

Konstrukční řešení násobného vlnovodu mikrovlnné komory

Bc. et Bc. Josef Vintr

Diplomová práce
2009



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VYKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Josef VINTR**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Konstrukční řešení násobného vlnovodu mikrovlnné komory**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii na dané téma
2. Zpracujte FEM model chování vln ve vlnovodu
2. Navrhněte konstrukční řešení vlnovodu
4. Proveďte experimentální práce s rozložením elektromagnetického pole
5. Závěr - vyhodnoťte a navrhněte další řešení

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1.DVORÁK,Z.,SVOBODA,I.,Vývoj spotřeby energií na přípravě gumárenských směsí,Nové směry v gumárenství,Sborník přednášek,Zlín,Univerzita Tomáše Bati,2003,s.37,ISBN 80-7318-149-5.

2.Elektromagnetické pole [online],[1999],[cit. 2005-05-06].Dostupný z WWW: <<http://www.elektrotechnika.cz/zaklady/prncp040426.html>>.

3.Spectrum of electromagnetic waves [online]. [2000] [cit. 2005-05-01]. Dostupný z WWW: <www.google.com>.

4.ČERNÝ,V.,Elektrický ohřev,Elektro,2003,č.3,s.57

5.Dvořák,Z., Elektrické teplo,elektronická podpora,Dostupný z WWW: <www.flutb.cz/czech/uvl/czech/index.htm>.

6.Diplomové práce 2005,2006,2007.

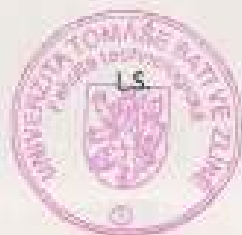
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Dvořák, CSc.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **20. února 2009**

Termín odevzdání diplomové práce: **20. května 2009**

Ve Zlíně dne 14. dubna 2009


doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan




doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
vedoucí katedry

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá chováním elektromagnetického pole uvnitř vlnovodu v závislosti na jeho konstrukčním řešení. Cílem je posuzovat vliv tvaru vlnovodu na chování mikrovln uvnitř, pro následnou aplikaci v průmyslu.

Klíčová slova: elektromagnetické pole, dielektrický ohřev, mikrovlnné zařízení, vlnovody

ABSTRACT

The diploma thesis deal with behaviour elektromagnetic field inside waveguides, depending on their constructional solving. The aim is to criticize the influence shape of waveguides to behavior microwave inside, for following application in industry.

Keywords: electromagnetic field, dielectric heating, microwave apparatus, waveguides

Děkuji vedoucímu své diplomové práce, panu Ing. Zdeňku Dvořákovi, CSc., za odborné vedení, cenné připomínky a rady, které mi poskytoval v průběhu vypracování diplomové práce. Mé poděkování patří také rodičům, za dlouholetou podporu na mé cestě ke vzdělání.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně 31.8.2009

.....

Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD.....	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 DIELEKTRICKÝ OHŘEV	10
1.1 ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ	10
1.2 POSTATA DE OHŘEVU	14
1.3 CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI DE OHŘEVU	14
1.4 UPLATNĚNÍ DE OHŘEVU V PLASTIKÁŘSKÉM A GUMÁRENSKÉM PRŮMYSLU	15
2 MIKROVLNNÁ ZAŘÍZENÍ.....	19
2.1 FUNKCE MIKROVLNNÉ TROUBY	19
3 MAGNETRONY	21
3.1 KONSTRUKCE A PRINCIP	21
3.2 VÁLCOVÝ MAGNETRON	22
3.3 ROVINNÝ MAGNETRON	27
4 VLNOVODY.....	28
4.1 PŘENOSOVÉ VEDENÍ	28
4.2 OBDÉLNÍKOVÝ VLNOVOD	33
4.3 MEZNÍ FREKVENCE	37
4.4 RYCHLOST ŠÍŘENÍ VLN VE VLNOVODU	39
4.5 DETEKCE VEDENÝCH VLN.....	41
4.6 SPOJOVÁNÍ VLNOVODŮ.....	42
4.7 MÓDY VLNOVODU	45
4.8 JINÝ POHLED NA VLNOVODY.....	46
4.9 ZNAČENÍ A NORMALIZACE VE VLNOVODOVÉ TECHNICE.....	51
4.10 VÝROBA A TECHNOLOGIE VLNOVODŮ A KOAXIÁLNÍCH KONEKTORŮ	55
SHRNUTÍ	56
II PRAKTICKÁ ČÁST	57
5 STANOVENÍ CÍLŮ A METOD V PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	58
6 VÝPOČET A STANOVENÍ ROZMĚRŮ VLNOVODU.....	59
6.1 NAVRŽENÍ DÉLKY VLNOVODU	60
7 SIMULACE CHOVÁNÍ ELEKTROMAGNETICKHO POLE V OBDÉLNÍKOVÉM VLNOVODU.....	62

