard to narrow down the signal to a single muscle.[20]

Electrical characteristics

The electrical source is the muscle membrane potential of about -90 mV.[21] Measured EMG potentials range between less than 50 µV and up to 20 to 30 mV, depending on the muscle under observation.

Typical repetition rate of muscle motor unit firing is about 7–20 Hz, depending on the size of the muscle (eye muscles versus seat (gluteal) muscles), previous axonal damage and other factors. Damage to motor units can be expected at ranges between 450 and 780 mV.[citation needed]

Normal results Muscle tissue at rest is normally electrically inactive. After the electrical activity caused by the irritation of needle insertion subsides, the electromyograph should detect no abnormal spontaneous activity (i.e., a muscle at rest should be electrically silent, with the exception of the area of the neuromuscular junction, which is, under normal circumstances, very spontaneously active). When the muscle is voluntarily contracted, action potentials begin to appear. As the strength of the muscle contraction is increased, more and more muscle fibers produce action potentials. When the muscle is fully contracted, there should appear a disorderly group of action potentials of varying rates and amplitudes (a complete recruitment and interference pattern).

Research

EMG can be used to sense isometric muscular activity where no movement is produced. This enables definition of a class of subtle motionless gestures to control interfaces without being noticed and without disrupting the surrounding environment. These signals can be used to control a prosthesis or as a control signal for an electronic device such as a mobile phone or PDA[citation needed].

EMG signals have been targeted as control for flight systems. The Human Senses Group at the NASA Ames Research Center at Moffett Field, CA seeks to advance man-machine interfaces by directly connecting a person to a computer. In this project, an EMG signal is used to substitute for mechanical joysticks and keyboards. EMG has also been used in research towards a "wearable cockpit," which employs EMG-based gestures to manipulate switches and control sticks necessary for flight in conjunction with a goggle-based display.

Unvoiced speech recognition recognizes speech by observing the EMG activity of muscles associated with speech. It is targeted for use in noisy environments, and may be helpful for people without vocal cords and people with aphasia.

EMG has also been used as a control signal for computers and other devices. An interface device based on EMG could be used to control moving objects, such as mobile robots or an electric wheelchair.[23] This may be helpful for individuals that cannot operate a joystick-controlled wheelchair. Surface EMG recordings may also be a suitable control signal for some interactive video games.[24]

In 1999 an EMG program called Echidna was used to enable a man with locked in syndrome to send a message to a computer. That program, now called NeuroSwitch, developed by Control Bionics enables people with severe disabilities to communicate by text, email, SMS, computer-generated voice and to control computer games and programs, and - through the internet - Anybots telepresence robots.

Polska kniga

Поглавје 3

Електронски кола за мерење на биопотенцијалите

Поглавје 4

Обработка на биомедицинските сигнали

Со преминот на биомедицинските сигнали во **дигитален домен**, се отвораат вратите кон примена на различните техники на дигиталната обработка на сигналите за нивната обработка. За оваа цел ќе го употребиме програмскиот јазик **Python**.

4.1 Слободен и отворен софтвер во научните истражувања

Еден од најкористените за оваа намена е програмскиот пакет **Матлаб**¹. Матлаб, или „Matrix Laboratory”, нуди големи можности за дигитална обработка на разнородни податоци и сигнали. Тој може да се употреби за развој на алгоритми во најразлични области од инженерската практика, меѓу кои во дигиталната обработка на биомедицинските сигнали.

Денес сè повеќе научници своето истражување го засноваат на платформи базирани на **отворен софтвер**². Ова пред сè се должи на филозофијата на отворениот, а особено **слободниот софтвер**³ основан од **Ричард Сталман**, како и поширокото **движење за отвореност**⁴, а тоа е заедништво во создавањето и напредувањето на технологијата и човештвото. Од практичен аспект, отворениот софтвер има низа предности над затворениот софтвер и тоа:

