

Návod na laboratorní úlohu

Invazivní měření teploty během termoterapie optovláknovým teploměrem

Název studijního předmětu: Biosenzory

Vedoucí cvičení/experimentu: Doc. Dr.-Ing. Jan Vrba, M.Sc.

Připravil: Doc. Dr.-Ing. Jan Vrba, M.Sc.

1. Anotace cvičení/experimentu:

Mikrovlnná hypertermie je velmi perspektivní metodou zvyšující efektivitu radio- a chemoterapie při snížení dávek těchto pro pacienty velmi zatěžujících terapií. Během mikrovlnné hypertermie je léčená oblast ohřívána pomocí mikrovlnného pole. Efektivita hypertermie je úměrná schopnosti prohřát celý objem léčené oblasti na požadovanou teplotu a tuto teplotu udržet po dobu 45 - 60 min. Měření teploty přímo v léčené oblasti je tak stěžejní pro úspěšnost léčby. Elektromagnetické pole však velmi silně interaguje s metalickými senzory teploty. Naproti tomu interakce optovláknových senzorů je velmi slabá. V rámci tohoto cvičení bude demonstrována interakce metalických a optovláknových senzorů s mikrovlnným zářením. Zároveň se zde studenti seznámí se základními kroky návrhu realizace a testování mikrovlnného aplikátoru.

Cvičení se skládá z počítačového modelování v prostředí COMSOL Multiphysics, kdy bude vytvořen numerický model aplikátoru a tkáň. Numerické simulace budou sloužit k optimalizaci geometrie aplikátoru, tak aby aplikátor vykazoval koeficient odrazu nižší než -10 dB a také k výpočtu teploty v agarovém fantomu při mikrovlnném ohřevu. Následovat bude realizační a experimentální část, ve které budou realizovány a) koaxiální aplikátor dle optimalizované geometrie a b) fantomy léčené oblasti. Během mikrovlnného ohřevu budou měřeny teploty ve fantomu léčené oblasti pomocí optovláknového a termočláňkového teploměru a výsledky budou porovnány vzájemně i s výsledky numerických simulací.

2. Protokol

1. Výpočetní část

- Vytvoření numerického modelu aplikátoru a léčené oblasti v prostředí COMSOL Multiphysics.
- Výpočet EM pole a koeficientu odrazu aplikátoru.
- Optimalizace rozměrů a polohy šterbiny ve vnějším vodiči koaxiálního aplikátoru, tak aby došlo ke snížení koeficientu odrazu pod -10 dB.
- Výpočet teplotního profilu v agarovém fantomu v závislosti na čase ve vzdálenosti 5, 10, 15 a 20 mm před šterbinou.

2. Realizační a experimentální část

- Příprava dvou agarových fantomů léčené oblasti.
- Výroba aplikátoru.
- Zavedení čtyř metalických resp. optovláknových senzorů teploty do fantomů léčené oblasti.
- Postupně vystavení obou fantomů mikrovlnným polím z hypertermického aplikátoru a měření teploty.

3. Cíle cvičení/experimentu:

Demonstrace interakce metalických a optovláknových teploměřů s mikrovlnným zářením. Studenti se seznámí i s principy návrhu, realizace a měření vlastností mikrovlnných generátorů, fungování optovláknových senzorů a architektury teploměru. Dále se seznámí s technickými parametry takovýchto teploměřů.

4. Popis použitých zařízení/přístrojů:

1. Úsek rigidního koaxiálního kabelu pro přípravu mikrovlnného koaxiálního aplikátoru
2. Polovodičový mikrovlnný generátor, 200 W, 2450 MHz, Sairem, Francie
3. Koaxiální kabel pro připojení aplikátoru ke generátoru
4. Vektorový analyzátor obvodů FSH8.28, Rohde&Schwarz, Německo
5. Kalibrační sada ZV-Z135, Rohde@Schwarz, Německo
6. Teploměr s metalickými sensory, 4-kanálový teplotní datalogger Voltcraft K204 pro termočlánky "K"
7. 4 kanálový optovláknový teploměr (MRI kompatibilní sondy pro měření teploty)
8. Čtyřkanálový teploměr s termočlánky
9. Ingredience pro přípravu fantomů – agarový prášek, deionizovaná voda, NaCl
10. Hrnc a varná deska pro přípravu fantomů
11. COMSOL Multiphysics
12. Výkonná pracovní stanice

5. Výpočetní část

5.1. Vytvoření numerického modelu aplikátoru a fantomu v prostředí COMSOL Multiphysics

Geometrie aplikátoru vychází z rigidního koaxiálního kabelu s vnitřním a vnějším poloměrem rovným 0,265 mm a 0,825 mm, viz obr. 1.



Obr. 1: Úsek rigidního koaxiálního kabelu s konektorem.

Mezi vnějším a vnitřním vodičem koaxiálního kabelu se nachází PTFE. Pomocí výpočtu dle rovnice 1 vypočítejte a zaznamenejte charakteristickou impedanci koaxiálního kabelu

$$Z_0(\Omega) = \frac{138 \cdot \log_{10}(R/r)}{\sqrt{\epsilon_{r,PTFE}}} \quad (1)$$

Otevřený konec koaxiálního kabelu bude zkratován a v určité vzdálenosti od zkratovaného konce bude vytvořena prstencová štěrbina ve vnějším vodiči. Tím vznikne apertura aplikátoru, kterou bude elektromagnetické pole aplikátor opouštět a vnikat do léčené oblasti.