7.1	OKRAJOVÉ PODMÍNKY STĚN VLNOVODU.....	62
7.2	VÝSLEDKY SIMULACE CHOVÁNÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE VE VLNOVODU $L = 212\text{MM}$	65
7.3	VÝSLEDKY SIMULACE CHOVÁNÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE VE VLNOVODU $L = 610\text{MM}$	68
7.4	VLNOVOD S PRAVOÚHLÝM ODBOČENÍM.....	70
7.5	VLNOVOD S JEDNODUCHOU KONSTRUKCÍ ZESLABOVAČE.....	71
8	PROVEDENÍ EXPERIMENTU A MĚŘENÍ.....	74
8.1	DE OHŘEV.....	74
8.2	ZDROJ ELEKTROMAGNETICKÉHO VLNĚNÍ.....	74
8.3	PŘIPOJENÍ VLNOVODŮ A POSTUP EXPERIMENTU.....	75
8.4	PŮSOBENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE NA TERMOPAPÍR.....	76
8.5	PLANIMETRIE VZORKŮ TERMOPAPÍRU.....	80
8.6	VÝSLEDKY EXPERIMENTU ZOBRAZENÉ VE 3D.....	83
9	DISKUZE VÝSLEDKŮ PRÁCE.....	85
	ZÁVĚR.....	86
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	87
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	88
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	90
	SEZNAM TABULEK.....	93
	SEZNAM PŘÍLOH.....	94

ÚVOD

Gumárenská výroba je energeticky náročná. Hlavní část spotřeby energie, zejména elektrické, je v provozech přípravy gumárenských směsí a dalších materiálů, a proto se hledají cesty a nové směry pro snížení energetické spotřeby v přípravě gumárenských směsí a polotovarů.

Mikrovlnný (dielektrický) ohřev představuje progresivní technologii se stále širším spektrem průmyslových aplikací. Uplatňuje se buďto jako efektivnější technologie nahrazující konvenční ohřevná zařízení nebo, a to častěji, se pořizuje proto, že umožňuje zcela novou kvalitu zpracování.

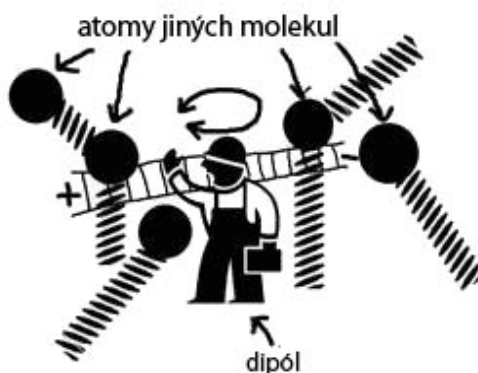
Kromě zvýšení kvality a tím i prodejnosti konkurenceschopných výrobků, nedosažitelných jinými technologiemi umožňuje mikrovlnný ohřev rovněž zkrácení výrobní doby a snížení výrobních nákladů. Energetická náročnost nejvýznamněji ovlivní úsporu celkových přímých provozních nákladů.

Výhodou mikrovln oproti konvenčnímu ohřevu je současný ohřev materiálu v celém objemu a tím dosažení lepších vlastností. Vyšší kvalita výrobků umožňuje konkurenceschopnost a tím nárůst prodeje, možnost nových výrobků, nedosažitelných jinými metodami. Zpracování na novou jakost neznamená jen vyšší tržby, ale i úsporu nákladů snížením zmetkovitosti a ztrát při výrobě.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 DIELEKTRICKÝ OHŘEV

Elektricky nevodivé látky lze ohřívat ve vysokofrekvenčním elektromagnetickém poli tepelnou energií, která vzniká na základě elektrických ztrát uvnitř těchto látek. Elektricky nevodivé látky obsahují polarizované molekuly a disociované kladné a záporné ionty. Molekuly a ionty se chovají jako elektrické dipóly a snaží se sledovat rychlé změny polarizace elektrického pole (1 – 100 miliardkrát za sekundu).



Obr. 1.1 Dielektrický ohřev

Na ohřev mají vliv dva jevy. Jsou to mezimolekulární tření překonávání mezimolekulárních přitažlivých sil a hysterese mezi působícím polem a indukovanou elektrickou odezvou vlivem setrvačnosti, jež závisí na elektrickém náboji, hmotě a tvaru molekul. V důsledku poté vzniká velmi rychlý ohřev materiálu.

[2]

1.1 Elektromagnetické vlnění

Elektromagnetické vlnění patří do skupiny, zahrnující rovněž oblast viditelného světla. Amplitudy magnetických a elektrických vln mají konstantní poměr. Elektromagnetické vlny se ve vakuu pohybují rychlostí světla, takže platí vztah:

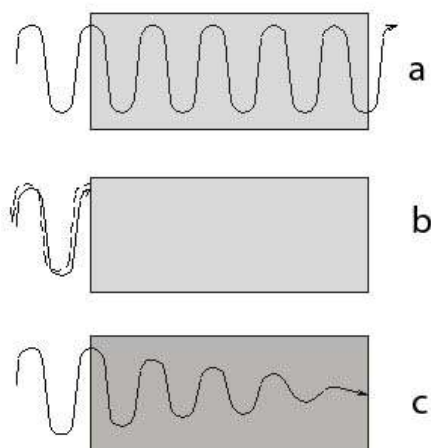
$$f \cdot \lambda = c \quad (1.1)$$

[11]

Elektromagnetické vlnění odpovídá frekvencím v intervalu 300 MHz až 300 GHz, což odpovídá délce vlny v rozsahu od 1 m do 1 mm. Pro domácí účely mikrovlnného ohřevu, byla určena frekvence 2,45 GHz, která odpovídá délce vlny 12,2 cm.

