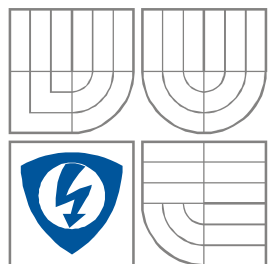


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

OHŘÍVÁNÍ ZTRÁTOVÉHO VLNOVODU

HEATING IN LOSSY WAVEGUIDE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

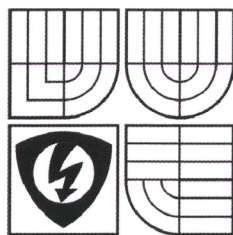
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jakub Tichý

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

BRNO, 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Tichý Jakub

Ročník: 3

ID: 77850

Akademický rok: 2007/08

NÁZEV TÉMATU:

Ohřívání ztrátového vlnovodu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s počítačovým modelem obdélníkového vlnovodu v programu Comsol Multiphysics. Do vlnovodu vložte dielektrickou destičku a sledujte změny v chování struktury. Stručně vše popište.

Postupně měňte měrný odpor dielektrické destičky. Sledujte, jak se mění činitel přenosu vlnovodu. Modelujte zahřívání struktury.

Svůj model rozšiřte o více dielektrických destiček různých parametrů. Sledujte, jak parametry těchto destiček ovlivní chování celé struktury. Souhrnně zpracujte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Internetová encyklopedie Wikipedia [cit. 19. února 2007]. Dostupné na WWW:
http://en.wikipedia.org/wiki/heat_equation

[2] COMSOL Multiphysics 3.3 User's Guide. Stockholm: Comsol AB, 2006.

Termín zadání: 11.2.2008

Termín odevzdání: 6.6.2008

Vedoucí projektu: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Jakub Tichý
Bytem: Novodvorská 3059, Frýdek-Místek, 738 01
Narozen/a (datum a místo): 4. ledna 1986 ve Valašském Meziříčí

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☒ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Ohřívání ztrátového vlnovodu

Vedoucí/ školitel VŠKP: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy
(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 6. června 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt:

Tato práce se zabývá modelováním vlnovodu s obdélníkovým příčným průřezem v programu Comsol Multiphysics a jeho optimalizací pomocí PSO algoritmu v programu MATLAB. Praktická část popisuje vybuzení elektrické vlny na různých kmitočtech a vlivy změn základních vlastností, rozměrů a polohy vložené dielektrické destičky na procházející elektrickou vlnu v pásmu jednovodovosti. V další fázi práce jsou aplikovány změny těchto základních vlastností na ohřívání struktury při vybuzení elektrického pole u vstupu tohoto vlnovodu. Poslední část se zabývá optimalizací vlnovodového filtru pomocí metody včelího roje a jeho následným zkoumáním elektrických a tepelných vlastností. Vše je ilustrováno na vložených obrázcích, které zachycují vlnovod z podélného vrchního pohledu, a pravoúhlých grafech.

Abstract:

This thesis deals with modeling of a waveguide with the rectangular cross-section in Comsol Multiphysics and optimization with PSO algorithm in MATLAB. The practical section describes electromagnetic wave excitation at different frequencies; and the influence of changes of basic characteristics, proportions and the location of an inserted dielectric slide on passing electromagnetic wave in a single-mode band. In next phase of the project, changes of basic characteristics on heating structure at electromagnetic field excitation by this waveguides are discussed. The last part deals with optimizing waveguide filter with particle swarm optimization and research his new electric and thermal character. Modeled phenomena are illustrated by pictures of a waveguide from the axial upper projection, and on rectangular charts.

Klíčová slova:

Vlnovod, metoda konečných prvků, ztrátové dielektrikum, měrná elektrická vodivost, dominantní vid, optimalizace metodou včelího roje, Comsol Multiphysics.

Keywords:

Waveguide, finite element method, lossy dielectric, specific electric conductivity, dominant mode, particle swarm optimization, Comsol Multiphysics.

Bibliografická citace:

TICHÝ, J. *Ohřívání ztrátového vlnovodu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 43 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Ohřívání ztrátového vlnovodu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 6. června 2008

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Dr. Ing. Zbyňkovi Raidovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 6. června 2008

.....
podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK	8
SEZNAM SYMBOLŮ	9
ÚVOD	10
1 VLNOVODY	11
1.1 ŠÍŘENÍ VLN VE VLNOVODU	11
1.2 VLASTNOSTI VIDŮ TE	13
1.3 VLNOVODOVÉ REAKTANČNÍ ČLENY A ZESLABOVAČE	14
1.4 BUZENÍ VLNOVODŮ	15
2 DIELEKTRIKUM	16
3 TEPLA A ŠÍŘENÍ TEPLA	17
4 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	18
4.1 POSTUP ŘEŠENÍ	18
4.2 COMSOL MULTIPHYSICS A MATLAB	19
5 OPTIMALIZACE V ELEKTROTECHNICE	20
5.1 LOKÁLNÍ OPTIMALIZAČNÍ METODY A GENETICKÉ ALGORITMY	20
5.2 PSO ALGORITHMUS	21
6 PRAKTICKÁ ČÁST	24
6.1 ÚVOD DO MODELOVÁNÍ	24
6.2 VLASTNOSTI OVLIVŇUJÍCÍ PRŮCHOZÍ ELEKTRICKOU VLNU	24
6.2.1 Modelování vlnovodu	24
6.2.2 Změny parametrů vloženého dielektrika	25
6.2.6 Změny rozměrů a polohy vloženého dielektrika	28
6.3 OHŘÍVÁNÍ VLNOVODU	29
6.3.1 Modelování vlnovodu	29
6.3.2 Bezeztrátové dielektrikum	29
6.3.3 Ztrátové dielektrikum	30
6.4 OPTIMALIZACE POMOCÍ PSO ALGORITMU	33
6.4.1 Úvod do řešení problému	33
6.4.2 Výsledky optimalizace	35
6.3.3 Elektrické a tepelné vlastnosti	38
7 ZÁVĚR	40
8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	41
PŘÍLOHA	42

Seznam obrázků

Obr. 1 Příčné průřezy kovovými vlnovody.	11
Obr. 2 Kritické kmitočty vidů TE.	13
Obr. 3 Rozložení elektrické intenzity u vidů TE.	13
Obr. 4 Příklad dvojrozměrné sítě konečných prvků. Modrá čísla značí lokální uzly, červená globální.	18
Obr. 5 Síť trojúhelníkových konečných prvků pro vlnovod bez vložené dielektrické překážky (a), s vloženou dielektrickou překážkou (b).	25
Obr. 6 Bezeztrátový vlnovod buzený elektrickým polem o kmitočtu $f = 7$ GHz náležící pásmu nepropustnosti.	25
Obr. 7 Bezeztrátový vlnovod buzený elektrickým polem o kmitočtu $f = 10$ GHz náležící pásmu jednovírovosti.	25
Obr. 8 Vlnovod s vloženou překážkou mající: $\epsilon_{r1} = 7$ (a), $\epsilon_{r2} = 20$ (b).	26
Obr. 9 Vlnovod s vloženou překážkou mající: $\mu_{r1} = 20$ (a), $\mu_{r2} = 50$ (b).	26
Obr. 10 Ztrátový vlnovod s vloženou překážkou mající $\sigma = 15 \text{ S.m}^{-1}$.	27
Obr. 11 Vlnovod s vloženou překážkou mající: $\epsilon_r = 20$ a $\mu_r = 20$ (a), $\epsilon_r = 20$, $\mu_r = 20$ a $\sigma = 10 \text{ S.m}^{-1}$ (b).	27
Obr. 12 Elektrické pole s vyšším kmitočtem než je pásmo jednovírovosti pro bezeztrátový vlnovod (a), ztrátový vlnovod (b).	28
Obr. 13 Vlnovod s vloženou překážkou se změněnými rozměry: protáhnutí do šířky vlnovodu (a), protáhnutí podél vlnovodu ve středu (b), protáhnutí podél vlnovodu při kraji (c).	29
Obr. 14 Rozložení teploty ve vlnovodu na začátku každého ohřívání při $T_0 = 20^\circ\text{C}$.	30
Obr. 15 Graf závislosti teploty na čase uvnitř překážky bez uvažování ztrát.	30
Obr. 16 Rozložení teploty ve ztrátovém vlnovodu v čase $t = 2000 \text{ s}$.	30
Obr. 17 Graf závislosti teploty na čase uvnitř překážky pro $\sigma = 0,1 \text{ S.m}^{-1}$.	31
Obr. 18 Graf závislosti teploty na čase uvnitř překážky pro $\sigma = 0,01 \text{ S.m}^{-1}$ (a), $\sigma = 1 \text{ S.m}^{-1}$ (b).	32
Obr. 19 Graf závislosti teploty na čase uvnitř překážky pro $\sigma = 0,1 \text{ S.m}^{-1}$ a: $\epsilon_r = 2$ (a), $\mu_r = 5$ (b), $\epsilon_r = 2$ a $\mu_r = 5$ (c).	33
Obr. 20 Vlnodový filtr s označením pozice jednotlivých kolíků (viz. tab. 2).	34
Obr. 21 Výchozí kmitočtová charakteristika činitele přenosu.	34
Obr. 22 Kmitočtové charakteristiky činitele přenosu optimalizovaného vlnodového filtru pro: 10 iterací a 10 jedinců (a), 20 iterací a 20 jedinců (b), 20 iterací a 40 jedinců (c).	37
Obr. 23 Závislost chybové funkce na počtu iteračních kroků pro 10 iterací a 10 jedinců.	37
Obr. 24 Optimalizovaný vlnodový filtr buzený elektrickým polem o kmitočtu: $f_1 = 12 \text{ GHz}$ (a), $f_2 = 17,4 \text{ GHz}$ (b).	38
Obr. 25 Rozložení teploty v optimalizovaném ztrátovém vlnodovém filtru pro kmitočty: $f_1 = 12 \text{ GHz}$ (a), $f_2 = 17,4 \text{ GHz}$ (b).	39
Obr. 26 Graf závislosti teploty na čase pro nejvíce ohřívány kolíky optimalizovaného ztrátového vlnodového filtru pro kmitočty: $f_1 = 12 \text{ GHz}$ (a), $f_2 = 17,4 \text{ GHz}$ (b).	39

Seznam tabulek

Tab. 1 Hodnoty činitele přenosu na konkrétních kmitočtech.	34
Tab. 2 Hodnoty relativních permitivit kolíků po optimalizaci pro: 10 iterací a 10 jedinců (a), 20 iterací a 20 jedinců (b), 20 iterací a 40 jedinců (c).	35

Seznam symbolů

a	[m]	šířka příčného průřezu vlnovodu
b	[m]	výška příčného průřezu vlnovodu
c_p	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita
C_p	[J.K ⁻¹]	tepelná kapacita
c_n	[-]	člen pro optimalizační podmínky
c_1	[-]	vážený faktor pro lokální optimalizační minimum
c_2	[-]	vážený faktor pro globální optimalizační minimum
d_n	[-]	žádaná hodnota parametrů optimalizace
ε	[F.m ⁻¹]	komplexní permitivita
ε_r	[-]	relativní permitivita
E_{0z}	[V.m ⁻¹]	složka elektrické intenzity ve směru osy z
f	[Hz]	kmitočet elektrické vlny
f_{krit}	[Hz]	kritický kmitočet vidu ve vlnovodu
$F(x)$	[-]	kriteriální funkce
g_{best}	[-]	globální optimalizační minimum
k	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita
λ	[m]	vlnová délka elektrické vlny
λ_g	[m]	vlnová délka elektrické vlny ve vlnovodu
λ_{krit}	[m]	kritická vlnová délka vidu ve vlnovodu
μ	[H.m ⁻¹]	komplexní permeabilita
μ_r	[-]	relativní permeabilita
m_p	[kg]	hmotnost
m	[-]	vidové číslo náležící šířce vlnovodu
n	[-]	vidové číslo náležící výšce vlnovodu
p_{best}	[-]	lokální optimalizační minimum
Q	[J]	teplo
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota
σ	[S.m ⁻¹]	měrná elektrická vodivost
s_{21}	[dB]	činitel přenosu
t	[s]	čas
T_0	[K]	termodynamická teplota
T'	[s]	perioda elektrické vlny
Δt	[-]	délka iteračního kroku
ΔT	[K]	změna teploty
v	[m.s ⁻¹]	rychlost šíření rovinné elektromagnetické vlny
v_f	[m.s ⁻¹]	fázová rychlost vlny ve vlnovodu
v_n	[-]	aktuální rychlost pohybu jedinců
v_{n+1}	[-]	nová rychlost pohybu jedinců
v_{sk}	[m.s ⁻¹]	skupinová rychlost vlny ve vlnovodu
x_n	[-]	aktuální pozice jedince
x_{n+1}	[-]	nová pozice jedince
y_n	[-]	parametry optimalizovaného systému
Z_{0TM}	[Ω]	charakteristická impedance pro magnetické vidy
Z_{0TE}	[Ω]	charakteristická impedance pro elektrické vidy

Úvod

V současnosti nejčastějšími druhy vedení známé z každodenního života jsou převážně koaxiální vedení nebo dvojlinka, ale ty jsou jen omezeně použitelné v mikrovlnném kmitočtovém pásmu, poněvadž na vyšších kmitočtech přenášeného signálu významně rostou ztráty v dielektriku těchto vedení. Proto se k přenosu na vyšších kmitočtech využívají zejména vlnovody.

Teoretická část této práce se zaměřuje převážně na samotné vlnovody, jejich rozdělení, dále pak způsob šíření elektromagnetických vln v jejich nitru, teplotní vlivy a šíření těchto vln, včetně úvodu do teorie tepla. V krátkosti jsou také uvedeny možnosti využití optimalizací, a to převážně globálních, jako genetické algoritmy nebo metoda včelího roje počítající na základě PSO algoritmu. Závěrem teoretické části je uvedení možnosti výpočtu metodou konečných trojúhelníkových prvků, kterých využívá počítačový program Comsol Multiphysics.

V praktické části je samotné modelování vlnovodu s příčným obdélníkovým průřezem, na který je nahlíženo z vrchu, kde na vstupu je buzeno elektrické pole. Nejprve jsou prověřovány vlastnosti samotné elektrické vlny při průchodu vlnovodem s vloženou dielektrickou překážkou. Další fáze práce se věnuje vlivům vloženého ztrátového dielektrika na ohřívání celé struktury daného vlnovodu. Poslední částí je optimalizace vlnovodu jako filtru s více dielektrickými překážkami a celkový vliv na danou strukturu jak po elektrické stránce, tak po stránce tepelné. Veškeré výsledky jsou potom shrnuty v závěru.

1 Vlnovody

Vlnovod je typem vedení, jehož příčný rozměr je srovnatelný s vlnovou délkou a hraje tedy roli při přenosu elektromagnetické energie. Využívají se zejména pro přenos na velmi vysokých kmitočtech z důvodu neúnosně vysokého útlumu klasických kabelů. Můžeme je rozdělit vzhledem k materiálu na dielektrické a kovové.

- *Dielektrické vlnovody* – jsou obvykle tvořeny dielektrikem s vysokou permitivitou a malými ztrátami. Mívají většinou kruhový nebo obdélníkový průřez. Bývají označovány jako optická vlákna, poněvadž se nejčastěji užívají v infračervené a viditelné oblasti kmitočtového spektra. Mezi nejznámější oblasti jejich aplikace patří telekomunikace mezi městy, v rozvodech kabelových televizí nebo při propojení počítačů do sítí.
- *Kovové vlnovody* – mívají průřez jak kruhový a obdélníkový, tak můžou mít ve speciálních případech i tvar písmene „H“ nebo „Π“, jak ukazuje *obr. 1* [7]. Vlnovody s těmito průřezy jsou oproti obdélníkovému použitelné pro větší rozmezí kmitočtů, avšak mívají menší přenos výkonu.



