



# Биомедицинска електроника

Бранислав Геразов

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

**Биомедицинска електроника ~ Предавања и вежби v0.58**

©Бранислав Геразов, 26 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

<b>1 Вовед</b>	<b>4</b>
1.1 Историја на биомедицинското инженерство . . . . .	4
<b>2 Основи на човековата анатомија и физиологија</b>	<b>8</b>
2.1 Структура на клетка . . . . .	8
2.2 Деполаризација на клетка . . . . .	11
2.3 Нервни импусли . . . . .	13
2.4 Градба и работа на мускулите . . . . .	17
<b>3 Електронски кола за мерење на биопотенцијалите</b>	<b>23</b>
<b>4 Обработка на биомедицинските сигнали</b>	<b>24</b>
4.1 Слободен и отворен софтвер во научните истражувања . . . . .	24
4.2 Употреба на Пајтон за истражување . . . . .	26
4.3 Основи на Python . . . . .	27
4.4 Основи на Нумпај и Матплотлиб . . . . .	27
4.5 Воведни материјали за Пајтон, Нумпај, Матплотлиб, Сајпај . . . . .	28
4.6 Процесирање на ЕКГ сигнали . . . . .	28

# 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 Капуа<sup>1</sup> 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**<sup>2</sup> 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**<sup>3</sup> првпат ги употребил инженерските принципи на физиолошки проблем идентификувајќи ја електричната отпорност на мускулите и нервните ткива. Во **1895** германскиот физичар **Вилхелм Рентген**<sup>4</sup> случајно открил дека катодна цевка можела да направи хартија покриена со слој од бариум платиноцијанд да

<sup>1</sup>Wikipedia: Capua Leg [https://en.wikipedia.org/wiki/Capua\\_Leg](https://en.wikipedia.org/wiki/Capua_Leg)

<sup>2</sup>Wikipedia: René Laennec [https://en.wikipedia.org/wiki/René%C3%A9\\_Laennec](https://en.wikipedia.org/wiki/René%C3%A9_Laennec)

<sup>3</sup>Wikipedia: Hermann von Helmholtz [https://en.wikipedia.org/wiki/Hermann\\_von\\_Helmholtz](https://en.wikipedia.org/wiki/Hermann_von_Helmholtz)

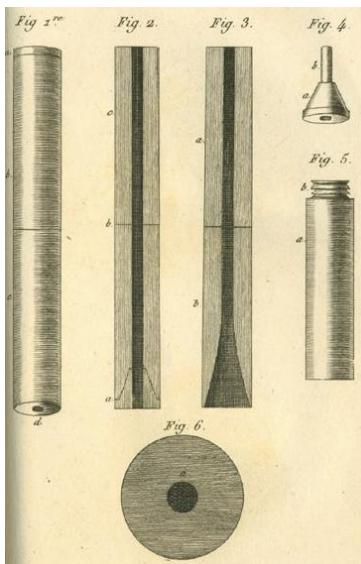
<sup>4</sup>Wikipedia: Wilhelm Röntgen [https://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm\\_R%C3%BCntgen](https://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_R%C3%BCntgen)



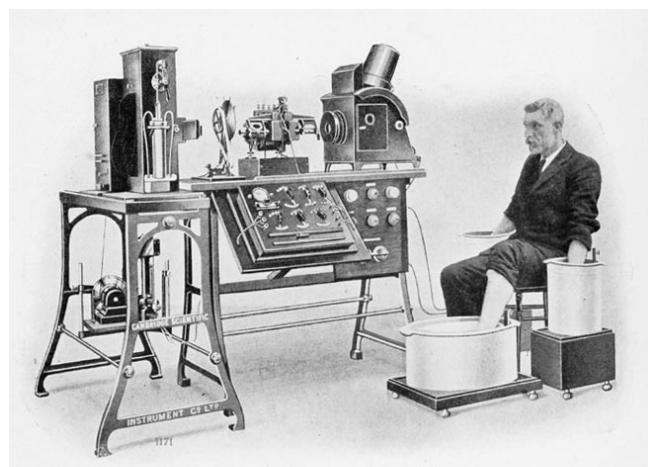
**Сл. 1.1:** Првата протеза – вештачки палец најден на мумија од стариот Египет.<sup>5</sup>



**Сл. 1.2:** Копија од ногата од Капуа од 300 г. п.н.е. пронајдена во Италија.<sup>6</sup>



**Сл. 1.3:** Првиот нацрт на стетоскоп од 1819 г.<sup>7</sup>



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*.<sup>8</sup>

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.

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

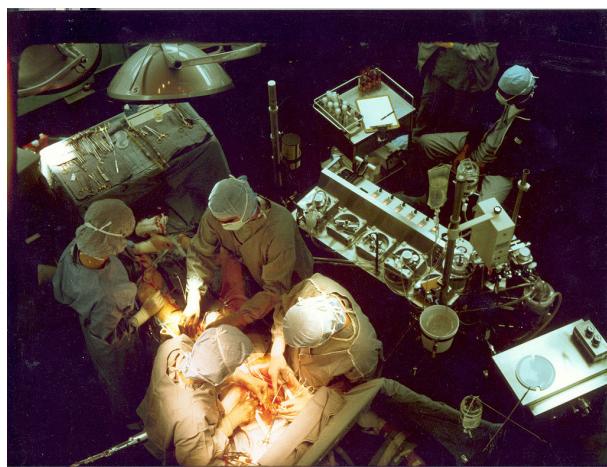
<sup>6</sup>By [http://wellcomeimages.org/indexplus/ofb\\_images/9a/e9/fd5080571b64c69ab0dc7e574b82.jpg](http://wellcomeimages.org/indexplus/ofb_images/9a/e9/fd5080571b64c69ab0dc7e574b82.jpg) Gallery: <http://wellcomeimages.org/indexplus/image/M0012307.html>, CC BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=36352216>

<sup>7</sup>By 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>

<sup>8</sup>By [http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Willem\\_Einthoven\\_ECG.jpg](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.<sup>11</sup>



**Сл. 1.6:** Употреба на машина за кардиопулмонарен бајпас во коронарна хирургија.<sup>12</sup>

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**<sup>9</sup> 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**<sup>10</sup> 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  $\alpha$ -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**<sup>13</sup> 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

<sup>9</sup>Wikipedia: Willem Einthoven [https://en.wikipedia.org/wiki/Willem\\_Einthoven](https://en.wikipedia.org/wiki/Willem_Einthoven)

<sup>10</sup>Wikipedia: Hans Berger [https://en.wikipedia.org/wiki/Hans\\_Berger](https://en.wikipedia.org/wiki/Hans_Berger)

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

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

<sup>13</sup>Wikipedia: Electron microscope [https://en.wikipedia.org/wiki/Electron\\_microscope](https://en.wikipedia.org/wiki/Electron_microscope)



Сл. 1.7: Уред за магнетна резонанса.<sup>19</sup>



Сл. 1.8: Вештачко срце SynCardia.<sup>20</sup>

**нуклеарната медицина.** Во 1953 била направена машината за **кардиопулмонарен бајпас**<sup>14</sup> 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)**<sup>15</sup> во која компјутерски се обработуваат повеќе Рентген слики за добивање на напречни пресеци на скенираниот дел од телото, како и **магнетна резонанса (MRI)**<sup>16</sup> 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)**<sup>17</sup> 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**<sup>18</sup> 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.

<sup>14</sup> Wikipedia: Cardiopulmonary bypass [https://en.wikipedia.org/wiki/Cardiopulmonary\\_bypass](https://en.wikipedia.org/wiki/Cardiopulmonary_bypass)

<sup>15</sup> Wikipedia: Computer Tomography - CT scan [https://en.wikipedia.org/wiki/CT\\_scan](https://en.wikipedia.org/wiki/CT_scan)

<sup>16</sup> Wikipedia: Magnetic resonance imaging [https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic\\_resonance\\_imaging](https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_resonance_imaging)

<sup>17</sup> Wikipedia: Positron emission tomography [https://en.wikipedia.org/wiki/Positron\\_emission\\_tomography](https://en.wikipedia.org/wiki/Positron_emission_tomography)

<sup>18</sup> Wikipedia: Artificial heart [https://en.wikipedia.org/wiki/Artificial\\_heart](https://en.wikipedia.org/wiki/Artificial_heart)

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

<sup>20</sup> By 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.<sup>1</sup> Таа е најмал жив биолошки систем.<sup>2</sup> Клетките се способни за саморепродукција, бидејќи го содржат целокупниот наследен материјал. Типичната градба на една клетка е дадена на Сл. 2.1.<sup>3</sup> 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  $\mu\text{m}$ , 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.

