

# Elektrická impedanční tomografie

Biofyzikální ústav LF MU

Projekt FRVŠ 911/2013

# Elektrická impedanční tomografie

- **Je neinvazivní lékařská technika využívající nízkofrekvenční elektrické proudy pro zobrazení elektrických vlastností tkání a vnitřních struktur těla.**
- **Různé biologické tkáně mají různé elektrické vlastnosti a existují výrazné rozdíly elektrických vlastností mezi zdravými a patologickými tkáněmi.**
- **Technika od sebe umožňuje odlišit jednotlivé typy tkání a poskytuje důležité informace o struktuře, fyziologickém stavu, patologii a funkci tkání.**

# Elektrická impedanční tomografie

- **Měření elektrických vlastností přináší nové možnosti v lékařském zobrazování a nabízí užitečnou alternativu ke standardním zobrazovacím metodám.**
- **Uplatnění v lékařské diagnostice a klinickém vyšetřování, při screeningu nebo kontinuálním monitorování funkcí pacienta u lůžka.**
- **Kromě statického zobrazení umožňují některé systémy zaznamenat také dynamické změny nebo vytvořit 3D obraz měřené oblasti.**

# Elektrická impedanční tomografie

## Aplikace v praxi

- **Vyšetření a monitorování funkce plic (např. dýchací potíže, poranění plic, ARDS, rakovina plic).**
- **Kontrola funkce plic při umělé plicní ventilaci.**
- **Stanovení míry prokrvení plic, míry ventilace plic, hodnocení plicních objemů nebo monitorování distribuce vzduchu v plicích.**
- **Diagnostika hemothoraxu, pleurálních výpotků, plicních otoků, plicní embolie nebo krve v plicích, dále např. pneumothoraxu nebo plicního emfyzému.**

# Elektrická impedanční tomografie

## Aplikace v praxi

- **Vyšetření a screening prsu (rakovina prsu, zánět prsní žlázy). Tzv. MEIK systémy.**
- **Neurologie: Diagnostika mozkové ischemie a mrtvice, mozkového krvácení, lokalizace epileptických ložisek, monitorování mozkových funkcí a aktivity neuronů.**
- **Diagnostika nádorů podkožních tkání, sledování gastrického vyprazdňování, hodnocení průtoku krve.**
- **Monitorování teploty (např. hypertermické terapie).**

# Elektrické vlastnosti tkání

- **Elektrický odpor (R):** Popisuje vztah mezi napětím a stejnosměrným elektrickým proudem.

$$R = \frac{U}{I} \quad [\Omega]$$

- **Elektrická vodivost:** Popisuje schopnost látky vést elektrický proud.

$$G = \frac{1}{R} \quad [S]$$

# Elektrické vlastnosti tkání

- **Měrný elektrický odpor (rezistivita):** Popisuje elektrický odpor vodiče jednotkové délky ( $l$ ) a jednotkového průřezu ( $S$ ). Rezistivita je materiálová konstanta.

$$\rho = \frac{RS}{l} \quad [\Omega \cdot m]$$

- **Měrná elektrická vodivost (konduktivita):** Definuje se jako převrácená hodnota měrného elektrického odporu.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad [\Omega^{-1} \cdot m^{-1}]$$

# Elektrické vlastnosti tkání

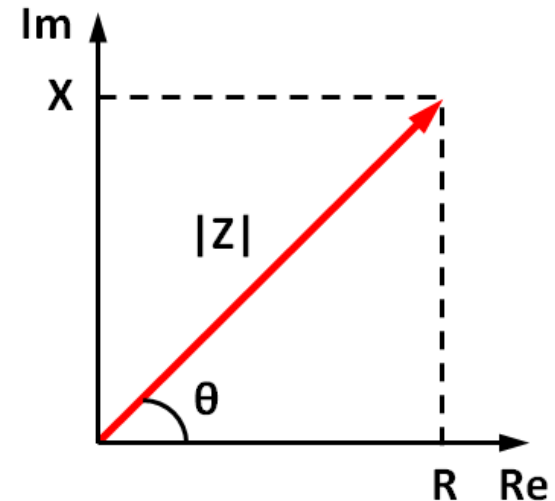
- **Elektrická impedance ( $\mathbf{Z}$ ):** Popisuje odpor látky proti průchodu střídavého proudu a určuje fázový posun mezi elektrickým napětím a proudem. Je vektorová veličina.

$$\mathbf{Z} = \frac{U}{I} \quad [\Omega]$$

$$\mathbf{Z} = |\mathbf{Z}|e^{j\theta}$$

$$\mathbf{Z} = R + jX = |\mathbf{Z}| \cos \theta + j|\mathbf{Z}| \sin \theta$$

$$|\mathbf{Z}| = \sqrt{R^2 + X^2}$$



- Úhel  $\theta$  popisuje fázový posun mezi napětím a proudem.



