



VYSOKÉ UČENÍ FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
TECHNICKÉ A KOMUNIKAČNÍCH
V BRNĚ TECHNOLOGIÍ

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

MODELOVÁNÍ TEPELNÝCH ÚČINKŮ ELEKTROPORAČNÍHO PROCESU NA ŽIVOU TKÁŇ

Roman Kafka

Vedoucí práce: Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.

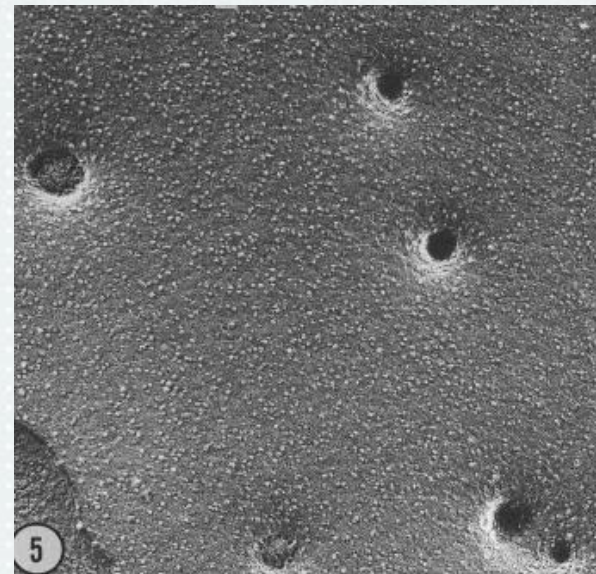
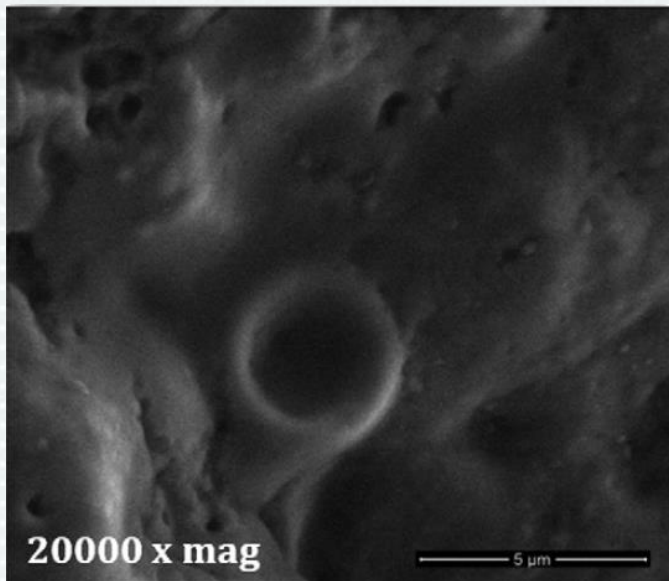
24. května 2019

