

Návod na laboratorní úlohu Good practices and good modeling – microwave coil

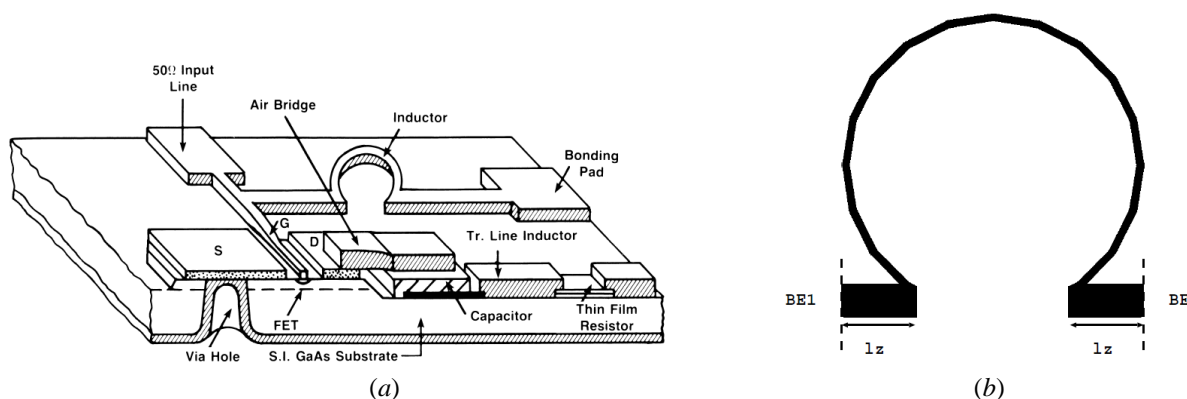
Název studijního předmětu: Modeling and Simulation in Medicine

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

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

1. Anotace cvičení/experimentu:

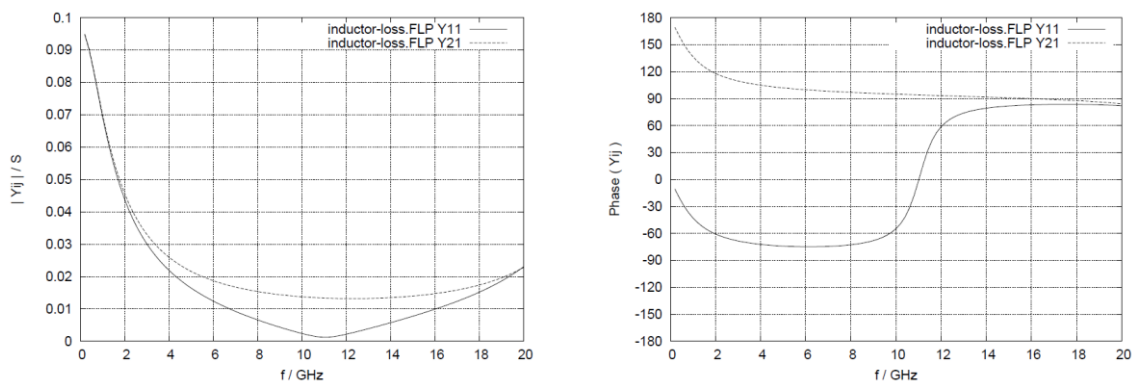
V rámci tohoto cvičení studenti ze syntetických (získaných pomocí numerických simulací) admitančních parametrů mikrovlnné cívky (viz obr. 1a a 1b) typu omega postupně odvodí náhradní elektrická schémata 0., 1. a 2. řádu a vyčíslí hodnoty jejich jednotlivých ideálních obvodových prvků. Syntetická data ve frekvenčním rozsahu 0 až 15 GHz byla získána pomocí full-wave elektromagnetických simulací. Dále studenti vytvoří numerický model mikrovlnné cívky a provedou simulace admitančních parametrů.