Obr. 1 Příčné průřezy kovovými vlnovody.

Kovové vlnovody využíváme u radiolokátorů a systémů pro družicovou komunikaci, zejména pro přenos energie z vysokofrekvenčního generátoru k anténě nebo přenos signálu z antény k vysokofrekvenčnímu stupni přijímače.

Ve srovnání různých druhů vlnovodů a koaxiálního vedení má obdélníkový vlnovod proti koaxiálnímu vedení asi 2,5-krát menší útlum a asi pětikrát větší činný výkon. Vzhledem k vlnovodům kruhového příčného průřezu je útlum asi 1,5-krát menší a dvakrát větší činný výkon. U obdélníkového vlnovodu je také přibližně dvakrát větší šířka pásma přenášených kmitočtů než u kruhového vlnovodu. Z těchto důvodů se pro přenos elektromagnetické energie na kratších cm a mm vlnách používají právě vlnovody obdélníkového průřezu (pro delší cm a dm vlny již vychází za daných podmínek příliš velké příčné rozměry).

1.1 Šíření vln ve vlnovodu

Z řešení Maxwellových rovnic plyne, že celkové elektromagnetické pole uvnitř dutého kovového vlnovodu lze vyjádřit jako superpozici dvou typů vln, a to vlny příčně magnetické (TM) a příčně elektrické (TE). Pole TM se rovněž označuje jako elektromagnetické pole typu E, jelikož vlna TM má příčnou i podélnou složku elektrické intenzity nenulovou (podélná složka magnetické intenzity je nulová). Pole TE pro změnu má nulovou podélnou složku elektrické intenzity a nenulovou příčně a podélně magnetickou složku, proto se nazývá elektromagnetickým polem typu H. V kovovém vlnovodu s ideálně vodivými stěnami mohou vlny TE a TM i samostatně existovat, být samostatně buzeny

a samostatně se šířit nezávisle jedna na druhé. Každá vlna TM a TE tak představuje samostatný kanál vlnovodu. V obdélníkovém vlnovodu těchto vln může existovat nekonečně mnoho a označují se jako tzv. vidy TE a TM. Jednotlivé vidy pak charakterizují jejich nezáporná vidová čísla m a n , přičemž u vidu TM musí být obě čísla i různá od nuly a u vidu TE může být nulové pouze jedno. Podmínky pro šíření elektromagnetické vlny uvnitř kovového vlnovodu jsou poměrně složité. Přítomnost vodivých stěn vlnovodu spolu s nutností zajistit nulovou velikost tečné složky intenzity elektrického pole vylučuje možnost, aby se vlna TEM šířila podél osy vlnovodu. Dále pak je důležitou podmínkou velikost kmitočtu vlny, kterýžto nesmí klesnout pod kritickou hodnotu a je závislý na vzdálenosti vodivých ploch. Při nižším kmitočtu už není možné vlnu ve vlnovodu vybudit. Naopak při vyšších kmitočtech než je kritický můžeme sledovat různé druhy struktur (vidů) vln. Ve vlnovodu může najednou existovat více vidů. Pro hodnotu kritického kmitočtu platí vzorec [2]:

$$f_{krit} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\varepsilon \cdot \mu}} \sqrt{\left(\frac{m \cdot \pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n \cdot \pi}{b}\right)^2}. \quad (1)$$

Zde a, b jsou rozměry příčného průřezu vlnovodu, m, n jsou vidová čísla. Permittivita ε a permeabilita μ se vztahuje k prostředí uvnitř vlnovodu a π je konstanta. S rostoucími vidovými čísly roste hodnota kritického kmitočtu. V závislosti na vybuzení vidu a jeho mezním kmitočtu se ve vlnovodu mění další parametry buzených elektromagnetických vln. Jsou to základní parametry a mezi ně patří fázová rychlost v_f [2], což je rychlost vlny ve vlnovodu, se kterou se v podélném směru vlnovodu pohybují místa konstantní fáze signálu:

$$v_f = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_m}{f}\right)^2}} = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2}}. \quad (2)$$

Skupinová rychlost v_{sk} [2] je rychlost pohybu míst konstantní fáze modulační obálky signálu ve směru podélné osy vlnovodu a nebo také rychlost přenosu energie vlny vlnovodem:

$$v_{sk} = v \sqrt{1 - \left(\frac{f_m}{f}\right)^2} = v \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2}. \quad (3)$$

Délka vlny ve vlnovodu λ_g [2] vyjadřuje vzdálenost, kterou vlna urazí fázovou rychlostí v_f za dobu jedné periody $T' = f^{-1}$:

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_m}{f}\right)^2}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2}}. \quad (4)$$

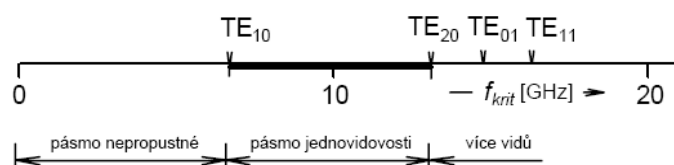
V neposlední řadě charakteristická impedance vlny definována jako podíl komplexních amplitud příčných elektrických a magnetických složek pole uvnitř vlnovodu [2]:

$$Z_{0TM} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \sqrt{1 - \left(\frac{f_m}{f}\right)^2} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2} \quad (5)$$

$$Z_{0TE} = \frac{\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_m}{f}\right)^2}} = \frac{\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2}} \quad (6)$$

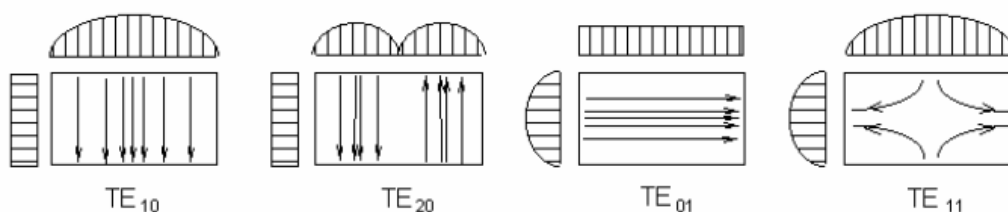
Ze vztahu je zřejmé, že charakteristická impedance je pro propustné pásmo reálná a pro nepropustné pásmo imaginární, a tedy má kapacitní nebo induktivní charakter. Ve výše uvedených vztazích značí v rychlost šíření rovinné elektromagnetické vlny v neomezeném prostoru, f a λ jsou kmitočet a vlnová délka buzené vlny, f_m a λ_m jsou mezní kmitočet a vlnová délka pro právě buzený vid a ϵ a μ jsou permitivita a permeabilita prostředí uvnitř vlnovodu. Jednotlivé vidy také přenášejí různé činné výkony a jsou tlumeny různým měrným útlumem α . V dutém kovovém vlnovodu existují tři druhy útlumu, a to útlum vlivem nedokonalé vodivých stěn, útlum vlivem ztrátového dielektrika a útlum vlivem odrazu vlny.

1.2 Vlastnosti vidů TE



Obr. 2 Kritické kmitočty vidů TE.

Na obr. 2 [7] jsou pásma vidů TE pro vlnovod R100, přičemž až po kmitočet prvního vidu TE_{10} sahá nepropustné pásmo, kde elektromagnetické vlny nemohou být vybudeny. Za jeho hranicí následuje pásmo jednovírovosti, ve kterém výhradně bývají vlnovody provozovány. Tento fakt je proto, že za hranicí pásma dalšího vidu již vlny interferují, což může způsobit mnohé komplikace. Pro tyto případy jsou vyráběny také vlnovody s příčným průřezem ve tvaru písmene H nebo Π , které lze aplikovat na vyšších kmitočtech než je dominantní vid jako například následující vid TE_{20} . Na obr. 3 [7] lze sledovat jak vidová čísla m , n ovlivní na příčném průřezu vlnovodem rozložení intenzity elektrického pole u nejnižších vidů. Lze také pozorovat, že vidové číslo m označuje počet půlvln elektrické intenzity na delší straně příčného průřezu a n počet půlvln na straně kratší (jestliže je vidové číslo nulové, pak to znamená, že složka elektrické intenzity je na dané straně konstantní a zároveň nezávisí na jejich rozměrech).



Obr. 3 Rozložení elektrické intenzity u vidů TE.

1.3 Vlnovodové reaktanční členy a zeslabovače

Reaktanční členy mají za úkol vytvořit ve vlnovodu bezztrátový prvek požadovaného charakteru (induktor, kapacitor, zkrat). Realizace těchto prvků se v mikrovlnné technice provádí posuvnými zkratovacími písty, tlumivkami, vlnovodovými clonami a kolíky. Konstruují se z nich potom bezztrátové impedanční transformátory, a nebo především vlnovodové filtry.

- *Vlnovodové písty a tlumivky* – používají se k vytvoření zkratu v určitém místě daného vlnovodu. Měřítkem kvality pístu je vstupní poměr stojatých vln v pracovním pásmu kmitočtů, který pro pevný vlnovodový zkrat bývá až 500 a pro posuvný nesmí klesnout pod 150. Původní písty s galvanickými kontakty se již dnes nepoužívají po řadě mechanických i elektrických problémů. Typické konstrukce dnešních vlnovodových pístů jsou zásadně bezkontaktní a využívají několikanásobné čtvrtvlnné transformace v úsecích vlnovodu s různými velikostmi charakteristické impedance. Lze je využít i ve funkci samostatné tlumivky pro zabránění vyzáření mikrovlnného signálu z vlnovodu ven kolem napájecích přívodů. Příklady pístů jsou tlumivkový píst, žlabkový píst a rotační píst v obdélníkovém vlnovodu, který odstraňuje pracovní výrobu předchozích dvou případů.
- *Vlnovodové clony* – označují se tak vlnovodové překážky, které částečně přehrazují příčný průřez vlnovodu. V obdélníkovém vlnovodu to bývají symetrické induktivní, kapacitní a rezonanční. Induktivní clona snižuje šířku vlnovodu a má za důsledek hlavně deformaci magnetického pole. Kapacitní clona naopak snižuje výšku vlnovodu, čímž způsobí zvýšení koncentrace elektrického pole v daném místě, což má za důsledek zmenšení průrazné pevnosti a tím i velikosti přenášeného výkonu. Poslední případ je rezonanční clona, která v sobě zahrnuje obě předchozí a je tvořena kovovou překážkou s obdélníkovým nebo kruhovým otvorem. Lze ji navrhnout i tak, že na daném kmitočtu clona neovlivní dominantní vid TE_{10} .
- *Vlnovodové kolíky* – mohou hrát ve vlnovodu podobnou roli jako vlnovodové clony (zasunuté ve směru elektrických nebo magnetických siločar). Induktivní kolík realizuje vodivou spojku pro příčné vodivé proudy spojením širších stran obdélníkového vlnovodu ve směru elektrických siločar dominantního vidu. Výhodou je jejich snadná implementace a proti vlnovodovým clonám prakticky nezmenšují průraznou elektrickou pevnost a tedy ani přenášený výkon. Kapacitní kolík se realizuje zasunutím kolíku širší stěnou ve směru elektrických siločar, avšak nedotýká se protější širší stěny. Vodivá část představuje induktivní charakter a rozptylové elektrické pole jeho konce vůči protější stěně kapacitní složku impedance (menší zasunutí – převažuje kapacitní složka, větší zasunutí – převažuje induktivní složka). Nejčastější využití kapacitních kolíků je k přesnému doladění vlnovodových filtrů, nepoužívají se však ve výkonných vlnovodových systémech kvůli značnému zmenšení průrazného elektrického pole vlnovodu v místě kolíku. Kapacitní charakter má ovšem i kolík spojující obě užší stěny vlnovodu. Tento na rozdíl od předchozího typu nijak významně nesnižuje maximální úroveň přeneseného výkonu.

Vlnovodové filtry se v mikrovlnné technice používají pro ty nejnáročnější účely a nejvyšší kmitočtová pásma, přičemž proti koaxiálním nebo mikropáskovým filtrům vytvářejí vysoce selektivní filtrační soustavy s vysokou hodnotou přenášeného výkonu. Při konstrukci vlnovodových filtrů se často využívají transformační vlastnosti čtvrtvlnných úseků

vedení, jež se v teorii filtrů označuje jako impedanční invertor. Spojením vlastností dříve zmiňovaných reaktančních členů lze konstruovat různé druhy těchto vlnovodových filtrů. Mezi nejčastěji používané mikrovlnné obvody patří tzv. zeslabovače neboli atenuátory, které umožňují zeslabení výkonu postupné vlny vyslané z generátoru na požadovanou úroveň. Mohou sloužit i jako ochrana generátoru před odraženou vlnou nebo zabezpečení dostatečného přizpůsobení zátěže a vedení, avšak dnes tuto funkci plní výhradně feritové izolátory.

Odporové (absorpční) zeslabovače – uvnitř těchto zeslabovačů vzniká útlum vlivem pohlcení elektromagnetické vlny a její přeměny na teplo ve ztrátovém dielektriku, ve špatně vodivých stěnách vlnovodu nebo v odporových deskách vložených dovnitř vlnovodu. Jedno z nejčastějších použití je zeslabovač s příčně posuvnou odporovou deskou. Napříč vlnovodem se posouvá dielektrická deska (např. sklo), na jejíž jedné straně je nanášena odporová vrstva (grafitový lak nebo tenká vrstva nichromu). Nejmenších útlumů dosahuje deska těsně u boční stěny a největších v místě maxima intenzity elektrického pole pro vid TE_{10} uprostřed vlnovodu. Deskové atenuátory se vyrábějí jako pevné (přesně nastavená vzdálenost od boční stěny vlnovodu) i jako pohyblivé (dostatečně jemný a rovnoměrný posuv a zachování dobrého přizpůsobení). Přesnost nastavení útlumu činí asi 5 %, kmitočtová závislost útlumu je obvykle 5 až 10 % v kmitočtovém pásmu použitého vlnovodu pro útlum do 30 dB. Na stejném principu pracují i nožové atenuátory, které se využívají u obdélníkových vlnovodů s velmi malými rozměry (deska se zasouvá úzkou podélnou štěrbinou). Snadnou obsluhou a přesností vyniká otočný odporový zeslabovač, který se skládá ze dvou krajních přechodů z obdélníkového na kruhový vlnovod s videm TE_{11} , prostřední část je otočná kruhového průřezu a v každé části je umístěna tenká dielektrická deska s odporovou vrstvou (nejmenší útlum je když jsou elektrické siločáry ve všech částech kolmé na desku). Hlavní předností otočných atenuátorů je, že jejich útlum od 0 po 60 dB nezávisí na kmitočtu ani na vlastním útlumu odporových desek. Dále existuje celá řada neproměnných odporových zeslabovačů, které se dají lépe přizpůsobit např. odvodům tepla.

1.4 Buzení vlnovodů

V současnosti se používají tři základní způsoby buzení vlnovodů, koaxiálních vedení a dutinových rezonátorů: buzení proudovou sondou (anténkou), magnetickou smyčkou a vazebním otvorem (štěrbinou). Předpokladem u všech těchto buzení je znalost průběhů a rozložení elektromagnetického pole, které chceme vybudit.