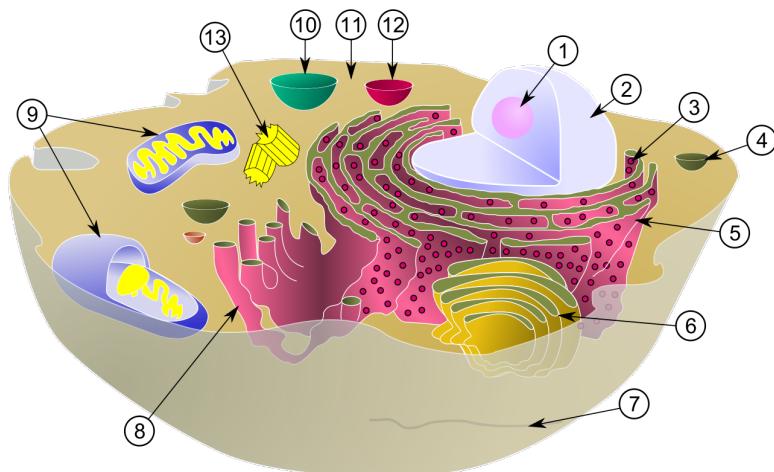
Онадвор клетката е обвиткана со **клеточна мембра**.<sup>4</sup> Ваквата мембра е составена од два слоја на масти во кои се вметнати различни белковини и мало количество на шеќери. Клеточната мембра е многу важна, бидејќи таа одредува што може да влезе, а што да излезе од клетката. Клеточната мембра 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.

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

<sup>2</sup>Интересно 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>

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

<sup>4</sup>Wikipedia: Клеточна мембра [https://mk.wikipedia.org/wiki/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.<sup>7</sup>

**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 информација<sup>5</sup>,
- **митохондриите** се клеточни органели во кои се врши аеробното разградување на материите и се ослободува енергија во вид на аденоzin трифосфат (АТФ)<sup>6</sup>. 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.

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

<sup>6</sup>На английски Adenosine triphosphate (ATP).

<sup>7</sup>Од 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  $\text{Na}^+$ , Калиум  $\text{K}^+$ , Калциум  $\text{Ca}^{2+}$ , и Магнезиум  $\text{Mg}^{2+}$ ,
- **анјони** – хлорид  $\text{Cl}^-$ , сулфат  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , и фосфат  $\text{PO}_4^{3-}$ .

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.<sup>8</sup> 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

<sup>8</sup>Фруктозата, 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  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , ослободувајќи притоа големо количество 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 заситени<sup>9</sup>, 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**<sup>10</sup> 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.<sup>12</sup>

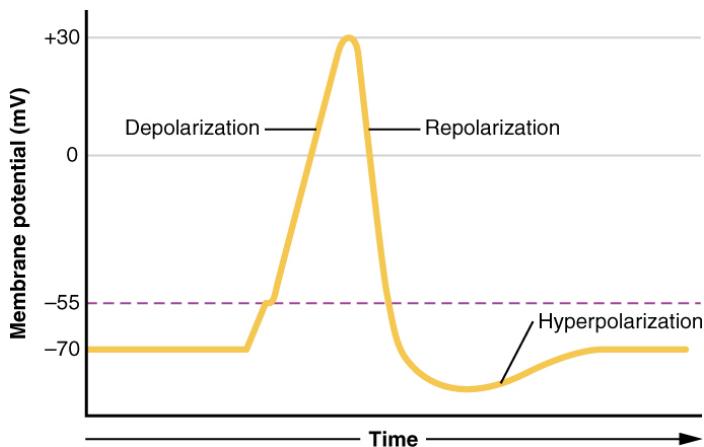
Разликата во потенцијалите помеѓу внатрешноста и надворешноста на клетката се нарекува **потенцијал на клеточната мембра** или **биоелектричен потенцијал во**

<sup>9</sup>Заситените 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/>.

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

<sup>11</sup>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=30147928>

<sup>12</sup>Текстот во овој поднаслов користи исчеоци од Wikipedia: Биоелектричен потенцијал [https://mk.wikipedia.org/wiki/Биоелектричен\\_потенцијал](https://mk.wikipedia.org/wiki/Биоелектричен_потенцијал)



**Сл. 2.2:** Деполаризација на една клетка.<sup>11</sup>

**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  $-70\text{ mV}$ , но немаат секогаш иста големина.

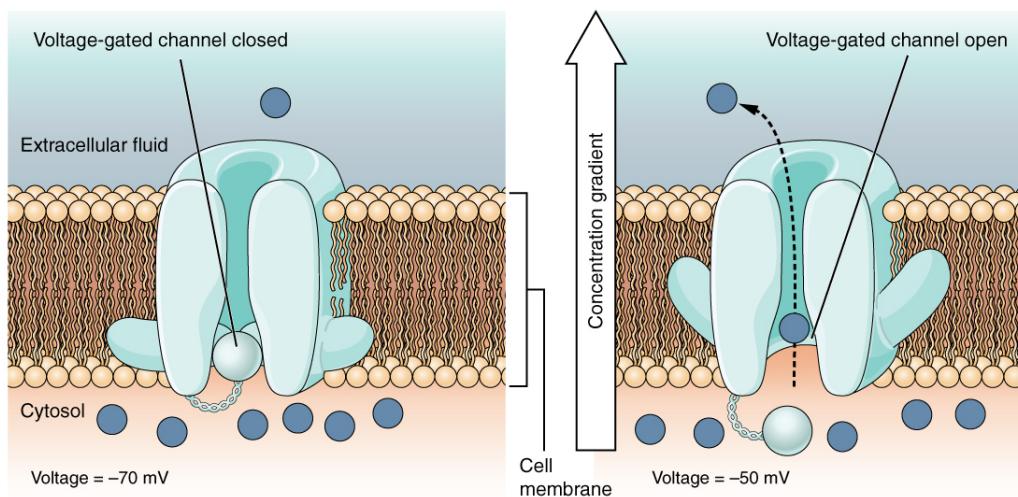
Најважна улога во создавањето на биоелектричниот потенцијал има дифузијата на натриумовите  $\text{Na}^+$  и калиумовите  $\text{K}^+$  јони преку клеточната мембра, која е резултат на дејството на таканаречените **натриум-калиумови пумпи**. Преку нив за секои два внесени  $\text{K}^+$  јони, од клетката се испуштуваат три  $\text{Na}^+$  јони со употреба на еден молекул на АТФ.<sup>13</sup> 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  $\text{Na}^+$  јони кои не можат да продрат во клетката поради тоа што пропустливоста на мемраната на  $\text{Na}^+$  јони е 100 пати поголема од пропустливоста за  $\text{K}^+$  јони. Оваа нерамнотежка ја одржуваат и **напонски регулираните јонски канали** кои биоелектричниот потенцијал ги држи затворени, Сл. 2.3. И покрај високата концентрација на  $\text{K}^+$  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 мемраната на јоните на натриумот  $\text{Na}^+$  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.

<sup>13</sup>Овој 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.<sup>14</sup>

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.<sup>15</sup>

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

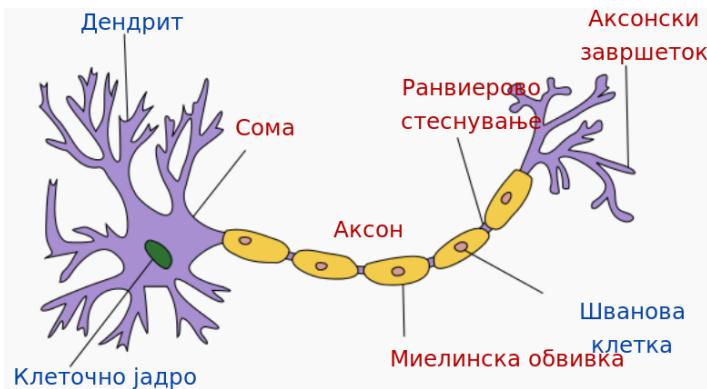
**Нервните клетки** или **невроните** се основните градбени единки на нервниот систем.<sup>16</sup> За разлика од другите клетки во телото, невроните се карактеризираат со надразливост, осетливост и спроводливост. Овие карактеристики се во согласност со нивната специфична функција. Градбата на невроните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

- тело на нервната клетка или невроцит,

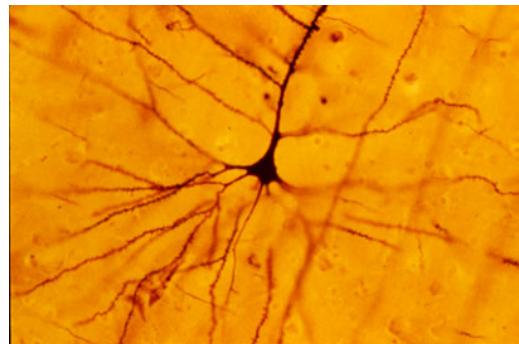
<sup>14</sup>By OpenStax College - Anatomy & Physiology, Connexions Web site. <http://cnx.org/content/col11496/1.6/>, Jun 19, 2013., CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30147924>