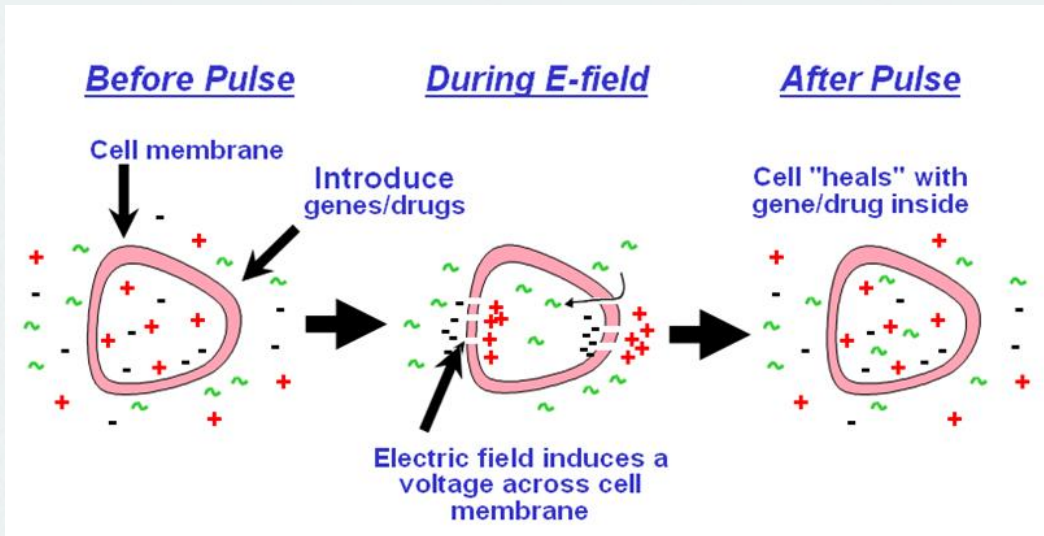
Obsah

- Fenomén elektroporace
- Motivace k simulaci
- Řešení vlastního modelu
- Závěr

Princip elektroporace

- Zvýšení propustnosti buněčných membrán po aplikaci krátkého vysokonapěťového pulzu
- Porušení homeostázy a případná smrt buňky