Elektromagnetické vlnění patří podobně jako rádiové, infračervené a viditelné záření mezi neionizující záření. To znamená, že dokážou elektrony v atomech pouze rozkmitat, ale nedokážou je vytrhnout a způsobit tak chemickou změnu v látkách. Z tohoto hlediska je působení mikrovln neškodné. Elektromagnetické vlnění se může šířit v různých médiích, samozřejmě s nižší rychlostí než ve vakuu. Ve vzduchu je tento rozdíl malý, jiná je situace ve vodě, kde se elektromagnetické vlnění šíří 9 krát nižší rychlostí, a v důsledku toho se i vlnová délka devětkrát zkrátí na 1,36 cm. Při přechodu elektromagnetického vlnění z jednoho prostředí do druhého dochází na rozhraní k odrazovým a lomovým jevům stejně jako u světla a platí pro ně stejné zákony. V podstatě jde o kombinaci tří případů - elektromagnetické vlnění projde, odrazí se, nebo se absorbuje (Obr.1.2). Při absorpci jde o materiály, obsahující polární molekuly, schopné absorbovat elektromagnetické vlnění. Přitom jejich ztrátový činitel ovlivňuje hloubku vniku- tzv. penetrační hloubku. Elektromagnetické vlnění prochází nekovovými materiály podobně jako světlo různě tmavým barevným sklem. Při odrazu, například kovy zůstávají v elektromagnetickém poli studené. Transparentní materiály (průsvitné) jako například vzduch, některé druhy skla, polyetylén, teflon, polystyrén aj. Tyto vlastnosti jsou často silně teplotně závislé (viz Tab. 1.2). Tak se může stát, že materiál zdánlivě transparentní při pokojové teplotě může dobře absorbovat elektromagnetické vlnění při teplotách nad 100°C. To je typické pro oxid hliníku, oxid křemíku, skleněnou keramiku a některé bornitridy. Navíc jsou tyto vlastnosti závislé na kmitočtu - např. suchá porcelánová hmota se může chovat na frekvenci 2,45 GHz jako téměř ideálně transparentní, zatímco na kmitočtu kolem 30 GHz se během minuty může ohřát na spékací teplotu. Další parametr je penetrační hloubka. Závisí na dielektrických parametrech zpracovávaného materiálu a je přímo úměrná vlnové délce. Elektromagnetické vlnění je při vstupu do materiálu tímto absorbováno, takže ohřevný účinek směrem dovnitř materiálu postupně klesá.

[2]



Obr. 1.2. Působení elektromagnetického vlnění na různé druhy materiálů: a- vlny projdou (sklo, keramika, papír), b-odrazí se (kovy), c-absorbují (voda)

Při absorpci elektromagnetického vlnění v materiálu se snižuje amplituda vlny. Míra absorpce je charakterizována pomocí penetrační hloubky, což je vzdálenost, kterou elektromagnetického vlnění v materiálu musí projít, aby jeho intenzita klesla na 13,53 % původní hodnoty. I u kovových materiálů, které jsou dobře vodivé, se penetrační hloubka pohybuje řádově v mm (viz Tab. 1.1) a elektromagnetické vlnění se z jejich povrchu odráží, zatímco led a obecně nevodivé jsou pro elektromagnetické vlnění transparentní. U ostatních materiálů závisí penetrační hloubka na jejich dielektrických vlastnostech, charakterizovaných relativní permitivitou (viz Tab. 1.2)

Tabulka 1.1 Penetrační hloubka mikrovln v různých materiálech

Látka	Teplota (°C)	Penetrační hloubka(cm)
Voda	1,5	1,7
Voda	25	3,4
Voda	45	5,4
Voda	65	7,6
Voda	95	14
Led	-12	3000
Měď	25	0,000013
Hliník	25	0,000017
Teflon	20	9000
Máslo	20	14

