

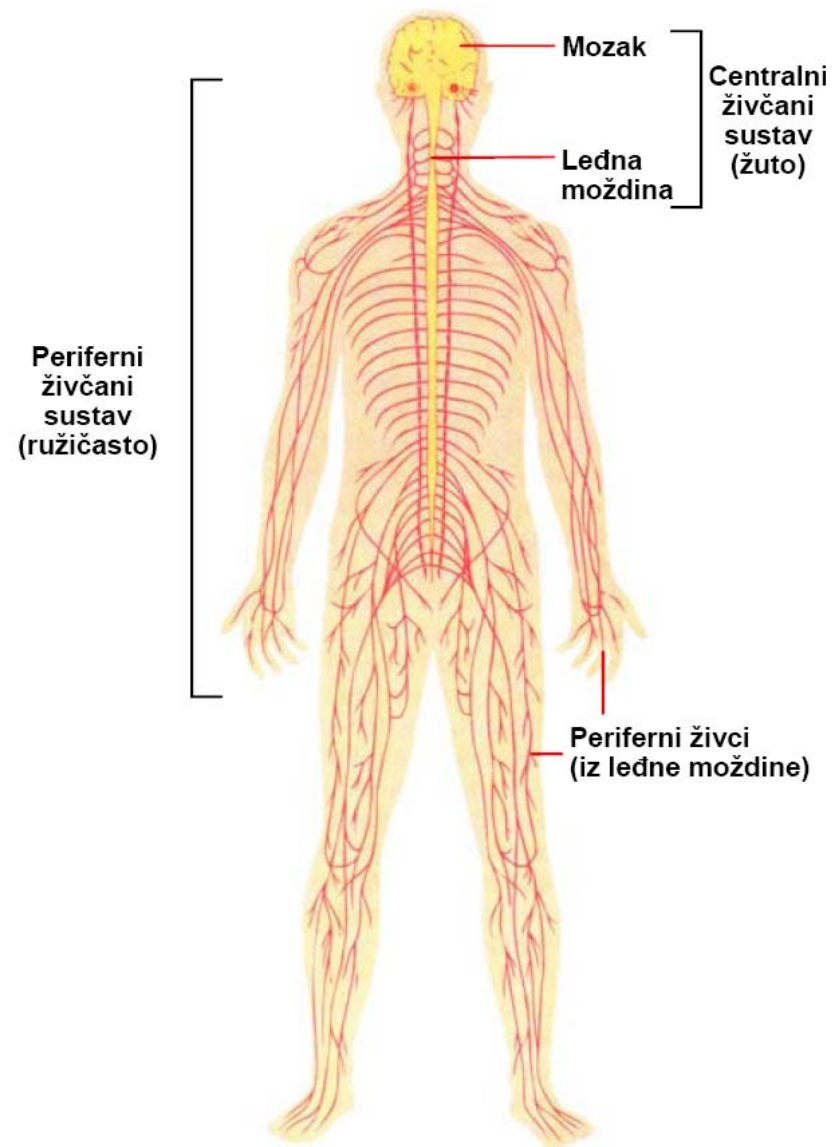
# Biomedicinski signali i sustavi

## 3. predavanje

# Ljudski organizam kao skup 11 sustava

1. Koštani
2. Mišićni
3. Živčani
4. Krvožilni
5. Dišni
6. Probavni
7. Urinarni
8. Reprodukcijski
9. Endokrini
10. Limfni
11. Ovojni (integumentni)

# Živčani sustav



# Centralni živčani sustav

- Izdvaja **značajne** informacije
- Uspoređuje **dolazeće** informacije s **pohranjenim** uzorcima
- Klasificira i upisuje **neke** podatke u memoriju
- Vrš **svjesno** upravljanje izlaznim sustavima ljudskog organizma (ponajprije kontrakcijom mišića)

# Autonomni živčani sustav

- Održava **homeostazu**
  - regulacijski sustav održavanja ravnotežnog stanja organizma
- Simpatički – parasimpatički sustav
  - Simpatički živčani sustav dio je autonomnog živčanog sustava, naročito je aktivan tijekom reakcija poput straha i tjeskobe koje troše tjelesne zalihe energije.
  - Parasimpatički živčani sustav ima suprotan učinak od simpatičkog. Putem neurotransmitera acetilkolina usporava frekvenciju srca, smanjuje snagu srčanih kontrakcija i snižava krvni tlak.

# Autonomni živčani sistem

- Agonistički – antagonistički sistem
- Glatki mišići
  - probava
  - izlučivanje (znoj, urin, fekalije)
- Lučenje žlijezda
  - biokemijska ravnoteža
- Srce (puls + pritisak + pH krvi)
- Disanje
- Temperatura
- Ravnoteža (lokomocija)

# Periferni živčani sustav

- aferentni
  - senzorička vlakna – prenose informaciju od osetila do leđne moždine ili mozga
- eferentni
  - motorička vlakna – prenose naredbu za kontrakciju do mišića

# Lokomotorni sustav

- Sustav organa za kretanje čovjeka čine:
  - kosti i spojevi među kostima (pasivni dio)
  - mišići (aktivni dio)



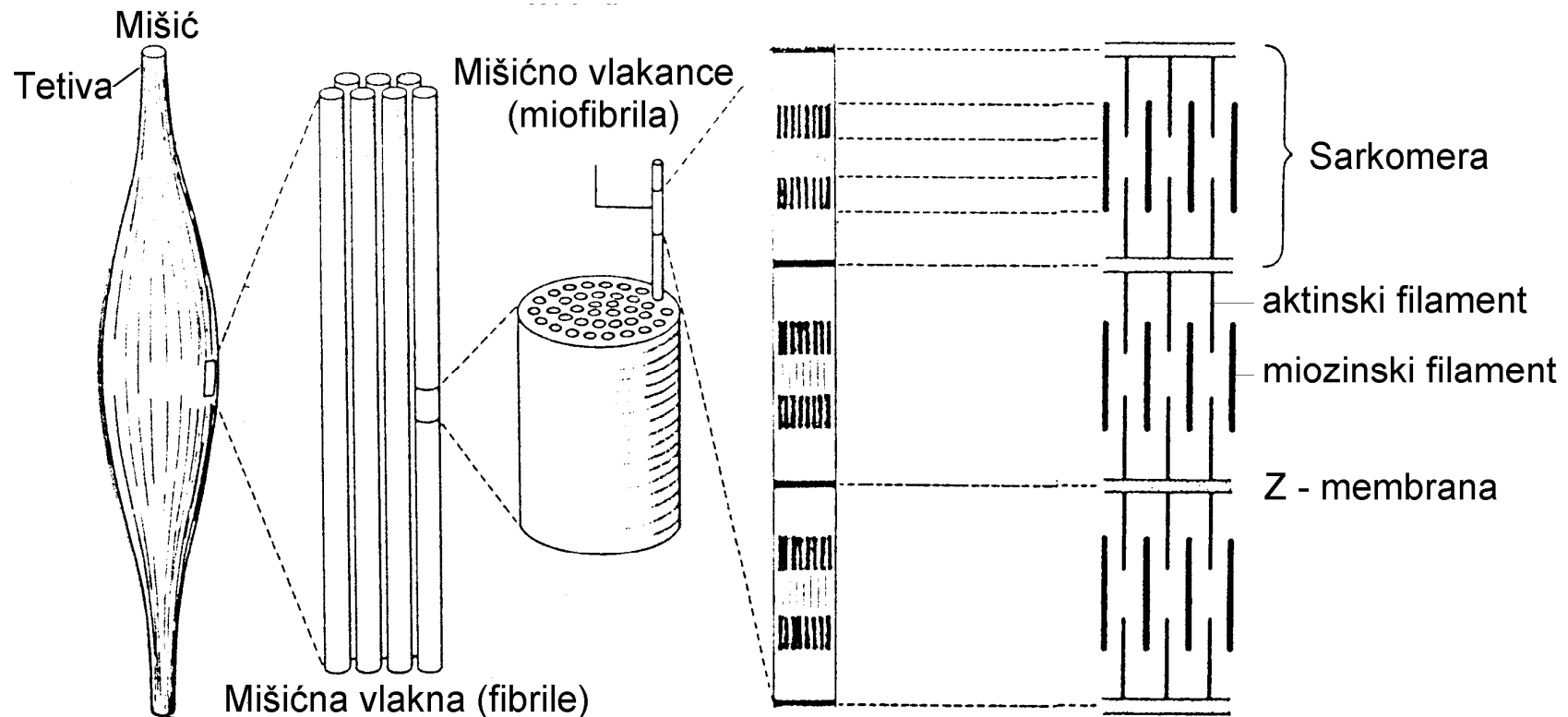
# Mišići

- Aktuatori
- Osnovna fiziološka svojstva mišićnog tkiva:
  - podražljivost (**ekcitabilnost**)
  - upravljivo skraćivanje (**kontraktibilnost**)
  - mogućnost istezanja i elastičnost
- Tri tipa mišića:
  - glatki
  - srčani
  - poprečno-prugasti (skeletni)
- Upravljeni su živcima preko posebnih sinapsi, tzv. motoričkih pločica koje predstavljaju **neuromuskularnu vezu**

# Građa skeletnih mišića

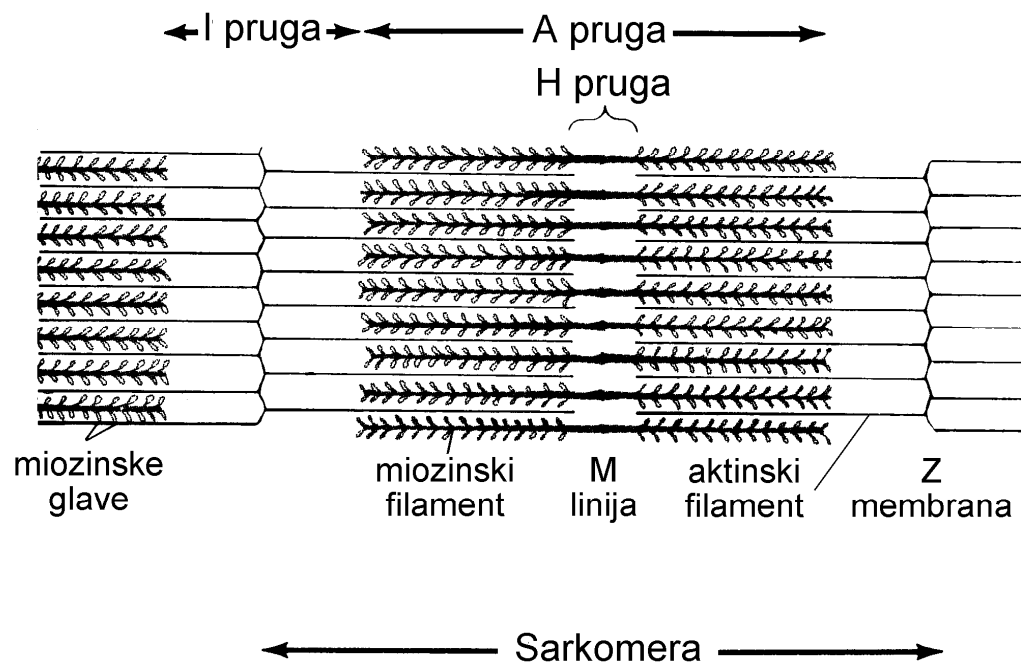
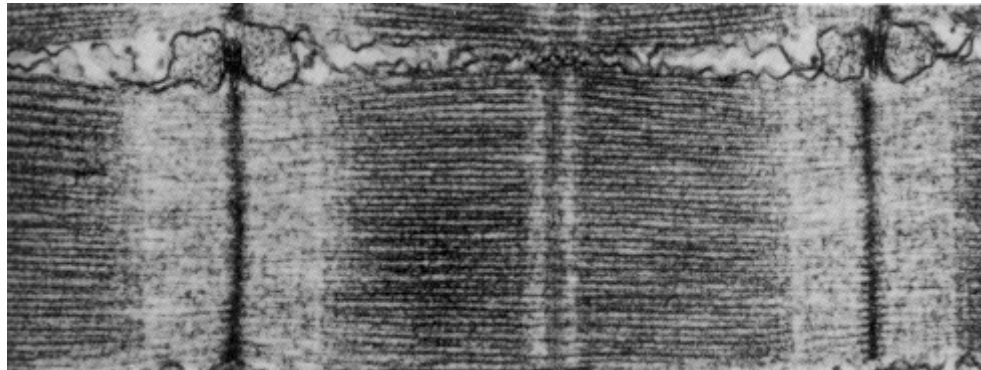
- Poprečno-prugasto mišićno tkivo
  - sastoji se od mišićnih vlakana (**fibrila**) od kojih svako predstavlja jednu veliku stanicu nastalu fuzijom mnogih zasebnih stanica
  - duljina mišićnog vlakna iznosi od 0,1 do 30 cm, a promjer od 10  $\mu\text{m}$  do 100  $\mu\text{m}$
  - mišićno vlakno građeno je od mišićnih valakanca (**miofibrila**) promjera 1- 2  $\mu\text{m}$  koja se uglavnom protežu cijelom duljinom mišićnog vlakna, a uzdužno su podijeljene poprečnim **Z-membranama** na segmente duljine oko 2,5  $\mu\text{m}$  - **sarkomere**

# Građa skeletnih mišića



- unutar sarkomere uzdužno su smješteni filamenti građeni od nitastih bjelančevina koje čine osnovu kontraktilnog mehanizma
- debeli filamenti (promjera oko 100 nm) građeni su od proteina **miozina**, a tanji (promjera oko 5 nm) od **aktina**

# Poprečno-prugasto mišično tkivo



# Poprečno-prugasto mišićno tkivo

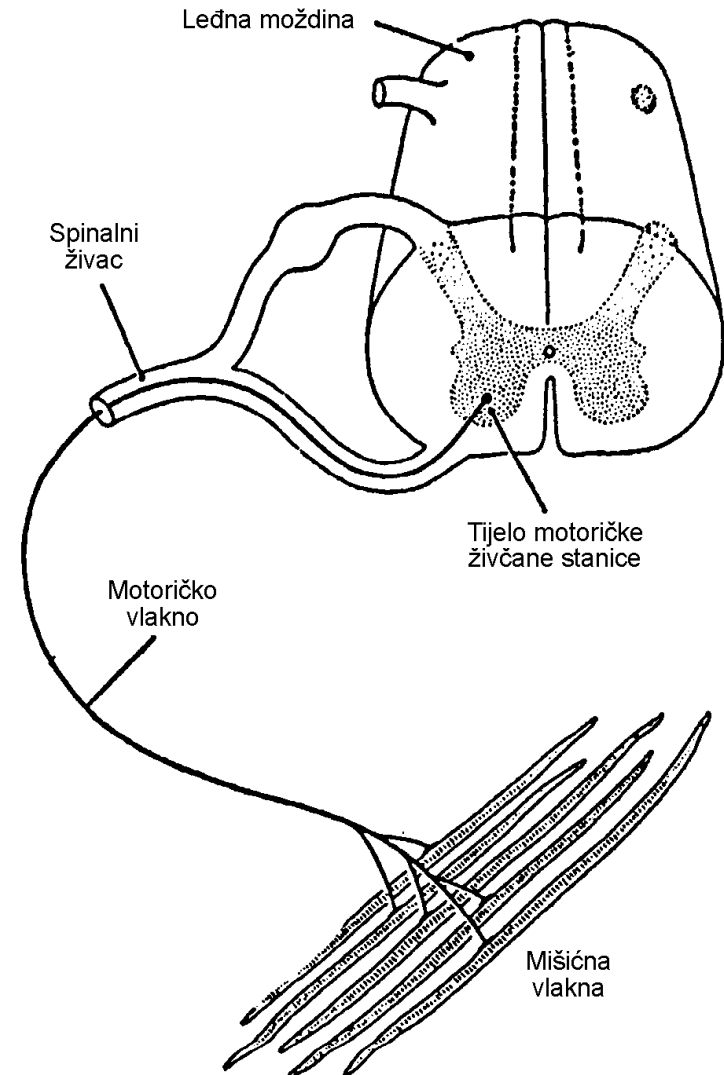
- Optički fenomen poprečne ispruganosti mišićnih vlakana uočljiv svjetlosnim mikroskopom uvjetovan je molekularnom građom miofibrila
- Razlog ispruganosti je raspored aktinskih i miozinskih filamenata
- Tamne pruge predstavljaju područja preklapanja aktinskih i miozinskih filamenata i nazivaju se A-pruge jer su optički anizotropne
- Svijetle pruge su područja u kojima se nalaze samo aktinski filament i nazivaju se I-pruge jer su optički izotropne

# Poprečno-prugasto mišićno tkivo

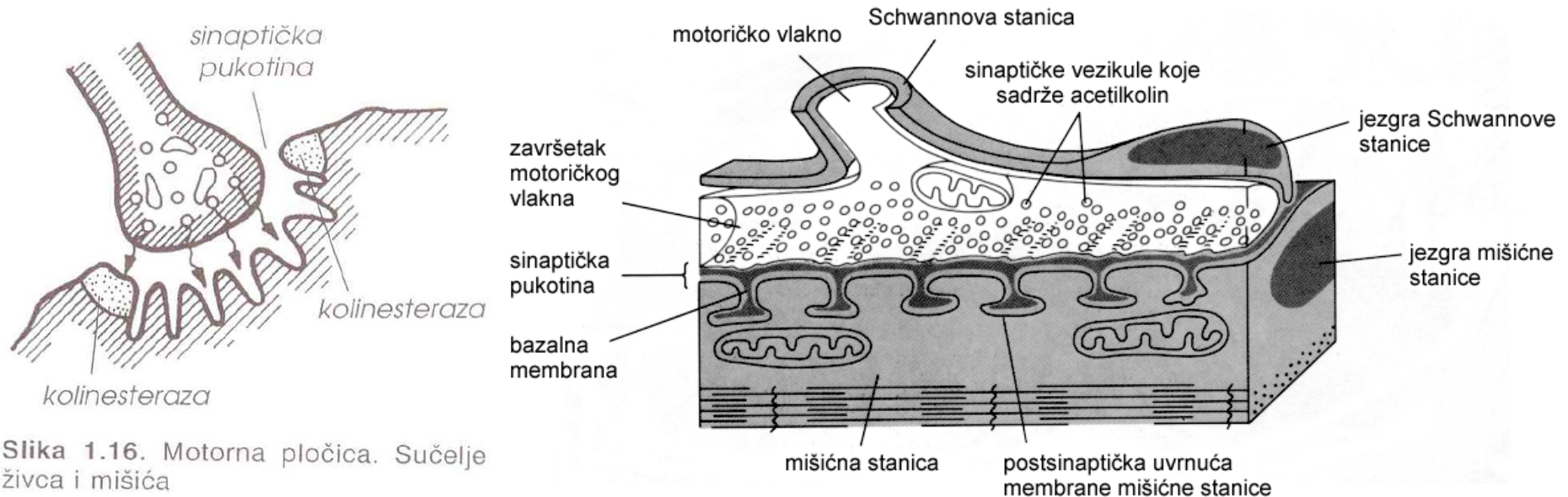
- U sredini tamne A-pruge nalazi se nešto svjetlija H-pruga (Hensenova membrana), a u njezinoj sredini nalazi se M-linija koju formiraju fina vlakanca što spajaju srednje dijelove miozinskih filamenata
- U sredini svijetle I-pruge nalazi se tanka, anizotropna Z-membrana. Ona nije ograničena samo na miofibrile već se proteže kroz čitavo mišićno vlakno formirajući Z-ploču
- Oko 2,5  $\mu\text{m}$  dugi segmenti mišićnog vlakna između dvije Z-membrane nazivaju se sarkomere