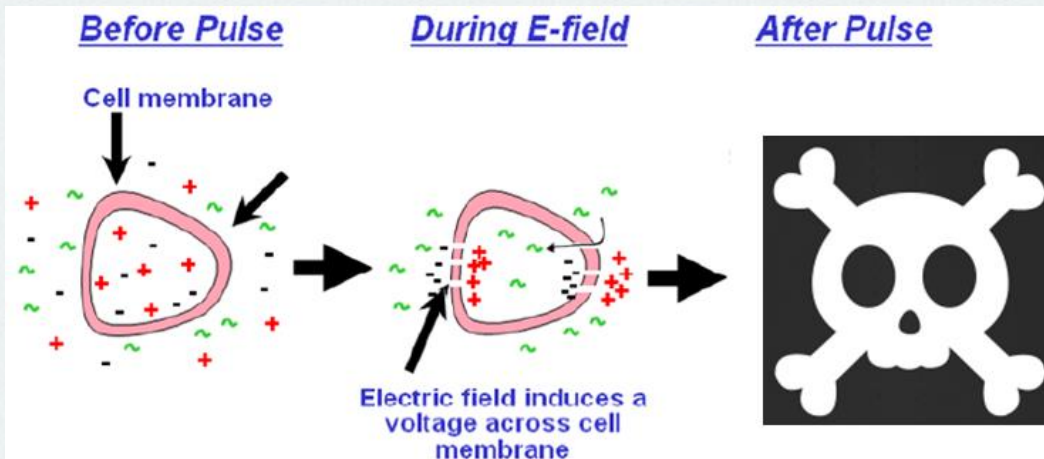




Reverzibilní elektroporace

- Dočasné póry
- Zavádění léků, proteinů, barev atd. do buněk

$$|\vec{E}_{rev}| \leq |\vec{E}| \leq |\vec{E}_{irrev}|$$



Ireverzibilní elektroporace

- Trvalé póry
- Sterilizace, buněčná ablace

$$|\vec{E}_{irrev}| \leq |\vec{E}| \leq |\vec{E}_{therm}|$$

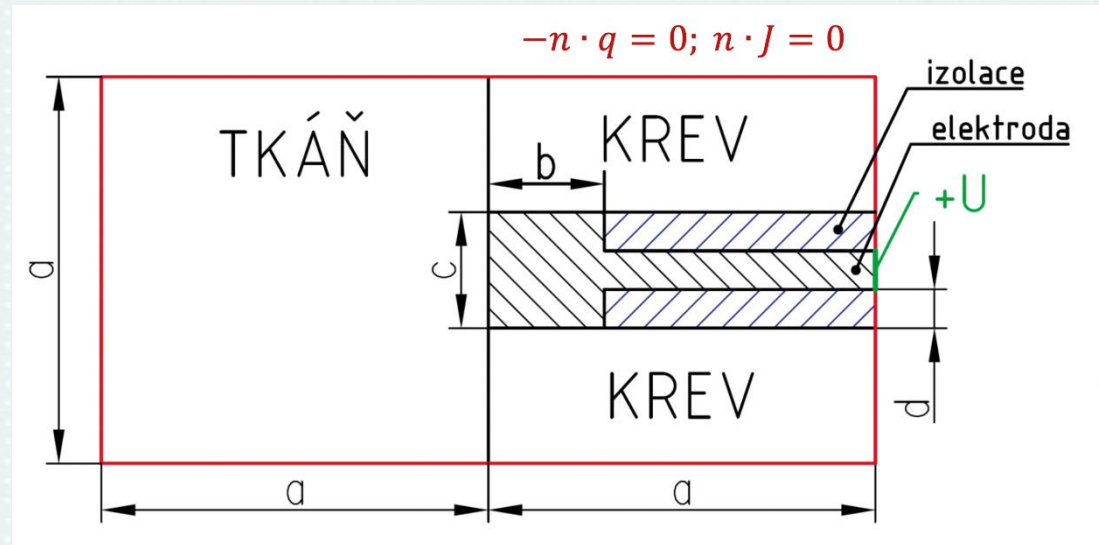
Irreverzibilní elektroprace

- Netermální, minimálně invazivní ablační technika
- Cílené odstranění nežádoucí tkáně bez významného dopadů na okolní zdravou tkáň
- Alternativa k termálním ablačním technikám
- Nedochází k destrukci mezibuněčných a citlivých struktur (cévy, nervy, žlučové cesty, atd.)
- Nezpůsobuje zánět ani imunoreakci
- Bez fibrózy a jizvení
- Kolonizace prostoru po odumřelých buňkách zdravými buňkami

Motivace k simulaci

- Dle požadavků klinické praxe
- Stanovení hranice reverzibilní a ireverzibilní elektroporace
- Stanovení hranice tepelného poškození
- Nesmí dojít ke koagulační nekróze

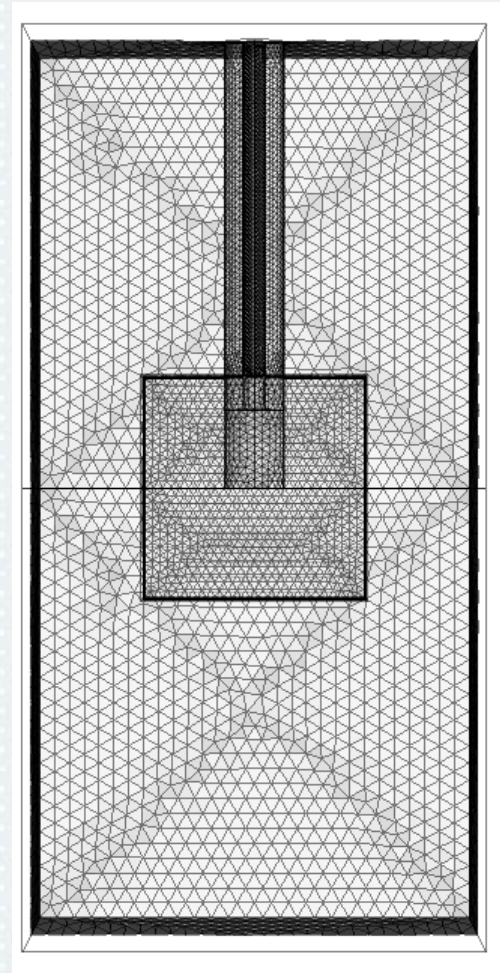
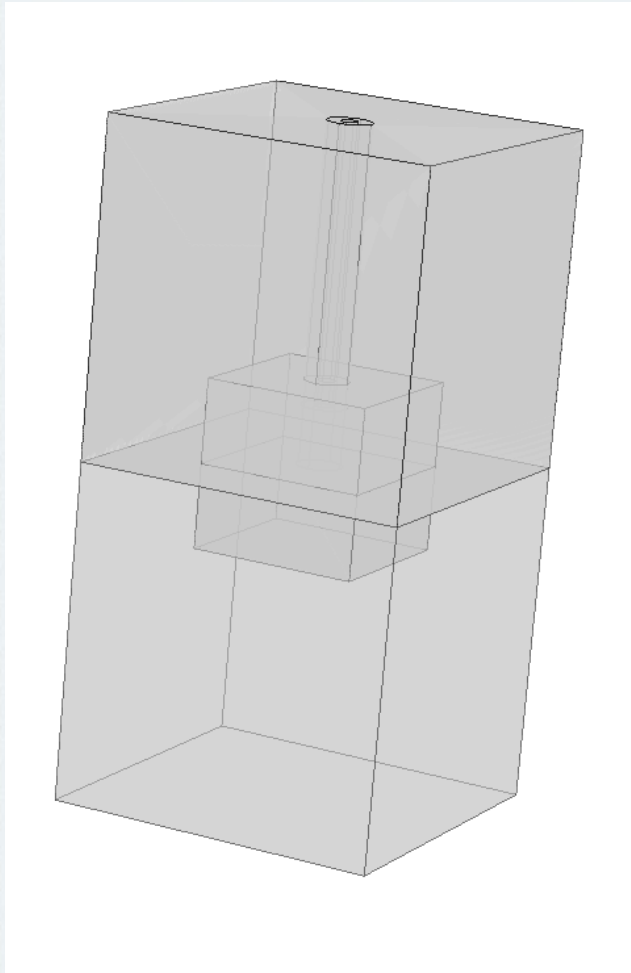
Řešený model