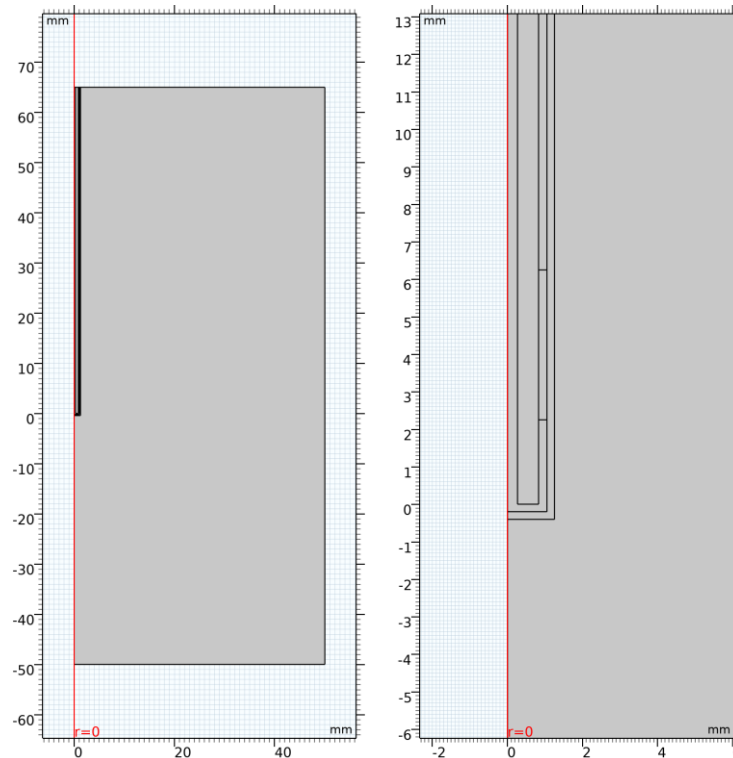
5.1.1. Postup vytvoření modelu pro výpočet elektromagnetického pole a koeficientu odrazu

Po spuštění COMSOL Multiphysics zvolíme nový model (**File/New**) a vybereme **Model Wizard**. Vzhledem k tomu, že geometrie, kterou uvažujeme, je osově symetrická volíme nyní rozměr prostoru “**2D Axisymmetric**”. To znamená, že při kreslení geometrie aplikátoru a léčené oblasti kreslíme pouze 2D řez geometrií a jen v pravé části od osy symetrie.

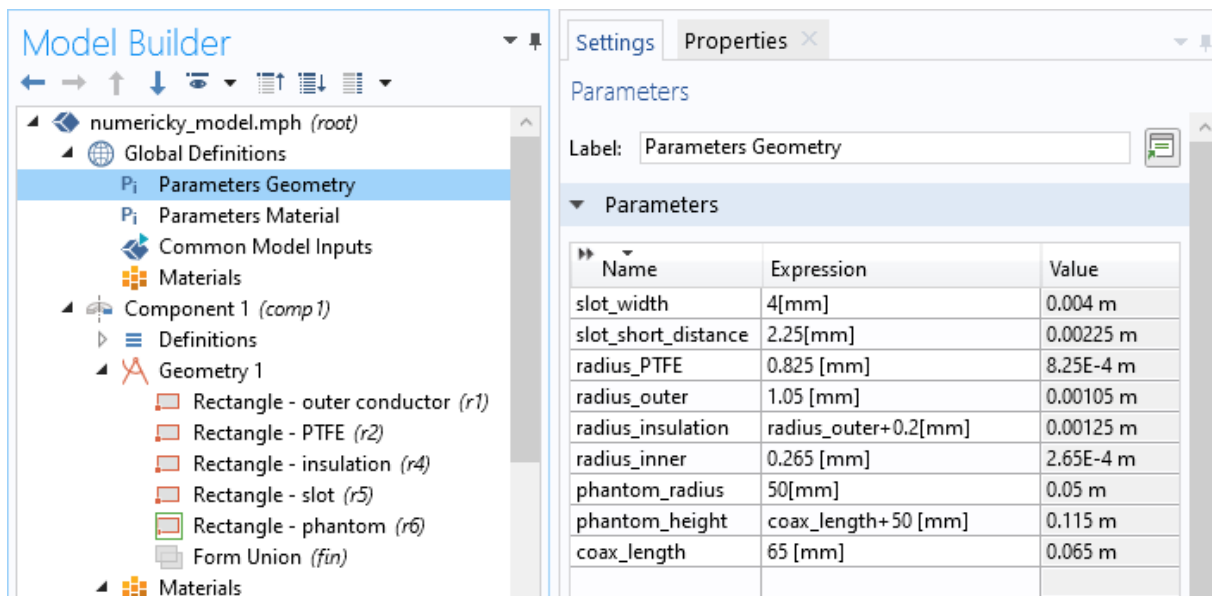
Volíme fyziku – **Electromagnetic Waves, Frequency domain** (potvrzujeme tlačítkem **Add** a poté tlačítkem se zelenou šipkou vpravo **Study**) a volíme studii **Frequency Domain** (potvrzujeme tlačítkem **Done**).

