



---

**SEMINAR DOKTORANADA/POS LIJEDOKTORANADA 2015.**

# **Odziv aksona na pobude proizvoljnog valnog oblika – eksperimentalni postav**

**dr. sc. Zlatko Živković, poslijedoktorand**

**Katedra za primjenu EM polja**



- **COST EMF-MED (Action BM1309): European network for innovative uses of EMFs in biomedical applications**  
**voditelj: izv. prof. dr. sc. Antonio Šarolić**
- **Working Group 1 (WG1) – Cancer EMF interactions and applications**
- **Working Group 2 (WG2) – Non-cancer EMF interactions and applications**
- **Working Group 3 (WG3) – EMF dosimetry – in silico tools & measurements**
- <http://cost-emf-med.eu/>

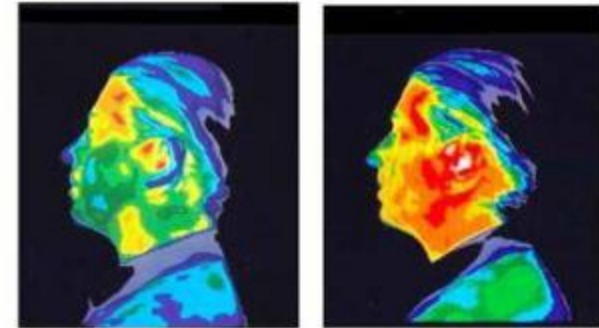
# Sadržaj

- biološki učinci
- izvori zračenja na niskim frekvencijama
- zaštitne norme
- mjerenja temeljena na jednom aksonu (životinjski model)
- mjerni postav
- mjerni rezultati

# Biološki učinci

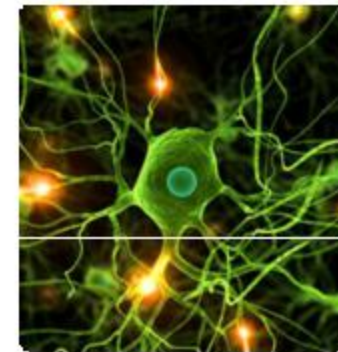
- **Zagrijavanje tkiva**

- pretvaranje apsorbirane EM energije u toplinsku
- frekvencije iznad 100 kHz
- spregnuto električno i magnetsko polje
- **efektivna vrijednost**



- **Stimulacija električki podražljivog tkiva**

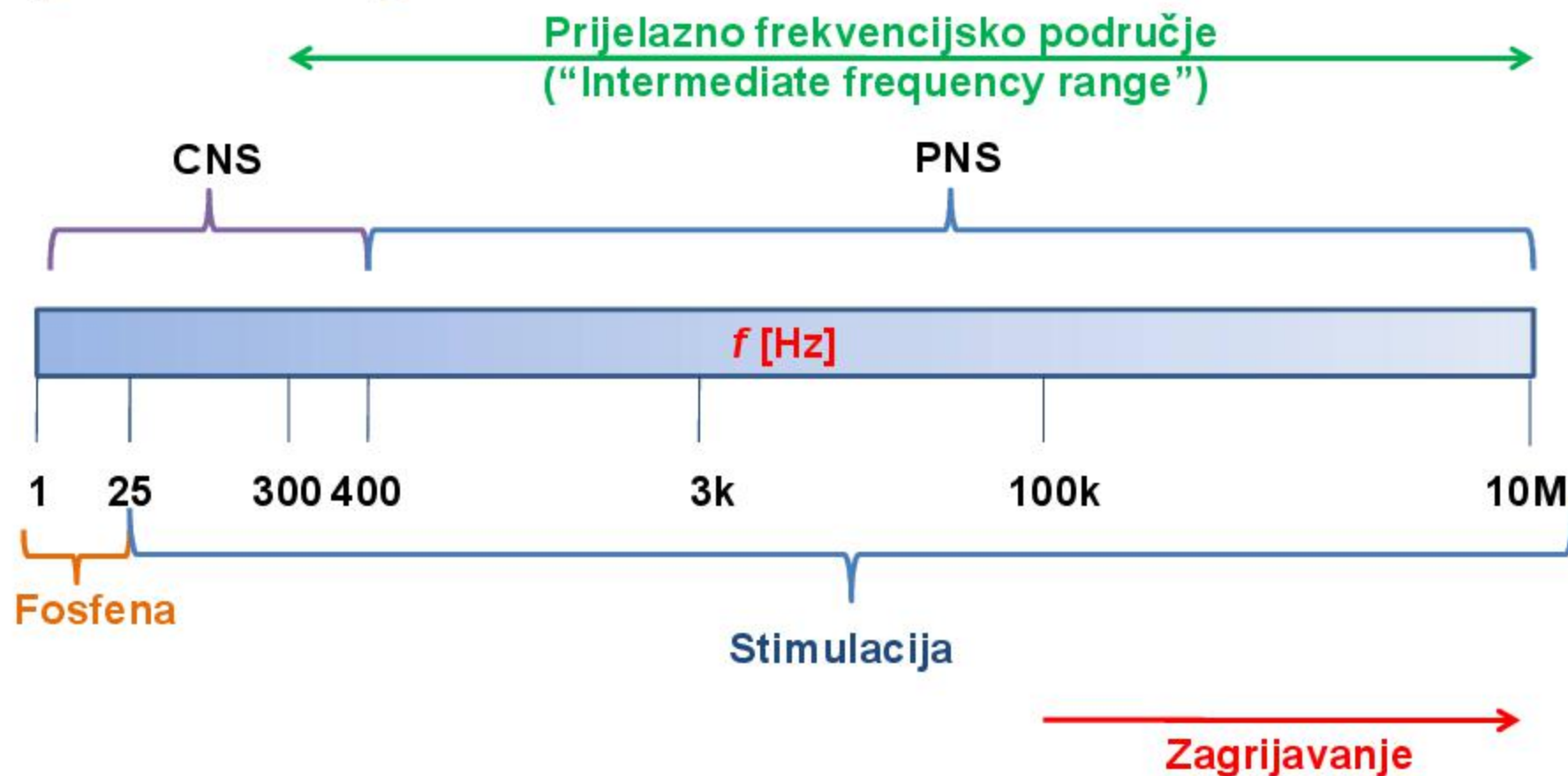
- inducirane električne struje u tijelu  
(kontaktne struje, površinske gustoće naboja, strujni vrtlozi)
- frekvencije do 10 MHz
- raspregnuta električna i magnetska polja
- **valni oblik pobude**



- **Ostali učinci – dugotrajna izloženost**

- maligna oboljenja, hormonalni i neuro-degenerativni poremećaji, psihosomatske smetnje, ...

