

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Měření rezonančních frekvencí dutinového rezonátoru

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří HLÍNA**
Osobní číslo: **E13N0115P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Telekomunikační a multimediální systémy**
Název tématu: **Měření rezonančních frekvencí dutinového rezonátoru**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

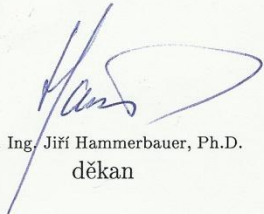
1. Prostudujte a popište problematiku dutinových rezonátorů včetně jejich praktického využití.
2. Výpočtem stanovte rezonanční frekvence přiděleného dutinového rezonátoru s možností variability jeho délky alespoň pro 5 rozměrů.
3. Vypočtené rezonanční frekvence ověřte experimentálním měřením ve frekvenčním rozsahu 9 kHz až 3 GHz.
4. Realizujte výpočet 3D elektromagnetického pole uvnitř dutinového rezonátoru pro vybrané frekvence a délky rezonátoru.
5. Vyhodnoťte získané výsledky.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. Novotný, K.: Elektromagnetické pole a vlny. ČVUT Praha
2. Oppl, L.: Úvod do mikrovlnné techniky. ČVUT Praha
3. <http://www.comsol.com>

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Roman Hamar, Ph.D.**
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na měření rezonančních frekvencí dutinového rezonátoru. V práci jsou popsány jednotlivé typy dutinových rezonátorů, metody jejich buzení a možnosti zapojení těchto rezonátorů do vedení. Další část diplomové práce je zaměřena na simulaci elektromagnetického pole uvnitř obdélníkového dutinového rezonátoru a měření jeho rezonančních frekvencí.

Klíčová slova

Dutinový rezonátor, obdélníkový dutinový rezonátor, válcový dutinový rezonátor, rezonanční frekvence, činitel jakosti, simulace elektromagnetického pole, měření rezonančních frekvencí

Abstract

The diploma thesis is focused on measuring the resonant frequencies of the cavity resonator. The individual types of the cavity resonators, methods of their excitation and connection possibilities to wiring of these resonators are described in this thesis. Next part of the diploma thesis is focused on simulation of the electromagnetic field inside the rectangular cavity resonator and measuring of its resonant frequencies.

Key words

Cavity resonator, rectangular cavity resonator, cylindrical cavity resonator, resonant frequency, quality factor, simulation of electromagnetic field, measuring of the resonant frequencies

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 6.5.2015

Bc. Jiří Hlína

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Romanu Hamarovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce, Katedře energetiky a ekologie za poskytnutí EMC komory a přístrojů a Ing. Miroslavu Hromádkovi, Ph.D. za pomoc při měření.

Obsah

ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ	10
1 DUTINOVÉ REZONÁTORY	13
1.1 ČINITEL JAKOSTI.....	14
1.2 NÁHRADNÍ SCHÉMA DUTINOVÉHO REZONÁTORU.....	15
1.3 OBDÉLNÍKOVÉ DUTINOVÉ REZONÁTORY	16
1.3.1 <i>Elektromagnetické pole v obdélníkových dutinových rezonátorech</i>	16
1.3.2 <i>Rezonanční kmitočet</i>	19
1.4 VÁLCOVÉ DUTINOVÉ REZONÁTORY	20
1.4.1 <i>Elektromagnetické pole ve válcových dutinových rezonátorech</i>	21
1.4.2 <i>Rezonanční kmitočet</i>	22
1.4.3 <i>Koaxiální rezonátory</i>	24
1.5 BUZENÍ DUTINOVÝCH REZONÁTORŮ	24
1.5.1 <i>Buzení proudovou sondou</i>	24
1.5.2 <i>Buzení vazebním otvorem</i>	25
1.5.3 <i>Buzení magnetickou smyčkou</i>	25
1.6 ZPŮSOBY ZAPOJENÍ DUTINOVÝCH REZONÁTORŮ DO VEDENÍ	25
1.6.1 <i>Průchozí rezonátor</i>	25
1.6.2 <i>Absorpční rezonátor</i>	28
1.6.3 <i>Reakční rezonátor</i>	31
2 VÝPOČET REZONANČNÍCH FREKVENCÍ	32
2.1 PŘÍKLAD VÝPOČTU	32
2.2 VYPOČTENÉ REZONANČNÍ FREKVENCE	33
3 SIMULACE ROZLOŽENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE	36
3.1 COMSOL MULTIPHYSICS	36
3.2 VLASTNÍ SIMULACE	36
4 MĚŘENÍ REZONANČNÍCH FREKVENCÍ.....	40
4.1 POUŽITÉ PŘÍSTROJE.....	41
4.2 NAMĚŘENÉ HODNOTY.....	42
ZÁVĚR	50
LITERATURA.....	51
PŘÍLOHY.....	I

Úvod

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na měření rezonančních frekvencí dutinového rezonátoru a na problematiku dutinových rezonátorů. Při nízkých frekvencích lze vytvořit rezonanční systém pomocí spojení prvků se soustředěnými parametry. Ve vysokofrekvenční oblasti nelze rezonanční systémy vytvořit pomocí prvků se soustředěnými parametry a proto se jako rezonanční systémy používají rezonátory.

Text práce je rozdělen do čtyř částí. V první části jsou popsány jednotlivé typy dutinových rezonátorů. Dále jsou v této části práce popsány způsoby buzení rezonátorů a způsob jejich zapojení do vedení. Druhá část je zaměřena na výpočet rezonančních frekvencí měřeného dutinového rezonátoru, pro který je ve třetí části práce provedena simulace rozložení elektromagnetického pole uvnitř rezonátoru. Čtvrtá část je praktická a týká se měření rezonančních frekvencí již zmíněného dutinového rezonátoru.

Seznam symbolů

a [m]	Šířka pravoúhlého rezonátoru, poloměr válcového rezonátoru
b [m]	Výška pravoúhlého rezonátoru
C [F]	Kapacita
c_0 [m.s ⁻¹]	Rychlost světla ve vakuu
d [m]	Délka rezonátoru
\bar{E} [V.m ⁻¹]	Fázor intenzity elektrického pole
f_0 [Hz]	Rezonanční frekvence
G [S]	Svod
\bar{H} [A.m ⁻¹]	Fázor intenzity magnetického pole
k [-]	Konstanta šíření
L [dB]	Průchozí útlum rezonátoru
L [H]	Indukčnost
m [-]	Vidové číslo
n [-]	Vidové číslo
n [-]	Převod vazby rezonátoru
n_1 [-]	Převod vstupní vazby rezonátoru
n_2 [-]	Převod výstupní vazby rezonátoru
p [-]	Vidové číslo
P_2 [W]	Výstupní výkon
P_{2max} [W]	Maximální výstupní výkon
P_{2min} [W]	Minimální výstupní výkon
P_{2T} [W]	Maximální teoretická hodnota výstupního výkonu
P_Z [W]	Výkon ztracený ve stěnách rezonátoru
P_{Z1} [W]	Výkon ztracený na vstupu rezonátoru
P_{Z2} [W]	Výkon ztracený na výstupu rezonátoru
P_{Zd} [W]	Výkon pohlcený ztrátovým dielektrikem v dutině
P_{Zext} [W]	Výkon ztracený ve vnějších obvodech rezonátoru
Q_0 [-]	Vlastní činitel jakosti
Q_{0e} [-]	Činitel jakosti zahrnující ztráty v dielektriku
Q_1 [-]	Vstupní činitel jakosti
Q_2 [-]	Výstupní činitel jakosti

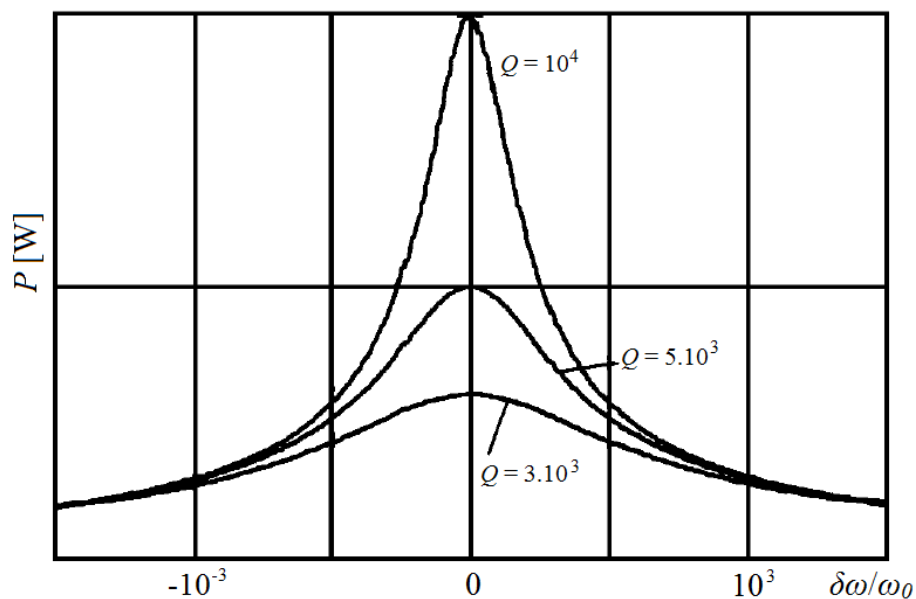
Q_{ext} [-]	Vnější činitel jakosti
Q_L [-]	Provozní činitel jakosti
R [Ω]	Elektrický odpor
S_p [m^2]	Vnitřní povrch pláště rezonátoru
T [-]	Činitel průchozích ztrát
TE	Transverzálně (příčně) elektrická vlna
TEM	Transverzálně elektromagnetická vlna
TE_{mnp}	Transverzálně (příčně) elektrický vid
$tg\delta$ [-]	Ztrátový činitel
TM	Transverzálně (příčně) magnetická vlna
T_{max} [-]	Maximální hodnota činitele průchozích ztrát
T_{min} [-]	Maximální hodnota činitele průchozích ztrát
TM_{mnp}	Transverzálně (příčně) magnetický vid
V [m^3]	Objem dutiny
W [J]	Celková energie elektromagnetického pole
Y_0 [S]	Charakteristická admitance
Z_0 [Ω]	Charakteristická impedance
Z_{01} [Ω]	Vstupní charakteristická impedance
Z_{02} [Ω]	Výstupní charakteristická impedance
z_1 [-]	Normovaná hodnota vstupní impedance rezonátoru
Z_1 [Ω]	Vstupní impedance rezonátoru
$\alpha_{mn}, \alpha'_{mn}$ [-]	Kořeny Besselových funkcí
γ [$S \cdot m^{-1}$]	Měrná vodivost
δ [m]	Hloubka vniku
Δf_A [Hz]	Šířka pásma
ϵ_r [-]	Relativní permitivita
\mathcal{G} [-]	Poměrné kmitočtové rozladění
κ [-]	Činitel vazby
κ_1 [-]	Vstupní činitel vazby
κ_2 [-]	Výstupní činitel vazby
λ [m]	Vlnová délka
λ_0 [m]	Rezonanční vlnová délka
μ [$H \cdot m^{-1}$]	Permeabilita

ω [rad.s ⁻¹]	Úhlová frekvence
ω_0 [rad.s ⁻¹]	Úhlová rezonanční frekvence

1 Dutinové rezonátory

Dutinové rezonátory se používají jako rezonanční systémy v mikrovlnné oblasti. Pod pojmem dutinový rezonátor si můžeme představit objem dielektrika (např. vzduch, vakuum), který má libovolný tvar a je zcela uzavřen dobře vodivým kovovým pláštěm s výjimkou jednoho nebo více vazebních otvorů. V podstatě se jedná o vlnovod, kterému se uzavře vstupní a výstupní brána. Vznikne tak uzavřená dutina o objemu V . Tyto rezonátory hrají podstatnou roli v technice centimetrových vln, zejména díky vysokému činiteli jakosti (řádově jednotky až desítky tisíc) a jednoduché konstrukci.

Pokud takovýto rezonátor se dvěma otvory napájíme signálem o proměnné frekvenci, zjistíme, že v okolí jistých rezonančních frekvencí interakce mezi otvory rapidně narůstá. Obecně existuje nekonečný počet těchto rezonančních frekvencí, ale zpravidla nás zajímá nejnižší rezonanční frekvence, které odpovídá vlnová délka, která je porovnatelná s lineárními rozměry dutinového rezonátoru. Na obr. 1 je znázorněna závislost přeneseného výkonu přes dutinový rezonátor na poměrném rozladění $\delta\omega/\omega_0$, kde ω_0 je úhlová rezonanční frekvence dutinového rezonátoru a δ je hloubka vniku. [1]



Obr. 1.1 Závislost přeneseného výkonu na poměrném rozladění $\delta\omega/\omega_0$

Vlastnosti rezonančního obvodu v oblasti nízkých frekvencí jsou dané parametry R , L a C . V případě dutinových rezonátorů nelze parametry jako indukčnost nebo kapacita zavést, protože by bylo obtížné je měřit a v limitních případech ztrácejí fyzikální smysl. Proto je nutné dutinové rezonátory charakterizovat parametry, které jsou v mikrovlnné technice

měřitelné. Těmito parametry jsou: rezonanční frekvence f_0 (případně rezonanční vlnová délka λ_0), rezonanční vodivost (případně rezonanční odpor) a vlastní nebo nezatížený činitel jakosti Q_0 .

Dutinové rezonátory mohou být libovolných tvarů, v praxi se převážně používají rezonátory jednoduchých geometrických tvarů (obdélníkové, válcové, toroidní atd.). Protože se jedná o uzavřený útvar, nemůže se v něm šířit vlna a nastává pouze stojaté vlnění mezi všemi stěnami. V rezonátoru se stojatá vlna vyskytuje i ve směru osy z , na rozdíl od vlnovodu, kde se stojatá vlna vyskytuje ve směrech x a y . Stejně jako u vlnovodů se v rezonátorech šíří vidy TE (příčně elektrické) a TM (příčně magnetické) podle charakteru elektromagnetického pole. [1]

Dutinové rezonátory se používají např. ve vlnovodových filtrech typu pásmová propust a pásmová zádrž. Pásmová propust se skládá z paralelních a sériových rezonančních obvodů. Paralelní rezonanční obvody jsou tvořeny půlvlnnými rezonátory, které jsou omezeny induktivními clonami a jsou doladřované kapacitními šrouby. Sériový rezonanční obvod je tvořen stejným rezonátorem, který je inverzně transformovaný čtvrtvlnnými vazebními úseky vlnovodu. Pásmová zádrž se skládá z půlvlnných rezonátorů, které jsou připojeny k obdélníkovému vlnovodu ve vzdálenostech $3/4\lambda$. Tyto rezonátory jsou buď obdélníkové, nebo válcové. [2]

1.1 Činitel jakosti

Činitel jakosti je nejdůležitějším parametrem dutinového rezonátoru při jeho rezonanci. Činitel jakosti lze pro většinu rezonátorů jednoduchých vypuklých tvarů přibližně určit podle vztahu

$$Q_0 \approx \frac{2}{\delta} \cdot \frac{V}{S_p}, \quad (1.1)$$

kde δ je hloubka vniku do vodivých stěn při rezonančním kmitočtu, V je objem dutiny a S_p je vnitřní povrch pláště. Hloubka vniku je definována vztahem

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\gamma}}, \quad (1.2)$$

kde μ je permeabilita a γ je měrná vodivost.

V případě, že není vnitřní povrch rezonátoru opracován do zrcadlového lesku, může být hloubka vniku δ menší než drsnost povrchu vodiče a dráha povrchového proudu se přibližně $\sqrt{2}$ - krát prodlouží a dostáváme vztah pro činitel jakosti korigovaný na drsnost povrchu stěn dutiny

$$Q_0 \approx \frac{2}{\sqrt{2} \cdot \delta} \cdot \frac{V}{S_p} = \frac{\sqrt{2}}{\delta} \cdot \frac{V}{S_p}. \quad (1.3)$$

Pokud je dutina rezonátoru vyplněna dielektrikem s malými, ale nezanedbatelnými ztrátami, které jsou charakterizovány ztrátovým činitelem $\operatorname{tg} \delta \ll 1$, pak lze činitel jakosti určit pomocí vzorce

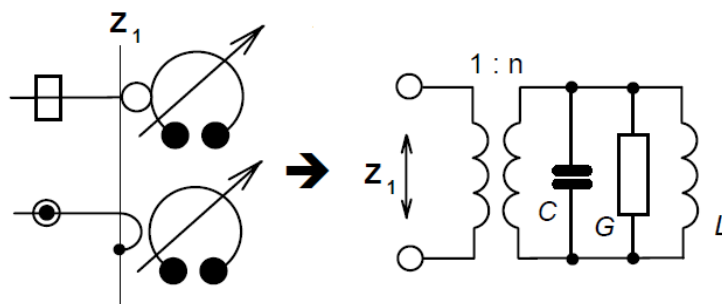
$$\frac{1}{Q_{0c}} = \frac{1}{Q_0} + \operatorname{tg} \delta. \quad (1.4)$$

Vlastní činitel jakosti klesne vlivem ztrát v dielektriku na hodnotu $Q_{0c} < Q_0$. [2]

1.2 Náhradní schéma dutinového rezonátoru

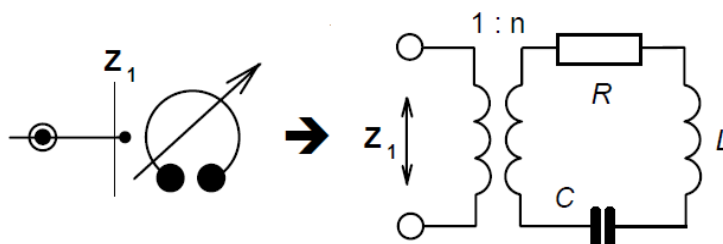
Dutinový rezonátor je možné popsat náhradním schématem v podobě sériového nebo paralelního rezonančního RLC obvodu nachází-li se rezonátor ve stavu rezonance v okolí základního pracovního vidu. O tom, zda se pro popis rezonátoru použije sériový nebo paralelní RLC rezonanční obvod rozhoduje hlavně typ vazebního prvku, kterým je dutina vázána s napájecím vedením nebo vlnovodem. Tato vazba je charakterizována ideálním transformátorem s převodem $1 : n$.

Pokud je rezonátor vázán s napájecím vedením štěrbinou nebo smyčkou, je impedance dutiny v místě vazebního prvku vyjádřena paralelním rezonančním obvodem, který je zobrazen na obr 1.2.



Obr. 1.2 Náhradní schéma rezonátoru – paralelní rezonanční obvod [4]

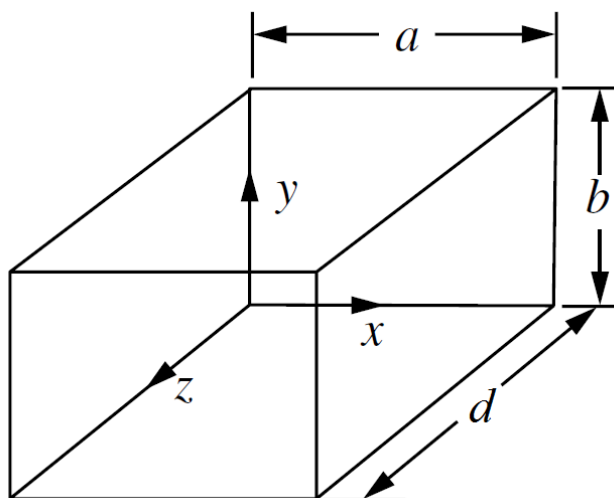
U rezonátoru, který je vázán s napájecím vedením sondou (kolíkem), je impedance v místě sondy vyjádřena sériovým rezonančním obvodem zobrazeným na obr. 1.3. [4]



Obr. 1.3 Náhradní schéma rezonátoru – sériový rezonanční obvod [4]

1.3 Obdélníkové dutinové rezonátory

Dutinové rezonátory se dělí na rezonátory obdélníkové, válcové a koaxiální. Nejpodrobněji jsou v této práci popsány obdélníkové dutinové rezonátory, protože následné měření rezonančních frekvencí bude prováděno právě na obdélníkovém rezonátoru. Jedná se o dutinové rezonátory, které jsou vytvořeny z úseku vlnovodu o obdélníkovém průřezu (obr. 2). Zvláštním případem je krychlový rezonátor, u kterého platí $a = b = d$.



Obr. 1.4 Geometrie obdélníkového rezonátoru [5]

Pokud mají vidy TE_{mnp} a TM_{mnp} stejná vidová čísla m , n , a p , mají i stejné rezonanční kmitočty. Takové vidy se nazývají degenerované a lze je od sebe oddělit jen vhodným způsobem vybuzení. Pokud by došlo k vybuzení obou vidů současně, dojde k jejich degeneraci a k prudkému poklesu činitele jakosti rezonátoru na daném kmitočtu.

V praxi obdélníkové dutinové rezonátory obvykle pracují s nejjednodušším příčně elektrickým videm TE_{101} . Jeho rezonanční vlnová délka není závislá na výšce b pravoúhlé dutiny. Přeladování (změna f_0) se zpravidla provádí změnou délky d rezonátoru. [2]

1.3.1 Elektromagnetické pole v obdélníkových dutinových rezonátorech

TM_{mnp} vidy

Pole TM vidů lze odvodit ze složky E_z . Při odvození pole vycházíme z vlnové rovnice

$$\begin{aligned} \nabla^2 \overline{E}_z + k^2 \overline{E}_z &= 0 \\ \frac{\partial^2 \overline{E}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \overline{E}_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \overline{E}_z}{\partial z^2} + k^2 \overline{E}_z &= 0. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Tuto rovnici řešíme metodou separace proměnných a dostáváme řešení

$$\overline{E}_z = (\overline{A} \cos(k_x x) + \overline{B} \sin(k_x x))(\overline{C} \cos(k_y y) + \overline{D} \sin(k_y y))(\overline{G} \cos(k_z z) + \overline{H} \sin(k_z z)). \quad (1.6)$$

Předpokládáme, že stěny rezonátoru jsou dokonale vodivé, tudíž je na nich nulová složka intenzity elektrického pole. Z podmínky $\overline{E_z}|_{x=0} = 0$ a $\overline{E_z}|_{y=0} = 0$ dostaneme $\overline{A} = \overline{C} = 0$. Pak

$$\begin{aligned}\overline{E_z} &= \overline{BD} \sin(k_x x) \sin(k_y y) (\overline{G} \cos(k_z z) + \overline{H} \sin(k_z z)) \\ \overline{E_x} &= \frac{k_z k_x}{k_p^2} \overline{BD} \cos(k_x x) \sin(k_y y) (-\overline{G} \sin(k_z z) + \overline{H} \cos(k_z z)) \\ \overline{E_y} &= \frac{k_z k_y}{k_p^2} \overline{BD} \sin(k_x x) \sin(k_y y) (-\overline{G} \sin(k_z z) + \overline{H} \cos(k_z z)).\end{aligned}\quad (1.7)$$

Tečná složka intenzity elektrického pole musí být nulová i na vodivých stěnách uzavírajících vlnovod. Z podmínky $\overline{E_x}|_{z=0} = 0$ a $\overline{E_y}|_{z=0} = 0$ dostaneme $\overline{H} = 0$. Rovněž musí platit

$$\begin{aligned}\overline{E_z}|_{x=a} &= 0 \\ \overline{E_z}|_{y=b} &= 0 \\ \overline{E_x}|_{z=d} &= 0 \\ \overline{E_y}|_{z=d} &= 0.\end{aligned}\quad (1.8)$$

Odtud dostaneme

$$\begin{aligned}k_x &= \frac{m\pi}{a} \\ k_y &= \frac{n\pi}{b} \\ k_z &= \frac{p\pi}{d},\end{aligned}\quad (1.9)$$

kde m , n a p jsou celá čísla. Vidové číslo p může mít nulovou hodnotu, vidová čísla m a n musí být nenulová. Složky intenzit TM_{mnp} vidů jsou

$$\begin{aligned}\overline{E_x} &= -\frac{1}{k_p^2} k_z k_x \overline{E_0} \cos(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z) \\ \overline{E_y} &= -\frac{1}{k_p^2} k_z k_y \overline{E_0} \sin(k_x x) \cos(k_y y) \sin(k_z z) \\ \overline{E_z} &= \overline{E_0} \sin(k_x x) \sin(k_y y) \cos(k_z z) \\ \overline{H_x} &= \frac{1}{k_p^2} \omega \varepsilon k_y \overline{E_0} \sin(k_x x) \cos(k_y y) \cos(k_z z) \\ \overline{H_y} &= -\frac{1}{k_p^2} \omega \varepsilon k_x \overline{E_0} \cos(k_x x) \sin(k_y y) \cos(k_z z) \\ \overline{H_z} &= 0.\end{aligned}\quad (1.10)$$

Konstanta \overline{E}_0 určuje maximální velikost složky intenzity \overline{E}_z . Z předcházejících vztahů vyplývá, že veškeré vlny jsou stojaté a nepozorujeme žádné šíření. [3]

TE_{mnp} vidy

Pole TM vidů lze odvodit ze složky H_z . Při odvození opět vycházíme z vlnové rovnice

$$\begin{aligned}\nabla^2 \overline{H}_z + k^2 \overline{H}_z &= 0 \\ \frac{\partial^2 \overline{H}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \overline{H}_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \overline{H}_z}{\partial z^2} + k^2 \overline{H}_z &= 0.\end{aligned}\quad (1.11)$$

Použitím metody separace proměnných dostáváme řešení

$$\overline{H}_z = (\overline{A} \cos(k_x x) + \overline{B} \sin(k_x x))(\overline{C} \cos(k_y y) + \overline{D} \sin(k_y y))(\overline{G} \cos(k_z z) + \overline{H} \sin(k_z z)). \quad (1.12)$$

Pro tečnou složku intenzity magnetického pole na povrchu ideálního vodiče platí $\frac{\partial \overline{H}_t}{\partial \text{normála}} = 0$ a na stěnách rezonátoru musí platit $\frac{\partial \overline{H}_z}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0$ a $\frac{\partial \overline{H}_z}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0$. Odtud dostaneme

$$\begin{aligned}\overline{B} = \overline{D} &= 0 \\ \overline{H}_z &= \overline{A}\overline{C} \cos(k_x x) \cos(k_y y) (\overline{G} \cos(k_z z) + \overline{H} \sin(k_z z)).\end{aligned}\quad (1.13)$$

Z podmínky, že na příčných stěnách (vzhledem k ose z) musí být $\frac{\partial \overline{H}_x}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0$ a $\frac{\partial \overline{H}_y}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0$ dostaneme $\overline{G} = 0$. Rovněž musí platit

$$\begin{aligned}\frac{\partial \overline{H}_z}{\partial x} \Big|_{x=a} &= 0 \\ \frac{\partial \overline{H}_z}{\partial y} \Big|_{y=b} &= 0 \\ \frac{\partial \overline{H}_x}{\partial z} \Big|_{z=d} &= 0 \\ \frac{\partial \overline{H}_y}{\partial z} \Big|_{z=d} &= 0.\end{aligned}\quad (1.14)$$

Odtud dostaneme

$$\begin{aligned}
k_x &= \frac{m\pi}{a} \\
k_y &= \frac{n\pi}{b} \\
k_z &= \frac{p\pi}{d},
\end{aligned}
\tag{1.15}$$

kde m , n a p jsou opět celá čísla. Na rozdíl od TM vidů nesmí být vidové číslo p rovno nule (pro $p = 0$ by byly všechny složky pole nulové). Jedno z vidových čísel m nebo n může být rovno nule (řešení $m = 0$ a současně $n = 0$ nereprezentuje žádnou vlnu). Složky intenzit TM_{mnp} vidů jsou [3]

$$\begin{aligned}
\overline{H}_x &= -\frac{1}{k_p^2} k_z k_x \overline{H}_0 \sin(k_x x) \cos(k_y y) \cos(k_z z) \\
\overline{H}_y &= -\frac{1}{k_p^2} k_z k_y \overline{H}_0 \cos(k_x x) \sin(k_y y) \cos(k_z z) \\
\overline{H}_z &= \overline{H}_0 \cos(k_x x) \cos(k_y y) \sin(k_z z) \\
\overline{E}_x &= -\frac{j}{k_p^2} \omega \mu k_y \overline{H}_0 \cos(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z) \\
\overline{E}_y &= -\frac{j}{k_p^2} \omega \mu k_x \overline{H}_0 \sin(k_x x) \cos(k_y y) \sin(k_z z) \\
\overline{E}_z &= 0.
\end{aligned}
\tag{1.16}$$

1.3.2 Rezonanční kmitočet

Rezonanční kmitočet pro oba typy vidů lze určit ze vztahu

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi\sqrt{\varepsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2}.
\tag{1.17}$$

Z předchozího vztahu lze snadno získat vztah pro rezonanční vlnovou délku

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f_0} = \frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2}}.
\tag{1.18}$$

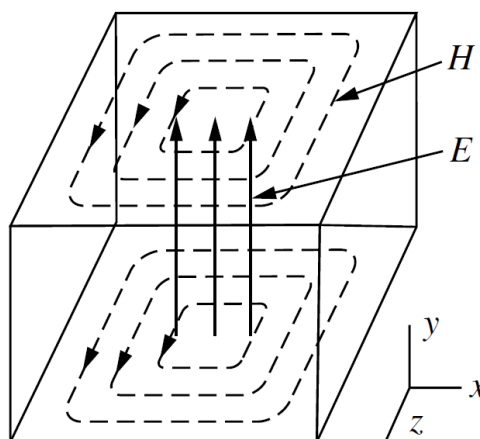
Rezonanční kmitočet TM_{mn0} vidů nezávisí na délce rezonátoru d a vlna má složky \overline{E}_z , \overline{H}_x a \overline{H}_y . Minimální rezonanční kmitočet u TM vidů má vid TM_{110} a lze ho určit pomocí vztahu

$$f_0 = \frac{c_0}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2}.
\tag{1.19}$$

Rezonanční kmitočet TE_{mnp} vidů vždy závisí na délce rezonátoru d a vlna má složky \overline{E}_y , \overline{H}_x a \overline{H}_y . Minimální rezonanční kmitočet u TE vidů má vid TE_{101} a lze ho určit pomocí vztahu

$$f_0 = \frac{c_0}{2\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{d}\right)^2}. \quad (1.20)$$

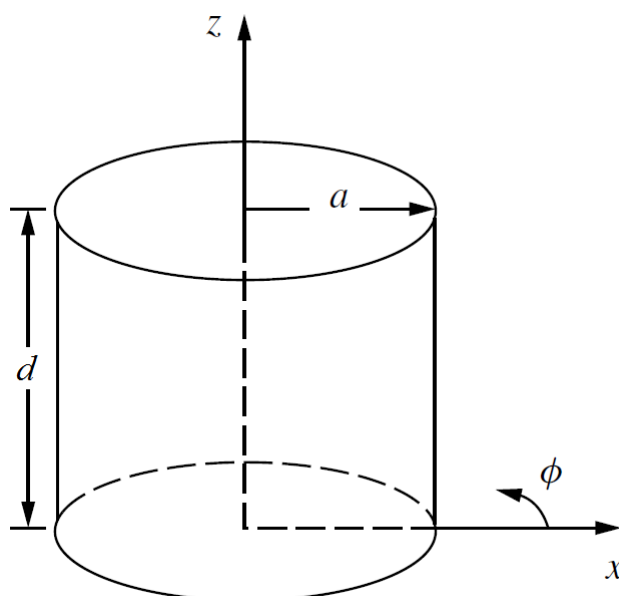
Rozložení elektromagnetického pole tohoto vidu je znázorněno na obr. 1.5. [2][3]



Obr. 1.5 Rozložení elektromagnetického pole vidu TE_{101} [5]

1.4 Válcové dutinové rezonátory

Dalším typem dutinových rezonátorů jsou válcové rezonátory. Tyto rezonátory jsou vytvořeny z úseku kruhového vlnovodu a jsou nejrozšířenějším a nejpoužívanějším typem rezonátorů v mikrovlnné technice. Jejich předností je jednoduchá výroba válcové dutiny. Nejčastěji se používají jako přesné mikrovlnné vlnoměry. Díky vysokému činiteli jakosti ($10^4 - 10^7$) umožňují měření kmitočtu s chybou 0,1 – 0,01 %.