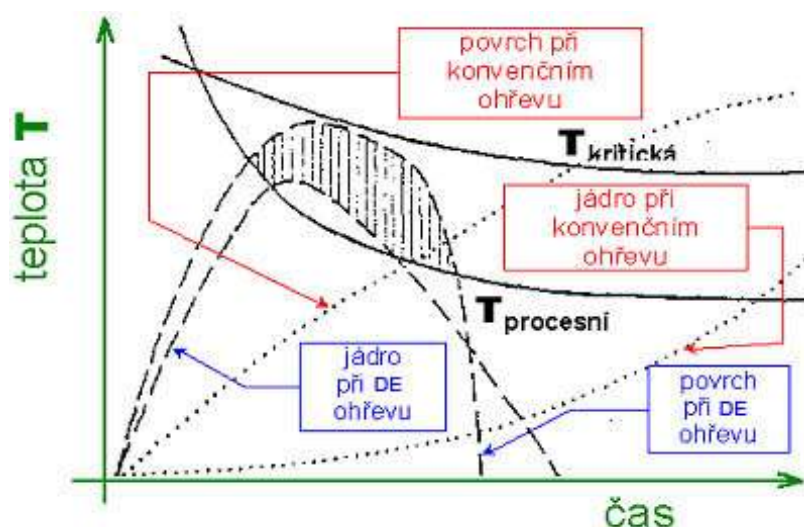
Některé materiály mohou být také kombinací transparentního, odražejícího a absorbujícího materiálu. Například přírodní kaučuk (NR) a butadien-styrenový kaučuk (SBR) se vyznačují velmi nízkými ztrátami a tím slabou reakcí na DE ohřev. Ke zlepšení mechanických vlastností a dosažení požadovaných fyzikálně-chemických parametrů se proto používají některé jemné substance - vhodná plnidla, např. uhlík. Slouží i ke zvýšení polárního efektu a usnadňují DE ohřev. Mezi nízkoztrátové elastomery patří etylén-propylénový kaučuk (EPDM) a tzv. polynorboren (PNB), oba z nich jsou bílé, a také butylový kaučuk (BR). Naproti tomu některé přírodní elastomery mají vysoké dielektrické ztráty, jako je chlorobutadienový kaučuk (CR) a nitrilo-butadienový kaučuk (NBR). [2]

Tabulka 1.2 Dielektrické vlastnosti některých materiálů při frekvenci 2,45GHz

Materiál	ε' (-)	ε'' (-)	Teplota (°C)	PD (cm)
Al ₂ O ₃	9	0,004	25	1 461
Al ₂ O ₃	9,46	0,01	296	599
Al ₂ O ₃	10,15	0,055	683	113
Al ₂ O ₃	11,18	0,241	1 221	27
křemenné sklo	3,78	0,0002	25	18 937
SiC	10,4	0,9	25	7
ZrO ₄	18	2,34	300	4
ZrO ₄	18,8	3,38	500	3
ZrO ₄	22,3	8,25	800	1
PVC	2,9	0,016	25	107
PTFE	2,1	0,0006	25	4 700
rostlinný olej	2	0,2	20	14
voda	77,4	9,2	25	1,87
voda	69,4	4,9	50	3,3
voda	62,3	2,6	75	5,9
voda (zmrzlá)	3,2	0,003	-12	1 162
alkohol	6	1,32	25	4
metylalkohol	24	15	25	0,6
propanol	5	3,5	25	1
dřevo	4	0,88	25	4,4

1.2 Postata DE ohřevu

Mikrovlny vznikají přeměnou elektrické energie na energii elektromagnetického vlnění v generátoru, který se nazývá magnetron. Tato energie se dále mění na energii tepelnou působením na polární molekuly materiálu. Materiál se ohřívá v celém objemu. Ze všech druhů ohřevu lze pouze dielektrickým ohřevem (tj. ohřevem na vysokých kmitočtech včetně mikrovln) vyvolat vyšší teplotu uvnitř produktu než na povrchu (Obr.1.3).



Obr. 1.3. Srovnání DE ohřevu a konvečního ohřevu

Graf znázorňuje teplotní homogenitu, šetrnost a rychlejší průběh mikrovln. Srovnání s klasickým ohřevem ukazuje, že DE proces je již zcela ukončen v době, kdy teplota v jádře materiálu při konvenčním ohřevu teprve dosáhla potřebné hodnoty, zatímco povrch se již nachází v oblasti nežádoucího přehřevu. Další podstatnou výhodou je rovněž rychlost a dokonalost prohřátí a absorpce téměř veškeré elektromagnetické energie v ohřívaném materiálu. Vysoká homogenita rozložení tepla, rychlý náběh na potřebnou teplotu v celém objemu, přesná regulace teploty a vysoká energetická účinnost, typická pro DE ohřev, zpravidla není současně dosažitelná jinými způsoby ohřevu. [3]

1.3 Charakteristické vlastnosti DE ohřevu

Objemový ohřev - k ohřevu dochází v celém objemu, tj. zevnitř a nikoliv přestupem tepla od povrchu dovnitř, jak je tomu u klasického ohřevu. To může přispívat k rovnoměrnosti

ohřevu, avšak záleží na tvaru, velikosti a složení materiálu. Záleží na teplotním profilu, který je opačný než u ohřevu klasického. Nejvyšší teplota je uvnitř a klesá směrem k povrchu.

Selektivní ohřev - k ohřevu u více složkového materiálu dochází jen u složky, která absorbuje elektromagnetické vlnění. Neabsorbující složka se neohřívá. Nebo jen vedením od ohřáté složky (např. směsi voda-tuk, voda-olej, voda-papír atd.). Při sušení se např. selektivně ohřívá jen vlhkost a sušení je mnohem rovnoměrnější a úspornější než při klasickém sušení. Může však dojít i k nerovnoměrnému ohřevu, to je třeba pak řešit (např. snížením výkonu na pulzní systém).

