



## Návod na laboratorní úlohu

### Modelování radiofrekvenčních cívek pro magnetickou rezonanci.

**Název studijního předmětu:** Modelování a simulace technických systémů

**Vedoucí cvičení/experimentu:** Ing. Matouš Brunát, Doc. Ing. David Vrba, Ph.D.

**Anotace cvičení/experimentu:**

V rámci tohoto cvičení navrhnete a optimalizujete radiofrekvenční (RF) objemovou cívku pro magnetickou rezonanci (Birdcage) tak, aby vykazovala homogenní magnetické pole  $B_1$  uvnitř cívky. Toto je obvyklý požadavek u MRI systémů, aby bylo dosaženo vyššího rozlišení snímků a potlačení artefaktů. Homogenní magnetické pole je získáno tzv. kvadraturním napájením (dva zdroje mají vzájemně posunutou fázi o 90 stupňů) cívky a správnou hodnotou soustředěných součástek (kapacitorů) v cívce. Aby cívka pracovala na Larmorově frekvenci, je nezbytné vypočítat pomocí parametrické studie velikosti těchto kapacit v každé noze cívky.

**Cíle cvičení/experimentu:**

Modelování radiofrekvenční objemové cívky pro magnetickou rezonanci (Birdcage) a simulace rozložení magnetického pole  $B_1$  v modelu lidské hlavy v prostředí COMSOL Multiphysics s využitím výpočetního clusteru.

**Popis použitých zařízení/přístrojů:**

Výpočetní cluster.

## 1. Birdcage RF cívka

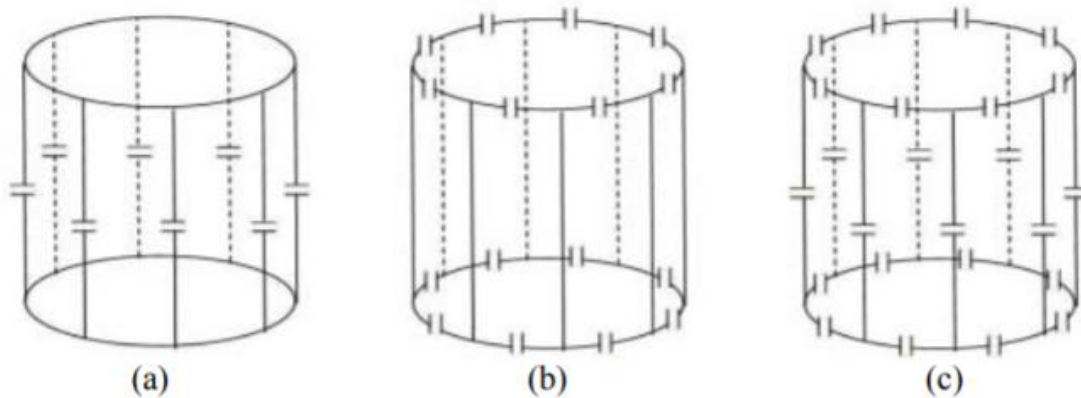
Radiofrekvenční (RF) MRI cívky jsou nutnou částí každé MRI. RF cívky se dělí dle jejich funkce na tři hlavní skupiny. Vysílače, přijímače a vysílače/přijímače. Vysílače vytvářejí rotující magnetické pole ( $B_1$ ), které je kolmé k statickému magnetickému poli ( $B_0$ ). Vytvořené rotační pole excituje jádra atomů v Larmorově frekvenci. Přijímače pak na stejné frekvenci zachytávají záření vytvořené při relaxaci jader zpátky do neexcitovaného stavu. RF cívky mohou také sloužit jako přijímač i vysílač, avšak v dnešních MRI to není běžné.

Pravděpodobně nejoblíbenější RF cívkou je birdcage cívka. Jednoduchá konstrukce a homogenní magnetické pole díky sinusovému rozložení proudové hustoty na povrchu cívky vedli k masivnímu rozšíření jejich popularity. Birdcage je nejčastěji využívána jako cívka vysílací.

Birdcage se skládá ze dvou kruhových smyček zvaných end rings (koncové prsteny), které jsou spojené pomocí stejně dlouhých segmentů zvaných rungs (příčky). Počet příček musí být vždy sudý. Pro vytvoření potřebného homogenního pole je nutné na příčky či na koncové prsteny připájet stejné kondenzátory. Pro zlepšení homogenity pole uvnitř birdcage je možné přidat více páru příček.