# Prijelazno frekvencijsko područje

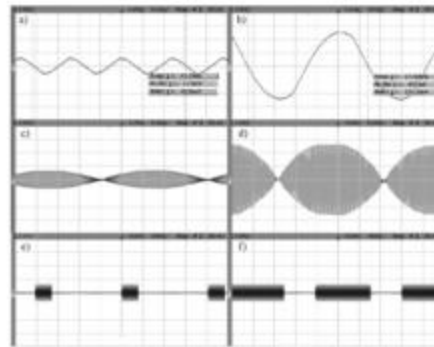
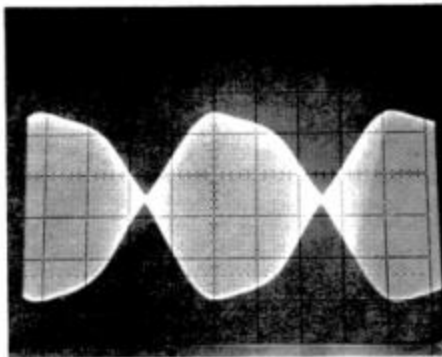


# Izvori zračenja (1)

- **Izloženost opće populacije**

- **indukcijske kuhinjske ploče (kuhala)**

- izobličene sinusoide i amplitudno modulirana EM polja
- frekvencije nosioca su iznad 10 kHz (standardno 22 i 34 kHz) uz harmonike i do nekoliko stotina kHz

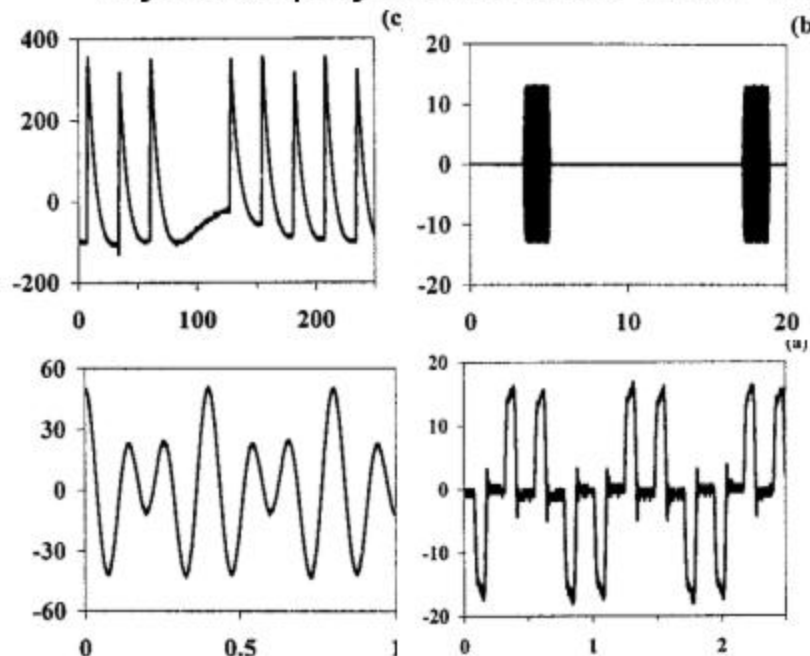


# Izvori zračenja (2)

- **Izloženost opće populacije**

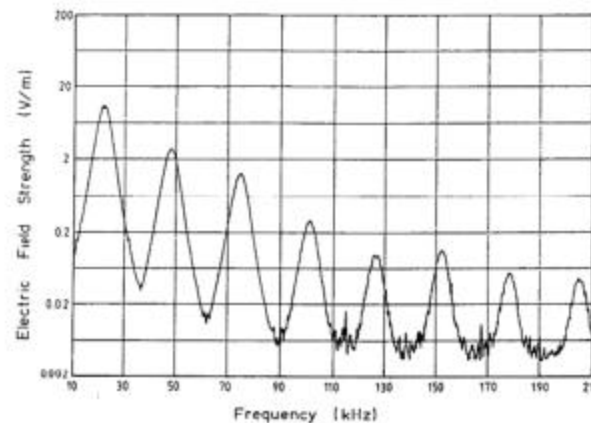
- **sustavi za nadzor i osiguranje od krađe**

- obuhvaćaju magnetizatore/demagnetizatore u knjižnicama, kontrolu prtljage na aerodromima, vrata za detekciju krađe, detektore metala, itd.
- složeni valni oblici (pulsna polja, sinusoidna polja, sinusoidne praskove, kombinacije sinusoida nekoliko frekvencija i dr.).
- široko frekvencijsko područje od nekoliko desetaka Hz do nekoliko MHz, a mjerena polja često su u razini ili iznad granica definiranih ICNIRP-om



# Izvori zračenja (3)

- **Izloženost opće populacije**
  - **monitori i TV uređaji**
    - pilasti valni oblici
    - osnovna frekvencija 15-35 kHz uz harmonike do nekoliko stotina kHz





# Izvori zračenja (4)

- **Izloženost opće populacije**
  - **komunikacijski uređaji**
    - OMEGA (10.2-13.6 kHz) i LORAN navigacijski sustavi (100 kHz)
    - standardni AM komunikacijski sustavi (535-1705 kHz)
    - amaterski komunikacijski uređaji (1.8-2 MHz)
    - VLF sustavi za podmornice (234 kHz)



# Izvori zračenja (5)

- **Izloženost profesionalne populacije - industrija**
  - **indukcijski i plazma grijači**
    - AM polja modulacijske frekvencije 50 Hz, nosioca od nekoliko kHz do 27 MHz
    - iznimno visoka električna i magnetska polja
  - **indukcijske peći**
    - 280 Hz-7 kHz
  - **dielektrični grijači**
    - nekoliko MHz do 120 MHz
  - **uređaji za varenje**
    - ovisno o tipu varenja (elektrolučno ili elektrotoporno) mogu se generirati pulsna i sinusna magnetska polja te polja složenih valnih oblika u frekvencijskom području od nekoliko Hz do nekoliko stotina kHz

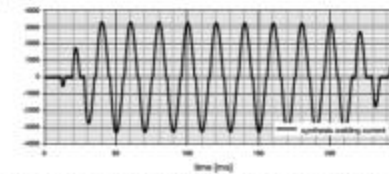


Figure 4a: Waveform of typical a.c. welding current, the amplitude is given in [A]

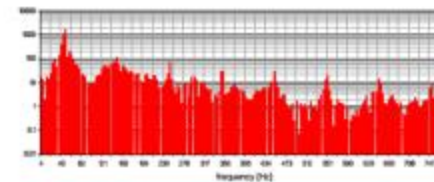


Figure 4b: Spectral components of typical a.c. welding current the r.m.s. amplitudes are given in [A] on a logarithmic scale

# Izvori zračenja (6)

- **Izloženost profesionalne populacije - medicina**

- **MRI:**

- trapezoidna, pulsna i sinusna gradijentna magnetska polja
- nekoliko desetaka Hz do nekoliko MHz