Přidejte fyziku přenosu tepla v biologických tkáních (pozn. může být i v pevných látkách) – klikněte pravým tlačítkem na **Component** a zvolte **Add Physics**, poté **Bioheat Transfer**.

Nyní nastavíme jednotky délky v modelu na milimetry – levým kliknutím na **Geometry** a výběrem **mm** z **Length unit**. Pomocí opakovaného použití nástroje obdélník (**Rectangle**) nakreslíme celou geometrii výpočetní oblasti dle obr. 2. Geometrické rozměry definujeme jako parametry modelu v **Global Definitions/Parameters**, viz obr. 3.



Obr. 2 Geometrie výpočetní oblasti a detail na konec aplikátoru se štěrbinou ve vnějším vodiči



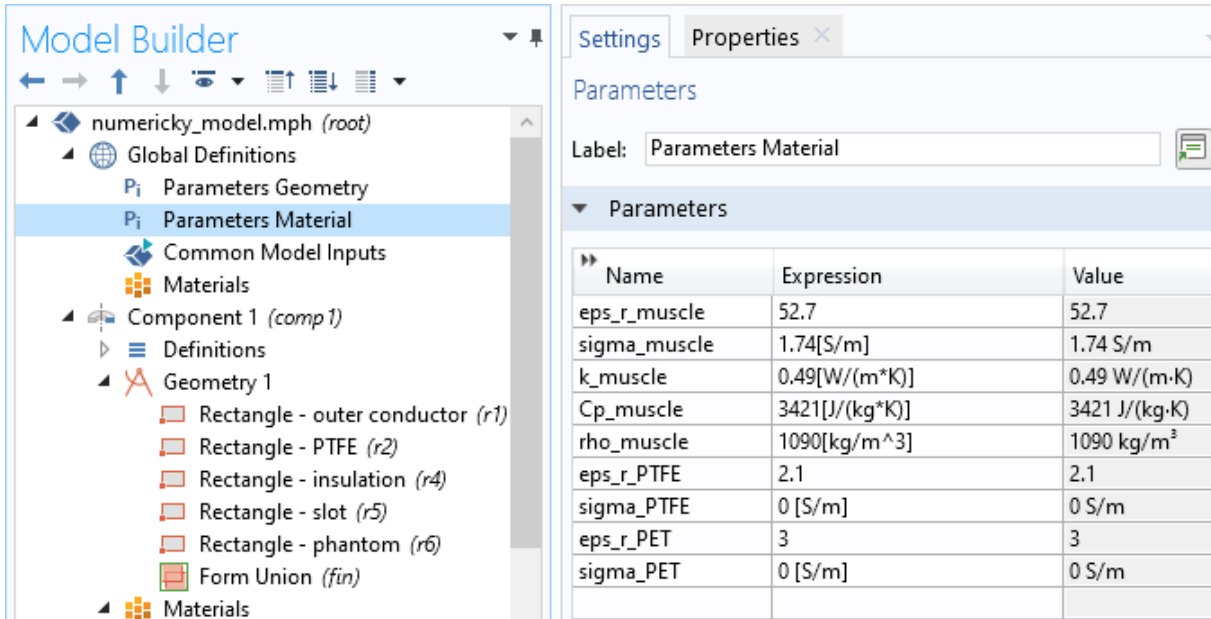
Name	Expression	Value
slot_width	4[mm]	0.004 m
slot_short_distance	2.25[mm]	0.00225 m
radius_PTFE	0.825 [mm]	8.25E-4 m
radius_outer	1.05 [mm]	0.00105 m
radius_insulation	radius_outer+0.2[mm]	0.00125 m
radius_inner	0.265 [mm]	2.65E-4 m
phantom_radius	50[mm]	0.05 m
phantom_height	coax_length+ 50 [mm]	0.115 m
coax_length	65 [mm]	0.065 m

Obr. 3 Geometrie a její parametry

Nastavení materiálů

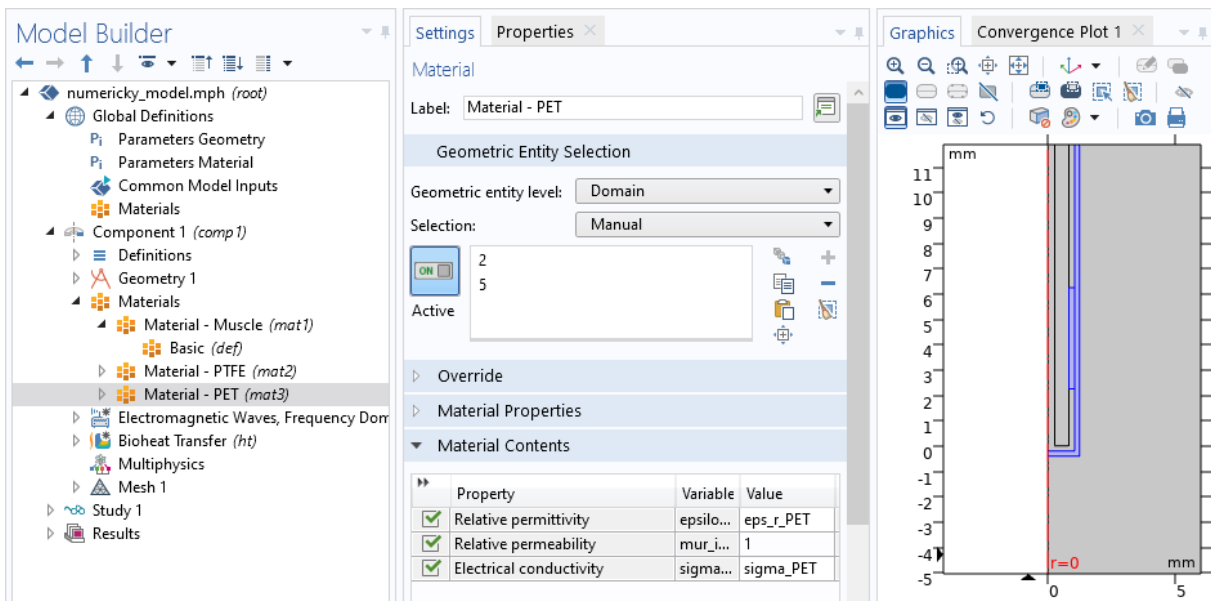
- a. Vložíme materiály PTFE, PET, Muscle – klikneme pravým tlačítkem na **Materials** a zvolíme z **Blank Material**.