# Elektrické vlastnosti tkání

- **Admittance:** Definuje se jako převrácená hodnota impedance.

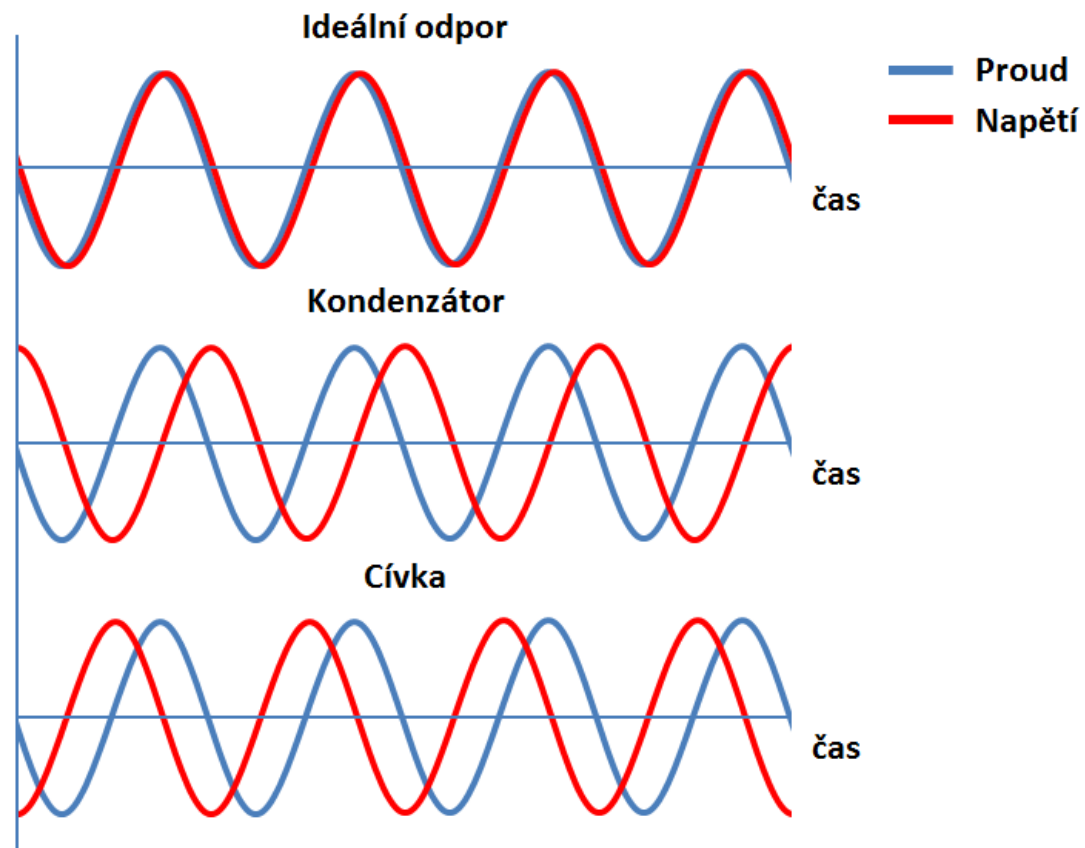
$$Y = \frac{1}{Z} \quad [S]$$

- **Elektrická permitivita ( $\epsilon$ ):** Je popisována jako míra rozdělení náboje uvnitř látky vlivem vnějšího elektrického pole. Popisuje míru zeslabení vlivu elektrické síly látkou.