- **ниската цена** – поради основната премиса на давање на изворниот код, со цел да се овозможи неговиот развој од заедницата, отворениот софтвер е *de facto* и бесплатен софтвер. Така, повеќето производители на слободниот софтвер живеат од донацији.
- **безбедноста** – поради достапноста на изворниот код, не постои начин производителот на софтерверот да прави нешто скриено од вас, а секој спорен дел од кодот е подложен на промена од заедницата. Кај затворениот софтвер тоа не е случај, на пр. во Windows 10 производителот го задржува правото да ги чува вашите приватни податоци⁵, а истите механизми се додадени во претходните верзии на Windows преку автоматските апдејти⁶,

¹MATLAB®, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States. <http://www.mathworks.com/products/matlab/>

²Wikipedia. *Open-source software*. https://en.wikipedia.org/wiki/Open-source_software

³Wikipedia. *Free software movement*. https://en.wikipedia.org/wiki/Free_software_movement

⁴Wikipedia. *Open-source*. https://en.wikipedia.org/wiki/Open_source

⁵Ова е оригиналниот изводок од изјавата за приватност: “Finally, we will access, disclose and preserve personal data, including your content (such as the content of your emails, other private communications or files in private folders), when we have a good faith belief that doing so is necessary ...”

Zach Epstein, Windows 10 is spying on almost everything you do – here’s how to opt out, Jul 31, 2015, <http://bgr.com/2015/07/31/windows-10-upgrade-spying-how-to-opt-out/>

⁶Ashley Allen, How to Stop Windows 7 and 8 From Spying on You <http://www.etechnix.com/stop-windows-7-8-spying/>

- **слободата од производителот** – како корисници на отворениот софтвер, вие не сте затворени во екосистемот на производителот. Истиот тој софтвер може да биде превземен од друга заедница на програмери и да продолжи неговото одржување и развој во друга насока.
- **подobar квалитет** – при воспоставување на критична големина на заедницата околу еден отворен софтвер, развојот не може да се спореди со ресурсите кои ги поседува било која корпорација во светот. Така, развојот на **Линукс јадрото**⁷, кое во основата оперативниот систем **Линукс**⁸ и 600-те **ГНУ/Линукс дистрибуции**⁹, првично напишано од **Линус Торвалдс**, денес претставува најголемиот здружен проект во историјата на човештвото со околу 6000 активни развивачи, над 20 милиони редови на код, и со проценета развојна вредност од над 2 милијарди евра.

4.2 Употреба на Python за истражување

Во духот на слободниот софтвер, а следејќи ги светските научни трендови, во предметот **Биомедицинска електроника** се работи со слободен/отворен софтвер. За процесирањето на дигиталните биомедицински сигнали ќе биде искористен програмскиот јазик **Python**¹⁰ и тоа неговата постара верзија **2.7**¹¹, заедно со библиотеките:

- **NumPy** – за работа со вектори и матрици,¹²
- **SciPy** – за дигитално процесирање на сигнали,¹³
- **Matplotlib** – за плотирање на 2Д графици.¹⁴

Освен овие постојат мноштво библиотеки за Python кои се користат во научните истражувања како на пример **Pandas**¹⁵ за статистички анализи, **Sympy**¹⁶ за симболичка математика, **SciKit-Learn**¹⁷ за машинско учење итн.

Како интерфејс кон Python ќе ја искористиме интерактивната конзола **IPython**¹⁸ и научната развојна средина за Python **Spyder**¹⁹.

4.3 Основи на Python

За работа со **Python** може да ја искористиме стандардната конзола која доаѓа со неговата инсталацијата. Таа се повикува со:

```
$ python
```

```
Python 2.7.10 (default, Oct 14 2015, 16:09:02)
[GCC 5.2.1 20151010] on linux2
Type "help", "copyright", "credits" or "license" for more information.
>>>
```

⁷Wikipedia. *Linux kernel*. https://en.wikipedia.org/wiki/Linux_kernel

⁸Wikipedia. *Linux*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Linux>

⁹Wikipedia. *List of Linux distributions*. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Linux_distributions

¹⁰Python <https://www.python.org/>

¹¹Ова се должи на некомплетно завршеното портирање на пакети развиени од научната заедница за работа со Python.