- b. Materiály přiřadíte doménám – klikněte na materiál a v **Selection** zvolte následující čísla domén PTFE – 4, PET – 2, 5 a Muscle – 1.
- c. Založte a vyplňte dle obr. 4 a s pomocí <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database> materiálové parametry v materiálech viz ilustrativní obr. 5 pro PET.



Name	Expression	Value
eps_r_muscle	52.7	52.7
sigma_muscle	1.74[S/m]	1.74 S/m
k_muscle	0.49[W/(m*K)]	0.49 W/(m-K)
Cp_muscle	3421[J/(kg*K)]	3421 J/(kg-K)
rho_muscle	1090[kg/m^3]	1090 kg/m ³
eps_r_PTFE	2.1	2.1
sigma_PTFE	0 [S/m]	0 S/m
eps_r_PET	3	3
sigma_PET	0 [S/m]	0 S/m

Obr. 4 Materiálové parametry



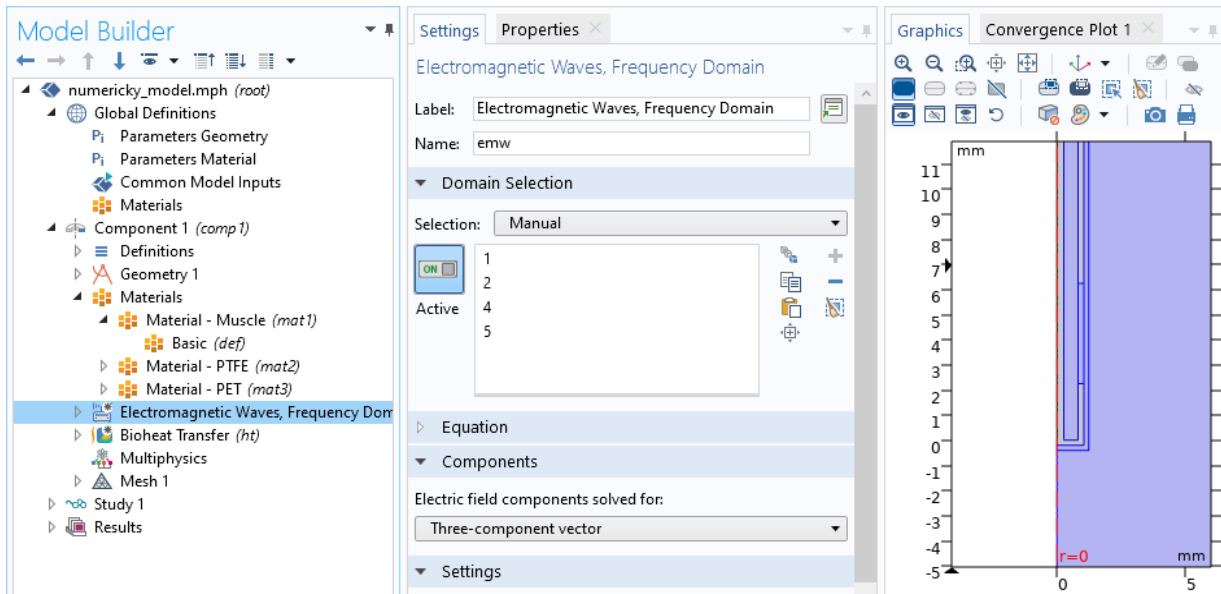
Property	Variable	Value
<input checked="" type="checkbox"/> Relative permittivity	epsilo...	eps_r_PET
<input checked="" type="checkbox"/> Relative permeability	mur_i...	1
<input checked="" type="checkbox"/> Electrical conductivity	sigma...	sigma_PET