Katetr THERMOCOOL SMARTTOUCH® D133602
použitý při experimentu

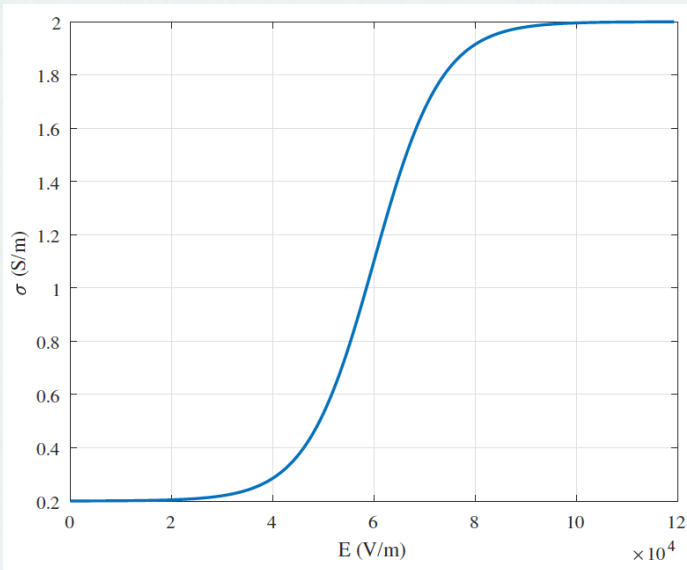
- 6 elektrod → pro zjednodušení pouze jedna

Řešený model - pokračování



Využití nástroje pro výpočet

$$\rho_t c_t \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + \cancel{w_b c_b (T_b - T)} + \cancel{p_m} + \sigma |\nabla \varphi|^2$$



- Pennesova rovnice
- Moduly *Electric Currents*, *Bioheat transfer*, *Events*
- Izotropní a anizotropní závislost elektrické vodivosti

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

$$\sigma(E) = \begin{bmatrix} \sigma_{xx}(E) & 0 & 0 \\ 0 & 3 \cdot \sigma_{yy}(E) & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz}(E) \end{bmatrix}$$

- ▼ **Electric Currents (ec)**
 - ▢ Current Conservation 1
 - ▢ Electric Insulation 1
 - ▢ Initial Values 1
 - ▢ Electric Potential 1
 - ▢ Ground 1
- ▼ **Bioheat Transfer (ht)**
 - ▶ ▢ Biological Tissue 1
 - ▢ Initial Values 1
 - ▢ Thermal Insulation 1
 - ▢ Blood
 - ▢ Electrode
 - ▢ Isolation
 - ▢ Heat Source 1
- ▼ **Events (ev)**
 - ▢ Discrete States 1
 - ▢ Explicit Event 1
 - ▢ Explicit Event 2