- **elektronički kirurški instrumenti:**

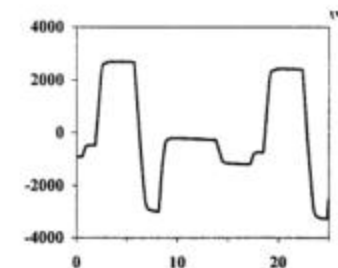
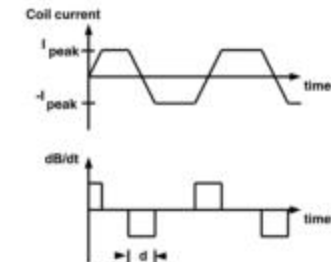
- AM polja modulacijske frekvencije 10-30 kHz uz nosilac 0.5-2.4 kHz
- **magnetska stimulacija kostiju**
- pulsna magnetska polja iznimno složenih valnih oblika

- **Izloženost profesionalne populacije – vojska**

- **komunikacijski sustavi za podmornice**

- **HF odašiljači**

- **sustavi za napajanje i pulsnu modulaciju kod radara**

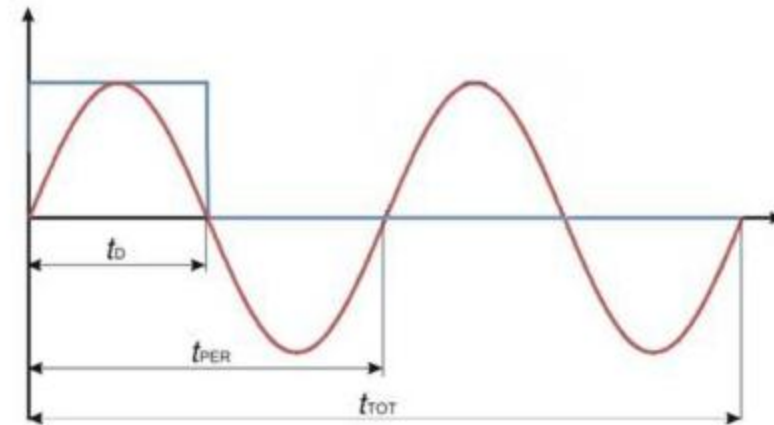


# Zaštitne norme - ICNIRP



## ICNIRP 1998[3]

Exposure characteristics	Frequency range	Current density for head and trunk (mA m <sup>-2</sup> ) (rms)
Occupational exposure	up to 1 Hz	40
	1-4 Hz	40/f
	4 Hz-1 kHz	10
	1-100 kHz	f/100
	100 kHz-10 MHz	f/100
	10 MHz-10 GHz	—
General public exposure	up to 1 Hz	8
	1-4 Hz	8/f
	4 Hz-1 kHz	2
	1-100 kHz	f/500
	100 kHz-10 MHz	f/500
	10 MHz-10 GHz	—



## ICNIRP 2010[4]

Exposure characteristic	Frequency range	Internal electric field (V m <sup>-1</sup> )
Occupational exposure CNS tissue of the head	1-10 Hz	0.5f
	10 Hz-25 Hz	0.05
	25 Hz-400 Hz	2 × 10 <sup>-3</sup> f
	400 Hz-3 kHz	0.8
	3 kHz-10 MHz	2.7 × 10 <sup>-2</sup> f
All tissues of head and body	1 Hz-3 kHz	0.8
	3 kHz-10 MHz	2.7 × 10 <sup>-2</sup> f
General public exposure CNS tissue of the head	1-10 Hz	0.1f
	10 Hz-25 Hz	0.01
	25 Hz-1000 Hz	4 × 10 <sup>-4</sup> f
	1000 Hz-3 kHz	0.4
	3 kHz-10 MHz	1.35 × 10 <sup>-2</sup> f
All tissues of head and body	1 Hz-3 kHz	0.4
	3 kHz-10 MHz	1.35 × 10 <sup>-2</sup> f

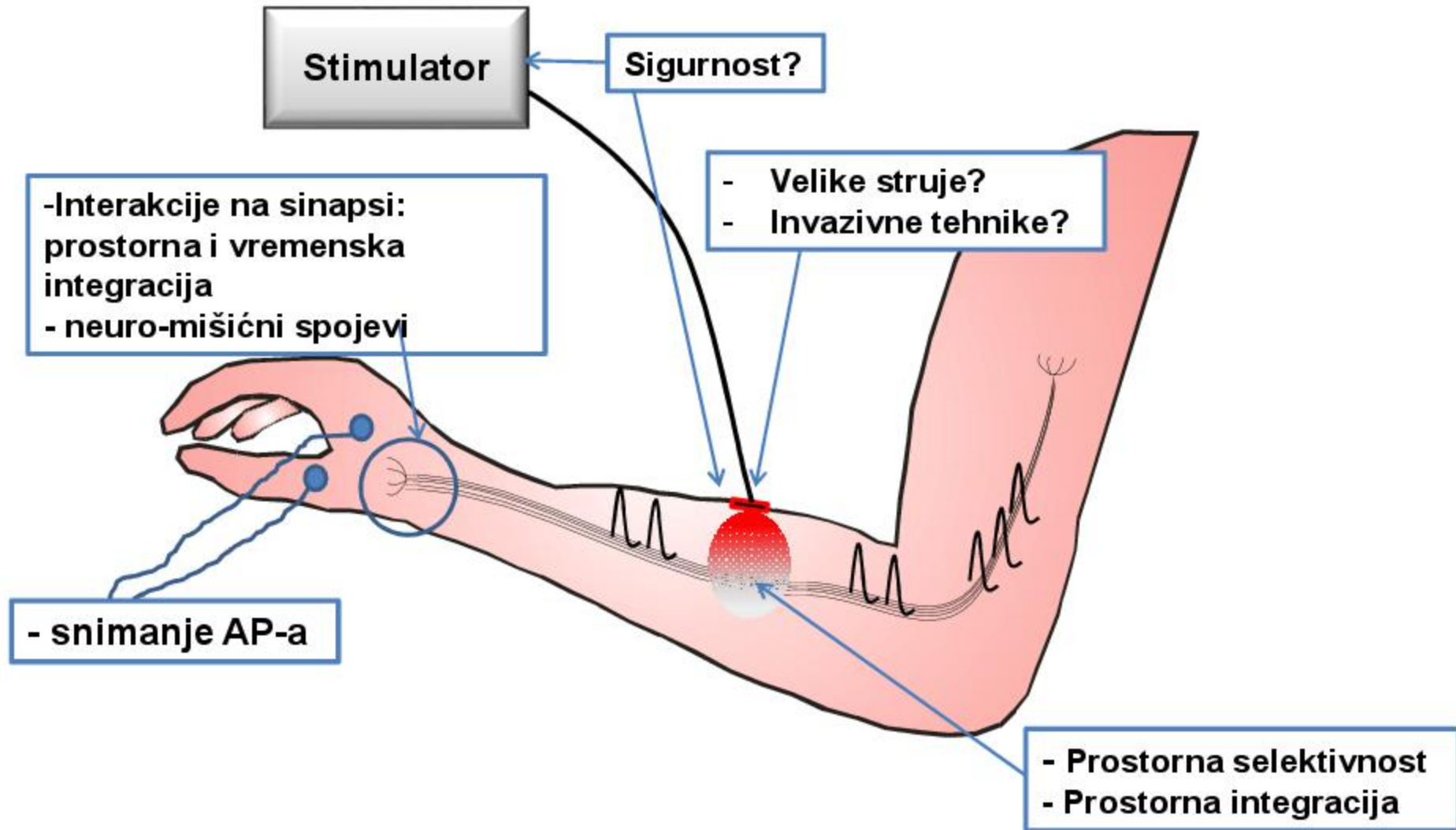
$$\sum_{i=0}^{10 \text{ MHz}} \frac{A_i}{ME_i} \leq 1$$