Lokální přehřátí - k nerovnoměrnému ohřevu nemusí dojít jen v důsledku selektivního ohřevu, ale nejčastěji k němu dochází v důsledku nehomogenity elektromagnetického pole. Elektromagnetického pole rozptýlené v prostoru trouby není nikdy zcela homogenní, tj. existují místa s vyšší a nižší intenzitou (tzv. „not spots“), která mohou způsobit až místní přepálení materiálů. V kuchyňských mikrovlnných troubách se tento jev potlačuje rotačním talířem, u průmyslových zařízení běžícím pásem.

Teplotní úlet - dochází k němu jen ve výjimečných případech, kdy síla absorpce elektromagnetického vlnění prudce stoupá s teplotou (např. u práškových kovů). U vody tento případ nehrozí, neboť absorpce elektromagnetického vlnění s teplotou klesá - může však dojít k přehřátí vody nad 100 °C.

1.4 Uplatnění DE ohřevu v plastikářském a gumárenském průmyslu

Ve výrobě plastů a v gumárenském průmyslu se DE ohřev využívá např. při ohřevu granulátů plastů před vytlačovacími lisami, při přehřívání pryže před vulkanizací a při vytváření výrobků ze skleněných vláken. Při výrobě epoxidových vysokonapěťových izolátorů se při DE ohřevu na teplotu 80 až 100 °C zkracuje formovací proces o 15 až 45 %. Při DE ohřevu keramických materiálů se doba sintrace zkracuje o 5 až 30 %. Pro DE ohřev jsou nejvhodnější materiály s pokud možno vysokou hodnotou tzv. ztrátového činitele, jaký má např. voda nebo jiné polární molekuly, např. soli, uhlík apod., přítomné i v malých množstvích. Materiály bez bipolárního elektrického náboje, jako např. některé plastické hmoty, na elektromagnetické vlnění nereagují.

Sušení plastů je pravděpodobně nejrozšířenější aplikací DE ohřevu v průmyslu plastů. Mechanismus sušení elektromagnetickou energií je zcela rozdílný od konvenčního sušení. Na rozdíl od povrchového konvenčního sušení dochází u DE ohřevu k současnému zvýšení teploty v celém objemu materiálu a k rychlé generaci páry. Přitom DE energie se váže přednostně na vlhčí oblasti. Většina vlhkosti se odpaří ještě před únikem z materiálu. Tím se podstatně snižuje migrace materiálu směrem k povrchu. Vzniklý teplotní gradient urychluje sušení, nedochází k vytvrzení povrchu materiálu. Je umožněna univerzální konstrukce a zpracování různých tvarů a profilů sypkých a kusových materiálů bez podstatných úprav sušících komor a linek, jejichž konstrukční řešení je většinou koncepčně podobné. Mimořádně významnou aplikací je sušení hygroskopických granulátů plastů, zejména před vytlačováním. Lze dosáhnout 30–ti násobného i vyššího zkrácení procesu sušení před vytlačováním proti obvyklým 2–12 hodinám. Další význačnou předností proti konvenčním způsobům ohřevu je, že lze snadno dosáhnout extrémně nízkých obsahů vlhkosti. Základní energetická bilance je přibližně 1 kW elektromagnetického výkonu na odpaření 1 litru vody za hodinu.

Při polymeraci, jedné ze základních operací při výrobě plastů, se s výhodou využívá DE ohřev k homogenizaci teploty výchozí směsi monomerů a příměsí. Uplatňuje se u dvou hlavních skupin polymerů:

- termoplastů, získaných jednoduchou polymerizací
- reaktoplastů, získaných polykondenzační reakcí

Při elektromagnetické polymeraci PMMA, PMA, PS (polymethylmetakrylátu, polymethylakrylátu a polystyrenu) lze dosáhnout podstatného snížení molekulární váhy plastového produktu ve srovnání s konvenčním ohřevem při srovnatelných podmínkách reakce. Úspěšně bylo ověřeno využití mikrovln při polymeraci termoplastů nastříknutých v tenké vrstvě na papír při výrobě filtrů pro automobilové motory.

Pro výrobu zesílených materiálů se široce využívají polyestery. Například byl s úspěchem využit ve Francii, Německu, Švédsku a v dalších zemích. Polyuretany vznikají reakcí polyalkoholů s polyizokyanáty. DE ohřevem dochází k polymeraci, při níž vzniklé teplo přispívá k účinku elektromagnetického vlnění. Možné aplikace zahrnují například lakování skleněných lahví a impregnaci vlnité lepenky.

Epoxidové pryskyřice se získávají kondenzací epichlorhydrinu bisfenolem, jež je stimulována sušícími činidly, např. polyaminy. Například je známa japonská aplikace polymerace epoxidových matic plněných uhlíkem anebo kevlarom pomocí DE ohřevu v průmyslovém měřítku pro využití v leteckém průmyslu.