- *Buzení proudovou sondou* se realizuje krátkým úsekem lineárního vodiče zasunutým do buzeného vlnovodu v místě jeho maximální intenzity a rovnoběžně se siločarami elektrického pole. Samozřejmostí je, že velikost kmitočtu budícího signálu musí být větší než mezní kmitočet buzeného vidu v daném vlnovodu. Na tomto principu je konstruována většina přechodů z koaxiálního na vlnovodové vedení (sonda je tvořena „obnaženým“ koncem středního vodiče koaxiálního vedení či koaxiálního konektoru).
- *Buzení magnetickou smyčkou* je obdobou proudové sondy, kterou vytváříme do podoby malé „téměř uzavřené“ smyčky, přičemž plocha smyčky je kolmá k magnetickým siločarám buzeného vidu a její střed je v místě maxima intenzity magnetického pole. Velikost buzení lze regulovat natočením smyčky o 90°. Nejčastější využití je u vzduchem plněného koaxiálního vedení a koaxiálních dutinových rezonátorů.

- *Buzení vazebním otvorem* se provádí vytvořením malého otvoru a vybuzením elektrického pole vnějším vedením, vnějším vlnovodem či ozářením elektromagnetickou vlnou. Budící elektrické pole musí být ve štěrbině kolmo k magnetickým siločarám a střed štěrbiny umístěn v maximu magnetického pole buzeného vidu. Tento způsob buzení je typický pro buzení dutinových vlnovodových rezonátorů. Z výrobních důvodů se nejčastěji používá kruhová štěrbina.

2 Dielektrikum

Dielektrikum je látka mající schopnost akumulovat po přiložení elektrického pole elektrickou energii, avšak neplní funkci izolantu (izolování vodivých částí s různým potenciálem). Je známo, že každý izolant je dielektrikum, ale ne každé dielektrikum je izolantem. Dielektrikum je charakterizováno několika vlastnostmi, které mohou ovlivňovat procházející elektromagnetickou vlnu. V programu Comsol Multiphysics jsou využity následující tři:

- *Permitivita* je fyzikální vlastnost popisující vzájemné působení elektrického pole a dielektrika a je určena schopností polarizovat se působením elektrického pole, které je uvnitř daného materiálu redukováno. Je udávána jako podíl elektrické indukce a elektrické intenzity a značí se ϵ .
- *Permeabilita* je fyzikální veličina popisující míru magnetizace dielektrika v důsledku působení magnetického pole a zároveň je reakcí určitého prostředí na silové účinky magnetického pole, které jsou v závislosti na prostředí zesilovány nebo zeslabovány. Tato vlastnost představuje analogii permitivity při působení elektrického pole, udává tedy podíl magnetické indukce a intenzity magnetického pole. Značí se řeckým písmenem μ .
- *Měrná elektrická vodivost (konduktivita)* je fyzikální vlastnost látky vést dobře elektrický proud, přičemž čím větší hodnota konduktivity, tím lepší elektrický vodič. Je to vlastnost závislá na teplotě a značí se σ .

Působením elektrického pole se začnou v dielektriku vytvářet jevy, tzv. dielektrické ztráty, a tyto ztráty se vyjadřují výše zmiňovanou vlastností měrnou elektrickou vodivostí. Jestliže je do vlnovodu vloženo dielektrikum o rozměrech menších než je dutina samotného vlnovodu, chová se podobně jako odporový zeslabovač (atenuátor). Dielektrické ztráty rozdělujeme podle fyzikálního charakteru do tří druhů, a to vodivostní, polarizační a ionizační.

- *Vodivostní ztráty* se vyskytují u všech dielektrik a jsou podmíněny ohmickou vnitřní a povrchovou vodivostí dielektrika. Dochází k nim působením stejnosměrného i střídavého napětí a důsledkem tohoto jevu je degradace energie elektrického pole v Jouleovo teplo. Fyzikální podstata těchto ztrát tkví ve srážkách volných nosičů nábojů s kmitajícími částicemi, které tvoří strukturu látky.
- *Polarizační ztráty* jsou podmíněny polarizačními pochody uvnitř dielektrika a její velikost závisí na druhu použité polarizace (velké ztráty hlavně polarizace dipólová

a iontová relaxační). V neposlední řadě patří mezi polarizační ztráty ještě ztráty rezonanční, které se projevují silnou selektivitou a objevují se až při kmitočtech odpovídající kmitočtu světelného spektra.

- *Ionizační ztráty* se vyskytují převážně u plynů a pak také u tuhých a kapalných látek, které jsou směsí s plynem. Nutností vzniku je překročení tzv. prahu ionizace daného plynu.

3 Teplo a šíření tepla

Teplo resp. tepelná energie je část vnitřní energie, kterou těleso přijme nebo odevzdá při tepelné výměně druhému tělesu z důvodu rozdílné teploty a značí se Q [10]:

$$Q = m_p c_p \Delta T. \quad (7)$$

Zde m_p značí hmotnost, c_p měrnou tepelnou kapacitu a ΔT změnu teploty. Teplo představuje změnu stavu tělesa a vyjadřuje se fyzikální veličinou teplota, jejíž značkou je T . Podle kinetické teorie je teplo celkovou kinetickou energií neuspořádaného pohybu částic, z nichž se látka skládá. Přeměna mechanické práce na teplo je kinetickou teorií vysvětlována jako přeměna energie uspořádaného pohybu na kinetickou energii neuspořádaného pohybu částic. Fyzikální veličina popisující tepelné vlastnosti látky se nazývá tepelná kapacita (teplo, které je potřeba k ohřátí látky o jeden teplotní stupeň) a značí se C_p nebo také měrná tepelná kapacita (teplo potřebné k ohřátí jednoho kilogramu látky o jeden teplotní stupeň) se značkou c_p .

Šíření tepla je jedním ze způsobů přenosu energie a dělí se na tři základní způsoby, a to vedením, prouděním a tepelným zářením. Při tepelném záření dochází k vyzařování energie ze zdroje ve formě elektromagnetických vln a jeho následném pohlcování ozařovaným tělesem. Tento způsob záření se od dvou zbylých odlišuje tím, že se může šířit i v prostoru, které není vyplněno žádnou látkou (tedy ve vakuu). Posledního jmenovaného je využito např. u mikrovlnné trouby, kde dochází k ohřevu pokrmu (dielektrikum) pomocí stojatého vlnění vycházejícího z magnetronu (zdroj energie) do prostoru mikrovlnné trouby (vedené vlnovodem do vlnovodového rezonátoru). Elektromagnetické vlny jsou pohlcovány molekulami a přijatá energie se pak mění v teplo. Dále jsou již uvedeny konkrétněji základní způsoby šíření tepla:

- *Vedení tepla*, neboli kondukce, je jedním ze způsobů šíření tepla, které se uplatňuje u pevných těles. Při tomto způsobu částice mající vyšší střední kinetickou energii předají část pohybové energie prostřednictvím srážek částicím s nižší střední kinetickou energií. Podle tepelné vodivosti (přesněji součinitele tepelné vodivosti), což je rychlost vedení tepla uvnitř látky se rozděluje na dvě skupiny. První z nich představují tepelné vodiče, jakožto látky s vysokou rychlostí vedení tepla a vysokým součinitelem vodivosti. Nejlepšími vodiči jsou např. stříbro, měď, hliník, wolfram, mosaz. Druhou skupinu tvoří látky s nízkou rychlostí vedení tepla a nízkým součinitelem vodivosti zvané tepelné izolanty. Nejlepšími tepelnými izolanty jsou především plyny a kapaliny, které se šíří spíše prouděním než vedením. Z pevných látek to potom jsou převážně látky obsahující hodně plynu, např. skelná vata, polystyren, sklo, dřevo, atd. Vedení tepla lze rozdělit na ustálené, kde se teplotní

rozdíl s časem nemění a neustáléné, kde se s časem teplotní rozdíl mění. Matematická formulace nestacionárního (neustálého) vedení tepla umožňuje obecné vyjádření diferenciální rovnice vedení tepla.

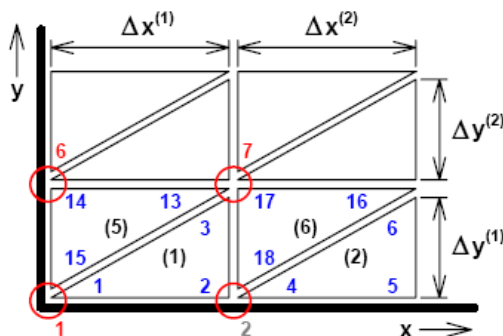
- *Proudění tepla*, neboli konvekce je způsob šíření tepla, kdy dochází k proudění hmoty o různé teplotě, což se uplatňuje u kapalin a plynů. Pohybem hmoty dochází k promíchávání částí s odlišnou teplotou, a tím se přenáší teplo mezi různými částmi hmotného útvaru. Proudění je obvykle spojeno se změnou některé vlastnosti látky v závislosti na teplotě. Ve srovnání s vedením tepla může být rychlejší.
- *Tepelné záření* je elektromagnetické záření vysílané látkami s termodynamickou teplotou vyšší než $T = 0$ K. Má spojité spektrum a jeho intenzita i rozložení závisí na teplotě látky. S rostoucí teplotou přibývají kratší vlnové délky a intenzita roste se čtvrtou mocninou teploty. Tepelné záření se též označuje jako sálání, což je fyzikální proces, kdy látka emituje do prostoru energii nebo hmotu. Tato energie závisí na několika faktorech. Prvním faktorem je teplota tělesa. Množství vyzařené energie tohoto tělesa je popsáno Planckovým vyzařovacím zákonem. Druhým faktorem je barva povrchu, kdy nejmenší množství tepla je vyzařováno stříbrně lesklými povrchy (vnitřní povrch termosek), největší černými (chladiče kosmických lodí). Při teplotách nad $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ lze již jen s malou chybou považovat všechna tělesa za absolutně černé těleso, což je ideální těleso, které pohlcuje všechna přichozí záření a jeho vyzařovací charakteristika je závislá jenom na jeho povrchové teplotě. Energie vyzařována sáláním je přímo úměrná poslednímu třetímu faktoru, což je plocha.

4 Metoda konečných prvků

4.1 Postup řešení

V této části se budu věnovat metodě konečných prvků, kterých také využívá program Comsol Multiphysics. Metoda konečných prvků je obecná numerická metoda pro řešení parciálních diferenciálních rovnic. Základní postup při výpočtu rozložení pole ve vlnovodu lze shrnout do několika kroků [8]:

1. Profil vlnovodu rozdělíme na konečné prvky, přičemž v případě podélně homogenního to budou malé trojúhelníky, jejichž vrcholy nazýváme uzly, viz. *obr. 4* [8].



Obr. 4 Příklad dvojrozměrné sítě konečných prvků. Modrá čísla značí lokální uzly, červená globální.

2. Rozložení podélné složky elektrické intenzity vidu TM a magnetické vidu TE formálně aproximujeme nad každým konečným prvkem, nebo-li funkci vyjádříme pomocí neznámých hodnot intenzity v uzlech a známých báзовých funkcí (lineárních, kvadratických, kubických). Každá báзовая funkce nabývá jednotkové hodnoty v jednom uzlu a nulové v ostatních.
3. Formální aproximaci dosadíme do výchozího vztahu, tj. do řešené rovnice. Ke vztahu poté přičteme chybovou funkci tzv. residuum (které vzhledem k přesnosti aproximace by mělo být co nejmenší), poněvadž samotná formální aproximace není příliš přesná.
4. Minimalizaci reziduí provedeme vynásobením rezidua vhodnou váhovou funkcí a integrováním tohoto součinu přes celý profil analyzovaného vlnovodu. Dosazením báзовých funkcí všech uzlů za váhové dostaneme N rovnic o N neznámých, což nazýváme Galerkinovou metodou.
5. Vyřešením dané matice rovnic tzv. zobecněného problému vlastních čísel získáme hodnoty dosud neznámých uzlových intenzit. Výsledkem je vektor vlastních čísel (vektor kvadrátů kritických vlnových čísel jednotlivých vidů) a matice odpovídajících vlastních vektorů (uzlové hodnoty podélných složek intenzit jednotlivých vidů).
6. Po dosazení uzlových hodnot do formální aproximace získáme aproximační funkci podélné složky intenzity v každém bodě profilu analyzovaného vlnovodu. Z té pak lze spočítat všechny ostatní složky vektorů intenzity elektrického i magnetického pole.

Toto bylo pouze základní naznačení metody konečných prvků, ovšem při praktických výpočtech se postupuje poněkud jinak. V literatuře lze vyhledat již hotové matice koeficientů určených pro konkrétní normovaný konečný prvek. Matice se poté upraví pro daný konečný prvek a spojí společně s konečnými prvky do sítě.

4.2 Comsol Multiphysics a MATLAB

MATLAB představuje programovací prostředí a jazyk pro vědecko-technické numerické výpočty, počítačové simulace, návrhy algoritmů, modelování, analýzu a prezentaci dat, měření a zpracování signálů a spoustu dalších v technickém prostředí užitečných početních usnadnění. Samotný název MATLAB vznikl ze spojení MATrix LABoratory, podle čehož lze určit, že základní datovou strukturou při výpočtech jsou matice. Programovací jazyk vychází z Fortran.

Program Comsol Multiphysics je produktem švédské firmy Comsol. Následující pokusy budou prováděny ve verzi 3.3. Předešlé byly známy pod názvem FEMLAB, které dokonce do verze 3.0 fungovaly jen jako nadstavba programu MATLAB. Program je určen k řešení parciálních diferenciálních rovnic metodou konečných prvků.

5 Optimalizace v elektrotechnice

5.1 Lokální optimalizační metody a genetické algoritmy

Optimalizace je metoda hledání nejvhodnějšího řešení, při které měníme tzv. stavové proměnné optimalizovaného objektu a pozorujeme, jaký vliv to má na výsledné parametry. Optimalizaci provádíme dokud nedosáhneme požadovaných (optimálních) parametrů nebo se jim alespoň nepřiblížíme a lze je rozdělit na optimalizaci neomezenou, kdy se stavové prvky mohou měnit bez jakéhokoliv omezení a optimalizaci omezenou, kdy jsou zavedeny jisté omezující podmínky. Optimalizační problém lze tedy vyjádřit jako minimalizaci podle určitých parametrů, kde vektor x je prvkem n -rozměrného reálného prostoru [10]:

$$\min_{x \in R^n} F(x). \quad (7)$$

Pro takovou minimalizaci lze použít kritériální funkci $F(x)$ jako součet kvadrátů odchylek mezi aktuálními a požadovanými hodnotami parametrů [10]:

$$F(x) = \sum_{i=1}^m [y_i(x) - d_i]^2. \quad (8)$$

Aktuální hodnoty parametrů a minimalizovaná kritériální funkce závisí na sloupcovém vektoru stavových proměnných [10]:

$$x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]. \quad (9)$$

V případě omezené optimalizace se zavádějí optimalizační podmínky, které lze obecně vyjádřit [10]:

$$c_i(x) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, k', \quad (10)$$

$$c_i(x) \geq 0, \quad i = k'+1, \dots, k. \quad (11)$$

Pro případ (10) definujeme k' omezení rovností, přičemž funkce stavových proměnných musí být rovna nule. Pro případ (11) je funkce stavových proměnných větší nebo rovna nule a při vynásobení hodnotou -1 menší nebo rovna nule. Ve výše uvedených vztazích zastupuje stavové proměnné $x_1, x_2, \dots, x_n$, parametry optimalizovaného problému $y_1, y_2, \dots, y_n$ a žádané hodnoty těchto parametrů $d_1, d_2, \dots, d_n$. Klasifikace optimalizačních problémů se provádí na základě formulací kritériálních funkcí (nejjednodušší je funkce jedné proměnné) a omezujících podmínek (nejjednodušší je bez omezujících podmínek) a hraje důležitou roli při výběru vhodné optimalizační metody. Podobným způsobem jako lze klasifikovat optimalizační úlohy, lze klasifikovat i optimalizační metody. Jedno z rozdělení je například na globální a lokální. Nevýhodou lokálních metod je schopnost najít globální minimum pouze v blízkém okolí počáteční pozice a může tedy dojít k „uváznutí“ v minimu lokálním. Tento problém jsou však metody globální schopny překonat, ale jejich nevýhodou je pro změnu vyšší výpočetní náročnost. Mezi nejpoužívanější globální optimalizační metody patří hlavně genetické algoritmy (GA), u kterých není kladen žádný velký požadavek na kritériální funkci,

nýbrž jde spíše o to, aby byl výpočet rychlý, poněvadž se mnohokrát opakuje. Stavové veličiny mohou být spojité nebo diskrétní, avšak pokud jsou spojité, je nutná diskretizace. Mezi nejvíce používanými optimalizačními metodami pracujícími s genetickými algoritmy jsou dva zásadní rozdíly:

1. GA pracují se symbolickou reprezentací parametrů systému, které se nazývají chromozomy (sled nul a jedniček s délkou rovnající se počtu alel v jednom genu násobených počtem parametrů).
2. GA neoptimalizují najednou jediné řešení, ale pracují současně s celou skupinou různých řešení nazývaných se populace (vytvořených ze skupiny chromozomů, každý prvek je označován jako jedinec).