Obr. 1.6 Geometrie válcového rezonátoru [5]

Nejčastější vidy, které se ve válcových dutinových rezonátorech používají, jsou tzv. rotačně symetrické vidy typu TE_{0np} . Nejčastěji se používá vid TE_{011} , který má nulovou složku \overline{H}_φ . Složka \overline{H}_z na stěně pláště rezonátoru je nenulová. Plošné proudy jsou na tuto složku kolmé a tečou pouze v příčné rovině. Takový rezonátor lze snadno přeladovat bezkontaktním posuvným pístem (nemusí mít vodivý kontakt s pláštěm rezonátoru).

Výjimečně se válcové dutinové rezonátory používají s jinými než rotačně symetrickými vidy. Například některé širokopásmové dutinové vlnoměry používají vidy TE_{111} . K přeladování rezonátorů s videm TE_{111} není možné použití bezkontaktního pístu.

V některých jednoduchých aplikacích se používají válcové dutinové rezonátory s vidy TM_{0n0} . Resonanční kmitočet těchto vidů nezávisí na délce rezonátoru d . [2]

1.4.1 Elektromagnetické pole ve válcových dutinových rezonátorech

TM_{mnp} vidy

Složky pole TM_{mnp} vidů jsou

$$\begin{aligned}\overline{E}_z &= \overline{E}_0 \overline{J}_m(k_p r) \cos m\varphi \cos k_z z \\ \overline{E}_r &= -\overline{E}_0 \frac{k_z}{k_p^2} k_p \overline{J}'_m(k_p r) \cos m\varphi \sin k_z z \\ \overline{E}_\varphi &= \overline{E}_0 \frac{k_z}{k_p^2} \frac{m}{r} \overline{J}_m(k_p r) \sin m\varphi \sin k_z z \\ \overline{H}_r &= -j\overline{E}_0 \frac{\omega\epsilon}{k_p^2} \frac{m}{r} \overline{J}'_m(k_p r) \sin m\varphi \cos k_z z \\ \overline{H}_\varphi &= -j\overline{E}_0 \frac{\omega\epsilon}{k_p^2} k_p \overline{J}'_m(k_p r) \cos m\varphi \cos k_z z,\end{aligned}\tag{1.21}$$

kde

$$\begin{aligned}k_z &= \frac{p\pi}{d} \\ k_p &= \frac{\alpha_{mn}}{a}.\end{aligned}\tag{1.22}$$

Vidové číslo p může být rovno nule. Pokud je $p = 0$, má vlna složky \overline{E}_z , \overline{H}_r a \overline{H}_φ a pokud je navíc ještě $m = 0$, pak má vlna pouze složky \overline{E}_z a \overline{H}_φ . [3]

TE_{mnp} vidy

Složky pole TE_{mnp} vidů jsou

$$\begin{aligned}
\overline{H}_z &= \overline{H}_0 \overline{J}_m(k_p r) \cos m\varphi \sin k_z z \\
\overline{H}_r &= \overline{H}_0 \frac{k_z}{k_p^2} k_p \overline{J}'_m(k_p r) \cos m\varphi \cos k_z z \\
\overline{H}_\varphi &= -\overline{H}_0 \frac{k_z}{k_p^2} \frac{m}{r} \overline{J}_m(k_p r) \sin m\varphi \cos k_z z \\
\overline{E}_r &= j\overline{H}_0 \frac{\omega\mu}{k_p^2} \frac{m}{r} \overline{J}'_m(k_p r) \sin m\varphi \sin k_z z \\
\overline{E}_\varphi &= j\overline{H}_0 \frac{\omega\mu}{k_p^2} k_p \overline{J}'_m(k_p r) \cos m\varphi \sin k_z z,
\end{aligned} \tag{1.23}$$

kde

$$\begin{aligned}
k_z &= \frac{p\pi}{d} \\
k_p &= \frac{\alpha'_{mn}}{a}.
\end{aligned} \tag{1.24}$$

Vidové číslo p musí být nenulové. Pro $p = 0$ jsou všechny složky pole nulové. Hodnoty α_{mn} a α'_{mn} jsou kořeny Besselových funkcí a jejich derivací a jsou uvedeny v následující tabulce. [3]

Tab.1.1 Kořeny Besselových funkcí [3]

m	$n = 1$		$n = 2$		$n = 3$		$n = 4$	
	α_{mn}	α'_{mn}	α_{mn}	α'_{mn}	α_{mn}	α'_{mn}	α_{mn}	α'_{mn}
0	2,4048	3,8317	5,5201	7,0156	8,6537	10,1735	11,7915	1,3237
1	3,8317	1,8412	7,0156	5,3314	10,1734	8,5363	13,3237	11,7060
2	5,1356	3,0524	8,4172	6,7061	11,6198	9,9695	14,7960	13,1704
3	6,3802	4,2012	9,7610	8,0152	13,0152	11,3459	16,2235	14,5859
4	7,5883	5,3176	11,0647	9,2824	14,3725	12,6819	17,6160	15,9641

1.4.2 Rezonanční kmitočty

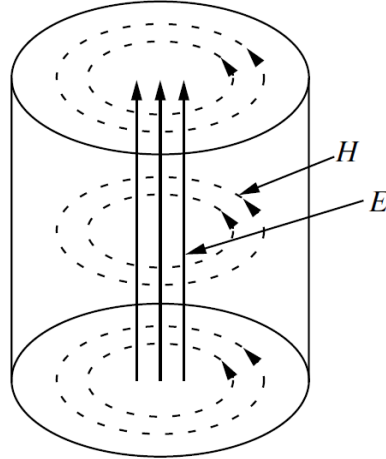
Rezonanční kmitočty pro TM_{mnp} vidy lze určit pomocí vztahu

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{\alpha_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2}. \tag{1.25}$$

Z předchozího vztahu lze snadno získat vztah pro rezonanční vlnovou délku

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f_0} = \frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{\alpha_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2}}. \quad (1.26)$$

Nejnižším TM videm válcového dutinového rezonátoru je vid TM_{010} . Rozložení elektromagnetického pole tohoto vidu je znázorněno na obr. 1.7.



Obr. 1.7 Rozložení elektromagnetického pole vidu TM_{010} [5]

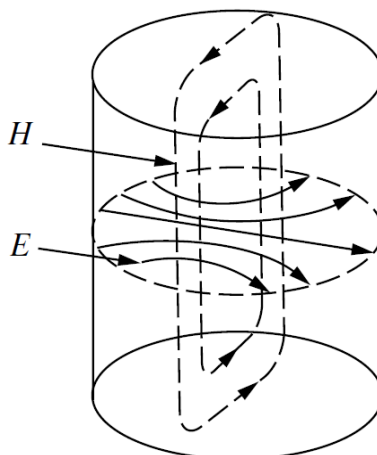
Rezonanční kmitočet pro TE_{mnp} vidy určíme podle vztahu

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{\alpha'_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2} \quad (1.27)$$

a rezonanční vlnovou délku ze vztahu

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f_0} = \frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{\alpha'_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2}}. \quad (1.28)$$

Pokud je délka d rezonátoru větší než jeho poloměr a , má nejnižší rezonanční kmitočet vid TE_{111} . Rozložení elektromagnetického pole tohoto vidu je znázorněno na obr. 1.8. [3]

Obr. 1.8 Rozložení elektromagnetického pole vidu TE_{111} [5]

1.4.3 Koaxiální rezonátory

Koaxiální rezonátory jsou dalším typem dutinových rezonátorů. Jsou vyrobeny z úseku koaxiálního vedení. V koaxiálních rezonátorech se používá výhradně vid TEM (dominantní vid koaxiálního vedení). Jeho rezonanční kmitočet určíme pomocí vztahu

$$f_0^{TEM} = \frac{p}{2d\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (1.29)$$

a rezonanční vlnová délka se vypočítá pomocí vztahu

$$\lambda_0^{TEM} = \frac{2d}{p}, \quad (1.30)$$

kde p je vidové číslo, které určuje počet půlvln elektromagnetického pole na délce rezonátoru d . Koaxiální rezonátory se dále dělí na půlvlnné koaxiální rezonátory a čtvrtvlnné koaxiální rezonátory. [2]

1.5 Buzení dutinových rezonátorů

K buzení dutinových rezonátorů se v praxi používají tři způsoby: buzení proudovou sondou (anténkou), buzení vazebním otvorem (štěrbinou) a buzení magnetickou smyčkou. U všech výše zmíněných způsobů je potřeba znát rozložení a průběh buzeného elektromagnetického pole. [2]

1.5.1 Buzení proudovou sondou

Buzení proudovou sondou je realizováno krátkým úsekem lineárního vedení o délce $l \ll \lambda$, které je zasunuto do buzeného dutinového rezonátoru. K optimálnímu buzení konkrétního vidu elektromagnetického pole je nutné, aby byla sonda zasunuta v místě maximální intenzity elektrického pole rovnoběžně s jeho siločarami. Frekvence budícího signálu musí být blízká rezonanční frekvenci buzeného vidu. [2]

1.5.2 Buzení vazebním otvorem

Buzení vazebním otvorem (štěrbinou) je realizováno vazebním otvorem vyříznutým v kovové stěně dutinového rezonátoru. Požadovaný vid je buzen budícím elektrickým polem, které je vytvořeno ve vyříznutém vazebním otvoru z vnějšku (vnějším vedením, vnějším vlnovodem nebo ozářením elektromagnetickou vlnou). K optimálnímu buzení je nutné, aby bylo budící elektrické pole ve vazebním otvoru orientováno kolmo na směr magnetických siločar buzeného vidu. Další podmínkou je umístění středu vazebního otvoru v místě maxima magnetického pole buzeného vidu. Stejně jako u buzení proudovou sondou musí být frekvence budícího signálu blízká rezonanční frekvenci buzeného vidu. [2]

1.5.3 Buzení magnetickou smyčkou

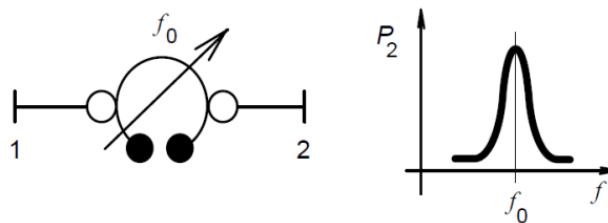
Buzení magnetickou smyčkou je odvozeno od buzení proudovou sondou. Rozdíl spočívá ve vytváření lineární proudové sondy do tvaru malé téměř uzavřené smyčky. K optimálnímu buzení je nutné, aby byla plocha smyčky kolmá k magnetickým siločarám buzeného vidu. Dále je nutné, aby byl střed smyčky v místě maximální intenzity magnetického pole. Frekvence budícího signálu musí být stejně jako u předchozích dvou způsobů blízká rezonanční frekvenci dutinového rezonátoru. [2]

1.6 Způsoby zapojení dutinových rezonátorů do vedení

Dutinový rezonátor je s napájecím vlnovodem vázán jedním nebo několika vazebními prvky. V případě koaxiálních rezonátorů je tímto vazebním prvkem zpravidla vazební smyčka a v případě vlnovodných dutinových rezonátorů je vazba s napájecím vlnovodem řešena nejčastěji vazebním otvorem (štěrbinou). Připojení dutinového rezonátoru k napájecímu vlnovodu je možné třemi základními způsoby: jako průchozí rezonátor, absorpční rezonátor nebo reakční rezonátor. [2]

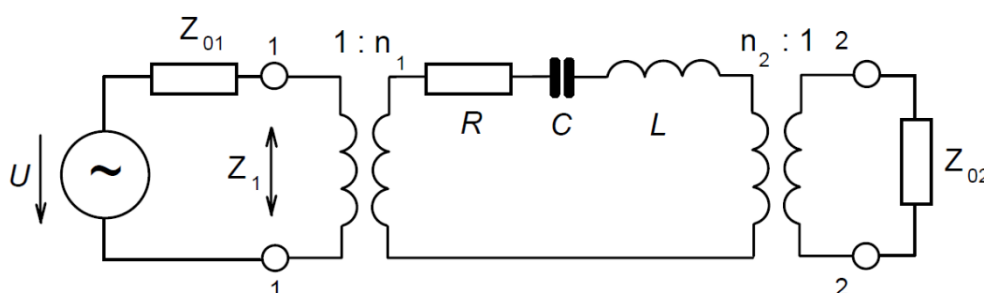
1.6.1 Průchozí rezonátor

Průchozí rezonátor je s napájecím vlnovodem vázán dvěma vazebními otvory. Schematické znázornění zapojení průchozího rezonátoru do vedení je zobrazeno na obr. 1.9. Při rezonanci signál prochází dutinou a v dutině je nahromaděna maximální energie, jejímž důsledkem je prudký nárůst výstupního výkonu. Při větším rozladění signál dutinou prakticky neprojde. [2]



Obr. 1.9 Schematické znázornění průchozího rezonátoru [4]

Na obr. 1.10 je zobrazeno náhradní schéma průchozího rezonátoru. Rezonátor je buzen impedančně přizpůsobeným generátorem přes vlnovod s charakteristickou impedancí Z_{01} a výstup rezonátoru je zatížen přizpůsobeným vlnovodem o charakteristické impedanci Z_{02} . [4]



Obr. 1.10 Náhradní schéma průchozího rezonátoru [4]

Činitel jakosti nezatíženého rezonátoru (vlastní činitel jakosti) určíme ze vztahu

$$Q_0 = \frac{\omega_0 W}{P_Z + P_{Zd}} = \frac{\omega_0 L}{R}, \quad (1.31)$$

kde ω_0 je úhlový rezonanční kmitočet, W je celková energie elektromagnetického pole v dutině, P_Z je činný výkon ztracený ve stěnách rezonátoru a P_{Zd} je činný výkon pohlcený ztrátovým dielektrikem v dutině.

Činitel jakosti zatíženého rezonátoru (provozní činitel jakosti) učíme pomocí vztahu

$$Q_L = \frac{\omega_0 W}{P_Z + P_{Zd} + P_{Zext}} = \frac{\omega_0 L}{R + n_1^2 Z_{01} + n_2^2 Z_{02}}, \quad (1.32)$$

kde P_{Zext} je činný výkon ztracený ve vnějších obvodech rezonátoru (v reálných impedancích Z_{01} a Z_{02}).

Dále se ještě definuje vnější činitel jakosti rezonátoru

$$Q_{ext} = \frac{\omega_0 W}{P_{Zext}} = \frac{\omega_0 W}{P_{Z1} + P_{Z2}} = \frac{\omega_0 L}{n_1^2 Z_{01} + n_2^2 Z_{02}}. \quad (1.33)$$

U průchozího rezonátoru lze vnější činitel jakosti rozdělit na vstupní činitel jakosti

$$Q_1 = \frac{\omega_0 W}{P_{Z1}} = \frac{\omega_0 L}{n_1^2 Z_{01}} \quad (1.34)$$

a výstupní činitel jakosti

$$Q_2 = \frac{\omega_0 W}{P_{Z2}} = \frac{\omega_0 L}{n_2^2 Z_{02}}. \quad (1.35)$$

Mezi jednotlivými činiteli jakosti platí následující vztah

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{ext}} = \frac{1}{Q_L} + \frac{1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2}. \quad (1.36)$$

Častěji než vnějšími činiteli jakosti se vazba rezonátoru s vnějšími obvody vyjadřuje pomocí vstupního a výstupního činitele vazby. Vstupní činitel vazby určíme pomocí vztahu

$$\kappa_1 = \frac{Q_0}{Q_1} = \frac{P_{Z1}}{P_Z + P_{Zd}} = n_1^2 \frac{Z_{01}}{R} \quad (1.37)$$

a výstupní činitel vazby pomocí vztahu

$$\kappa_2 = \frac{Q_0}{Q_2} = \frac{P_{Z2}}{P_Z + P_{Zd}} = n_2^2 \frac{Z_{02}}{R}. \quad (1.38)$$

Důležitým parametrem je vstupní impedance rezonátoru Z_1 na svorkách 1-1 v náhradním schématu průchozího rezonátoru. Její normovaná hodnota je definována jako

$$z_1 = \frac{Z_1}{Z_{01}} = \frac{1 + \kappa_2 + j2\mathcal{G}Q_0}{\kappa_1}, \quad (1.39)$$

kde \mathcal{G} je poměrné kmitočtové rozladění

$$\mathcal{G} = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}{2} \approx \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}. \quad (1.40)$$

Přenosové vlastnosti průchozího rezonátoru jsou vyjádřeny činitelem průchozích ztrát $T(\omega)$

$$T(\omega) = \frac{P_2}{P_{2T}} = \frac{4\kappa_1\kappa_2}{(1 + \kappa_1 + \kappa_2)^2 + 4\mathcal{G}^2 Q_0^2}, \quad (1.41)$$

kde P_2 je výstupní výkon a P_{2T} je maximální teoretická hodnota výstupního výkonu (tedy výkonu, který při rezonanci projde ideálním bezztrátovým rezonátorem do přizpůsobené zátěže). Při rezonanci dosahuje činitel průchozích ztrát $T(\omega)$ své maximální hodnoty

$$T_{\max} = T(\omega_0) = \frac{4\kappa_1\kappa_2}{(1 + \kappa_1 + \kappa_2)^2}. \quad (1.42)$$

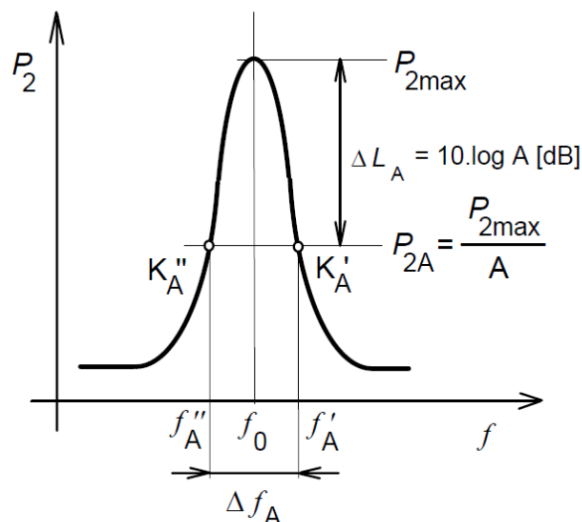
V průchozím rezonátoru vznikají ztráty, které se často vyjadřují v dB jako průchozí útlum rezonátoru

$$L = 10 \log \frac{P_{2T}}{P_2} = 10 \log \frac{1}{T(\omega)}. \quad (1.43)$$

Dalším parametrem je šířka kmitočtového pásma. Na obr. 1.11 je šířka pásma Δf_A definována jako rozdíl kmitočtů f'_A a f''_A , při kterých se přenášený výkon P_2 sníží A -krát ($A > 1$) proti maximální hodnotě při rezonanční frekvenci. Pak $P_{2A} = P_{2max} / A$ a průchozí útlum rezonátoru vzroste o $\Delta L_A = 10 \log A$ [dB]. V důsledku této definice je šířka pásma definována vztahem

$$\Delta f_A = \frac{f_0}{Q_L} \sqrt{A-1}. \quad (1.44)$$

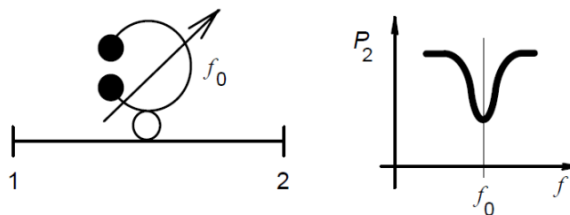
Pokud A je rovno 2, dostáváme často užívaný případ, kdy je šířka pásma definována pro pokles výstupního výkonu P_{2max} na polovinu, neboli zvětšení průchozího útlumu rezonátoru o 3 dB vzhledem k hodnotě $L(\omega_0)$. [4]



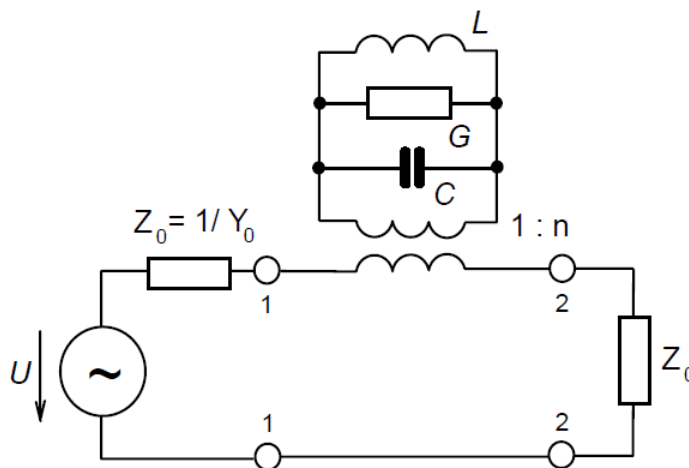
Obr. 1.11 Definice šířky pásma průchozího rezonátoru [4]

1.6.2 Absorpční rezonátor

Absorpční rezonátor je spojen s napájecím vlnovodem jedinou štěrbinou. Schematické znázornění zapojení absorpčního rezonátoru do vedení je zobrazeno na obr. 1.12. U tohoto způsobu zapojení rezonátoru dutina funguje jako sací obvod, který při rezonanci odsaje část výkonu z vnějšího vlnovodu a dojde k poklesu výstupního výkonu. Při velkém rozladění dutina vlnovod prakticky neovlivňuje a prochází jím celý výkon. Na obr. 1.13 je znázorněno náhradní schéma toho rezonátoru. [2]



Obr. 1.12 Schematické znázornění průchozího rezonátoru [4]



Obr. 1.13 Náhradní schéma absorpčního rezonátoru [4]

Činitel jakosti nezatíženého rezonátoru (vlastní činitel jakosti) určíme ze vztahu

$$Q_0 = \frac{\omega_0 C}{G}. \quad (1.45)$$

Činitel jakosti zatíženého rezonátoru (provozní činitel jakosti) určíme pomocí vztahu

$$Q_L = \frac{\omega_0 C}{G + \frac{Y_0}{2n^2}} \quad (1.46)$$

a vnější činitel jakosti rezonátoru pomocí vztahu

$$Q_{ext} = \frac{\omega_0 C}{\frac{Y_0}{2n^2}} = 2n^2 Z_0 \omega_0 C. \quad (1.47)$$

Vstupní a výstupní činitele jakosti se na rozdíl od průchozího rezonátoru rovnají

$$Q_1 = Q_2 = \frac{\omega_0 C}{\frac{Y_0}{n^2}} = n^2 Z_0 \omega_0 C. \quad (1.48)$$

Mezi jednotlivými činiteli jakosti platí vztah

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{ext}} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{2Q_1}. \quad (1.49)$$

Činitel vazby (vstupní činitel vazby je roven výstupnímu činiteli vazby) je definován vztahem

$$\kappa = \kappa_1 = \kappa_2 = \frac{Q_0}{Q_1} = \frac{Y_0}{n^2 G} = \frac{1}{n^2 Z_0 G}. \quad (1.50)$$

Normovaná impedance na svorkách 1 - 1 v náhradním schématu absorpčního rezonátoru

$$z_1 = \frac{Z_1}{Z_{01}} = 1 + \frac{\kappa}{1 + j2\vartheta Q_0} = \frac{1 + \kappa + j2\vartheta Q_0}{1 + j2\vartheta Q_0}. \quad (1.51)$$

Činitel průchozích ztrát je vyjádřen vztahem

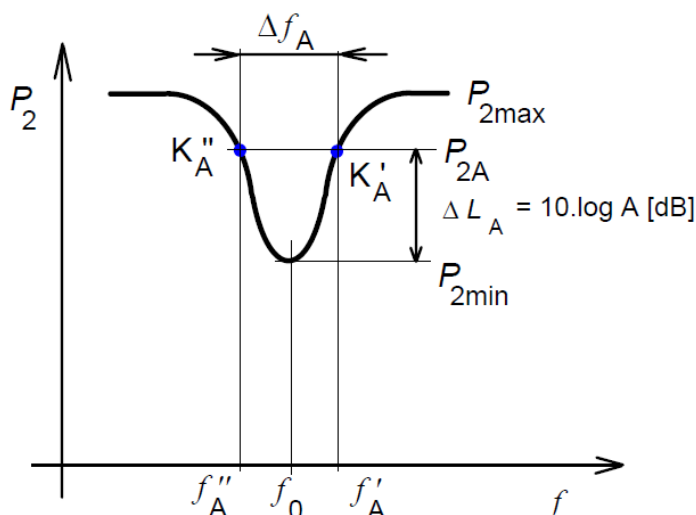
$$T(\omega) = \frac{P_2}{P_{2\max}} = 4 \frac{1 + 4\vartheta^2 Q_0^2}{(2 + \kappa)^2 + 16\vartheta^2 Q_0^2}. \quad (1.52)$$

Při rezonanci dosahuje činitel průchozích ztrát $T(\omega)$ své minimální hodnoty

$$T_{\min} = T(\omega_0) = \frac{P_{2\min}}{P_{2\max}} = \frac{4}{(2 + \kappa)^2} = \left(\frac{Q_L}{Q_0} \right)^2 \quad (1.53)$$

a výstupní výkon P_2 na svorkách 2-2 v náhradním schématu při rezonanci rovněž dosahuje své minimální hodnoty. Průchozí ztráty lze opět vyjádřit v dB jako průchozí útlum

$$L = 10 \log \frac{1}{T(\omega)}. \quad (1.54)$$



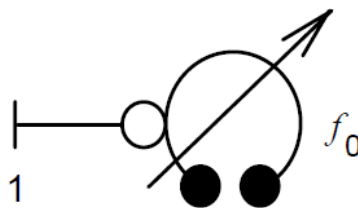
Obr. 1.14 Definice šířky pásma absorpčního rezonátoru [4]

Na obr. 1.14 je šířka pásma absorpčního rezonátoru definována jako rozdíl kmitočtů f'_A a f''_A , při kterých je výkon odsátý rezonátorem A -krát menší než maximální odsátý výkon při rezonanci obvodu. Platí $P_{2\max} - P_{2A} = (P_{2\max} - P_{2\min}) / A$ pro $A > 1$. Pak je šířka pásma absorpčního rezonátoru definována stejným vztahem jako u průchozího rezonátoru [4]

$$\Delta f_A = \frac{f_0}{Q_L} \sqrt{A-1}. \quad (1.55)$$

1.6.3 Reakční rezonátor

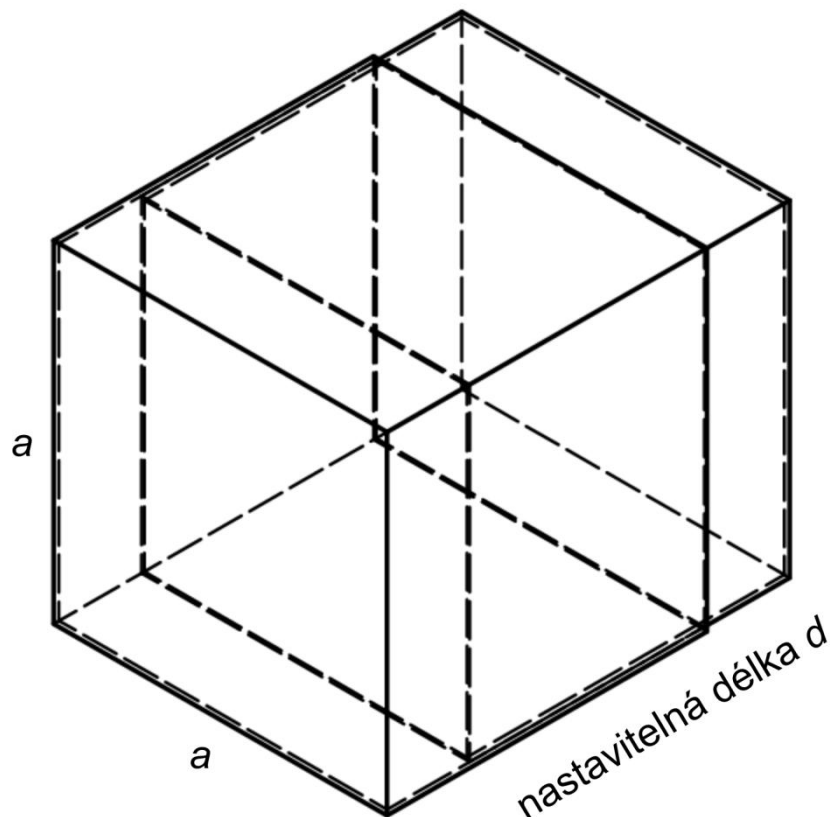
Reakční rezonátor je zapojený na konec vlnovodu. Toto zapojení je znázorněno na obr. 1.15. Reakční rezonátor je zvláštním případem rezonátoru průchozího nebo absorpčního se zkratovanou bránou v místě vazebního prvku. Do napájecího vlnovodu je zapojen indikátor (např. měřící vedení), který slouží k zjišťování rezonance. Vzdáleností tohoto indikátoru od vstupu rezonátoru je indikováno maximum nebo minimum výkonu na měřícím vedení. [2]



Obr. 1.15 Schematické znázornění reakčního rezonátoru [4]

2 Výpočet rezonančních frekvencí

V této kapitole je popsán výpočet rezonančních frekvencí dutinového rezonátoru, který je použit v následné simulaci rozložení elektromagnetického pole a měření rezonančních frekvencí. Měření by mělo být prováděno do frekvence 3 GHz. Geometrie tohoto rezonátoru je znázorněna na obr. 2.1. Jedná se o dvě otevřené krychle z ocelového plechu, které se zasouvají do sebe a tím je umožněna změna délky rezonátoru. Vzhledem k tomu, že se jedna krychle zasouvá do druhé a tudíž krychle nemají stejné vnitřní rozměry, vypočítal jsem délku hrany rezonátoru a jako aritmetický průměr vnitřního rozměru a obou krychlí. Rezonátor má tedy rozměr $a = 24,4$ cm a vzhledem k tomu, že má rezonátor čtvercový průřez, platí $a = b$. Dále jsem ještě zvolil pět různých délek rezonátoru d : 25 cm, 30 cm, 35 cm, 40 cm a 45 cm.