¹²NumPy <http://www.numpy.org/>

¹³SciPy <http://www.scipy.org/>

¹⁴Matplotlib <http://matplotlib.org/>

¹⁵Pandas <http://pandas.pydata.org/>

¹⁶Sympy <http://www.sympy.org/en/index.html>

¹⁷SciKit-Learn <http://scikit-learn.org/stable/>

¹⁸IPython Interactive Computing <http://ipython.org/>

¹⁹Spyder – The Scientific PYthon Development EnviRonment <https://github.com/spyder-ide/spyder>

За подобра работа со Python ќе ја инсталлираме интерактивната конзола **IPython** која меѓу другото овозможува и автоматско комплетирање на кодот:

```
$ sudo apt-get install ipython
```

По инсталацијата може да ја повикаме со:

```
$ ipython
```

```
Python 2.7.10 (default, Oct 14 2015, 16:09:02)
Type "copyright", "credits" or "license" for more information.
```

```
IPython 2.3.0 -- An enhanced Interactive Python.
?           -> Introduction and overview of IPython's features.
%quickref -> Quick reference.
help        -> Python's own help system.
object?     -> Details about 'object', use 'object??' for extra details.
```

```
In [1]: print 'hello world'
```

```
hello world
```

```
...
```

За излегување од конзолата треба да притиснеме **Ctrl+D**.

4.4 Основи на NumPy и MatPlotLib

Пред да се запознаеме со основите на работата со треба да ги инсталлираме потребните модули:

```
$ sudo apt-get install python-numpy python-matplotlib python-scipy
```

Сега може да ги повикаме во IPython:

```
In [1]: import numpy as np
In [2]: from matplotlib import pyplot as plt
```

```
...
```

4.5 Воведни материјали за Python, NumPy, MatPlotLib, SciPy

Добар вовед во програмскиот јазик **Python**, од аспект на неговата примена за истражување, може да се најде во книгата **Scipy Lecture Notes** (Varoquaux et al., 2015) која е во целост достапна на интернет. Оваа книга претставува отворен проект и во неа, благодарејќи на многуте автори и придонесувачи, се поместени основите за работа со Python, NumPy, SciPy, MatPlotLib, SciKit-learn, SymPy, па дури и Cython.

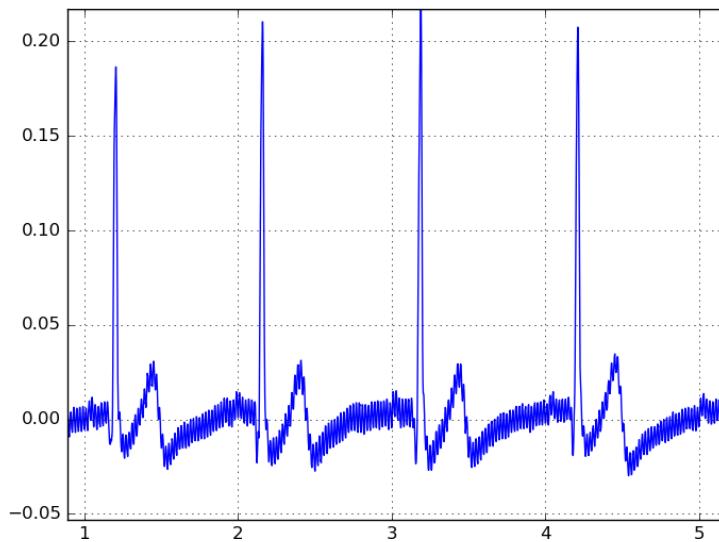
Добар вовед во програмскиот јазик Python е и официјалниот туторијал кој може да се најде на неговата вебстраница²⁰. Уште една добра книга за основите на Python е книгата **Invent Your Own Computer Games with Python** (Sweigart, 2010) која исто така може во целост да се превземе од интернет.

4.6 Процесирање на ЕКГ сигнали

Во овој дел ќе направиме низа основни процесирања на еден ЕКГ сигнал. Како основа ќе го искористиме програмскиот пакет **BioSPPy**.²¹

²⁰The Python Tutorial. <https://docs.python.org/2.7/tutorial/index.html>

²¹BioSPPy – Biosignal Processing in Python. <https://github.com/PIA-Group/BioSPPy>



Сл. 4.1: Изглед на измерениот ЕКГ сигнал.