# Elektrické vlastnosti tkání

- **Elektrická impedance se uplatňuje především v obvodech střídavého proudu s kapacitními prvky a/nebo prvky s indukčností.**
  - **Impedance rezistoru (rezistance):** Fázový posun mezi napětím a proudem není ovlivněn:  $Z_R = R$
  - **Impedance cívky (induktance):** Pozitivní fázový posun (proud se zpožďuje za napětím) :  $Z_L = j\omega L$
  - **Impedance kondenzátoru (kapacitance):**  
Negativní fázový posun:  $Z_C = \frac{1}{j\omega C}$
- **Impedance kondenzátoru, resp. cívky jsou závislé na frekvenci elektrického proudu  $\omega = 2\pi f$ .**

# Elektrické vlastnosti tkání



# Bioimpedance tkání

- **Tkáň je tvořena mezibuněčnou tekutinou a souborem morfologicky podobných buněk, které plní určitou funkci.**
- **Mezibuněčná (extracelulární) tekutina obsahuje:** vodu, elektrolyty, AMK, bílkoviny, cukry, mastné kyseliny a tuky, enzymy, hormony, neurotransmitery, soli, živiny, rozpuštěné dýchací plyny a produkty látkové výměny.
- **Buňka je ohraničena plazmatickou membránou a obsahuje cytoplazmu (intracelulární tekutina), jádro, buněčné organely a jiné buněčné struktury. Složení cytoplazmy je podobné extracelulární tekutině.**

# Bioimpedance tkání

- **Biologická tkáň se od kovových vodičů a elektrolytů odlišuje složitou mikroskopickou i makroskopickou strukturou, nehomogenitou a anizotropií.**
- **Tkáně vedou elektrický proud pouze prostřednictvím kladných a záporných iontů (tzv. vodič druhého řádu) obsažených v extracelulární i intracelulární tekutině.**
- **Nitrobuněčné i mezibuněčné mají obvykle vysokou měrnou vodivost (asi 0,2 až 1,0 S/m).**
- **Měrná vodivost buněčných membrán dosahuje mnohem nižších hodnot (asi  $10^{-6}$  až  $10^{-8}$  S/m).**

# Bioimpedance tkání

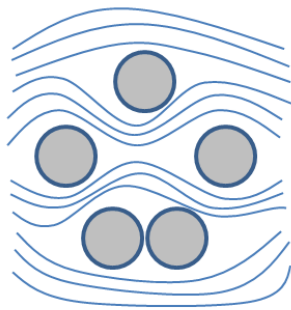
- **Odpor biologických tkání (tzv. bioimpedance) je velmi nestálý, je ovlivněn molekulovou, histologickou a anatomickou strukturou i funkčním stavem tkáně.**
- **Buněčná membrána se k proudu chová podobně jako kondenzátor. Kapacitní vlastnosti membrány se mění podle druhu a frekvence proudu.**
- **Celkový odpor tkáně je součtem frekvenčně nezávislých odporů tkáňových tekutin a frekvenčně závislého odporu buněčných membrán.**

# Bioimpedance tkání

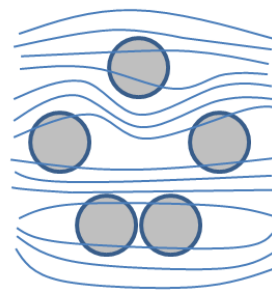
- **Odporové vlastnosti tkáně:** Jsou ovlivněny strukturou, složením (voda, elektrolyty, proteiny, aj.) a množstvím nitrobuněčných a mimobuněčných tekutin.
- **Kapacitní vlastnosti tkáně:** Závisí na charakteristice buněčných membrán (iontové kanály, mastné kyseliny, membránové proteiny, spoje mezi buňkami, tloušťka membrány, aj.) a vlastnostech buněk (počet, velikost, typ).
- **Tkáně s vysokým množstvím tekutiny (např. krev, svalová tkáň) mají nízký odpor. Naopak impedance tukové tkáně, kostí nebo vzduchu je velmi vysoká.**

# Bioimpedance tkání

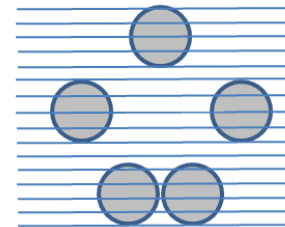
- **Stejnoseměrné proudy a střídavé proudy s nízkou frekvencí (< 5 kHz):** Membrána buňky je pro proud zcela nepropustná a vodivost tkáně je ovlivněna pouze odporem mimobuněčného prostoru.
- **Střídavé proudy s frekvencí cca 5-100 kHz:** S rostoucí frekvencí proudu odpor buněčné membrány klesá. Vodivost tkáně je dána odporem mimo- i nitrobuněčného prostoru.
- **Střídavé proudy s frekvencí >100 kHz:** Proud prochází přes buněčnou membránu téměř bez omezení.