Obr. 2.1 Geometrie použitého rezonátoru

2.1 Příklad výpočtu

K výpočtu rezonančních frekvencí byl použit vztah 1.17. Pro názornost zde uvádím jeden příklad výpočtu pro TM i TE vidy. Rezonanční kmitočet vidu TM_{110} pro délku rezonátoru $d = 25$ cm je roven

$$\begin{aligned}
 f_0 &= \frac{c_0}{2\pi\sqrt{\varepsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2} = \\
 &= \frac{3 \cdot 10^8}{2\pi\sqrt{1}} \sqrt{\left(\frac{1 \cdot \pi}{0,244}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot \pi}{0,244}\right)^2 + \left(\frac{0 \cdot \pi}{0,25}\right)^2} = 0,8694 \text{ GHz}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

a rezonanční kmitočet vidu TE_{101} pro délku rezonátoru $d = 25$ cm je roven

$$\begin{aligned}
 f_0 &= \frac{c_0}{2\pi\sqrt{\varepsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2} = \\
 &= \frac{3 \cdot 10^8}{2\pi\sqrt{1}} \sqrt{\left(\frac{1 \cdot \pi}{0,244}\right)^2 + \left(\frac{0 \cdot \pi}{0,244}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot \pi}{0,25}\right)^2} = 0,8590 \text{ GHz}.
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

2.2 Vypočtené rezonanční frekvence

Vypočtené rezonanční frekvence pro jednotlivé délky rezonátoru jsou uvedeny v tabulkách 2.1 a 2.2. Pro větší přehlednost jsem rezonanční frekvence TM a TE vidů rozdělil do dvou tabulek. Jak již bylo uvedeno v kapitole 1.3, pro TM vidy platí, že vidová čísla m a n musí být nenulová a vidové číslo p může být rovno nule. Pro TE vidy platí, že buď m , nebo n může být rovno nule a p nesmí být rovno nule.

Pro rezonanční frekvence vidů, které jsou v tabulkách barevně zvýrazněny, je v následující kapitole provedena simulace rozložení elektromagnetického pole.

Tab. 2.1 Rezonanční frekvence TM vidů

Vidová čísla			Rezonanční frekvence [GHz]				
<i>m</i>	<i>n</i>	<i>p</i>	<i>d</i> = 25 cm	<i>d</i> = 30 cm	<i>d</i> = 35 cm	<i>d</i> = 40 cm	<i>d</i> = 45 cm
1	1	0	0,8694	0,8694	0,8694	0,8694	0,8694
1	1	1	1,0563	1,0029	0,9693	0,9468	0,9311
2	1	0	1,3746	1,3746	1,3746	1,3746	1,3746
2	1	1	1,4999	1,4627	1,4399	1,4249	1,4145
2	1	2	1,8247	1,6999	1,6200	1,5659	1,5278
2	2	0	1,7388	1,7388	1,7388	1,7388	1,7388
2	2	1	1,8394	1,8092	1,7908	1,7788	1,7704
2	2	2	2,1127	2,0058	1,9386	1,8936	1,8622
3	1	0	1,9440	1,9440	1,9440	1,9440	1,9440
3	1	1	2,0345	2,0073	1,9907	1,9799	1,9724
3	1	2	2,2846	2,1861	2,1246	2,0837	2,0552
3	2	0	2,2165	2,2165	2,2165	2,2165	2,2165
3	2	1	2,2963	2,2722	2,2576	2,2480	2,2415
3	2	2	2,5205	2,4317	2,3765	2,3400	2,1346
3	1	3	2,6494	2,4554	2,3307	2,2461	2,1861
3	2	3	2,8553	2,6764	2,5624	2,4857	2,4317
3	3	1	2,6763	2,6557	2,6432	2,6350	2,6294
3	3	2	2,8710	2,7933	2,7454	2,7139	2,6920
3	3	3	3,1690	3,0088	2,9079	2,8405	2,7933
4	1	0	2,5347	2,5347	2,5347	2,5347	2,5347
4	1	1	2,6047	2,5835	2,5707	2,5623	2,5565
4	1	2	2,8044	2,7248	2,6757	2,6433	2,6209
4	2	0	2,7493	2,7493	2,7493	2,7493	2,7493
4	2	1	2,8140	2,7944	2,7825	2,7747	2,7694
4	2	2	2,9997	2,9255	2,8798	2,8497	2,8289
4	1	3	3,1088	2,9453	2,8421	2,7731	2,7248
4	2	3	3,2861	3,1318	3,0350	2,9705	2,9255
4	3	0	3,0738	3,0738	3,0738	3,0738	3,0738
4	3	1	3,1318	3,1142	3,1035	3,0966	3,0918
4	3	2	3,2997	3,2323	3,1910	3,1639	3,1452
4	3	3	3,5620	3,4202	3,3318	3,2732	3,2323
4	1	4	3,4907	3,2287	3,0600	2,9453	2,8640
4	2	4	3,6494	3,3998	3,2399	3,1318	3,0555
4	3	4	3,8998	3,6672	3,5195	3,4202	3,3505
4	4	0	3,4776	3,4776	3,4776	3,4776	3,4776

Tab. 2.2 Rezonanční frekvence TE vidů

Vidová čísla			Rezonanční frekvence [GHz]				
<i>m</i>	<i>n</i>	<i>p</i>	<i>d</i> = 25 cm	<i>d</i> = 30 cm	<i>d</i> = 35 cm	<i>d</i> = 40 cm	<i>d</i> = 45 cm
1	0	1	0,8590	0,7924	0,7494	0,7201	0,6993
1	1	1	1,0563	1,0029	0,9693	0,9468	0,9311
2	0	1	1,3681	1,3273	1,3021	1,2854	1,2739
2	1	1	1,4999	1,4627	1,4399	1,4249	1,4145
2	0	2	1,7180	1,5848	1,4988	1,4402	1,3906
2	1	2	1,8247	1,6999	1,6200	1,5659	1,5278
2	2	1	1,8394	1,8092	1,7908	1,7788	1,7704
2	2	2	2,1127	2,0058	1,9386	1,8936	1,8622
3	0	1	1,9394	1,9108	1,8934	1,8820	1,8741
3	1	1	2,0345	2,0073	1,9907	1,9799	1,9724
3	0	2	2,2003	2,0979	2,0337	1,9909	1,9611
3	1	2	2,2846	2,1861	2,1246	2,0837	2,0552
3	2	1	2,2963	2,2722	2,2576	2,2480	2,2415
3	2	2	2,5205	2,4317	2,3765	2,3400	2,3146
3	0	3	2,5771	2,3772	2,2482	2,1603	2,0979
3	1	3	2,6494	2,4554	2,3307	2,2461	2,1861
3	2	3	2,8553	2,6764	2,5624	2,4857	2,4317
3	3	1	2,6763	2,6557	2,6432	2,6350	2,6294
3	3	2	2,8710	2,7933	2,7454	2,7139	2,6920
3	3	3	3,1690	3,0088	2,9079	2,8405	2,7933
4	0	1	2,5312	2,5093	2,4961	2,4874	2,4815
4	1	1	2,6047	2,5835	2,5707	2,5623	2,5565
4	0	2	2,7362	2,6546	2,6041	2,5708	2,5478
4	1	2	2,8044	2,7248	2,6757	2,6433	2,6209
4	2	1	2,8140	2,7944	2,7825	2,7747	2,7694
4	2	2	2,9997	2,9255	2,8798	2,8497	2,8298
4	0	3	3,0474	2,8804	2,7749	2,7041	2,6546
4	1	3	3,1088	2,9453	2,8421	2,7731	2,7248
4	2	3	3,2861	3,1318	3,0350	2,9705	2,9255
4	3	1	3,1318	3,1142	3,1035	3,0966	3,0918
4	3	2	3,2997	3,2323	3,1910	3,1639	3,1452
4	3	3	3,5620	3,4202	3,3318	3,2732	3,2323
4	0	4	3,4361	3,1697	2,9976	2,8804	2,7972
4	1	4	3,4907	3,2287	3,0600	2,9453	2,8640
4	2	4	3,6494	3,3998	3,2399	3,1318	3,0555

3 Simulace rozložení elektromagnetického pole

V této kapitole je popsána simulace rozložení elektromagnetického pole uvnitř rezonátoru, popsaném v předchozí kapitole. K simulaci byl použit program COMSOL Multiphysics.

3.1 COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics je simulační program, který používá k řešení úloh metodu konečných prvků. Tento program lze s úspěchem používat v případech, kdy je potřeba do modelu zahrnout více fyzikálních procesů (tzv. multifyzikální úlohy). To znamená, že lze do jedné úlohy zahrnout libovolný počet fyzikálních jevů, které budou brány v úvahu při vytváření modelu. Součástí tohoto programu jsou předdefinované typové úlohy, které ulehčují práci při definování modelů.

COMSOL Multiphysics obsahuje všechny funkce, které jsou potřebné k vytvoření a analýze modelu: definici geometrie, definici materiálových vlastností, zadání okrajových podmínek, vytvoření sítě, nastavení řešičů a vizualizaci výsledků.

Další možností je vytvoření vlastní simulace definováním matematických rovnic buď ve formě PDE (parciální diferenciální rovnice), nebo ODE (obyčejné diferenciální rovnice). Definice rovnic probíhá přímo v grafickém rozhraní programu.

Pracovní postup při modelování úlohy lze rozdělit do několika kroků:

- 1) Definice geometrie zkoumaného modelu
- 2) Zadání okrajových podmínek a vlastností oblastí
- 3) Generování výpočetní sítě
- 4) Řešení modelu
- 5) Konečné zpracování výsledků

Program COMSOL Multiphysics lze rozšířit celou řadou rozšiřujících modulů z oblasti elektrotechniky, mechaniky, kapalin nebo chemie. [6]

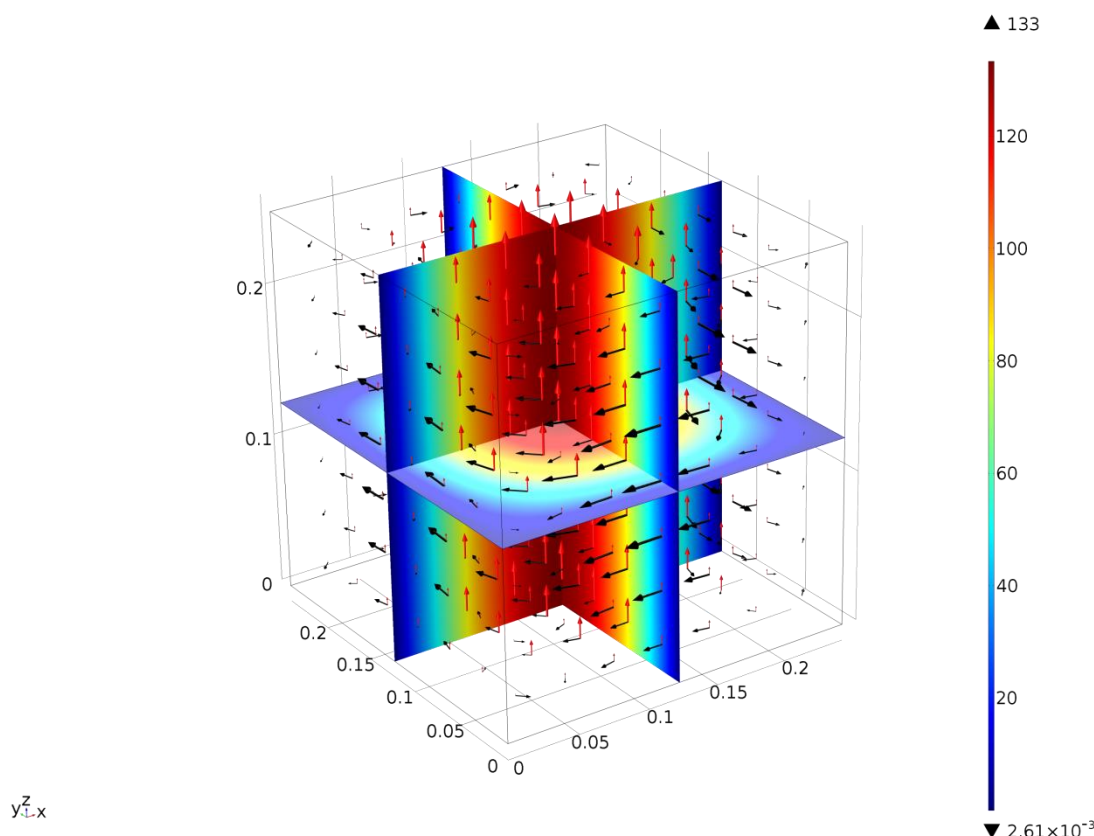
3.2 Vlastní simulace

K simulaci rozložení elektromagnetického pole již zmíněného rezonátoru byl použit přídatný RF modul programu COMSOL Multiphysics. Tento modul je určený k modelování elektromagnetického vlnění vysokých frekvencí. Používá se v oblasti antén, vlnodů, rezonátorů, optických vláken a dalších vysokofrekvenčních aplikacích. V tomto modulu jsem vytvořil model měřeného rezonátoru. V tomto modelu je uvnitř rezonátoru vakuum a stěny

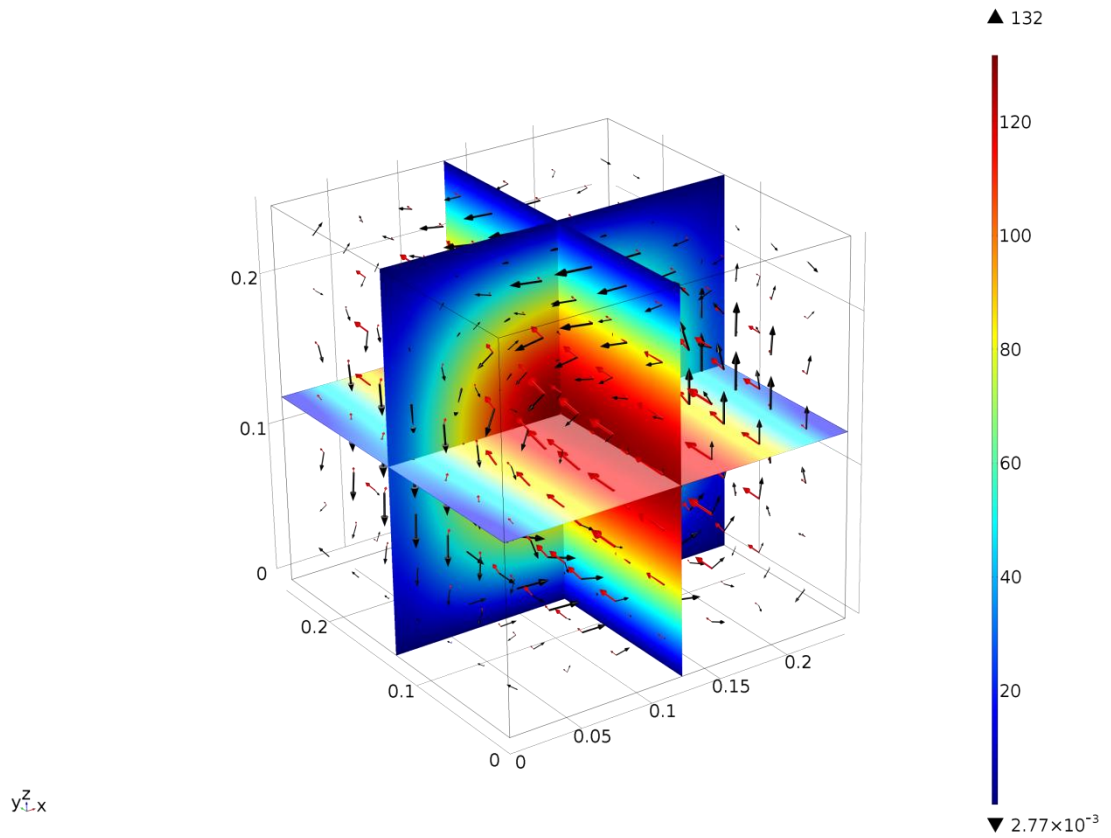
rezonátoru mají vodivost 10^7 S.m^{-1} . Simulaci jsem prováděl pro pět délek rezonátoru pro TM i TE vidy, které jsou barevně zvýrazněny v tabulkách 2.1 a 2.2.

Na obr. 3.1 je znázorněno rozložení elektromagnetického pole vidu TM_{110} pro rezonátor o délce 25 cm. Červené šipky znázorňují směr intenzity elektrického pole E a černé šipky znázorňují směr intenzity magnetického pole H . Obdobně je na obr. 3.2 znázorněno rozložení elektromagnetického pole vidu TE_{101} pro rezonátor o délce 25 cm. Simulace rozložení elektromagnetického pole pro ostatní vidy a délky z tabulek 2.1 a 2.2 je uvedena v příloze A. Stupnice uvedená u obrázků udává hodnotu intenzity elektrického pole E ve V.m^{-1} .

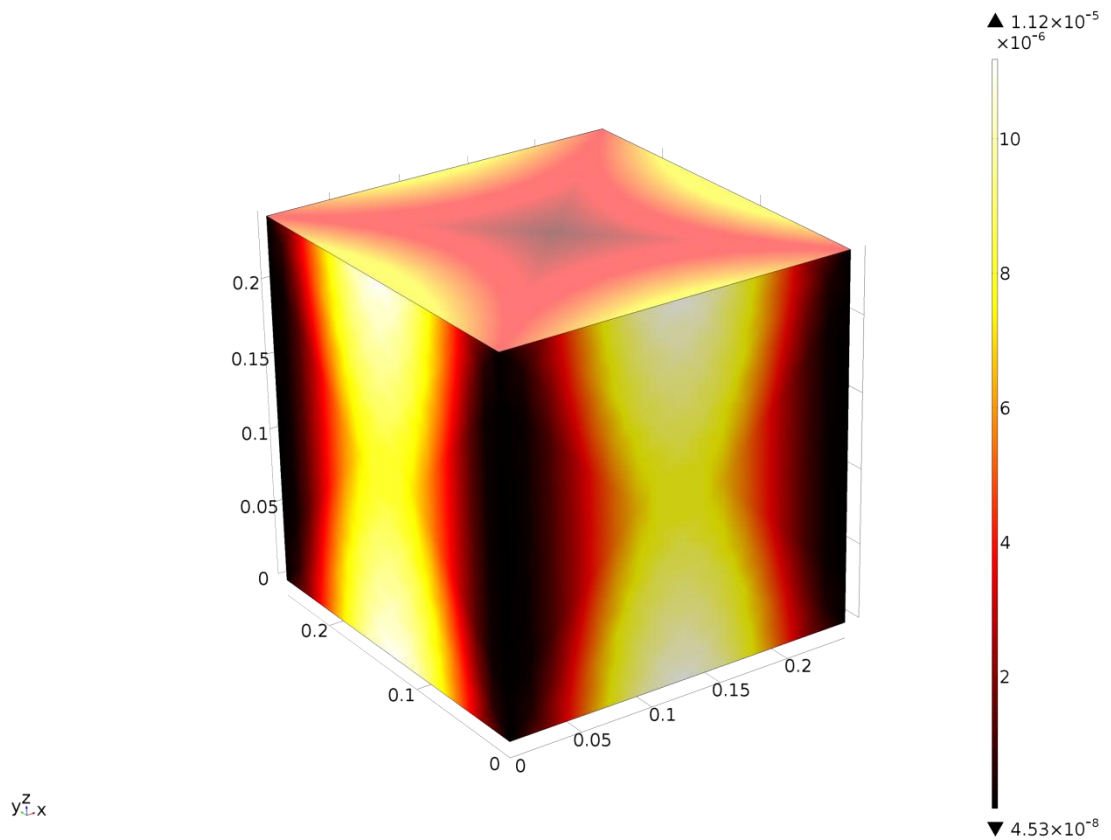
Vzhledem k tomu, že stěny rezonátoru nejsou dokonale vodivé, vznikají v nich povrchové ztráty. Povrchové ztráty se udávají ve W.m^{-2} . Simulace povrchových ztrát ve stěnách rezonátoru pro vid TM_{110} je zobrazena na obr. 3.3. Pro vid TE_{101} je simulace povrchových ztrát ve stěnách rezonátoru zobrazena na obr. 3.4. Simulace povrchových ztrát pro ostatní vidy a délky z tabulek 2.1 a 2.2 je uvedena v příloze B.



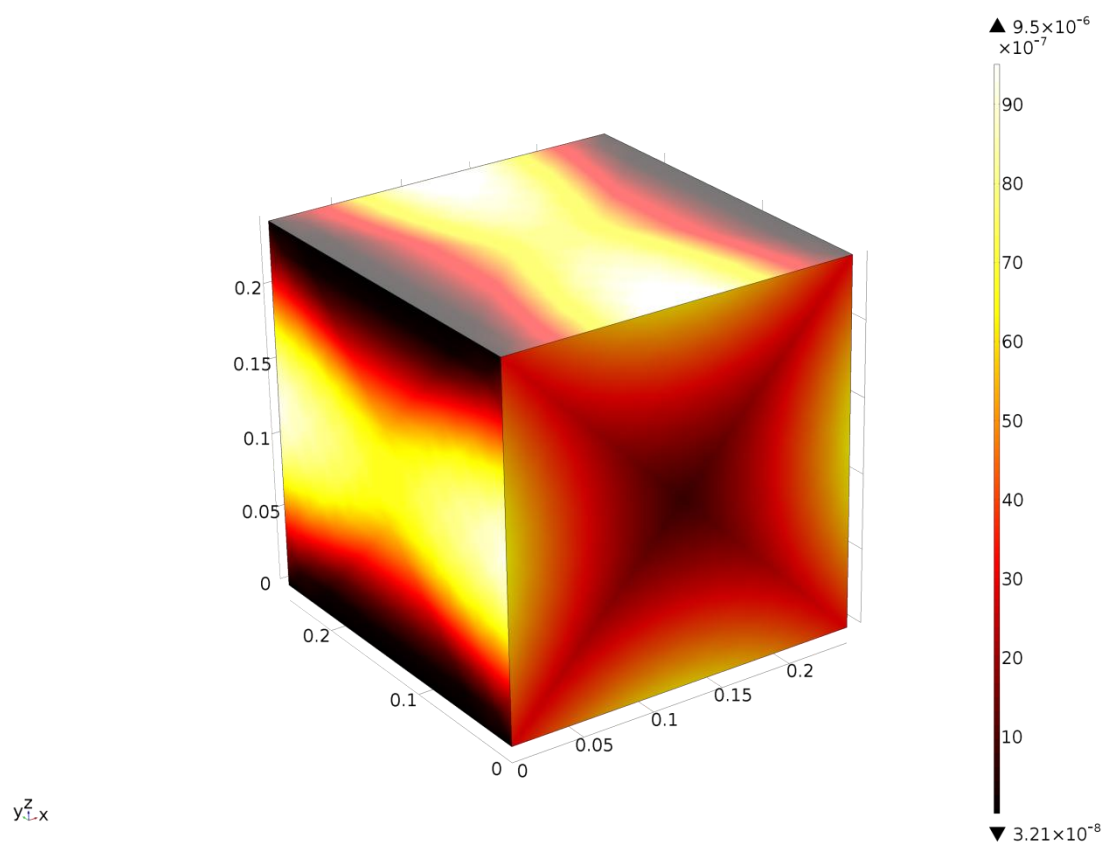
Obr. 3.1 Rozložení elektromagnetického pole vidu TM_{110} , délka rezonátoru 25 cm



Obr. 3.2 Rozložení elektromagnetického pole vidu TE_{101} , délka rezonátoru 25 cm



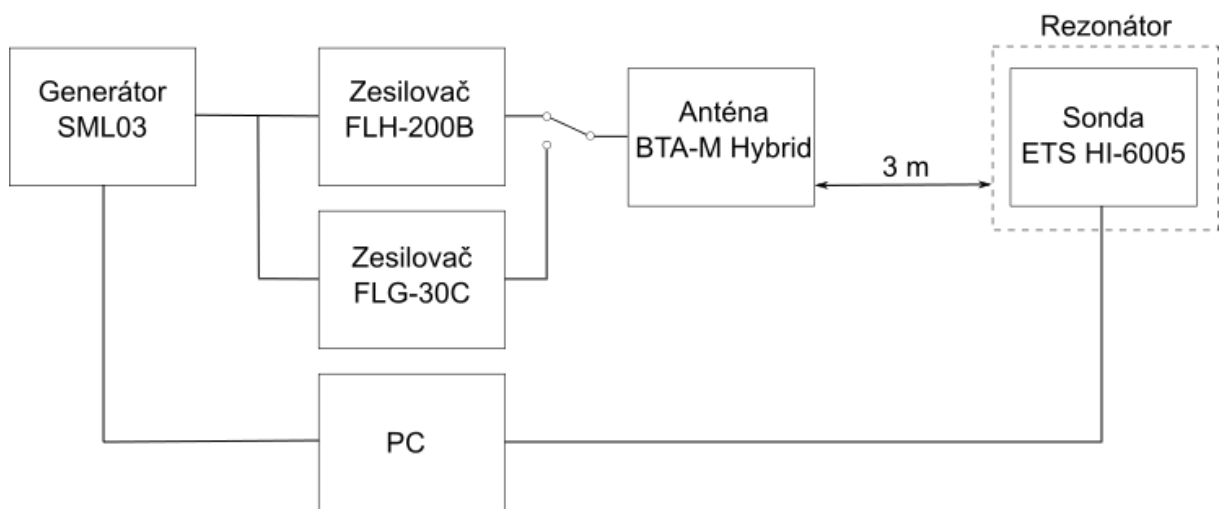
Obr. 3.3 Povrchové ztráty ve stěnách rezonátoru pro vid TM_{110} , délka rezonátoru 25 cm



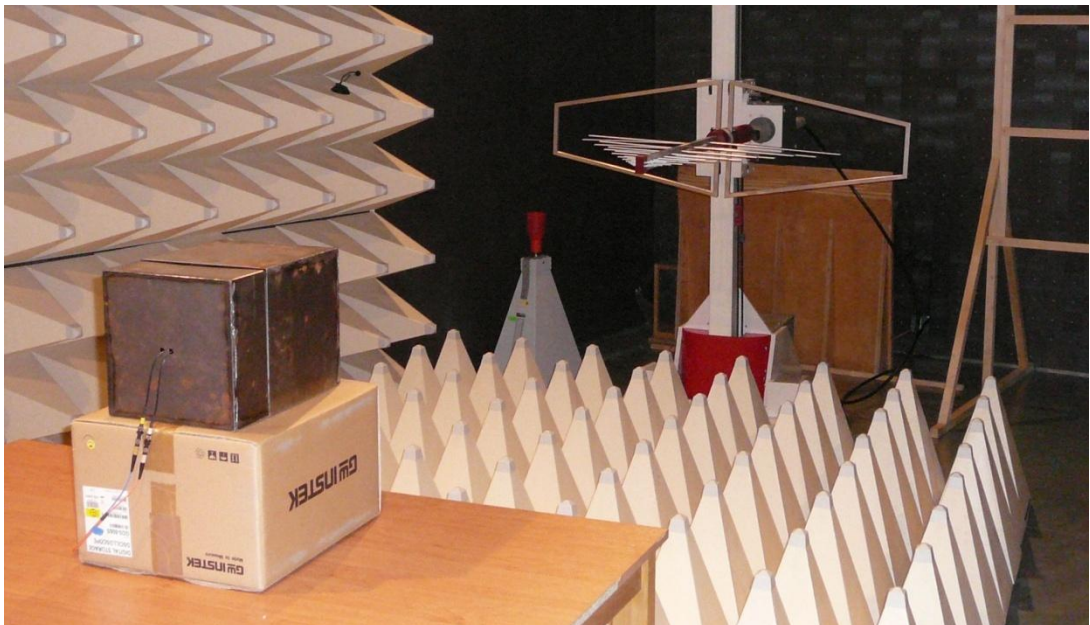
Obr. 3.4 Povrchové ztráty ve stěnách rezonátoru pro vid TE_{101} , délka rezonátoru 25 cm

4 Měření rezonančních frekvencí

V této kapitole je popsáno měření rezonančních frekvencí dutinového rezonátoru, který je popsán v předchozích kapitolách. Měření nebylo možné provést až do zadané frekvence 3 GHz, protože byla k dispozici kalibrace měřicího řetězce pouze do 2,25 GHz. Zapojení měřicího řetězce je zobrazeno na obr. 4.1. Měření probíhalo v bezodrazové komoře. Rezonátor byl umístěn na stole ve výšce přibližně 1,55 m a uvnitř rezonátoru (přibližně v jeho středu) byla umístěna sonda elektrického pole. Ze vzdálenosti 3 m ve výšce 1,55 m byla na rezonátor namířena horizontálně polarizovaná logaritmicko – periodická anténa (obr 4.2).