Na začátku dojde k vytvoření výchozí populace a samotná optimalizace spočívá ve zkvalitňování výměnou jedinců (nikoliv změnou počtu). Každá nová populace vytváří další novou generaci. Převzato z [10].

5.2 PSO algoritmus

K dalším globálním metodám optimalizace patří algoritmus PSO, což je optimalizace pracující na principu včelího roje, která bývá zpravidla efektivnější při hledání globálního minima nelineárních funkcí než genetické algoritmy. Každé řešení se skládá z množiny parametrů a reprezentuje bod v dimenzionálním prostoru. Optimalizace metodou včelího roje, k němuž je použit algoritmus PSO, je robustní pseudonáhodná výpočetní technika zakládající se na pohybu a inteligenci včelího roje. Tato metoda ukazuje, jak efektivně optimalizovat obtížnou nespojitou mnohorozměrnou problematiku ve variantách polí. V roce 2002 byla na konferenci předvedena úspěšná aplikace této metody při návrhu antény. Při aplikaci lze na PSO analogicky nahlížet jako na včelí roj hledající květiny na louce. Úkolem včel je najít na louce oblast s největší hustotou květin. Na začátku jsou včely v náhodné oblasti s náhodnou rychlostí na poli. Každá včela si může zapamatovat místo, kde našla nejvíce květin a nějakým způsobem ví i o oblastech, kde našly ostatní včely hojnost květin. Čím více informací má včela o tom, kde našla nejvíce květin a kde našly ostatní včely nejvíce květin, tím více zrychluje změny své trajektorie. Jestliže je nalezena oblast s novou nejvyšší koncentrací květin, přelétne tuto oblast celý roj a poté je tažen zpět k předešlým. Tímto způsobem stále kontrolují všechna místa, kde byla nalezena lokální maxima s domněním, že najdou absolutní maximum, ke kterému jsou neustále přitahovány. Nakonec všechny včely krouží kolem tohoto globálního maxima.

Slovník termínů algoritmu PSO použitý při výpočtu:

- *Particle* nebo *Agent* je jedinec v roji. Každý jedinec má za úkol urychlit svůj pohyb směrem k nejlepší osobní a nejlepší celkové poloze, zatímco kontroluje aktuální umístění.
- *Location* nebo *Position* představují souřadnice jedince v N-rozměrném prostoru. Tyto souřadnice reprezentují řešení daného problému v definovaném prostoru.
- *Swarm* je celkové seskupení jedinců (roj).

- *Fitness* neboli kritériální funkce reprezentuje hodnotu nejlepší vypočtené pozice. Tato funkce udává vztah mezi fyzickým problémem a algoritmem optimalizace.
- p_{best} je pozice v početním prostoru s nejlepším fitness pro daného jedince. Tato pozice je stále porovnávána s aktuálním umístěním jedince, a jakmile se objeví místo s lepším fitness, je touto hodnotou přepsána.
- g_{best} je pozice v početním prostoru s nejlepším fitness pro celý roj. Tato pozice je jediná pro celý roj a je to nejlepší hodnota fitness vybraná ze všech p_{best} . Jakmile je jedincem nalezeno nové p_{best} , které má lepší fitness než g_{best} , tak je nahrazeno touto hodnotou.
- v_{max} je největší povolená rychlost jedince v daném směru.

Samotný výpočetní algoritmus lze stručně popsat takto:

1. Nejprve se definuje početní prostor. Prvním krokem je vybrání parametrů, kterým je třeba dát racionální rozsah, a tedy minimální ($Xmin_n$) a maximální ($Xmax_n$) příslušné hodnoty, kterých může dosáhnout při samotném řešení, kde n může nabývat hodnot od 1 do N v N -rozměrném prostoru.
2. Druhý krok je definování kritériální funkce, která je důležitá při propojení optimalizačního algoritmu a řešeného problému. Tento krok je velmi důležitý. Musí být vhodně zvolena specifická funkce pro danou optimalizaci.
3. Inicializace náhodné počáteční polohy roje a jejich rychlostí (jak směr, tak velikost). Počáteční poloha každého jedince se stává ihned jeho p_{best} , přičemž je dále toto lokální maximum srovnáváno s aktuální hodnotou. Ze všech počátečních p_{best} je vybráno g_{best} , které je také porovnáváno při každé změně p_{best} některého z jedinců.
4. Následuje systematický let všech jedinců řešeným prostorem, které jsou aplikovány na každého jedince individuálně:
 - a) Kritériální funkce zpracovává souřadnice jedince a vrací hodnotu fitness, která je porovnávána s p_{best} jedince a následně g_{best} celého roje. Případně dojde k přepsání těchto hodnot při splnění podmínek.
 - b) Hlavním prvkem celé optimalizace je manipulace s rychlostmi jedinců, které se mění podle relativního umístění p_{best} a g_{best} . Každý další pohyb je popsán rovnicí rychlosti [11]:

$$v_{n+1} = wv_n + c_1 rand() \cdot (p_{best,n} - x_n) + c_2 rand() \cdot (g_{best,n} - x_n). \quad (12)$$

Zde v_n je rychlost jedince a x_n jsou jeho souřadnice v n -tém rozměru. w je vážený faktor pro starou rychlost (nakolik zůstane směr jedince neovlivněn) a c_1 a c_2 jsou mírou relativního tahu k p_{best} a g_{best} . c_1 a c_2 udávají jakou měrou jsou ovlivněni jedinci a celý roj vzpomínkou na jejich nejlepší umístění. Funkce náhodného čísla $rand()$ může nabývat hodnot v rozmezí od 0 do 1. Zavedením náhodné funkce do optimalizace má za cíl simulovat nepatrnou nepředvídatelnou součást přirozeného chování roje. Díky těmto náležitostem

jedinci, kteří jsou vzdálenější od g_{best} nebo p_{best} více, se k nim začnou více orientovat než jedinci, kteří jsou blíž.

c) V dalším kroku jsou spočteny nové souřadnice jedince podle vztahu [11]:

$$x_{n+1} = x_n + \Delta t \cdot v_{n+1}. \quad (13)$$

Zde jsou x_n opět souřadnice jedince v n -tém rozměru, v_{n+1} nová rychlost jedince a Δt je krok odpovídající jedné iteraci, a tedy době změny pozice jedince.

5. Celý proces se opakuje, dokud není nalezeno optimální řešení nebo dokud neproběhne zadaný počet iterací.

Zkušenosti ukázaly, že zavedení v_{max} , vážených faktorů c_1 a c_2 a inerčního faktoru w ne vždy omezily jedince ve vymezeném prostoru, a proto byly zavedeny tři různé okrajové podmínky:

- Absorbing walls – když jedinec „narazí“ do hranice řešeného prostoru jedné z dimenzí, jeho energie je absorbována, rychlost se vynuluje a jedinec je tažen zpět do řešeného prostoru.
- Reflecting walls – když jedinec „narazí“ do hranice jedné z dimenzí, jeho rychlost se mění a jedinec se odráží zpět do řešeného prostoru.
- Invisible walls – jedinci mohou proletět za hranice řešeného prostoru, avšak není ohodnocena jejich fitness.

Všechny výše uvedené náležitosti jsou základní informace k aplikování PSO algoritmu v praxi k řešení globálních optimalizačních problémů. Tento text je převzat z anglicky psané verze [11].

6 Praktická část

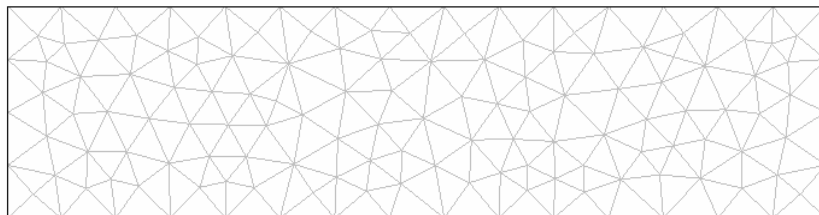
6.1 Úvod do modelování

Úkolem této práce bylo modelovat v programu Comsol Multiphysics ztrátový vlnovod a pozorovat změny v jeho struktuře po vložení ztrátového dielektrika. Vše bylo pro jednoduchost modelováno dvourozměrně z „horního“ pohledu, aby šlo co nejlépe pozorovat, co daná vlna ve vlnovodu vykoná. Pozorování bylo zaměřeno na dominantní elektrický vid TE_{10} , pro který postačí znát pouze širší rozměr příčného průřezu vlnovodem. Kmitočet byl zvolen tak, aby ležel v pásmu jednovídrovosti, a to $f = 10$ GHz, což vyhovovalo podmínce pro dolní kritický kmitočet ($f_{krit} = 7,5$ GHz) a také pro dolní kritický kmitočet následujícího vidu TE_{20} ($f_{krit} = 15$ GHz). Při samotném modelování bylo nejprve prověřováno chování vlny bez uvažování tepelných ztrát, což bylo obsahem semestrálního projektu 1. Druhá část práce se věnovala ohřívání struktury vlnovodu vlivem vloženého ztrátového dielektrika. V závěrečné práci byl daný model rozšířen o více dielektrických překážek mající různé hodnoty permitivity a celá struktura byla optimalizována jako filtr pomocí algoritmu PSO.

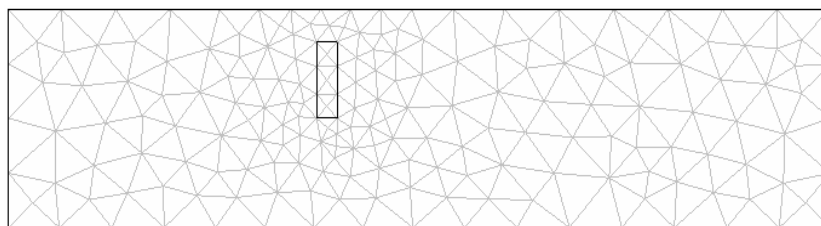
6.2 Vlastnosti ovlivňující průchozí elektrickou vlnu

6.2.1 Modelování vlnovodu

Cesta ke spuštění požadovaného módu je následující: *RF-Module-> In-Plane Waves-> Hybrid-Mode Waves-> Harmonic propagation*. Byl namodelován obdélníkový vlnovod s šířkou 20 mm a délkou 80 mm. V menu *Physics-> Boundary Settings-> Boundary condition* byly stanoveny okrajové podmínky jednotlivých stran. Podélné strany jsou ve funkci dokonalého elektrického vodiče (*perfect electric conductor*), levá vstupní strana odpovídá vstupu budícího elektrického pole (*elektrick field*) a pravá byla nahrazena ideální pohlcující vrstvou (*scattery boudnering condition*), aby nemusel být konec ponechán naprázdno nebo zakončen zkratem, který by způsobil vznik stojatého vlnění. Poté byl nastaven kmitočet vlny v menu *Physics-> Scalar Variables-> Frequency* 10 GHz. Další modelování spočívalo v modelování překážky, kterou vlna bude mít v cestě v podobě dielektrické destičky. V následujícím kroku byla vygenerována síť trojúhelníkových konečných prvků zobrazená na obr. 5, která se dá případně zjemnit (*Refine Mesh*) nebo zpět zhrubit (*Initialize Mesh*). Je uveden případ s i bez dielektrické destičky.



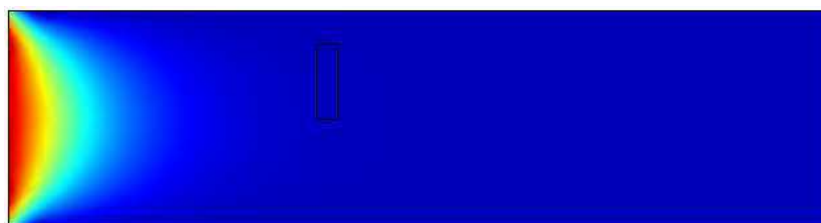
a)



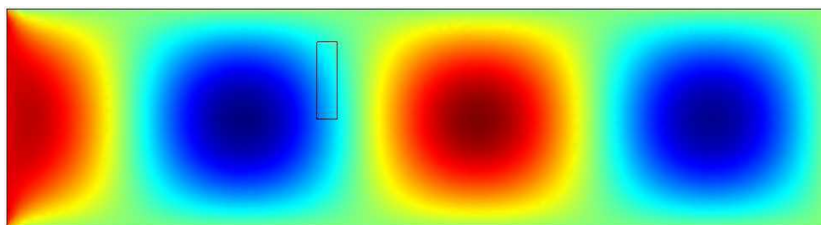
b)

Obr. 5 Síť trojúhelníkových konečných prvků pro vlnovod bez vložené dielektrické překážky (a), s vloženou dielektrickou překážkou (b).

V dalším kroku byla namodelována dielektrická destička o rozměrech 2 mm a 7 mm a vložena do vlnovodu. Do okna v menu *Draw-> Create Composite Object-> Set formula* bylo vepsáno “ $R1+R2$ “, čímž bylo docíleno spojení obou objektů v celek. Posledním krokem je spuštění výpočtu (*Solve*). Případy, které byly modelovány jako první, zatlumení vlny o kmitočtu nižším než je dolní hranice pásma jednovidovosti, nazývané pásmo nepropustnosti (*obr. 6*) a průchod vlny ideálním bezeztrátovým vlnovodem v pásmu jednovidovosti (*obr. 7*).



Obr. 6 Bezeztrátový vlnovod buzený elektrickým polem o kmitočtu $f = 7$ GHz náležící pásmu nepropustnosti.



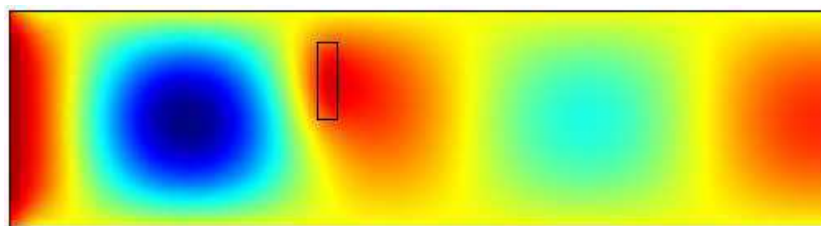
Obr. 7 Bezeztrátový vlnovod buzený elektrickým polem o kmitočtu $f = 10$ GHz náležící pásmu jednovidovosti.