$f < 5 \text{ kHz}$



$f \approx 50 \text{ kHz}$

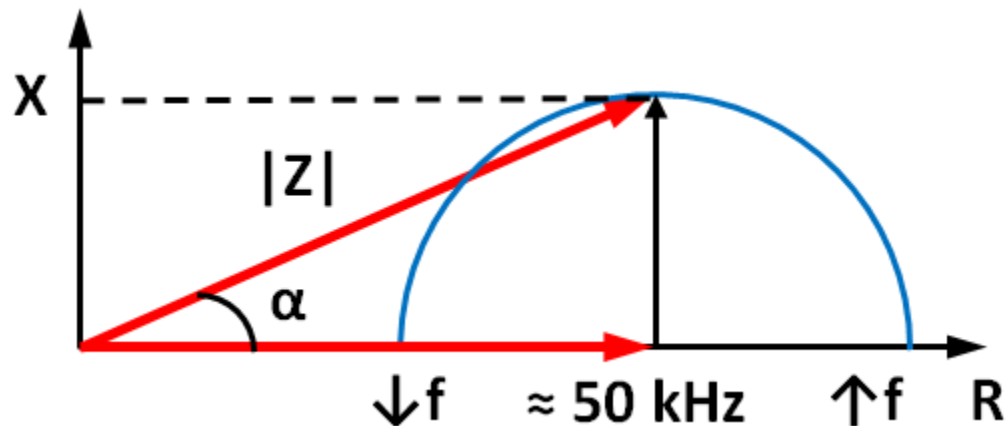


$f > 100 \text{ kHz}$



# Bioimpedance tkání

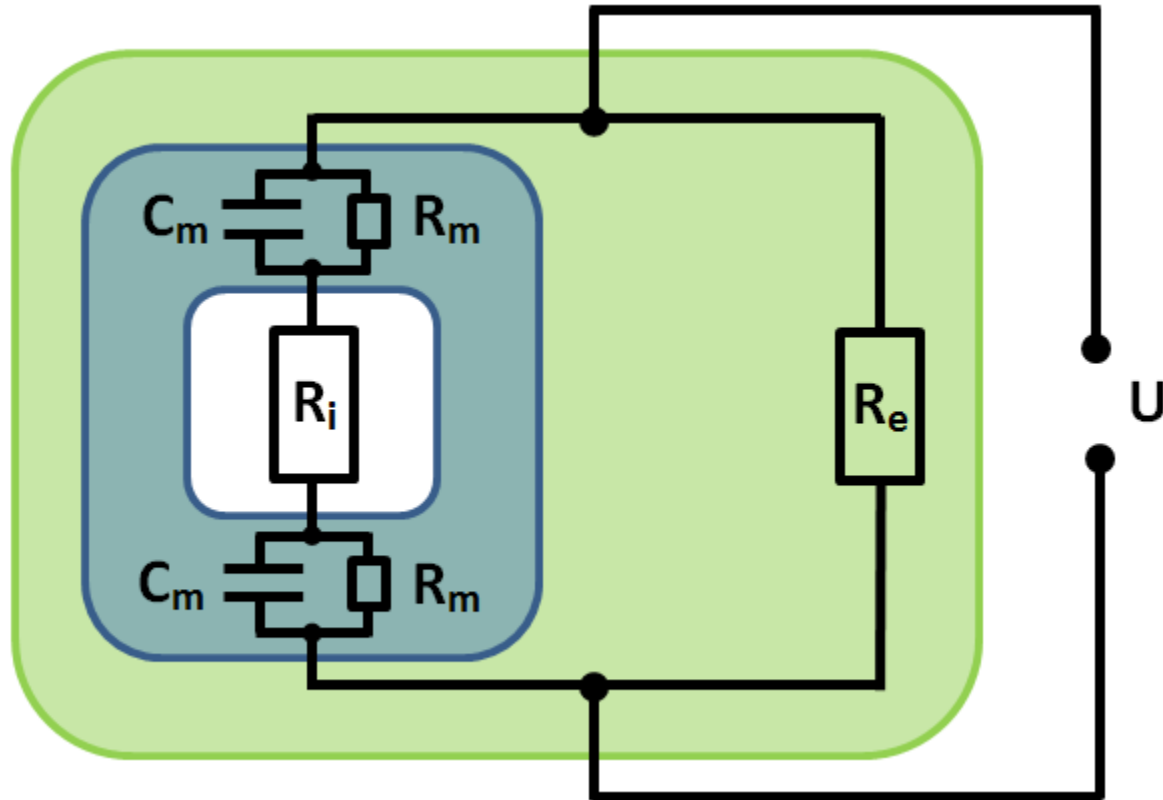
- **Kapacitní chování tkáně se zvyšuje s frekvencí střídavého proudu až do svého maxima při frekvenci proudu cca 50 kHz.**
- **S dalším zvyšováním frekvence proudu naopak dochází ke ztrátě kapacitních vlastností (tzv. Cole-Cole křivka).**