Obrázek 1: (a) Monolitický mikrovlnný integrovaný obvod (MMIC) obsahující cívku, (b) layout cívky
D. M. Pozar, Microwave Engineering, 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, ISBN 978-0470631553, 1998

2. Protokol

1. Použijte na obr. 2 uvedené syntetické admitanční parametry na frekvenci $f = 3$ GHz k získání indukčnosti (model 0. řádu). Načrtněte modul a fázi admitančních parametrů Y_{11} a Y_{21} modelu 0-tého řádu v závislosti na frekvenci.



Obrázek 2: Příklad syntetických Y-parametrů mikrovlnné cívky



2. Rozšířte model získaný v bodě 2 tak, aby zahrnoval ztráty vodiče. Určete hodnoty obvodových prvků modelu z modulu a fáze simulovaných admitančních parametrů (Obr. 1) na frekvenci $f = 0.2$ GHz (model 1. řádu).
3. Použijte simulované admitanční parametry Y_{11} a Y_{21} ztrátové cívky z obr. 2 k rozšíření modelu 1. řádu z bodu 3 tak, aby popsal rezonanci simulované cívky na frekvenci $f=11$ GHz. Vypočítejte pouze hodnoty přidávaných obvodových prvků.
4. Jakým způsobem může být model z bodu 4 rozšířen tak, aby popisoval i ztráty vznikající v dielektrickém substrátu?
5. Vytvořte 3D elektromagnetický model mikrovlnné cívky v simulátoru COMSOL Multiphysics. Proveďte odpovídající numerické simulace a vykreslete závislosti amplitudy a fáze admitančních (Y -) parametrů Y_{11} a Y_{21} .

3. Cíle cvičení/experimentu:

V rámci tohoto cvičení si studenti postupně odvodí náhradní elektrické schémata mikrovlnné cívky. Důraz ve cvičení je kladen na fyzikálně orientované modelování, kdy studenti řeší, jak konkrétní fyzikální jev přispívá k elektrickým parametrům dané součástky a jak tento jev zahrnout do náhradního obvodu pomocí vhodného ideálních obvodových prvků a vhodné topologie. Zároveň topologie modelu je systematicky rozšiřována od jednoduchého modelu 0.tého řádu platného pouze pro nízké frekvence až po model 2. řádu, který je schopný popsat chování cívky i v okolí první rezonance. V posledním bodě cvičení studenti vytvoří 3D elektromagnetický model mikrovlnné cívky v simulátoru COMSOL Multiphysics a provedou odpovídající numerické simulace admitančních parametrů.

4. Popis použitých zařízení/přístrojů:

1. Výkonná pracovní stanice
2. COMSOL Multiphysics



5. Modelování elektrických parametrů mikrovlnné cívky

5.1. Model 0-tého řádu

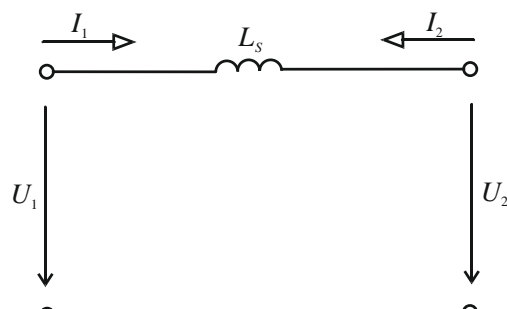
Úkol: Použijte syntetické admitanční parametry na frekvenci $f = 3$ GHz k získání indukčnosti (model 0. řádu). Načrtněte modul a fázi admitančních parametrů Y_{11} a Y_{21} modelu 0-tého řádu v závislosti na frekvenci.