Podle rozmístění kondenzátoru v birdcage odlišujeme 3 druhy birdcage. Tyto typy jsou zobrazeny na obrázku 1. Thiyagarajan, K., Kesavamurthy, T. & Bharathkumar, G. Design and Analysis of Microstrip-



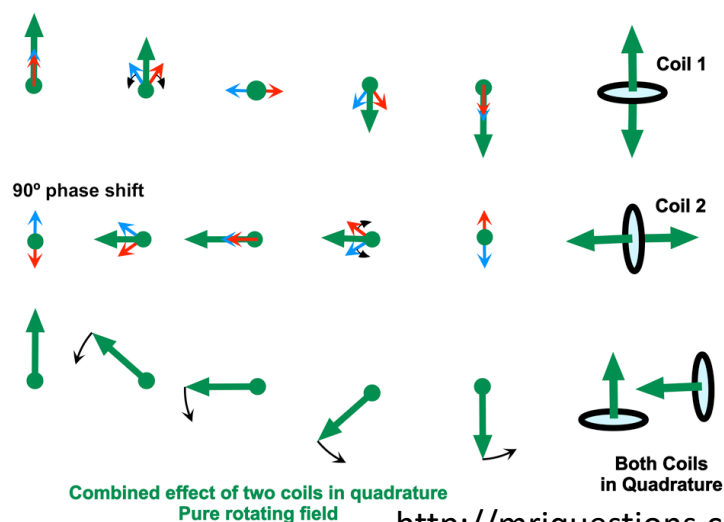
Thiyagarajan, K., Kesavamurthy, T. & Bharathkumar, G. Design and Analysis of Microstrip-Based RF Birdcage Coil for 1.5 T Magnetic Resonance Imaging. Appl Magn Reson 45, 255–268 (2014)

Obrázek 1: Umístění kondenzátorů na birdcage. a) Dolní propust b) horní propust c) pásmová propust.

Jak je vidno na obrázku 1. Dolní propust má kondenzátory umístěné na příčkách a horní propust na koncových prstenech. Pásmová propust pak obojí.

Birdcage cívky mají vždy sudý počet příček. Pokud má birdcage  $N$  příček a všechny kondenzátory mají stejnou kapacitu, má birdcage  $N/2$  rezonančních módů (frekvencí). Pro birdcage jako dolní propust je  $m = 1$  mod s nejnižší frekvencí a pro horní propust má mód  $m = 1$  ten s nejvyšší frekvencí.

Cívka je napájena pomocí dvou portů, které jsou od sebe geometricky posunuty o  $90^\circ$  a také fázově posunuty o  $90^\circ$ . Pokud je do portů přiváděn proud se stejným resonantním módem, vytváří se uvnitř cívky rotující homogenní pole.



<http://mriquestions.com/receive-only-coils.html>

Obrázek 2: Skládání módů uvnitř cívky. Porty jsou od sebe posunuty o  $90^\circ$  a je do nich přiváděno napětí se stejnou frekvencí. Skládáním těchto napětí dosáhneme homogenního rotujícího pole.



Obrázek 3: Ukázky používaných birdcage.

<https://mriquestions.com/birdcage-coil.html>

## 2. Cíl:

Namodelovat a vyšetřit RF birdcage v prostředí Comsol Multiphysics.

1. Vytvořit geometrii
2. Nastavit definice modelu
3. Vybrat vhodnou MESH.
4. Provést simulaci
5. Vykreslit rozložení pole uvnitř cívky, vykreslit povrchové proudy ve vodičích.
6. Vytvořit animaci rotace magnetického pole uvnitř cívky.

## 3. Postup:

### 3.1 Termíny

Pro práci v Comsolu je nutné znát několik termínů, které se při tvorbě modelu využívají. Tyto termíny je možné vidět i v jiných odvětvích, především v elektrotechnice.

- 1) Lumped element (LE) – Je jedním ze základních pojmů pro vyšetřování elektrických obvodů. Pod pojmem „element“ si můžeme představit jakýkoliv prvek v obvodu. Tedy cívky, kondenzátory, vodiče, rezistory atd. Při analýze obvodu narážíme na problém vzájemného ovlivnění prvků v obvodu. Například cívka kolem sebe vytvoří magnetické pole, které zpětně indukuje ve vodičích proud. Toto vzájemné ovlivnění bývá často zanedbáváno, avšak v reálných aplikacích hraje velikou roli. Proto byly zavedeny takzvané lumped elementy, které ignorují všechny interakce mezi součástkami. Pokud do obvodu přidáváme LE kondenzátor, přidáváme pouze hodnotu jeho kapacity bez ovlivnění okolím. V obvodu je nutné rozeznat, jaké části je možné za LE vyměnit a které ne.
- 2) Perfect electric conductor (PEC) – Je v modelování nejjednodušší varianta, jak modelovat kovy. Jak název napovídá, jedná se o ideální vodič, ve kterém nedochází ke ztrátám. Kovy se ideálním

vodičům velmi blíží a velmi část obývají jako PEC definovány. Například odpor mědi se pohybuje kolem  $1.7 \cdot 10^{-8} \Omega/\text{m}$ .