# Kontrakcija skeletnih mišića

- Jedna motorička živčana stanica i sva mišićna vlakna koja ona podražuje čine jednu **motoričku jedinicu**
- To je djelatna kontraktilna jedinica jer se prilikom podražaja motoričke živčane stanice sva mišićna vlakna unutar motoričke jedinice kontrahiraju istodobno
- Mišićna vlakna jedne motoričke jedinice nisu odijeljena anatomski u posebnu skupinu, već postoji znatna isprepletenost vlakana među susjednim motoričkim jedinicama



# Neuromuskularna veza

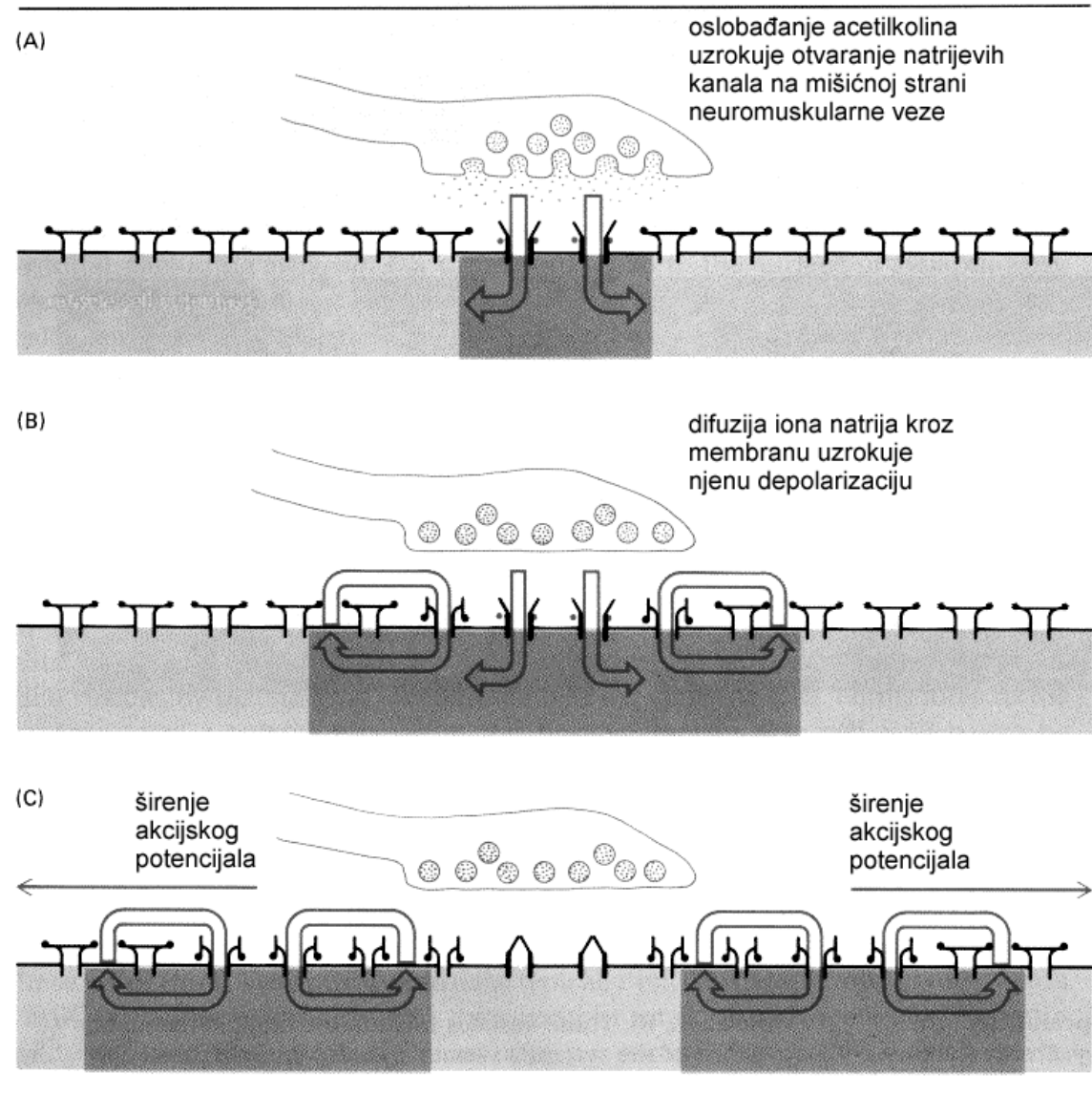


- Naborana postsinapsa – povećana površina, pojačano djelovanje acetilkolina
- 2 ms nakon lučenja acetilkolina luči se kolinesteraza koja ga razgrađuje
- Te 2 ms dovoljne su da acetilkolin izazove akcijski potencijal i kontrakciju mišića

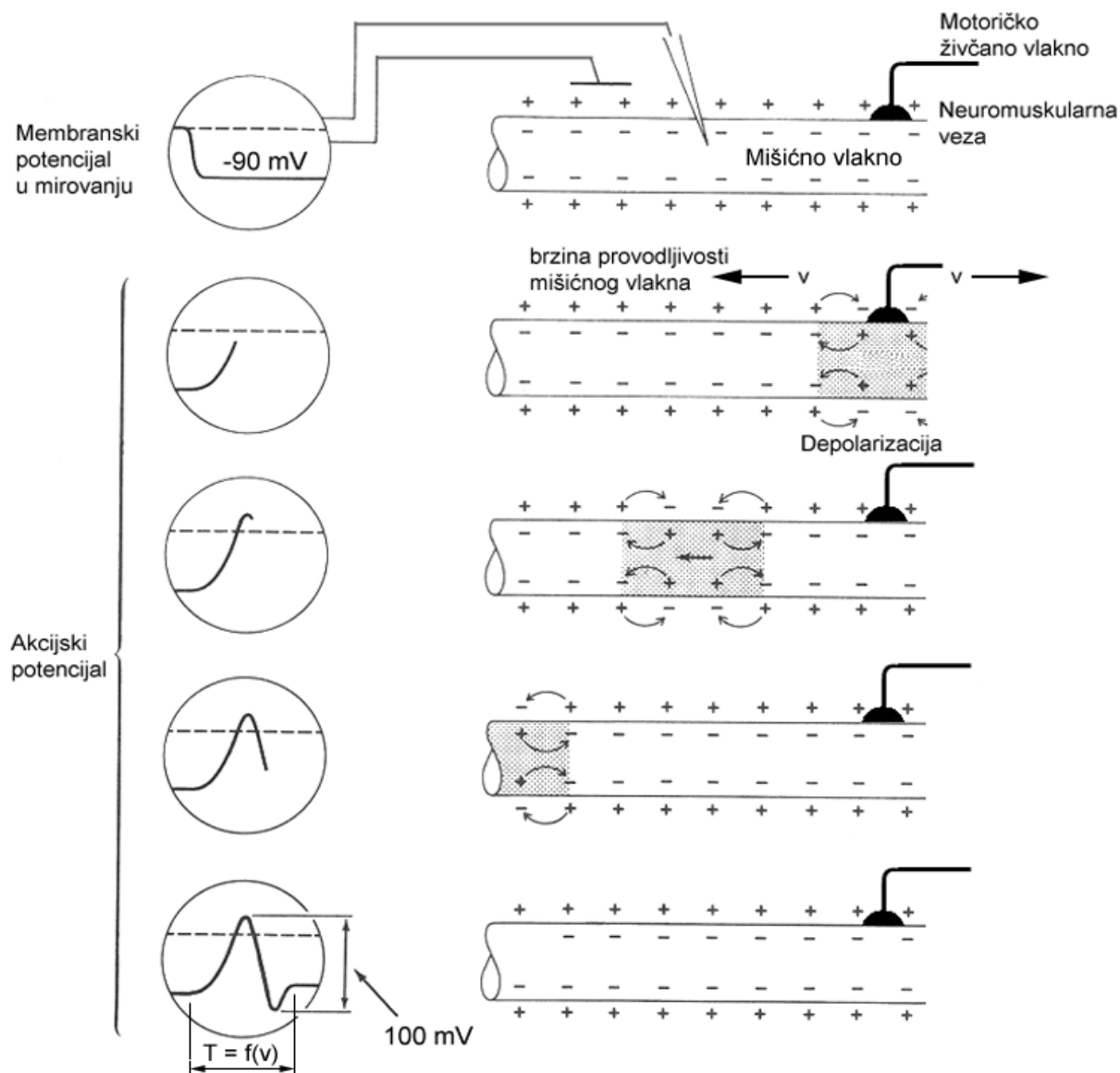


# Kontrakcija skeletnih mišića

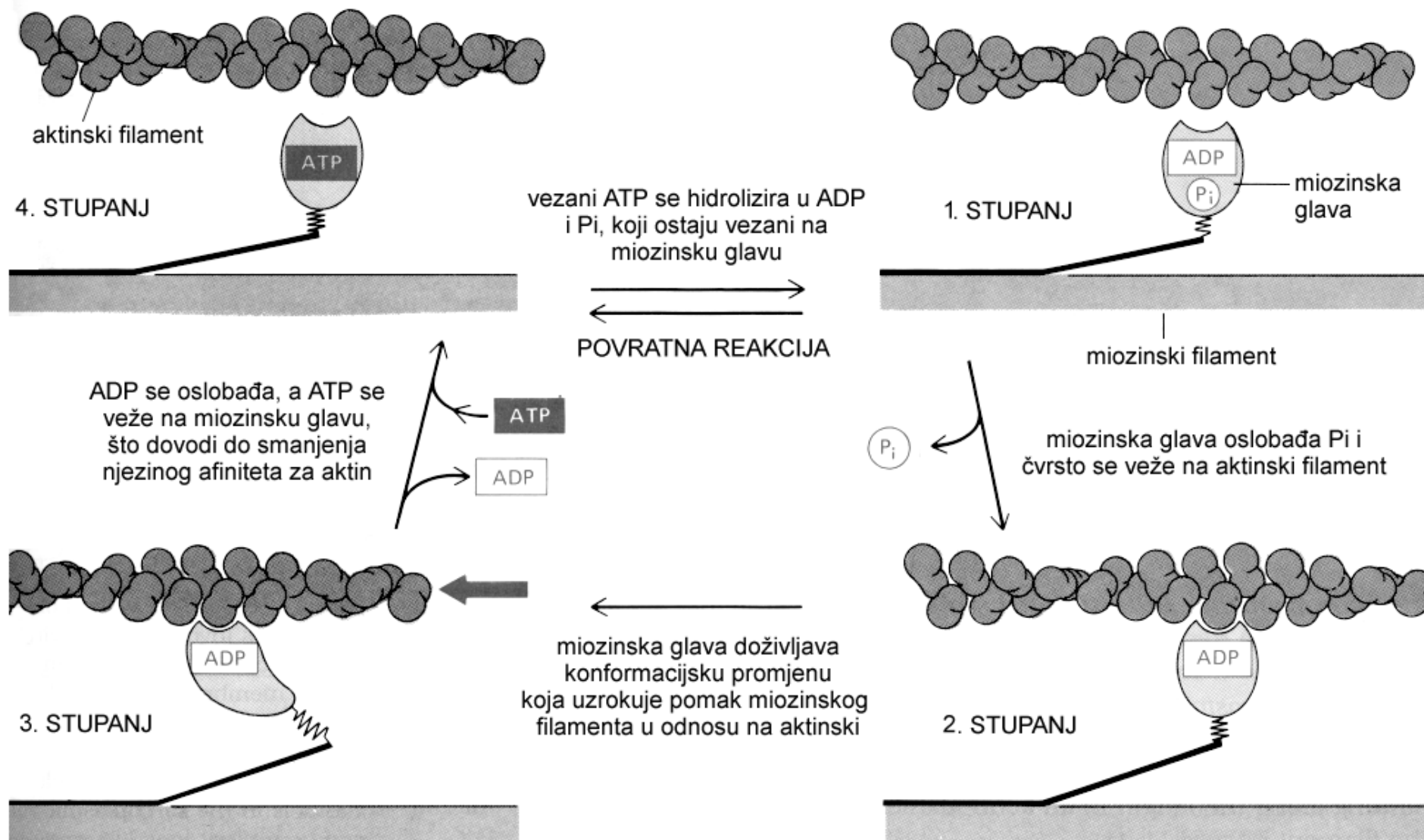
- Kontrakcija skeletnih mišića slijedi nakon živčanog podražaja mišićnog vlakna preko **neuromuskularne veze**
- Neuromuskularna veza nalazi se u pravilu na središnjem dijelu mišićnog vlakna kako bi se depolarizacija ravnomjerno širila u oba smjera
- Brzina kojom se depolarizacija širi uzduž mišićnog vlakna naziva se **brzina provodljivosti** mišićnog vlakna i iznosi od 2 do 6 m/s



# Akcijski potencijal

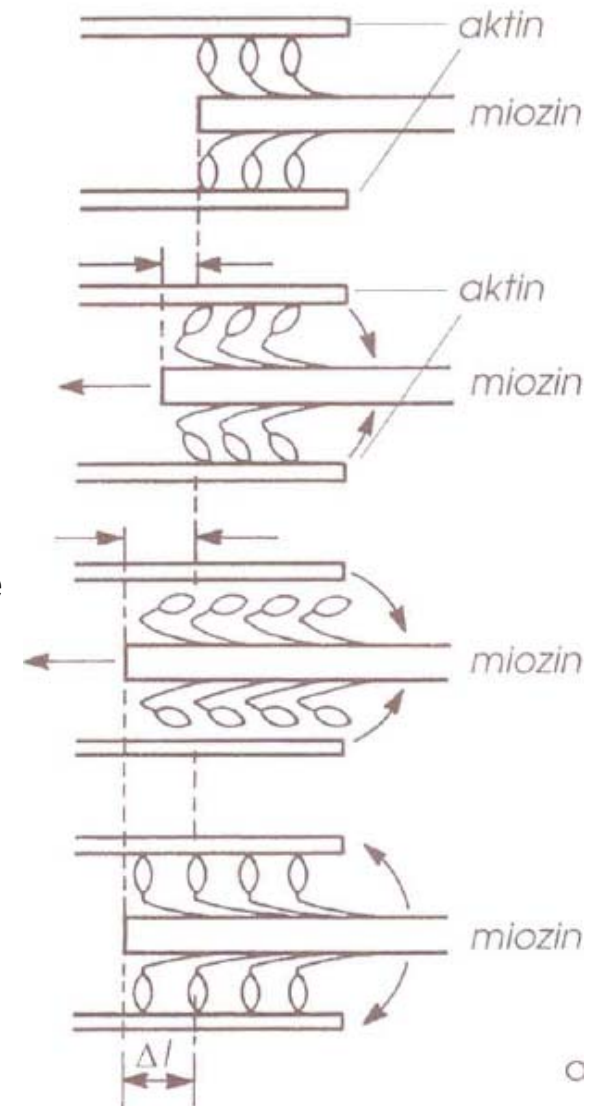


# Kontrakcija mišićnog vlakna



# Kontrakcija mišićnog vlakna

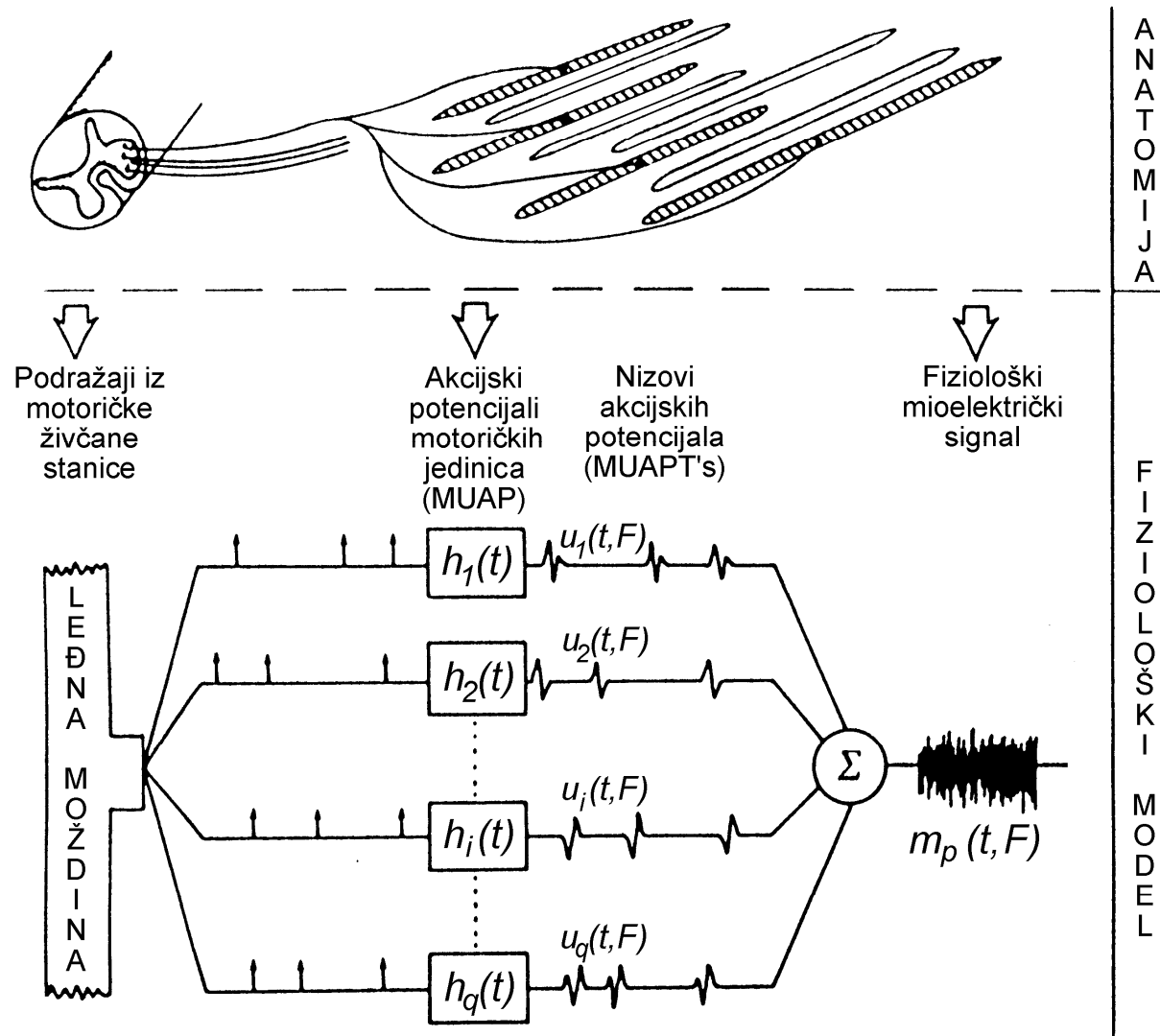
- 1. stupanj
  - molekula ATP-a veže se na miozinsku glavu koja ima sposobnost da ju hidrolizira u ADP i anorganski fosfat. Nakon te hidrolize, oba navedena produkta hidrolize (ADP i Pi) ostaju vezani uz miozinsku glavu
- 2. stupanj
  - energija oslobođena hidrolizom omogućuje naginjanje miozinske glave prema aktivnom mjestu aktinskog filameta i uspostavljanje slabe veze između tih dviju molekula
- 3. stupanj
  - interakcija aktina i miozinske glave uzrokuje oslobađanje molekula ADP i Pi. Dok se one oslobode, miozinska glava se veže snažnije na aktinski filament i promjenom molekularne konformacije poprečnog mosta i glavičice stvara silu za klizanje aktinske molekule 5 – 10 nm u smjeru H-pruge
- 4. stupanj
  - miozinska glava ostaje čvrsto vezana uz aktin tako dugo dok vezanje nove molekule ATP-a ne omogući prekidanje veze aktinskog filameta i miozinske glave, čime je uz povrat poprečnog mosta i glavičice u početni položaj stvoren preduvjet za novi ciklus



# Tipovi mišićnih vlakana

- Spora oksidacijska vlakna (SO ili tip I)
- Brza oksidacijsko-glikolitička vlakna (FOG ili tip IIA)
- Brza glikolitička vlakna (FG ili tip IIB)
  - Podjela provedena na temelju brzine kojom molekula miozina hidrolizira molekulu ATP-a pri kontrakciji u pojedinom tipu vlakna

# Fiziološki mioelektrički signal



# Mišićni umor

- stanje privremenog sniženja sposobnosti obavljanja rada određenog intenziteta uzrokovano upravo tim radom (Heimer, 1987.)