<sup>15</sup>Уште 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](https://www.youtube.com/watch?v=-h_kWFM2faQ)

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



Сл. 2.4: Градба на невроните.<sup>17</sup>



Сл. 2.5: Човечки неврон виден под микроскоп.<sup>18</sup>

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

На Сл. 2.5 е прикажан неокортikalен 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.<sup>20</sup> 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

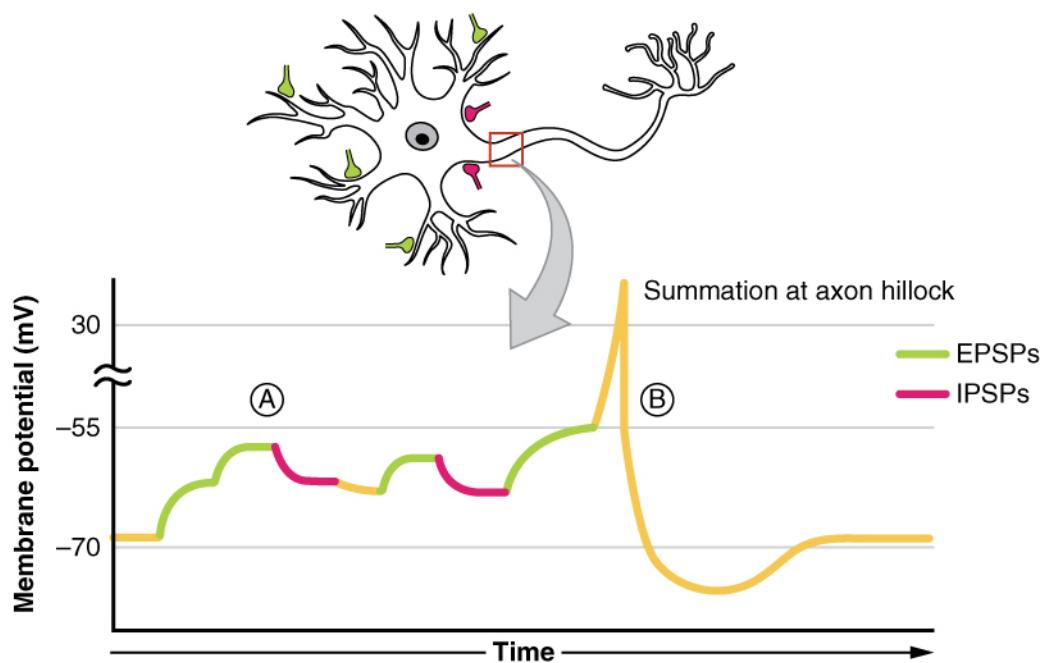
<sup>17</sup> Wikipedia: Неврон <https://mk.wikipedia.org/wiki/Неврон>, оригинал од Quasar Jarosz на Википедија на англиски, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7616130>

<sup>18</sup> 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>

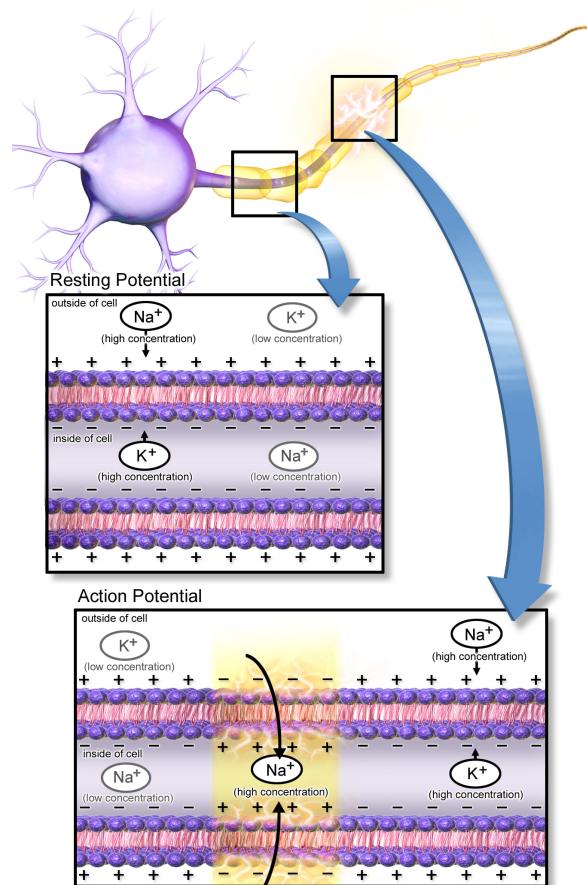
<sup>19</sup> By OpenStax College - Anatomy & Physiology, Connexions Web site. <http://cnx.org/content/col11496/1.6/>, Jun 19, 2013., CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30147931>

<sup>20</sup> Wikipedia: Action potential [https://en.wikipedia.org/wiki/Action\\_potential](https://en.wikipedia.org/wiki/Action_potential)

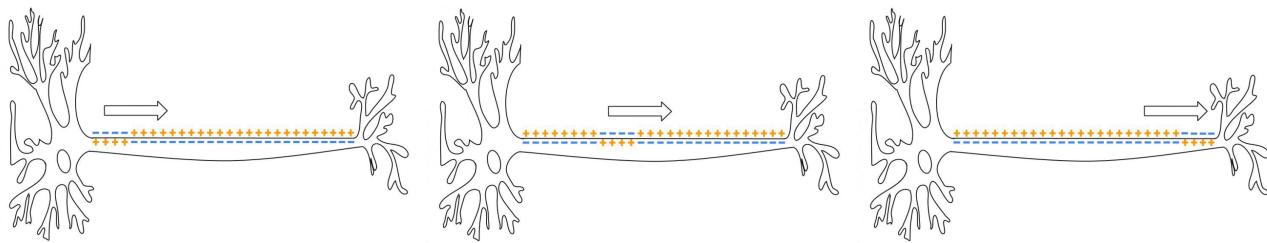
<sup>21</sup> Blausen.com staff. "Blausen gallery 2014". Wikiversity Journal of Medicine. DOI:10.15347/wjm/2014.010. ISSN 20018762. - Own work, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=29452220>



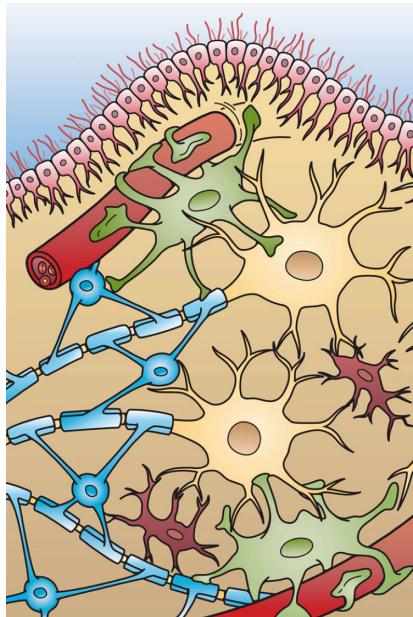
Сл. 2.6: Интегрирање на побудите во телото на невронот.<sup>19</sup>



Сл. 2.7: Простирање на нервниот импулс.<sup>21</sup>



**Сл. 2.8:** Фази од простирањето на нервниот импулс.<sup>22</sup>



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

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

### 2.3.3 Глиа клетки

Швановите клетки претставуваат 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.<sup>24</sup>

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:

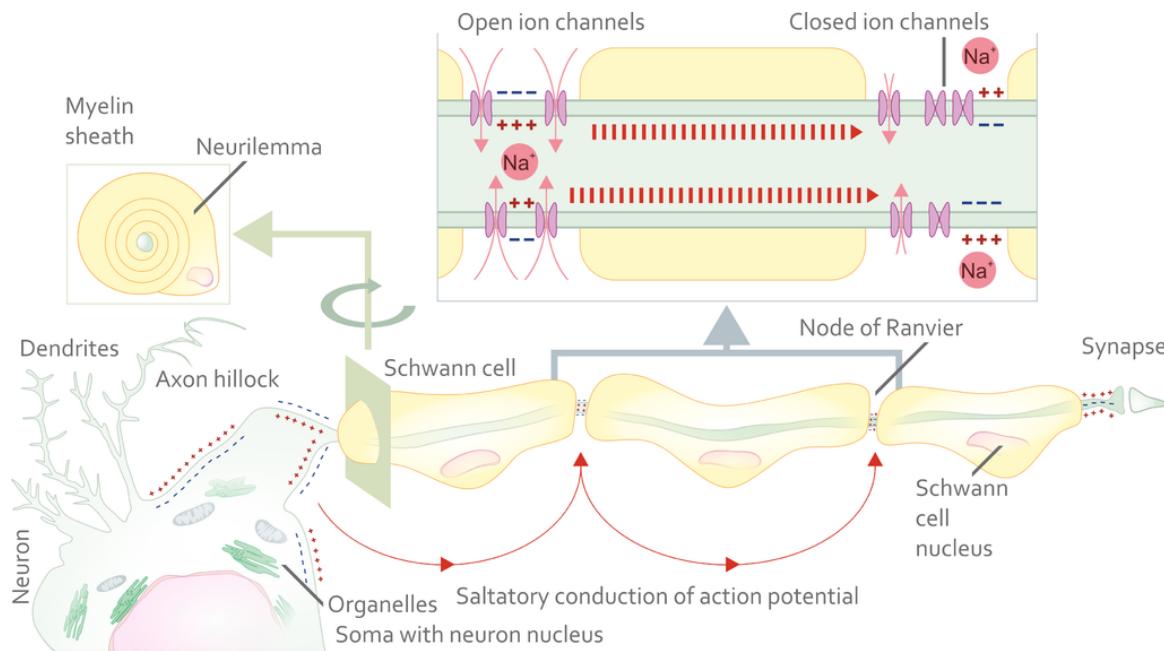
- епендималните клетки – одговорни за излачување и придвижување на мозочно-спиналната течност,
- астроцитите – задолжени за пренос на хранливите материји од капиларите до невроните и отпадните материји од невроните во спротивна насока тие се чуварите на мозочно-крвната бариера,

<sup>23</sup>Како 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>

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

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

<sup>25</sup>By 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.<sup>26</sup>

- 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.<sup>27</sup> 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  $\mu\text{m}$  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.

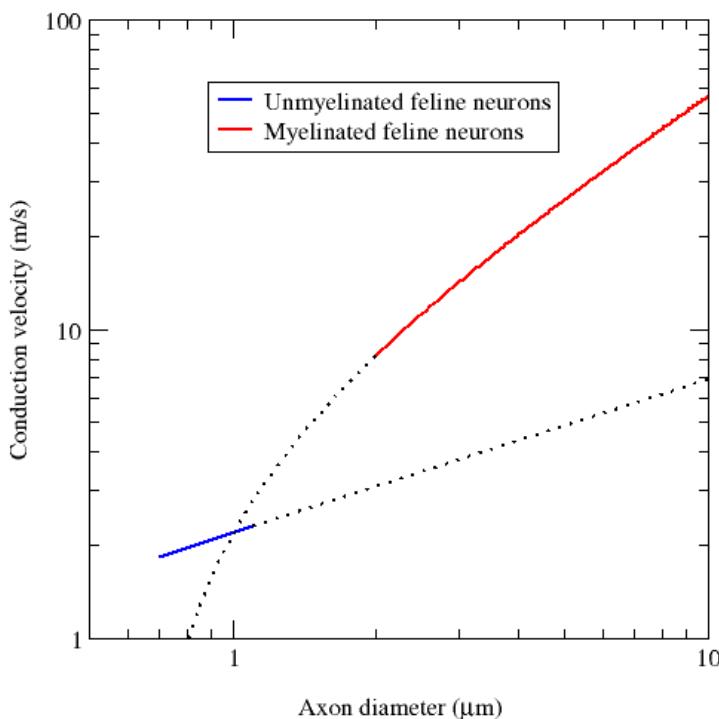
## 2.4 Градба и работа на мускулите

Мускулите претставуваат ткива составени од мноштво спонзори на **мускулни влакна**, кои ја имаат способноста да генерираат сила и движење преку контракција. Тие го сочинуваат актив-

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

<sup>27</sup>Wikipedia: Saltatory conduction [https://en.wikipedia.org/wiki/Saltatory\\_conduction](https://en.wikipedia.org/wiki/Saltatory_conduction)

<sup>28</sup>By 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.<sup>28</sup>

ниот дел на локомоторниот апарат.<sup>29</sup> Постојат три видови на мускулни ткива во човековиот организам:

- **напречно-пругасто** ткиво од кое се изградени скелеталните мускули кои преку **тетиви** се врзани за скелетот на човекот, имаат голема брзина на контракција и овозможуваат движење преку свесна контрола,
- **мазно** ткиво кое ги формира сидовите на внатрешните органи, на пр. гастроинтестиналниот тракт и уринарниот систем; тие имаат бавна брзина на контракција и работат без наша волја, и
- **срцево** ткиво кое го формира сидовите на срцевите празнини, т.е. комори. По градбата е слично на напречно-пругастото, а по функција на мазното мускулно ткиво, со средна брзина на контракција и вон наша свесна контрола.

Структурата и составот на мускулните влакна од напречно-пругастото ткиво е прикажан на Сл. 2.13. Може да се види дека мускулните влакна се клетки со повеќе клеточни јадра. Нивната основна градбена единка се протеинските нишки наречени **миофилили**. Миофилилите се обвиткани од **саркоплазмичен ретикулум (СР)** и се составени од наизменична низа на напречни структури изградени од тенки нишки на **актин** и дебели нишки на **миозин**. Елементарниот дел на оваа повторувачка структура се нарекува **саркомер**. Поради внатрешната структура на миофилилите, скелеталните, а и срцевите мускулни влакна имаат пругаст, т.е. стриест изглед.

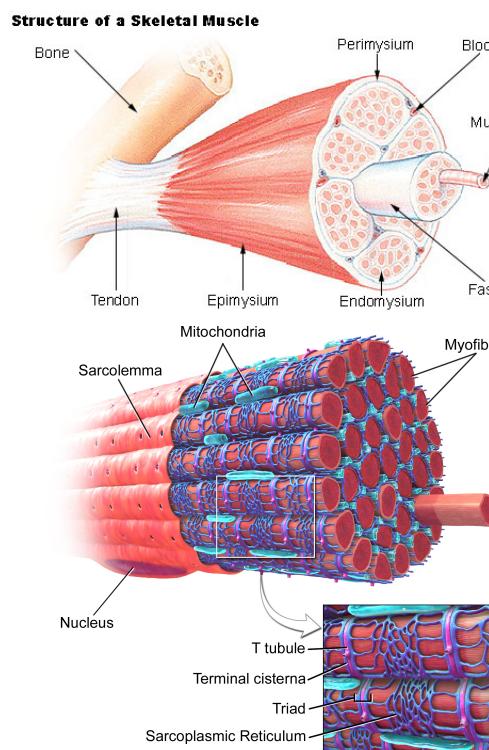
Контракциите на скелетните мускули се **неврогенични**, односно тие се предизвикани од нервни

<sup>29</sup> Википедија – Мускул <https://mk.wikipedia.org/wiki/Мускул>

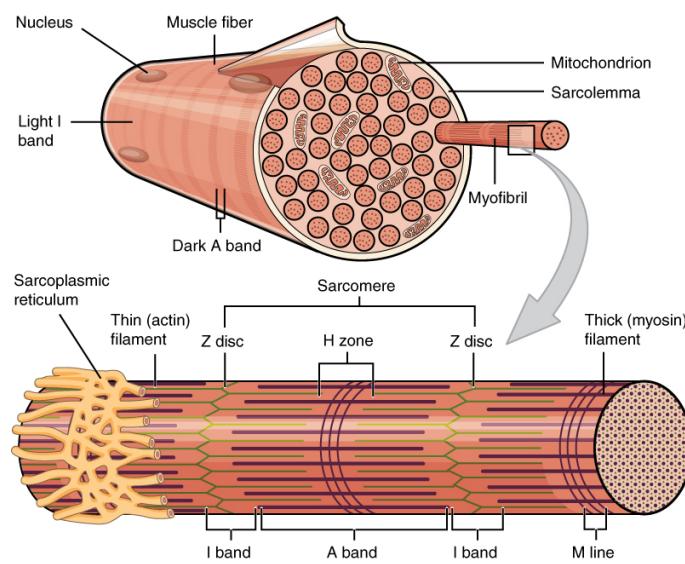
<sup>30</sup> Illu muscle structure – Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1197565>

Skeletal Muscle Fiber – By BruceBlaus. Blausen.com staff (2014). "Medical gallery of Blausen Medical 2014". WikiJournal of Medicine 1 (2). DOI:10.15347/wjm/2014.010. ISSN 2002-4436. - Own work, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=29452230>

<sup>31</sup> Organization of skeletal muscle – By OpenStax - <https://cnx.org/contents/FPtK1zmh@8.25:fEI3C80t@10/Preface>, CC BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30015051>



**Сл. 2.12:** Структура и состав на скелеталните мускули.<sup>30</sup>



**Сл. 2.13:** Структура и состав на скелеталните мускулни влакна.<sup>31</sup>

импулси на моторните неврони, наречени мотоневрони, кои предизвикуваат деполаризација на мускулните влакна, а со тоа и нивна **контракција**.<sup>32</sup> Притоа, мотоневроните се разгрануваат и инервираат повеќе мускулни влакна, активирајќи ги истовремено. Збирот на мотоневрон со мускулните влакна кои ги инервира се нарекува **моторна единица**. 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.