- 3) Scattering boundary condition – V tomto případě se jedná o termín čistě z modelování. Boundary (hranice, okraj) je v modelování okraj s určitými podmínkami. Nejznámější bývají takzvané okrajové podmínky, které spolu s počátečními podmínkami určují, jak se bude model chovat. Scattering boundary condition je jedna možnost okrajových podmínek. Pokud na scattering boundary condition dopadá záření, je rozptýleno „za model“. Jiné podmínky by mohly záření odrazit či dokonce generovat. Scattering boundary condition se používá často tam, kde by reálně mělo jednoduše pokračovat okolí (vzduch, voda atd.).

### 3.2 Vytvoření geometrie

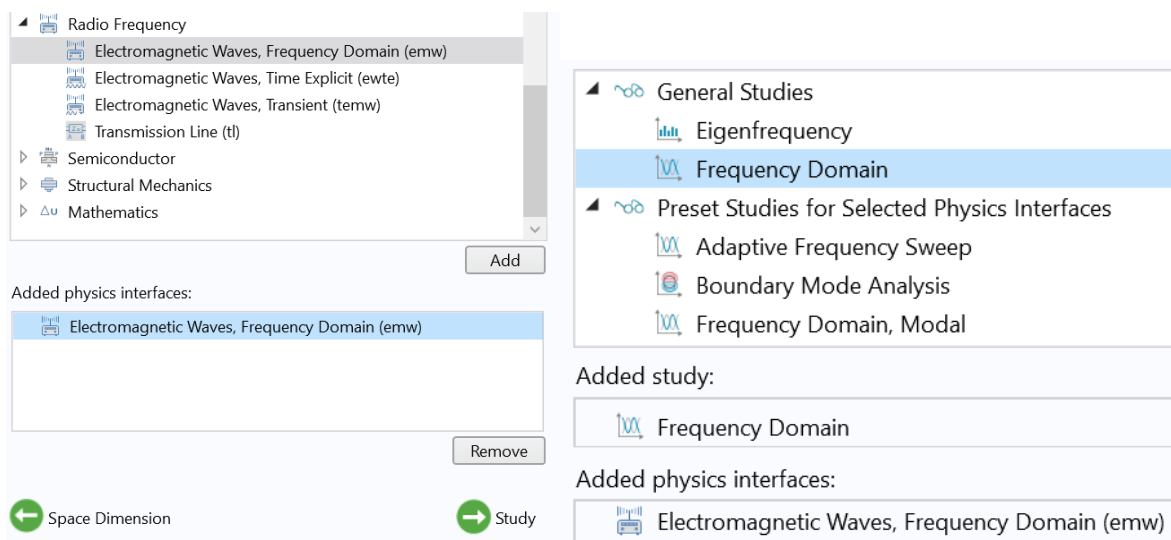
Varianta je psaná pro Comsol verzi 5.4.

Zapneme Comsol a vytvoříme nový prázdný model pomocí:

Model Wizard -> 3D

Přidáme radiofrekvenční modul, který nám umožní počítat s Elektromagnetickými vlnami a výsledný model budeme studovat ve Frekvenční oblasti (domain).

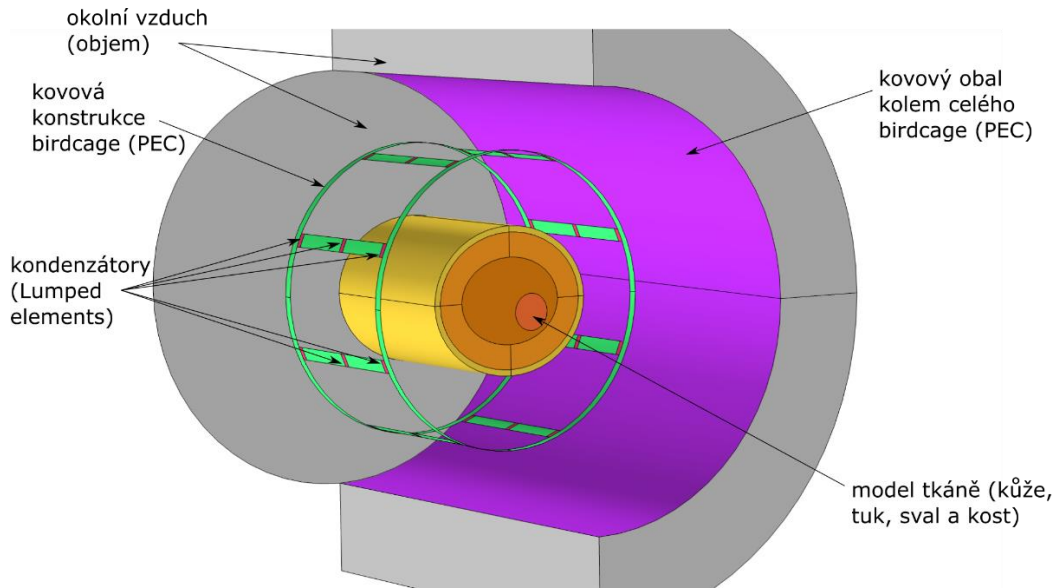
Více na obrázku 4.