4.6.1 Вчитување на ЕКГ сигналот

За нашата анализа ќе го искористиме пример сигналот вклучен во BioSPPy `ecg.txt`. Во овој текстуален фајл е записан ЕКГ сигнал со времетраење од 15 s семплиран со фреквенција f_s од 1000 Hz со резолуција од 12 битови по одбирок. Истата ќе ја вчитаме со следниот код.

```

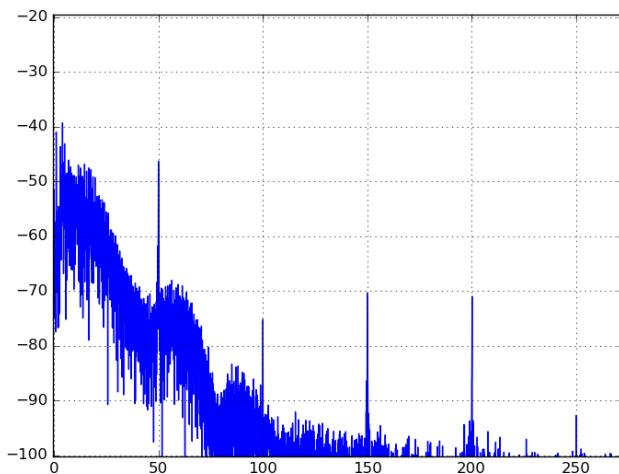
1  from __future__ import division
2  import numpy as np
3  import matplotlib.pyplot as plt
4  import scipy.fftpack as ff
5
6  ecg = np.array([])
7  count = 0
8
9  with open('ecg.txt') as fh:
10     for line in fh:
11         if count > 3:
12             val = float(line[:-3])
13             ecg = np.append(ecg, val)
14             count += 1
15
16  ecg = (ecg - 2**11) / 2**11
17  Fs = 1000
18  t = np.arange(0, ecg.size/Fs, 1/Fs)
19  plt.plot(t, ecg)
20  plt.grid()

```

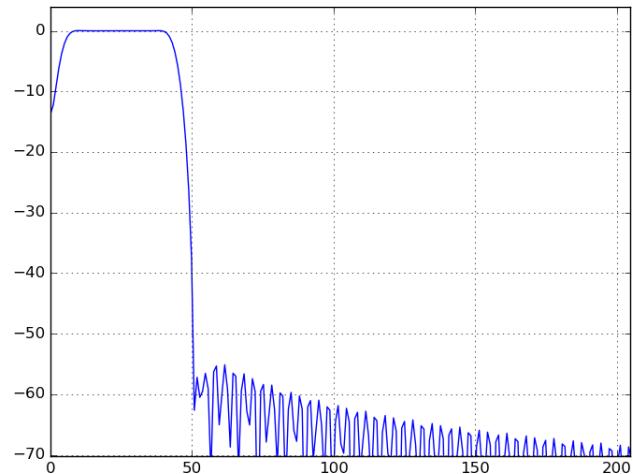
На почетокт од кодот се увезува делењето со автоматско каствување во `float` од Python 3.5 (1), како и потребните модули (2–4). Потоа се иницијализира `ecg` NumPy векторот (6) во кој во `for` јамката (10) се вчитуваат сите примероци од ЕКГ сигналот конвертирани во `float` (12–13). Потоа сигналот се сведува во опсег од -1 до 1 (16) и се врши негово исцртување со помош на функцијата `plot` од `matplotlib` (17–20). Добиениот график е прикажан на Сл. 4.1

4.6.2 Спектар на ЕКГ сигналот

Од графикот може да се видат отчукувањата на срцето преку QRS комплексот на ЕКГ сигналот. Исто така, можат да се забележат два вообичаени проблеми со ЕКГ сигналите – дрифт на DC



Сл. 4.2: Амплитуден спектар на измерениот ЕКГ сигнал.