# Procjena mišićnog umora

- praćenje sniženja sposobnosti **obavljanja rada** određenog intenziteta
- određivanje **koncentracije laktata** u mišiću na temelju uzoraka tkiva uzetih u određenim vremenskim intervalima tijekom rada (Horita i Ishiko, 1987)
- analiza **mioelektričkih signala**



# Statičko i dinamičko umaranje mišića

- Statičko umaranje
- statička kontrakcija
  - ne mijenja se duljina mišića (izometrijska kontrakcija)
  - kod kontrakcija većeg intenziteta smanjen protok krvi kroz mišić
- Dinamičko umaranje
- dinamičke kontrakcije
  - mijenjaju se dimenzije mišića
  - promjenjiva sila kontrakcije
  - sila kontrakcije opada s brzinom kontrakcije
  - povećan protok krvi kroz mišić

# Cilj istraživanja

- razvoj metode mjerenja i analize površinskih mioelektričkih signala radi procjene umaranja mišića tijekom voljnih cikličkih dinamičkih kontrakcija

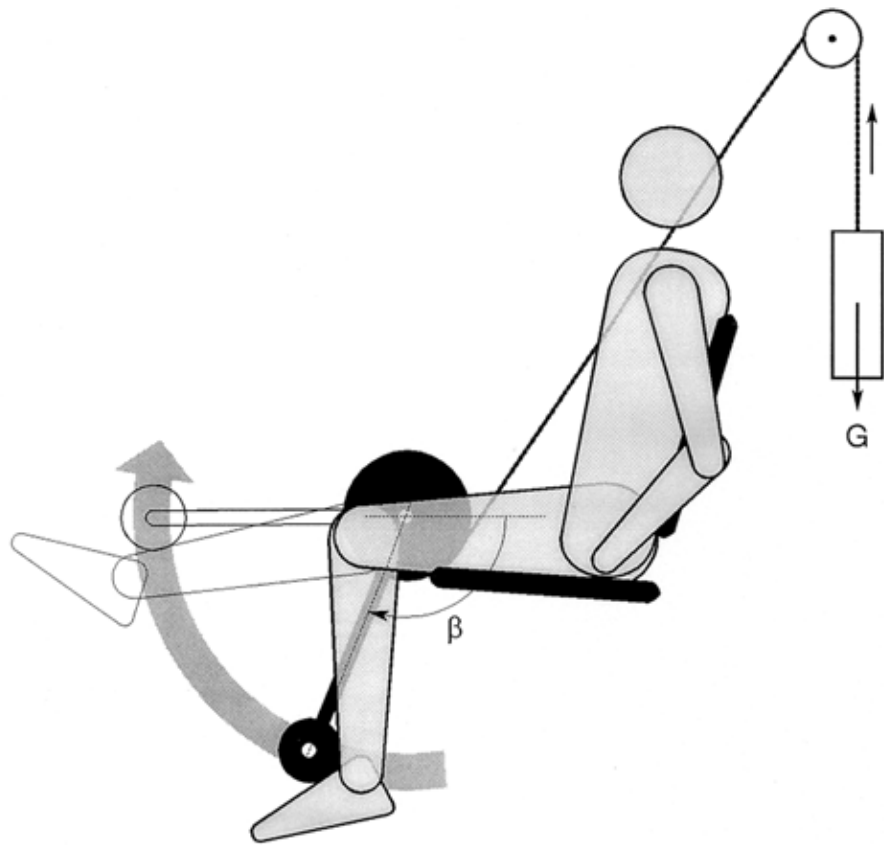
# Površinska elektromiografija

- Prednosti

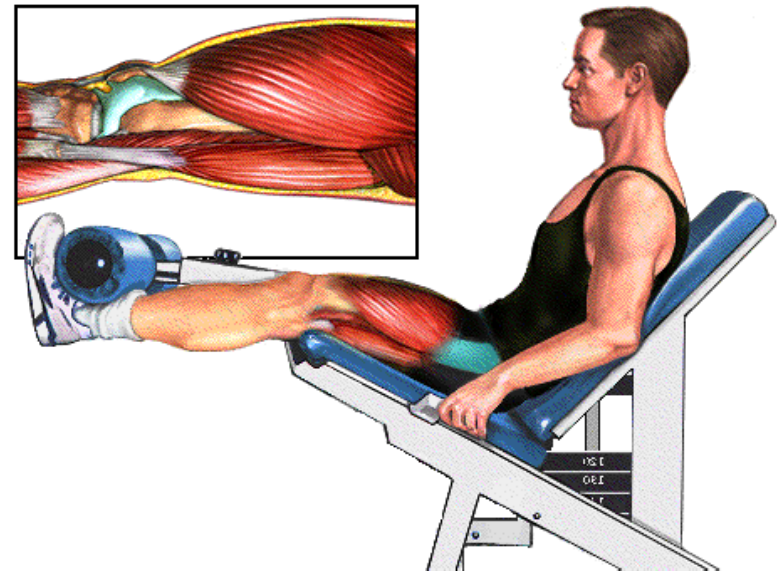
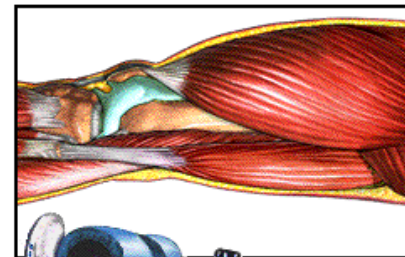
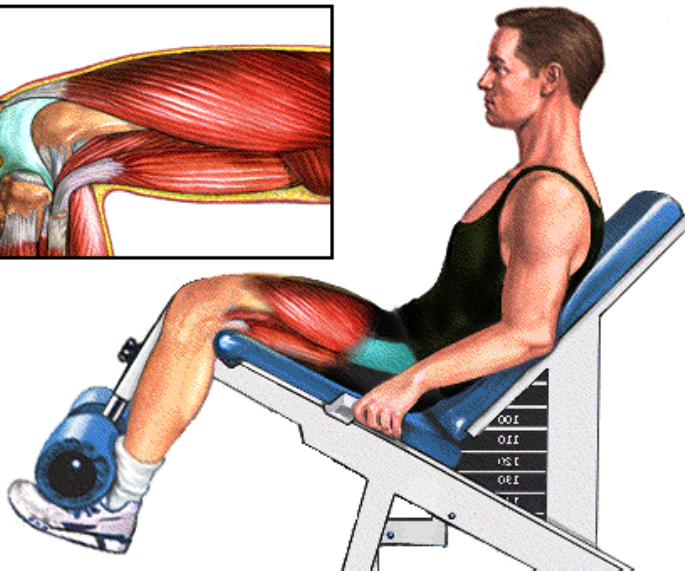
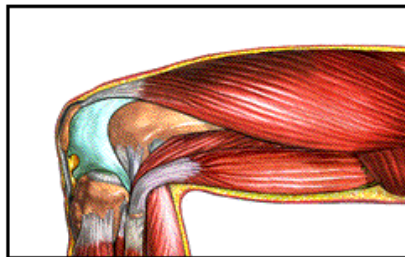
- neinvazivnost
- praćenje aktivnosti mišića u stvarnom vremenu
- mogućnost praćenja aktivnosti pojedinih mišića u grupi agonista
- svojstva mioelektričkog signala ovise o biokemijskim i fiziološkim promjenama u mišiću tijekom rada

# Površinska elektromiografija

- Nedostaci
  - mogućnost praćenja samo **površinskih mišića**
  - **preslušavanje** signala sa susjednih mišića

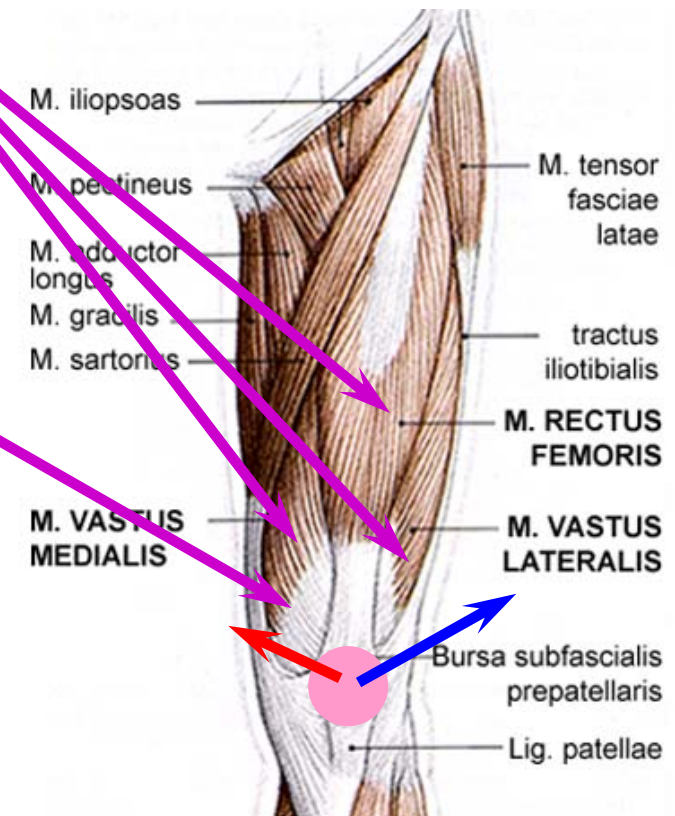


a4.avi



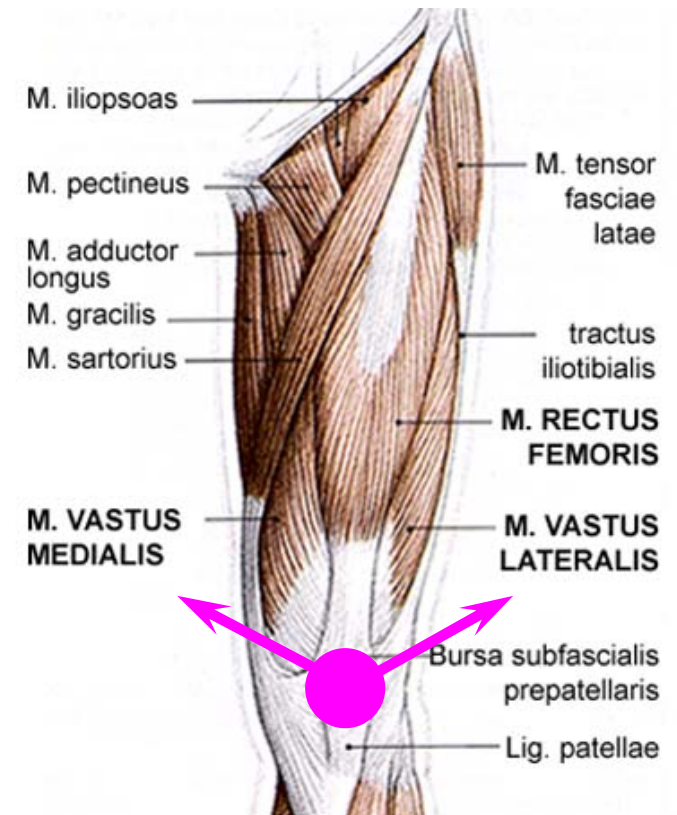
# Neke posljedice ozljede koljena:

- atrofija mišića kvadricepsa
- *vastus medialis* je prvi mišić iz grupe kvadricepsa koji atrofira i sporije reagira na rehabilitaciju od mišića *vastus lateralis* te djeluje manjom silom na patelu.
- ↓ ta neravnoteža može uzrokovati disfunkciju vođenja patele (engl. *patellar tracking dysfunction*)



# Neki od ciljeva rehabilitacije:

- jačanje mišića koji okružuju koljeno
- uspostava ravnoteže (neuromuskularne koordinacije) između mišića *vastus medialis* i *vastus lateralis*

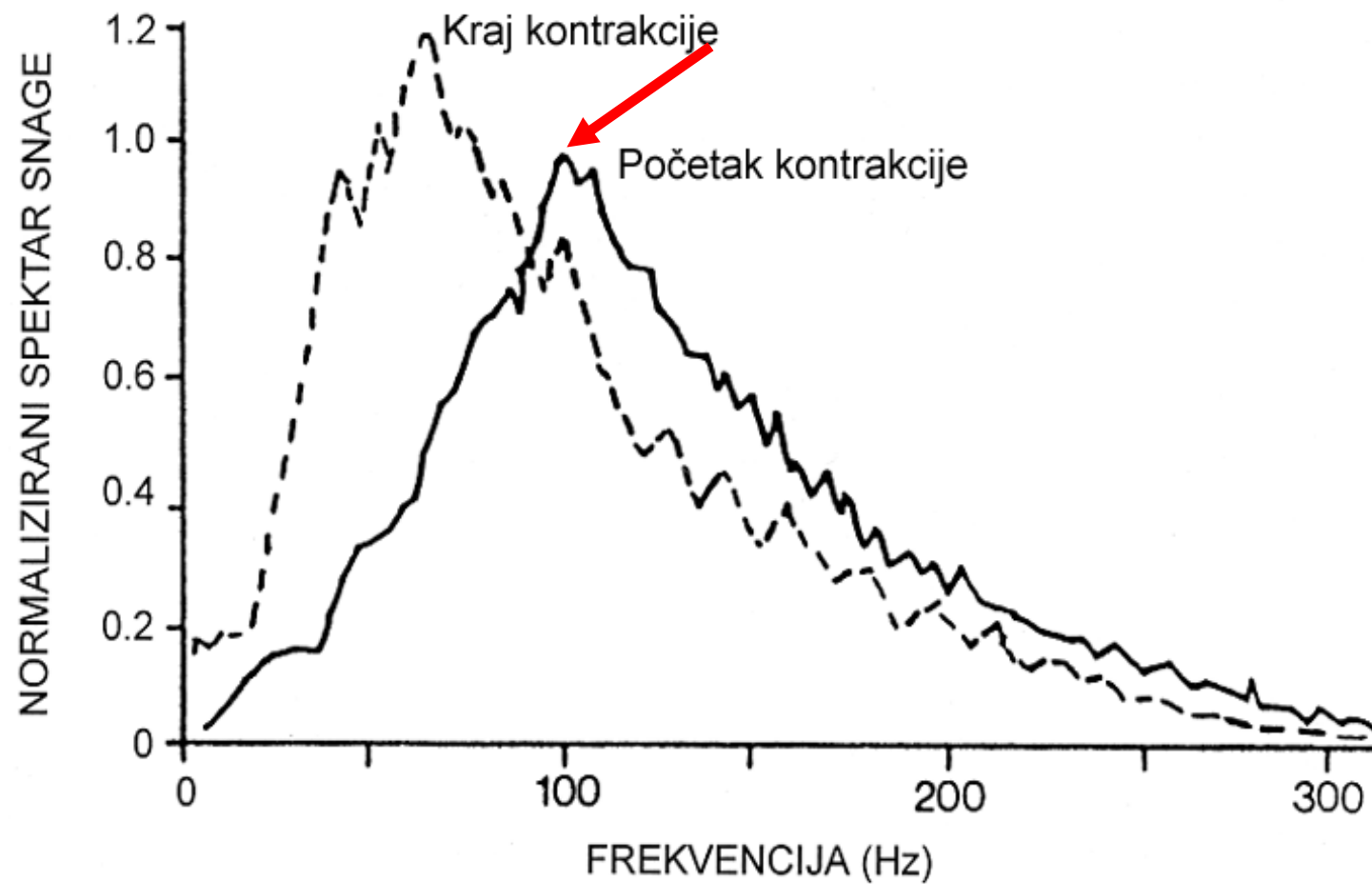


# Dosadašnje spoznaje

- statičko umaranje:
  - smanjuje se **brzina provodljivosti** mišićnog vlakna
  - povećava se **trajanje** akcijskog potencijala
  - spektar snage površinskog mioelektričkog signala se pomiče prema **nižim frekvencijama**
  - **raste amplituda** površinskog mioelektričkog signala