Obrázek 4: Nastavení prázdného modelu.

Nyní začneme tvořit geometrii modelu.

Na obrázku 5 je ukázána finální geometrie. Takto by měl model vypadat před výpočtem.



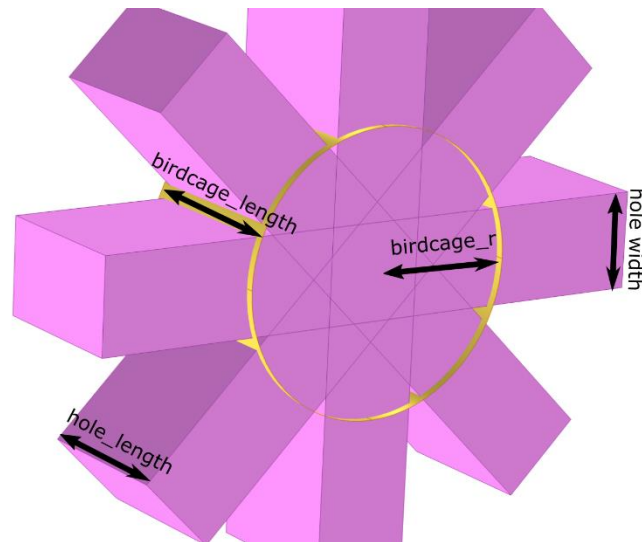
Obrázek 5: Hotová geometrie. Fialová a zelená barva znázorňuje kovové části. Odstíny oranžové ukazují biologickou hmotu. Kondenzátory jsou červeně.

Existuje více možností, jak takový model vytvořit. Zde použijeme parametrické zadávání rozměrů, kdy si všechny potřebné rozměry a hodnoty napíšeme předem a pojmenujeme, abychom je uvnitř modelu mohli už jen „zavolat“.

Parametry:

Parameters			
Name	Expression	Value	Description
hole_width	0.1625 [m]	0.1625 m	Vzdálenost mezi příčkami birdcage.
birdcage_r	0.24 [m]	0.24 m	Poloměr bircage.
skin	1[cm]	0.01 m	Tloušťka kůže.
elements_height	1 [cm]	0.01 m	Velikost lumped elementů.
body_b	12[cm]	0.12 m	Poloosa b v elipticky simulovaném těle.
body_a	14[cm]	0.14 m	Poloosa a v elipticky simulovaném těle.
hole_length	27 [cm]	0.27 m	Délka příček birdcage.
C	28 [pF]	2.8E-11 F	Kapacita kondenzátorů.
birdcage_length	30 [cm]	0.3 m	Délka birdcage. (Délka příček s koncovými prsteny)
fat	4[cm]	0.04 m	Tloušťka tuku v těle.

Jako první vytvoříme samotnou birdcage. Jedna z možností, jak birdcage vytvořit je, vytvořit plášť válce a do něj vyříznout „díry“ takové, aby v plášti zanechali jen malé příčky, což budou příčky birdcage.



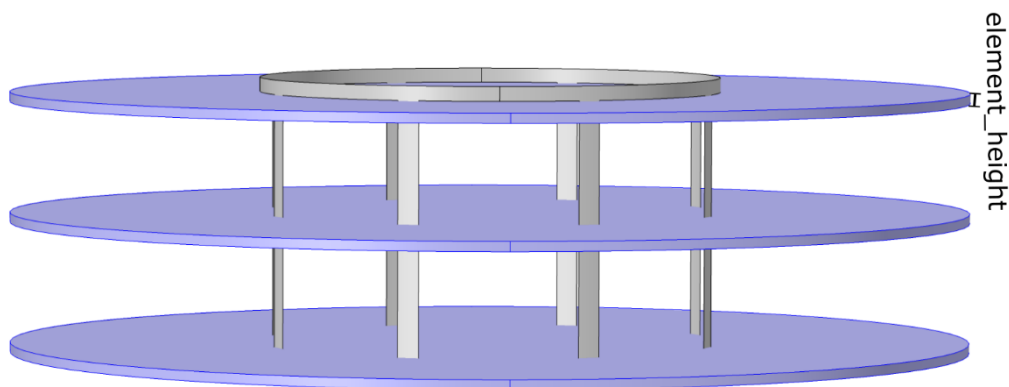
Obrázek 6: Vytvoření birdcage v comsolu. Znáznorněné rozměry jsou uvedeny v parametrech. Žlutě je znázorněn plášť válce a růžově kvádry, které z něho budou vyříznuty. Po odečtení kvádrů zbuđe téměř hotová birdcage.