Сл. 4.3: Преносна функција на дизајнираниот FIR филтер пропусник на опсег.

нивото и шум од напонот од градска мрежа на 50 Hz. Овие два проблеми можат наједноставно да се елиминираат преку употреба на филтер пропусник на опсег. За да видиме во кој опсег се движи ЕКГ сигналот најпрвин ќе направиме анализа на неговиот амплитуден спектар.

```

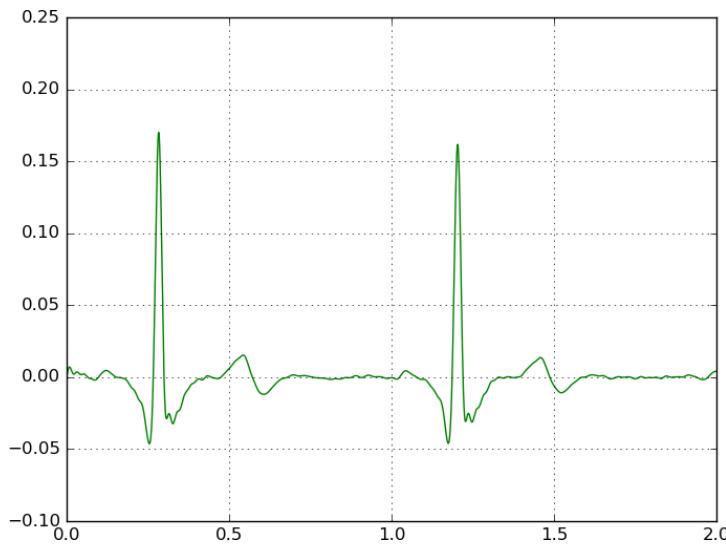
21 N = ecg.size
22 Nfft = 2**np.ceil(np.log(N)/np.log(2))
23
24 ecg_spec = ff.fft(ecg, Nfft)
25 ecg_spec = np.abs(ecg_spec)
26 ecg_spec = ecg_spec / N
27 ecg_spec = ecg_spec[0:Nfft/2+1]
28 ecg_spec[2:-1] = ecg_spec[2:-1] * 2
29 ecg_spec = 20*np.log10(ecg_spec)
30
31 f = np.linspace(0,Fs/2,Nfft/2+1)
32 plt.figure()
33 plt.plot(f, ecg_spec)
34 plt.grid()
```

Во овој код, најпрвин се пресметува следниот поголем број $2^n N_{FFT}$ од должината на сигналот за оптимално пресметување на FFT (22). Потоа се користи `fft` функцијата од модулот `scipy.fftpack` за пресметка на FFT (24), од која се пресметува амплитудниот спектар (25), кој се скалира со должината на сигналот (26). Поради тоа што половина од коефициентите се пресликуваат, дел од нив може да се отфрлат (28), а нивните слики треба да се удвојат (29). На крајот се пресметува логаритам од амплитудниот спектар (29) и фреквенциите на кој се поставени секој од коефициентите (31). Добиениот амплитуден спектар е прикажан на Сл. 4.2.

4.6.3 Филтрирање на ЕКГ сигналот

Може да се види дека ЕКГ сигналот нема значајни компоненти над 45 Hz па можеме да дизајнираме FIR²² филтер пропусник на опсег со гранични фреквенции 3 и 45 Hz. За тоа ќе ја искористиме методата за дизајн со прозорци (Богданова, 1997) кој е имплементиран во модулот `scipy.signal` со функцијата `firwin()`. Карактеристиките на филтерот може да ги визуелизирате користејќи ја функцијата `freqz()` со која го добиваме графикот на Сл. 4.3.