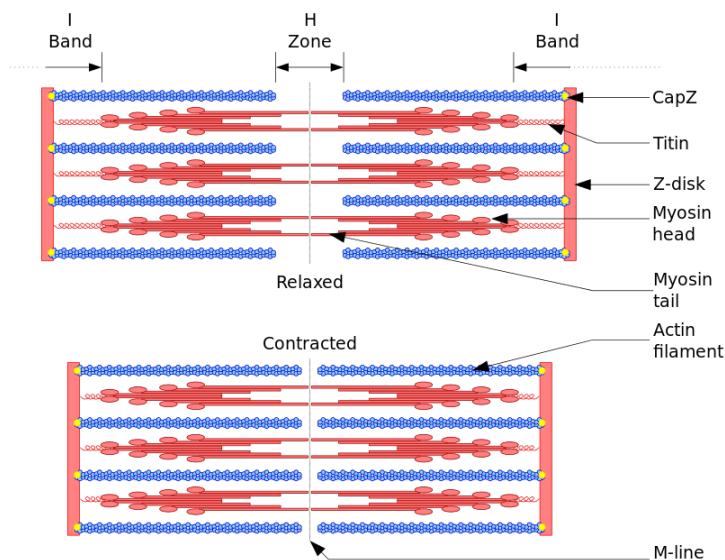
Покрај различниот тип на влезна побуда на која реагираат, контракцијата на сите три типа на мускулно ткиво се должи на истиот физиолошки механизам. Имено, при активација протеинските нишки на **актин** и **миозин** во мускулните влакна според **теорија на лизгање на нишките**, тие лизгаат едни покрај други генерирајќи сила и придвижување, т.е. контракција. На Сл. 2.14 е 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 чекор по чекор по чекор на Сл. 2.15.<sup>34</sup> Деполаризацијата на мускулното влакно ја предизвикува надворешниот акционен потенцијал на мотоневронот. Таа се пренесува низ Т тубулите и ги активира напонски контролирани калциумови помпи во саркоплазмичниот ретикулум, кој е одговорен за чување на калциумот во мускулните влакна. Ова предизвикува ослободување на калциумови  $\text{Ca}^{2+}$  јони од СР. Синхронизираното ослободување на калциум од илјадниците СР 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 тропонинот. Оваа врска предизвикува промена во положбата

<sup>32</sup>Wikipedia: Muscle Contraction. [https://en.wikipedia.org/wiki/Muscle\\_contraction](https://en.wikipedia.org/wiki/Muscle_contraction)

<sup>33</sup>By Slashme at English Wikipedia. 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>

<sup>34</sup>Анимирана илустрација на целиот процес е дадена во: McGraw-Hill Animations – Muscle Contraction Process [HD Animation] <https://www.youtube.com/watch?v=ousflr0zQHc>



**Сл. 2.14:** Меѓусебната положба на протеинските нишки при релаксација, односно контракција.<sup>33</sup>

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 врзана молекула на аденоzin дифосфат (АДФ) и неоргански фосфор Р, резултат на хидролизата на **аденоzin трифосфат (АТФ)** молекулата<sup>36</sup>, се врзува за актинот. При врзувањето се ослободува АДФ и Р молекулите во два чекори – во првиот се ослободува Р а потоа се ослободува останатиот АДФ. 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 нова АТФ молекула се врзува за миозинот, што го ослободува од актинот.<sup>37</sup> Неговата хидролиза на АДФ и Р го враќа во почетната високо-енергетска состојба. Ако тропомиозинот сеуште не го покрива актинот, целиот процес се повторува. Во целиот процес калциумот  $\text{Ca}^{2+}$  активно се впумпува во саркоплазмичниот ретикулум, па при недостиг на надворешен акционен потенцијал за активирање на неговото ослободување, неговата концентрација паѓа со што тропомиозинот се враќа во првичната состојба и мускулот преминува во состојба на релаксација.

Деполаризацијата на скелеталните мускули е слична со онаа на невроните.<sup>38</sup> Таа настапува поради активацијата на натриумовите канали, што предизвикува навлегување на натриумовите јони  $\text{Na}^+$  во внатрешноста на клетката. Овој процес престанува со затворањето на овие канали, а до реполаризација на клетката доаѓа поради истекувањето на калиумовите јони  $\text{K}^+$  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 единечен нервен импулс е прикажана на **миограмот** на Сл. 2.16. 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 ја започне неговата контракцијата.

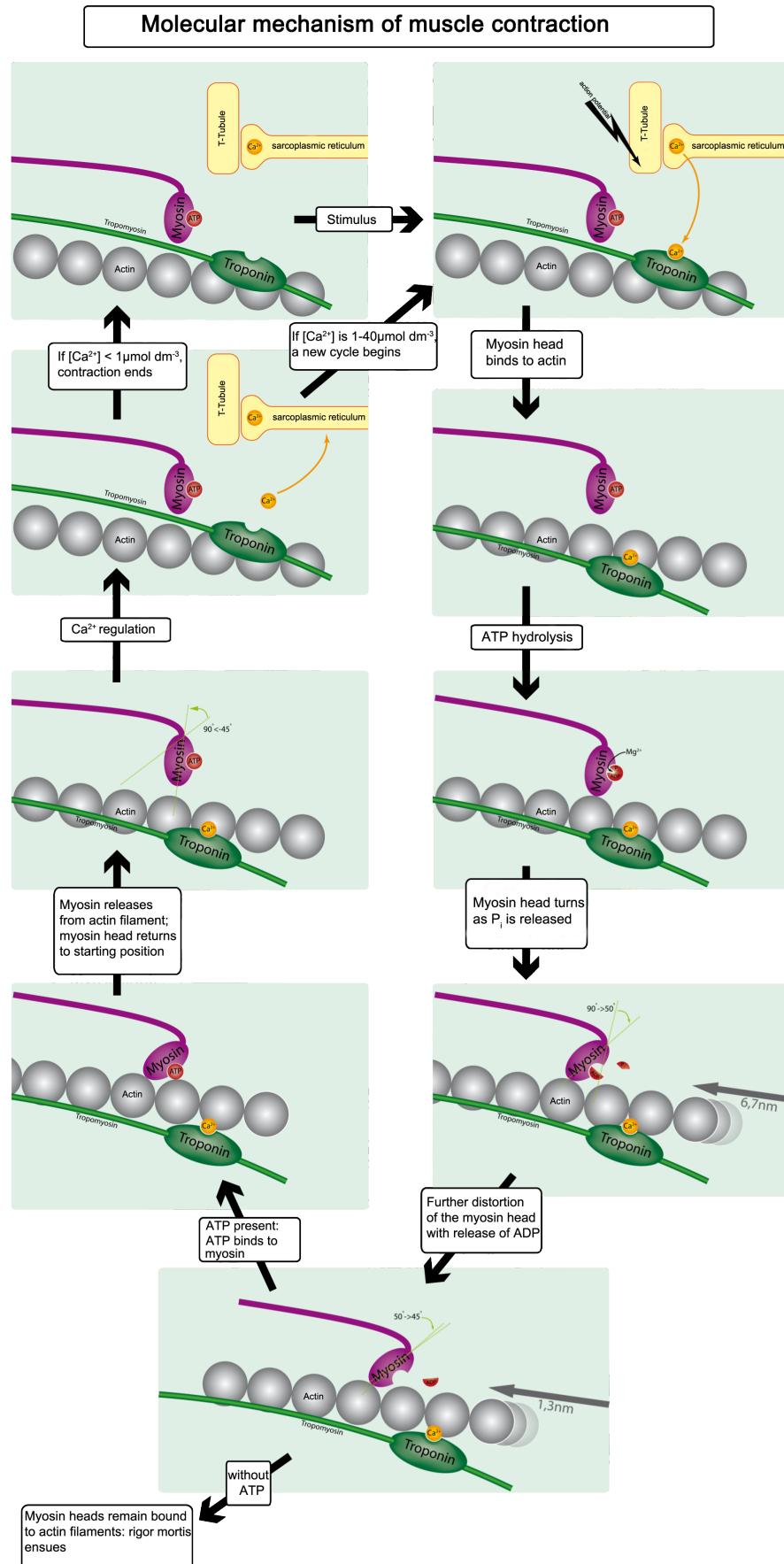
<sup>35</sup> By Muskel-molekular.png: Hank van Helvete derivative work: GravityGilly - Muskel-molekular.png, CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10703870>

<sup>36</sup> Adenosine triphosphate (ATP) [https://en.wikipedia.org/wiki/Adenosine\\_triphosphate](https://en.wikipedia.org/wiki/Adenosine_triphosphate)

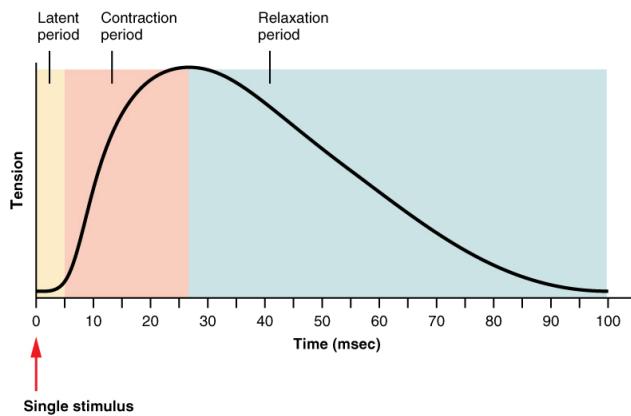
<sup>37</sup> При недостиг на АТФ, мускулите остануваат во грч.