# Bioimpedance tkání

- **Pro výpočet bioimpedance je užitečné provést analogii biologické tkáně s elektrickým modelem.**
- **Tkáň je tvořena buňkami a mimobuněčnou tekutinou a lze ji chápat jako mikroskopickou síť elektrických obvodů.**
- **Obvyklým modelem tkáně je čtyřprvkové odporově-kapacitní zapojení tvořené:**
  - Odpozem extracelulární tekutiny ( $R_e$ )
  - Odpozem intracelulární tekutiny ( $R_i$ )
  - Paralelním zapojením kapacity membrány ( $C_m$ ) a odporu buněčné membrány ( $R_m$ )

# Bioimpedance tkání



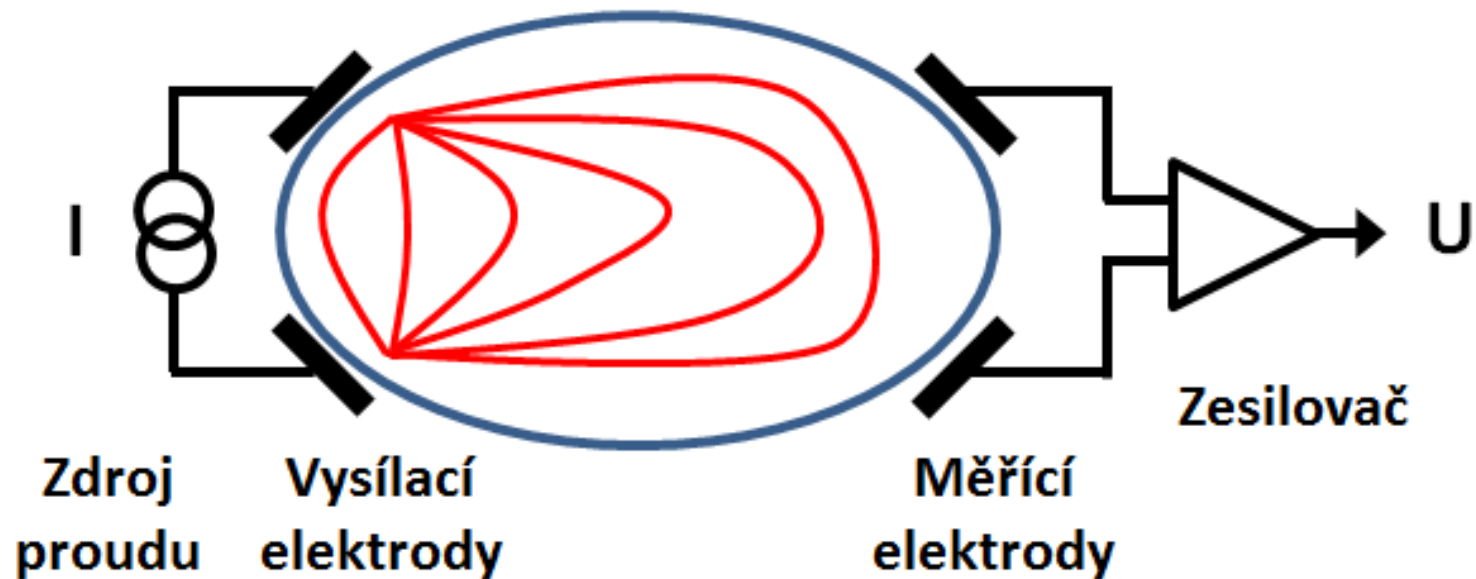
# Elektrická impedanční tomografie

## Princip metody

- **EIT systémy jsou tvořené zdrojem elektrického proudu, vysílacími a měřícími elektrodami, zesilovačem signálu a obvody pro zpracování signálu.**
- **Používají se výhradně zdroje střídavého proudu o frekvenci asi 10 kHz až 1 MHz, které pronikají přes membránu buněk.**
- **Stejnoseměrné proudy se nepoužívají, protože při jejich aplikaci vzniká na rozhraní elektroda-povrch těla polarizovaná vrstva s nábojem, která může maskovat a ovlivňovat naměřené elektrické signály.**