²²Wikipedia: Finite impulse response. https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_impulse_response



Сл. 4.4: Исфилтрирана верзија од ЕКГ сигналот.

```

35 order = int(0.3 * Fs) # neparen za tip 1
36 if order % 2 == 0: # ako e paren
37     order = order + 1
38
39 from math import pi
40 import scipy.signal as sg
41 f_l = 3
42 f_h = 45
43 b = sg.firwin(order,[f_l, f_h],pass_zero=False,nyq=Fs/2)
44 w, h = sg.freqz(b)
45 f = w / pi *Fs/2
46
47 plt.figure()
48 plt.plot(f, 20*np.log10(np.abs(h)))
49 plt.grid()

```

```

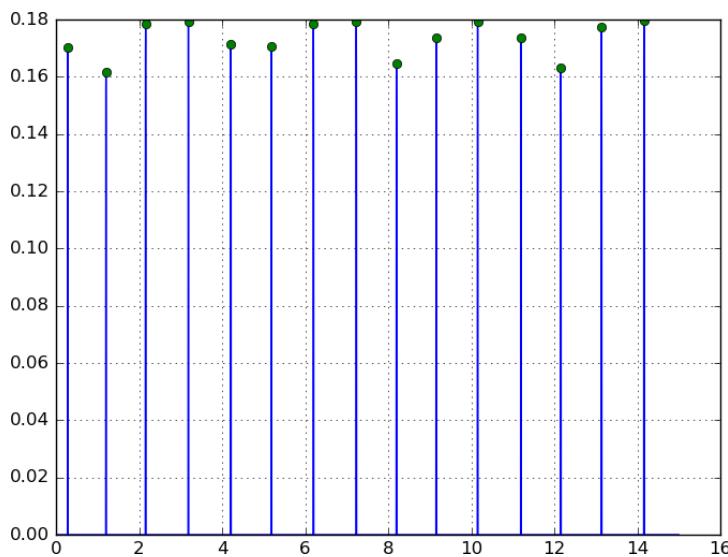
50 ecg_filt = sgfiltfilt(b, 1, ecg)
51 plt.figure()
52 plt.plot(t,ecg_filt,'g')
53 plt.grid()

```

Филтрирањето ќе го извршиме со функцијата `filtfilt()` која го филтрира сигналот во двете насоки со што се постигнува филтриран сигнал кој нема фазно доцнење во однос на оригиналниот сигнал. Исфилтрираниот сигнал може да се види на Сл. 4.5. Може да се види дека елиминиран е проблемот со непостојаноста на DC нивото, како и шумот од градската мрежа. Сепак, може да се види и дека QRS комплексот има помала остринा.

4.6.4 Наоѓање на R врвовите во ЕКГ сигналот

Основната информација за брзината на отчукување на срцето може да се добие со детекција на R врвовите во ЕКГ сигналот. Наједноставен начин за тоа да се направи е да се најдат сите максимуми на филтрираниот ЕКГ сигнал кои имаат амплитуди над избран праг. Тоа е реализирано во следниот код, кој ги наоѓа врвовите како што е прикажано на Сл. ??



Сл. 4.5: Најдени врвови во ЕКГ сигналот.

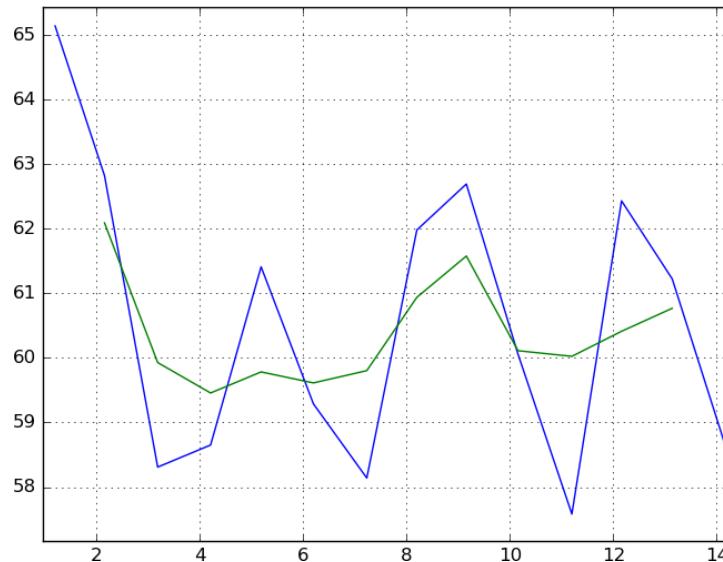
```

54 ecg_max = np.max(ecg)
55 threshold = ecg_max * 0.6 # 60% od max
56 ecg_th = np.zeros(ecg.size)
57 ecg_th[ecg_filt > threshold] = ecg_filt[ecg_filt > threshold]
58 R = np.array([], dtype='int')
59 for i in range(1,ecg.size):
60     if ecg_th[i] > ecg_th[i-1] and \
61         ecg_th[i] > ecg_th[i+1]:
62         R = np.append(R,i)
63
64 plt.figure()
65 plt.plot(t,ecg_th)
66 plt.plot(t[R],ecg_th[R], 'o')
67 plt.grid()