Obr. 4.1 Měřicí řetězec



Obr. 4.2 Umístění rezonátoru

Měření bylo prováděno v rozsahu frekvencí od 500 MHz do 2,25 GHz s konstantním krokem 2,5 MHz. Intenzita elektromagnetických vln přiváděných z generátoru přes zesilovač na vysílací anténu byla 10 V/m. Sondou byla měřena intenzita elektrického pole uvnitř rezonátoru.

Celé měření bylo řízeno počítačem a bylo postupně prováděno pro délky rezonátoru 25, 30, 35, 40 a 45 cm.

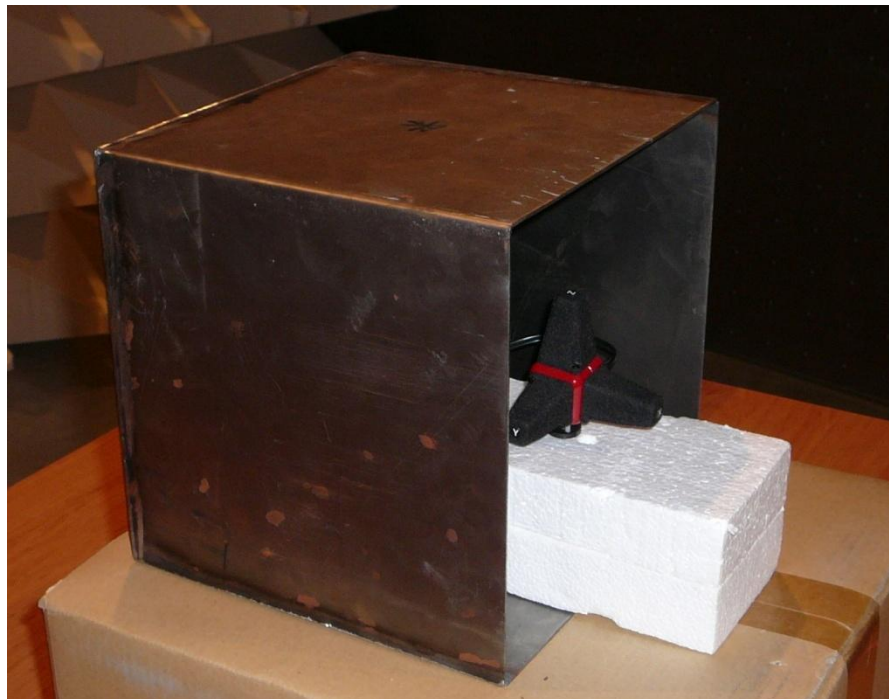
4.1 Použité přístroje

Jako generátor signálu byl použit vysokofrekvenční generátor Rohde & Schwarz SML03, který má frekvenční rozsah od 9 kHz do 3,3 GHz.

Pro frekvence do 1 GHz byl signál z generátoru přiváděn na zesilovač Frankonia FLH 200B (frekvenční rozsah 20 MHz – 1 GHz, zisk 54 dB). Po dosažení frekvence 1 GHz bylo nutné použít druhý zesilovač Frankonia FLG-30C (frekvenční rozsah 1 GHz – 3 GHz, zisk 46 dB).

Signál z výstupu zesilovačů byl přiváděn na logaritmicko – periodickou anténu Frankonia BTA-M Hybrid (frekvenční rozsah 30 MHz – 3 GHz, délka 106 cm).

Signál vysílaný anténou dopadal na stěny rezonátoru. Sondou ETS HI-6005 (frekvenční rozsah 100 kHz – 6 GHz, dynamický rozsah 0,5 – 800 V/m a rozlišení 0,01 V/m) byla měřena intenzita elektrického pole uvnitř rezonátoru (obr. 4.3).



Obr. 4.3 Sonda ETS HI-6005 uvnitř rezonátoru

4.2 Naměřené hodnoty

V následujících tabulkách jsou zapsány naměřené hodnoty. Jak již bylo zmíněno, měření probíhalo v rozsahu frekvencí od 500 MHz do 2,25 GHz s krokem 2,5 MHz. To znamená, že pro každou délku rezonátoru bylo naměřeno 701 hodnot. Z tohoto důvodu jsou v tabulkách zapsány jen ty frekvence, při kterých se intenzita elektrického pole uvnitř rezonátoru výrazněji lišila od okolních hodnot. Při těchto frekvencích byl rezonátor v rezonanci.

Tab. 4.1 Naměřené hodnoty – délka rezonátoru 25 cm

Frekvence [MHz]	Vysílaný signál		Intenzita elektrického pole v rezonátoru [V/m]
	Úroveň [dB]	Intenzita [V/m]	
837,5	84,3	10,14	3,54
842,5	83,8	10,18	2,98
862,5	86,4	10,05	2,99
1057,5	101,2	10,13	1,68
1392,5	99,3	10,03	3,43
1462,0	100,4	10,01	1,46
1492,0	102,2	10,07	4,74
1782,5	103,5	10,13	0,73
1832,5	104,6	10,06	3,33
1887,5	101,2	10,12	0,78
1910,0	100,5	10,13	0,82
1927,5	98,3	10,04	1,02
1940,0	100,3	10,12	1,05
1947,5	102,1	10,06	0,78
1957,5	103,0	10,21	0,77
1980,0	100,0	10,08	1,83
2005,0	102,6	10,01	1,02
2047,0	101,9	10,08	2,61
2100,0	99,9	10,23	0,78
2072,5	102,6	10,01	1,25
2127,5	104,0	10,001	1,13
2132,5	105,8	10,14	1,18
2162,5	100,7	10,23	1,30
2170,0	100,4	10,04	1,54
2197,5	105,7	10,01	1,70
2232,5	103,3	10,18	1,38
2250,0	106,9	10,06	1,57

Tab. 4.2 Naměřené hodnoty – délka rezonátoru 30 cm

Frekvence [MHz]	Vysílaný signál		Intenzita elektrického pole v rezonátoru [V/m]
	Úroveň [dB]	Intenzita [V/m]	
780,0	83,7	10,14	2,96
862,5	86,4	10,05	3,95
867,5	87,2	10,07	2,03
885,0	88,3	10,24	0,72
1002,5	97,7	10,08	1,07
1170,0	98,6	10,06	1,34
1335,0	101,3	10,22	2,54
1385,0	99,2	10,18	2,64
1455,0	98,5	10,10	1,99
1457,5	99,0	10,07	1,78
1465,0	100,5	10,00	1,71
1467,5	100,3	10,19	2,05
1587,5	100,9	10,02	1,20
1707,5	100,4	10,02	1,37
1710,0	101,4	10,02	1,38
1725,0	99,1	10,22	1,14
1812,5	99,3	10,10	1,00
1830,0	104,0	10,03	0,71
1877,5	100,0	10,04	0,70
1907,5	100,2	10,09	0,84
2010,0	103,9	10,13	1,56
2012,5	104,1	10,04	1,64
2082,5	103,4	10,14	0,78

Tab. 4.3 Naměřené hodnoty – délka rezonátoru 35 cm

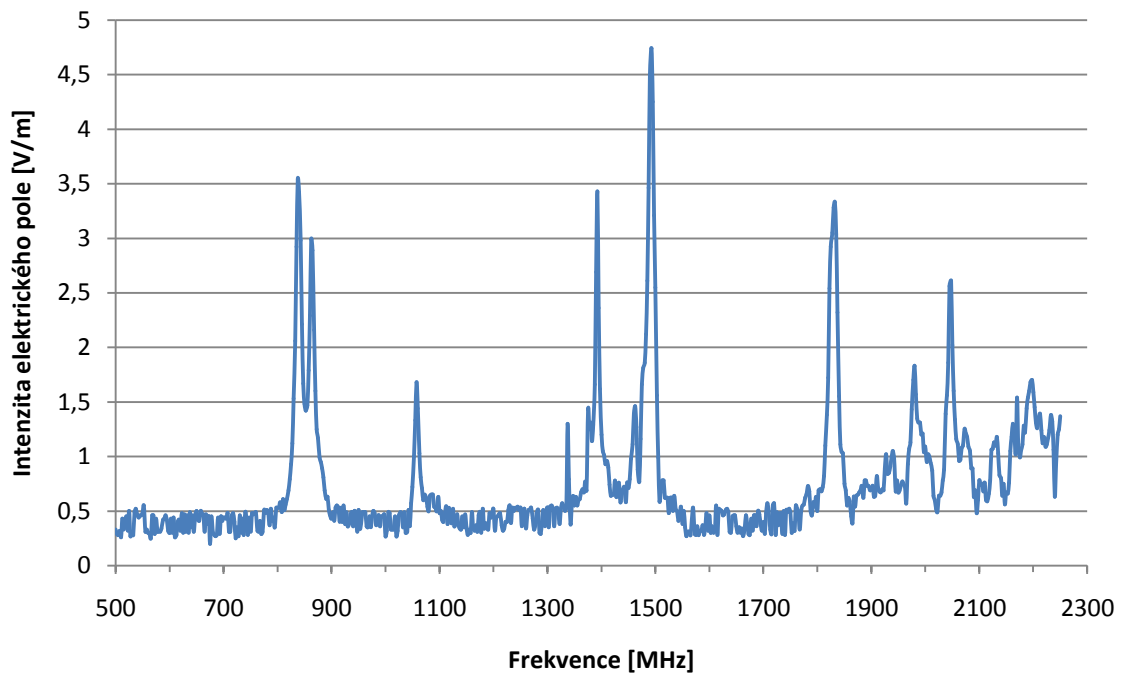
Frekvence [MHz]	Vysílaný signál		Intenzita elektrického pole v rezonátoru [V/m]
	Úroveň [dB]	Intenzita [V/m]	
737,5	85,8	10,02	2,45
860,0	86,4	10,05	3,39
967,5	84,9	10,10	0,95
1050,0	101,2	10,09	0,78
1307,5	102,4	10,22	1,52
1382,5	99,2	10,22	2,02
1392,5	99,3	10,14	1,82
1435,0	98,6	10,03	1,96
1627,5	97,3	10,21	0,73
1775,0	103,1	10,20	2,05
1807,5	98,7	10,13	1,22
1820,0	101,2	10,06	0,95
1840,0	102,0	10,01	1,42
1842,5	101,0	10,20	1,42
1872,5	99,2	10,17	0,84
1880,0	100,8	10,08	1,20
1892,5	101,6	10,11	1,73
1927,5	98,3	10,06	0,71
19992,5	98,8	10,04	0,68
2077,5	104,7	10,22	0,79
2160,0	101,2	10,17	1,49
2187,5	104,4	10,01	2,13
2197,5	105,7	10,22	2,99
2217,5	103,8	10,18	1,38
2232,5	103,3	10,07	1,36
2247,5	104,5	10,15	0,77

Tab. 4.4 Naměřené hodnoty – délka rezonátoru 40 cm

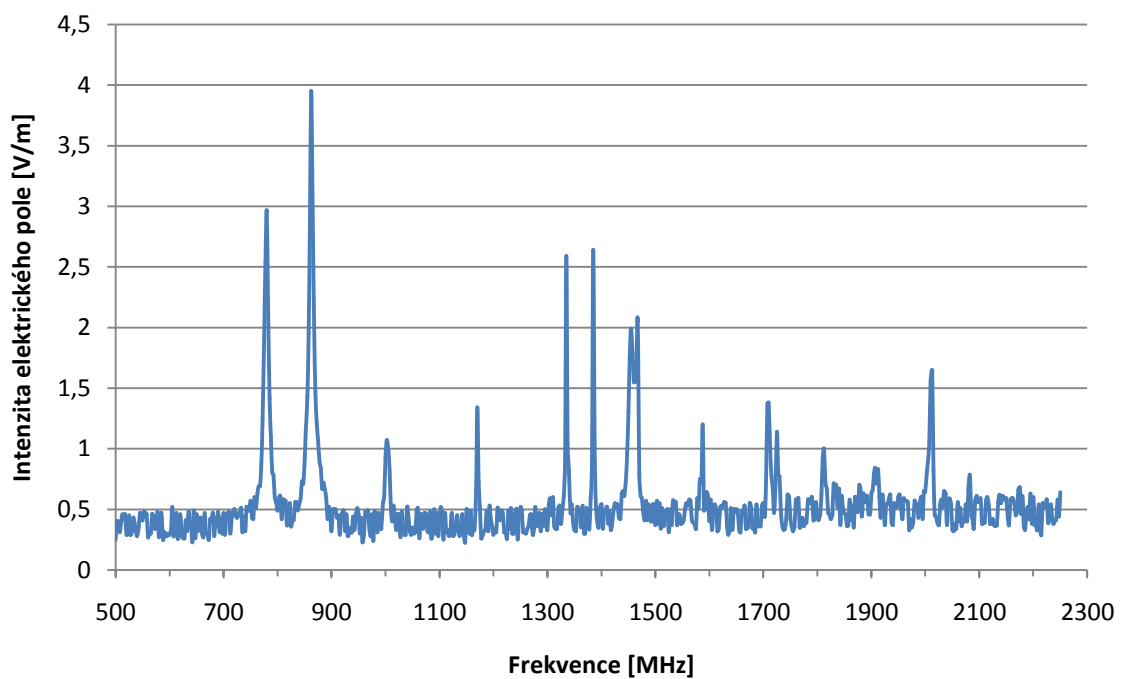
Frekvence [MHz]	Vysílaný signál		Intenzita elektrického pole v rezonátoru [V/m]
	Úroveň [dB]	Intenzita [V/m]	
710,0	83,7	10,08	1,21
862,5	86,4	10,05	4,02
950,0	85,5	10,20	0,83
967,5	84,9	10,10	0,74
1137,5	99,3	10,14	2,00
1257,5	103,4	10,22	2,55
1287,5	101,7	10,21	0,68
1375,0	99,7	10,22	2,33
1550,0	103,4	10,20	0,81
1565,0	99,2	10,16	2,79
1575,0	97,3	10,19	1,26
1595,0	102,8	10,05	0,72
1645,0	100,9	10,14	0,70
1665,0	98,2	10,02	1,16
1682,5	97,2	10,24	0,96
1692,5	96,4	10,13	1,08
1715,0	101,9	10,14	3,56
1732,5	101,3	10,05	2,35
1735,0	100,6	10,15	4,35
1742,5	98,7	10,11	4,61
1770,0	102,2	10,11	3,21
1782,5	103,5	10,13	3,49
1815,0	99,6	10,13	1,70
1830,0	104,0	10,03	1,80
1860,0	98,3	10,15	1,76
1890,0	101,4	10,12	1,33
1905,0	99,9	10,08	1,58
1912,5	100,7	10,06	1,47
1945,0	101,4	10,02	1,69
1980,0	100,0	10,08	0,81
2030,0	99,4	10,21	2,04
2057,5	100,9	10,18	2,67
2075,0	103,9	10,08	2,55
2212,5	104,6	10,10	2,31
2235,0	103,3	10,09	2,38
2240,0	103,6	10,00	2,40

Tab. 4.5 Naměřené hodnoty – délka rezonátoru 45 cm

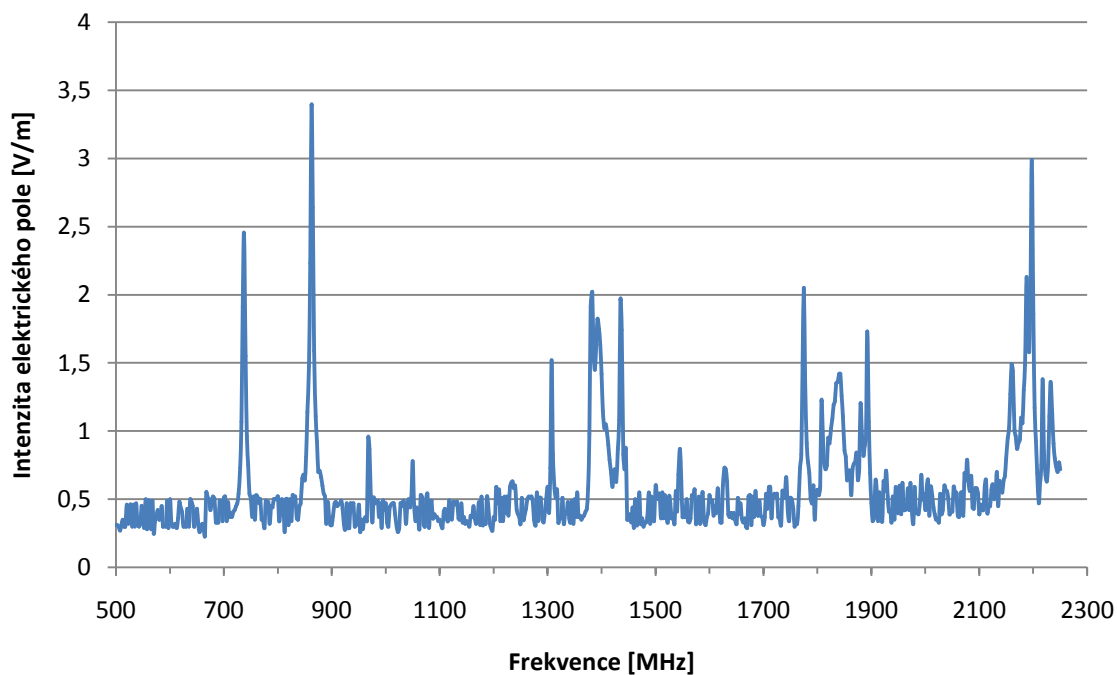
Frekvence [MHz]	Vysílaný signál		Intenzita elektrického pole v rezonátoru [V/m]
	Úroveň [dB]	Intenzita [V/m]	
690,0	84,7	10,21	2,14
862,5	86,4	10,05	3,10
902,5	86,4	10,03	2,16
1085,0	102,9	10,15	7,02
1150,0	98,9	10,23	1,51
1372,5	100,0	10,06	3,54
1395,0	99,4	10,01	0,86
1457,5	99,0	10,07	1,13
1522,5	99,9	10,19	1,16
1535,0	104,2	10,07	3,29
1577,5	97,5	10,14	0,93
1675,0	97,6	10,24	0,71
1735,0	100,6	10,15	1,55
1805,0	98,4	10,10	0,67
1845,0	100,1	10,13	0,73
1860,0	98,3	10,15	0,68
1890,0	101,4	10,12	1,06
1917,5	99,7	10,22	2,06
1940,0	100,3	10,12	0,93
1960,0	102,3	10,15	3,41
1982,0	100,2	10,13	0,74
2012,5	104,1	10,04	1,39
2050,0	102,0	10,13	1,05
2055,0	101,1	10,12	0,80
2080,0	104,3	10,23	1,27
2127,5	104,0	10,01	1,51
2140,0	104,7	10,24	0,75
2147,5	102,2	10,24	0,92
2162,5	100,7	10,23	1,14
2167,5	100,1	10,23	0,66
2197,5	105,7	10,01	0,70
2250,0	106,9	10,06	0,82



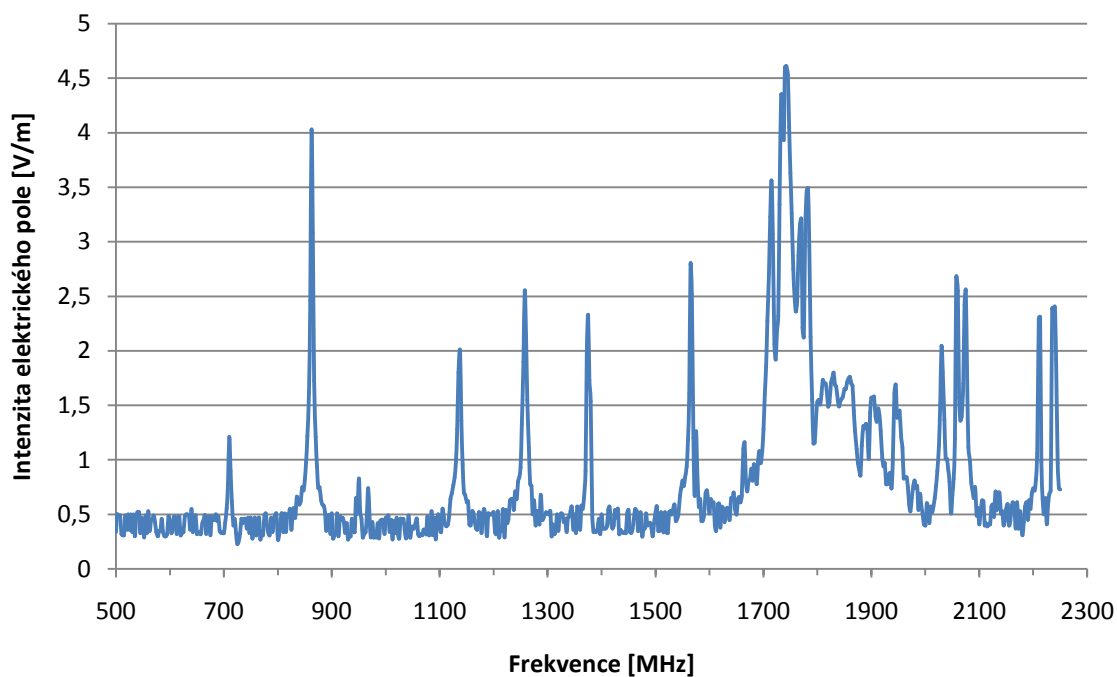
Obr. 4.4 Závislost intenzity pole uvnitř rezonátoru na frekvenci – délka rezonátoru 25 cm



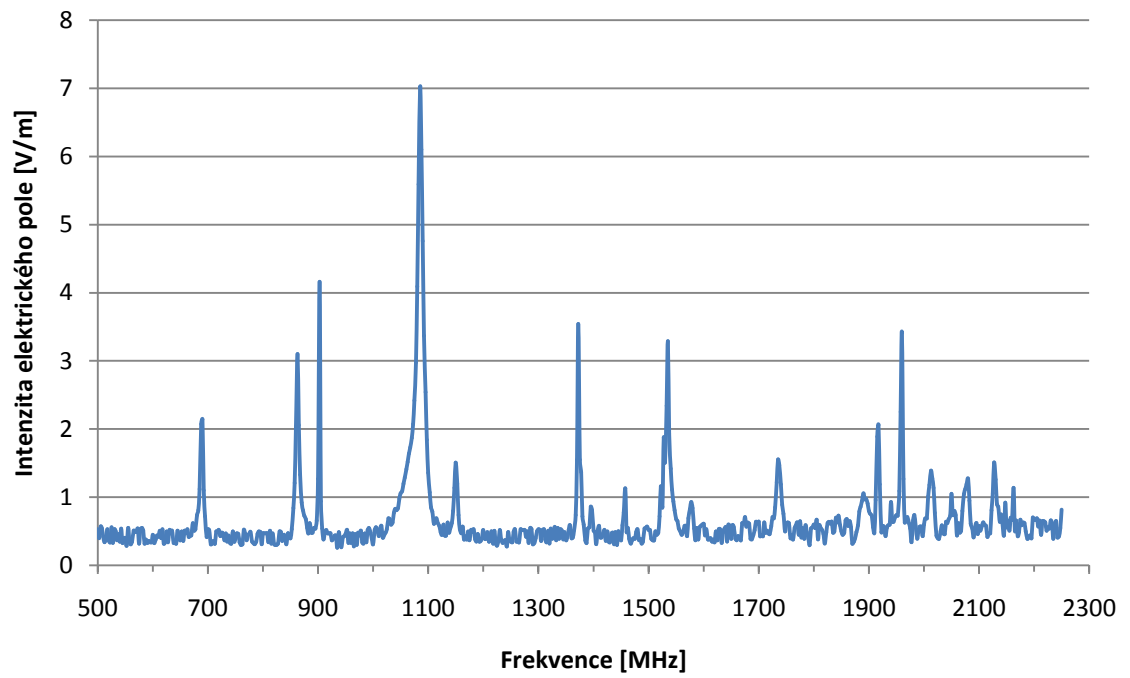
Obr. 4.5 Závislost intenzity pole uvnitř rezonátoru na frekvenci – délka rezonátoru 30 cm



Obr. 4.6 Závislost intenzity pole uvnitř rezonátoru na frekvenci – délka rezonátoru 35 cm



Obr. 4.7 Závislost intenzity pole uvnitř rezonátoru na frekvenci – délka rezonátoru 40 cm



Obr. 4.8 Závislost intenzity pole uvnitř rezonátoru na frekvenci – délka rezonátoru 45 cm

Závěr

V kapitole 1 jsou popsány jednotlivé typy dutinových rezonátorů. Větší pozornost byla věnována obdélníkovým dutinovým rezonátorům, protože měření rezonančních frekvencí bylo prováděno na dutinovém rezonátoru obdélníkového průřezu.

V následující kapitole jsou v tabulkách 2.1 a 2.2 uvedeny vypočtené rezonanční frekvence přiděleného dutinového rezonátoru, jehož geometrie je v této kapitole popsána. Resonanční frekvence jsou uvedeny pro pět různých délek rezonátoru a pro větší přehlednost jsou rozděleny do dvou tabulek podle toho, zda se jedná o TE nebo TM vidy.

V kapitole 3 je ve stručnosti popsán program COMSOL Multiphysics, ve kterém byla provedena simulace rozložení elektromagnetického pole uvnitř rezonátoru a simulace povrchových ztrát. Výsledky těchto simulací jsou uvedeny v přílohách A a B.

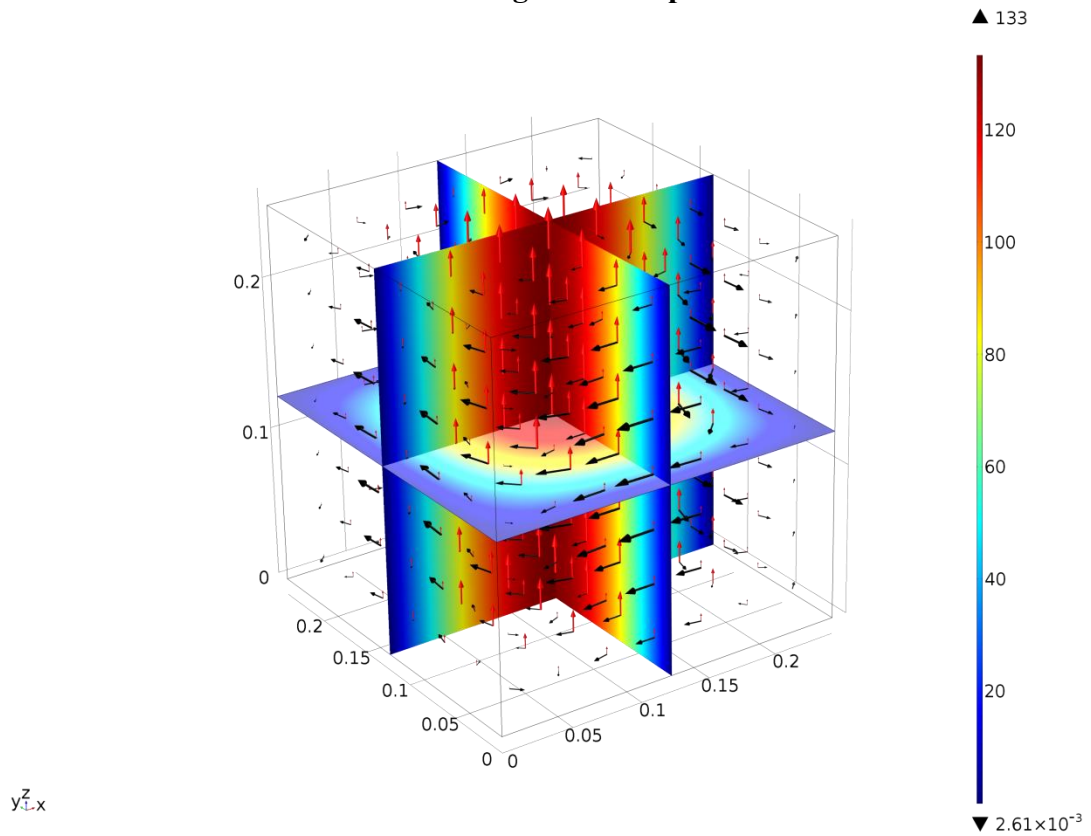
Kapitola 4 se týká měření rezonančních frekvencí. Dle zadání mělo být měření provedeno v rozsahu frekvencí 9 kHz až 3 GHz. Vzhledem k rozměrům rezonátoru by měření od frekvence 9 kHz nemělo význam, proto byla zvolena počáteční frekvence 500 MHz. Měření nebylo možné provést až do zadané frekvence 3 GHz, protože byla k dispozici kalibrace měřicího řetězce pouze do frekvence 2,25 GHz. Naměřené rezonanční frekvence pro jednotlivé délky rezonátoru uvedené v tabulkách 4.1 až 4.5 jsou přibližně o 30 MHz nižší než teoreticky vypočtené frekvence v tabulkách 2.1 a 2.2. Tento rozdíl by mohl být způsoben nepřesnostmi v konstrukci rezonátoru a také tím, že má rezonátor nastavitelnou délku, a tudíž se jedna část rezonátoru zasouvá do druhé a uvnitř rezonátoru vzniká schod na přechodu těchto dvou částí. Rozdíl mezi naměřenými a vypočítanými frekvencemi by mohl být způsoben i tím, že elektromagnetické vlny nebyly přivedeny vedením na vstup rezonátoru, ale byly vyzařovány anténou umístěnou vně rezonátoru.