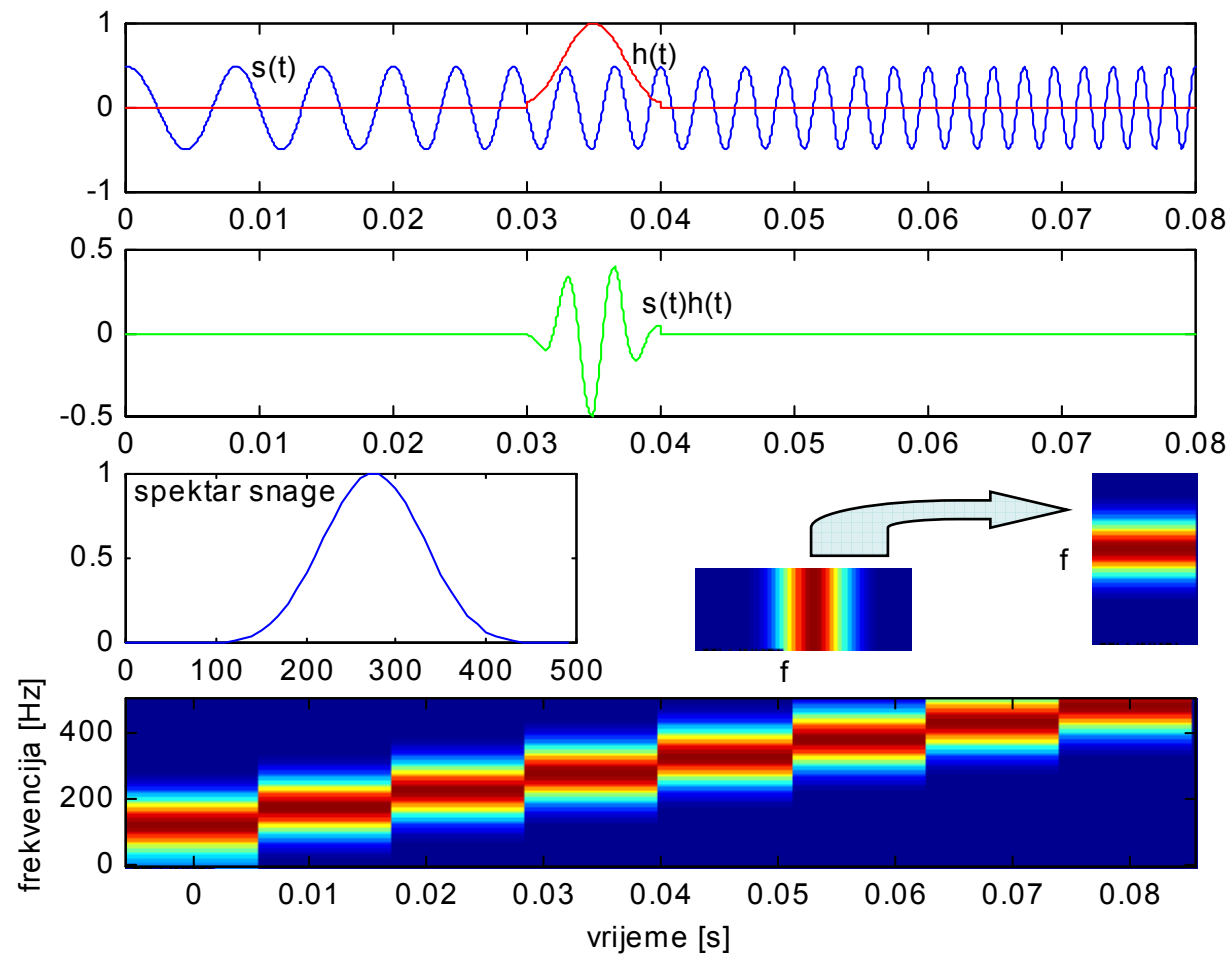


# Promjena spektra snage sEMG



# STFT

## (Short Time Fourier Transform)

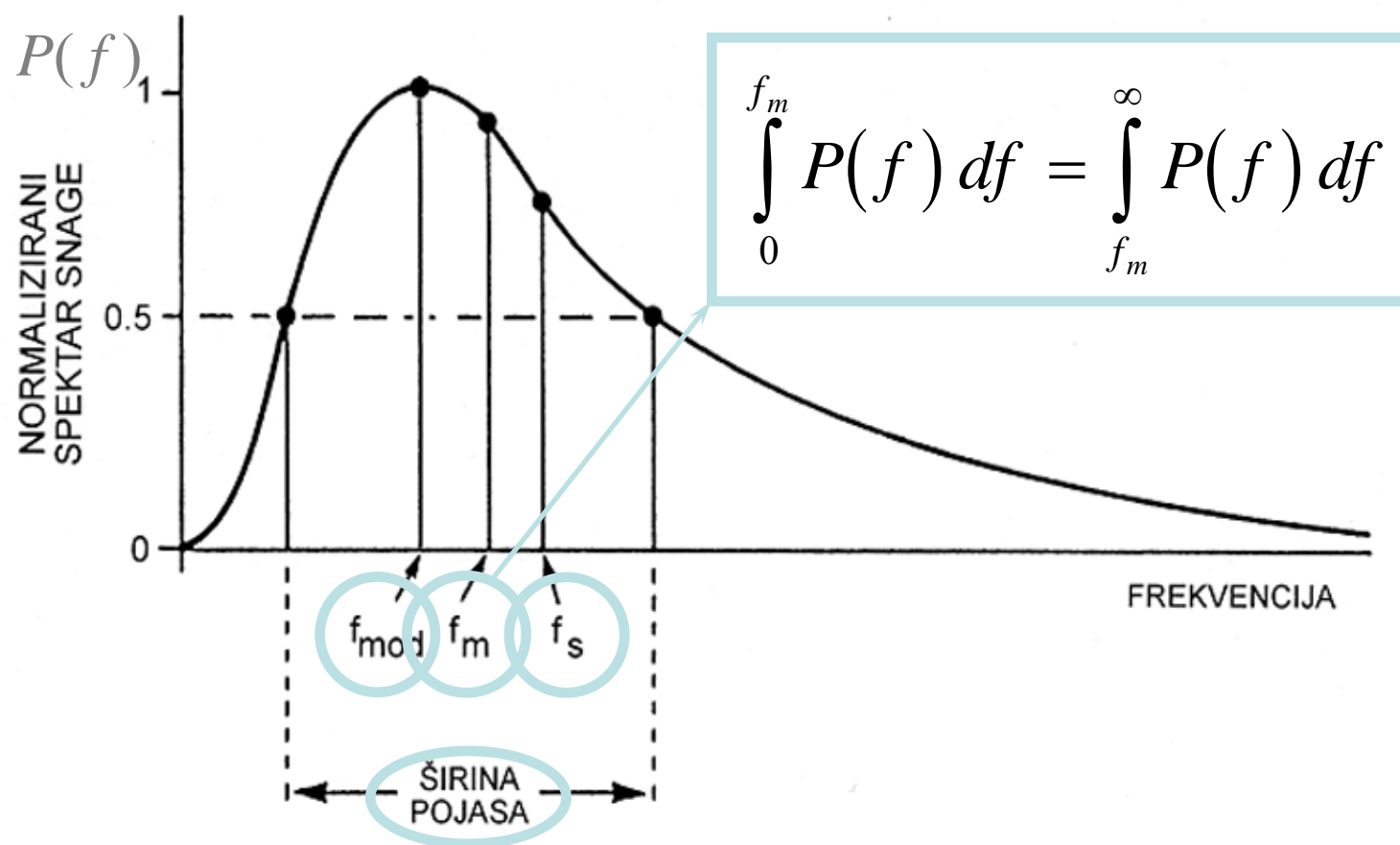


# STFT i Spektrogram

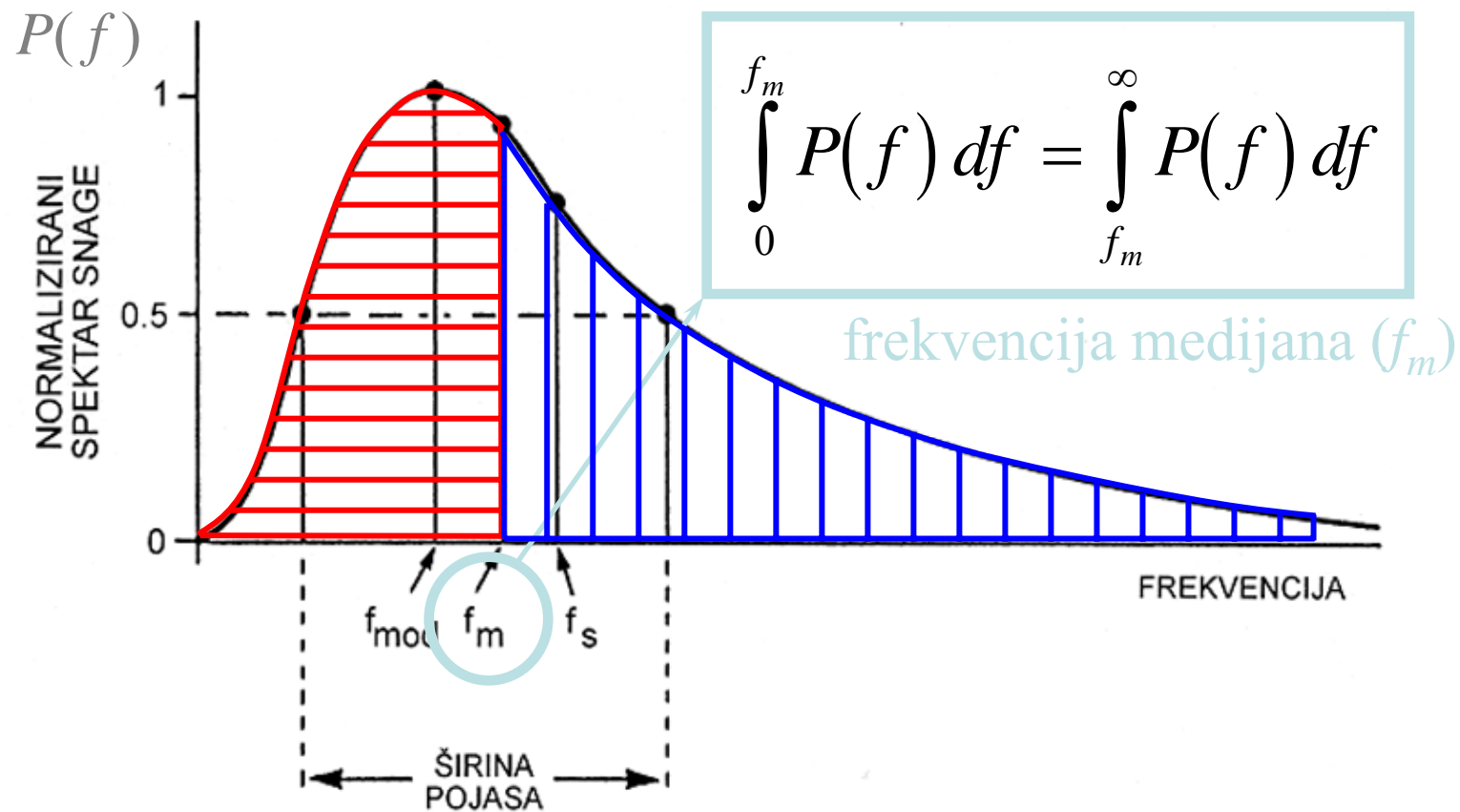
$$S_t(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e^{-j\omega\tau} s(\tau) h(\tau - t) d\tau$$

$$P_{SP}(t, \omega) = |S_t(\omega)|^2 = \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e^{-j\omega\tau} s(\tau) h(\tau - t) d\tau \right|^2$$

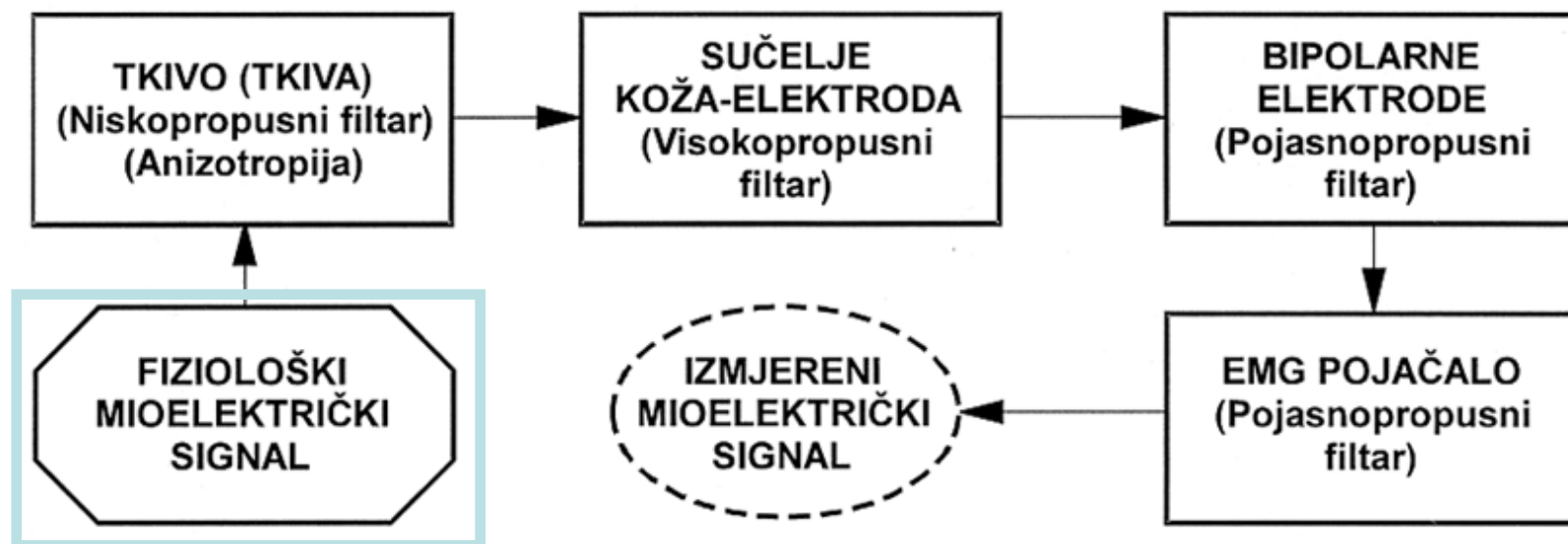
# Karakteristične frekvencije spektra snage EMG signala