Abychom docílili vytvoření birdcage, použijeme v geometrii tyto tvary a operace:

Válec, kvádr, rotaci a odečet. Všechna nastavení jsou upravitelná v „settings“ u každého geometrického objektu či operace. Práce s nimi je ponechána na studentovi.

Pro dokončení birdcage je nutné vytvořit místa (boundaries), které později nastavíme jako kondenzátory a zdrojové porty. Na každé příčce budou taková místa 3 a tudíž musíme vytvořit 3 x 8 míst.

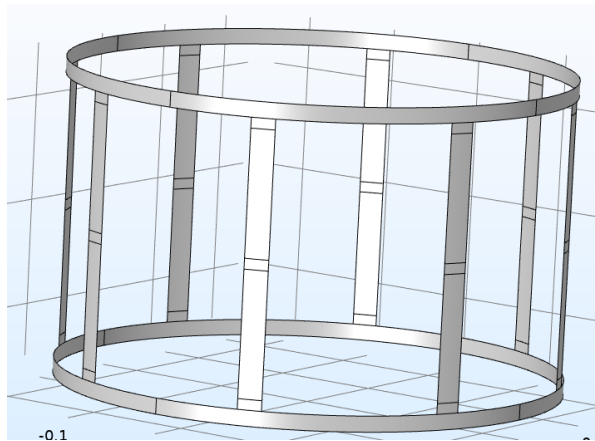
K vytvoření tolika míst využijeme 3 disky (nízké válce s širokou podstavou) a pomocí rovnice je skombinujeme s birdcage tak, aby nám vznikly požadovaná místa pro kondenzátory a porty.



Obrázek 7: Vytvoření místa pro kondenzátory. Modré disky vytvoří hranice tam, kde protínají birdcage.

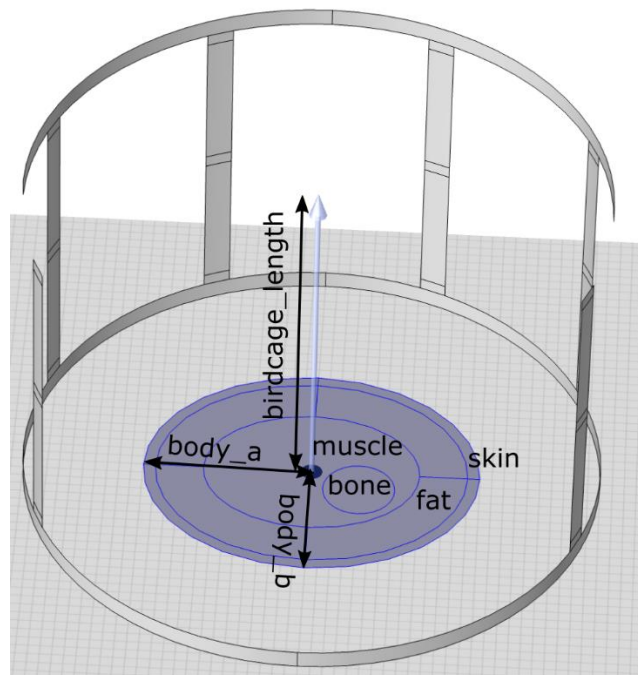
K tomuto řešení bylo použito: válec a operace „move“ s operací „compose“. Kde „move“ umožňuje zvolené geometrie i kopírovat a „compose“ je pak použit na skládání disků s birdcage. „Move“ je možné nahradit dvěma válci. (nápopvěda pro „compose“: dif1-mov1(1)-mov1(2)-mov1(3))+dif1)

Výsledná birdcage je zobrazena na obrázku 8.



Obrázek 8: Hotová geometrie pro birdcage.

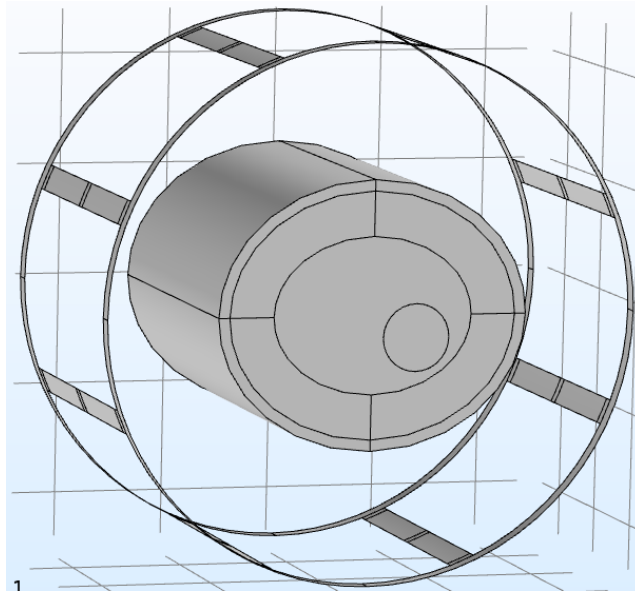
Nyní se budeme věnovat fantomu pacienta. Nejprve vytvoříme 2D průřez tělem, který následně pomocí operace „extrude“ protáhneme do 3D.