Jakmile byly přes menu *Physics-> Subdomain settings* pozměněny některé z parametrů destičky, začala se vlna různým způsobem deformovat jako reakce na průchod destičkou. Tři základní vlastnosti, které mohly průchodí elektrickou vlnu ve vlnovodu ovlivnit jsou v daném případě permitivita, permeabilita a jako hlavní ztrátový činitel měrná elektrická vodivost. Nejprve byly modelovány každé vlastnosti zvlášť, přičemž hodnoty, na kterých lze každou nejlépe prezentovat jsou uvedeny níže.

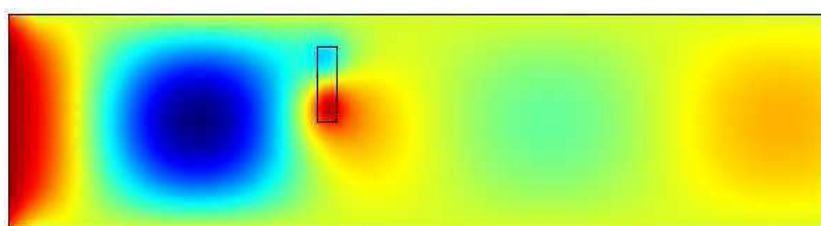
6.2.2 Změny parametrů vloženého dielektrika

Elektrická vlna je při průchodu destičkou přitahována prostorem s vyšší permitivitou, přičemž každá kmitna i uzel obklopují zcela destičku se snahou přiblížit se maximem co nejbliže k jejímu středu viz. *obr. 8a*. Tento jev doprovází vznik stojatého vlnění právě uvnitř

destičky. Po průchodu se opět rozprostře po celé šířce vlnovodu, ale už s ne tak vysokou maximální hodnotou jako na jejím vstupu. Při dalším zvýšení permitivity lze pak od určité hodnoty lépe pozorovat snížení vlnové délky stojaté vlny uvnitř destičky, což je nejlépe vidět na *obr. 8b*. S tímto jevem přichází i větší pokles amplitudy každého kmitu.



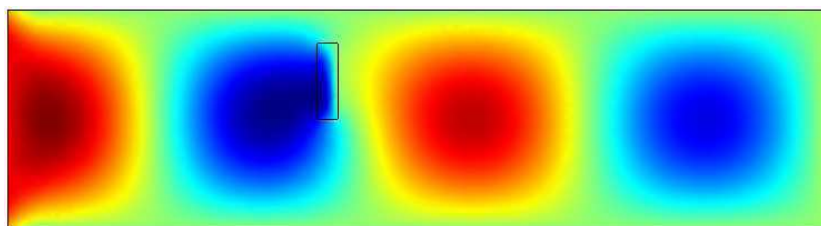
a)



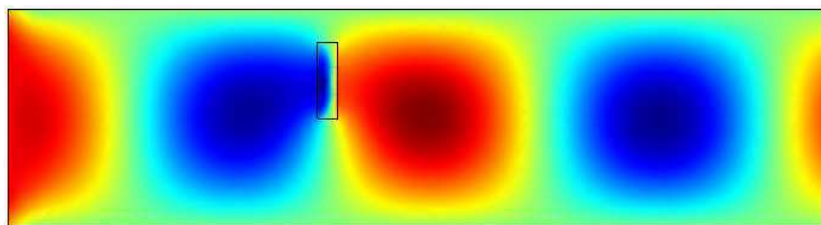
b)

Obr. 8 Vlnovod s vloženou překážkou mající: $\epsilon_{r1} = 7$ (a), $\epsilon_{r2} = 20$ (b).

Při zvýšené hodnotě permeability se vlna nehromadí celá kolem destičky jako v případě zvýšené permitivity, nýbrž je stále roztažena po celé šířce vlnovodu a jen maximum každého kmitu je přitahováno do středu destičky viz. *obr. 9a*, a tedy opět vznik stojatého vlnění uvnitř. Jestliže je zvýšena hodnota permeability, pak se v destičce sejdou amplitudy a klesne vlnová délka vlny uvnitř destičky, což je na *obr. 9b*. V obou případech nastávají ztráty, které se znatelně projeví až u vyšších hodnot po celé délce vlnovodu mimo destičku.



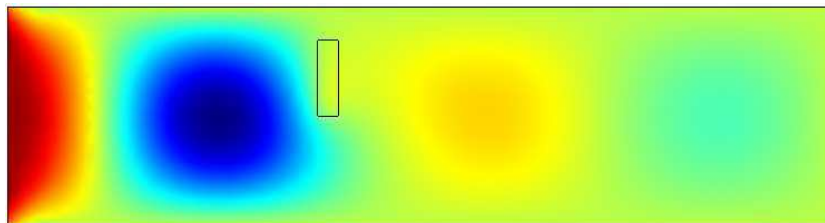
a)



b)

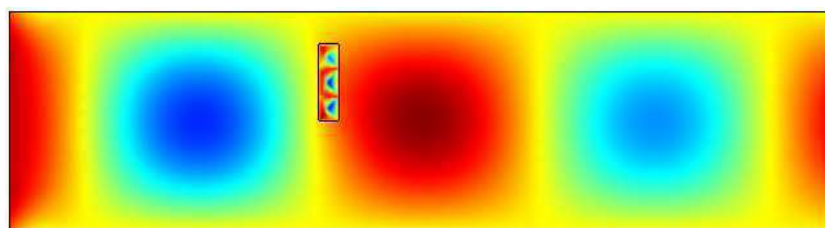
Obr. 9 Vlnovod s vloženou překážkou mající: $\mu_{r1} = 20$ (a), $\mu_{r2} = 50$ (b).

Zvýšením hlavního ztrátového činitele, a tedy měrné elektrické vodivosti, se znatelně projeví ztráty v tomto vlnovodu, což lze odpozorovat z jediného obrázku (*obr. 10*). Je to také hlavní vlastnost, která zapříčiňuje tepelné změny uvnitř vlnovodu. Na obrázku již není tak zřetelný průchod vlny destičkou, její deformace a projevy, avšak níže bude více rozpracován její vliv na změny teploty uvnitř struktury vlnovodu.

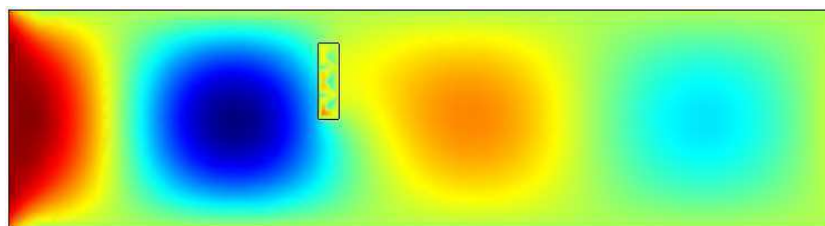


Obr. 10 Ztrátový vlnovod s vloženou překážkou mající $\sigma = 15 \text{ S.m}^{-1}$.

Tímto byla prověřena každá vlastnost jednotlivě a její vliv na průchod vlnu. V dalším kroku se pokračovalo nejprve na modelu, kterému byla dodána permitivita i permeabilita, u kterých ztráty nejsou tak znatelné a tudíž lze lépe prostudovat vliv obou konstant najednou. Ten se projeví hlavně uvnitř dielektrické destičky, kde se opět tvoří stojaté vlny, jak je vidět na *obr. 11a*. S jejich zvyšujícími se hodnotami tento jev vykazuje intenzivnější účinky, a přidáme-li destičce ještě měrnou elektrickou vodivost, pak jsou i ztráty viditelnější (*obr. 11b*).



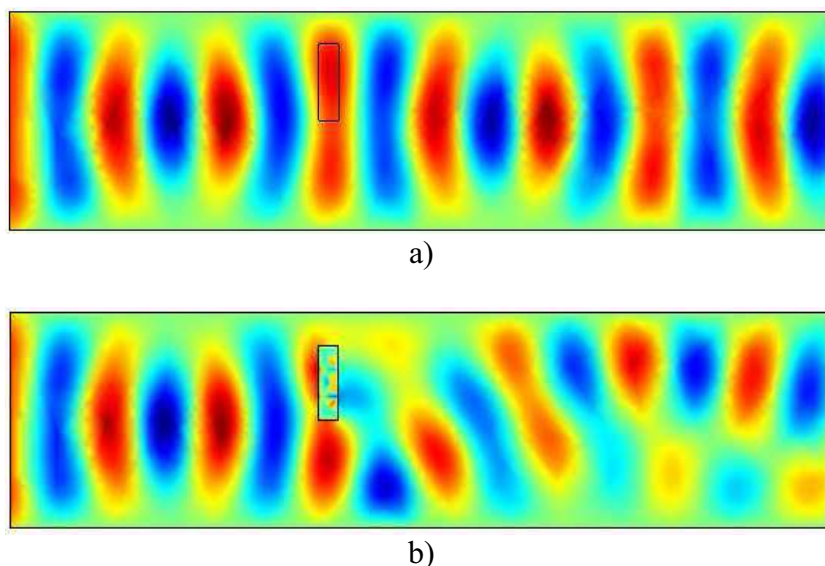
a)



b)

Obr. 11 Vlnovod s vloženou překážkou mající: $\epsilon_r = 20$ a $\mu_r = 20$ (a), $\epsilon_r = 20$, $\mu_r = 20$ a $\sigma = 10 \text{ S.m}^{-1}$ (b).

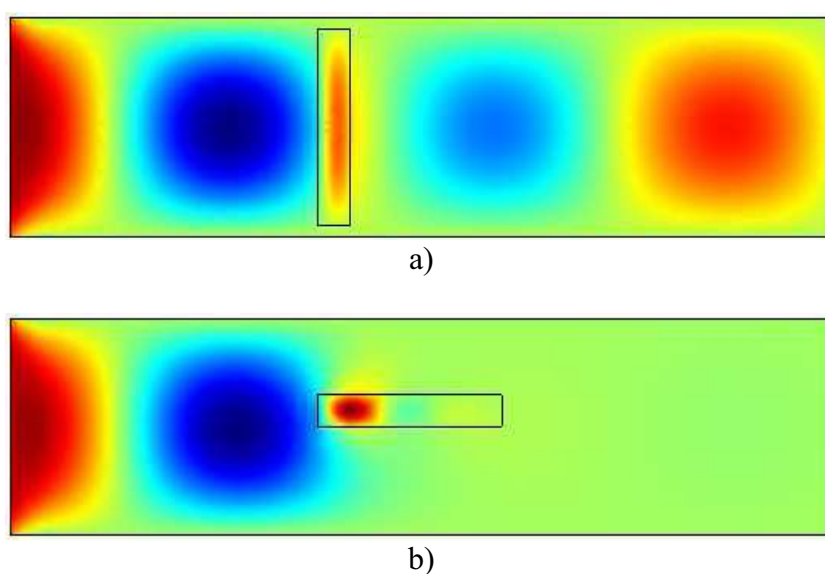
Výše uvedené náležitosti byly zkoumány pro vid TE_{10} , pro který bylo vše nejvíce zřetelné. U vidů s vyšší mezním kmitočtem již vlny ve vlnovodu interferují (*obr. 12a*) a při změně některé z vlastností destičky vzniká uvnitř složitěji rozpoznatelné stojaté vlnění (*obr. 12b*).

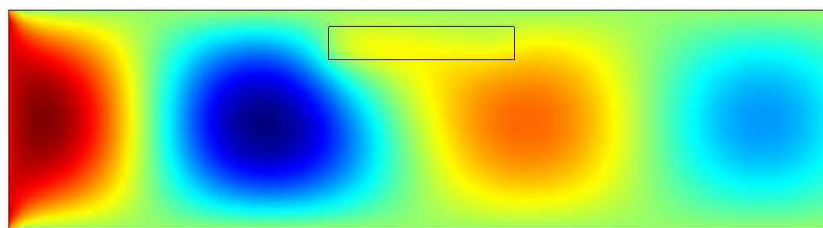


Obr. 12 Elektrické pole s vyšším kmitočtem než je pásmo jednovidovosti pro bezztrátový vlnovod (a), ztrátový vlnovod (b).

6.2.6 Změny rozměrů a polohy vloženého dielektrika

Pro pásmo jednovidovosti byl ještě prověřen vliv vlastností dielektrika při změně rozměrů a polohy destičky, načež jsou uvedeny tři příklady, na kterých lze intenzitu projevu pozorovat nejlépe. První případ je pro destičku protaženou po téměř celé šířce vlnovodu, což se projeví vyššími ztrátami při nižších hodnotách dielektrických parametrů destičky, poněvadž je vlna nucena celá projít danou překážkou (*obr. 13a*). Další dva případy jsou pro stejně velkou destičku i stejné parametry, ale ztráty jsou viditelně různé v závislosti na tom, kde je destička umístěna (*obr. 13b, c*). Pro umístění ve středu vlnovodu, a tedy v amplitudě elektrické intenzity, jsou ztráty mnohokrát vyšší (vlna je téměř zatlumena) než pro případ, kdy je umístěna při okraji stěny a vlna jí proniká jen svými nejnižšími hodnotami.





c)

Obr. 13 Vlnovod s vloženou překážkou se změněnými rozměry: protáhnutí do šířky vlnovodu (a), protáhnutí podél vlnovodu ve středu (b), protáhnutí podél vlnovodu při kraji (c).