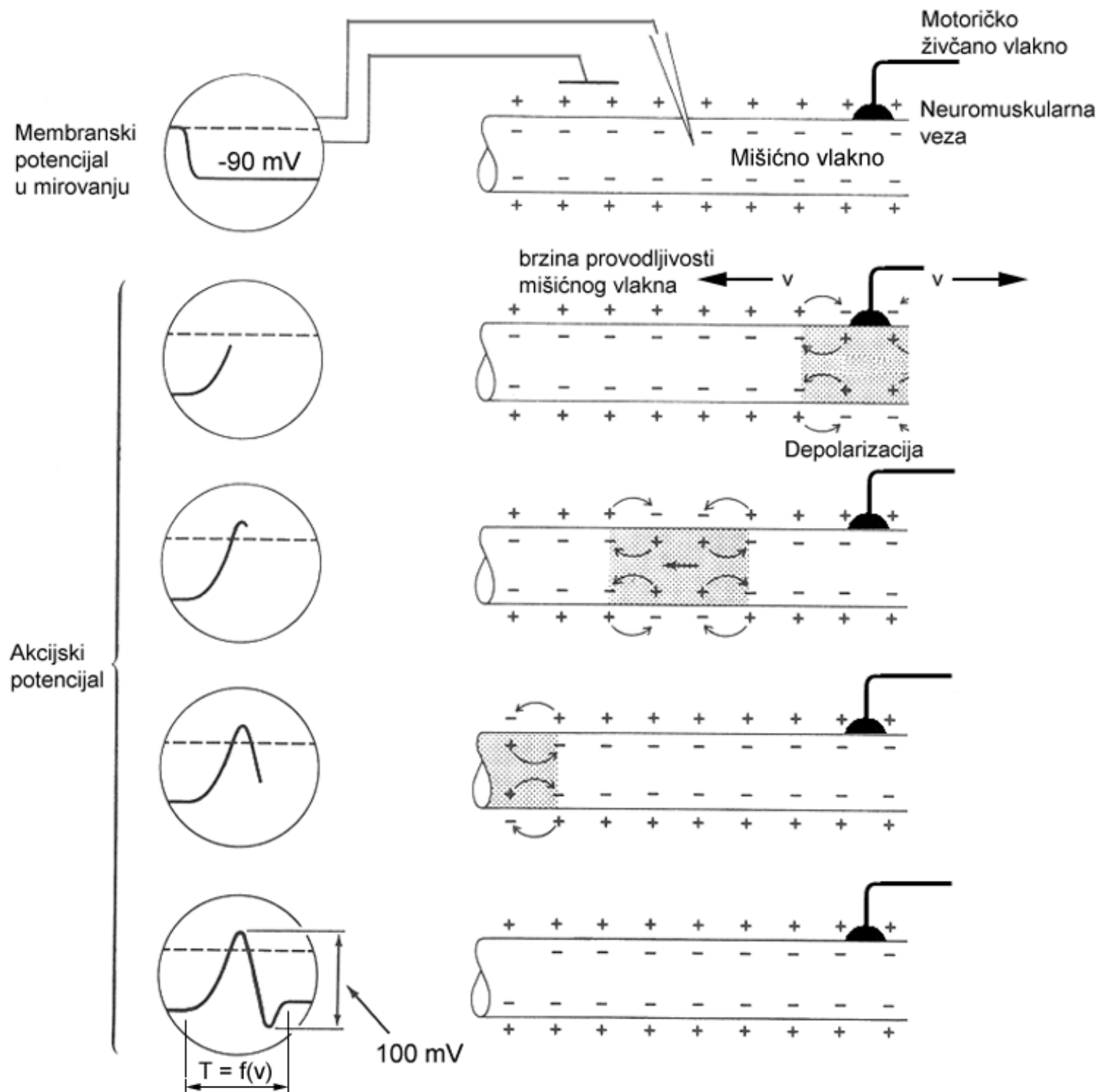


# Frekvencija medijana spektra snage EMG signala

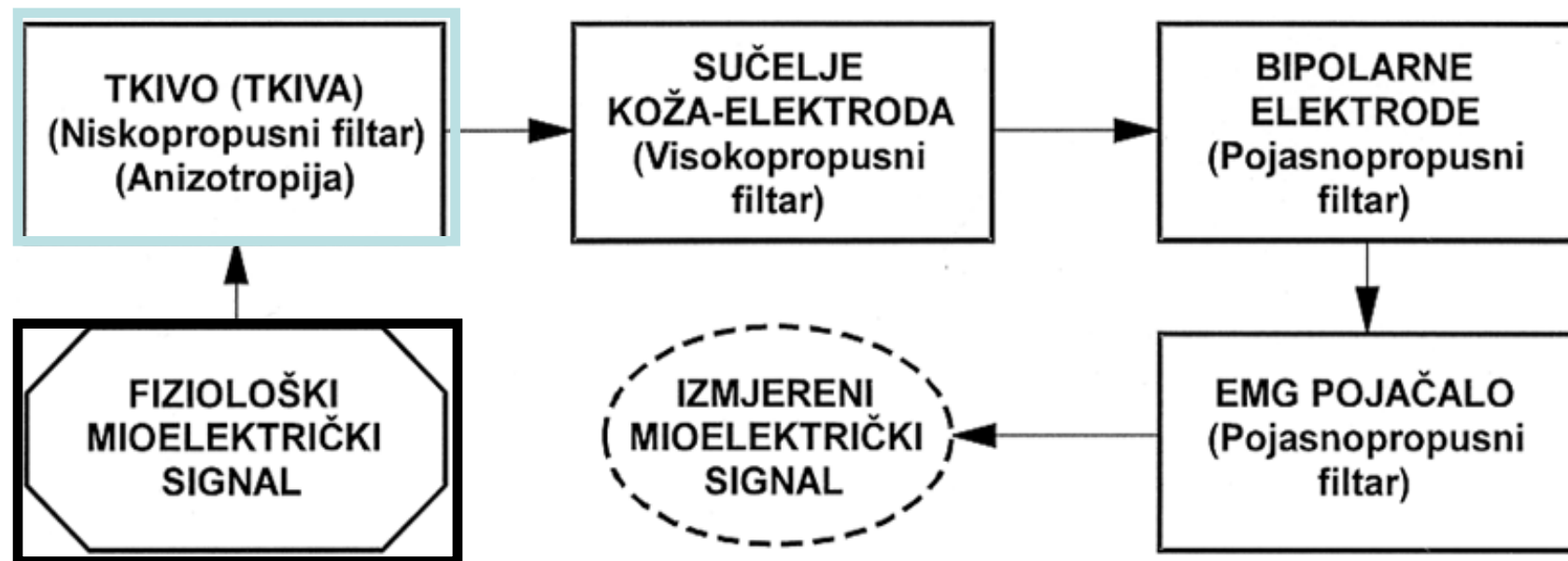


# Mjerenje površinskog mioelektričkog signala





# Mjerenje površinskog mioelektričkog signala





# Filtarsko svojstvo tkiva

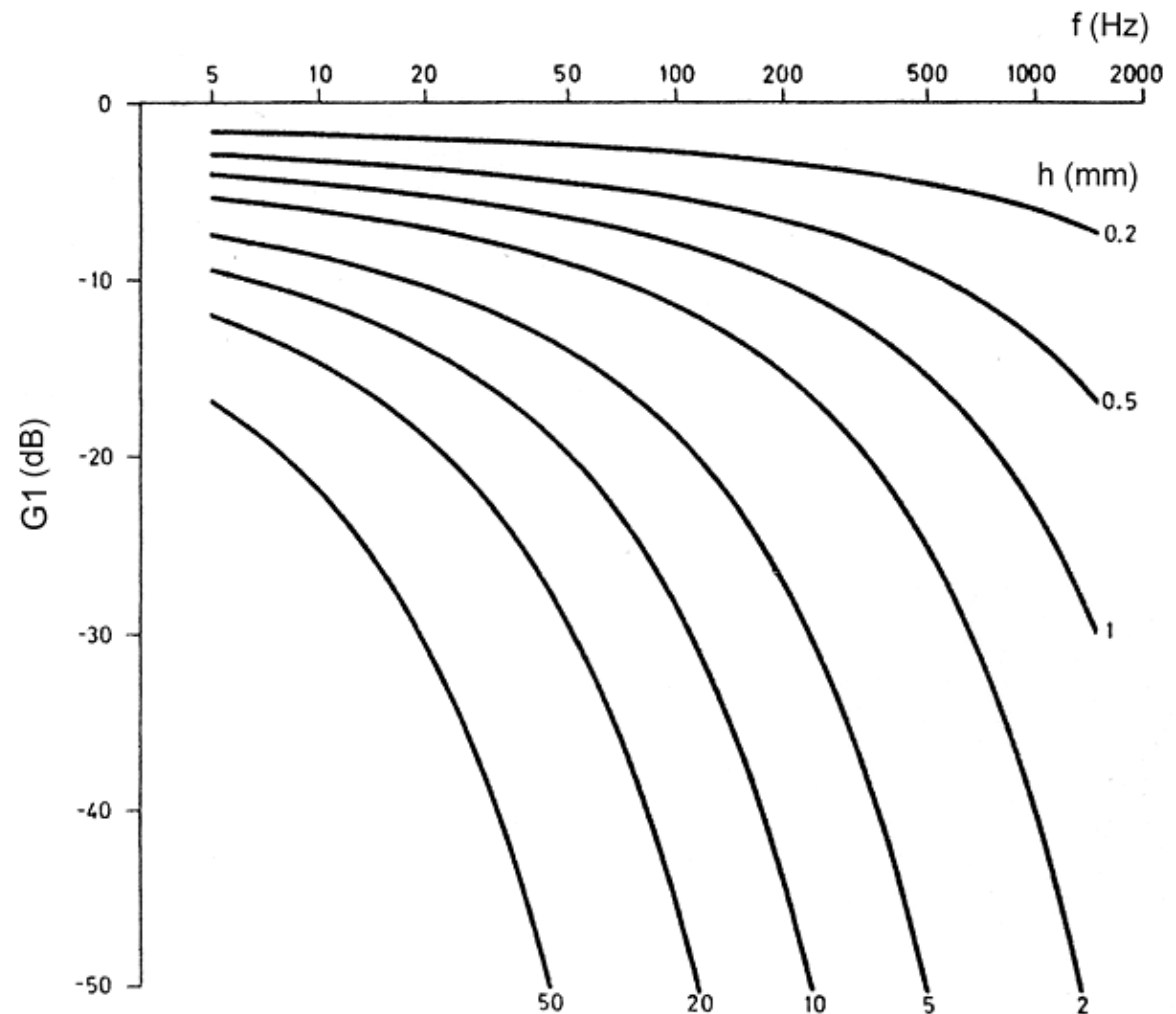
$$G_1 = \frac{K_0\left(\frac{2\pi f h}{v}\right)}{K_0\left(\frac{2\pi f a}{v}\right)}$$

$h$  = udaljenost aktivnog  
mišićnog vlakna od  
elektroda

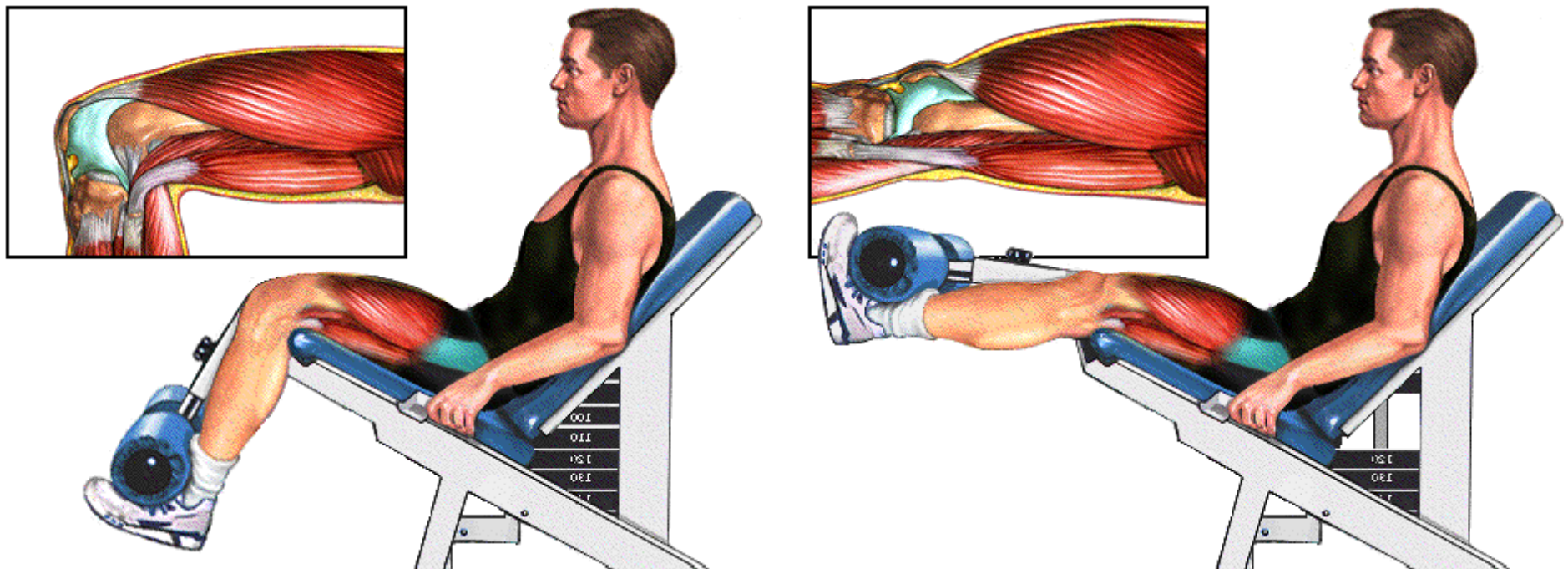
$v$  = brzina provodljivosti  
mišićnog vlakna

$a$  = polumjer mišićnog  
vlakna

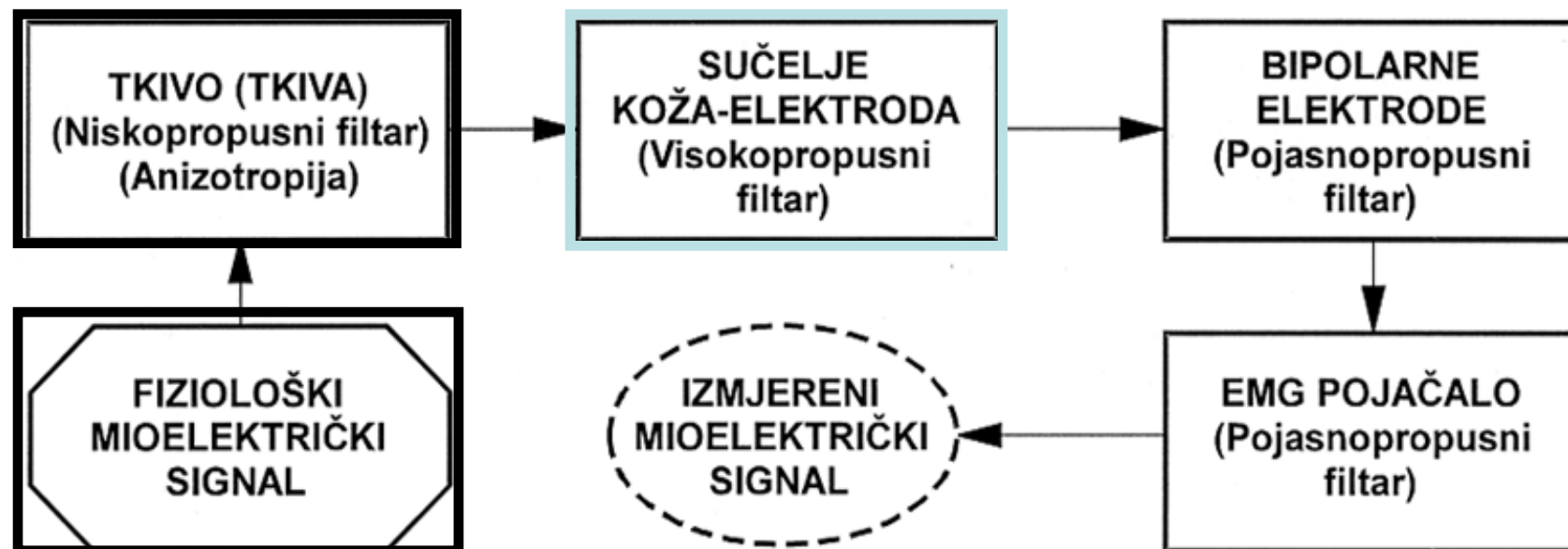
$K_0$  = modificirana Besselova  
funkcija druge vrste, nultog  
reda



# Promjena dimenzija mišića tijekom dinamičkih kontrakcija



# Mjerenje površinskog mioelektričkog signala



# Sučelje koža - elektroda

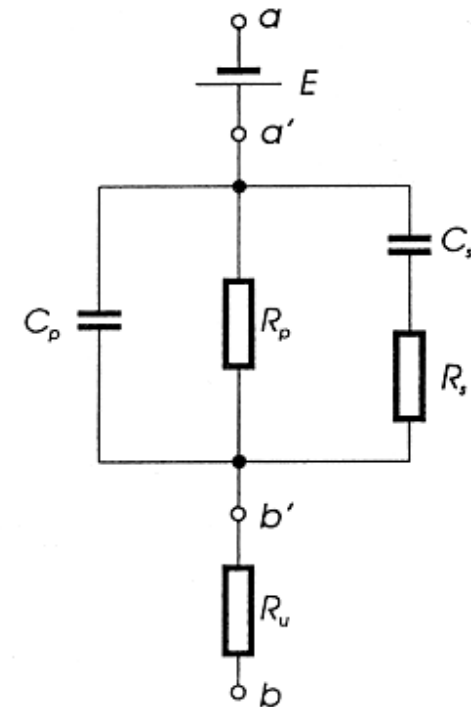
$$Y = \frac{1}{R_p} + \frac{\omega^2 C_s^2 R_s^2}{R_s} + j\omega(C_p + C_s), \quad \omega^2 C_s^2 R_s^2 \ll 1$$