# Elektrická impedanční tomografie

## Princip metody



# Elektrická impedanční tomografie

## Princip metody

- **Velikost proudů musí dodržovat přísné limity:** nesmí poškozovat tkáň a musí být pod prahem stimulace buněk.
- **Obvykle od 0,1 mA do 1 mA.**
- **Normy uvádějí bezpečnou velikost střídavého proudu max. 3,5 mA ( $f=10$  až 100 Hz) a 1 mA ( $f=10$  kHz).**
- **Aby zdroj proudu vyslal do objektu přesnou velikost proudu, musí mít pro všechny vysílací frekvence velmi velkou výstupní impedanci (ideálně  $Z \rightarrow \infty$ ).**

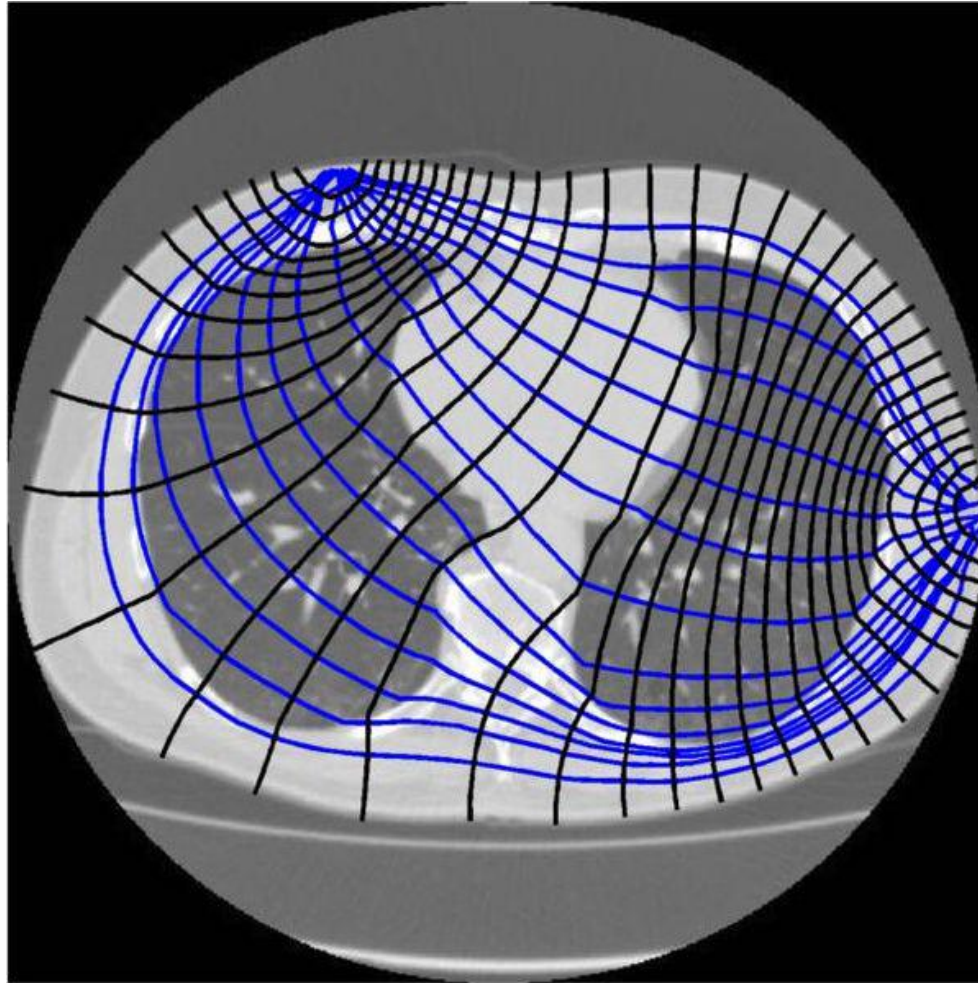
# Elektrická impedanční tomografie

## Princip metody

- **Vysílacími elektrodami jsou do objektu vyslány střídavé proudy. Působením proudů dochází uvnitř objektu k rozložení potenciálu, které je ovlivněno elektrickými vlastnostmi vnitřních struktur objektu.**
- **Hladiny se stejným potenciálem (tzv. izopotenciální hladiny) jsou vždy kolmé na směr šíření el. proudů.**
- **Šíření elektrických proudů v objektu se řídí Kirchhoffovými zákony: Proudů procházejí objektem mezi elektrodami po uzavřených smyčkách.**