▼ **Heat Source**

General source

Q_0

W/m³

▼ **Discrete States**

$u(t_0) = u_0$

Name	Initial value (u0)	Description
OnOff	1	
	0	

▼ **Event Timings**

Start of event:
 t_i s

Period of event:
 T s

Use consistent initialization

▼ **Reinitialization**

Variable	Expression
OnOff	1
	0

▼ **Event Timings**

Start of event:
 t_i s

Period of event:
 T s

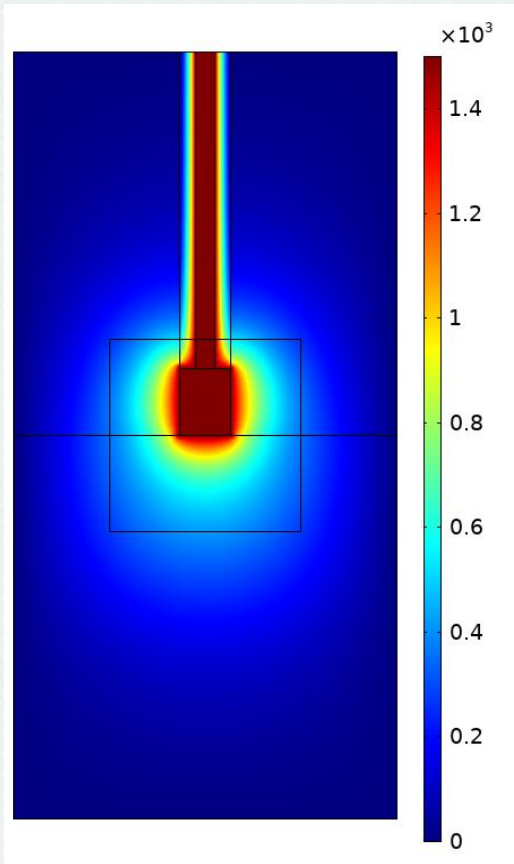
Use consistent initialization

▼ **Reinitialization**

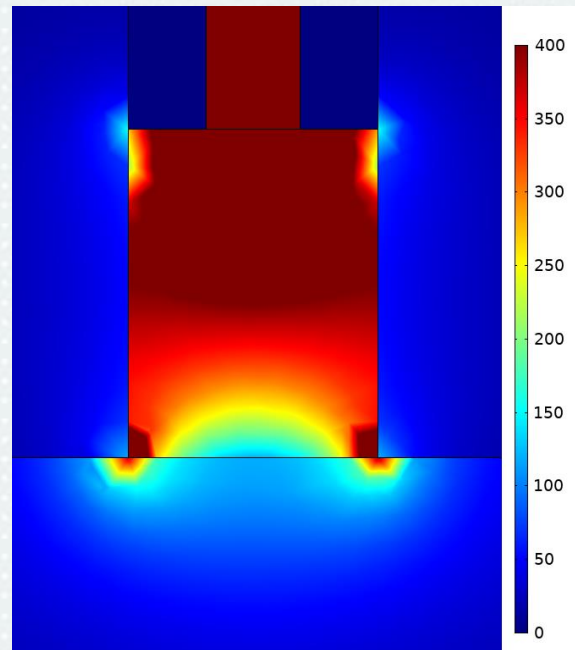
Variable	Expression
OnOff	0
	0

Výsledky

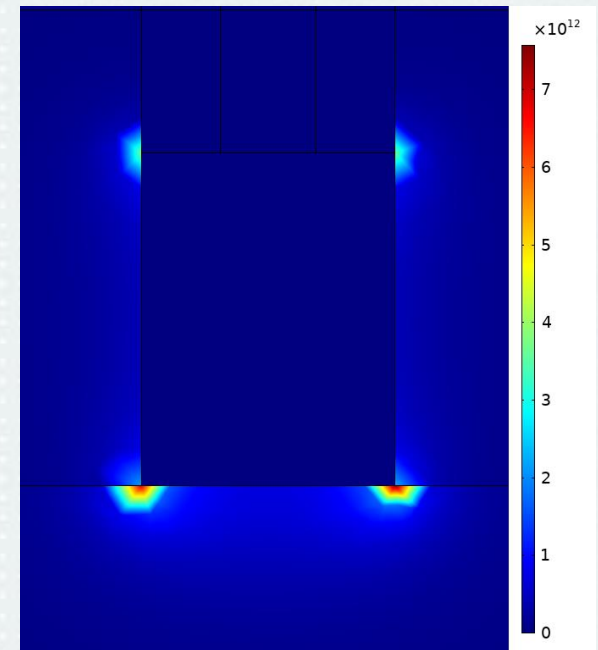
- Pulzy o velikosti napětí 1500 V



Napětí [V]