Literatura

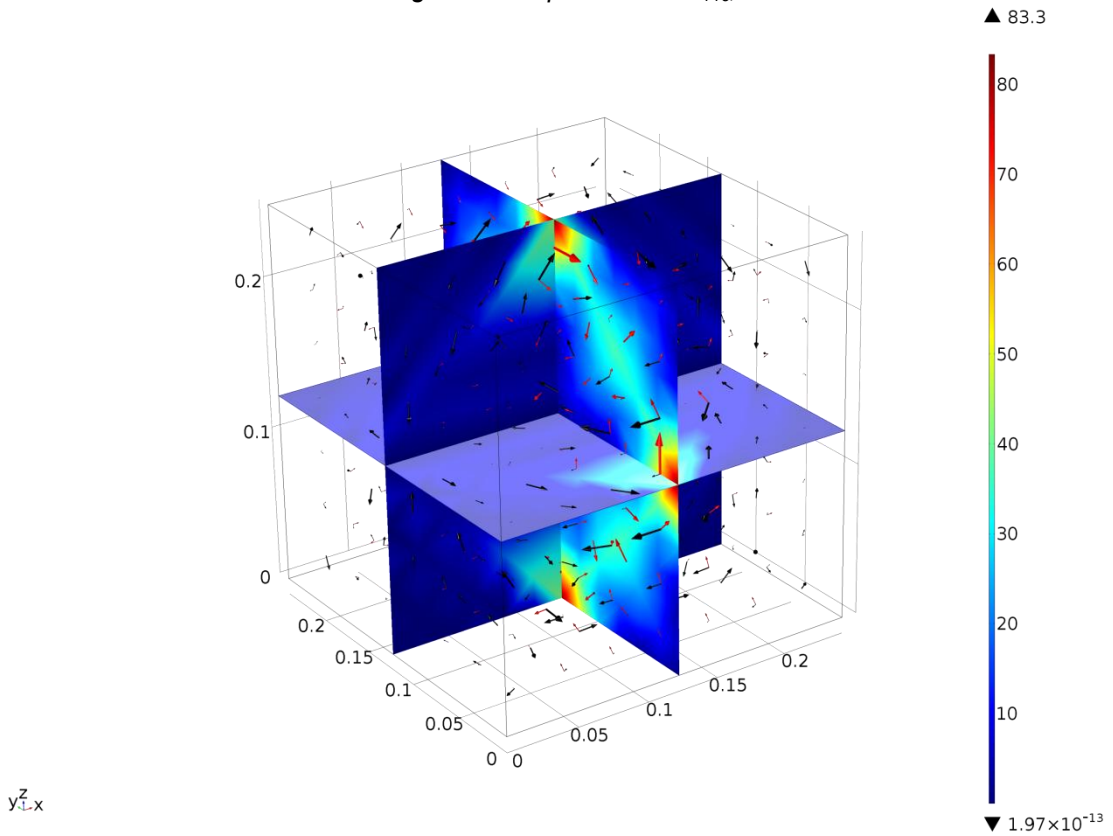
- [1] Tirpák, A.: *Elektronika vel'mi vysokých frekvencí*, Univerzita Komenského, Bratislava 2001
- [2] Hanus, S.; Svačina, J.: *Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika*, VUT v Brně, Brno 2002
- [3] Novotný, K.: *Elektromagnetické pole a vlny*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2001
- [4] Svačina, J.; Jakubová, I.: *Mikrovlnná měření*, VUT v Brně, Brno 2002
- [5] Chen, L. F.; Ong, C. K.: *Microwave electronic Measurement and Materials Characterization*, John Wiley & Sons Inc., Chichester 2004
- [6] *Popis programu COMSOL Multiphysics* [online]. [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: <http://www.humusoft.cz/produkty/comsol/comsol/>
- [7] Pozar, D. M.: *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons Inc., Chichester 2012
- [8] Oppl, L.: *Úvod do mikrovlnné techniky*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2004
- [9] *COMSOL Multiphysics* [online]. [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: <http://www.comsol.com/products>

Přílohy

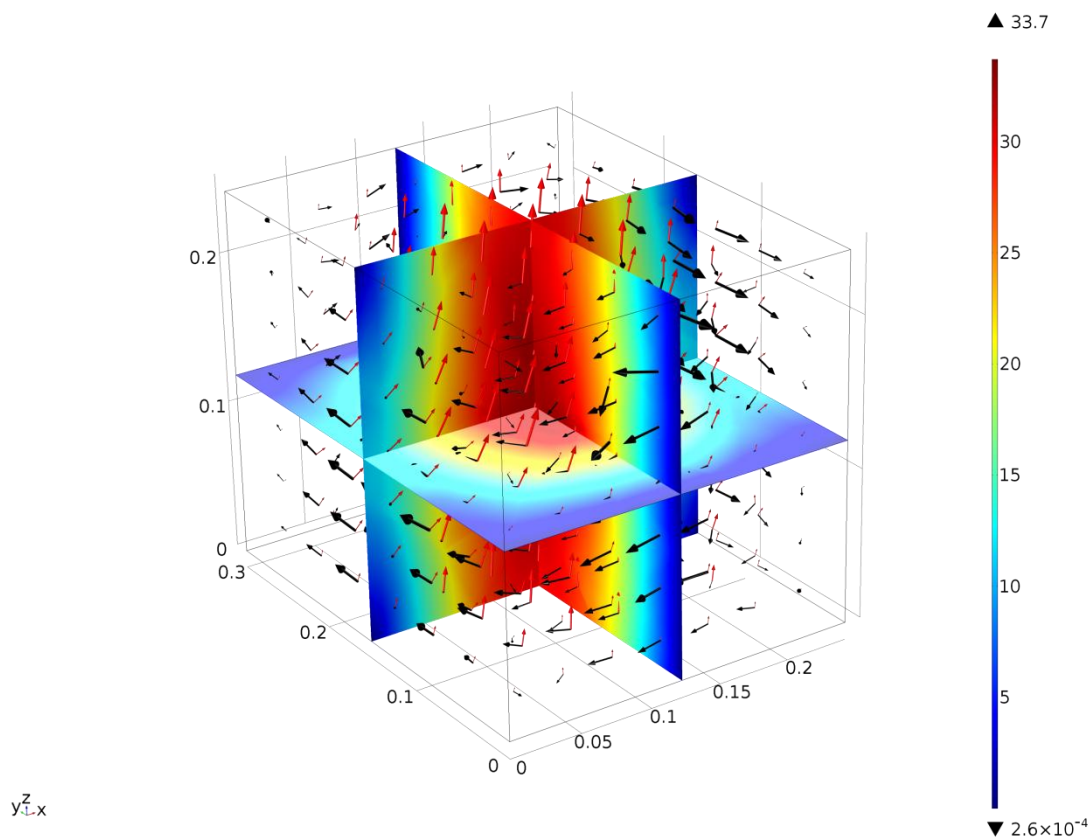
Příloha A – Simulace rozložení elektromagnetického pole



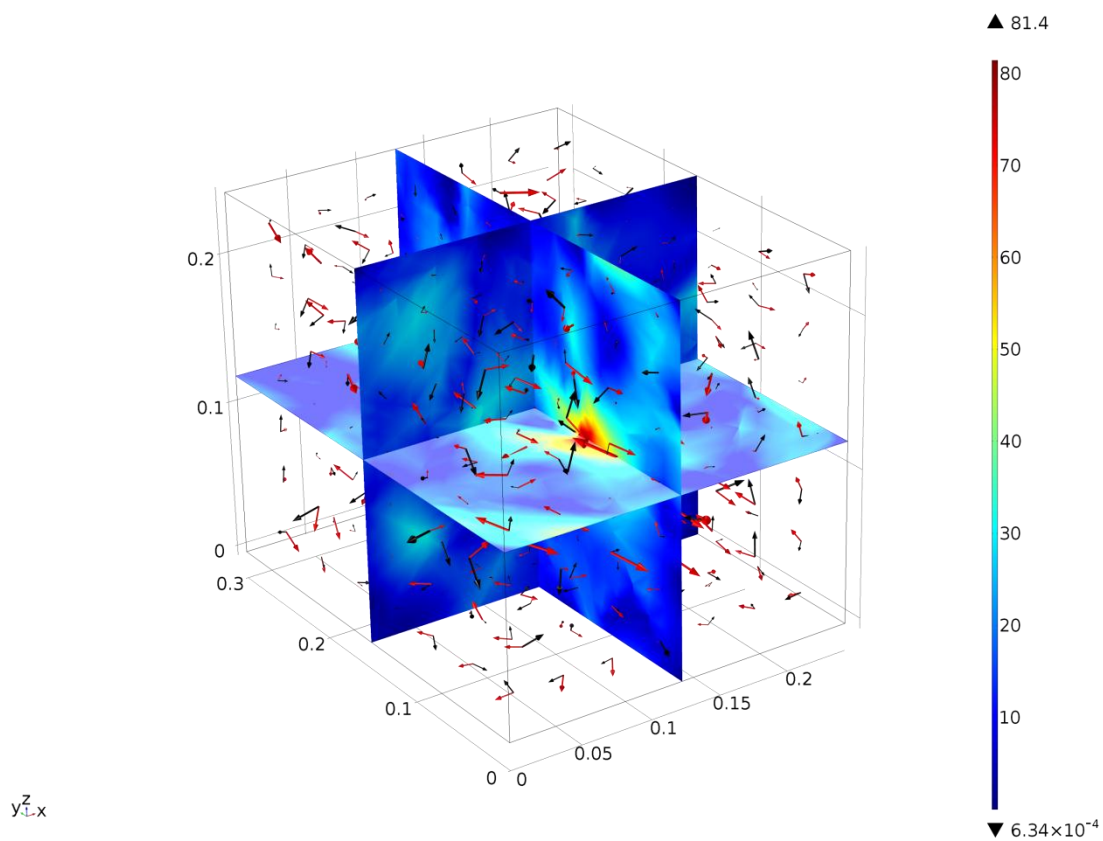
Obr. 1 Rozložení elektromagnetického pole vidu TM_{110} , délka rezonátoru 25 cm



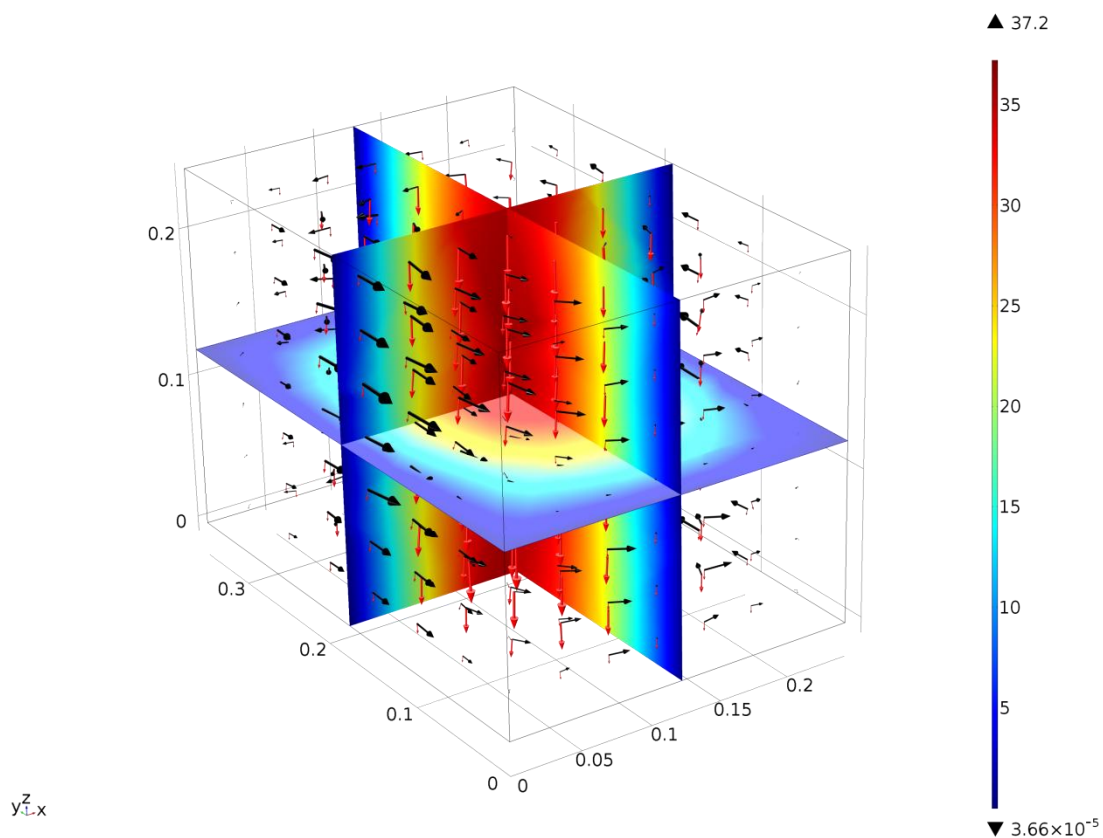
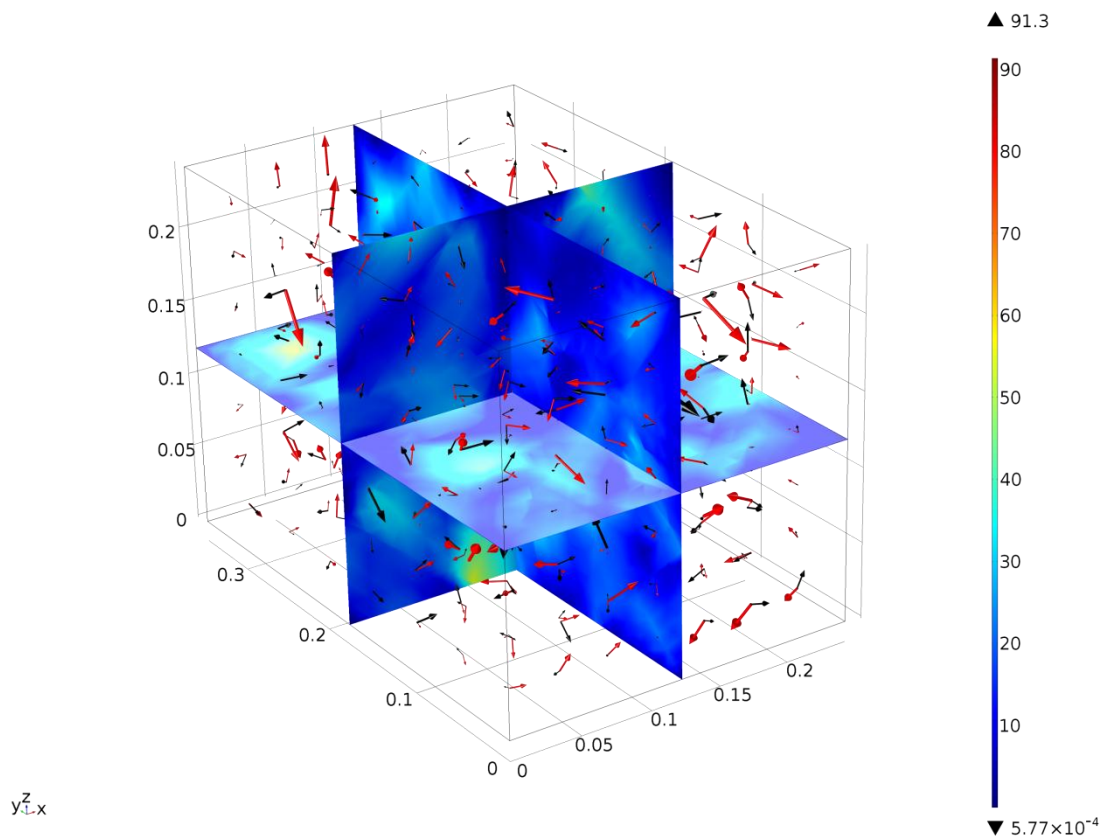
Obr. 2 Rozložení elektromagnetického pole vidu TM_{421} , délka rezonátoru 25 cm

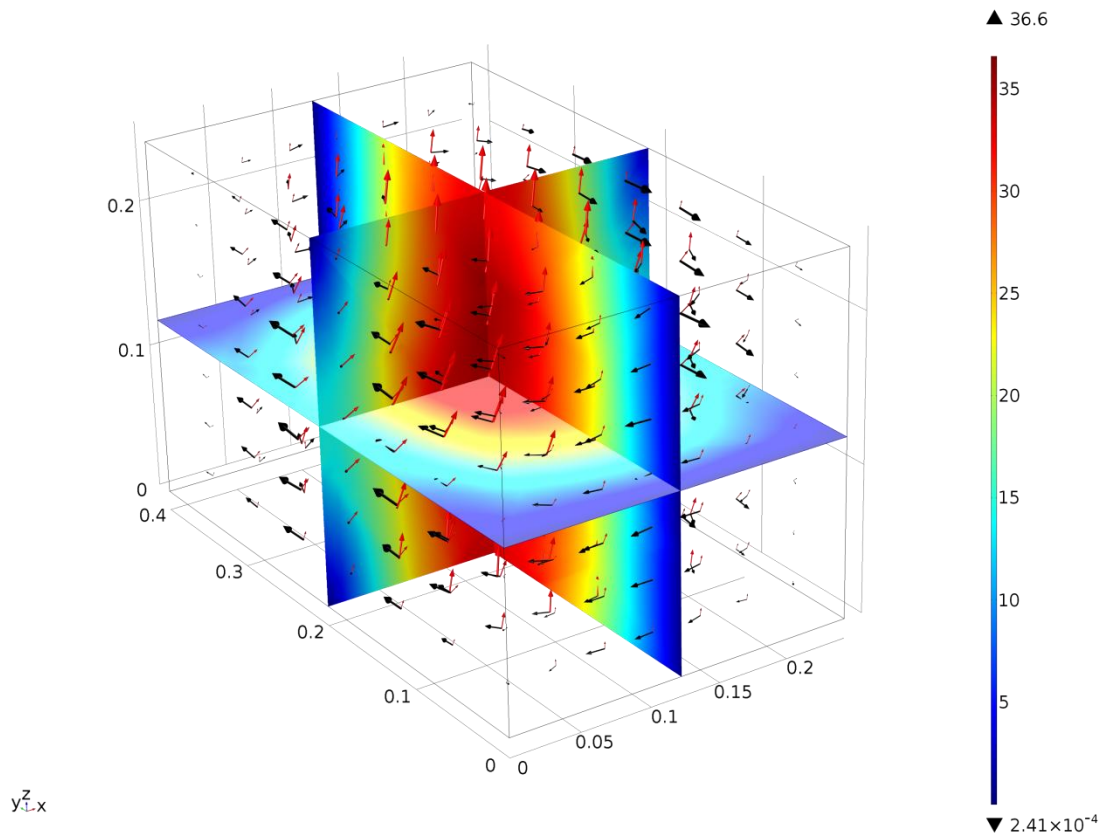


Obr. 3 Rozložení elektromagnetického pole vidu TM_{110} , délka rezonátoru 30 cm

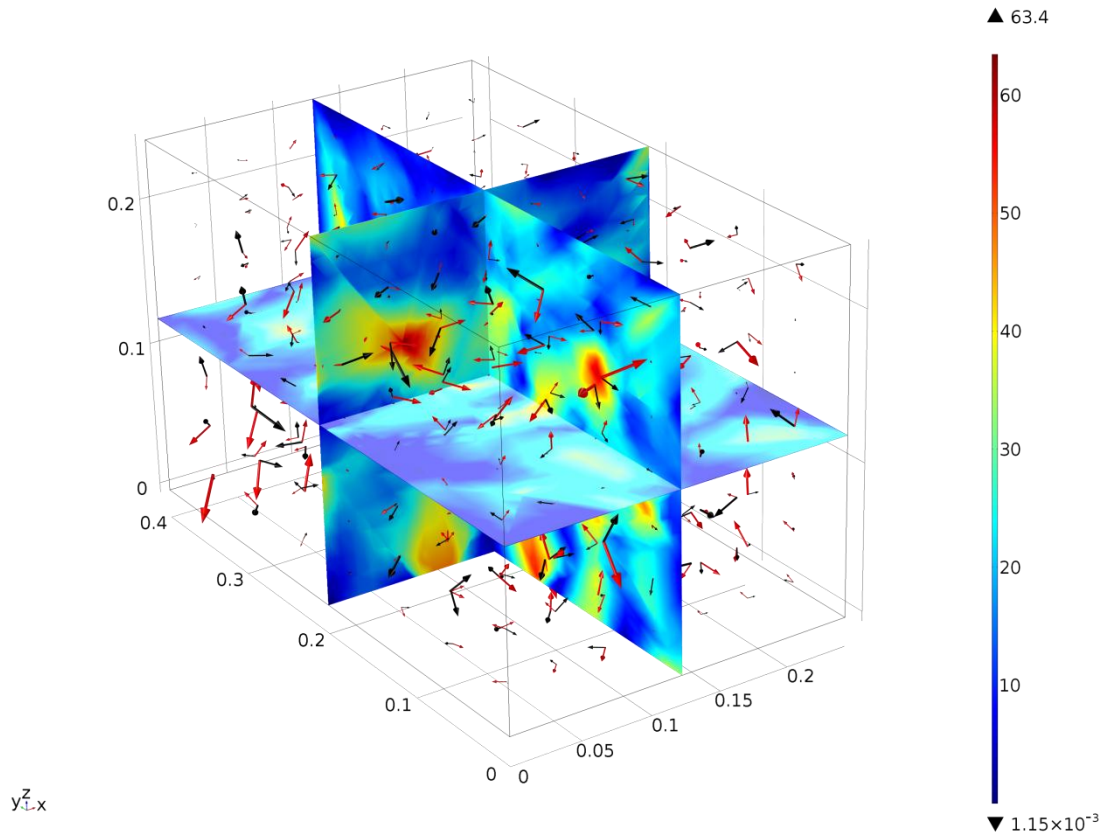


Obr. 4 Rozložení elektromagnetického pole vidu TM_{413} , délka rezonátoru 30 cm

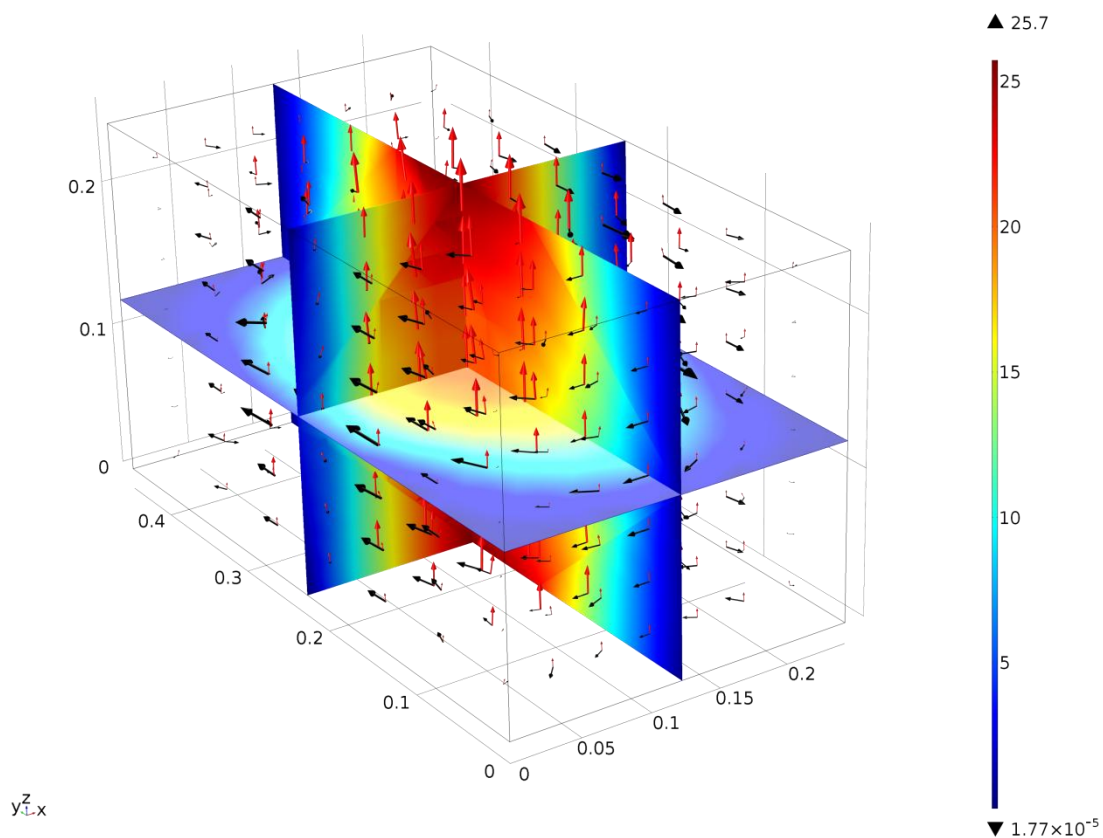
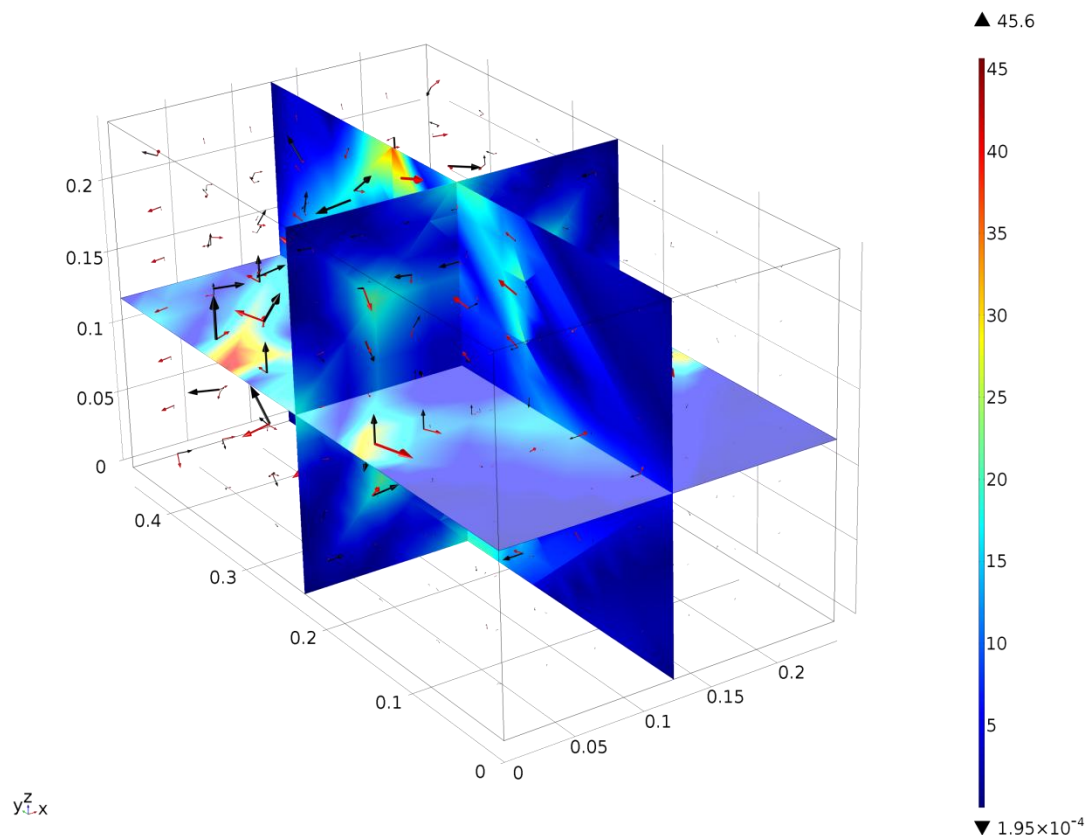
Obr. 5 Rozložení elektromagnetického pole vidu TM_{110} , délka rezonátoru 35 cmObr. 6 Rozložení elektromagnetického pole vidu TM_{413} , délka rezonátoru 35 cm