$R_p$  = otpor kože

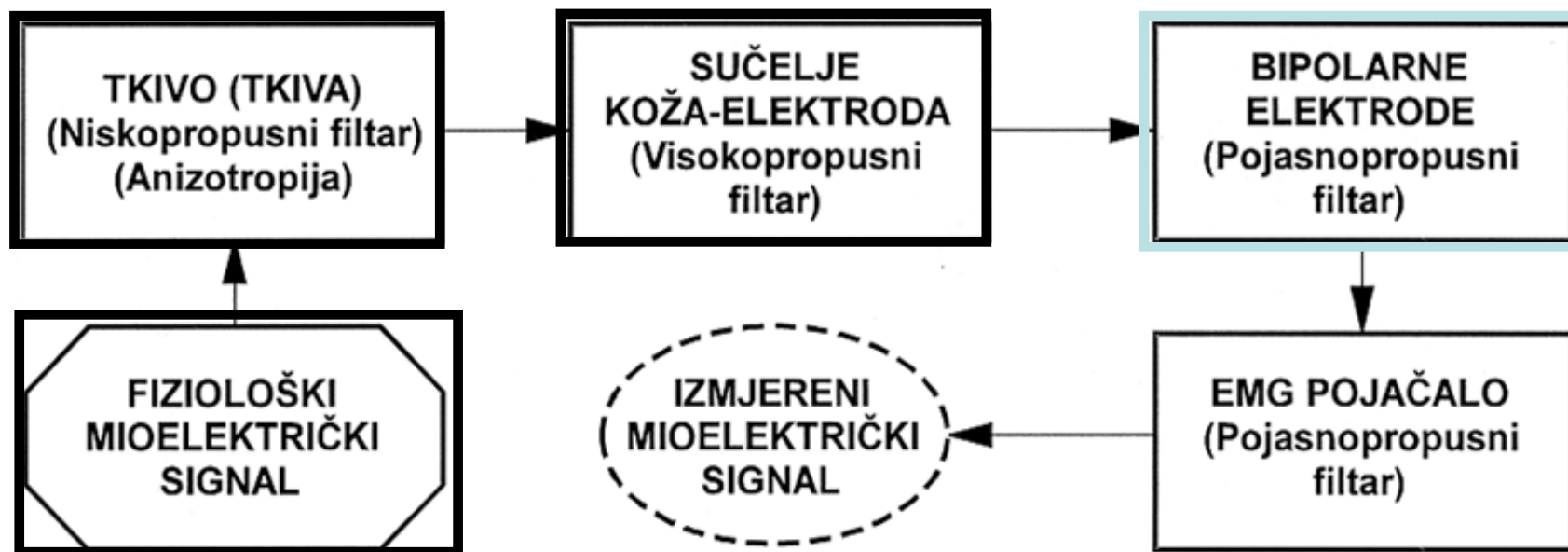
$C_p$  = kapacitet kože

$C_s$  = kapacitet električkog dvosloja

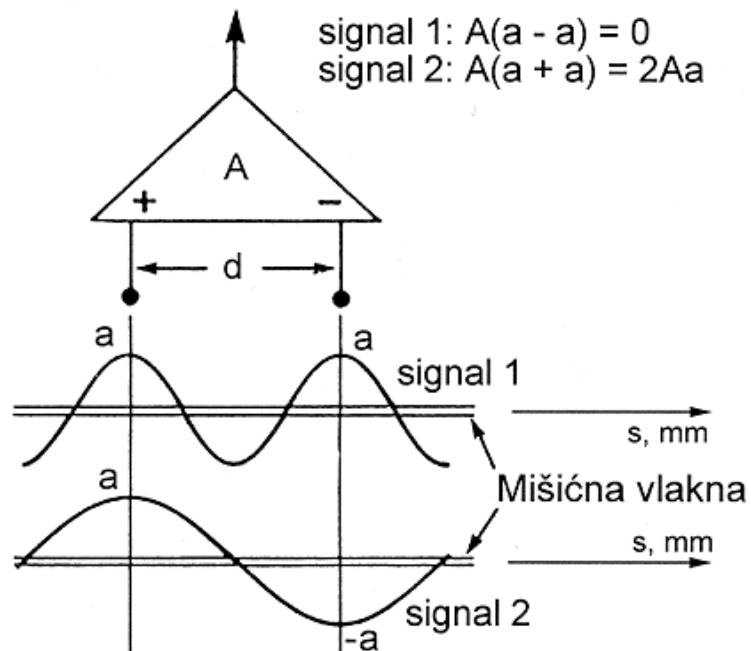
$R_s$  = otpor električkog dvosloja



# Mjerenje površinskog mioelektričkog signala

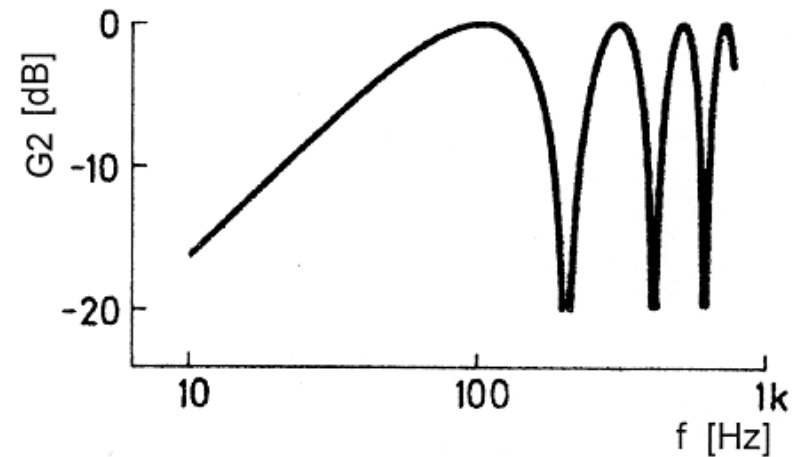


# Bipolarna konfiguracija elektroda i diferencijalno pojačalo



$$v = 4 \text{ m/s}$$

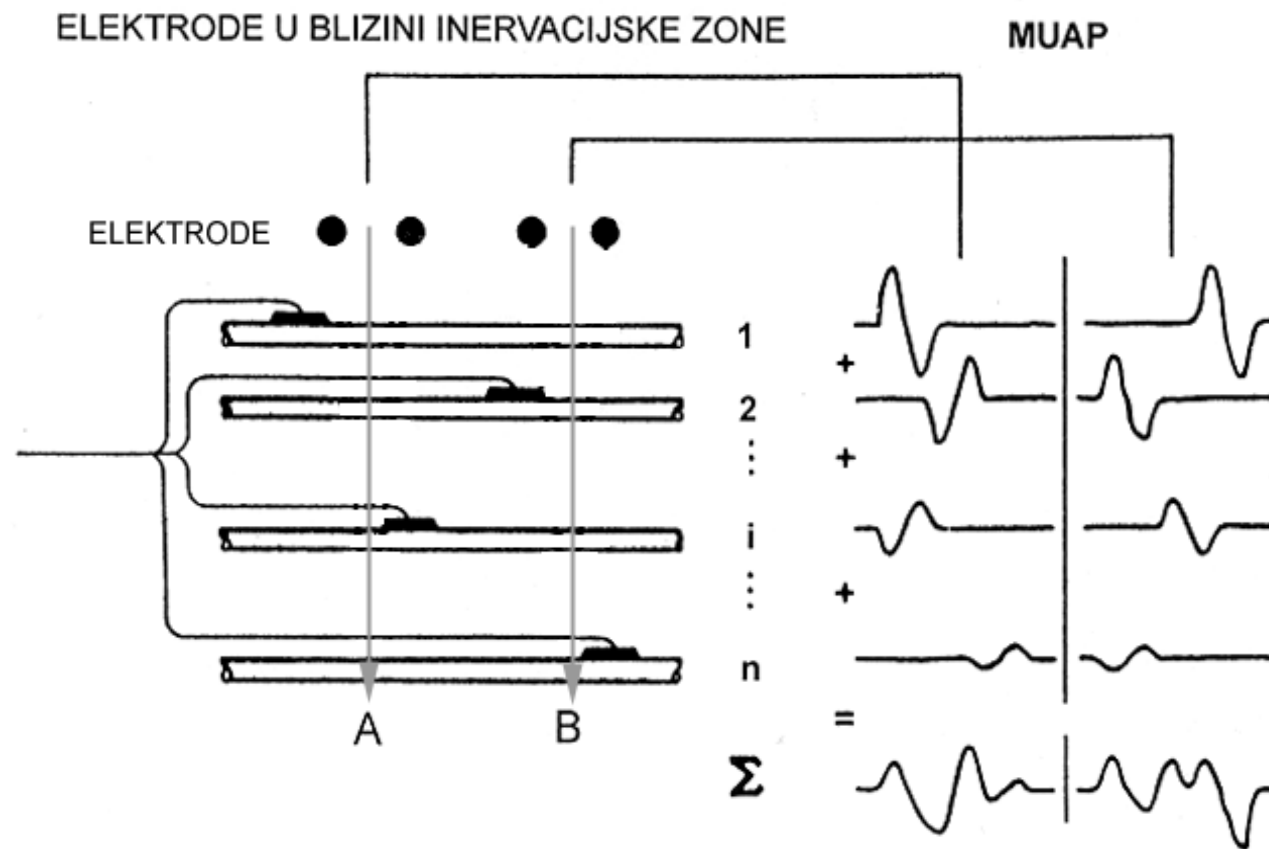
$$d = 20 \text{ mm}$$



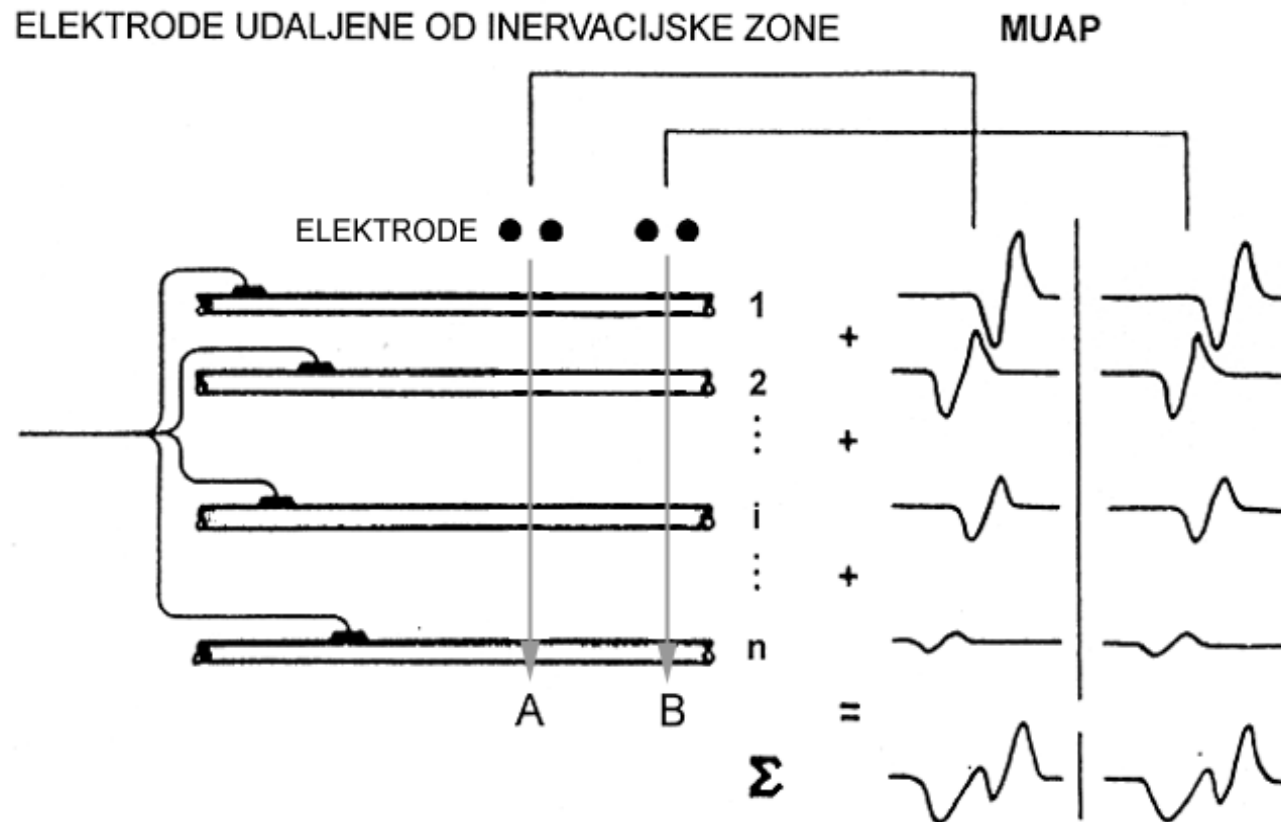
$$G_2(f, d) = K \sin^2\left(\frac{2\pi f d}{2v}\right)$$

$$f_p = \frac{nv}{2d}, \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad f_G = \frac{nv}{d}, \quad n = 1, 2, 4, 6, \dots$$

# Položaj EMG elektroda u odnosu na inervacijsku zonu

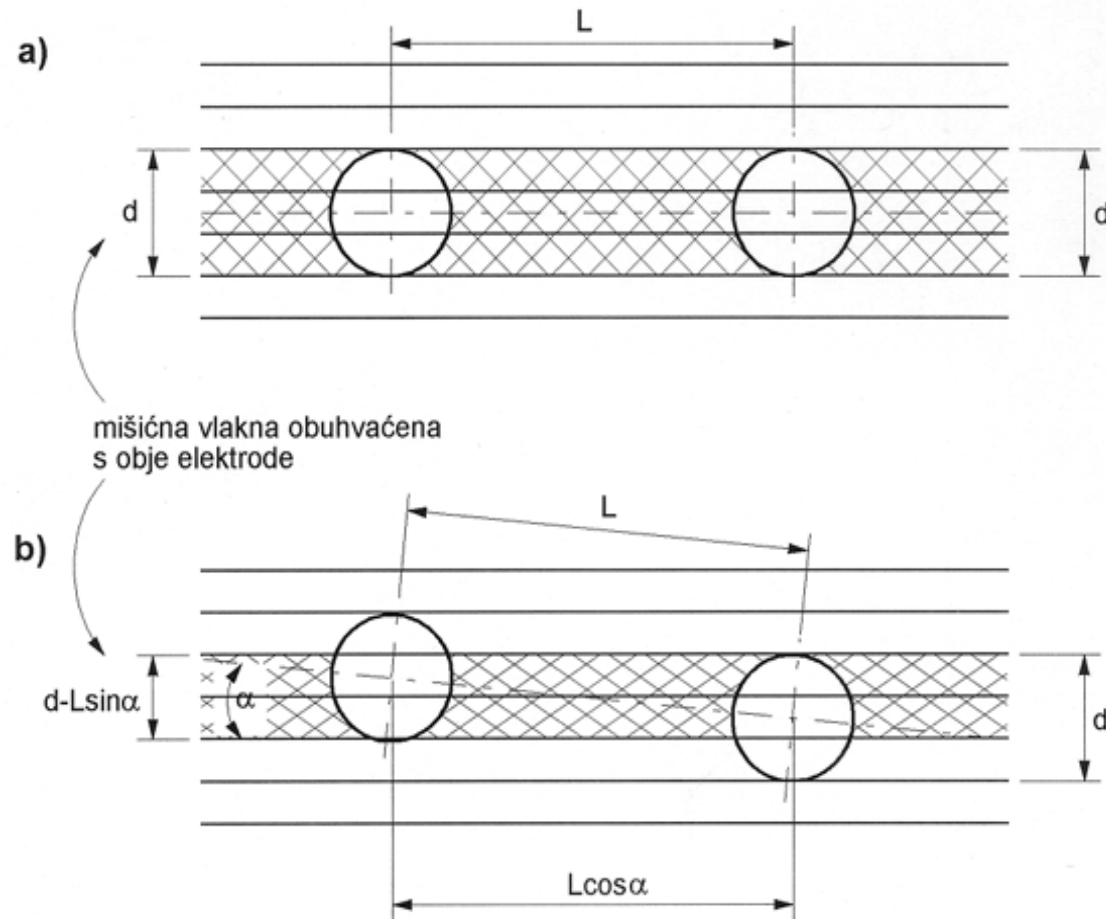


# Položaj EMG elektroda u odnosu na inervacijsku zonu





# Položaj elektroda u odnosu na smjer mišićnih vlakana



# Mjereni signali

- frekvencija srčanog ritma (puls)
- mioelektrički signali mišića *m. quadriceps femoris* lijeve noge:
  - m. rectus femoris (*RF*)
  - m. vastus lateralis (*VL*)
  - m. vastus medialis (*VM*)
- kut poluge trenažne sprave ( $\beta$ )

# Mjerna instrumentacija i oprema

- Elektromiograf ME3000P
- Elektrostimulator
- Mjerilo frekvencije srčanog ritma “Polar VANTAGE NV”
- Trenažna sprava za ekstenziju potkoljenice “GYM80 reha”
- Elektronički goniometar

# Ispitanici

- 10 ispitanika, studenti i studentice Fakulteta za fizičku kulturu
- 6 M + 4 Ž
- starost: 21 do 26 godina
- visina: 164 do 188 cm
- masa: 57 do 94 kg
- 1 L, 9 D
- samo jedna ispitanica je navela prethodnu ozljedu ligamenata lijeve noge

# Priprema ispitanika za mjerenje

- upoznavanje ispitanika s tijekom mjerenja
- postavljanje mjerila frekvencije srčanog ritma
- određivanje položaja motoričkih točaka
- postavljanje EMG elektroda
- zagrijavanje
- postavljanje elektromiografa

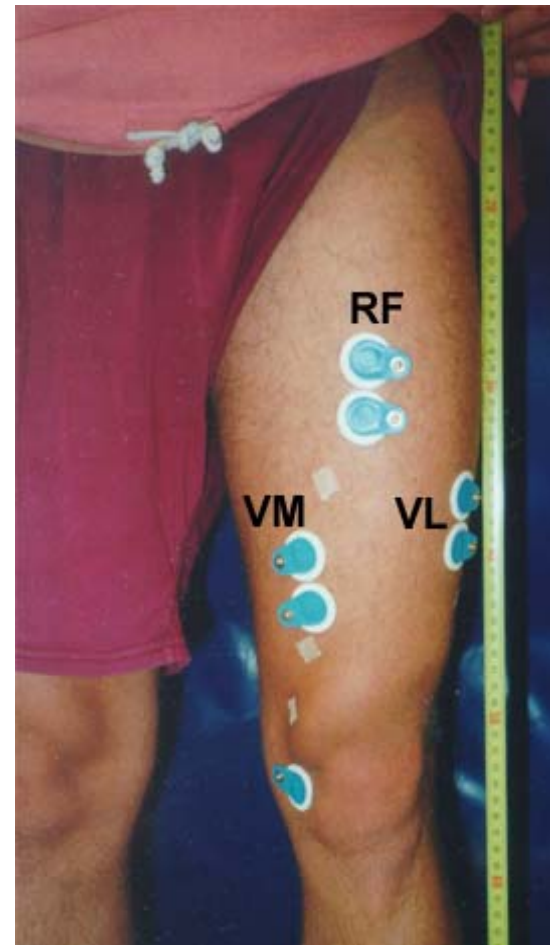
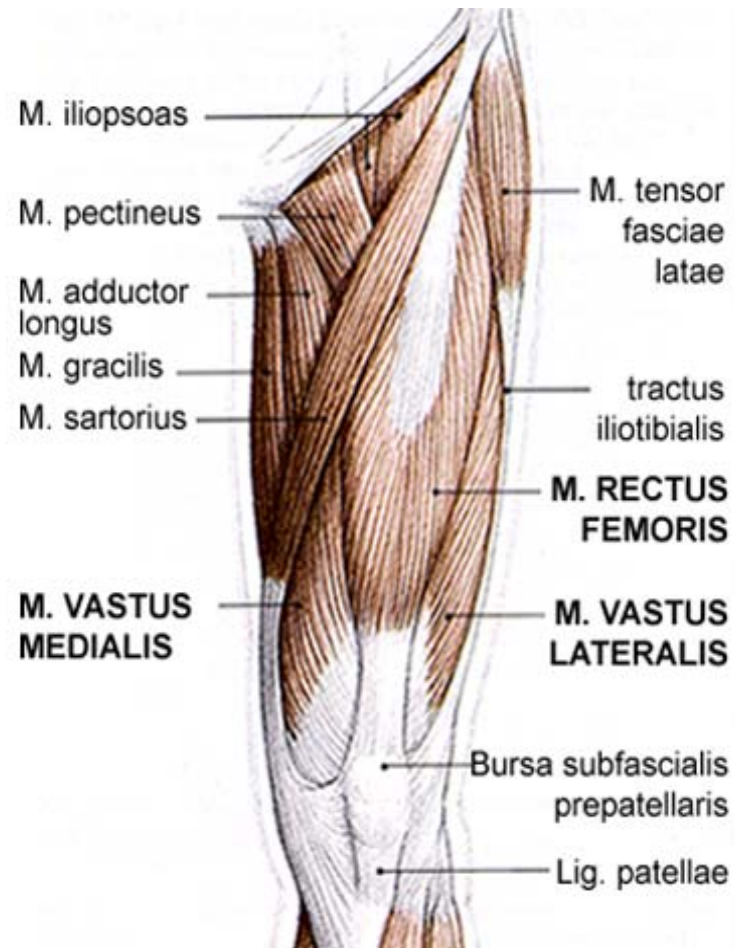
# Postavljanje mjerila frekvencije srčanog ritma