Obr. 5 Nastavení materiálových vlastností pro materiál PET

2. Nastavte fyziku **Electromagnetic waves**

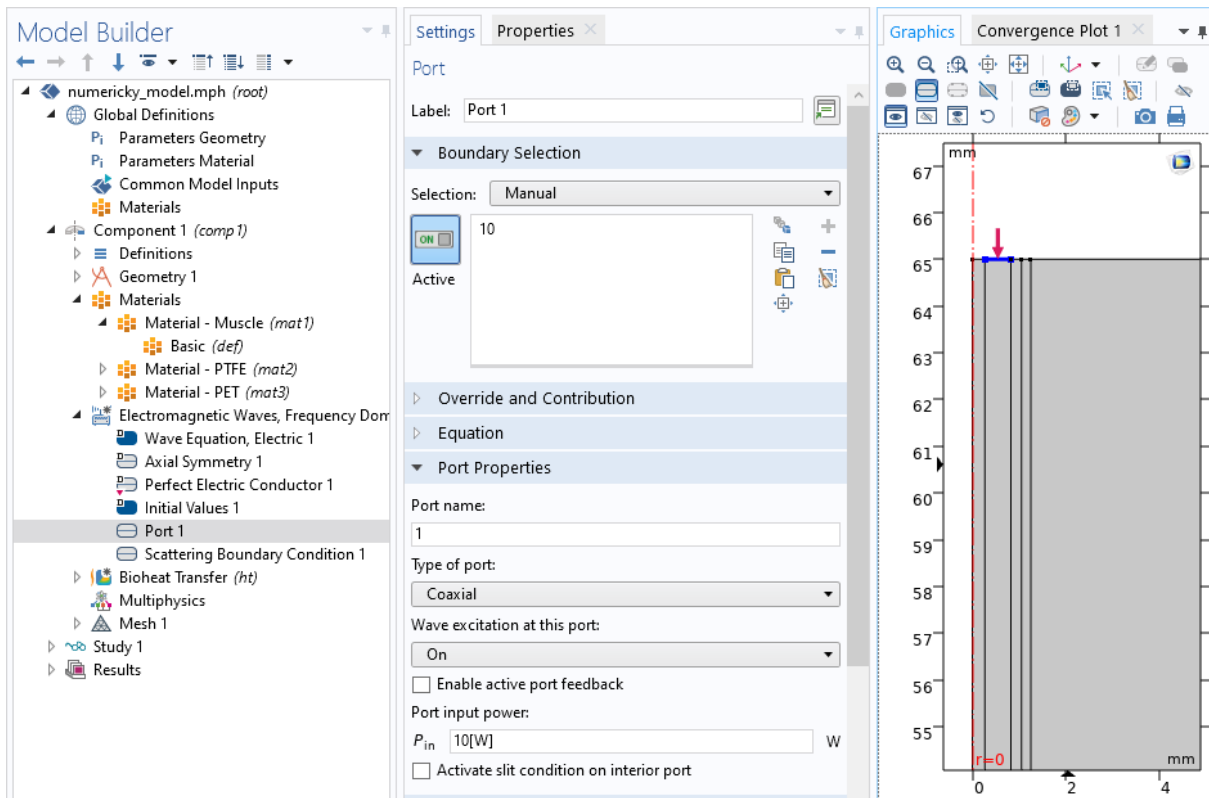
- a. Nejprve zvolíme domény, ve kterých se bude počítat EM pole. Vzhledem k tomu, že kovy se pro mikrovlnné frekvence chovají jako ideální vodič, což znamená, že EM pole v mikrovlnném pásmu do kovů neproniká (je uvnitř nulové), není potřeba pole v kovech počítat. Proto domény, které reprezentují kov, z výpočetní oblasti vyjmeleme – klikneme levým tlačítkem na **Electromagnetic waves** a v **Selections** zvolíme pouze domény 1, 2, 4, 5, viz obr. 6. Dále nastavte okrajovou podmínku **Scattering Boundary Condition**

na všechny hranice okolo výpočetní oblasti kromě portu a osy symetrie, konkrétně 2, 20, 22, 23.