Pokyny:

a) Vlastnosti náhradního obvodu (modelu) 0-tého řádu:

- uvažujeme pouze ideální vodiče,
- musí popsat elektrické chování obvodu pro nulovou frekvenci (DC),
- nezahrnujeme parazitní jevy,
- skládá se pouze z jednoho ideálního obvodového prvku.

b) Odpovídající topologie



Obrázek 3: Topologie modelu 0-tého řádu

c) Určení hodnoty obvodového prvku náhradního obvodu (modelu) 0-tého řádu

- Vycházíme z definice admitančních parametrů a odvodíme vztahy pro Y_{11} a Y_{21}

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}$$
$$Y_{11} = \left. \frac{I_1}{U_1} \right|_{U_2=0} = \frac{1}{j\omega L_s}$$
$$Y_{21} = \left. \frac{I_2}{U_1} \right|_{U_2=0} = -\frac{1}{j\omega L_s}$$

- Odečteme na frekvenci 3 GHz hodnotu modulu Y_{11} a dosadíme do vzorce. Následně vykreslíme graf modulu a fáze Y_{11} a Y_{21} .

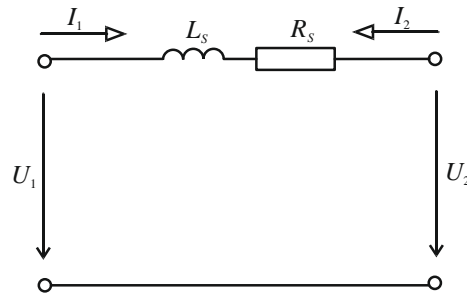
5.2. Model 1. řádu

Úkol: Rozšiřte model získaný v bodě 2 tak, aby zahrnoval ztráty vodiče. Určete hodnoty obvodových prvků modelu z modulu a fáze simulovaných admitančních parametrů (Obr. 1) na frekvenci $f = 0.2$ GHz (model 1. řádu).

Pokyny:

- Zahrnutí ztráty vodiče lze provést přidáním sériového rezistoru

a) Odpovídající topologie



Obrázek 4: Topology modelu 1. řádu

b) Určení hodnoty obvodových prvků náhradního obvodu (modelu) 1. řádu

- Znovu vycházíme z definice admitančních parametrů a odvodíme vztahy pro Y_{11} a Y_{21}

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \\ Y_{11} = \frac{I_1}{U_1} \Big|_{U_2=0} &= \frac{1}{R_s + j\omega L_s} = \frac{1}{R_s - j\omega L_s} = \frac{R_s}{R_s^2 + \omega^2 L_s^2} - j \frac{\omega L_s}{R_s^2 + \omega^2 L_s^2} \\ Y_{21} = \frac{I_2}{U_1} \Big|_{U_2=0} &= -\frac{1}{R_s + j\omega L_s} \end{aligned}$$

- Uvážíme-li exponenciální tvar komplexního čísla $Y_{11} = |Y_{11}|e^{j\phi_{11}}$ lze zapsat

$$\begin{aligned} |Y_{11}| &= \frac{1}{|R_s + j\omega L_s|} = \frac{1}{\sqrt{R_s^2 + \omega^2 L_s^2}} \\ \tan \phi_{11} &= \frac{\text{Im}\{Y_{11}\}}{\text{Re}\{Y_{11}\}} = \frac{-\omega L_s}{R_s} \end{aligned}$$

Z toho vyplývá, že $\omega L_s = -R_s \tan \phi_{11}$ a tedy

$$\begin{aligned} |Y_{11}| &= \frac{1}{\sqrt{R_s^2 + R_s^2 \tan^2 \phi_{11}}} \\ R_s &= \frac{1}{|Y_{11}| \sqrt{1 + \tan^2 \phi_{11}}} \end{aligned}$$

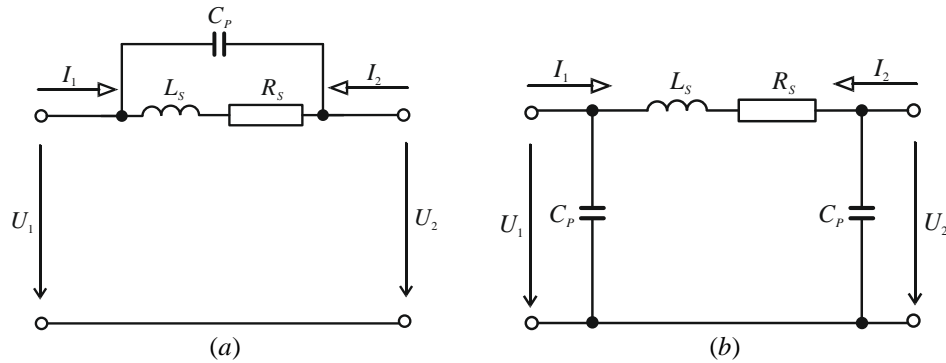
Kdy $|Y_{11}|$ a ϕ_{11} vyčteme z průběhů admitančních parametrů pro frekvenci $f = 0.2$ GHz.