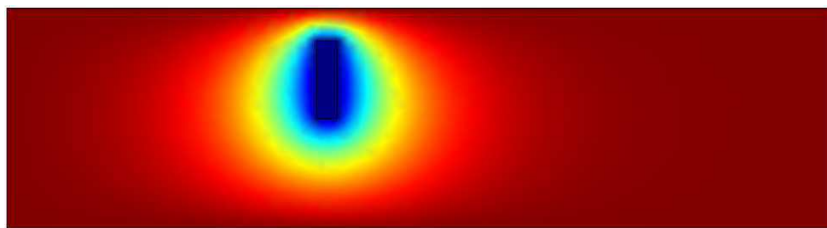
6.3 Ohřívání vlnovodu

6.3.1 Modelování vlnovodu

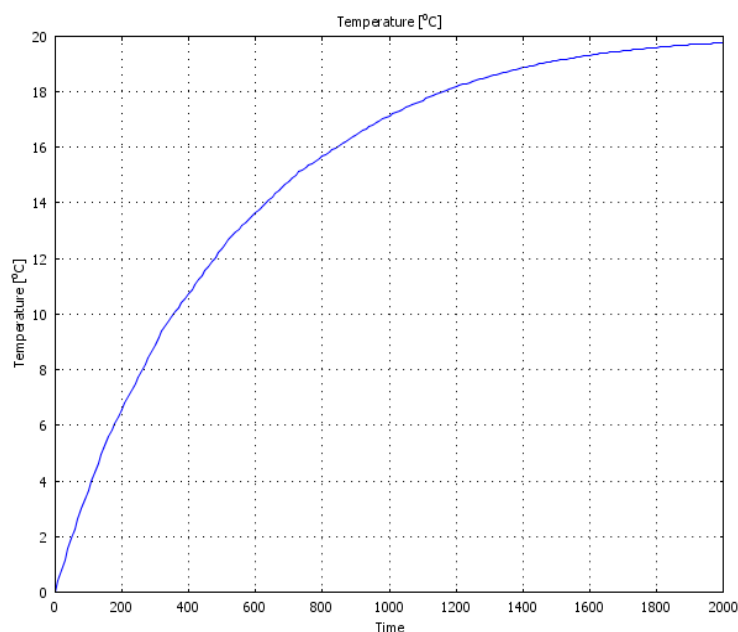
V této fázi modelování byla snaha zachytit co nejlépe ilustrující příklady ohřívání struktury vlnovodu opět modelováním v programu Comsol Multiphysics. Při samotném úvodu byl zvolen mód s cestou: *RF-Module-> Electro-Thermal Interaction-> In-Plane Microwave Heating-> Hybrid-Mode Microwave heating-> Transient analysis*. Opět byl namodelován vlnovod s destičkou stejných parametrů jako v předchozím případě, včetně okrajových podmínek pro elektrický model, avšak nyní mu byly přidány i tepelné vlastnosti a okrajové podmínky. Všechny strany vlnovodu byly v *Boundary settings* nastaveny na *Temperature* a jako počáteční teplota byla zvolena $T_0 = 293,15$ K, což odpovídá na Celsiově stupnici hodnotě 20°C . Okrajové podmínky destičky byly ponechány jako *Continuity*, nemají tedy žádnou tepelně izolační vlastnost a jsou pro teplo průchozí. Při nastavení vnitřního prostředí obou objektů byly v menu *Subdomain settings* dodány vnitřku vlnovodu přibližně vlastnosti vzduchu, a to tepelná vodivost $k = 0,0262 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$, hustota $\rho = 0,0012505 \text{ kg.m}^{-3}$ a měrná tepelná kapacita $c_p = 720 \text{ J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}$. Vlastnosti vnitřního prostředí destičky byly také upraveny a jejich hodnoty jsou tepelná vodivost $k = 0,55 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$, hustota $\rho = 1050 \text{ kg.m}^{-3}$ a měrná tepelná kapacita tohoto vnořeného dielektrika činila $c_p = 3640 \text{ J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}$. Dále již byly studovány pouze teplotní změny, způsobené vnořeným ztrátovým dielektrikem. Vlnovod byl buzen elektrickým polem o intenzitě $E_{0z} = 100 \text{ V.m}^{-1}$, aby změny teploty byly dostatečně zřetelné. Dalším důležitým kritériem je doba trvání každého děje, která byla ustanovena na $t = 2000$ s, což je doba, po které se teplota v celém vlnovodu téměř ustálí.

6.3.2 Bezeztrátové dielektrikum

Na prvním pokusu je velmi dobře vidět, jak se teplota rozšíří vzduchem ve vlnovodu během několika málo milisekund, přičemž barevné odstíny charakterizují její rozložení od 0 do 20°C (syť červená = nejvyšší hodnota, syť modrá = nejnižší hodnota). V dalších pokusech už bylo vše zobrazeno v pravoúhlém grafu závislosti teploty na čase informující o měnící se teplotě na konkrétní souřadnici uvnitř destičky poblíž střední osy vlnovodu viz. *obr. 15*. Na *obr. 14* je stav, který charakterizuje počáteční teploty po celém prostoru vlnovodu. U všech dalších grafů je nutno uvažovat, že jejich počáteční teploty mají toto rozložení.



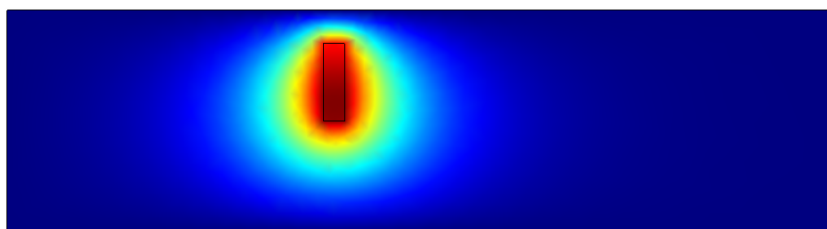
Obr. 14 Rozložení teploty ve vlnovodu na začátku každého ohřívání při $T_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.



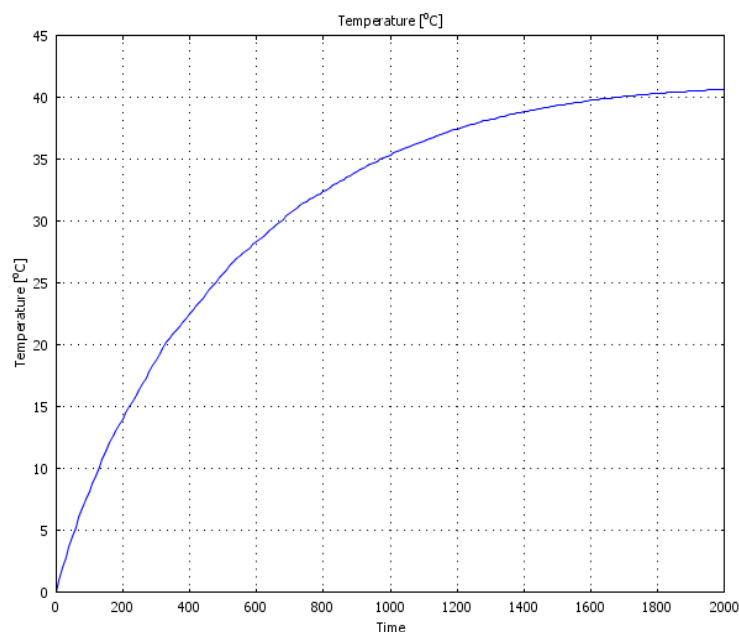
Obr. 15 Graf závislosti teploty na čase uvnitř překážky bez uvažování ztrát.

6.3.3 Ztrátové dielektrikum

Jakmile byla destičce dodána elektrická vodivost, začal vlnovod působit jako útlumový a ve ztrátovém dielektriku se začala elektrická energie měnit v teplo o určité teplotě. Působení elektrického pole na destičku, která je elektricky vodivá, vyvolalo náhlý vzrůst této teploty. Na *obr. 16* je stav při měrné elektrické vodivosti $\sigma = 0,1\text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ po uplynutí stanoveného času $t = 2000\text{ s}$. Uvnitř destičky je nyní maximální teplota a vyzařuje teplo do okolí, což představuje dutina vlnovodu. Je samozřejmostí, že s rostoucí vzdáleností od destičky teplota klesá. Zobrazen je opět i graf teplotní závislosti na čase viz. *obr. 17*.

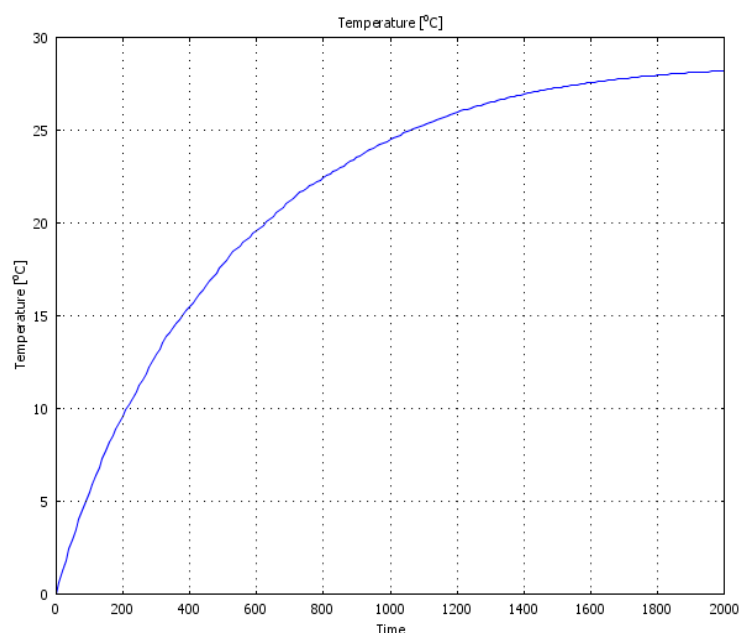


Obr. 16 Rozložení teploty ve ztrátovém vlnovodu v čase $t = 2000\text{ s}$.

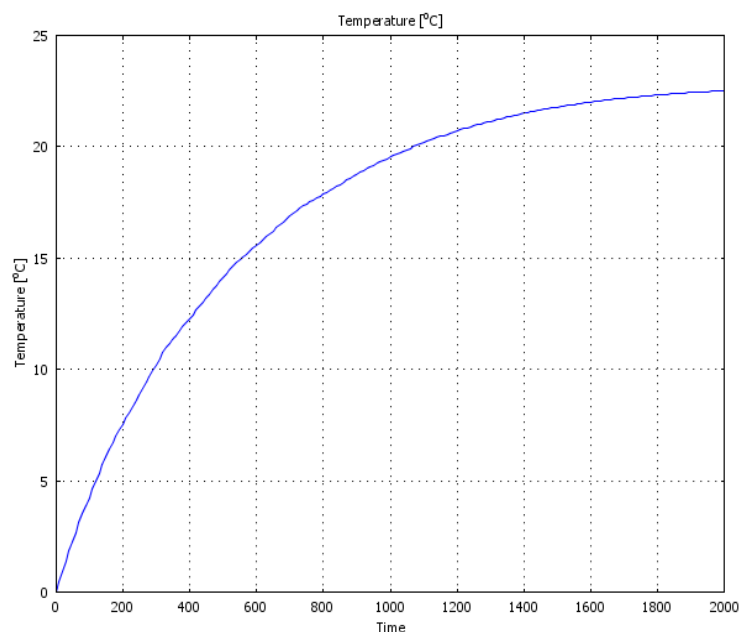


Obr. 17 Graf závislosti teploty na čase uvnitř překážky pro $\sigma = 0,1 \text{ S.m}^{-1}$.

Pokračováním tohoto pokusu bylo zmenšení, případně zvýšení, měrné elektrické vodivosti, a zobrazení teplotních změn pouze v pravoúhlých grafech, neboť pohled na vlnovod by se oproti *obr. 16* nijak znatelně nezměnil. Bylo tedy provedeno desetinásobné zvětšení na hodnotu 1 S.m^{-1} (*obr. 18b*) a desetinásobné zmenšení na hodnotu $0,01 \text{ S.m}^{-1}$ (*obr. 18a*), přičemž obě změny se projeví již ne tak velkým stoupáním teploty na celém intervalu ohřívání.



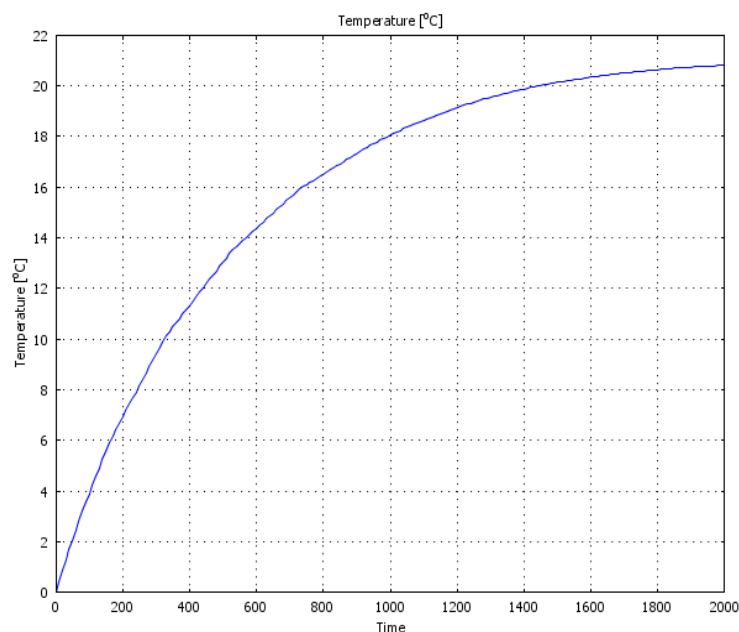
a)



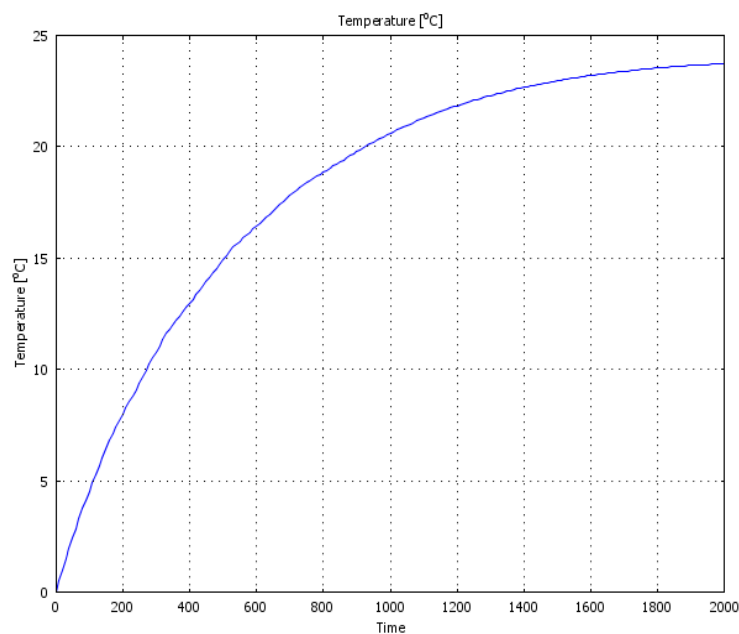
b)

Obr. 18 Graf závislosti teploty na čase uvnitř překážky pro $\sigma = 0,01 \text{ S.m}^{-1}$ (a), $\sigma = 1 \text{ S.m}^{-1}$ (b).

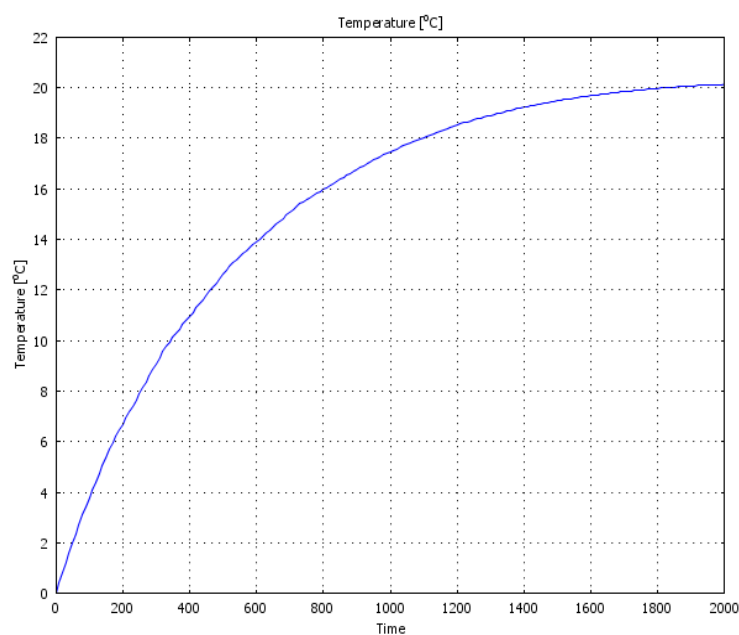
Závěrem této fáze práce je poukázáno, jak může ohřívání struktury ovlivnit zvýšená relativní permitivita a permeabilita. Hodnoty jsou voleny opět tak, aby bylo vše, co nejvíce zřetelné v prezentujících pravoúhlých grafech. Přidáním těchto vlastností dielektriku bylo docíleno menšího vzrůstu teploty ilustrovanou pro hodnotu měrné elektrické vodivosti $\sigma = 0,1 \text{ S.m}^{-1}$. V grafech na *obr. 19a, b, c* si lze tedy povšimnout, že elektrická vlastnost relativní permitivita značně sníží ohřívání destičky, u relativní permeability je také pokles, který se ovšem neprojevuje již tak intenzivně. Poslední graf poukazuje na velmi malé zvýšení maximální teploty při vyšších hodnotách obou předchozích veličin.



a)



b)



c)

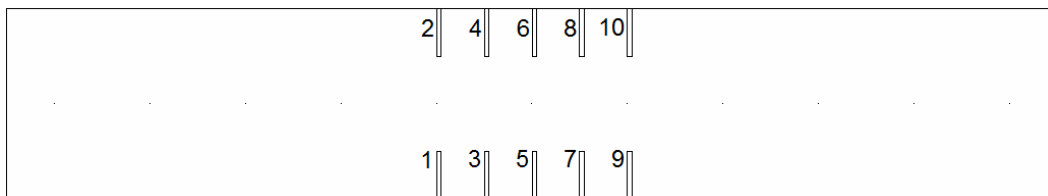
Obr. 19 Graf závislosti teploty na čase uvnitř překážky pro $\sigma = 0,1 \text{ S.m}^{-1}$ a: $\epsilon_r = 2$ (a), $\mu_r = 5$ (b), $\epsilon_r = 2$ a $\mu_r = 5$ (c).