Při spojování (lepení a svařování) plastů se využívá DE ohřevu, jež je jednou z nejstarších a nejúspěšnějších aplikací. V provozu je řada linek, například pro svařování dílů obalů na krevní konzervy a jiného plastového materiálu. Dosažený pokrok umožňuje automatické řízení svařovacího cyklu i u složitých, hromadně vyráběných materiálů. Novinkou je pokus svařovat termoplasty pomocí cílené energie mikrovln. Termoplasty zesílené dlouhými vlákny se nedají svařovat stávajícími způsoby a musí se proto lepit. Svařování elektromagnetickým vlněním se zvyšuje pevnost vzorků ve srovnání s lepením až na trojnásobek a může tím být alternativou. DE ohřev je ověřen ve dvou variantách - spojování přímým ohřevem dvou vrstev polymerů i jiných materiálů, anebo s využitím suscepční mezivrstvy.

Při tvarování plastových desek umožňuje DE ohřev nebo předehřev rovnoměrné prohřátí celého objemu materiálu např. z PVC, polystyrénu a polypropylénu. Obvyklé tloušťky do 6 mm lze zpracovat během několika sekund. Navíc lze, stejně jako u ostatních aplikací, měnit intenzitu ohřevu v určitých oblastech plynulou změnou vyzářeného výkonu.

Při recyklaci plastů byla ověřena zajímavá aplikace, při níž se z hořlavého plastového materiálu s použitím DE ohřevu vyrábí nový materiál se zvýšenou ohnivzdorností, použitelný například k tepelné izolaci. Elektromagnetickým vlněním se likvidují i nebezpečné odpady, obsahující vysoký podíl plastů, například ze zdravotnických zařízení. Dosahuje se spolehlivé neutralizace na úroveň běžného komunálního odpadu.

Vulkanizace extrudovaných profilů je nejrozšířenější aplikací DE ohřevu v gumárenství. Průřez profilu, vlastnosti daného druhu gumy a požadovaná výrobní kapacita ovlivňují rychlost posunu profilu, řízení průběhu a především velikost instalovaného elektromagnetického výkonu (typicky 1 kW na cca 30 kg produktu za hodinu). V extrudéru se teplota zvýší na (80-90°C) a před vstupem do vulkanizačního tunelu je zařazen DE předehřev na teplotu přibližně 130°C. Po vstupu do tunelu se materiál rychle zahřeje na vulkanizační teplotu. Např. na 180°C, podle složení směsi. Po průchodu mikrovlnným tunelem se směs udržuje na požadované teplotě po dobu (60-90 s) konvenční technologií, například horkovzdušným systémem. Poté se ochladí. Na rozdíl od vulkanizace lisovaných produktů, jež

probíhá zásadně pod tlakem, postačuje atmosférický tlak. To umožňuje univerzální konstrukci a zpracování různých profilů bez podstatných úprav linek, jejichž konstrukční řešení je většinou koncepčně podobné. [2]

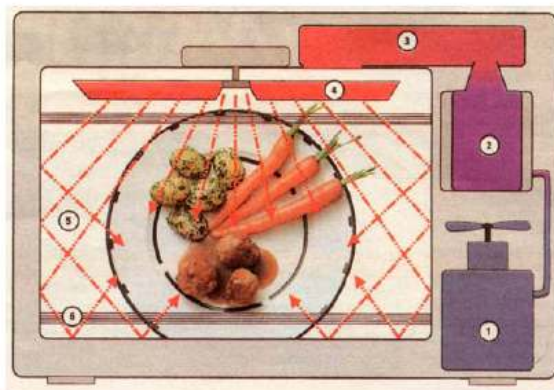
2 MIKROVLNNÁ ZAŘÍZENÍ

Z historického pohledu byly mikrovlny objeveny v počátku 40tých let v Anglii na univerzitě v Birminghamu. První využití mikrovln se uskutečnilo během 2. světové války ve formě radaru, což sehrálo významnou roli v bitvě o Británii. V roce 1947 si všiml zaměstnanec americké firmy Raytheon (výrobce radaru), že se mu v blízkosti radaru roztavila teplem čokoláda. To ho přimělo k myšlence zkonstruovat mikrovlnnou troubu.

První patent se objevil v r. 1952 a první mikrovlnná trouba (zatím dosti primitivní) se objevila v r. 1961. Byla velká jako skříň a stála 5 000 dolarů. O rok později byla v New Yorku otevřena první restaurace, kde se podávala jídla připravená v mikrovlnné troubě. Pro domácnosti se mikrovlnné trouby začaly rozšiřovat až v 80tých letech, v důsledku vyřešení japonské technologie sériové výroby magnetronů. Největšího uplatnění našly mikrovlny v komunikacích (radar, televize, mobilní telefony, satelitní vysílání atd.), dále při ohřevu a zpracování potravin (rozmrazování, pečení, ohřívání) a při sušení různých materiálů (keramika, dřevo, léčiva ap.). V chemii se uplatnění mikrovln rozvíjelo pomalu a dosáhlo výraznějšího rozvoje až v posledních letech.

2.1 Funkce mikrovlnné trouby

Mikrovlny jsou generovány magnetronem 2 a poté se vedou vlnovodem 3 do prostoru trouby (kavity) 5. Tam se mikrovlny rozptýlí 4, odrážejí se od stěn a vytvářejí zde mikrovlnné pole ;5,6.