Obr. 6 Výběr domén pro fyziku elektromagnetického pole

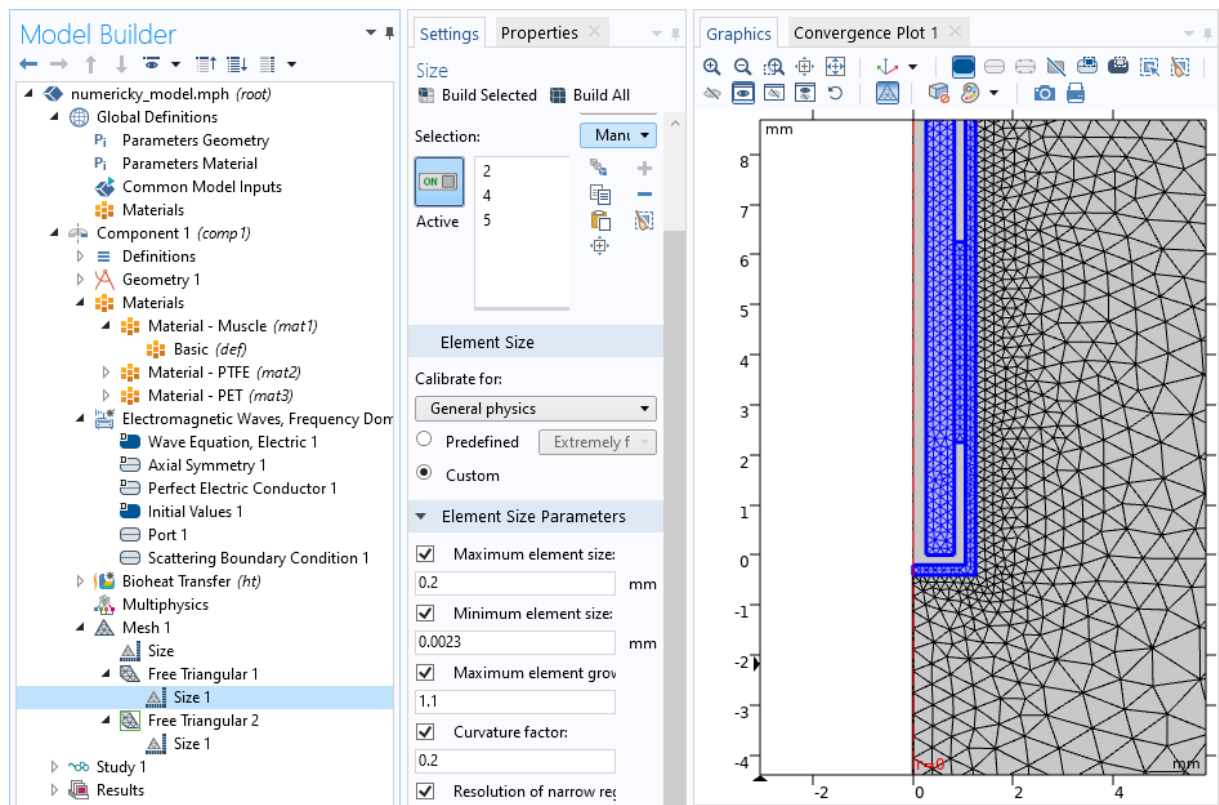
- b. Přidáme okrajovou podmínku **Port**, která nám bude sloužit ke vstupu mikrovlnné energie do výpočetní oblasti a na které bude počítán odražený výkon – výběrem z menu po kliknutí pravým tlačítkem na **Electromagnetic Waves**. Port zvolíme na úsečce číslo 10 na povrchu PTFE. Typ portu změňte na **Coaxial**, obr. 7.



Obr. 7 Nastavení portu na PTFE koaxiálního aplikátoru

c. Nastavení diskretizační mřížky (mesh)

Kliknutím pravým tlačítkem na **Mesh 1** vložte dvakrát **Free Triangular**. V **Selection** u **Free triangular 1** nastavte domény reprezentující PTFE, PET a šterbinu a u **Free Triangular 2** Muscle. Kliknutím pravým tlačítkem na **Free Triangular 1 a 2** přidejte možnost nastavit jemnost diskretizační sítě **Size**. U **Free triangular 1** zvolte **Element Size – Predifined – Extremely fine**, poté zaškrtněte **Custom** a nastavte v **Element Size parameters** **Maximum Element Size** na 0.2 mm. U **Free triangular 2** zvolte **Element Size – Predifined – Extra fine**. Nastavení i diskretizační síť jsou zobrazeny na obr. 8.



Obr. 8 Free Triangular 1 a 2.

d. Provedení výpočtu EM pole a koeficientu odrazu

Pro výpočet koeficientu odrazu nyní stačí nastavit pracovní frekvenci a spustit simulaci. V sekci **Study 1, Frequency domain, Study settings** nastavíme ve **Frequencies** 2.45 GHz. Dále odznačíme check box **Solve for** pro interface **Bioheat Transfer (ht)** a simulaci spustíme kliknutím na tlačítko **Compute** se symbolem „=“. Po provedení simulace v sekci **Results, Derived Values**, klikneme pravým tlačítkem na **S-Parameters** a zvolíme **Evaluate in Table1**.

e. Optimalizace rozměrů a polohy šterbiny ve vnějším vodiči koaxiálního aplikátoru, tak aby došlo ke snížení koeficientu odrazu pod -10 dB

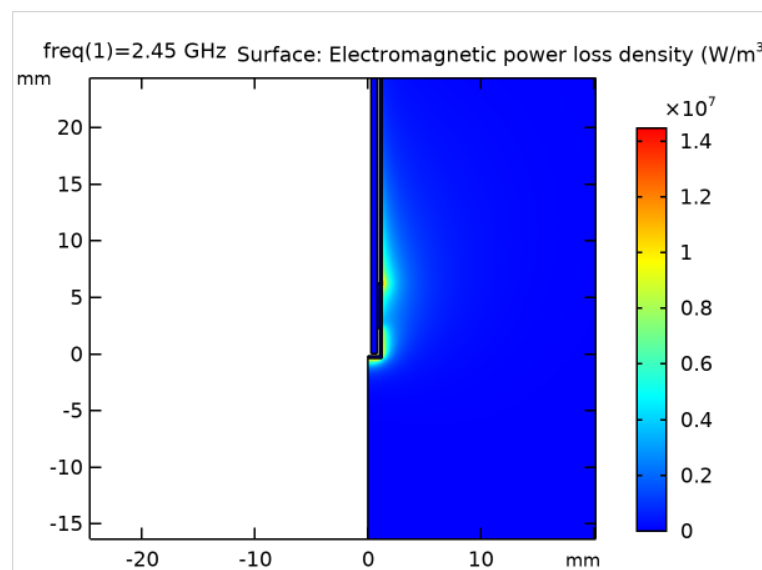
Pozorujte změnu hodnoty koeficientu odrazu pro různé hodnoty parametrů polohy a rozměrů šterbiny. Nyní nastavte rozměry šterbiny tak, aby hodnota koeficientu odrazu byla nižší než -10 dB.