```

4.6.5 Пресметка на бројот на отчукувања во минута

Откако ги имаме детектирано R врвовите во ЕКГ сигналот, од нив може да се пресмета моментната брзина на отчукување на срцето која вообичаено се изразува во bpm (beats per minute). За пресметување на измазната верзија од оваа брзина можеме да искористиме лизгачи прозорец за усреднување. Пресметаните моментни и усреднети вредности за bpm се прикажани на Сл. 4.6.



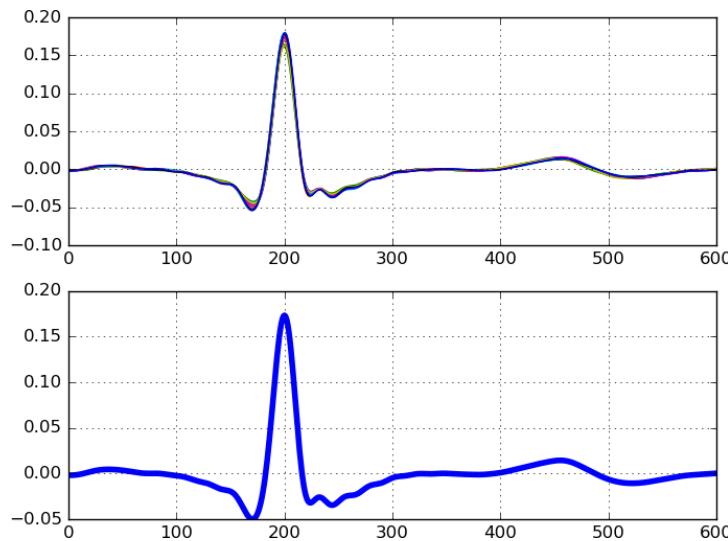
Сл. 4.6: Број на отчукувања на срцето во минута пресметани од ЕКГ сигналот.

```

68 R_diff = np.diff(R)
69 R_diff = R_diff/Fs # no s
70 bpm = 60 / R_diff
71
72 # smoothing - running average
73 smooth_ord = 3
74 win = np.ones(smooth_ord)
75 win = win / np.sum(win)
76 bpm_smooth = signal.convolve(bpm, win, mode='same' )
77 bpm_smooth = bpm_smooth[1:-1]
78
79 plt.figure()
80 plt.plot(t[R[1:]],bpm)
81 plt.plot(t[R[2:-1]],bpm_smooth)
82 plt.grid()
```

4.6.6 Усредната репрезентација на ЕКГ сигналот

Со помош на детектираните R врвови можеме од целиот ЕКГ сигнал да направиме усредната репрезентација на сите отчукувања на срцето. Потоа, оваа репрезентација може да се искористи за детекција на отчукувањата кои отстапуваат од неа. Оваа репрезентација е прикажана на Сл. 4.7.