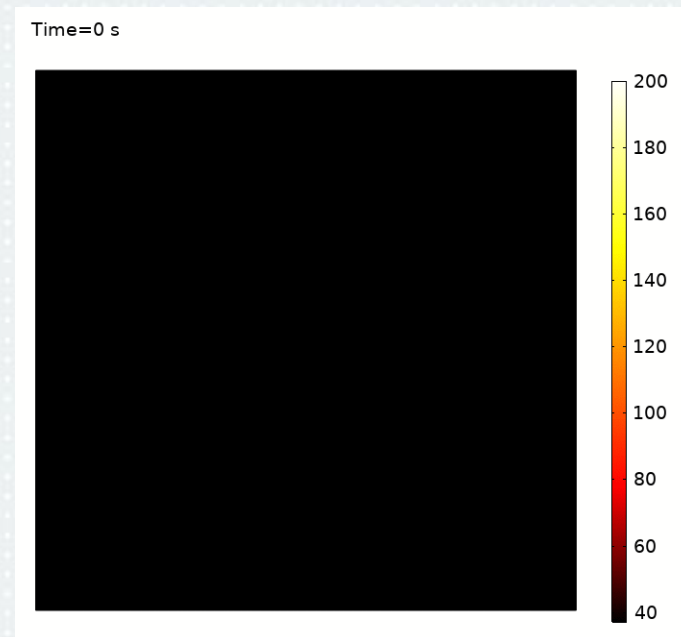
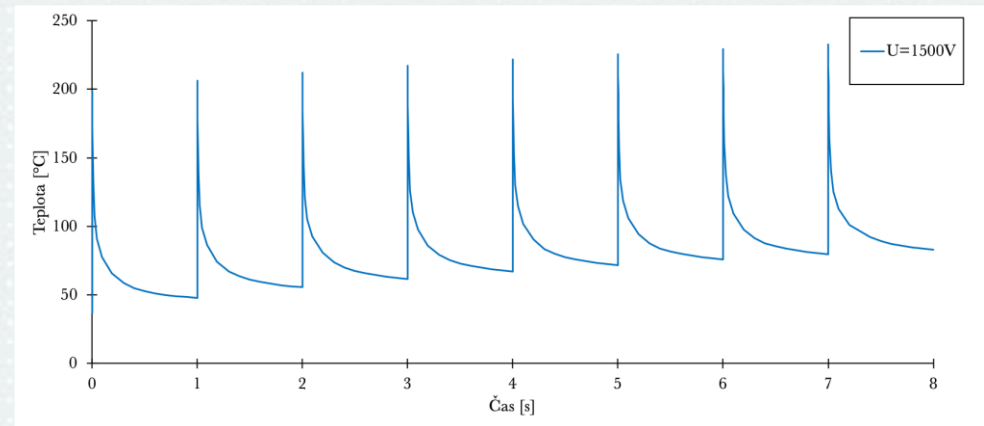
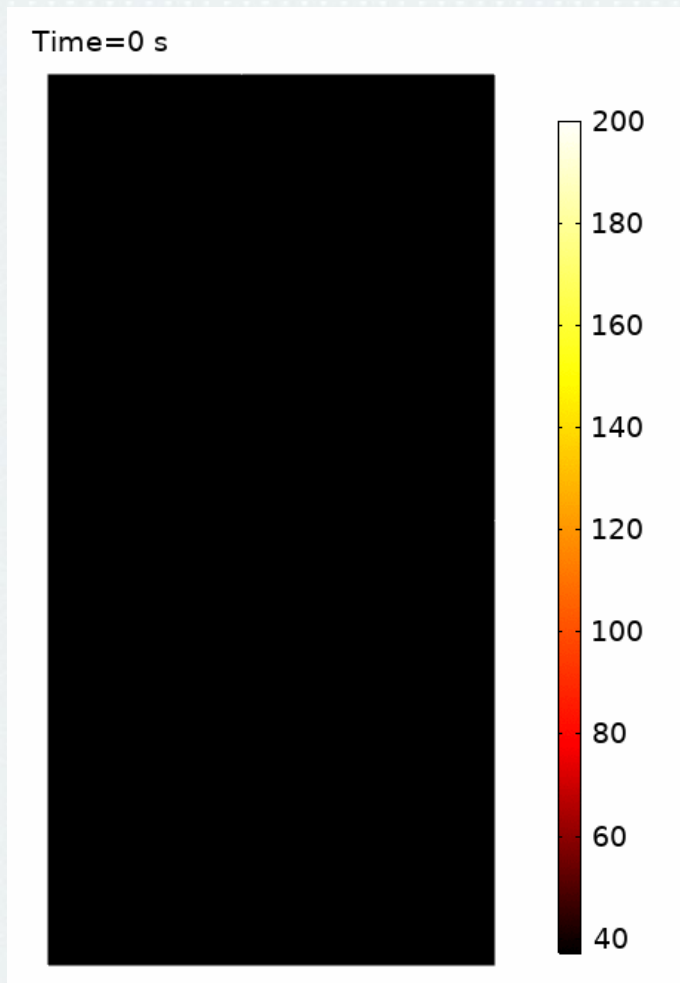