<sup>38</sup> Wikipedia: Action potential [https://en.wikipedia.org/wiki/Action\\_potential](https://en.wikipedia.org/wiki/Action_potential)

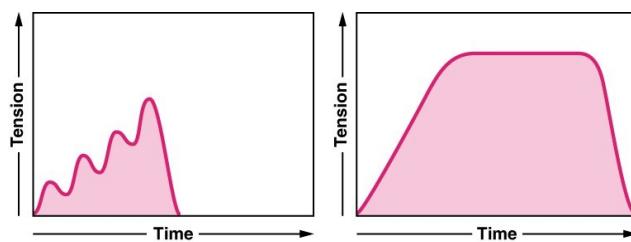
<sup>39</sup> By OpenStax - <https://cnx.org/contents/FPtK1zmh@8.25:fEI3C80t@10/Preface>, CC BY 4.0, <https://commons>.



Сл. 2.15: Чекори во контракцијата на мускулните влакна.<sup>35</sup>



Сл. 2.16: Миограм на елементарна контракција на мускулно влакно.<sup>39</sup>



Сл. 2.17: Миограм на сумација и тетанус при контракција на мускул.<sup>40</sup>

Доколку пристигне нов нервен импулс пред мускулното влакно да се врати во неговата релаксирана состојба доаѓа до таканаречена **сумација**. Ова е прикажано на Сл. 2.17. Постојат два типа на сумација и тоа:

- **фреквенциска сумација** – пристигнуваат поголем број на нервни импулси на истото мускулно влакно, и
- **сумација на повеќе влакна** – доаѓа до активација на нови мускулни влакна, т.е. моторни единици.

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 тетивите може да дојде при активација 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. 2.17.

## 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**<sup>1</sup>. 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.

#### 4.1.1 Слободен софтвер

Меѓутоа, денес сè повеќе научници своето истражување го засноваат на платформи базирани на **слободен софтвер**<sup>2</sup>. Ова пред сè се должи на философијата на движењето за слободен софтвер започнато од **Ричард Сталман**<sup>3</sup> во 1983 г. со креирањето на ГНУ оперативниот систем, а подоцна со воспоставување на Фондацијата за слободен софтвер<sup>4</sup> во 1985 г., како и поширокото **движење за отвореност**<sup>5</sup>, а тоа е заедништво во создавањето и напредувањето на технологијата и човештвото.

#### 4.1.2 Четири слободи

Слободниот софтвер е дефиниран со четирите слободи:<sup>6</sup>

- **Слобода 0.** Слобода да ја користите програмата за било која намена.

Додавањето на рестрикции за користење на слободен софтвер, како што се временските рестрикции („Пробен период од 30 дена“, „Лиценцата истекува на 1 јануари 2005“),

---

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

<sup>2</sup>Wikipedia – Free software movement [https://en.wikipedia.org/wiki/Free\\_software\\_movement](https://en.wikipedia.org/wiki/Free_software_movement)

<sup>3</sup>Wikipedia – Richard Stallman [https://en.wikipedia.org/wiki/Richard\\_Stallman](https://en.wikipedia.org/wiki/Richard_Stallman)

Предавање на Ричард Сталман за философијата на движењето за слободен софтвер – Richard Stallman – Free software, free society, TEDxGeneva 2014 [https://www.youtube.com/watch?v=Ag1AKI1\\_2GM](https://www.youtube.com/watch?v=Ag1AKI1_2GM)

<sup>4</sup>Wikipedia – Free Software Foundation [https://en.wikipedia.org/wiki/Free\\_Software\\_Foundation](https://en.wikipedia.org/wiki/Free_Software_Foundation)

<sup>5</sup>Wikipedia – Open-source model [https://en.wikipedia.org/wiki/Open-source\\_model](https://en.wikipedia.org/wiki/Open-source_model)

Nathan Seidle – How Open Hardware will Take Over the World, TEDxBoulder [https://www.youtube.com/watch?v=xGhj\\_1LNtd0](https://www.youtube.com/watch?v=xGhj_1LNtd0)

<sup>6</sup>Превземено од вебстраницата на организацијата Слободен софтвер Македонија <https://slobodensoftver.org.mk/shto>

рестрикции на целта („Дозволена е употреба за истражувачки и некомерцијални цели“) или рестрикции на географската област („Мора да се користи во земјата А“), ја прават програмата неслободна.

- **Слобода 1.** Слобода да проучите како работи програмата и како истата да ја адаптирате на сопствените потреби.

Добавањето легални или практични рестрикции на разбирањето или менувањето на програмата, како што се задолжително купување на специјални лиценци, потпишување на спогодба за неоткривање (Non-Disclosure-Agreement) или правењето изворниот код да биде недостапен, исто така ја прават програмата неслободна. Без слободата да се менува програта, луѓето ќе останат на милост на единствен снабдувач.

- **Слобода 2.** Слобода да редистрибуирате копии за да му помогнете на вашиот сосед.

Софтверот може да се копира/дистрибуира скоро без никакви трошоци. Ако не смеете да му дадете некоја програма на некој човек кому таа му треба, тоа ја прави програмата неслободна. Се разбира, доколку сакате, за ваквите активности можете да наплатите.

- **Слобода 3** Слобода да ја подобрувате програмата и да ги издадете вашите подобрувања во јавноста, од што корист ќе има целата заедница.

Сите луѓе не се подеднакво добри програмери. Некои луѓе пак воопшто не знаат да програмираат. Оваа слобода им дозволува на оние луѓе кои немаат време или знаење да решат некој проблем индиректно да пристапат до слободата за менување на програмата. Се разбира, доколку сакате, за ваквите активности можете да наплатите.

Доколку софтверот не ги исполнува сите горни услови, тогаш тој не е слободен софтвер.

#### 4.1.3 Предности на слободниот софтвер

Од практичен аспект, отворениот софтвер има низа предности над затворениот софтвер и тоа:

- **достапноста** – 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, но и од продавање поддршка за нивниот производ.
- **безбедноста** – поради достапноста на изворниот код, не постои начин производителот на софтерот 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.<sup>7,8</sup>
- **слободата од производителот** – како корисници на отворениот софтвер, вие не сте затворени во екосистемот на производителот.<sup>9</sup> Истиот тој софтвер може да биде превземен од друга заедница на програмери и да продолжи неговото одржување и развој во друга насока.

---

<sup>7</sup> Во Windows 10 производителот го задржува правото да ги чува вашите приватни податоци како што вели во 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 ...”

Истите механизми се додадени во претходните верзии на Windows преку автоматските надградби.

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/>

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

<sup>8</sup> Епл и Самсунг ги забавија телефоните на корисниците преку нивното редовно ажурирање <https://www.cnet.com/news/apple-and-samsung-fined-for-slowing-down-phones-with-updates/>

<sup>9</sup> Don Reisinger – Steve Jobs wanted to ‘further lock customers’ into Apple’s ‘ecosystem’ <https://www.cnet.com/news/steve-jobs-wanted-to-further-lock-customers-into-apples-ecosystem/>

- **подобар 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**<sup>10</sup>, кое е во основата оперативниот систем **GNU/Линукс** познат и само како **Линукс**<sup>11</sup> и повеќе од 600-те **GNU/Линукс дистрибуции**<sup>12</sup>, првично напишано од **Линус Торвалдс**<sup>13</sup>, 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.<sup>14</sup>

Сите овие придобивки заедно придонесуваат за широка распространетост на слободниот софтвер денес. Така, ГНУ/Линукс и ФриБСД оперативните системи се во употреба во 98,27 % од серверите на интернет (споредено со 1,73 % со Виндуос), 79,3 % од смартфоните (Андроид оперативниот систем)<sup>15</sup>, и 99 % од суперкомпјутерите<sup>16</sup>. Сепак, неговиот пробив во персоналните компјутери засега е незначителен – 2,1 % (наспроти 87 % на Видоус и 9,7 % на МекОС). Може да кажеме дека тој допрва доаѓа.