# Mjerenja na jednom aksonu

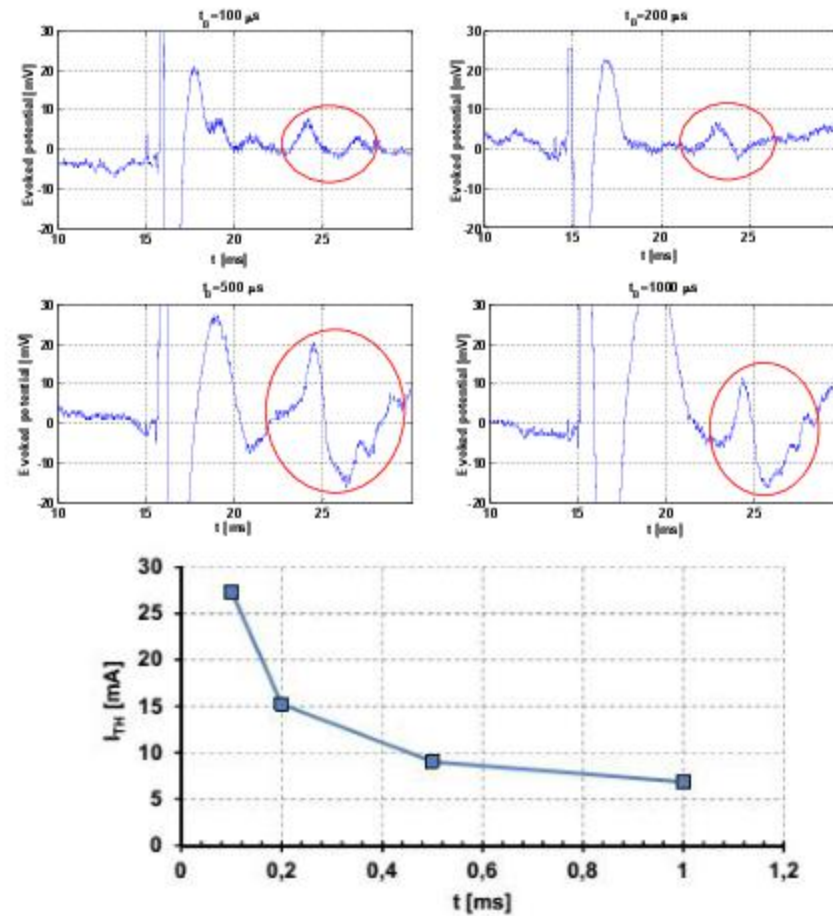
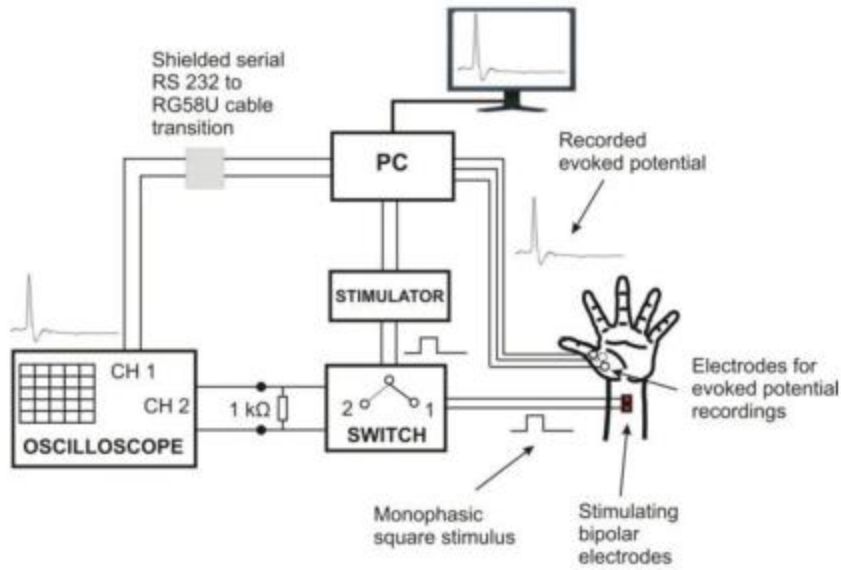
## Čemu?

- proučavanje fundamentalnih efekata
  - lakše izoliranje željenih efekata
  - izbjegavanje neželjenih efekata
- bolja kontrola mjerenja
  - pobuda aksona
  - snimanje akcijskih potencijala (AP)
- postoje teoretski (simulacijski) modeli
  - SENN, Neuron, CRRSS,...

# Mjerenja na ljudima (sisavcima)?



# Mjerenja na ljudima (pobuda ulnarnog živca)?



# SENN model mijeliniziranog aksona

$$I_m = C_m \cdot \frac{dV_n}{dt} + I_{i,n} = G_i \cdot (V_{i,n-1} - 2V_{i,n} + V_{i,n+1})$$

$$G_i = \frac{\pi \cdot d^2}{4\rho_i \cdot L_i}$$

$$L_i = 100D$$

$$d = 0.7D$$

$$V_n = V_{i,n} - V_{e,n}$$

$$\frac{dV_n}{dt} = \frac{1}{C_m} \cdot \left[ G_i \cdot (V_{n-1} - 2V_n + V_{n+1}) + V_{e,n-1} - 2V_{e,n} + V_{e,n+1} \right] - I_{i,n}$$

Second spatial difference of unknown transmembrane potential

Second spatial difference of extracellular liquid potential (activation function):  
 $\Delta^2 V_{e,n} \Rightarrow \Delta^2 V_{e,n} / \Delta x^2 = \Delta E_{e,n} / \Delta x$