5.3. Rozšíření modelu 1. řádu

Úkol: Použijte simulované admitanční parametry Y_{11} a Y_{21} ztrátové cívky z obr. 2 k rozšíření modelu 1. řádu z bodu 3 tak, aby popsal rezonanci simulované cívky na frekvenci $f = 11$ GHz. Vypočítejte pouze hodnoty přidaných obvodových prvků.

Pokyny:

- Abychom mohli elektricky popsat obvod v rezonanci musíme přidat druhý reaktanční obvodový prvek – v našem případě kapacitor. Máme v podstatě dvě možné topologie viz následující obrázek a musíme rozhodnout o tom, která lépe popisuje elektrické chování obvodu.



Obrázek 5: Dvě možné topologie rozšířeného modelu 1. řádu

- Vyjdeme-li z topologie (a) a definice admitančních parametrů

$$Y_{11} = \left. \frac{I_1}{U_1} \right|_{U_2=0} \quad \text{a} \quad Y_{21} = \left. \frac{I_2}{U_1} \right|_{U_2=0}$$

Je jasné, že platí $I_1 = -I_2$ a tedy, že pro frekvence vyšší než je rezonanční frekvence obvodu musí platit, že $\angle Y_{11} = \angle Y_{21} + 180$. Srovnáním s obr. 2 vpravo vychází, že topologie (a) není adekvátní.

- Vyjdeme-li z topologie (b) a definice admitančních parametrů dostáváme

$$Y_{11} = \left. \frac{I_1}{U_1} \right|_{U_2=0} = j\omega C_p + \frac{1}{R_s + j\omega L_s}$$

$$Y_{21} = \left. \frac{I_2}{U_1} \right|_{U_2=0} = -\frac{1}{R_s + j\omega L_s}$$

- Pokud pro výše uvedené vztahy uvážíme dva extrémní příklady $f = 0$ (DC) a $f > f_{\text{res}}$ (vysoké frekvence) dostáváme:
 - pro $f = 0$ (DC) jsou moduly Y_{11} a Y_{21} totožné a fáze se liší znaménkem.
 - Pro $f > f_{\text{res}}$ jsou fáze Y_{11} a Y_{21} totožné.
- Dále určíme hodnotu C_p z hodnoty rezonanční frekvence. Ta je rovna hodnotě frekvence pro kterou je $\phi_{11} = 0$ neboli $\text{Im}\{Y_{11}\} = 0$.

$$Y_{11} = j\omega C_p + \frac{1}{R_s + j\omega L_s} = j\omega C_p + \frac{R_s - j\omega L_s}{R_s^2 + \omega^2 L_s^2} = j\omega C_p + \frac{R_s}{R_s^2 + \omega^2 L_s^2} - j \frac{\omega L_s}{R_s^2 + \omega^2 L_s^2} =$$

$$\frac{R_s}{R_s^2 + \omega^2 L_s^2} + j\omega \left[C_p - \frac{L_s}{R_s^2 + \omega^2 L_s^2} \right] \Rightarrow C_p - \frac{L_s}{R_s^2 + \omega_{\text{res}}^2 L_s^2} = 0 \Rightarrow C_p = \frac{L_s}{R_s^2 + \omega_{\text{res}}^2 L_s^2}$$

6. Výpočet admitančních parametrů v COMSOL Multiphysics

Vytvořte 3D numerický model mikrovlnné cívky v prostředí COMSOL Multiphysics. Využijte RF modul.

[1] D. M. Pozar, Microwave Engineering, 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, 1998.

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