# Pronalaženje motoričkih točaka



# Postavljanje EMG elektroda



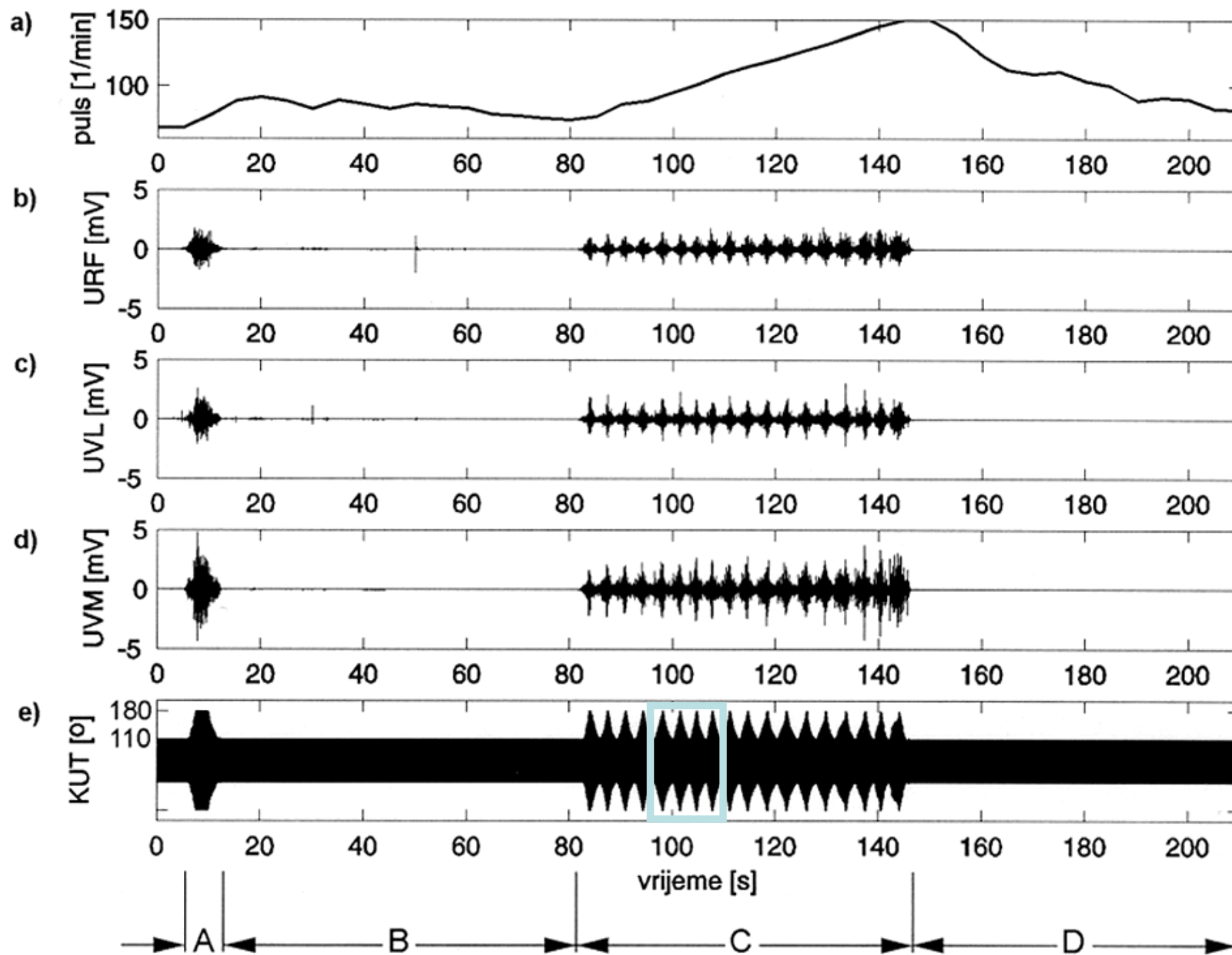


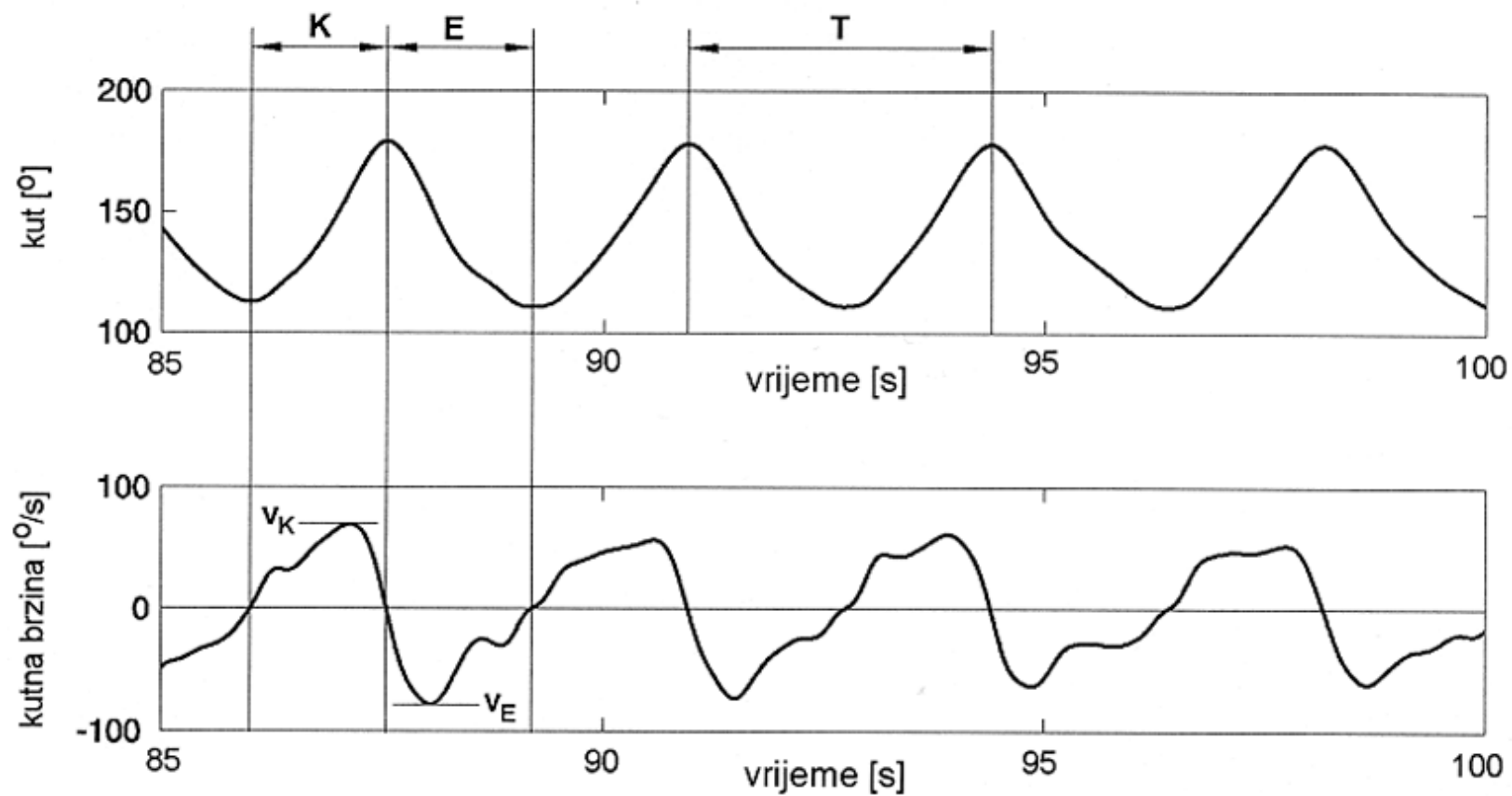
# Ispitanik pripremljen za mjerenje



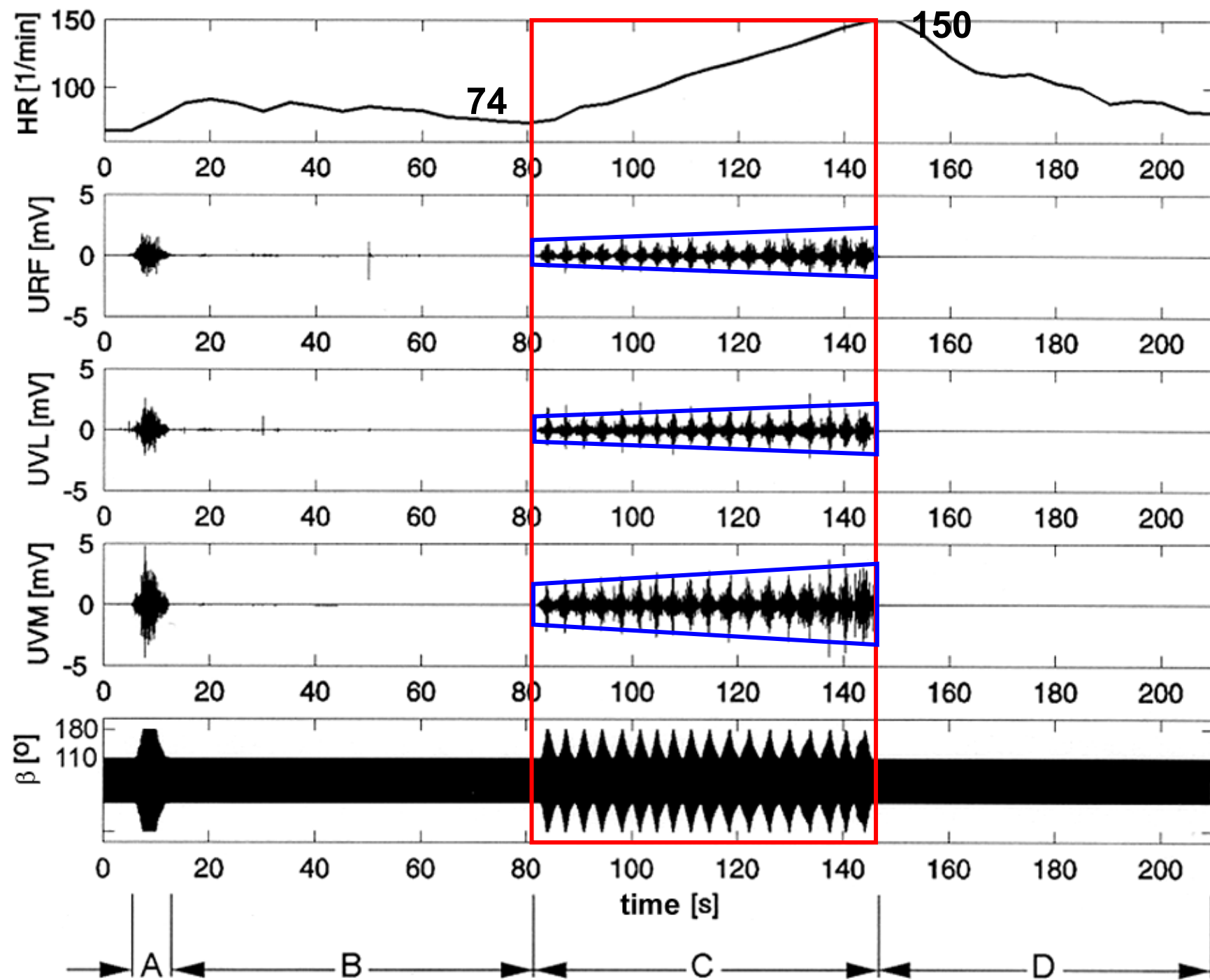
# Tijek mjerenja

- određivanje maksimalnog opterećenja
- mjerenje:
  - A* - podizanje maksimalnog tereta
  - B* - odmor, postavljanje tereta na polovicu maksimalnog
  - C* - vježba na trenažnoj spravi, do otkaza
  - D* - odmor

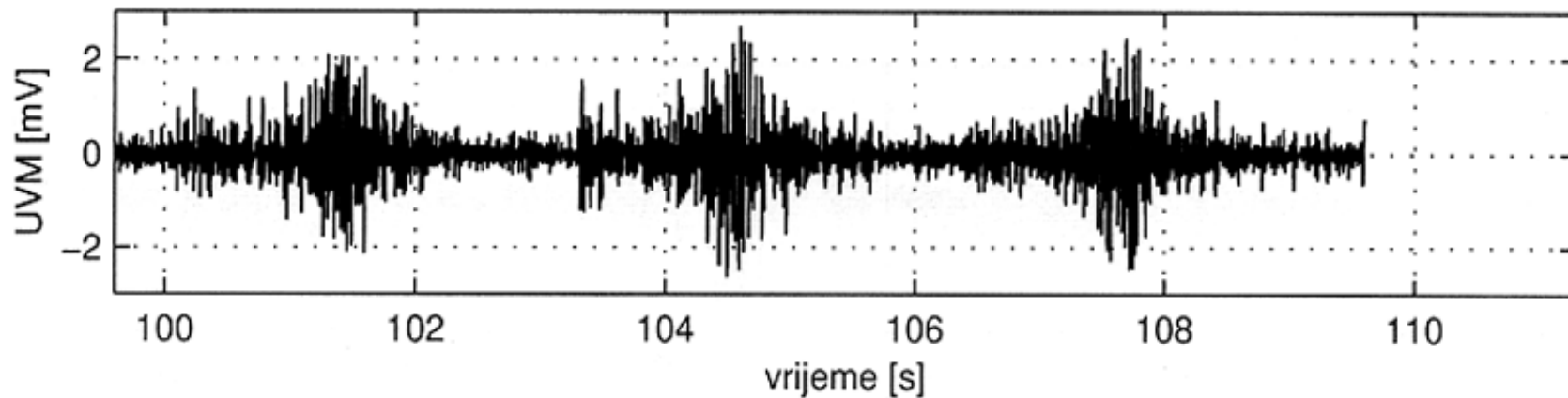




	Broj kontrakcija	$T_{sr}$ [s]	$f_{sr} = 1/T_{sr}$ [1/min]	$v_{Ksr}$ [°/s]	$v_{Esr}$ [°/s]
min	18	2.323	25.8	60	49.6
srednje	26	3.608	17.6	89.1	71.8
MAX	41	5.325	11.3	120.8	88.6



# Mioelektrički signal snimljen tijekom dinamičkih kontrakcija



- nestacionarni slučajni signal promjenjive efektivne vrijednosti i frekvencije

# Spektrogram

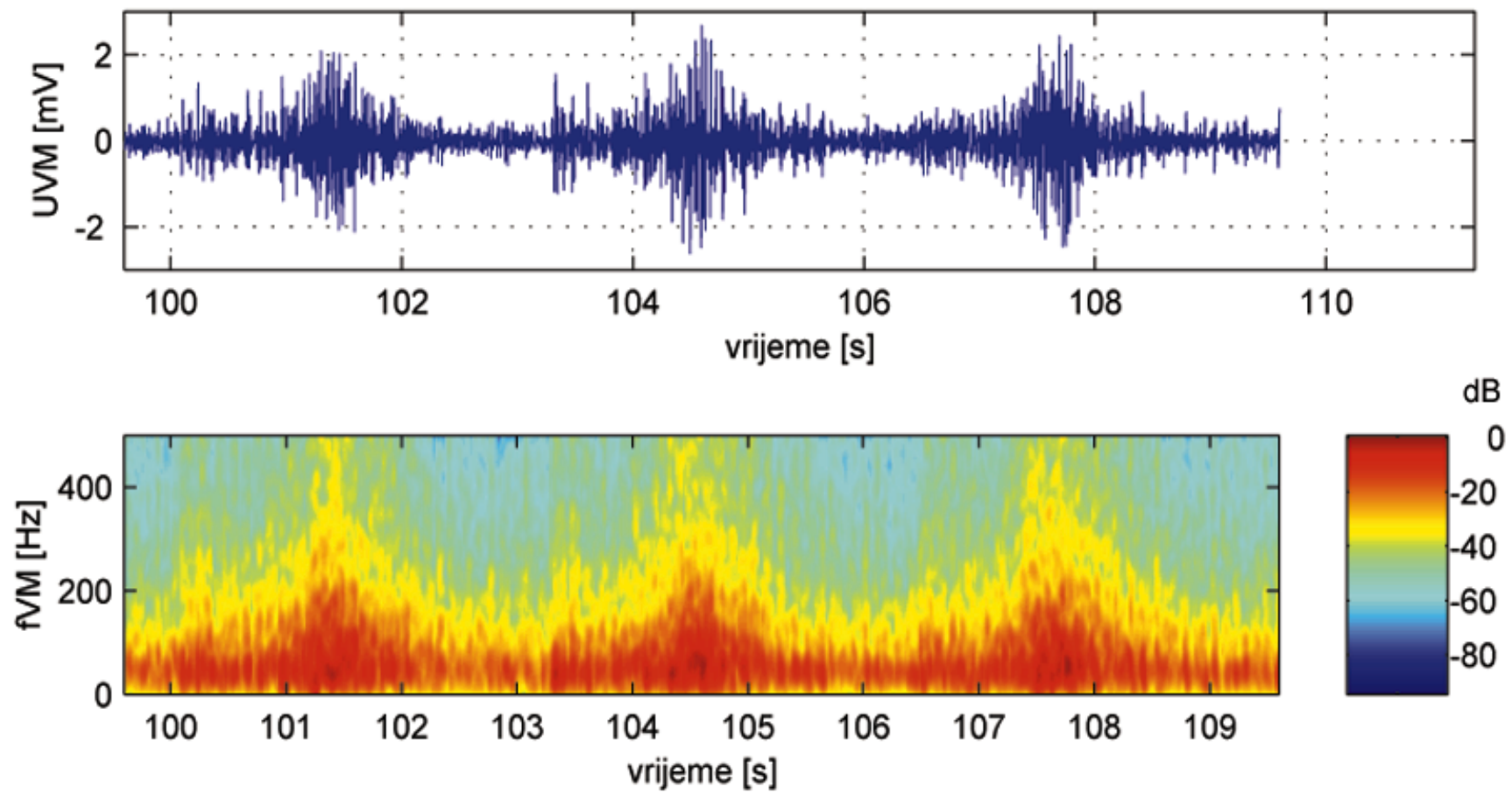
$$S[rR, k] = \frac{1}{LU} \left| \sum_{m=-(L-1)/2}^{(L-1)/2} x[rR + m] w[m] e^{-j(2\pi/N)km} \right|^2$$

$$-\infty < r < \infty, \quad 0 \leq k \leq N-1$$

$$w[m] = \begin{cases} w[-m], & |m| \leq (L-1)/2, \quad L \text{ neparan} \\ 0, & \text{inače} \end{cases}$$

$$U = \frac{1}{L} \sum_{m=0}^{L-1} (w[m])^2$$

# Spektrogram





# Promjena frekvencije medijana

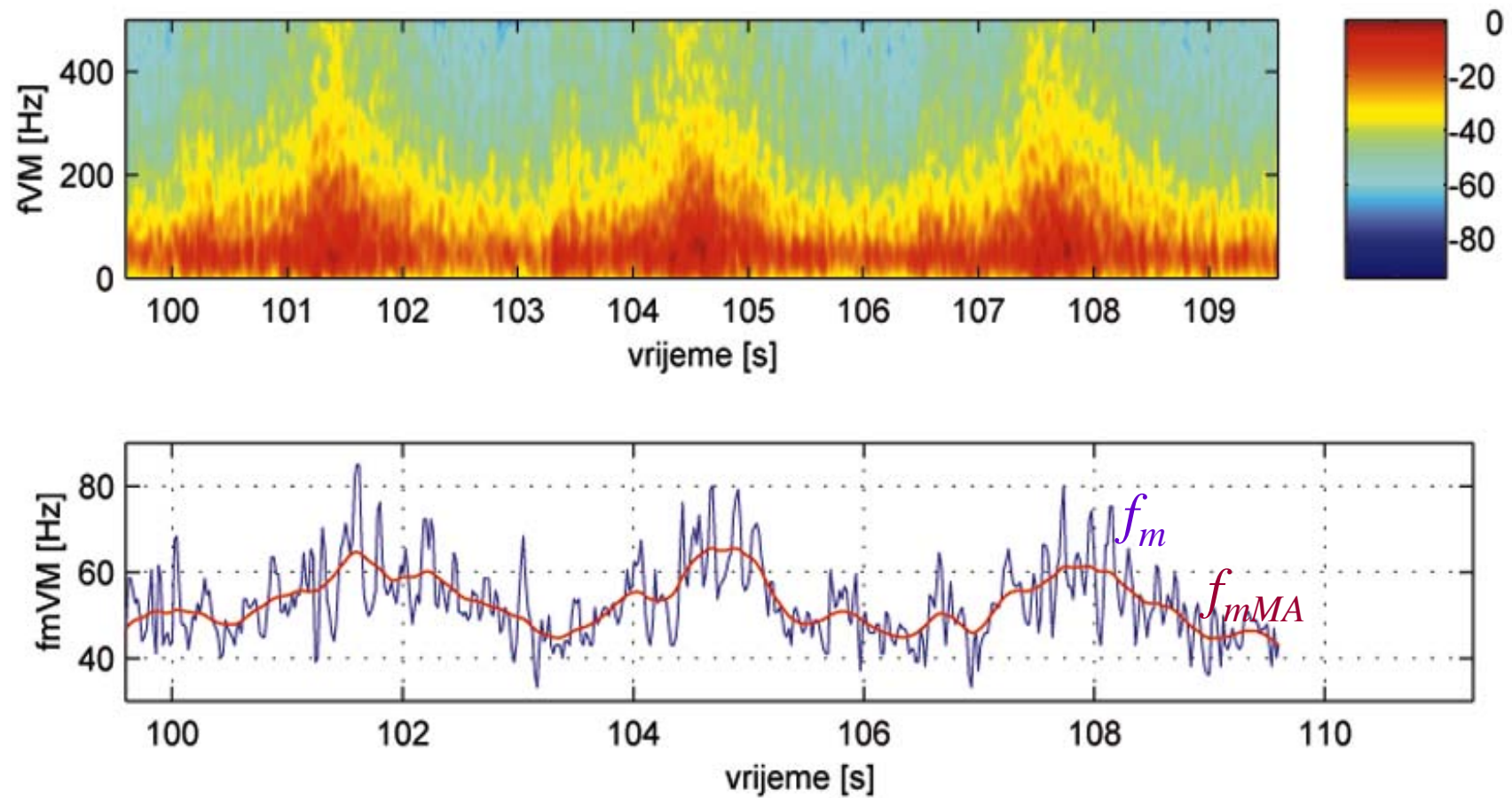
$$\sum_{k=0}^{k_m} S[rR, k] \approx \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N/2-1} S[rR, k]$$

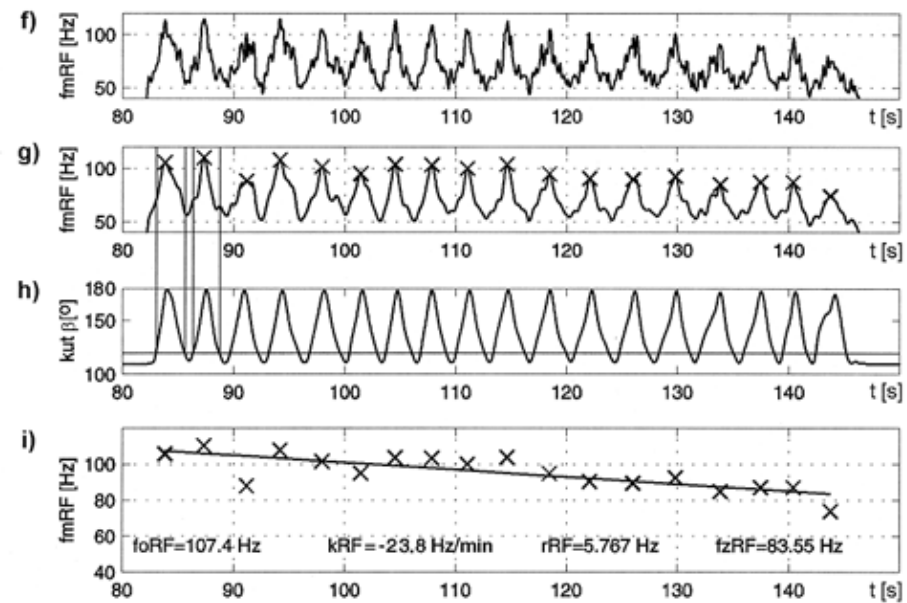
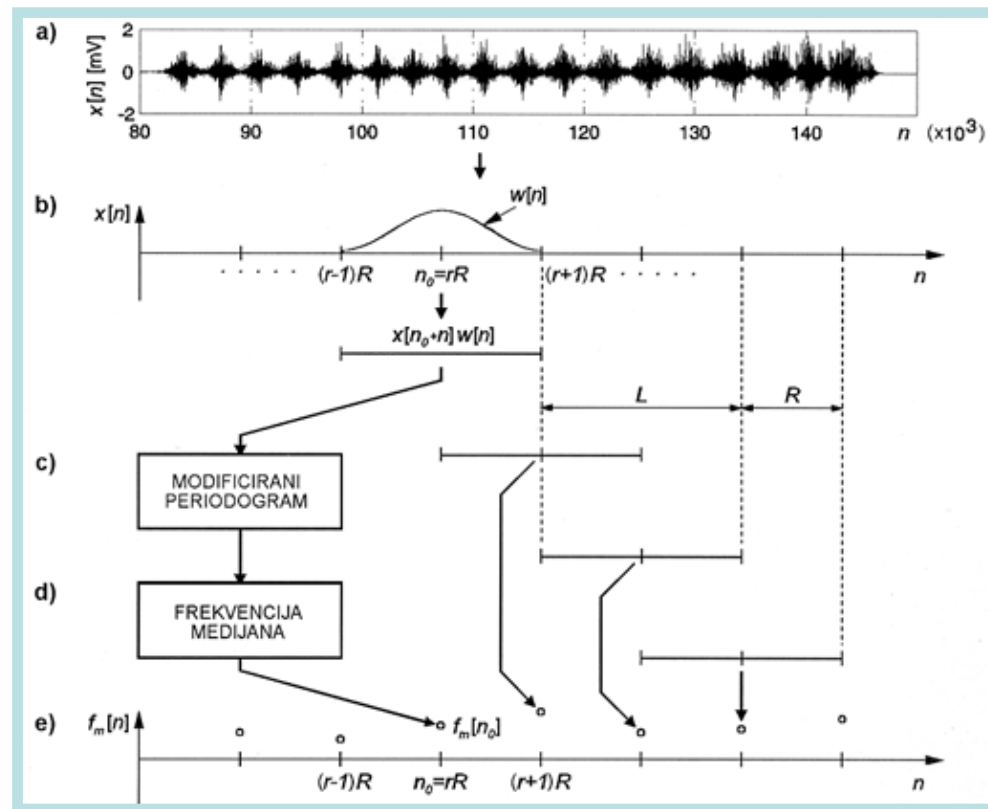
$$f_m[rR] = \Delta f \cdot k_m$$