$$I_{i,n} = \pi \cdot d \cdot w \cdot (J_{Na} + J_K + J_P + J_L)$$

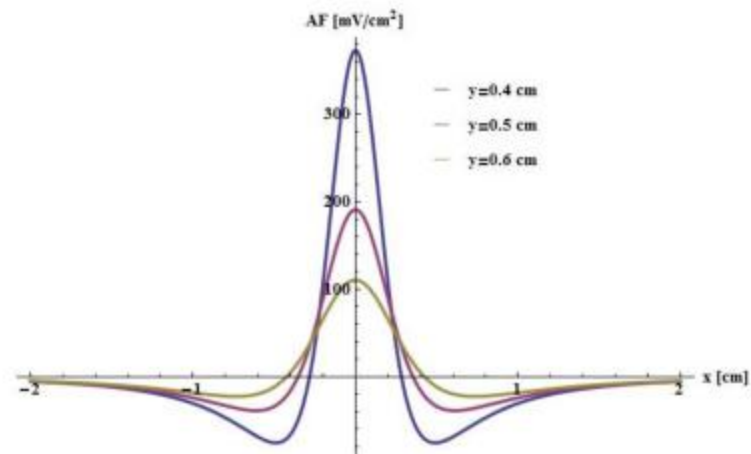
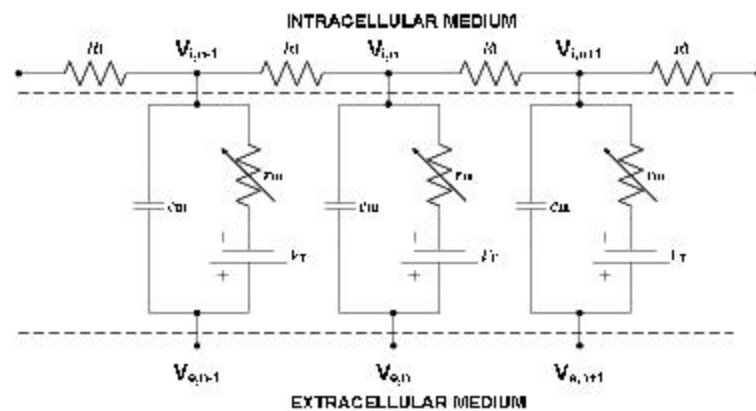
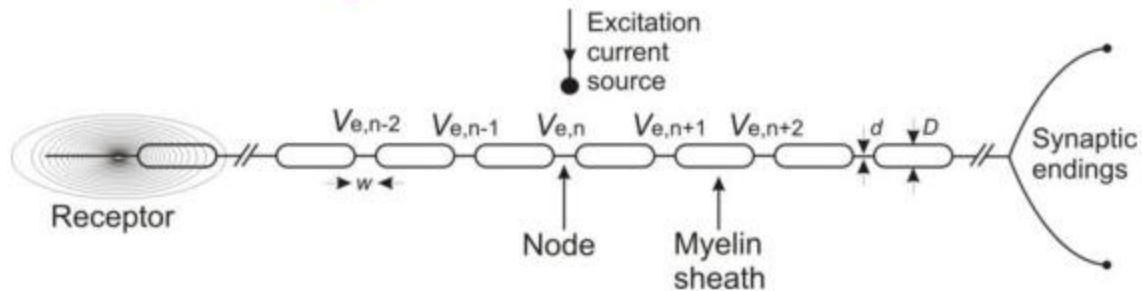
$$J_{Na} = G_{Na} \cdot (V_n - V_{Na})$$

$$J_K = G_K \cdot (V_n - V_K)$$

$$J_P = G_P \cdot (V_n - V_P)$$

$$J_L = G_L \cdot (V_n - V_L)$$

SENN model



Activation function



## Mjerenja na jednom aksonu -> životinjski modeli

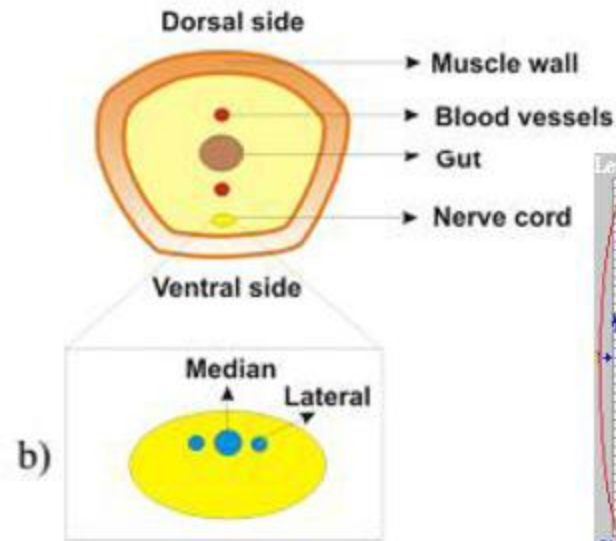
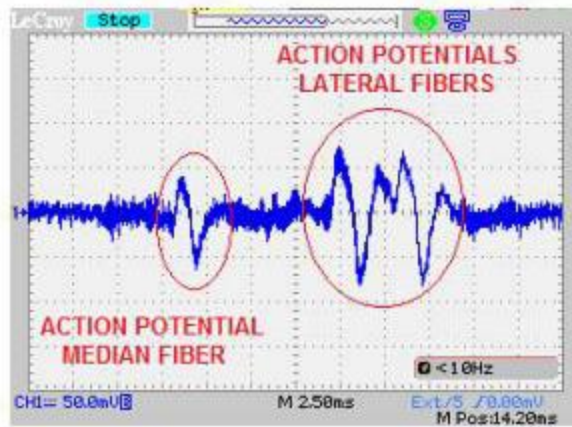