3. Výpočet teplotního profilu v agarovém fantomu v závislosti na čase ve vzdálenosti 1 cm před štěrbinou.

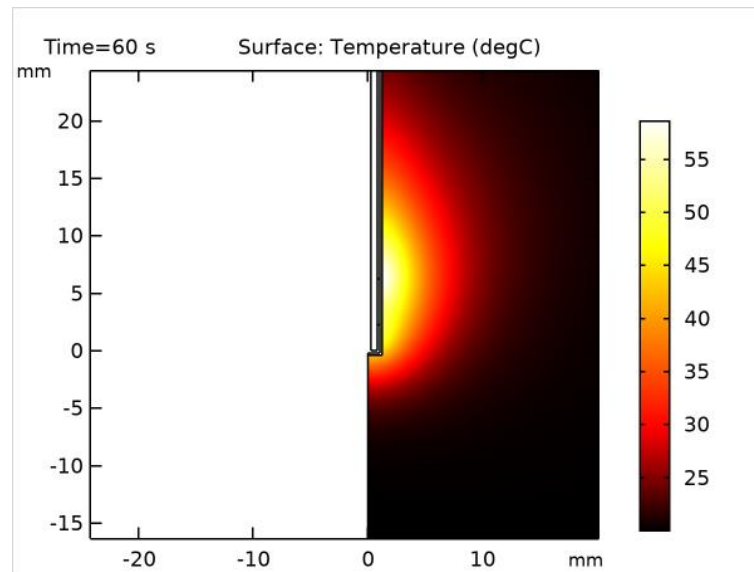
Nyní nastavíme fyziku **Bioheat Transfer**. Tuto fyziku budeme řešit pouze v léčené oblasti. Tzn., klikneme levým tlačítkem na **Bioheat Transfer** a v **Selections** zvolíme pouze doménu číslo 1. Dále nastavíme zdroj tepla v léčené oblasti a navážeme fyziku šíření tepla na fyziku EM pole. To provedeme pravým kliknutím na **Bioheat Transfer** a zvolením **Heat Source**. V nastavení (Settings) **Heat Source 1** zvolíme **General Source** a u Q_0 zvolíme **Electromagnetic Power Loss Density (emw/wee1)**.

Pro výpočet teplotního pole přidáme druhý krok řešení. Pravým kliknutím na **Study 1** vyvoláme nabídku a zvolíme **Study Steps, Time Dependent, Time Dependent**. V Step 2: Time Dependent odznačíme check box **Solve for pro Electromagnetic Waves, Frequency Domain (emw)**. **Dále nastavíme časový rozsah tranzientní simulace v Times na range(0, 1, 60)**. Simulaci spustíme kliknutím na tlačítko **Compute** se symbolem „=“.

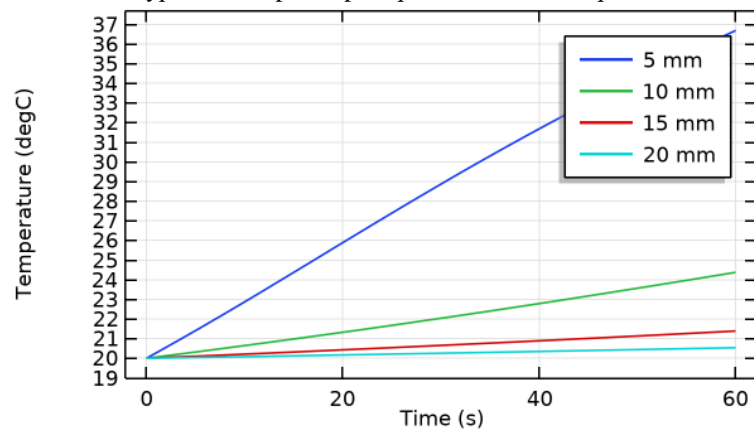
Následně vykreslíme vypočítaná rozložení absorbovaného výkonu, teploty a časové průběhy teploty před štěrbinou ve vzdálenostech 5, 10, 15, 20 mm, obr. 9-11.



Obr. 9 Vypočítané rozložení absorbovaného výkonu



Obr. 10 Vypočítané teplotní pole po 60ti vteřinové aplikaci 10 W.



Obr. 11 Vypočítané časové průběhy teploty v různých vzdálenostech před šterbinou

6. Experimentální část

6.1. Příprava aplikátoru

Aplikátor připravíme z již hotového úseku rigidního koaxiálního kabelu s konektorem viz obr. 12. Konec koaxiálního kabelu zkratujeme pájkou, a pomocí skalpelu vytvoříme ve vnějším vodiči koaxiálního kabelu šterbinu dle optimalizované geometrie. Nakonec aplikujeme v místě šterbiny a na povrchu vnějšího vodiče izolaci (teplem smrštitelné bužírky).



Obr. 12 Úsek rigidního koaxiálního kabelu s konektorem a s vytvořenou šterbinou. Izolace není pro názornost aplikovaná.

6.2. Příprava dvou agarových fantomů léčené oblasti

Fantom léčené oblasti by měl být tvarem kvádr s rozměry minimálně: $v = 10 \text{ cm} \times h = 10 \text{ cm} \times \text{š} = 10 \text{ cm}$ nebo válec o rozměrech $v = 10 \text{ cm} \times r = 5 \text{ cm}$. Hmotnostní poměry mezi agarovým práškem, deionizovanou vodou a NaCl jsou 4: 95.64 : 0.36. Tyto tři komponenty smícháme

v hrnci a za stálého míchání ohříváme na teplotu 95 °C. Poté vylijeme horkou směs do připravené formy a necháme ochladit na pokojovou teplotu.