Obrázek 9: Tvorba fantomu uvnitř birdcage.

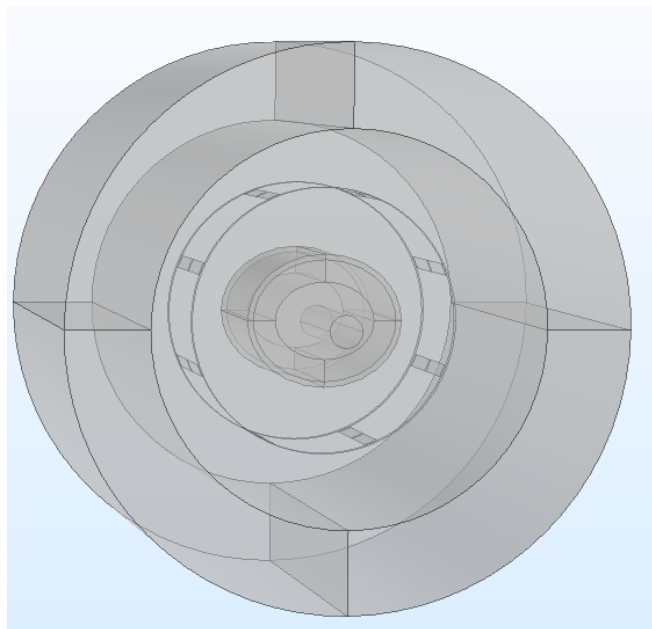
Zde jsou použity dva 2D obrazce (elipsa a kruh) a jedna operace „extrude“. Dělení elipsy na vrstvy je možné pomocí „layers“ což je možnost opět v „settings“ v elipse. Na přesných rozměrech a pozici kosti zde nezáleží.

Výsledný fantom je zobrazen na obrázku 10.



Obrázek 10: Fantom uvnitř birdcage.

Poslední částí geometrie je už jednoduché okolí. Vytvoříme pomocí válce s výškou 0.8 m, poloměrem 0.5 m a vrstvou 0.15 m.



Obrázek 11: Kompletní geometrie.

### 3.3 Materiály a definice

Po vytvoření geometrie je nutné nastavit správně materiály a boundaries (hranice). V okně „model builder“ vytvoříme odpovídající počet nových „blank materiál“ a přejmenujeme je na odpovídající



materiál (vzduch, kost, kůže, sval, tuk). Následně je nutné vyplnit správně jejich parametry, a to uděláme pomocí tohoto odkazu:

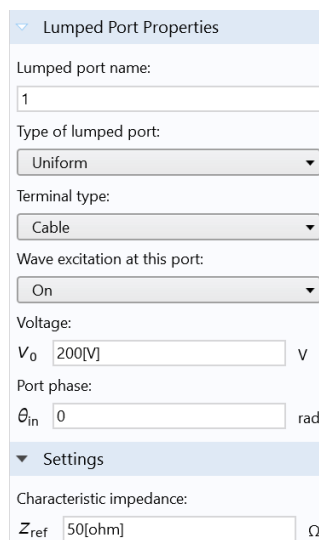
<https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/dielectric-properties/>

, ve kterém zadáme rezonanční frekvenci 64 MHz a parametry překopírujeme.

Boundaries nastavíme dle obrázku 5. Nastavují se v model builderu pod „electromagnetic waves, frequency domain“, kde vytvoříme nové hranice „PEC“ a přiřadíme jim všechny kovové části (birdcage bez míst pro kondenzátory a kovový obal celého birdcage). Následuje okrajová podmínka scattering boundary condition, která je vytvořena stejným postupem, avšak aplikujeme jí na všechny vnější okraje modelu. Tímto modelu řekneme, že vzduch mimo náš model „pokračuje“.

Následnou zdlouhavou nutností je každé boundaries, kde má být kondenzátor, nastavit boundary condition „lumped element“ a v settings zajistit, aby se jednalo o kondenzátor s kapacitou C. LE bude v modelu 22. Míst jsme si vytvořili 24, avšak 2 prostřední boundaries odsunuté o  $90^\circ$  od sebe je ponecháno na porty. LE není bohužel ve verzi 5.4 možné naklikat pod jednou boundary condition a jen je všechny označit uvnitř jedné boundary. Je nutné vytvořit 22 jednotlivých LE a každé přiřadit právě jedno místo. Rozmístění je vidět na obrázku 5.

Porty jsou „lumped port boundary condition“, kterým je v settings nastaveno dle obrázku 12.