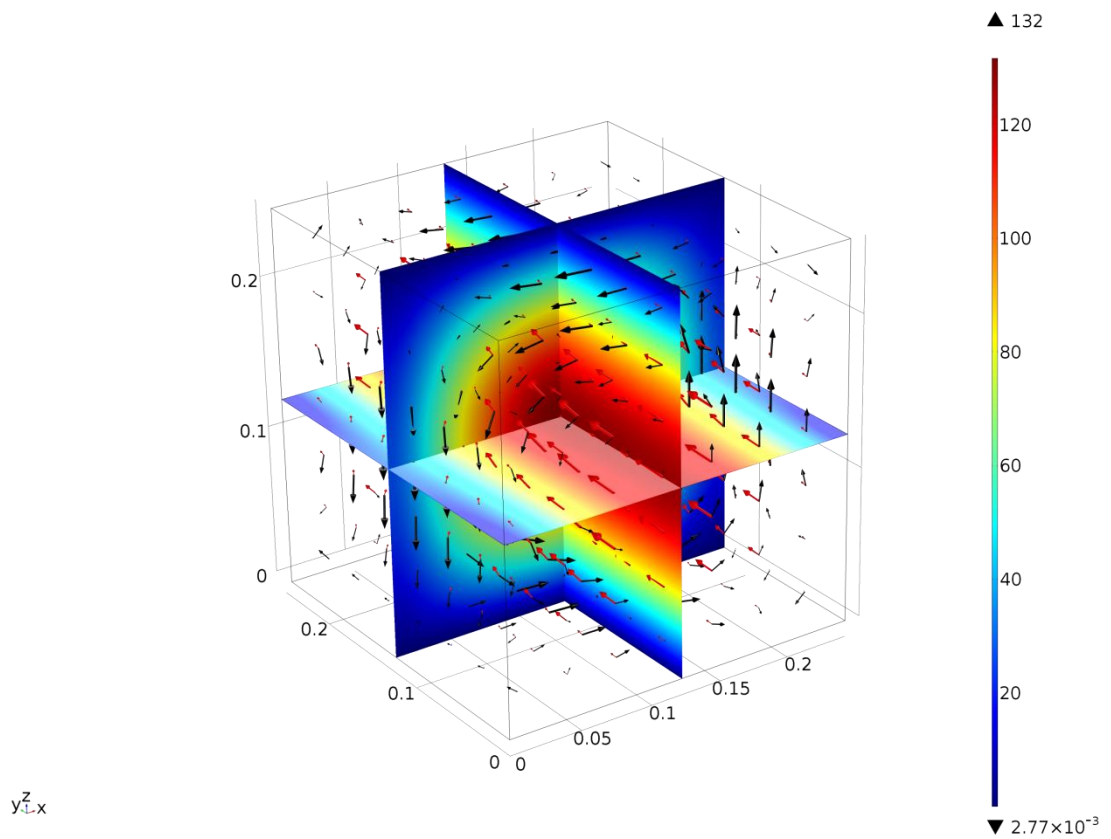


Obr. 7 Rozložení elektromagnetického pole vidu TM_{110} , délka rezonátoru 40 cm

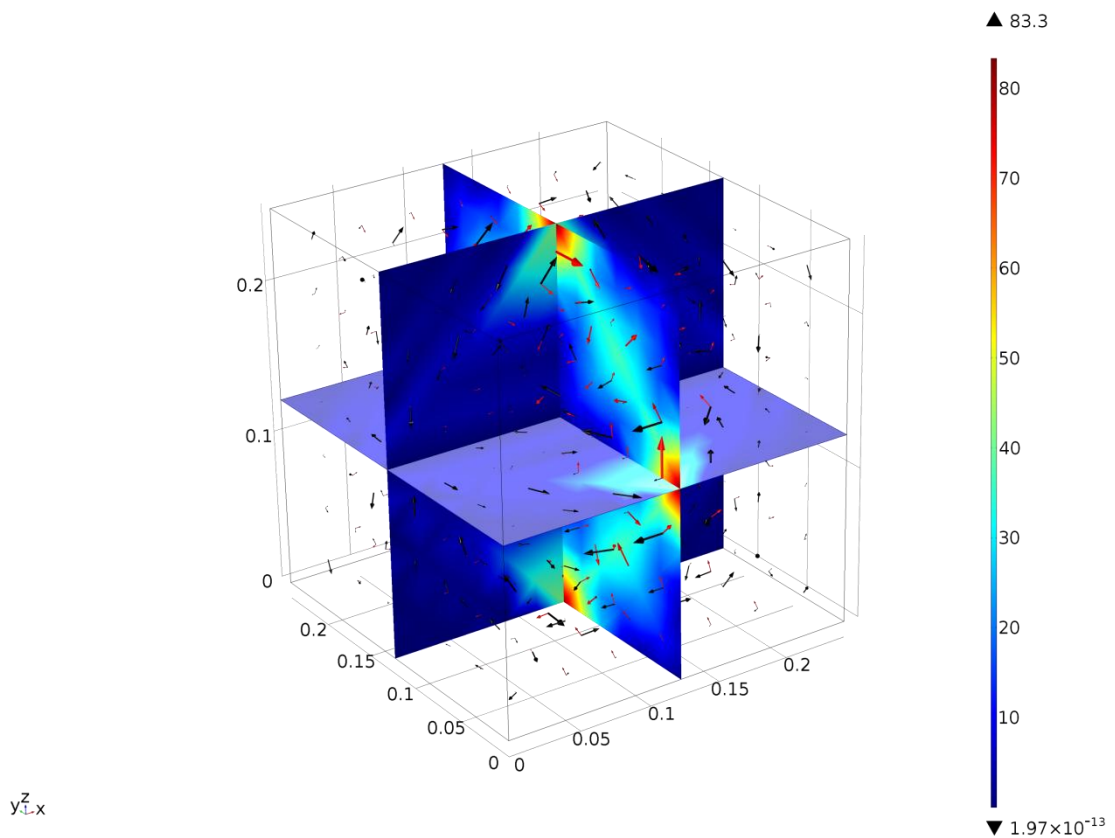


Obr. 8 Rozložení elektromagnetického pole vidu TM_{423} , délka rezonátoru 40 cm

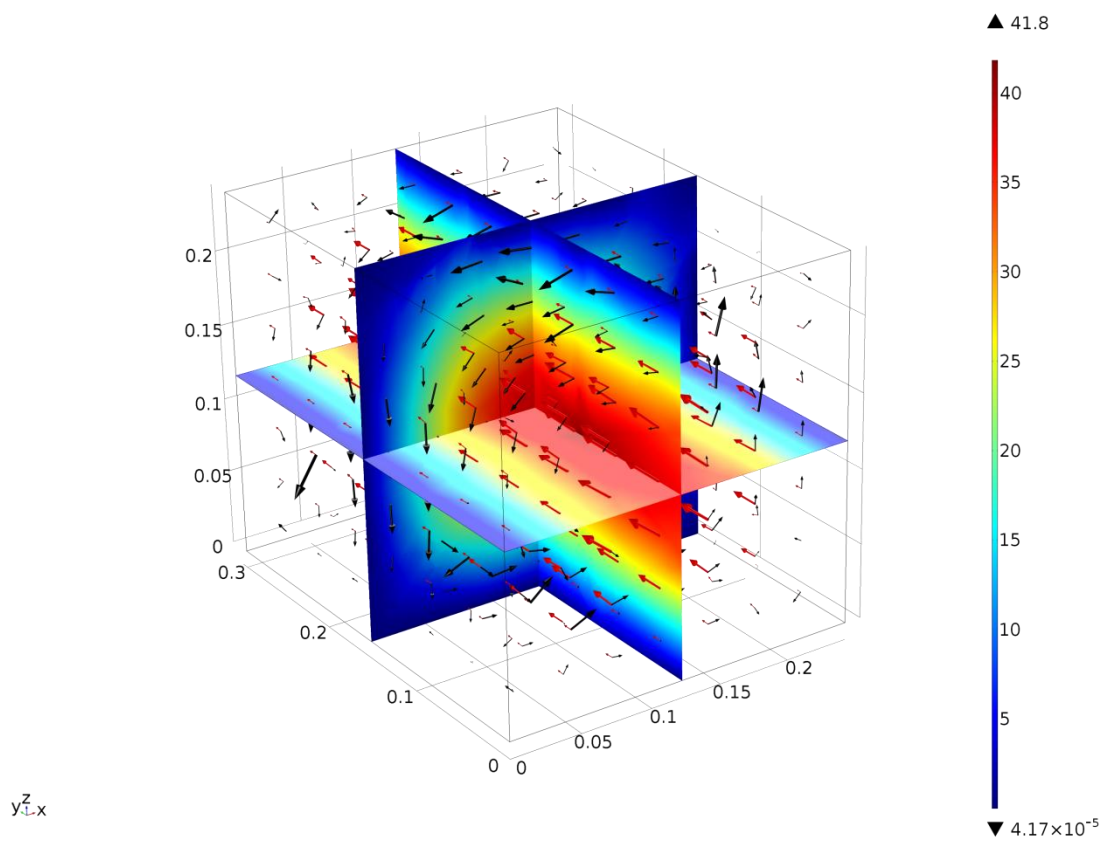
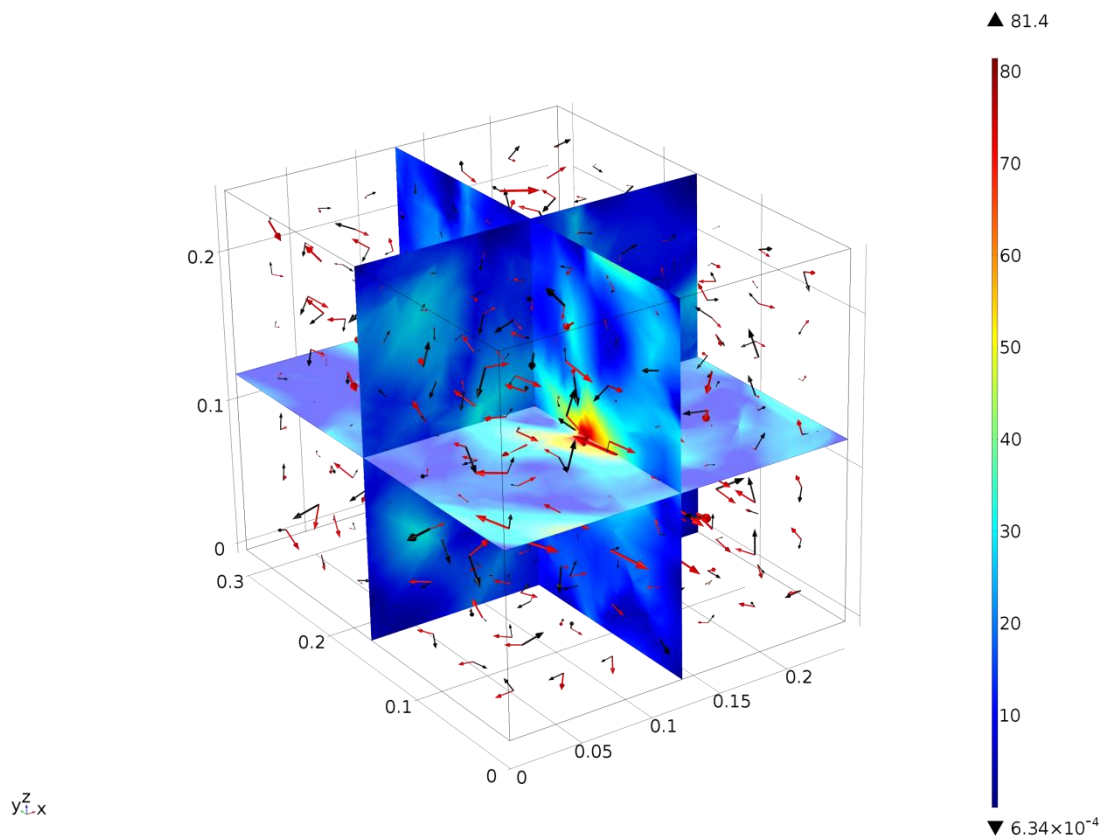
Obr. 9 Rozložení elektromagnetického pole vidu TM_{110} , délka rezonátoru 45 cmObr. 10 Rozložení elektromagnetického pole vidu TM_{423} , délka rezonátoru 45 cm

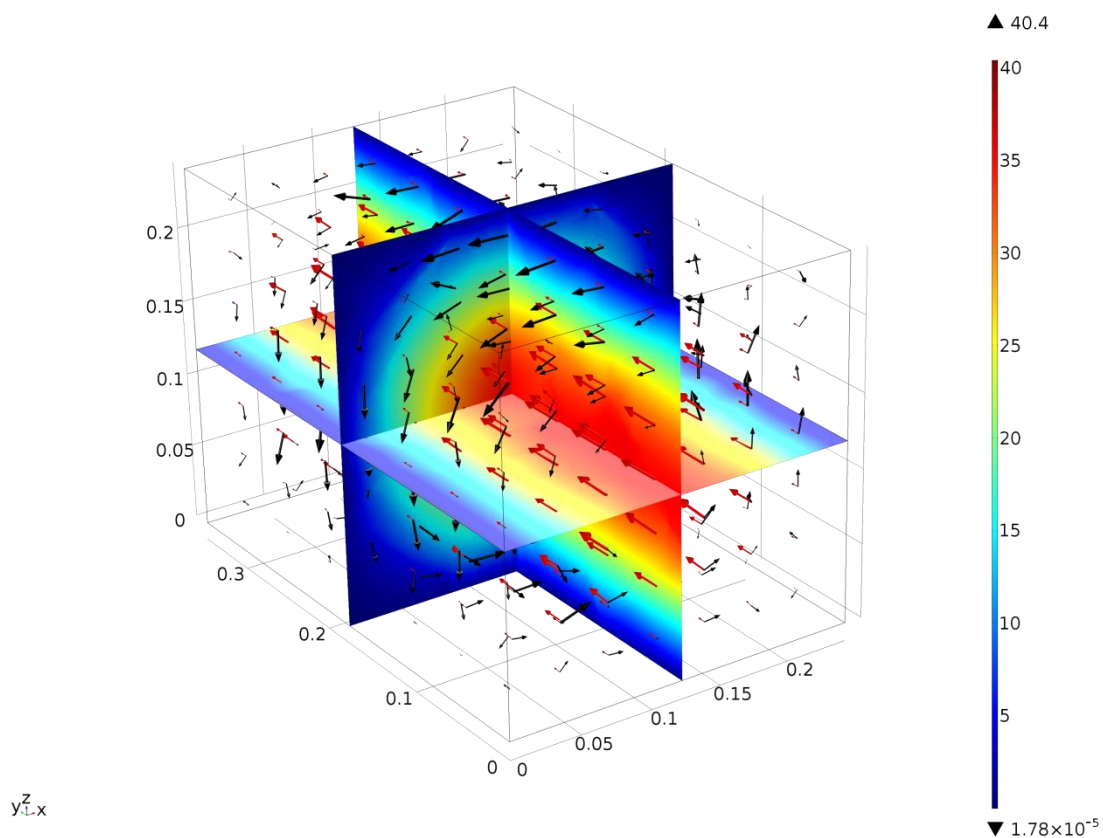


Obr. 11 Rozložení elektromagnetického pole vidu TE_{101} , délka rezonátoru 25 cm

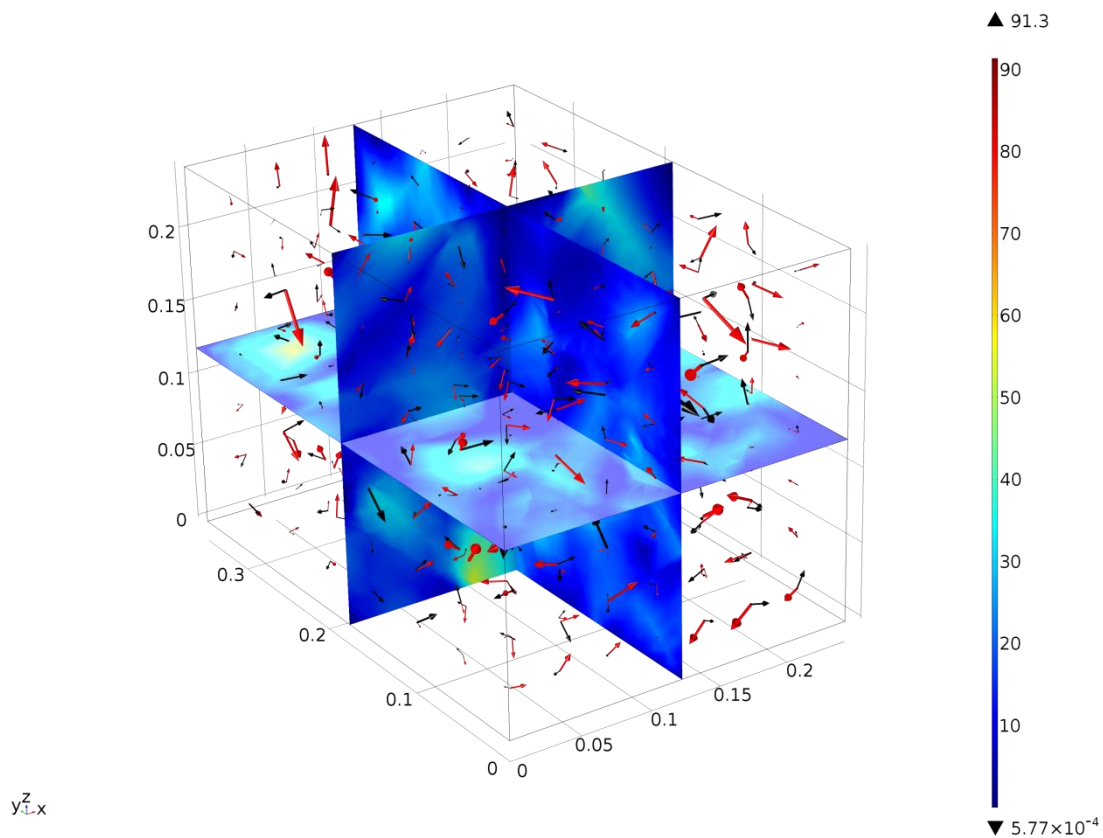


Obr. 12 Rozložení elektromagnetického pole vidu TE_{421} , délka rezonátoru 25 cm

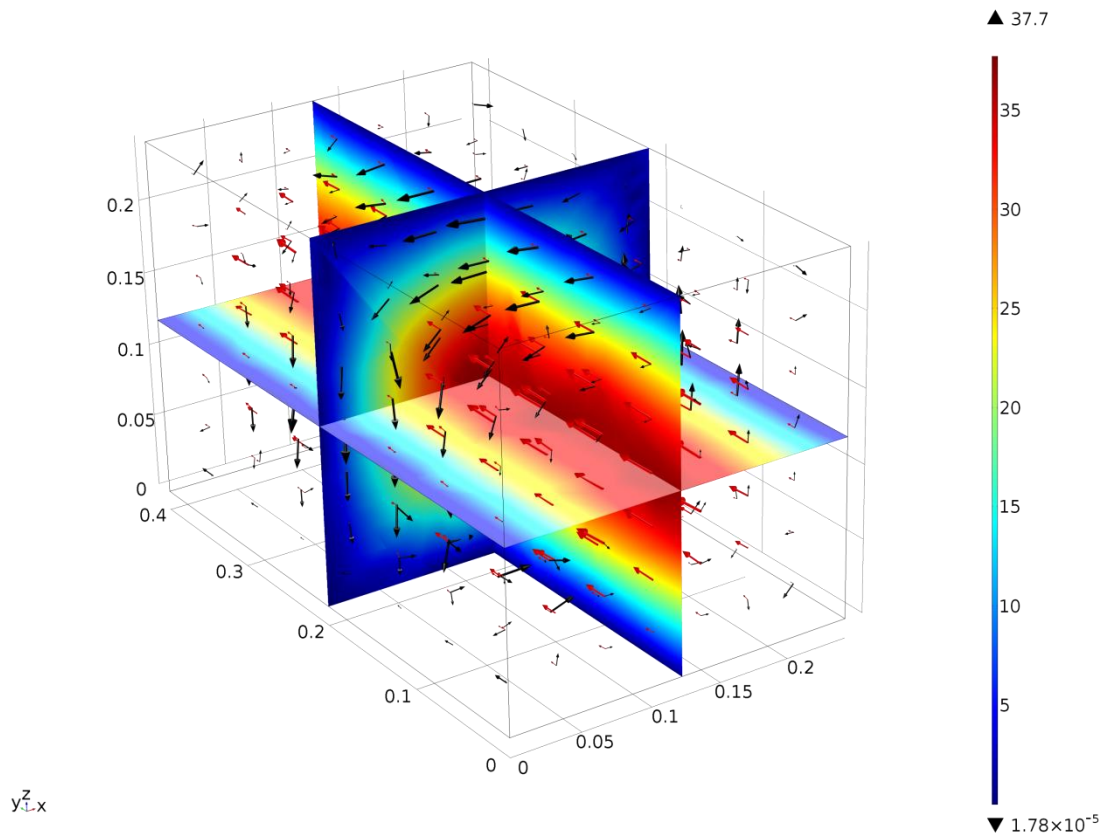
Obr. 13 Rozložení elektromagnetického pole vidu TE_{101} , délka rezonátoru 30 cmObr. 14 Rozložení elektromagnetického pole vidu TE_{413} , délka rezonátoru 30 cm



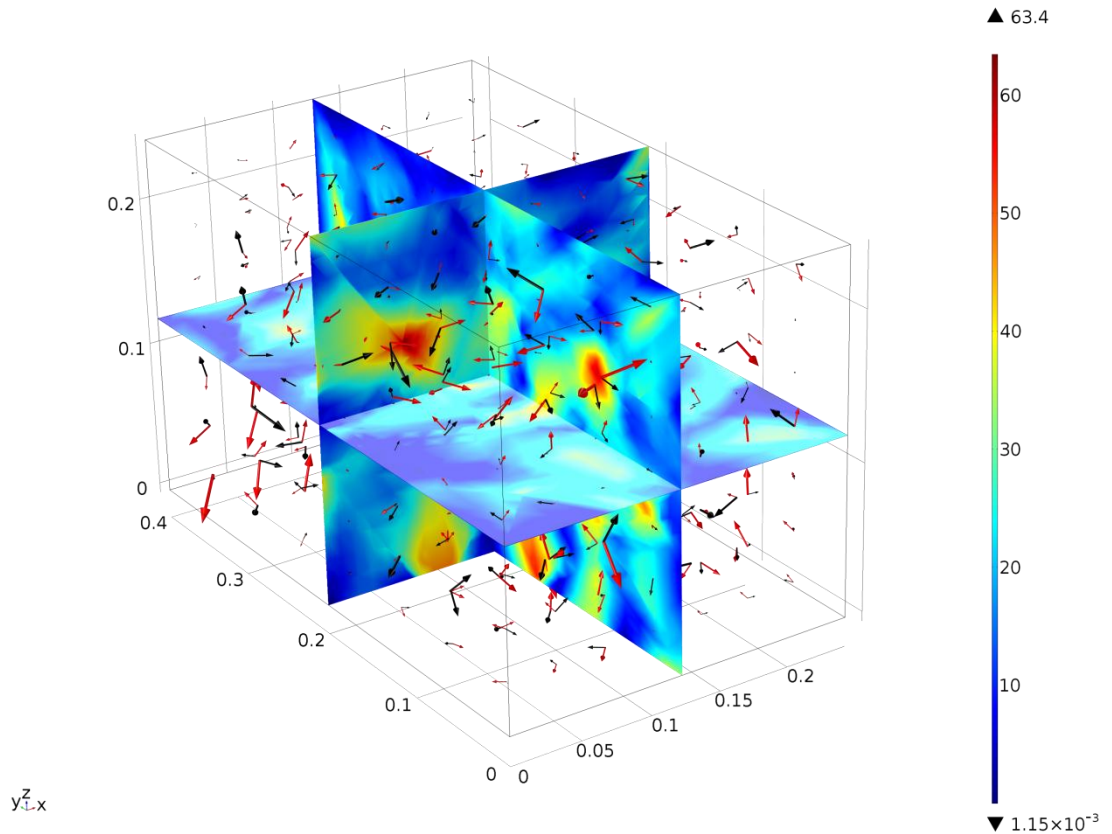
Obr. 15 Rozložení elektromagnetického pole vidu TE_{101} , délka rezonátoru 35 cm



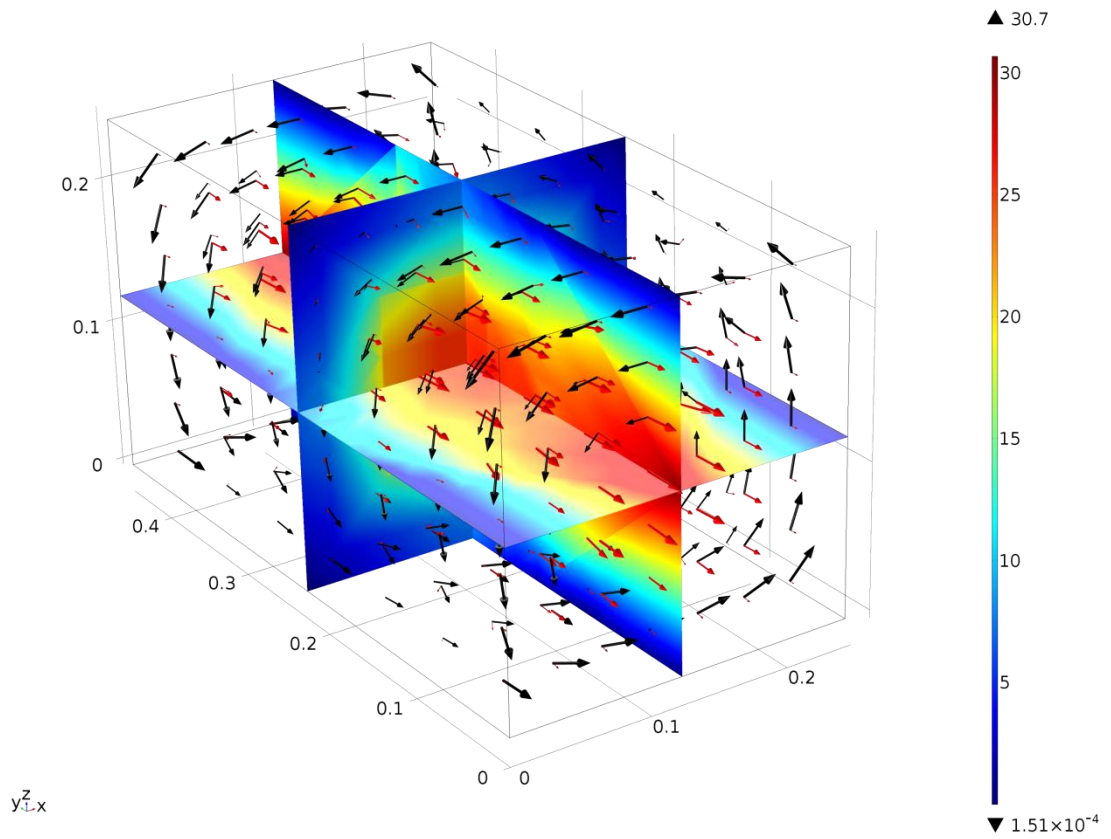
Obr. 16 Rozložení elektromagnetického pole vidu TE_{413} , délka rezonátoru 35 cm



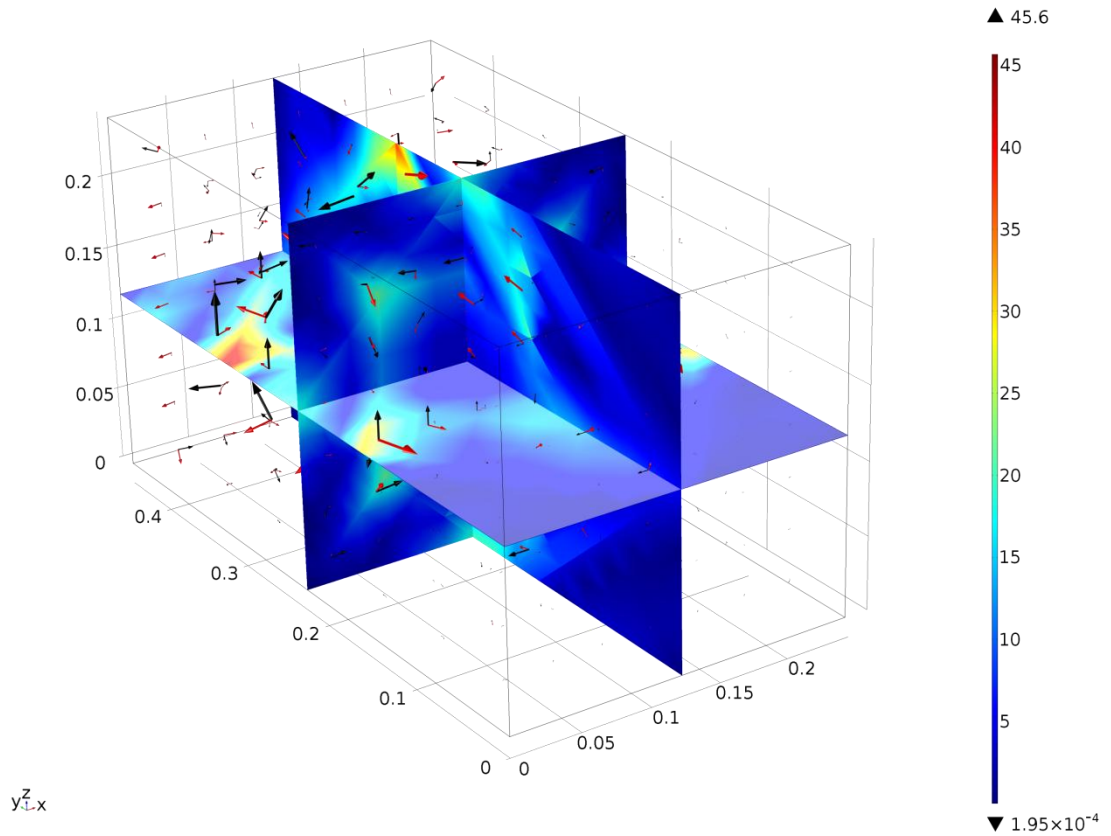
Obr. 17 Rozložení elektromagnetického pole vidu TE_{101} , délka rezonátoru 40 cm



Obr. 18 Rozložení elektromagnetického pole vidu TE_{423} , délka rezonátoru 40 cm

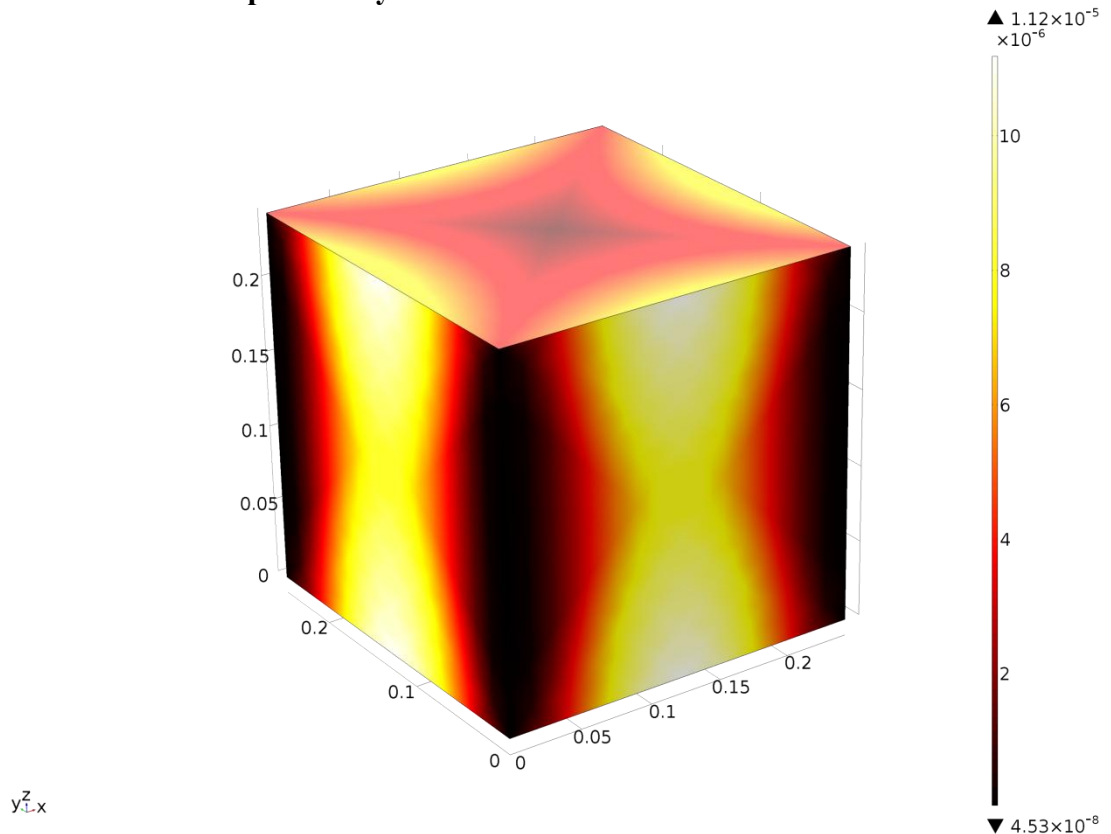
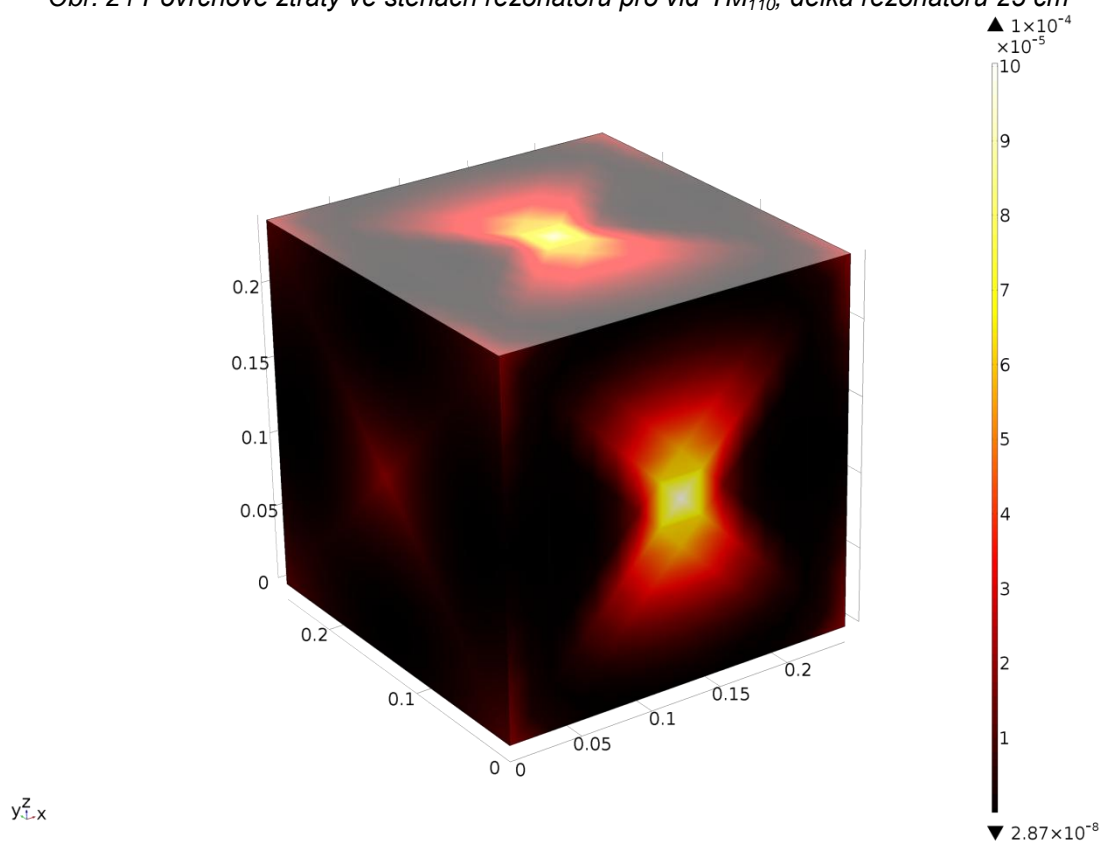