Lignja

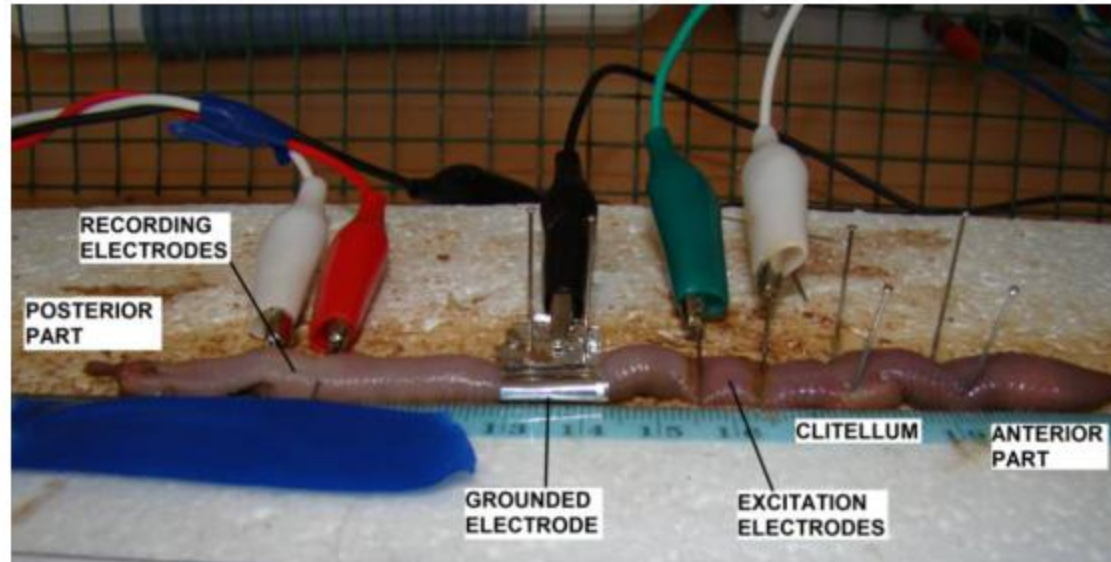


Gujavica

# Zašto gujavica (*Lumbricus terrestris*)?

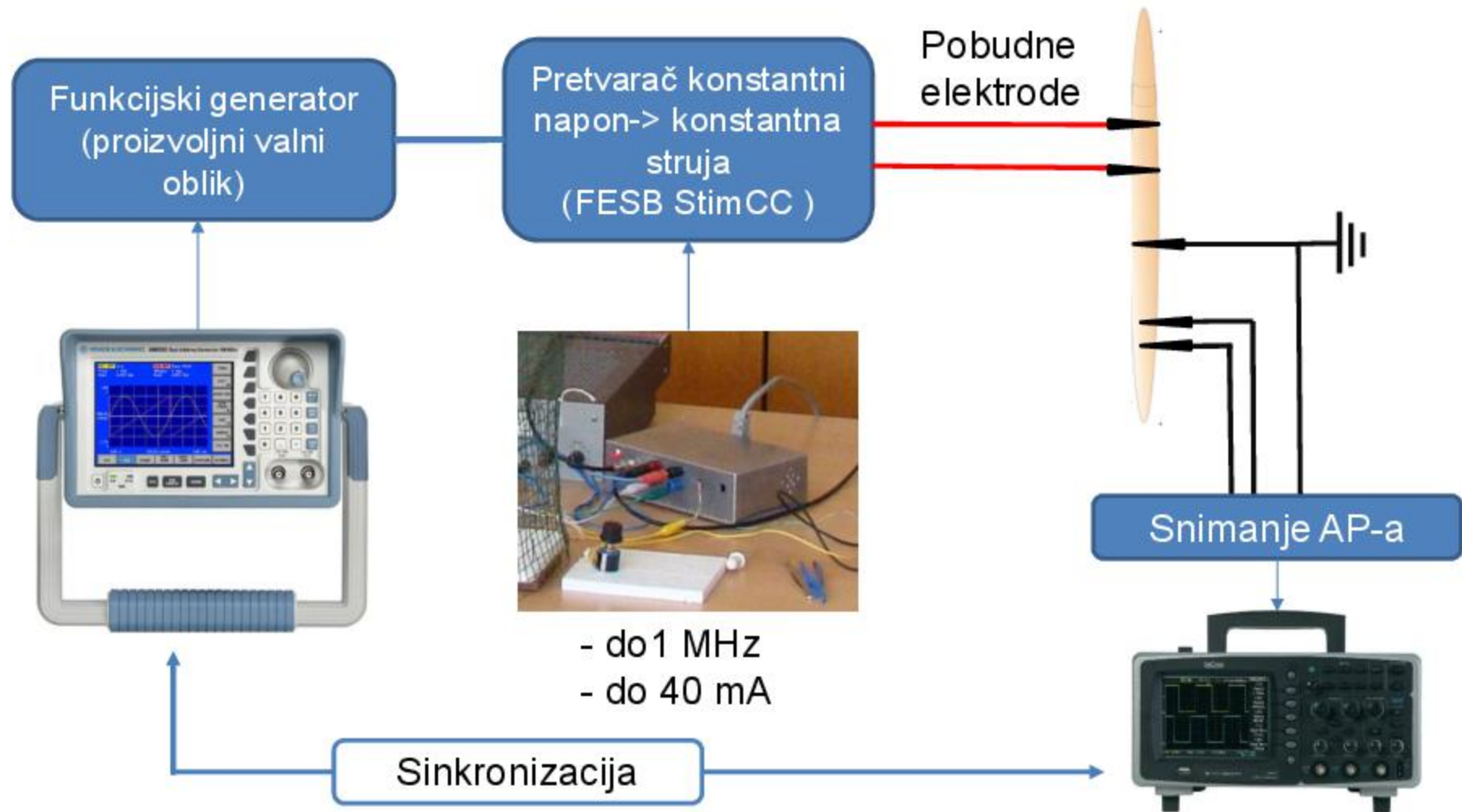


## Zašto gujavica (*Lumbricus terrestris*)?

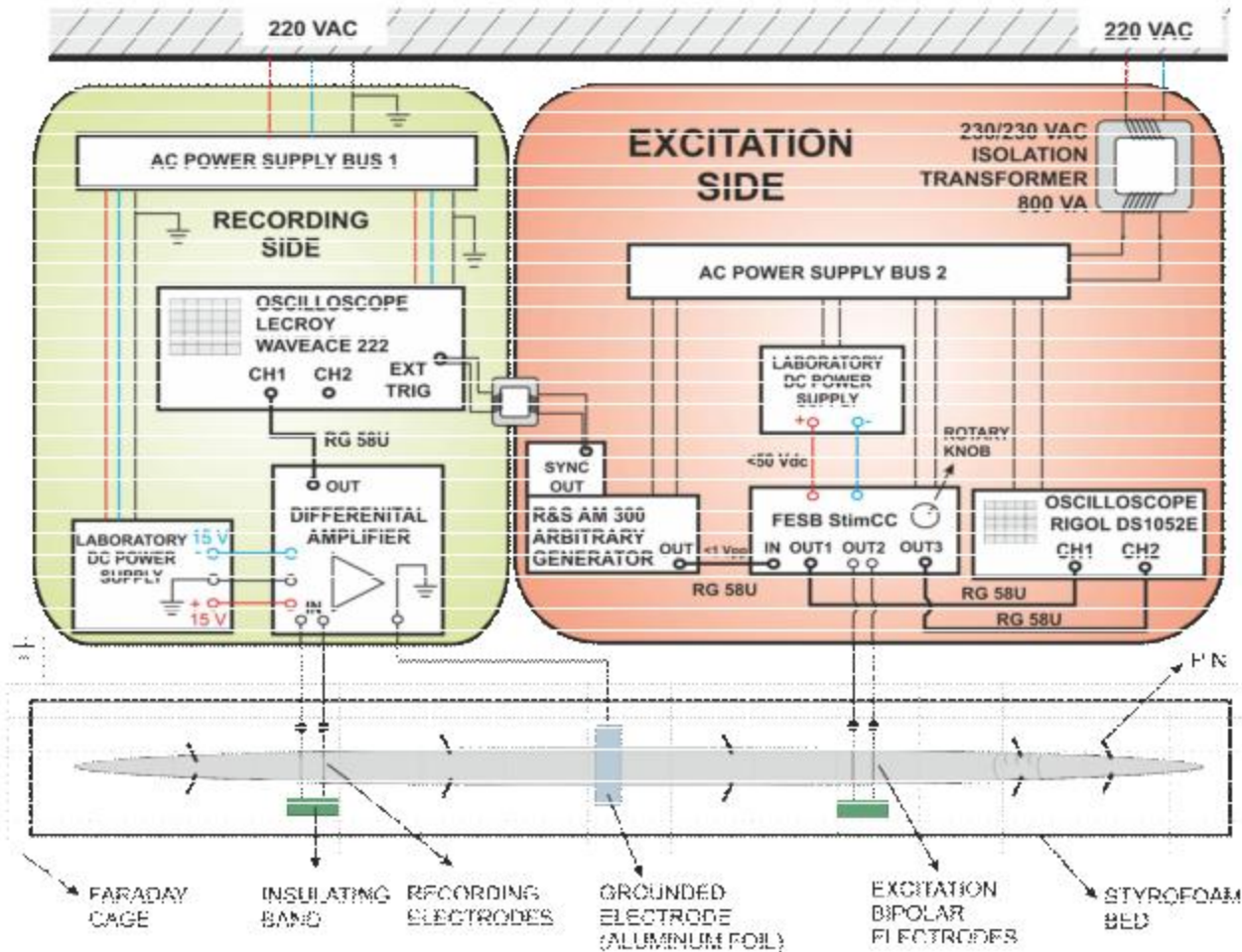


- Lake za nabaviti (???), za očuvati (mogu živjeti i do nekoliko tjedana u zemlji u hladnjaku) i pripremiti za eksperiment
- Moguća neinvazivna stimulacija pa glista preživljava eksperiment bez većih posljedica