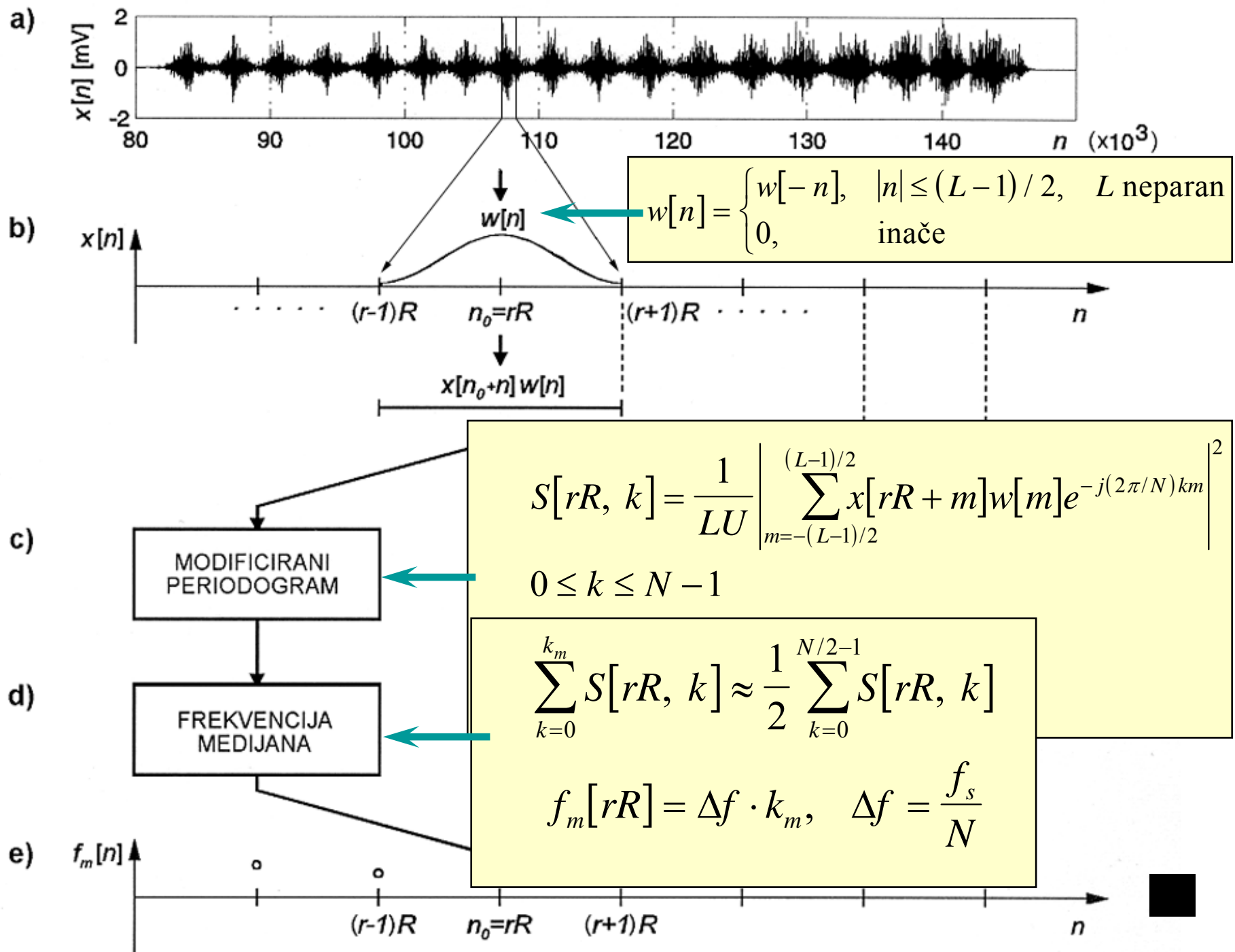
$$\Delta f = \frac{f_s}{N}$$

$$f_{mMA}[rR] = \frac{1}{L_{MA}} \sum_{k=0}^{L_{MA}-1} f_m[rR - k]$$

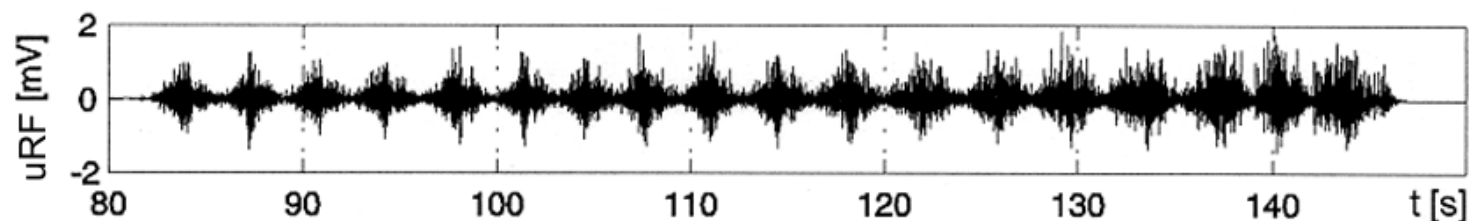
# Promjena frekvencije medijana



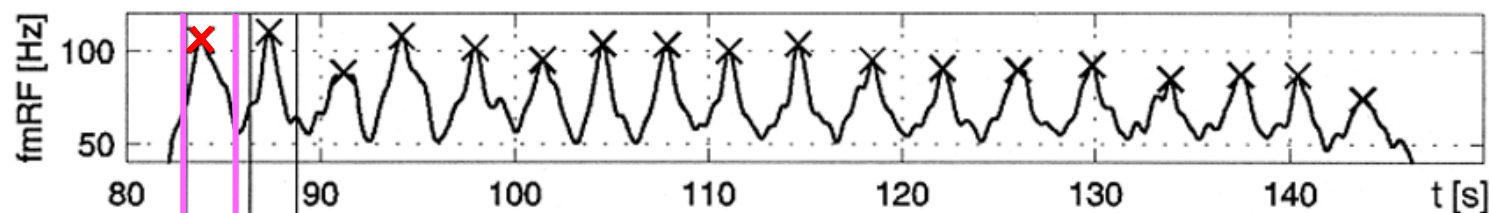




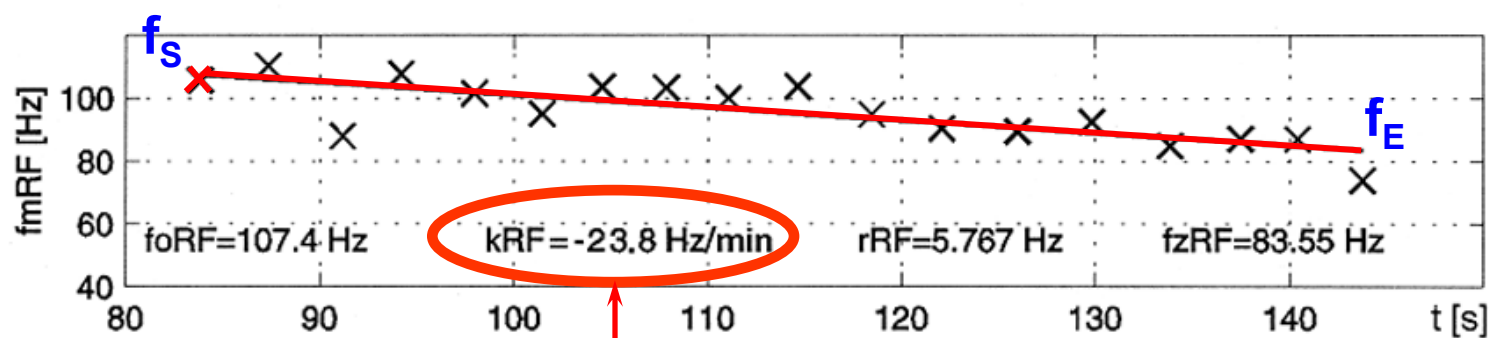
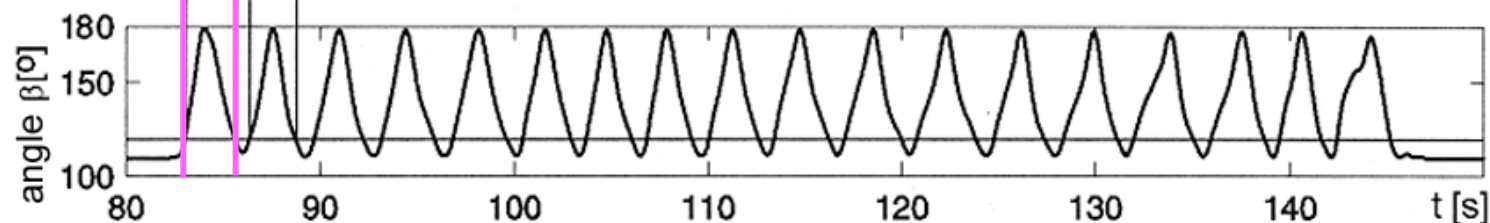
EMG



FREKVENCIJA  
MEDIJANA



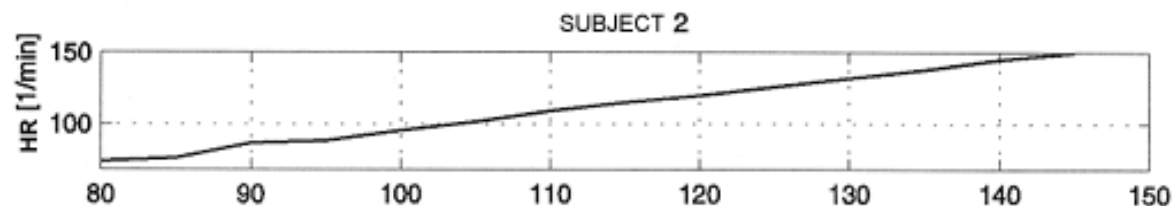
KUT  
POLUGE



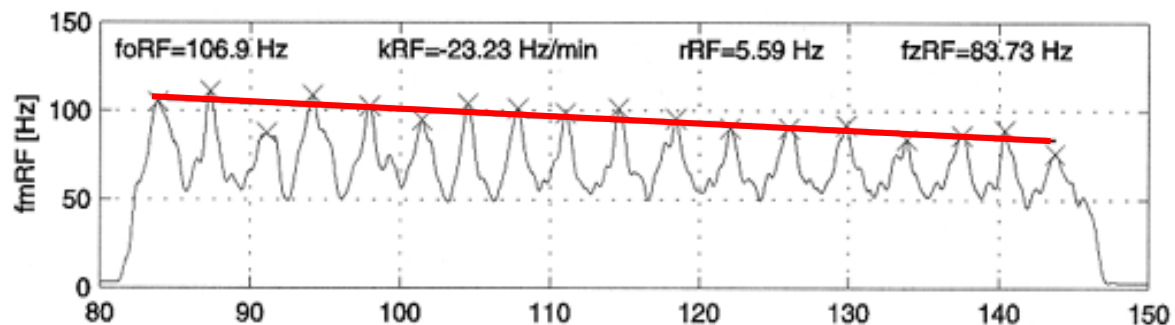
INDEKS UMORA 1:  $k$

INDEKS UMORA 2:  $\Delta f = 100 \cdot (f_E - f_s) / f_s$

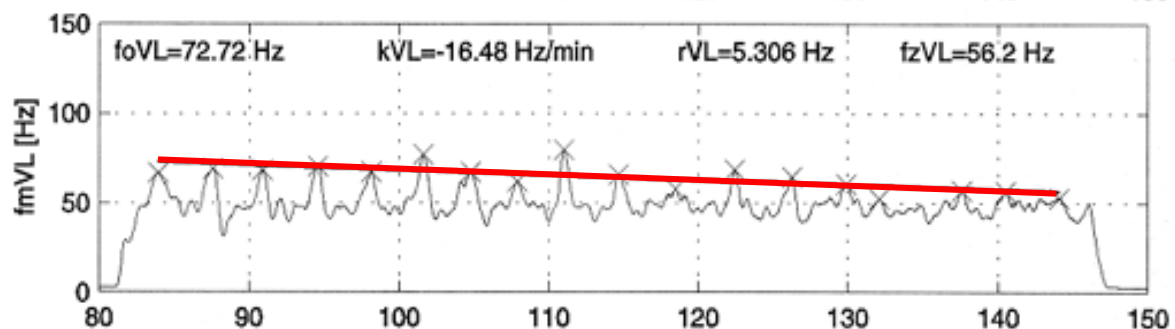
FREKVENCIJA SRČANOG RITMA



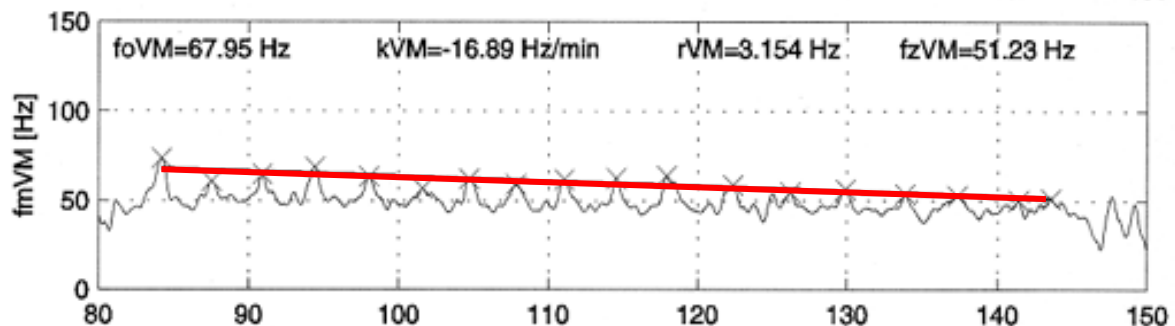
FREKVENCIJA MEDIJANA - RF



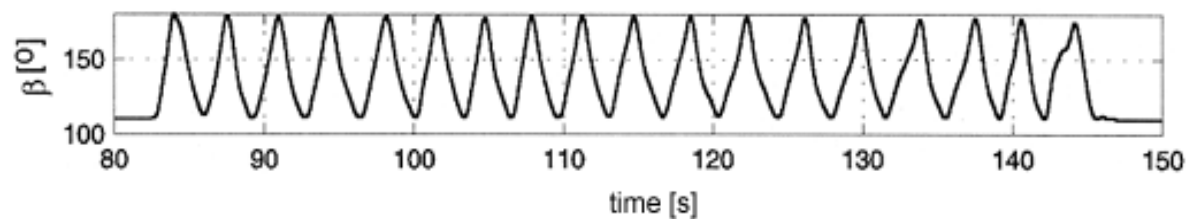
FREKVENCIJA MEDIJANA - VL

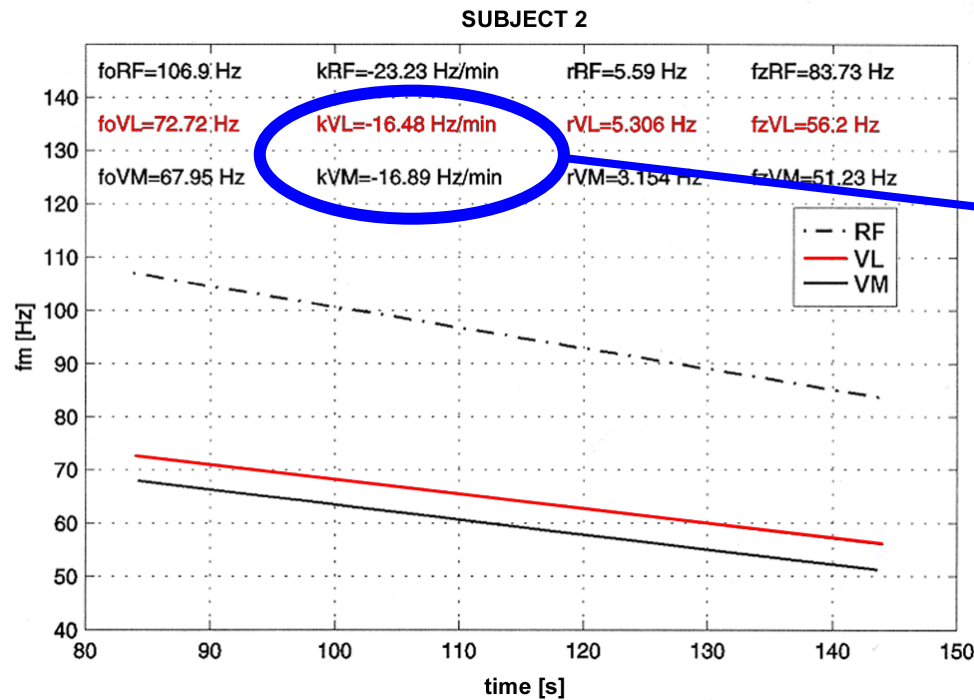


FREKVENCIJA MEDIJANA - VM



KUT POLUGE

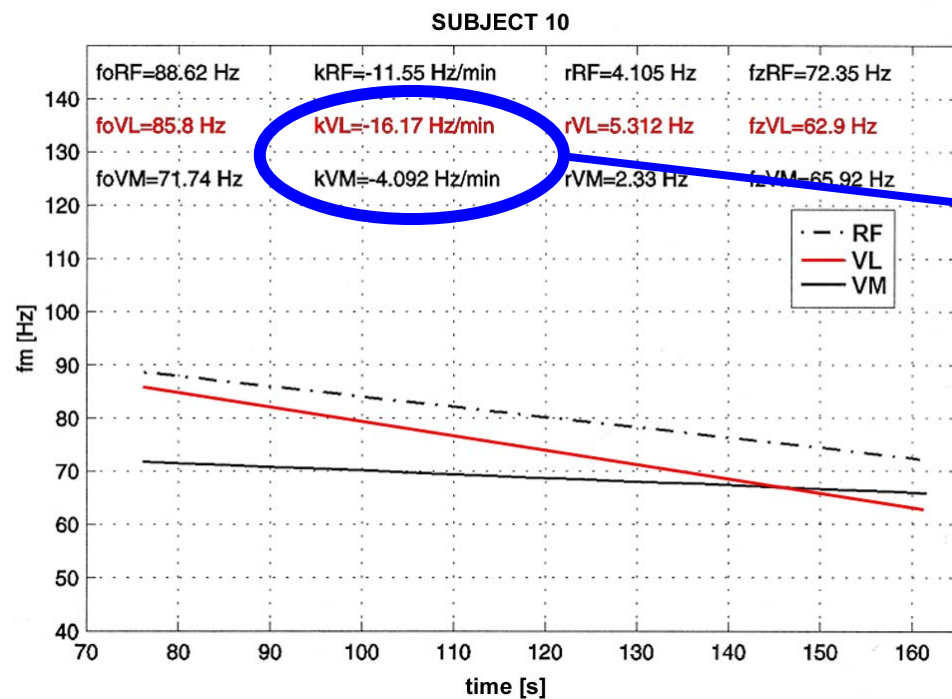




**kVL = -16.5 Hz/min**  
**kVM = -16.9 Hz/min**

$\Delta f_{VL} = -22.7\%$

$\Delta f_{VM} = -24.7\%$



**kVL = -16.2 Hz/min**  
**kVM = -4.1 Hz/min**

$\Delta f_{VL} = -26.7\%$

$\Delta f_{VM} = -8.1\%$