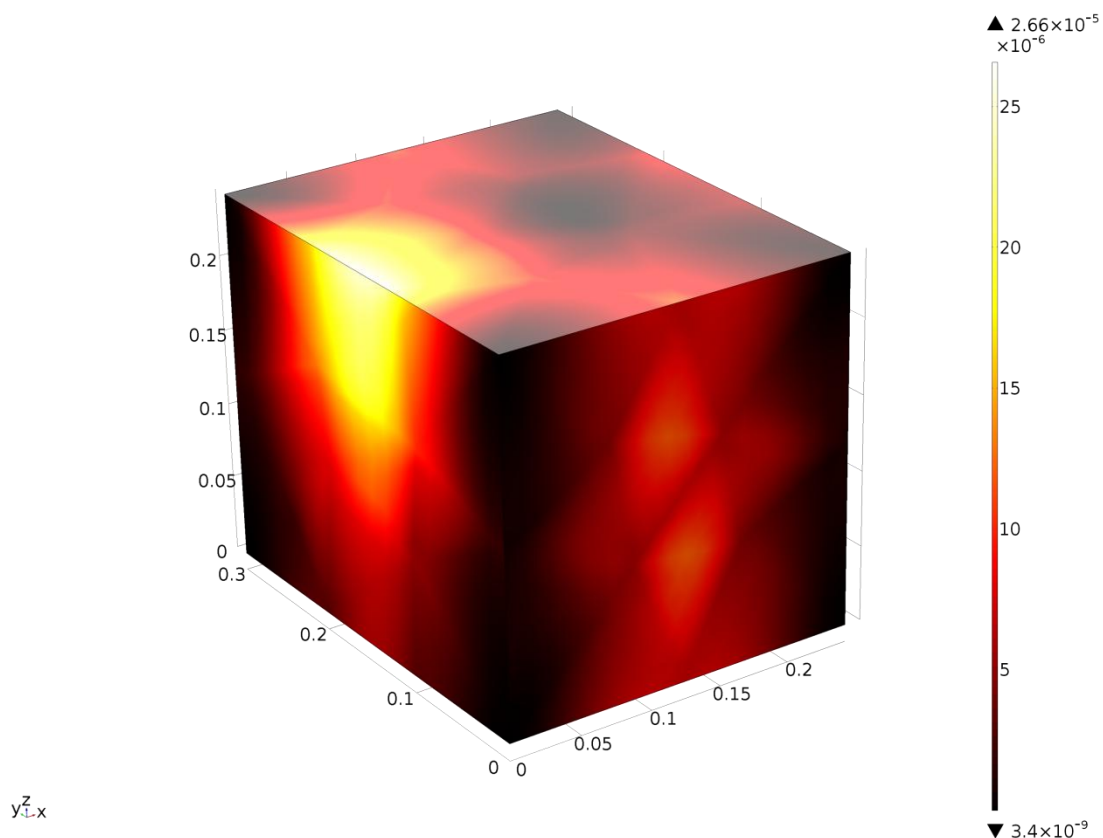
Obr. 19 Rozložení elektromagnetického pole vidu TE_{101} , délka rezonátoru 45 cm



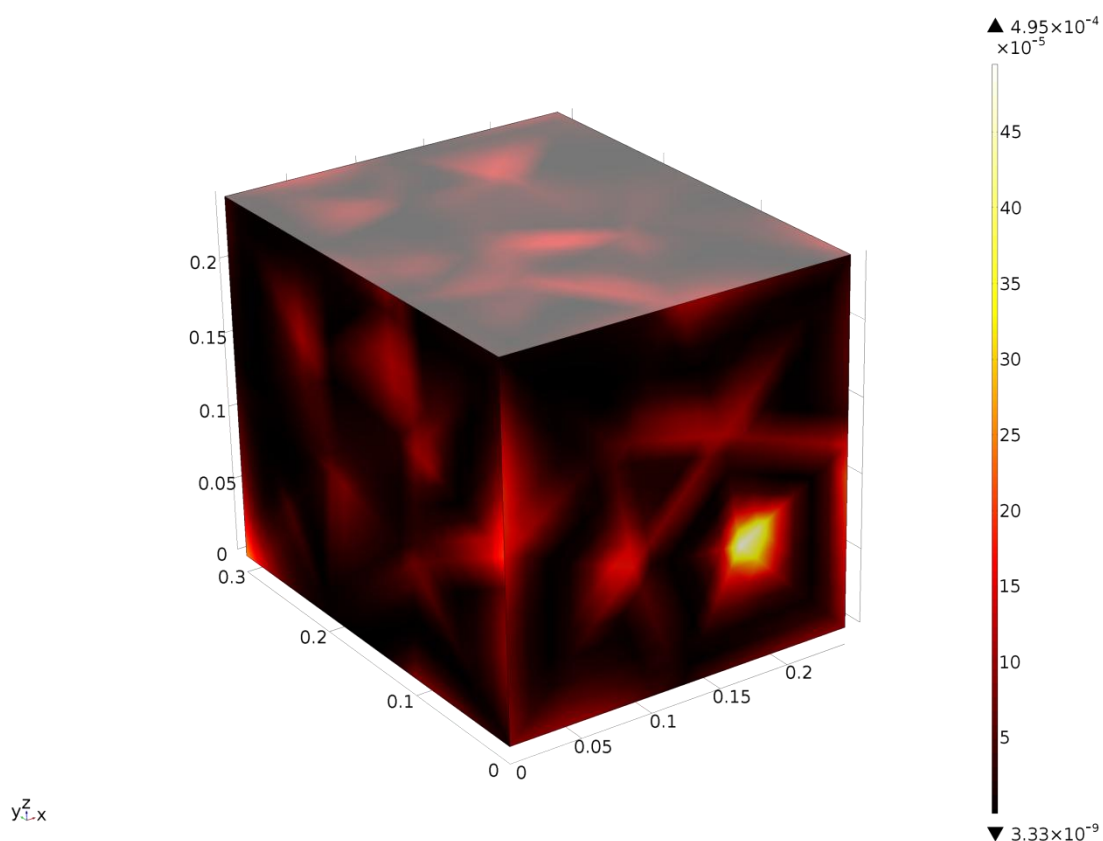
Obr. 20 Rozložení elektromagnetického pole vidu TE_{423} , délka rezonátoru 45 cm

Příloha B – Simulace povrchových ztrát

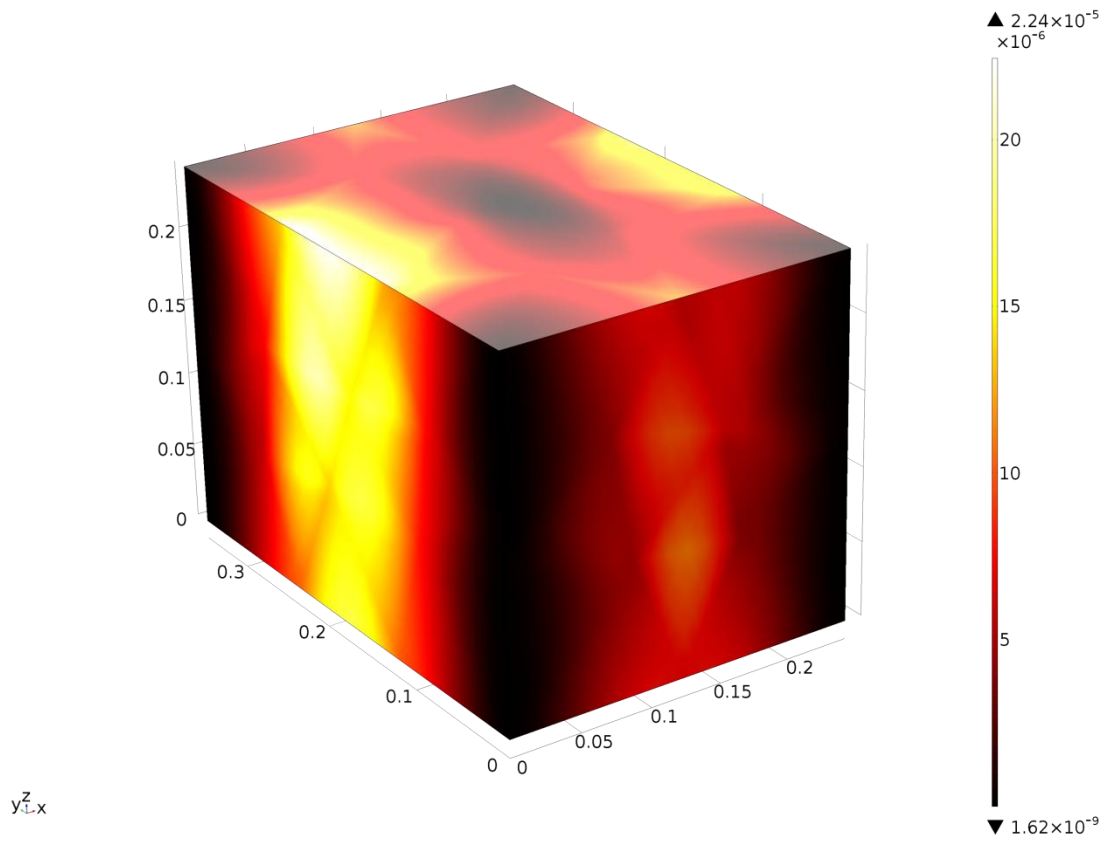
Obr. 21 Povrchové ztráty ve stěnách rezonátoru pro vid TM_{110} , délka rezonátoru 25 cmObr. 22 Povrchové ztráty ve stěnách rezonátoru pro vid TM_{421} , délka rezonátoru 25 cm



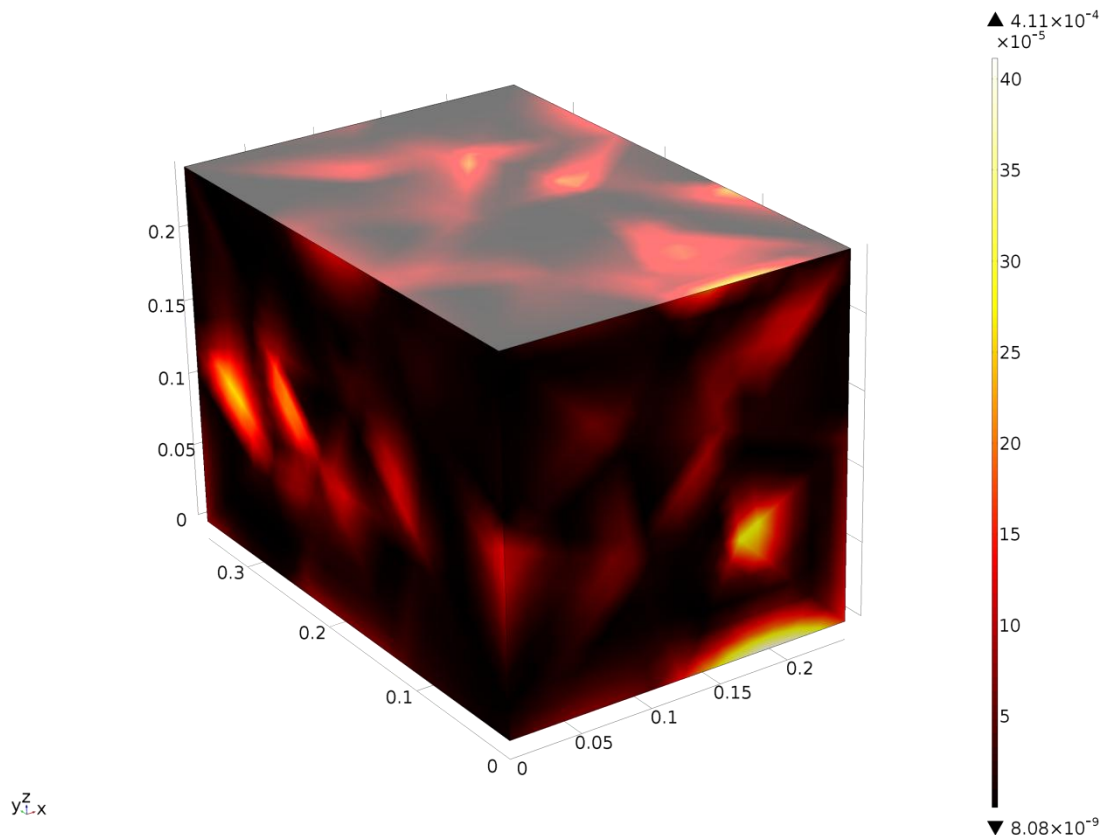
Obr. 23 Povrchové ztráty ve stěnách rezonátoru pro vid TM_{110} , délka rezonátoru 30 cm



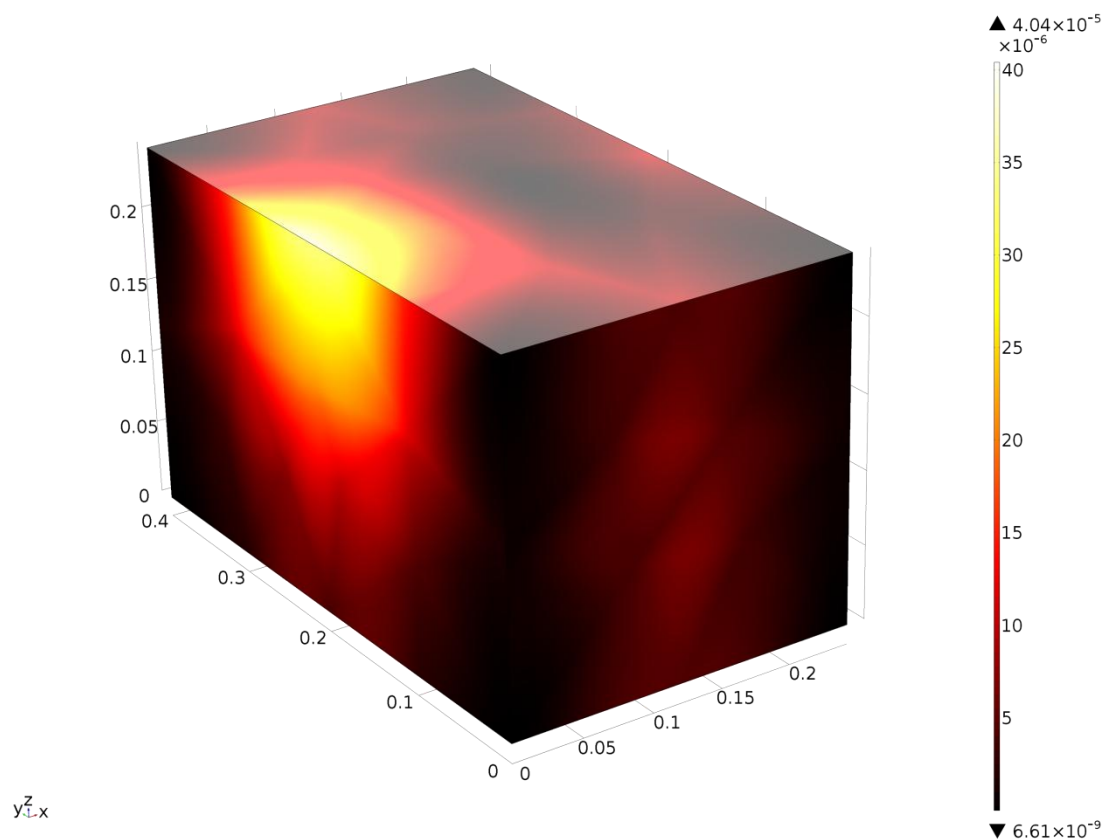
Obr. 24 Povrchové ztráty ve stěnách rezonátoru pro vid TM_{413} , délka rezonátoru 30 cm



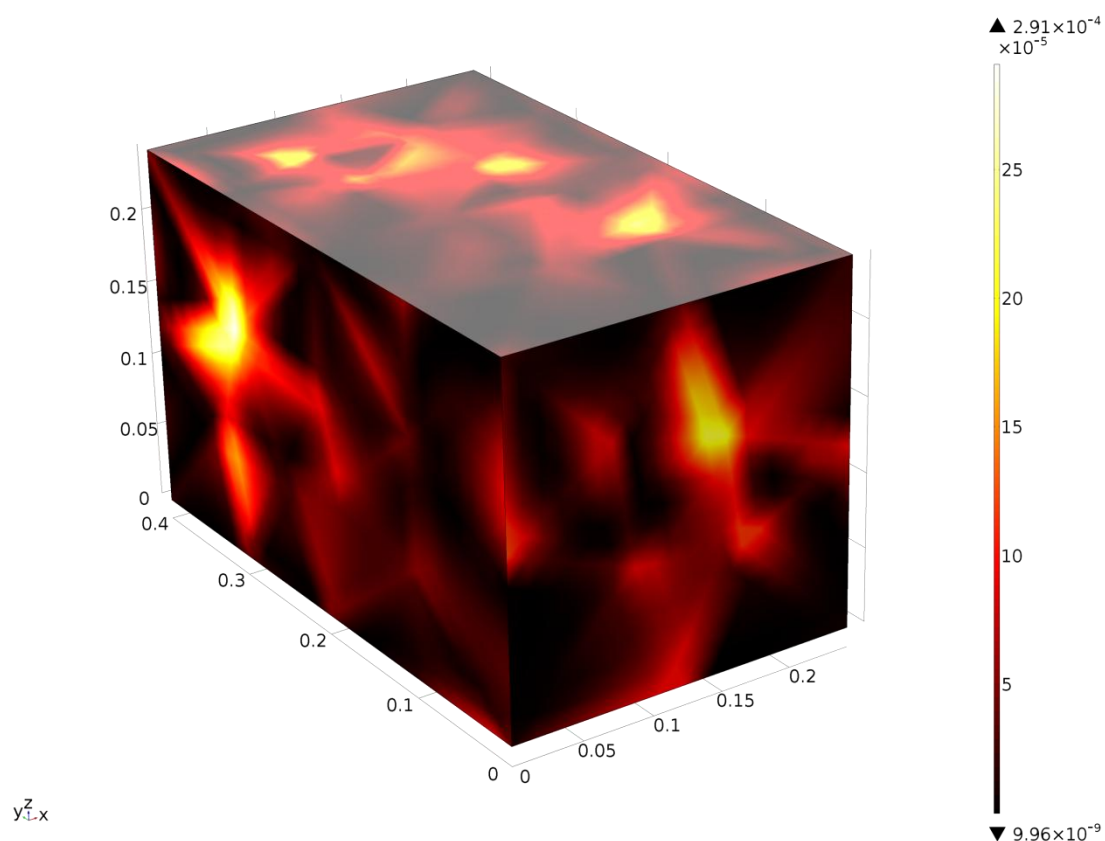
Obr. 25 Povrchové ztráty ve stěnách rezonátoru pro vid TM_{110} , délka rezonátoru 35 cm



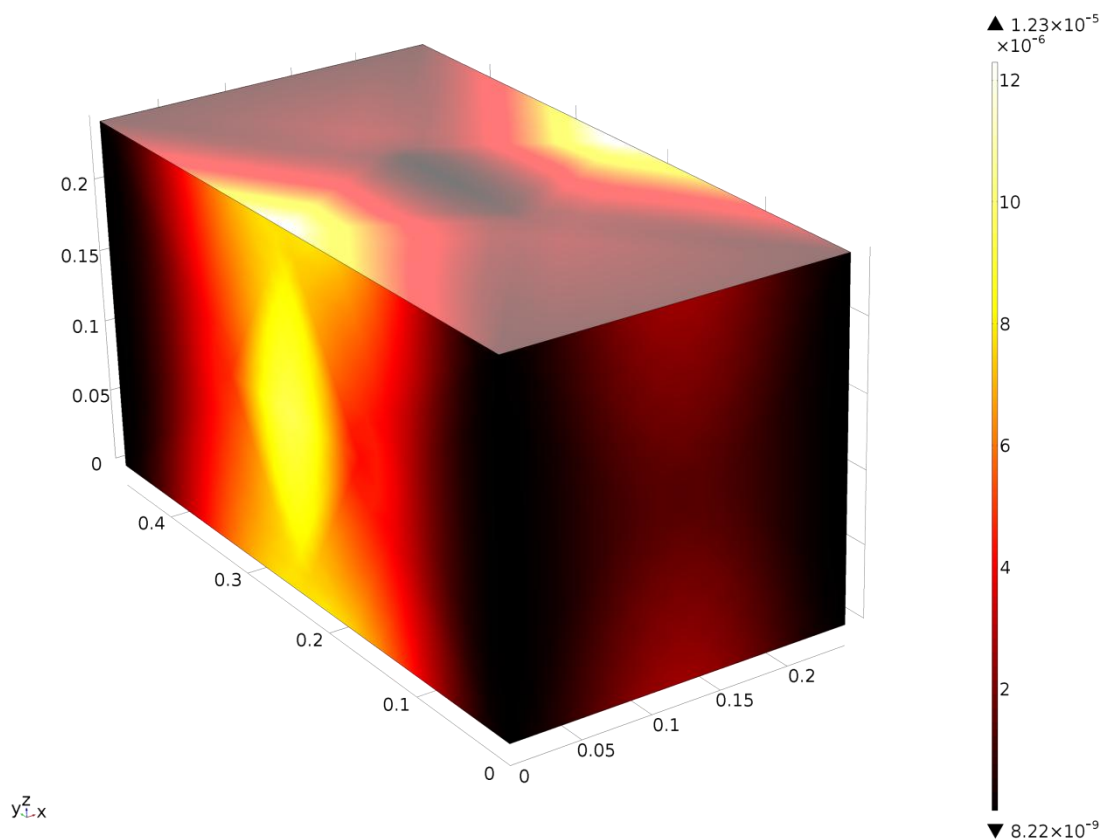
Obr. 26 Povrchové ztráty ve stěnách rezonátoru pro vid TM_{413} , délka rezonátoru 35 cm



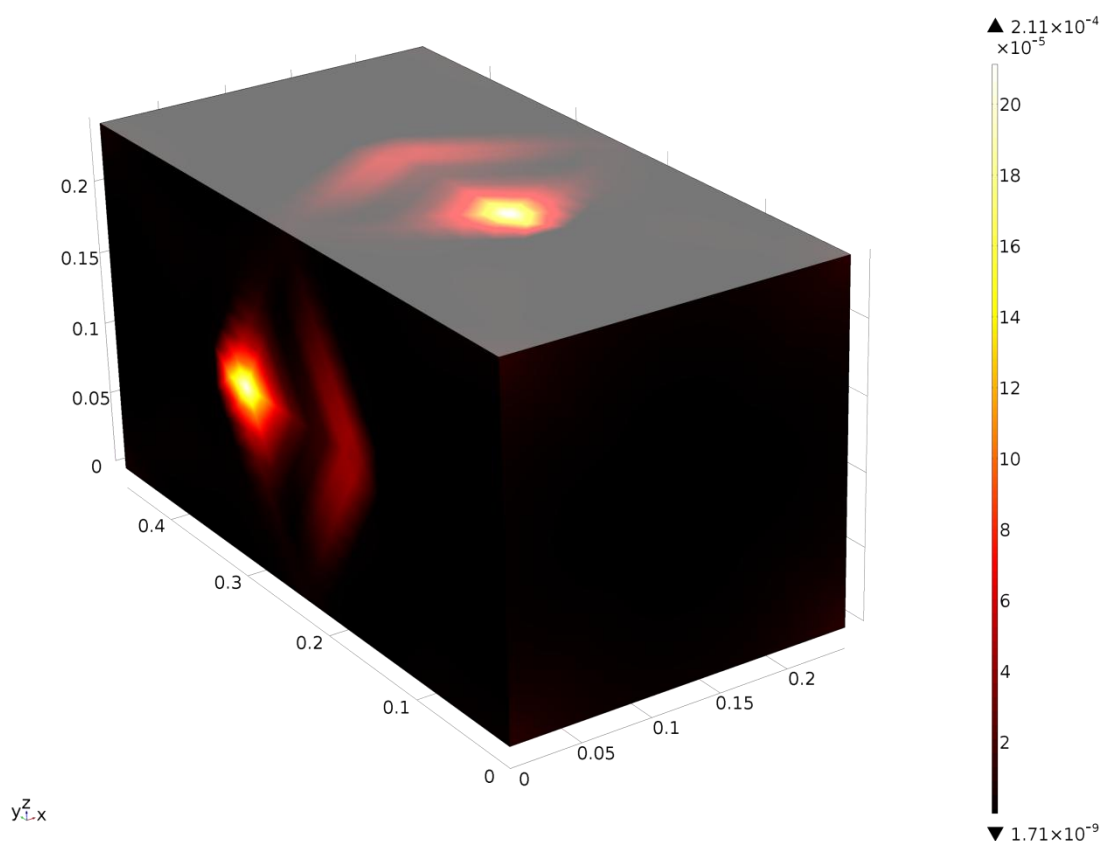
Obr. 27 Povrchové ztráty ve stěnách rezonátoru pro vid TM_{110} , délka rezonátoru 40 cm



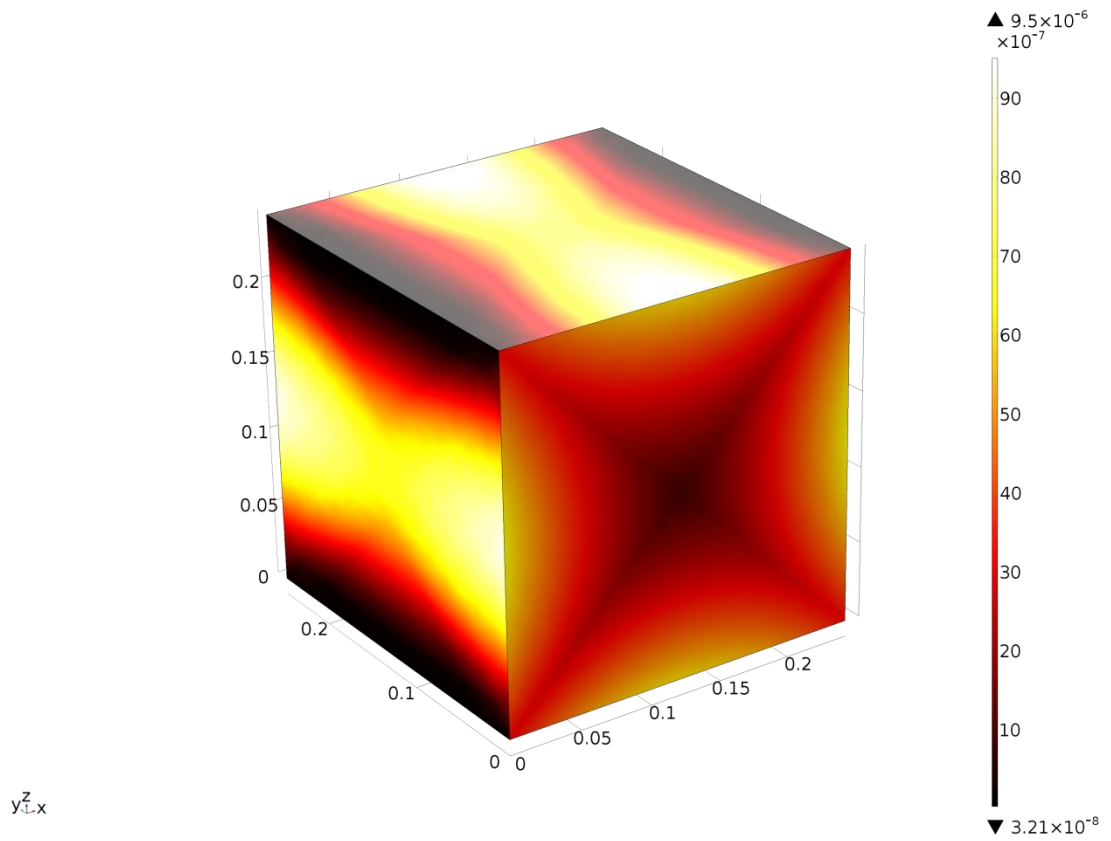
Obr. 28 Povrchové ztráty ve stěnách rezonátoru pro vid TM_{423} , délka rezonátoru 40 cm