6.3. Zavedení čtyř metalických resp. optovláknových senzorů teploty do fantomů léčené oblasti

Do fantomů, na předem definovaná místa z numerického modelu v COMSOL Multiphysics připravíme otvory pro aplikátor a teplotní čidla a poté teplotní čidla a aplikátor zavedeme. Odečtete počáteční teploty z každého optického teplotního sensoru.

6.4. Měření koeficientu odrazu

Měření **Měření koeficientu odrazu** provedeme pomocí vektorového analyzátoru obvodů FSH8.28, Rohde&Schwarz, Německo, ke kterému připojíme na první port koaxiální kabel. Na konci tohoto koaxiálního kabelu provedeme kalibraci pomocí kalibrační sady ZV-Z135, Rohde@Schwarz metodou Open-Short-Load. Následně připojíme vektorový analyzátor obvodů k aplikátoru (zasunutém ve fantomu) a změříme hodnotu koeficientu odrazu, kterou si poznamenejeme. Před kalibrací musíte zvolit frekvenční pásmo a během kalibrace musíte zvolit používanou kalibrační sadu.

Nejprve přejděte do režimu vektorového měření. Stiskněte klávesu MODE a potom softwarovou klávesu "Network Analyzer". Nastavte frekvenční rozsah od 2400 do 2500 MHz pomocí klávesy FREQ a nastavte frekvenci 2450 MHz. Dále stiskněte klávesu SPAN a nastavte 100 MHz. SW klávesu Calibration spustíte proces kalibrace. Vyberte Select Calkit a zvolte kalibrační sadu ZV-Z135. Zvolte kalibraci Reflection Port 1 a následujte pokyny.



(a)



(b)

Obr. 13 Vektorový analyzátor obvodů FSH8.28 (a) a kalibrační sada ZV-Z135 (b) (Rohde@Schwarz, Německo)

6.5. Postupné vystavení obou fantomů mikrovlnným z hypertermického aplikátoru a měření teploty

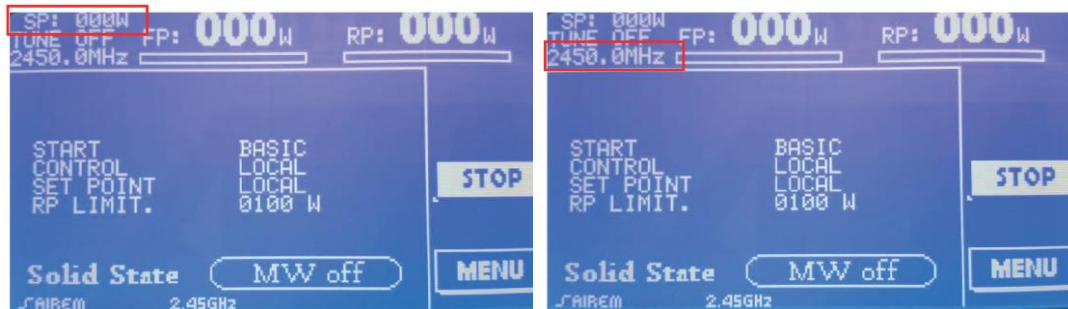


Obr. 14 Mikrovlnný generátor Solid State Microwave Generator, 200 W, 2450 MHz Sairem, Francie

6.5.1. Nastavení požadovaného výkonu, frekvence a doby ohřevu

V nastavení generátoru zvolíme pracovní frekvenci 2.45 GHz, dopředný (výstupní) požadovaný výkon 10 W a dobu ohřevu 60 s v souladu s nastavením numerických simulací. Pro nastavení frekvence a výkonu postupujte následovně:

Nastavené hodnoty výkonu a frekvence lze nastavit pomocí otočného knoflíku na předním panelu. V hlavním menu stisknete jednou knoflík a nastavená hodnota výkonu se zvýrazní. Otáčením knoflíku nastavte hodnotu a opětovným stisknutím volbu výkonu potvrdíte a zároveň vstoupíte do režimu nastavení frekvence. Otáčením knoflíku nyní nastavte hodnotu frekvence a opětovným stisknutím knoflíku hodnotu potvrdíte. Pozn.: FP a RP jsou postupně dopředný a odražený výkon ve Watech.



Obr. 15 Nastavení výkonu a frekvence mikrovlnného signálu.

Nastavení doby ohřevu a časový průběh generovaného výkonu. Vstupte do menu stiskem tlačítka Menu. Zvolte Start-up a základní režim (v čase konstantní aplikovaný výkon) a nastavte dobu ohřevu. V případě, že bude celý experiment připraven lze začít s ohřevem zvolením položky START v základním menu.

Odečtěte teplotu v okamžiku vypnutí výkonu generátoru Sirem. Měrný absorbovaný výkon (SAR) vypočítejte jako podíl přírůstku teploty a času ohřevu vynásobený specifickou teplotní kapacitou agarového fantomu. Porovnejte naměřené hodnoty SAR s predikovaným z programu COMSOL Multiphysics.