# Elektrická impedanční tomografie

## Princip metody





# Elektrická impedanční tomografie

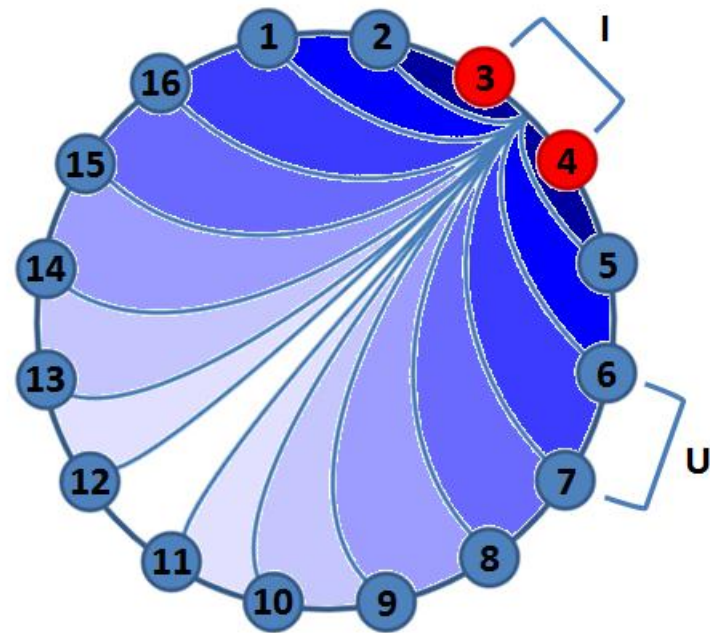
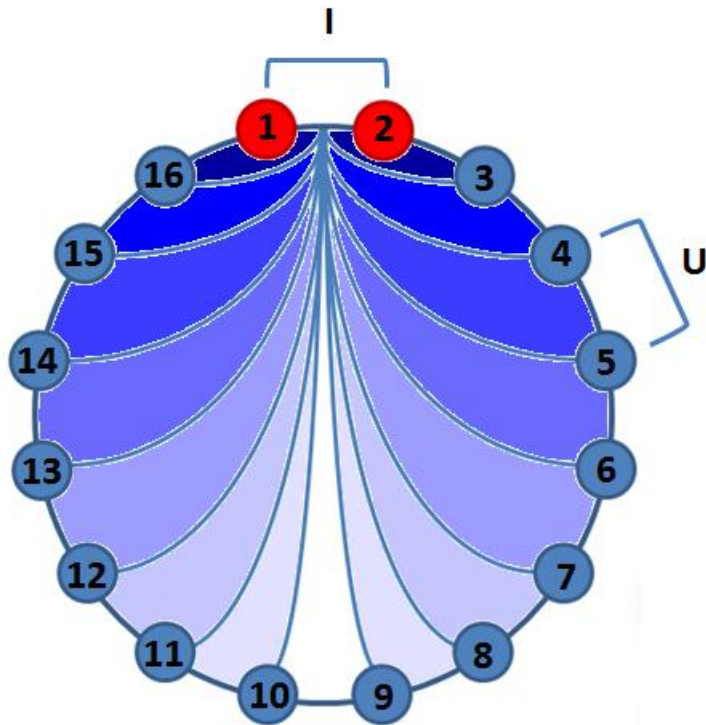
## Princip metody

- **Rozložení izopotenciálních hladin uvnitř objektu vytváří na povrchu objektu tzv. napěťové profily, které jsou detekovány měřicími elektrodami.**
- **Změny elektrických vlastností uvnitř objektu ovlivňují rozložení potenciálu a vyvolávají změny napěťových profilů na povrchu objektu.**
- **K vysílání elektrických proudů se obvykle používá jedna dvojice elektrod. Snímání napětí z povrchu objektu je zajištěno velkým počtem měřicích elektrod (napětí je měřeno mezi dvojicemi měřicích elektrod).**

# Elektrická impedanční tomografie

## Princip metody

- Např. pro systém se 16 elektrodami můžeme získat celkem  $16 \cdot 13 = 208$  napěťových profilů. Polovina měření (tj. 104) je nezávislých, druhá polovina měření odpovídá převráceným hodnotám.