# Mjerni postav (pojednostavljena verzija)

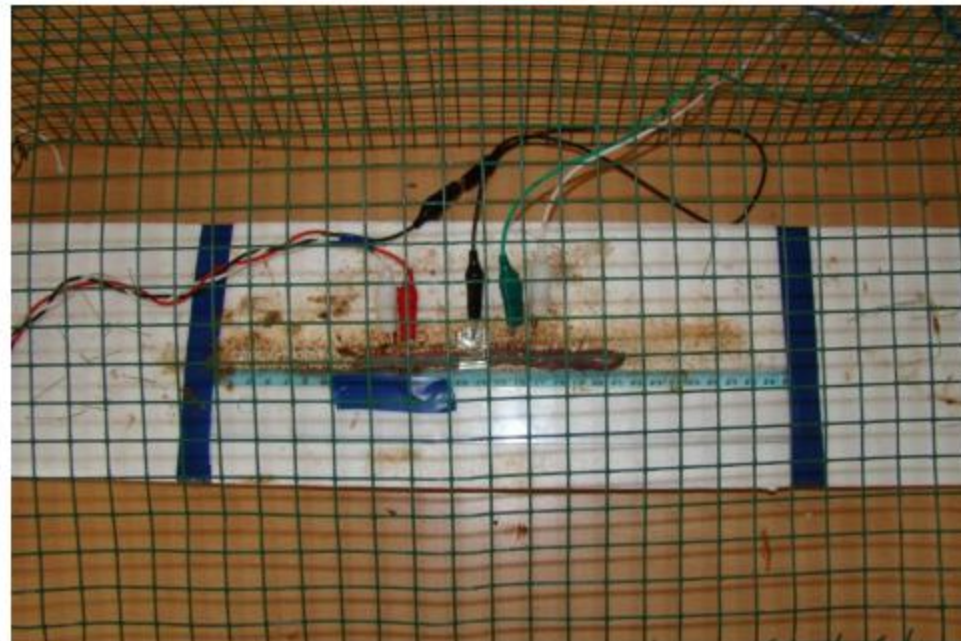


# Cjelokupni mjerni postav



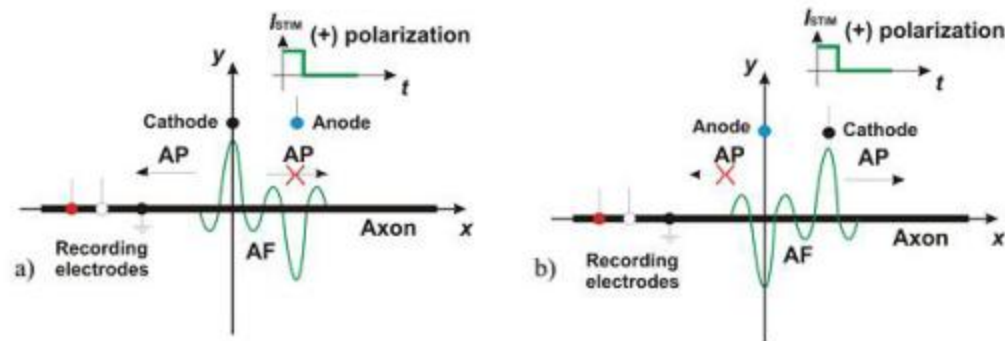
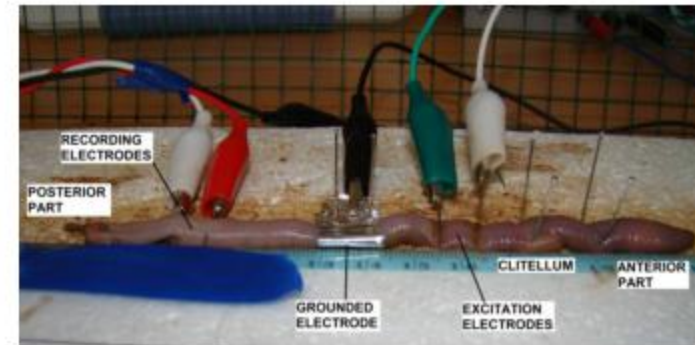
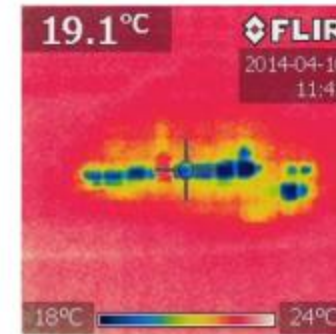
- pobudna strana je galvanski izolirana od strane za snimanje AP-a
- galvanski izolirana sinkronizacija između funkcijskog generatora i osciloskopa