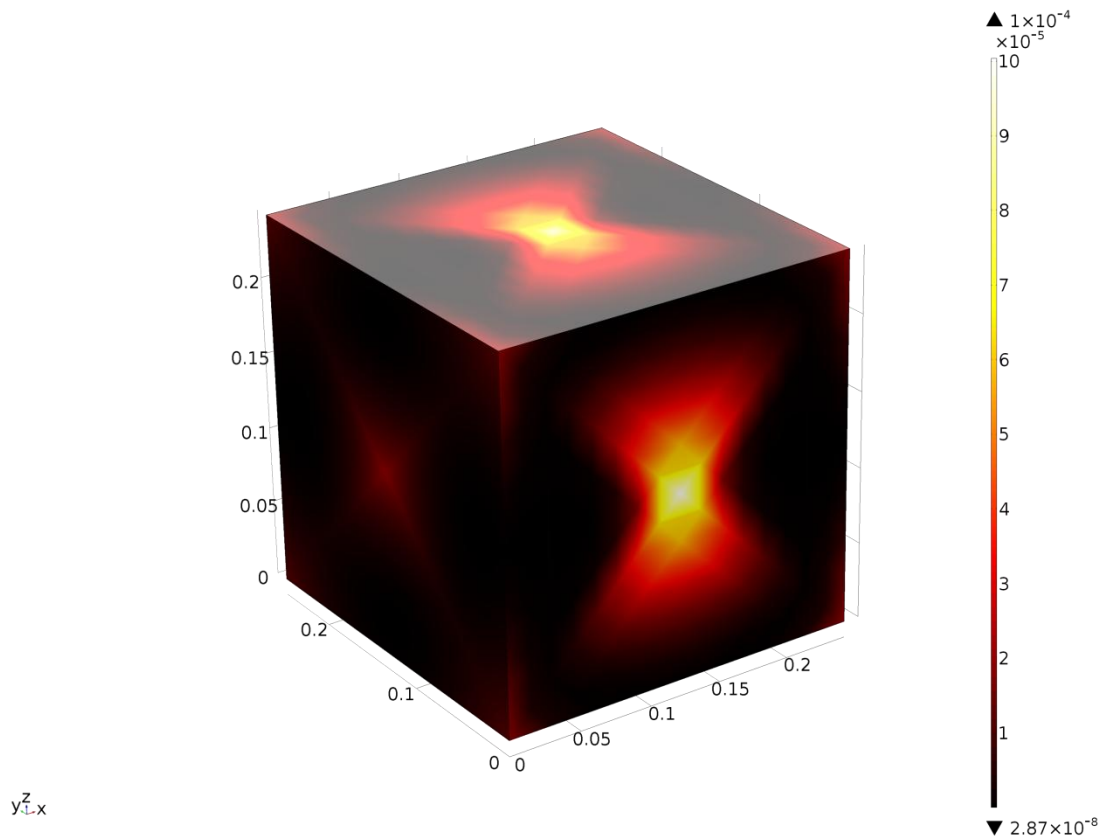
Obr. 29 Povrchové ztráty ve stěnách rezonátoru pro vid TM_{110} , délka rezonátoru 45 cm



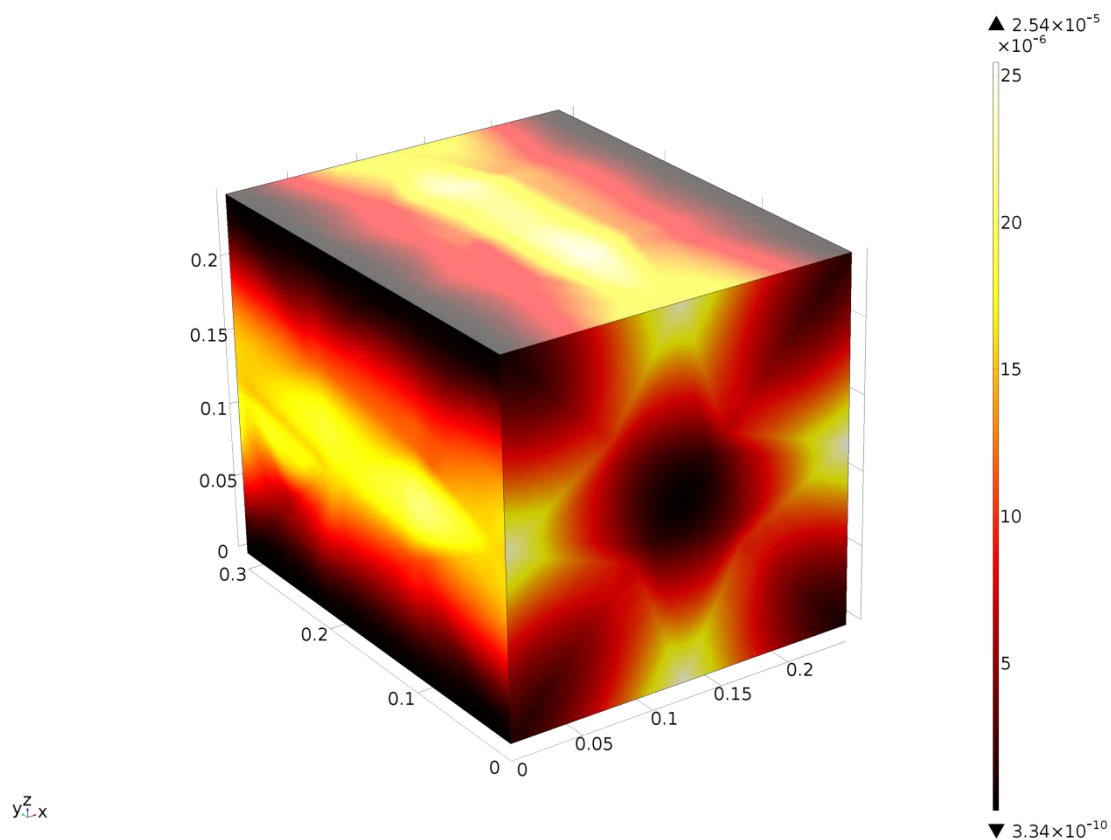
Obr. 30 Povrchové ztráty ve stěnách rezonátoru pro vid TM_{423} , délka rezonátoru 45 cm



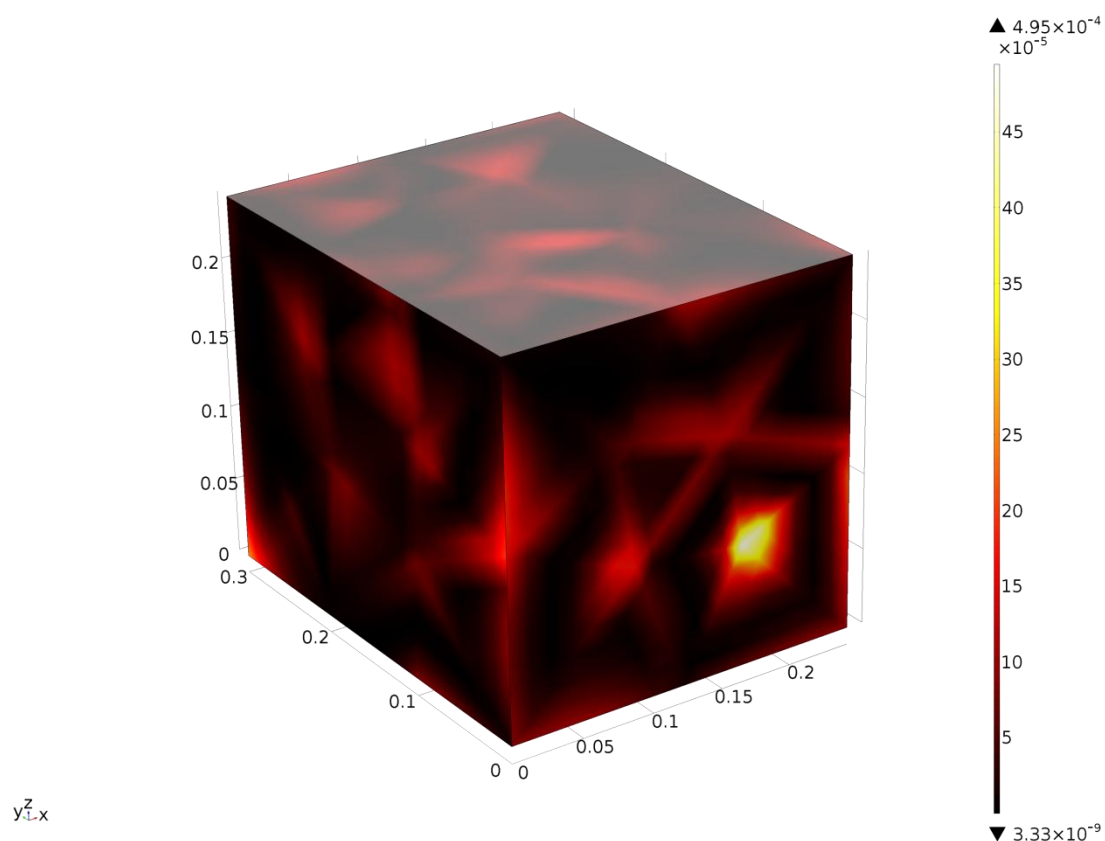
Obr. 31 Povrchové ztráty ve stěnách rezonátoru pro vid TE_{101} , délka rezonátoru 25 cm



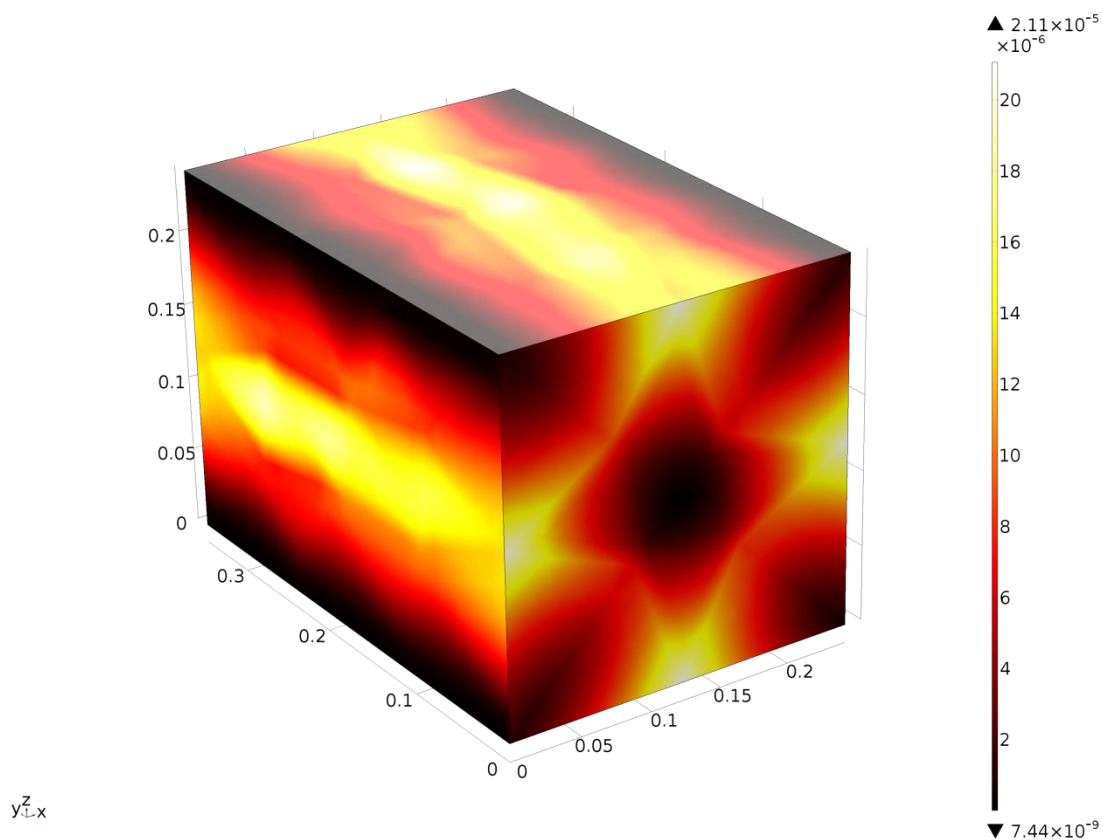
Obr. 32 Povrchové ztráty ve stěnách rezonátoru pro vid TE_{421} , délka rezonátoru 25 cm



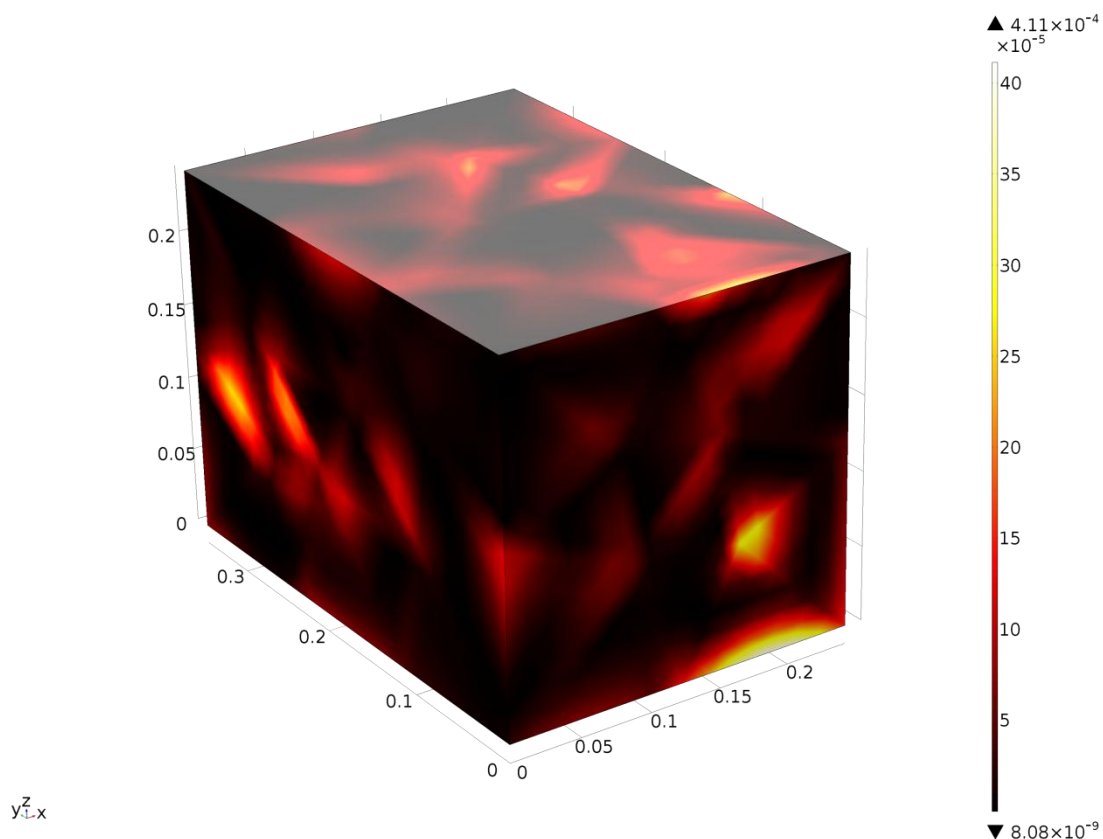
Obr. 33 Povrchové ztráty ve stěnách rezonátoru pro vid TE_{101} , délka rezonátoru 30 cm



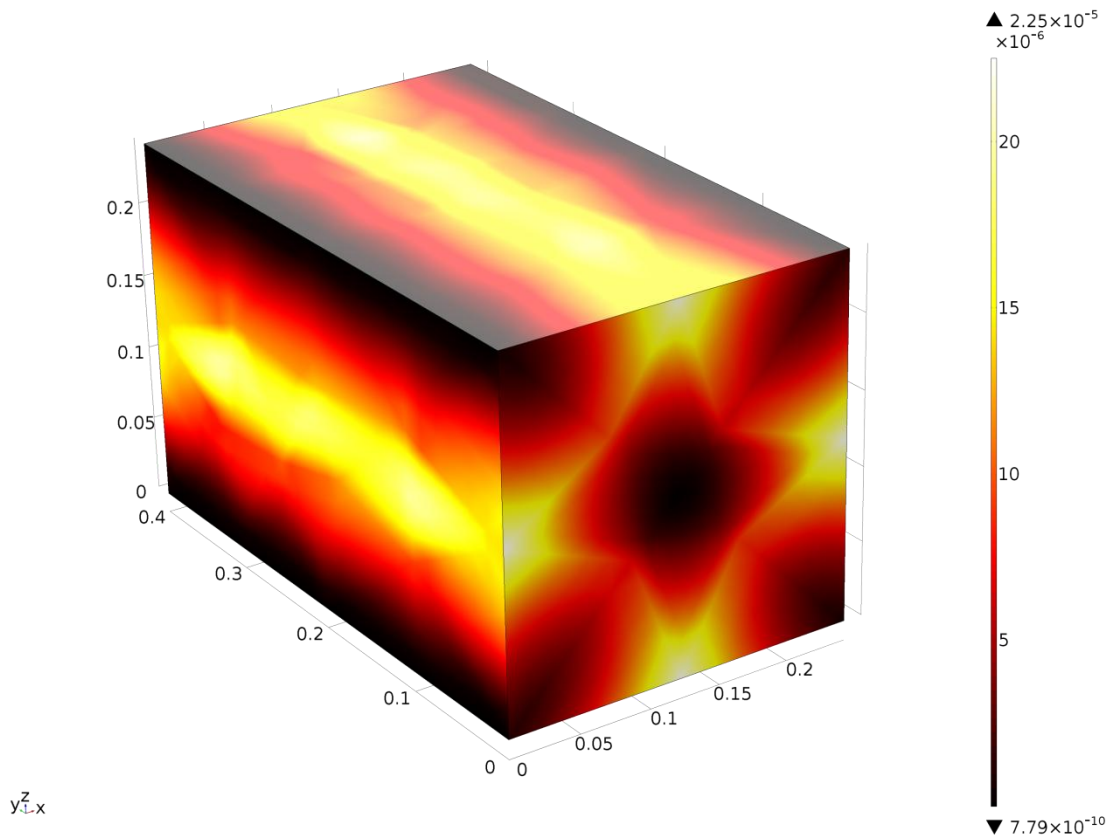
Obr. 34 Povrchové ztráty ve stěnách rezonátoru pro vid TE_{413} , délka rezonátoru 30 cm



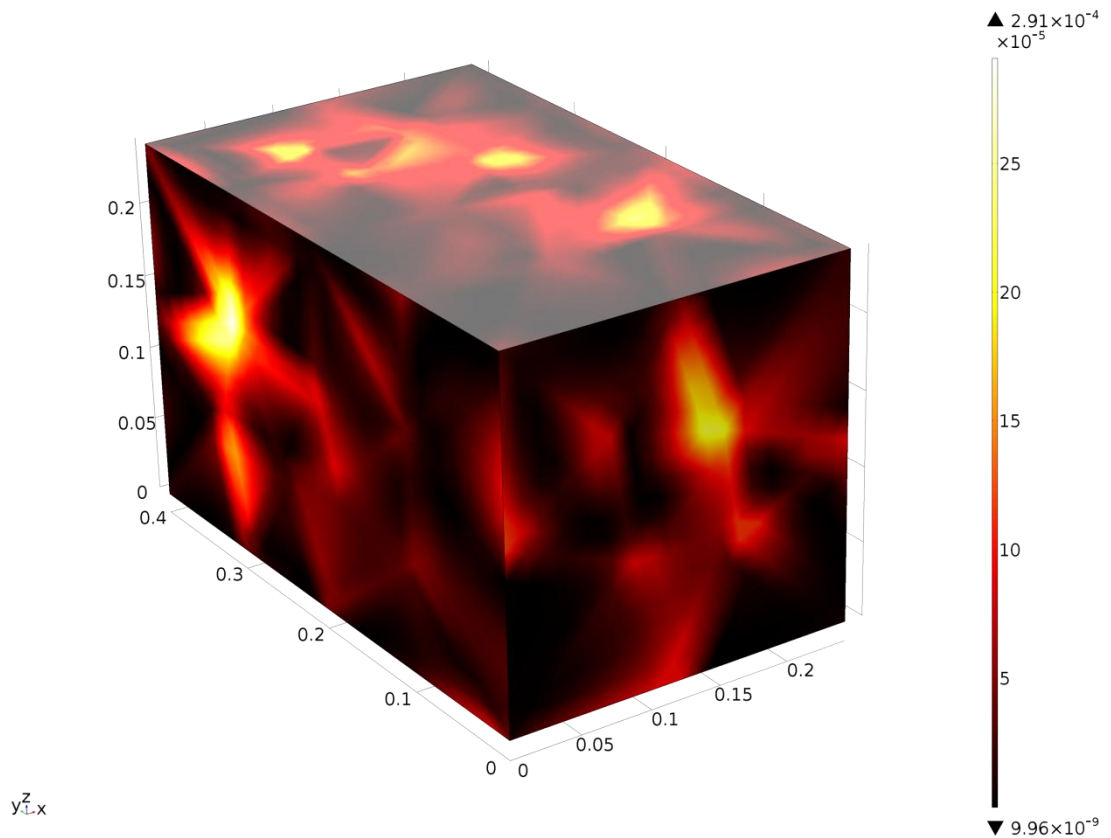
Obr. 35 Povrchové ztráty ve stěnách rezonátoru pro vid TE_{101} , délka rezonátoru 35 cm



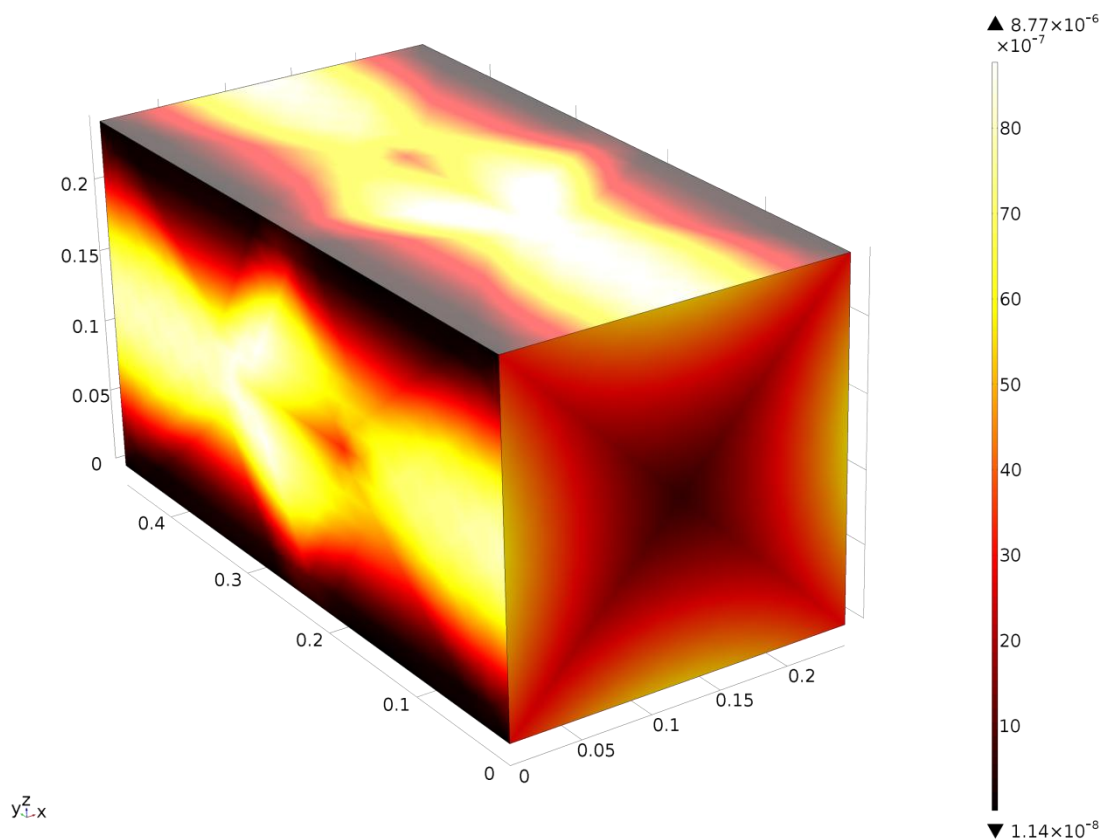
Obr. 36 Povrchové ztráty ve stěnách rezonátoru pro vid TE_{413} , délka rezonátoru 35 cm



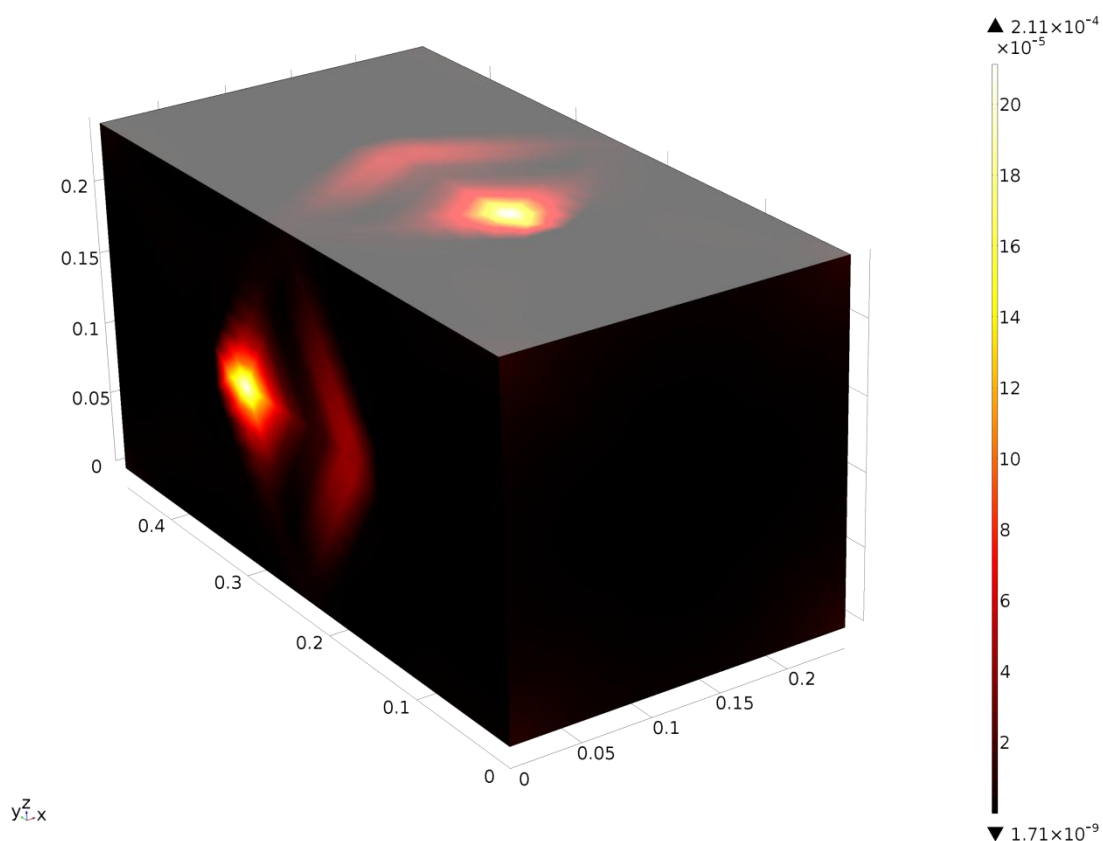
Obr. 37 Povrchové ztráty ve stěnách rezonátoru pro vid TE_{101} , délka rezonátoru 40 cm



Obr. 38 Povrchové ztráty ve stěnách rezonátoru pro vid TE_{423} , délka rezonátoru 40 cm



Obr. 39 Povrchové ztráty ve stěnách rezonátoru pro vid TE_{101} , délka rezonátoru 45 cm



Obr. 40 Povrchové ztráty ve stěnách rezonátoru pro vid TE_{423} , délka rezonátoru 45 cm

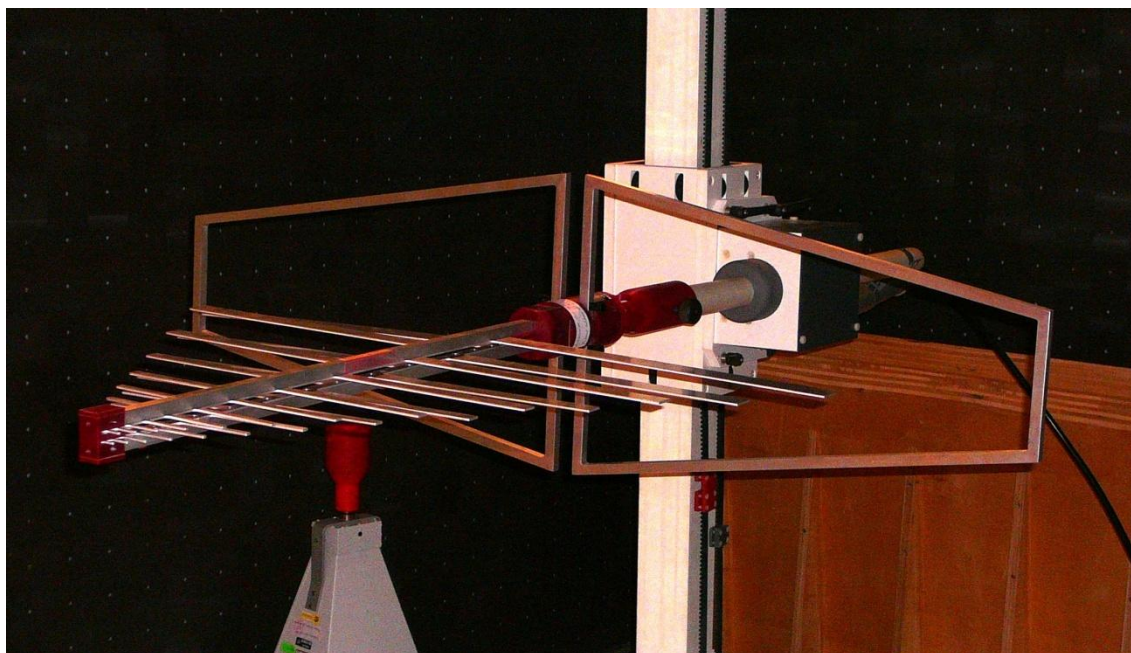
Příloha C – Fotografie z měření



Obr. 41 Měřený rezonátor



Obr. 42 Otevřený rezonátor



Obr. 43 Anténa BTA-M Hybrid