Obr. 2.1 Schéma mikrovlnné trouby: 1 vysokofrekvenční zdroj; 2 magnetron; 3 vlnovod; 4 rozptylovač mikrovln; 5,6 varný prostor

Mikrovlny se spotřebovávají pohlcením v absorpčních materiálech a vzniku tepla. Pokud se v mikrovlnném poli vyskytuje materiál s nízkou nebo žádnou absorpční schopností, mikrovlny se nemají kde pohltit, dochází k jejich zpětnému odrazu do magnetronu, což snižuje jeho životnost, případně hrozí jeho zničení. (Proto se nesmí trouba zapínat prázdná). Účinnost magnetronů při přeměně elektrické energie na mikrovlnnou je maximálně 65-70 %. Většina ztrát připadá na uvolněné teplo v magnetronu, který se proto musí intensivně chladit. Při úpravě kuchyňské mikrovlnné trouby pro laboratorní použití (vyvrtání děr např. pro chladič či teploměr), je třeba pravidelně kontrolovat detektorem mikrovln zdali nedochází k úniku mikrovln do prostoru obsluhy.

Jak vzniká mikrovlnný ohřev (tj. jak se přeměňuje mikrovlnná energie na teplo). Jak bylo uvedeno v úvodní části z hlediska materiálu a jeho interakce s mikrovlnami existují 3 možnosti:

- a) Transparentní (např. sklo, nepolární látky)
- b) Absorpční (např. voda, polární rozpouštědla)
- c) Odrážející (např. kovy)

Z obecného pohledu nás zajímá především případ b), tj. interakce mikrovln s látkami, které mikrovlny absorbují, např. látky polární. V normálním stavu jsou polární molekuly v neupořádaném stavu. V elektrickém poli dojde k orientaci molekul podle polarit (kladná část k zápornému pólu, záporná ke kladnému pólu). Co se však stane s polární molekulou při vystavení elektromagnetickému, tj. mikrovlnnému poli? Polarita vysokofrekvenčního elektromagnetického pole se mění více než 109 krát za sekundu. Polární molekula je nucena se těmto rychlým změnám přizpůsobit, ale sotva se přizpůsobí, již se polarita opět změní. To vyvolá oscilační vibrace, až rotace, kdy dochází ke tření a srážkám molekul (a k dielektrické ztrátě). To se projeví jako teplo, tj. dojde k přeměně mikrovlnné energie na tepelnou.

Mechanismus přeměny mikrovlnné energie na teplo je dán vztahem:

$$P = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \epsilon' \epsilon'' \cdot E^2 \quad (2.1)$$

Rozhodující úlohu při přeměně mikrovlnné energie na teplo hraje ztrátový faktor (ostatní hodnoty jsou dány).

3 MAGNETRONY

Magnetron se používá jako generátor vysokých výkonů a pracuje s vysokou účinností. Je reprezentantem velmi vysokofrekvenčních elektronek pracujících ve zkřížených polích. Na rozdíl od klystronů v něm dochází k interakci elektronů s vysokofrekvenčním polem v celém vnitřním prostoru. V mikrovlnné troubě je to energetický zdroj, pomocí něhož jsou generovány elektromagnetické vlny, zahřívající potraviny. Od druhé světové války je magnetron používán u některých druhů radarů.

Je zajímavé připomenout, že oscilace magnetronu jako první pozoroval a popsal již ve 20. letech Augustin Žáček, profesor Univerzity Karlovy.

3.1 Konstrukce a princip

Základ magnetronu tvoří velmi silný permanentní magnet ve tvaru prstence. Tímto magnetickým prstencem je obklopena vakuová trubice s rezonančními komorami, uvnitř které je z jedné strany žhavicí katoda a z druhé vlnovod, který přenáší mikrovlnné záření do požadovaného směru.

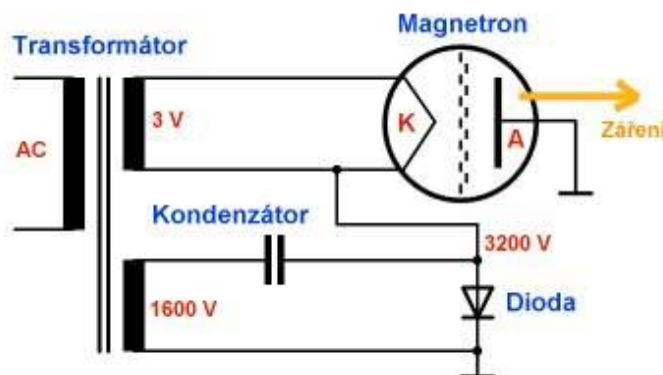
Hlavní části magnetronu tvoří:

- Silný prstencový permanentní magnet
- Vakuová trubice s elektrodou (katoda)
- Keramická zátka, oddělující vlnovod a vakuum
- Vlnovod
- Chlazení (vzduchem/kapalinou)
- Kondenzátor

Na katodu je přiváděno žhavicí napětí řádově několik voltů (3V), zatímco na anodu magnetronu napětí v řádu kilovoltů (3200 V). Dalšími důležitými součástkami, bez kterých by magnetron nebyl schopen funkce, jsou vysokonapěťová dioda, vysokonapěťový transformátor a vysokonapěťový kondenzátor.