6.4 Optimalizace pomocí PSO algoritmu

6.4.1 Úvod do řešení problému

V poslední části této práce byla struktura celého vlnovodu rozšířena na 10 dielektrických destiček (kolíků) a vlnovod optimalizován jako filtr v programu

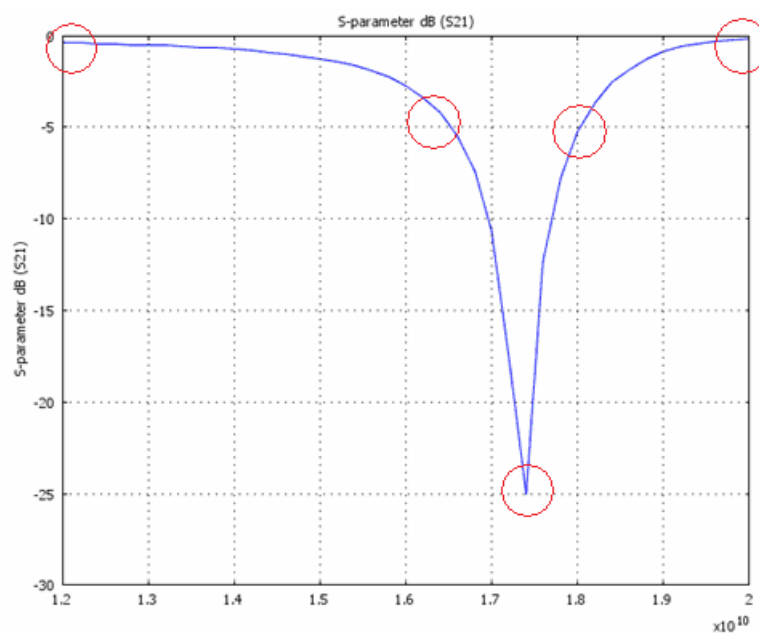
MATLAB. V této fázi bylo také využito toho, že program Comsol Multiphysics býval v dřívějších letech nadstavbou programu MATLAB. Nejprve byl namodelován daný filtr v programu Comsol Multiphysics, jak je vidět na *obr. 20*, přičemž čísla označují pořadí kolíků. Celý vlnovod byl protažen do délky na 110 mm, šířka byla zachována na 20 mm. Kolíky mají rozměry 0,5 mm a 5 mm. Nutností bylo pozměnit veličiny, které byly dále měněny a zobrazovány při následujícím řešení problému. Celý model byl uložen jako *m-file* v Comsol Multiphysics a spuštěn v MATLABu, kde byly jako vstupní hodnoty nastaveny kmitočet f [GHz] a relativní permitivity kolíků ϵ_r a výstupní hodnotou byl činitel přenosu s_{21} . Tento *m-file* byl poté „volán“ jako funkce v hlavním zdrojovém kódu, který již představoval samotnou optimalizaci pomocí PSO algoritmu (viz. *příloha*). V hlavním zdrojovém kódu byly hodnoty relativních permitivit nejprve náhodně vygenerovány od 1 do 30 a v tomto intervalu se drží v průběhu celého optimalizačního cyklu. Dále zde byly pevně dány hodnoty činitele přenosu vlnovodového filtru na diskretních kmitočtech (*tab. 1*), ke kterým by měla optimalizace dospět, vycházející z kmitočtové charakteristiky zobrazené na *obr. 21*. V červených kruzích jsou označeny konkrétní kmitočtové závislé přenosy z *tab. 1*.



Obr. 20 Vlnovodový filtr s označením pozice jednotlivých kolíků (viz. *tab. 2*).

f [GHz]	12	16,4	17,4	18	20
s_{21} [dB]	-0,4	-4,8	-25	-5,1	-0,2

Tab. 1 Hodnoty činitele přenosu na konkrétních kmitočtech.



Obr. 21 Výchozí kmitočtová charakteristika činitele přenosu.

Vstupními parametry optimalizace jsou počet generací (počet iteračních kroků ve kterých bude daná optimalizace probíhat) a počet jedinců (udává kvalitu optimalizace). Výstupními parametry jsou relativní permitivity kolíků, pro které je přenosová funkce na daných kmitočtech optimalizována, a průběh klesající chybové funkce v závislosti na počtu iteračních kroků.

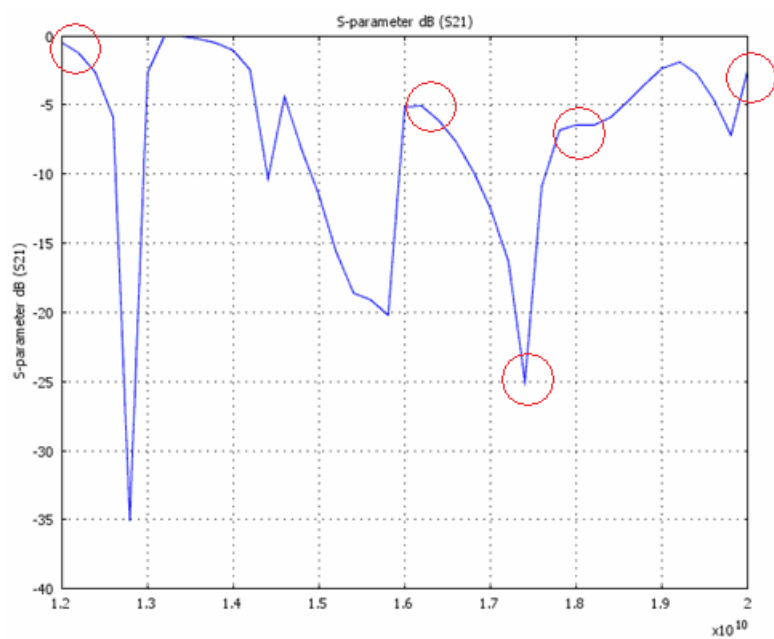
6.4.2 Výsledky optimalizace

Po provedení několika optimalizací byly vybrány tři příklady, pro které bylo dosaženo nejlepších výsledků, a byly zobrazeny jejich chybové funkce a přenosové charakteristiky na základě vypočtených permitivit kolíků. Hodnoty relativních permitivit zaokrouhlených MATLABem na čtyři desetinná místa jsou uvedeny v *tab. 2* s odkazem na jejich pozici ve vlnovodu označenou na *obr. 20*.

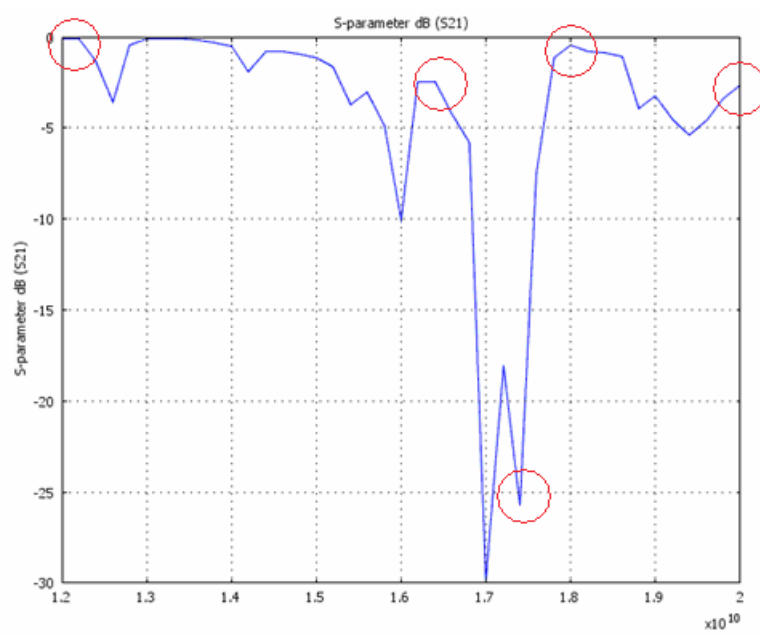
pozice kolíku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a ϵ_r [-]	27,5487	16,2897	7,6237	12,015	17,6768	18,0479	21,8596	24,4353	23,6572	16,2671
b ϵ_r [-]	18,2378	6,8944	11,8423	15,9112	12,2845	12,2086	12,4681	17,0919	13,8866	16,1884
c ϵ_r [-]	2,0944	26,6699	27,4853	24,0893	3,8627	8,5943	10,7253	20,7121	4,96	21,9156

Tab. 2 Hodnoty relativních permitivit kolíků po optimalizaci pro: 10 iterací a 10 jedinců (a), 20 iterací a 20 jedinců (b), 20 iterací a 40 jedinců (c).

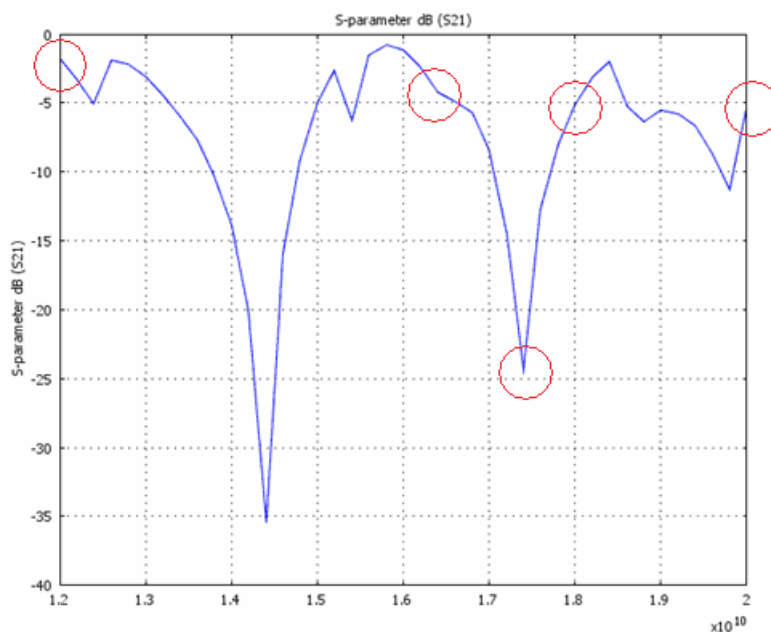
V programu Comsol Multiphysics byl dále namodelován vlnovod s relativními permitivitami uvedenými v *tab. 2a, b, c* a v grafech vyobrazeny závislosti činitele přenosu na kmitočtu. *Obr. 22a, b, c* zobrazuje přenosovou charakteristiku filtru s parametry viz. *tab. 2a, b, c*. Optimalizace byla aplikována pouze na pěti diskrétních hodnotách kmitočtu z celého zobrazeného pásma, proto průběh přenosových charakteristik zcela neodpovídá průběhu výchozímu. V červených kruzích jsou však označeny hodnoty optimalizovaného činitele přenosu, které nejvíce odpovídají výchozím na *obr. 20a*. Pokud by daná optimalizace probíhala na větším počtu kmitočtů ze zvoleného pásma, bylo by dosaženo přesnějších výsledků a průběhy by se více podobaly výchozímu, avšak celý proces výpočtu by trval delší dobu.



a)



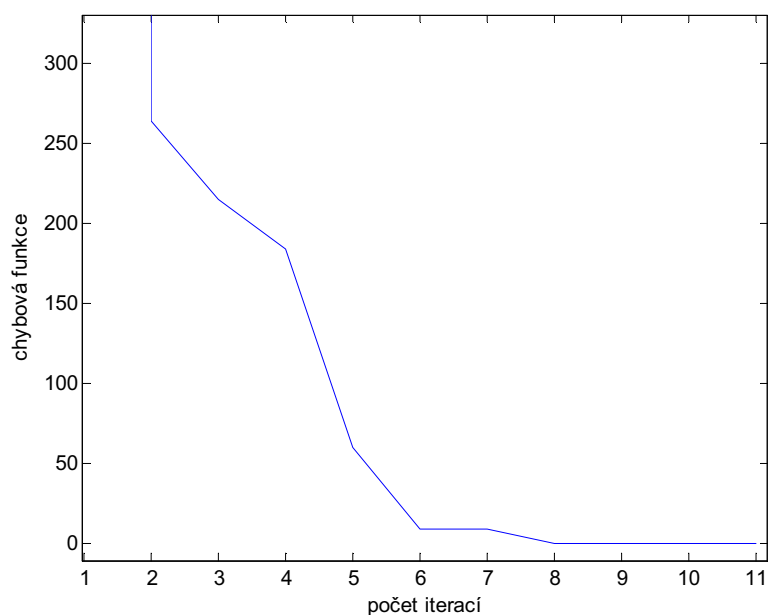
b)



c)

Obr. 22 Kmitočtové charakteristiky činitele přenosu optimalizovaného vlnodovového filtru pro: 10 iterací a 10 jedinců (a), 20 iterací a 20 jedinců (b), 20 iterací a 40 jedinců (c).

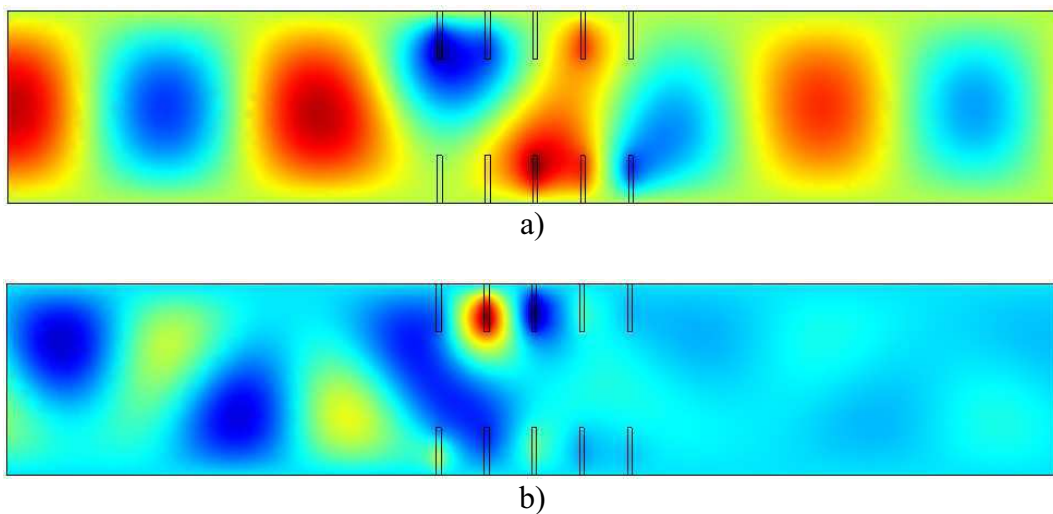
Konkrétním optimalizačním výsledkům také připadají příslušné průběhy chybových funkcí poukazující na klesající chybu v závislosti na počtu iteračních kroků. Názornou ukázkou je zobrazení této chybové funkce na *obr. 23* pro první optimalizaci při deseti iteracích a deseti jedincích. Chybová funkce začíná na hodnotě 10^6 a už při prvním kroku zaznamená značný pokles. Při každé další iteraci nadále klesá, až dosáhne optimální nejnižší hodnoty.