Proudová hustota
[A/cm²]

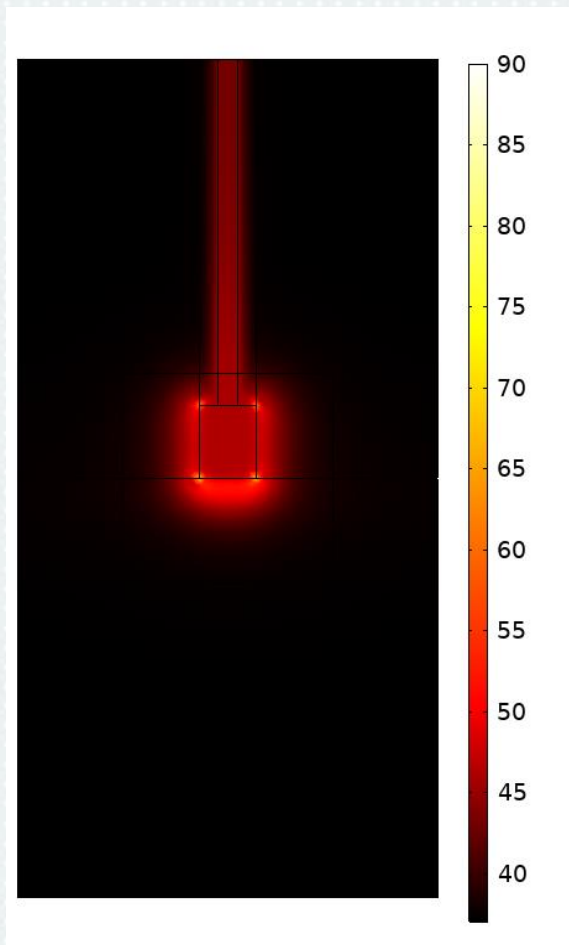


Jouleovy ztráty
[W/m³]

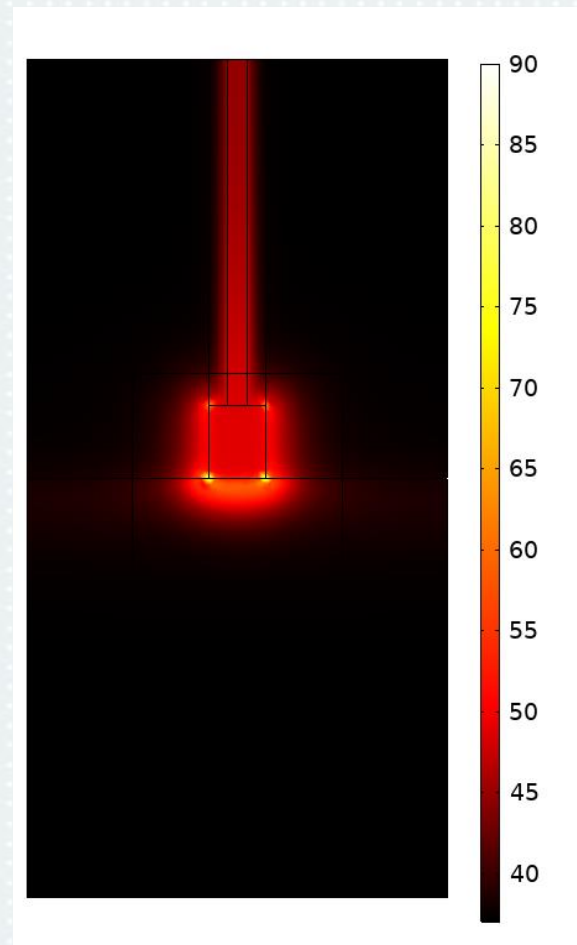
Výsledky - pokračování



Výsledky - pokračování



Izotropní elektrická
vodivost



Anizotropní elektrická
vodivost

Závěr

- Výpočet nebude přesně odpovídat výsledkům experimentu → mnoho zjednodušení
- Řešeno pouze pro 8 napěťových pulzů
- Dnes mimo DC pulzy také AC pulzy
- Použití přesnějších parametrů tkáně
- Vývoj nového typu katetru, který bude optimalizovaný pro elektroporační účely

**Děkuji Vám
za pozornost**

www.feec.vutbr.cz