▼ Lumped Port Properties

Lumped port name:  
1

Type of lumped port:  
Uniform ▼

Terminal type:  
Cable ▼

Wave excitation at this port:  
On ▼

Voltage:  
 $V_0$  200[V] V

Port phase:  
 $\theta_{in}$  0 rad

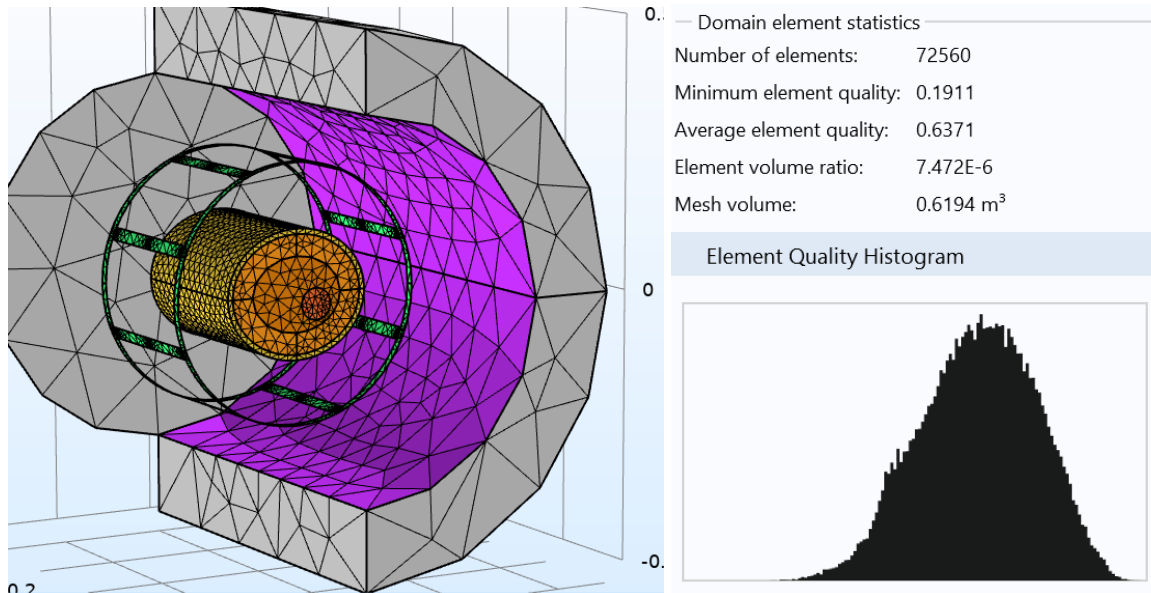
▼ Settings

Characteristic impedance:  
 $Z_{ref}$  50[ohm]  $\Omega$

Obrázek 12: Nastavení jednoho lumped portu. Druhý má nastavení stejné s posunutím fáze  $\pi/2$

### 3.4 MESH

Pro naše účely bude stačit MESH vygenerovaná pomocí „physics-controlled“ MESHe. Tudiž do ní nemusíme zasahovat a MESH vypadá takto:



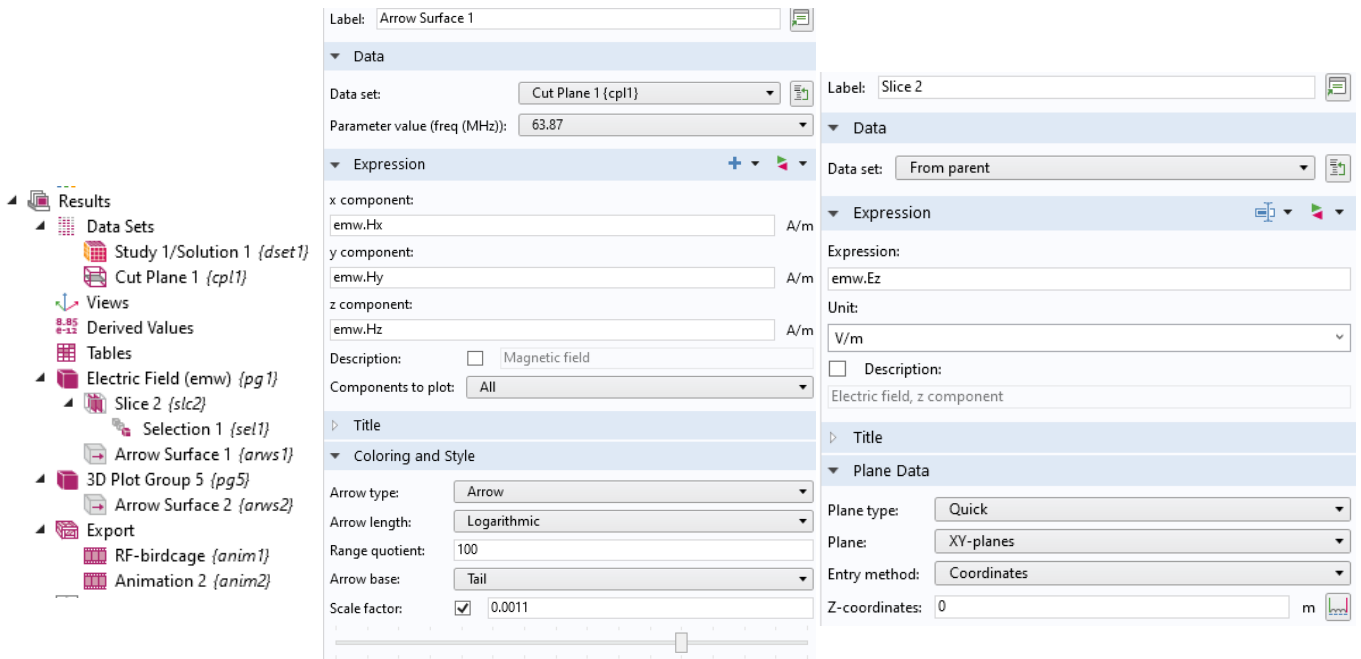
Obrázek 13: Ukázka použité MESHe i se statistikou.