## 4.2 Употреба на Пајтон 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 **Пајтон**<sup>17</sup>, заедно со научната Пајтон околина чија основа ја сочинуваат библиотеките:

- **Нумпај** – за работа со вектори и матрици,<sup>18</sup>
- **Сајпај** – за дигитално процесирање на сигнали,<sup>19</sup>
- **Матплотлиб** – за плотирање на 2Д графици.<sup>20</sup>

Освен овие постојат мноштво библиотеки за Пајтон кои се користат во научните истражувања како на пример **Пандас**<sup>21</sup> за статистички анализи, **Симпај**<sup>22</sup> за симболичка математика, **Сајкитлрн**<sup>23</sup> за машинско учење, **Пајторч**<sup>24</sup> за длабоко учење итн.

Како интерфејс кон Пајтон ќе ја користиме интерактивната конзола **иПајтон**<sup>25</sup> и научната развојна средина за Пајтон **Спајдер**<sup>26</sup>.

---

<sup>10</sup> Wikipedia – Linux kernel [https://en.wikipedia.org/wiki/Linux\\_kernel](https://en.wikipedia.org/wiki/Linux_kernel)

<sup>11</sup> Wikipedia – Linux <https://en.wikipedia.org/wiki/Linux>

<sup>12</sup> Wikipedia – List of Linux distributions [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_Linux\\_distributions](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Linux_distributions)

<sup>13</sup> Wikipedia – Linus Torvalds [https://en.wikipedia.org/wiki/Linus\\_Torvalds](https://en.wikipedia.org/wiki/Linus_Torvalds)

<sup>14</sup> Добар документарен филм за раѓањето и развојот на ГНУ/Линукс оперативниот систем е Revolution OS - 2001 <https://www.youtube.com/watch?v=Eluzi700-P4>

<sup>15</sup> Оваа бројка е речиси 91 % ако се има в' предвид дека и iOS е базиран на линукс јадрото.

<sup>16</sup> Linux is Running on Almost All of the Top 500 Supercomputers <https://itsfoss.com/linux-supercomputers-2017/>

<sup>17</sup> Python <https://www.python.org/>

<sup>18</sup> NumPy <http://www.numpy.org/>

<sup>19</sup> SciPy <http://www.scipy.org/>

<sup>20</sup> MatPlotLib <http://matplotlib.org/>

<sup>21</sup> Pandas <http://pandas.pydata.org/>

<sup>22</sup> SymPy <http://www.sympy.org/en/index.html>

<sup>23</sup> SciKit-Learn <http://scikit-learn.org/stable/>

<sup>24</sup> PyTorch <https://pytorch.org/>

<sup>25</sup> IPython Interactive Computing <http://ipython.org/>

<sup>26</sup> Spyder – The Scientific PYthon Development EnviRonment <https://github.com/spyder-ide/spyder>

## 4.3 Основи на Python

За работа со Пајтон може да ја искористиме стандардната конзола која доаѓа со инсталацијата на било која ГНУ/Линукс дистрибуција.<sup>27</sup> 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.
>>>
```

За подобра работа со Пајтон ќе ја инсталираме интерактивната конзола **иПајтон** 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 Нумпај и Матплотлиб

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

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

Сега може да ги повикаме во иПајтон:

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

```
...
```

---

<sup>27</sup>За основи на Баш командната линија во Линукс добро напатство е тоа на Столарска работилница за софтвер: Software Carpentry – The Unix Shell <http://swcarpentry.github.io/shell-novice/>

## 4.5 Воведни материјали за Пајтон, Нумпај, Матплотлиб, Сајпај

Добар вовед во програмскиот јазик Пајтон, 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 Пајтон, Нумпај, Сајпај, Матплотлиб, Сајкитлрн, Симпај, па дури и Џајтон<sup>28</sup>.

Добар вовед во програмскиот јазик Пајтон е и официјалниот туторијал кој може да се најде на неговата вебстраница<sup>29</sup>. Уште една добра книга за основите на Пајтон е книгата

## 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**.<sup>30</sup>

### 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 запишан 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.

```

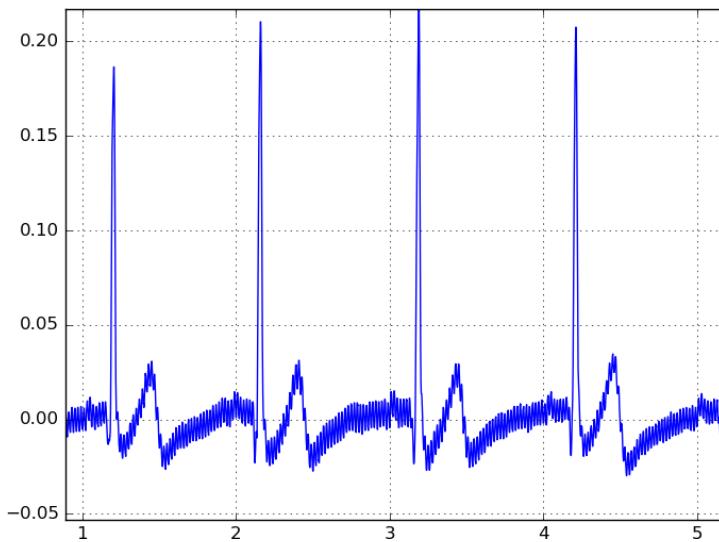
1 from __future__ import division
2 import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import scipy.fftpack as ff
5
6 ecg = np.array([])
7 count = 0
8
9 with open('ecg.txt') as fh:
10     for line in fh:
11         if count > 3:
12             val = float(line[:-3])
13             ecg = np.append(ecg, 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

<sup>28</sup>Cython <https://cython.org/>

<sup>29</sup>The Python Tutorial. <https://docs.python.org/2.7/tutorial/index.html>

<sup>30</sup>BioSPPy – Biosignal Processing in Python. <https://github.com/PIA-Group/BioSPPy>



Сл. 4.1: Изглед на измерениот ЕКГ сигнал.

#### 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 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.

```

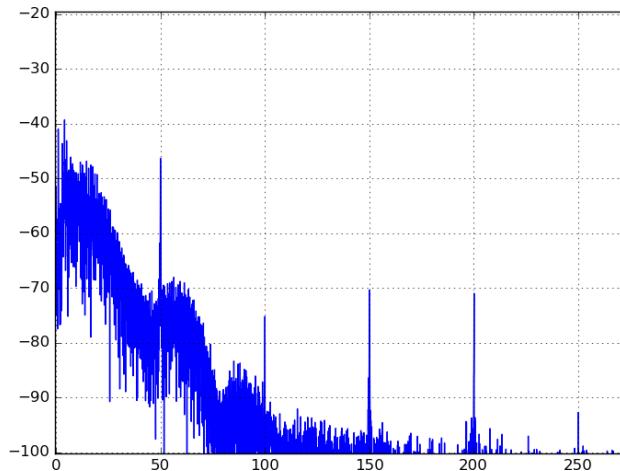
21 N = ecg.size
22 Nfft = 2**np.ceil(np.log(N)/np.log(2))
23
24 ecg_spec = ff.fft(ecg, Nfft)
25 ecg_spec = np.abs(ecg_spec)
26 ecg_spec = ecg_spec / N
27 ecg_spec = ecg_spec[0:Nfft/2+1]
28 ecg_spec[2:-1] = ecg_spec[2:-1] * 2
29 ecg_spec = 20*np.log10(ecg_spec)
30
31 f = np.linspace(0,Fs/2,Nfft/2+1)
32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

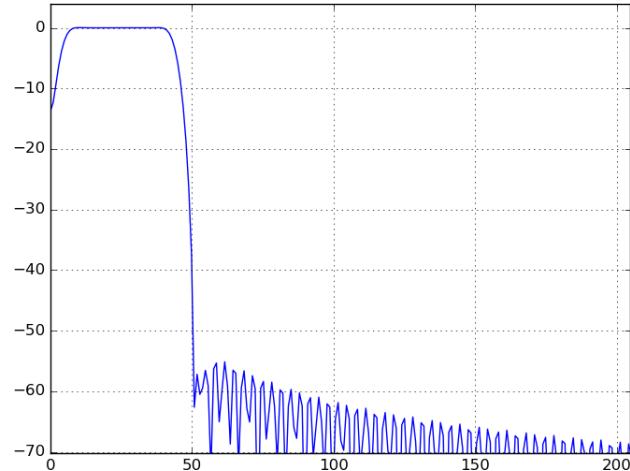
#### 4.6.3 Филтрирање на ЕКГ сигналот

Може да се види дека ЕКГ сигналот нема значајни компоненти над 45 Hz па можеме да дизајнираме FIR<sup>31</sup> филтер пропусник на опсег со гранични фреквенции 3 и 45 Hz. За тоа

<sup>31</sup>Wikipedia: Finite impulse response. [https://en.wikipedia.org/wiki/Finite\\_impulse\\_response](https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_impulse_response)



**Сл. 4.2:** Амплитуден спектар на измерениот ЕКГ сигнал.



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

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 визуелизирајме користејќи ја функцијата `freqz()` со која го добиваме графикот на Сл. 4.3.