Obr. 23 Závislost chybové funkce na počtu iteračních kroků pro 10 iterací a 10 jedinců.

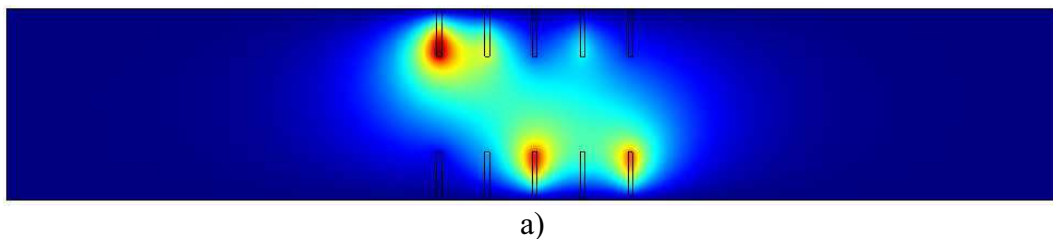
6.3.3 Elektrické a tepelné vlastnosti

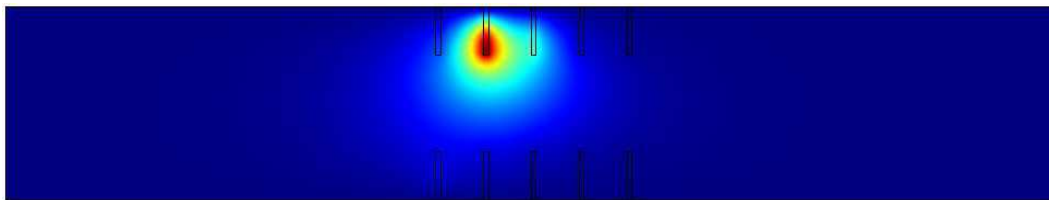
V poslední fázi této práce je zobrazen ještě tepelný model daného filtru, a to pro stejné parametry jako při ohřívání destičky v předešlém případě, jak pro vlnovod vyplněný vzduchem, tak pro kolíky mající všechny tepelné vlastnosti destičky z předchozího příkladu. Jednotlivé kolíky jsou ztrátové a jejich měrná elektrická vodivost je $\sigma = 0,1$ S/m. Hodnoty relativních permitivit těchto kolíků jsou shodné s případem první uvedené optimalizace pro 10 iterací a 10 jedinců. Vlnovod je na vstupu buzen analytickým portem s výkonem $P = 100$ W a na výstupu je pohlcující port, což jsou obdoby elektrického pole a pohlcující stěny. Na dvou příkladech pro dva různé kmitočty je uvedeno ohřívání celé struktury. První kmitočet je $f_1 = 12$ GHz ležící v pásmu jednovodnosti a druhým je kmitočet, na kterém byl při optimalizaci požadován největší útlum, a to $f_2 = 17,4$ GHz. Pro tyto dva případy jsou níže zobrazeny modely chování průchozí elektrické vlny (obr. 24a, b).



Obr. 24 Optimalizovaný vlnovodový filtr buzený elektrickým polem o kmitočtu: $f_1 = 12$ GHz (a), $f_2 = 17,4$ GHz (b).

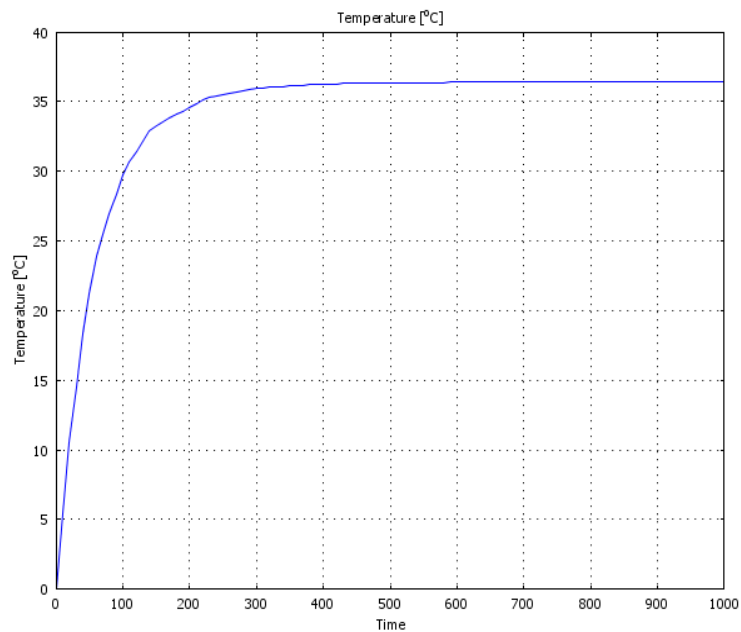
Na daných vlnovodech je vidět, jak je průchozí vlna deformována vlivem rozložení permitivit kolíků bez uvažování měrné elektrické vodivosti. Na obr. 25a, b je zobrazeno rozložení teploty v prostoru celého filtru při měrné elektrické vodivosti $\sigma = 0,1$ S/m pro každý kolík. Je vidět, jak se místa s největší intenzitou elektrického pole ohřívají nejvíce. Nárůst teploty v místech největší intenzity ohřevu jsou zobrazeny v grafech závislosti teploty na čase na obr. 26a, b pro dobu ustálení teploty $t = 1000$ s, kde je také zřetelné, že s rostoucím kmitočtem stoupla rapidně i maximální teplota celé struktury. Vzájemné souvislosti mezi dielektrickými překážkami a jejich ovlivňováním při působení elektrického pole by vyžadovaly další hlubší zkoumání daného problému.



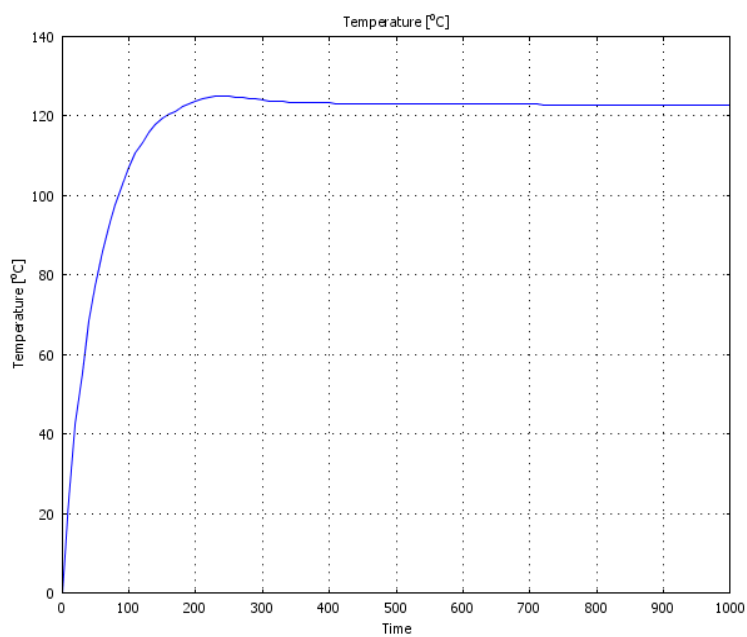


b)

Obr. 25 Rozložení teploty v optimalizovaném ztrátovém vlnodovém filtru pro kmitočty: $f_1 = 12$ GHz (a), $f_2 = 17,4$ GHz (b).



a)



b)

Obr. 26 Graf závislosti teploty na čase pro nejvíce ohříváný kolík optimalizovaného ztrátového vlnodovového filtru pro kmitočty: $f_1 = 12$ GHz (a), $f_2 = 17,4$ GHz (b).

7 Závěr

Hlavním úkolem této práce je modelování ohřívání ztrátového vlnovodu v programu Comsol Multiphysics a optimalizace pomocí PSO algoritmu v programu MATLAB. Teoretické poznatky zahrnují úvod do teorie vlnovodů a způsoby šíření elektromagnetických vln v jejich nitru, dále pak základní informace o ztrátovém dielektriku a z oblasti šíření tepla. Nastíněno je také, v čem spočívá metoda konečných trojúhelníkových prvků, které ke svým výpočtům využívá výše zmíněný program Comsol Multiphysics a základní princip PSO algoritmu používaný ke globálním optimalizačním metodám.

Modelování bylo zaměřeno nejprve na chování dominantního vidu TE_{10} pro kmitočet elektrické vlny 10 GHz, který leží uvnitř pásma jednovidovosti daného vlnovodu. Postupně byly měněny parametry vložené dielektrické překážky. Změny hodnot relativní permitivity a permeability měly za důsledek převážně deformaci vlny při průchodu destičkou a vznik stojatého vlnění v jejím nitru. Při změnách hodnot měrné elektrické vodivosti, jakožto hlavního ztrátového činitele, byla vlna po průchodu destičkou zatlumená a amplituda elektrické intenzity znatelně klesla. Zásadní vliv na průchozí vlnu měly také rozměry a umístění destičky. Největšího zatlumení v tomto případě dosáhla destička umístěná ve střední části vlnovodu, a tedy v místě, kde je amplituda elektrické vlny.

Další fáze této práce se věnuje pouze teplotním změnám uvnitř dutiny vlnovodu. Dosažené výsledky byly zobrazeny v grafech závislosti teploty na čase v místě, kde byl ohřev nejintenzivnější. Pro dostatečnou zřetelnost teplotních změn byla zvolena velikost počáteční složky elektrické intenzity $E_{0z} = 100 \text{ V.m}^{-1}$ a dobu, po kterou bude děj probíhat, na $t = 2000 \text{ s}$. Kromě grafů je pro názornost uvedeno také rozložení teplot uvnitř struktury daného vlnovodu. Pro ztrátové dielektrikum jsou prezentovány grafy při měrné elektrické vodivosti $\sigma = 0,1 \text{ S.m}^{-1}$. Největší nárůst teploty proběhl podle očekávání uvnitř destičky, a to o přibližně $41 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Stěny mající stále konstantní teplotu se chovají jako chladič vlnovodu. Byly uvedeny i příklady pro změnu měrné elektrické vodivosti nebo vzrůst relativní permitivity a permeability.

V poslední části byly do vlnovodu přidány další dielektrické destičky a celá struktura byla optimalizována jako filtr metodou včelího roje v programu MATLAB. V praktické části jsou prezentovány dosažené výsledky, a to přenosové charakteristiky pro optimalizované hodnoty relativních permitivit a chybová funkce nejpřesnějšího z nich. Výpočet probíhal pouze na pěti kmitočtech, a proto se optimalizované výsledky nedají srovnávat s výchozími. Avšak na těchto pěti konkrétních kmitočtech bylo dosaženo výsledků blížících se teoretickým předpokladům. Zavedením více hodnot kmitočtů by bylo dosaženo ještě přesnějších výsledků, avšak celá optimalizace by byla více časově náročná. Vstupními hodnotami nejpřesnějšího výpočtu bylo 10 iterací a 10 jedinců. Pro tento výsledek je na závěr také uveden elektrický a tepelný model vlnovodu pro případ ztrátových překážek.

8 Seznam použité literatury

- [1] COMSOL Multiphysics 3.3 User's Guide. Stockholm: Comsol AB, 2006.
- [2] HANUS, S., SVAČINA, J. *Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika*, skriptum. Brno: VUT, 2002.
- [3] *Internetová encyklopedie* [online], dostupné na: <http://encyklopedie.seznam.cz/>.
- [4] *Internetová encyklopedie* [online], dostupné na: <http://cs.wikipedia.org/wiki/>.
- [5] *Internetová encyklopedie* [online], dostupné na: <http://en.wikipedia.org/wiki/>.
- [6] JIRÁK, J. a kol. *Materiály a technická dokumentace*, skriptum. Brno: VUT, 2006.
- [7] NOVÁČEK, Z. *Elektromagnetické vlny, antény a vedení*, skriptum. Brno: VUT, 2006.
- [8] RAIDA, Z. *Počítačové řešení komunikačních systémů*, skriptum. Brno: VUT, 2006.
- [9] RAIDA, Z., *Multimediální učebnice EM vln a mikrovlnné techniky – Vlnovody* [online], dostupné na: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.html>.
- [10] RAIDA, Z., *Optimalizace v elektrotechnice* [online], dostupné na: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/optimalizace/index.htm>.
- [11] ROBINSON, J., RAHMAT-SAMII, Y. *Particle swarm optimization in electromagnetics*, IEEE Transactions on Antennas and propagation. 2004, vol. 52, no. 2, p. 397-407.

Příloha

```
function out = main( G, I)
% hledání optimálních permitivit kolíků vlnovodového filtru
% G je počet iteračních kroků (generací), I je počet jedinců
dt = 0.1; % délka iteračního kroku
c1 = 1.49; % vážený faktor pro pbest
c2 = 1.49; % vážený faktor pro gbest

f = [12.0, 16.4, 17.4, 18.0, 20.0]*1e9; % kmitočty na kterých provádíme
optimizaci
sd = -[ 0.4, 4.8, 25.0, 5.1, 0.2]; % požadované hodnoty přenosu
s21= zeros( 1, 5); % činitel přenosu
x = zeros( I, 11); % pozice jedinců
p = zeros( I, 11); % pbest

for n=1:I
    x( n, 1:10) = ones( 1, 10) + 29*rand( 1, 10); % inicializace
optimizace
    p( n, 1:10) = x( n, 1:10); % vložení počátečních hodnot fitness do
pbest
    p( n, 11) = x( n, 11);
end

v = rand( I, 10); % náhodné počáteční rychlosti
g = zeros( 1, 10); % gbest
e = zeros( G+1, 1); e(1) = 1e+6; % chybová funkce

for m=1:G % +++ OPTIMALIZAČNÍ SMYČKA +++
    w = 0.5*(G-m)/G + 0.4; % inerční šířka

    for o=1:5
        for n=1:I
            s21( n, o) = filtr( x(n,1:10), f(o)); % funkce filtru
        end;
    end;

    x( :, 11) = zeros( I, 1);

    for n=1:5
        x(:,11) = x(:,11) + ( sd(n) - s21(:,n)).^2; % kritériální funkce
    end

    [hlp,ind] = min( x( :,11)); % nejmenší chyba

    if hlp<e(m)
        g = x( ind, 1:10); % určení gbest
        e(m+1)= hlp;
    end

    for n=1:I
        if x(n,11)<p(n,11) % určení pbest
            p(n,:) = x(n,:);
        end
        v(n,:) = w*v(n,:) + c1*rand()*( p(n,1:10)-x(n,1:10));
        v(n,:) = v(n,:) + c2*rand()*( g(1,1:10)-x(n,1:10));
        x(n,1:10) = x(n,1:10) + dt*v(n,:);
    end
end
```

```

        if x(n, 1:10) > 30, x(n, 1:10) = 30; end % absorbční stěna-vrátí
                                                % permitivitu do
vymezeného intervalu
    end
end
plot( e); % vykreslení průběhu chybové funkce
xlabel( 'počet iterací');
ylabel( 'chybová funkce');
out = g; % výpis optimalizovaných hodnot permitivit

```