# Mjerni postav

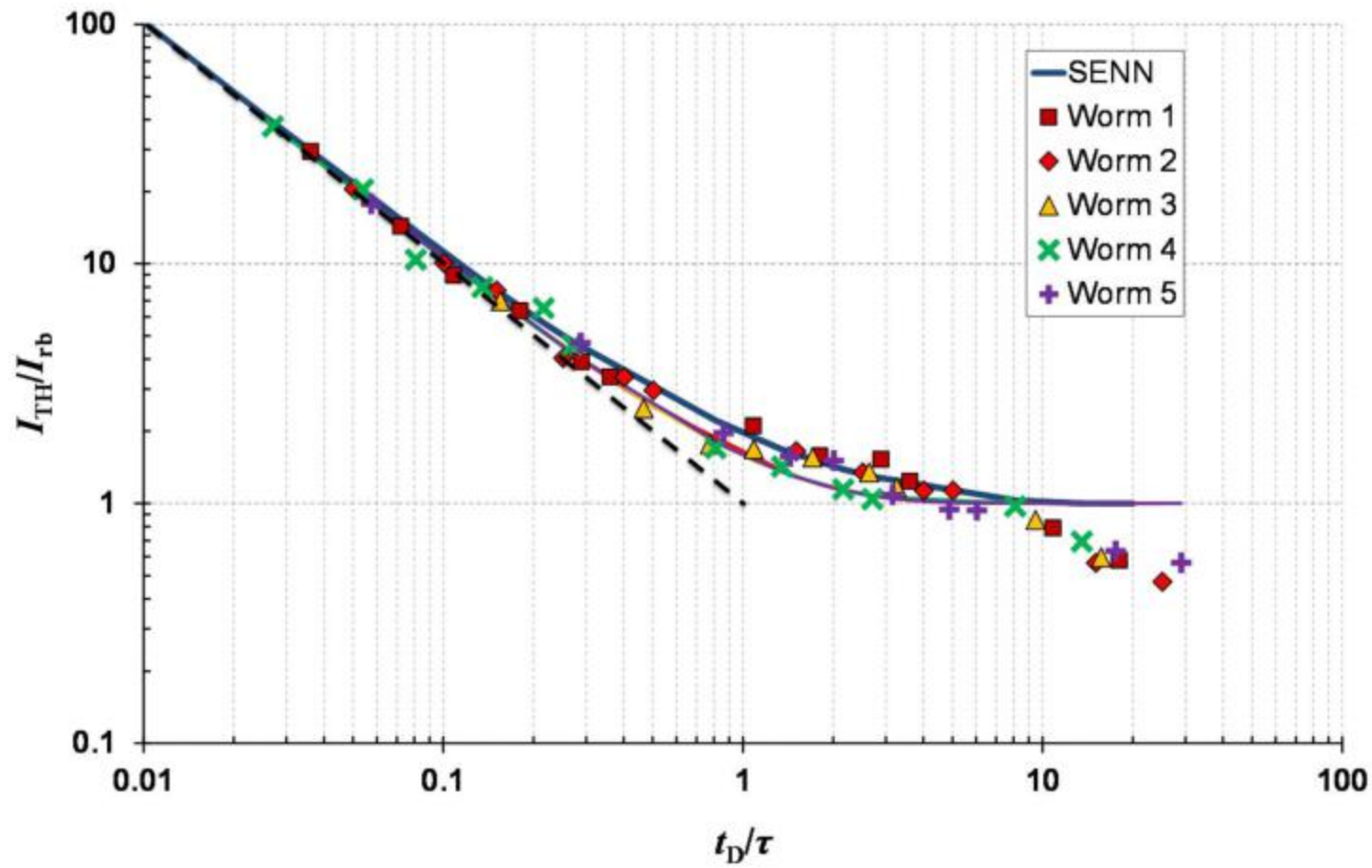


## Measurement/preparation procedure

- Priprema gujavice i laboratorija
  - kontrolirana temperatura
  - anestezija - 10% otopina alkohola u vodi na 5 minuta
  - gujavica se pažljivo prikači na podlogu od stiropora bez da se ošteti živac
  - treba voditi računa o polarizaciji elektroda

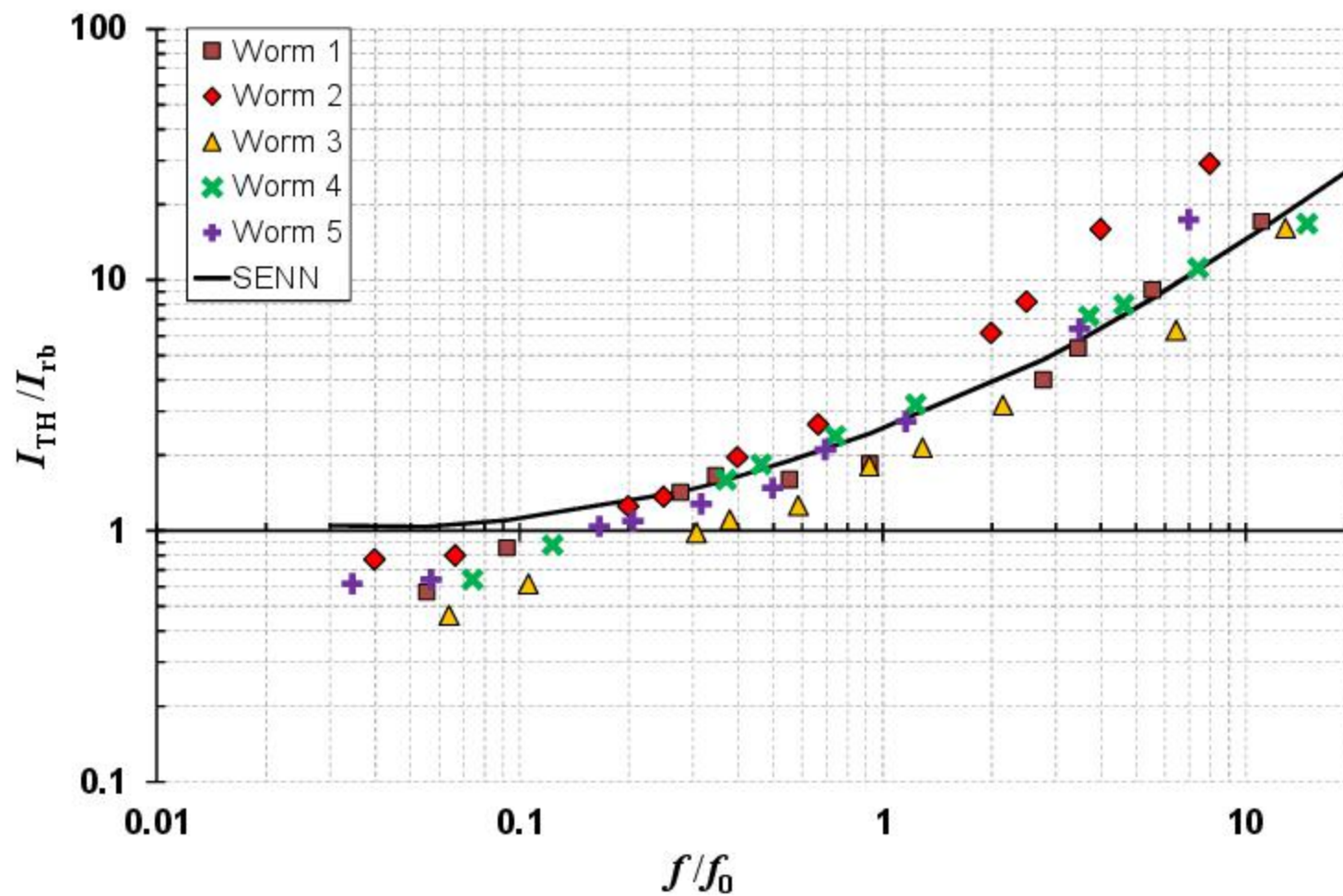


## Mjerni rezultati – monofazni pravokutni impuls





## Mjerni rezultati - kontinuirana sinusoida



## Conclusion

- Mjerni postav temeljen na mjerenju odziva jednog aksona je jednostavan i precizan
- Ovakav mjerni postav omogućava stimulaciju strujom proizvoljnog valnog oblika u širokom frekvencijskom i amplitudnom području
- Valni oblik struje ostaje očuvan bez obzira na promjene u impedanciji tereta (tijelo gujavice, čovjeka,...)
- Eksperimenti temeljeni na ovom mjernom postavu pokazali su vrlo dobro slaganje sa simulacijskim rezultatima (SENN)