# Elektrická impedanční tomografie

## Princip metody

- **Rozlišení obrazu roste s počtem měřících elektrod a je podmíněno provedením mnoha měření (stovky až tisíce) pro různá rozložení potenciálu uvnitř objektu.**
- **Ze získaných sad napětí, odlišných pro každé rozložení potenciálu, lze rekonstruovat obraz.**
- **Jednotlivá měření lze provést např. přepínáním dvojic elektrod, mezi kterými se detekuje napětí.**
- **Jinou možností je přepínání dvojice vysílacích elektrod, které generují v objektu proudy. Záznam se pak děje zbývajícimi dvojicemi měřících elektrod.**

# Elektrická impedanční tomografie

## Princip metody

- **Počet elektrod je různý – obvykle asi 16 až 256.**
- **Umístění a vzájemná pozice elektrod musí dodržovat přesná schémata:**
  - **Pásky okolo těla (např. hrudníku):** poskytují příčný řez tkání
  - **2D pole (např. vyšetření prsu):** vytvářejí řez tkání paralelně s rovinou pole elektrod
- **Změna pozice nebo nepřesné umístění elektrod na povrchu objektu výrazně ovlivňuje výsledky měření a způsobuje výrazné odchylky při rekonstrukci obrazu.**
- **Ve skutečnosti nelze vytvořit obrazy v jednotlivých vrstvách, protože se elektrické proudy šíří vždy celým objemem objektu ve směru gradientu el. pole.**

# Elektrická impedanční tomografie

## Princip metody

- **Rekonstrukci obrazu lze provést po naměření všech sad napětí pomocí vhodných výpočetních algoritmů.**
  - Filtrovaná zpětná projekce
  - Aproximativní iterativní metody
- **Výstupem jsou statické nebo dynamické 2D nebo 3D obrazy rozložení elektrického parametru.**
- **3D obraz lze získat, pokud jsou k dispozici data z celého povrchu snímané oblasti.**
- **Dynamické změny elektrických vlastností v čase (tzv. funkční EIT) mohou nést důležitou informaci o funkci vyšetřované tkáně.**



- **Výpočet neznámých elektrických vlastností tkáně spočívá v řešení rovnic, které popisují vztah mezi známou velikostí aplikovaného elektrického proudu a elektrickým napětím naměřeným na povrchu těla.**
- **Řešení je podmíněno přesnou znalostí geometrie hranic objektu (tvar povrchu objektu) a uspořádáním měřících elektrod na povrchu objektu.**
- **Princip výpočtu vychází z Maxwellových rovnic elektromagnetického pole, Ohmova zákona a Kirchhoffova zákona:**

$$\nabla \cdot \sigma \nabla \phi = 0$$

$\sigma$  ... měrná elektrická vodivost

$\phi$  ... elektrický potenciál

# Elektrická impedanční tomografie

## Výhody

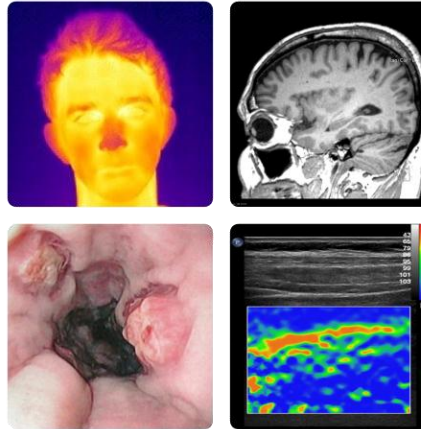
- **Jednoduchost, bezpečnost, rychlost a nízká cena.**
- **Vyhodnocení zcela odlišných parametrů tkání, než které získáváme z jiných zobrazovacích metod.**
- **Možnost provádět screeningová vyšetření nebo dlouhodobé kontinuální monitorování u lůžka.**



# Elektrická impedanční tomografie

## Limitace a nevýhody

- **Nízká rozlišovací schopnost, výpočetní náročnost a špatná reprodukovatelnost výsledků.**
- **Omezený dosah měřicích elektrod do hloubky.**
- **Nutná přesná znalost tvaru povrchu objektu a rozmístění elektrod na povrchu objektu.**
- **Protože se elektrické proudy nešíří objektem po přímkách, nemusí pozice struktur v obraze odpovídat skutečné pozici v objektu – nevhodné pro morfologii.**
- **Četné obrazové artefakty:** Impedanční změny v hrudníku vlivem dýchání (až o 300 %) a srdeční činnosti (až o 3 %), pohybové artefakty, odpor vrstvy rozhraní elektroda-povrch objektu, změna pozice elektrod, aj.



**Děkuji za pozornost !**