Сл. 4.7: Усредната репрезентација на отчукувањата на срцето во ЕКГ сигналот.

```

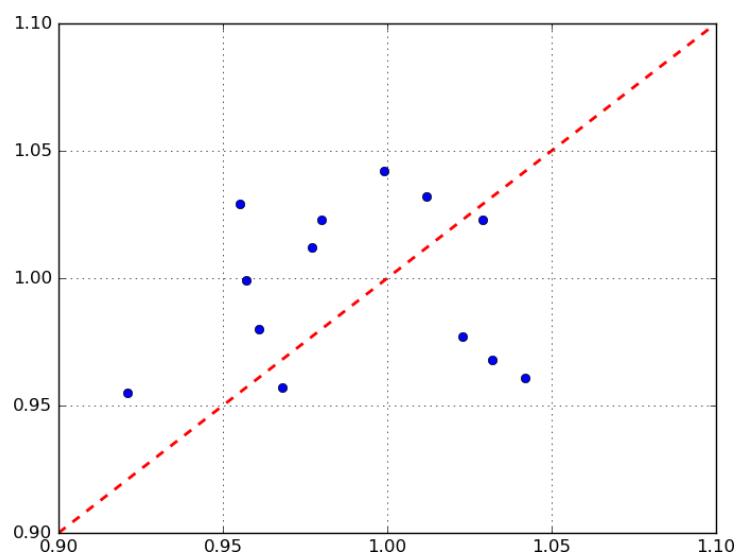
83 R_left = 0.200 * Fs
84 R_right = 0.400 * Fs
85 templates = np.zeros(R_left+R_right)
86 for r in R:
87     ecg_temp = ecg_filt[r-R_left : r+R_right]
88     templates = np.vstack((templates, ecg_temp))
89
90 ecg_template = np.mean(templates[1:],0)
91 plt.figure()
92 plt.subplot(211)
93 plt.plot(templates[1:].T)
94 plt.grid()
95 plt.subplot(212)
96 plt.plot(ecg_template,linewidth=4)
97 plt.grid()
```

4.6.7 Пресметување на RR дијаграмот од ЕКГ сигналот

Еден начин да се прикаже работата на срцето е преку RR дијаграмот. Во него времетраењето од последното отчукување се прикажува во однос на времетраењето на претпоследното отчукување, Сл. 4.8.

```

98 RRs = np.zeros(2)
99 for i in range(1,len(R_diff)):
100     RR = np.array([R_diff[i-1], R_diff[i]])
101     RRs = np.vstack((RRs, RR))
102
103 RRs = RRs[1:,:]
104
105 plt.figure()
106 plt.plot(RRs[:,0], RRs[:,1], 'o')
107 plt.plot([0.9, 1.1], [0.9,1.1], 'r--', linewidth=2)
108 plt.grid()
```



Сл. 4.8: RR дијаграм на отчукувањата на срцето во ЕКГ сигналот.

Литература

- S. Serge Barold. Willem einthoven and the birth of clinical electrocardiography a hundred years ago. *Cardiac Electrophysiology Review*, 7(1):99–104, 2003.
- J.D. Enderle, J.D. Bronzino, and S.M. Blanchard. *Introduction to Biomedical Engineering*. Academic Press series in biomedical engineering. Elsevier Academic Press, 2005. ISBN 9780122386626. URL https://books.google.mk/books?id=_yV3DqIU-tkC.
- Ana B Porto-Pazos, Noha Veiguela, Pablo Mesejo, Marta Navarrete, Alberto Alvarellos, Oscar Ibáñez, Alejandro Pazos, and Alfonso Araque. Artificial astrocytes improve neural network performance. *PloS one*, 6(4):e19109, 2011.
- Albert Sweigart. *Invent Your Own Computer Games with Python: A Beginner's Guide to Computer Programming in Python*. Al Sweigart, 2010. ISBN 9780982106013. URL <http://inventwithpython.com/>.
- Gael Varoquaux, Valentin Haenel, Emmanuelle Gouillart, Zbigniew Jędrzejewski-Szmek, Ralf Gommers, Fabian Pedregosa, Olav Vahtras, Pierre de Buyl, Gert-Ludwig Ingold, Nicolas P. Rougier, and et al. *scipy-lecture-notes*: Release 2015.1 beta, 2015. URL <http://www.scipy-lectures.org/>.
- Момчило Богданов и Софија Богданова. *Дигитално процесирање на сигнали*. Електротехнички факултет, Скопје, 1997. ISBN 9989-630-15-1.
- Доне Гершановски. *Предавања по биофизика за општа медицина*.