Před výpočtem samotným už jen zadáme ve „study 1“ frekvenci 64 MHz a klikneme na compute.

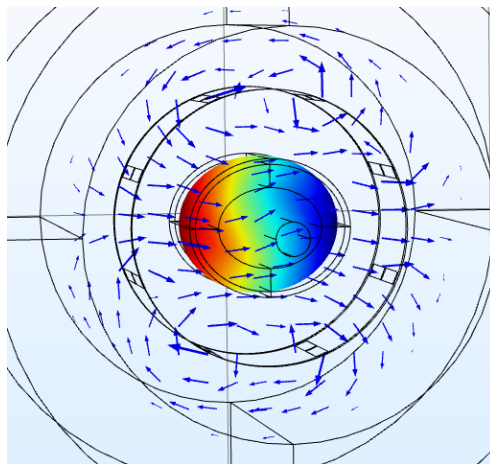
#### 4. Results (výsledky)

Abychom zjistili, jestli nám RF-birdcage funguje, podíváme se na dva řezy a jednu povrchovou hustotu.

- V results, v záložce data sets, vytvoříme Cut plane (kliknutí pravým tlačítkem). Cut plane nastavíme tak, aby si brala data ze Study 1/Solution 1 a procházela příčně středem birdage. (Pokud jsme měli stejný postup, mělo by to být rovina XY se Z-coordinates = 0)
- V záložce Electric field, vymažeme její obsah. Zde budeme chtít vykreslit magnetické pole pomocí šipek (Arrow surface) a pomocí řezu zase elektrické pole kolmé na směr pole magnetického.

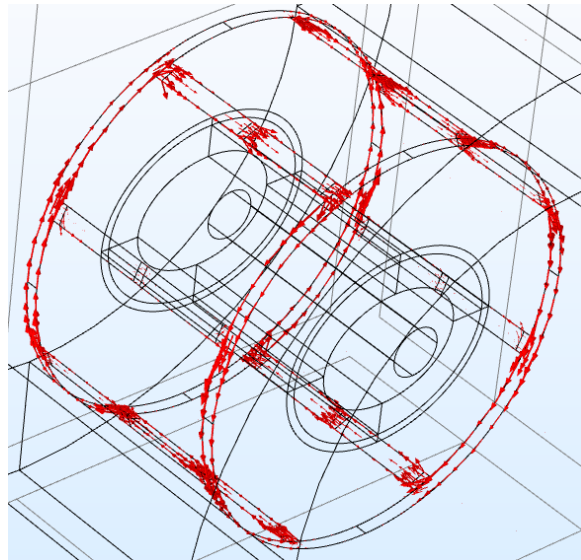


Obrázek 14: Vlevo je ukázáno, jak bude vypadat finální pohled na results. Uprostřed je nastavení arrow surface a vpravo je vidět nastavení Electric field.



Obrázek 15: Jak by mělo vypadat vykreslení Electric field záložky.

-Nyní vykreslíme povrchové proudy v birdcage. Vytvoříme si novou záložku klinutí pravým tlačítkem na Results. Vytvořená záložka se bude jmenovat 3D plot group. V této záložce vytvoříme nové Arrow surface, ve kterém nastavíme, ať vyobrazuje „Surface current density“.



Obrázek 16: takto by měl vypadat surface current density.

-Poslední kontrolou bude vytvoření dvou animací. V záložce export, vytvoříme v animaci player. V playeru nastavíme požadovanou část výsledků a sequence type změním na dynamic data extension. Pozorujeme rotaci pole a změnu proudů v birdcage.

**V celém dokumentu platí, že pokud není uvedena u obrázku reference, jedná se o autorské dílo.**