```

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()

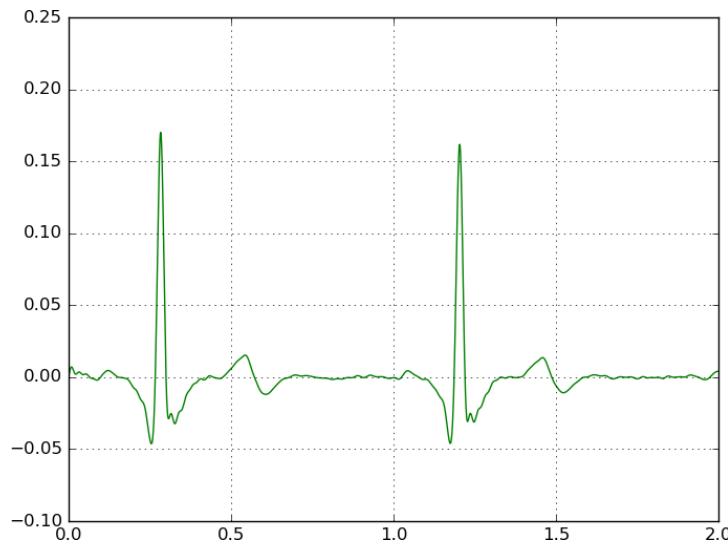
50 ecg_filt = sgfiltfilt(b, 1, ecg)
51 plt.figure()
52 plt.plot(t,ecg_filt,'g')
53 plt.grid()

```

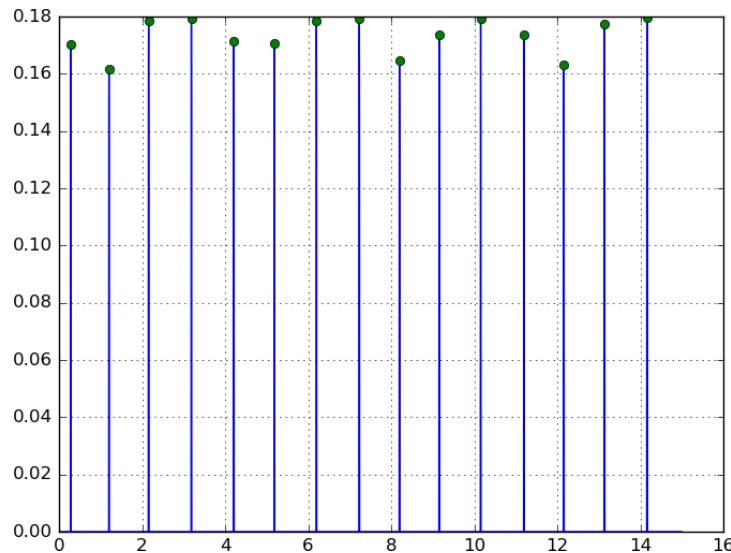
Филтрирањето ќе го извршиме со функцијата `filtfilt()` која го филтрира сигналот во двете насоки со што се постигнува филтриран сигнал кој нема фазно доцнење во однос на оригиналниот сигнал. Исфилтрираниот сигнал може да се види на Сл. 4.5. Може да се види дека елиминиран е проблемот со непостојаноста 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. 4.4: Исфилтрирана верзија од ЕКГ сигналот.

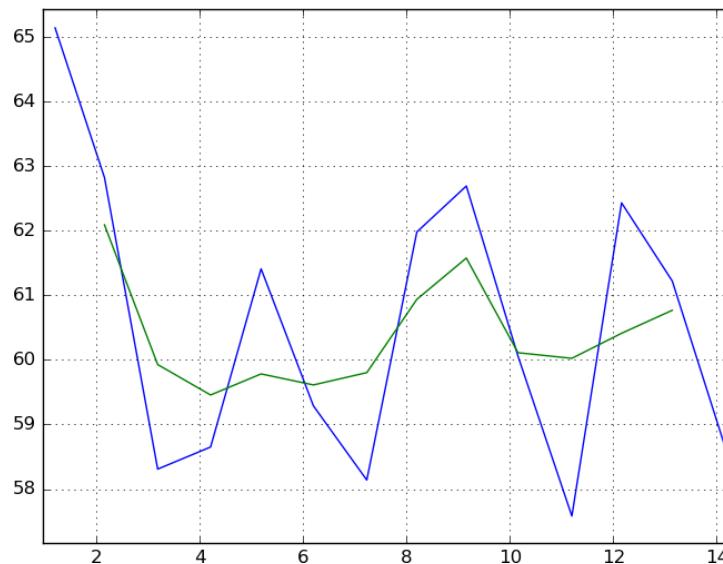


Сл. 4.5: Најдени врвови во ЕКГ сигналот.

```

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()

```



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

#### 4.6.5 Пресметка на бројот на отчукувања во минута

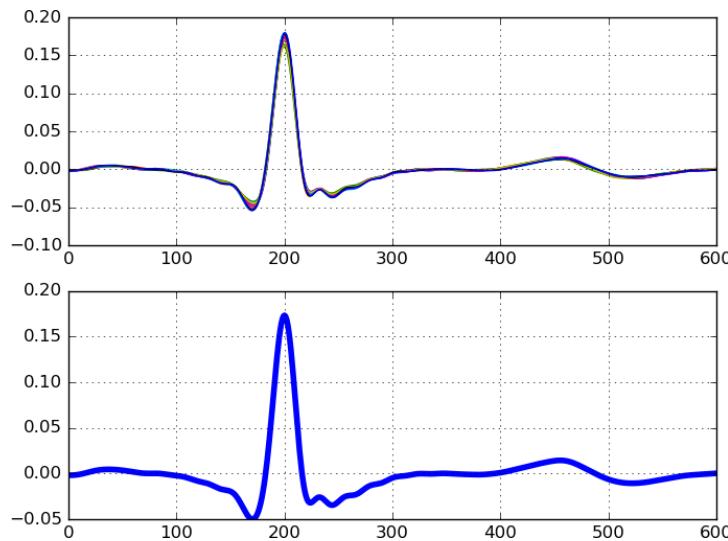
Откако ги имаме детектирано R врвовите во ЕКГ сигналот, од нив може да се пресмета моментната брзина на отчукување на срцето која вообичаено се изразува во bpm (beats per minute). За пресметување на измазната верзија од оваа брзина можеме да искористиме лизгачи прозорец за усреднување. Пресметаните моментни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

```

68 R_diff = np.diff(R)
69 R_diff = R_diff/Fs # in 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 детектираниите 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.

```

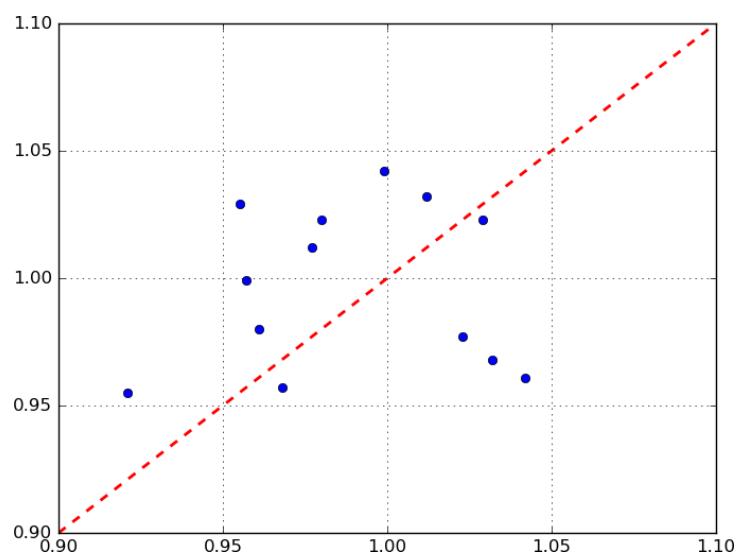
83 R_left = 0.200 * Fs
84 R_right = 0.400 * Fs
85 templates = np.zeros(R_left+R_right)
86 for r in R:
87     ecg_temp = ecg_filt[r-R_left : r+R_right]
88     templates = np.vstack((templates, ecg_temp))
89
90 ecg_template = np.mean(templates[1:],0)
91 plt.figure()
92 plt.subplot(211)
93 plt.plot(templates[1:].T)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

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*.