Žhavicí katoda emituje elektrony, které jsou přitahovány směrem k anodě, ale silné magnetické pole mění jejich dráhu na kruhovou. Proud elektronů indukuje v rezonačních komorách vysokofrekvenční kmity, které jsou odváděny vlnovodem.

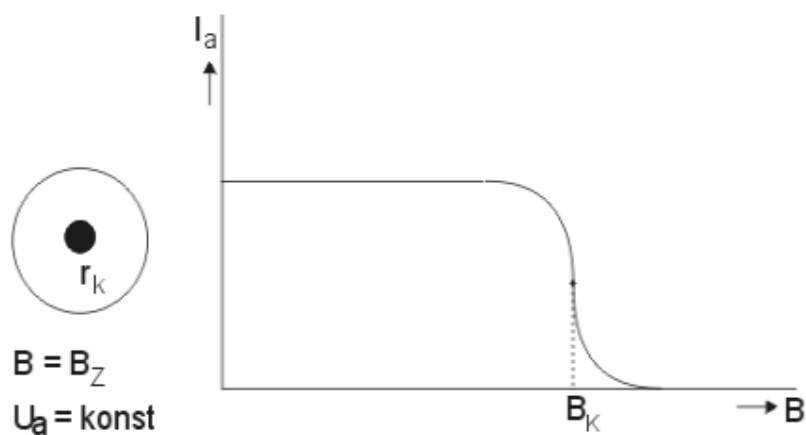
Magnetron dosahuje poměrně velké účinnosti (kolem 65%), frekvence generovaných kmitů však není příliš přesná. Pro generování vysokofrekvenčních kmitů s přesnou frekvencí se používá klystron, jehož účinnost je však asi poloviční.



Obr. 3.1 Schématické zapojení magnetronu

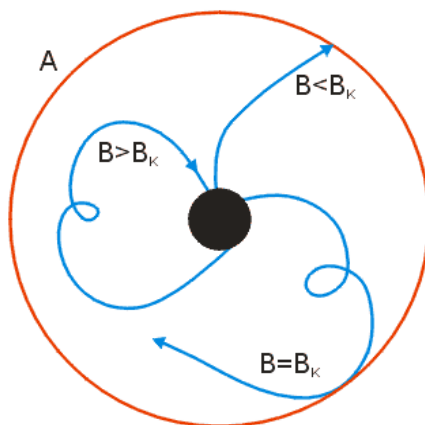
3.2 Válcový magnetron

Provedeme si základní, jednoduchý experiment. Vložíme do homogenního magnetického pole ve směru osy z (kolmá k rovině nákresny) válcovou diodu se žhavenou katodou a při konstantním napětí U_a na anodě budeme měřit závislost anodového proudu na intenzitě magnetického pole $J_a = J_a(B)$. Zjistíme, že při určité hodnotě $B = B_k$ proud prudce poklesne takřka na nulu.



Obr. 3.2 Válcová dioda v homogenním magnetickém poli

Vysvětlení tohoto jevu je snadné. Elektrony emitované katodou se pohybují ve zkřížených polích - radiálním elektrickém E_r a homogenním magnetickém B_z . Jejich trajektorie se zakřivují, (vzpomeňme si, že ve zkřížených homogenních polích je trajektorie nabitě částice trochoida), zakřivení stoupá se stoupajícím magnetickým polem a konečně je tak veliké, že elektron, přestože mu nechybí energie, nemůže na anodu dopadnout a vrací se ke katodě. Schematicky je znázorněna tato situace na Obr. 3.3.

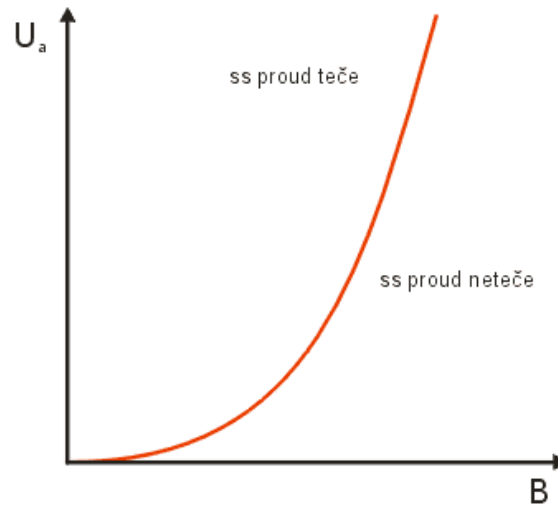


Obr. 3.3 Schéma trajektorie částice ve zkřížených homogenních polích

Při daném anodovém napětí U_a označíme B_k magnetické pole, při němž přestává téci anodový proud - kritické pole. Náhlý pokles z hodnoty $J_a = konst.$ na nulu při B_k nenastává, protože elektrony emitované z katody mají maxwellovské rozdělení rychlostí. Výsledkem je vztah

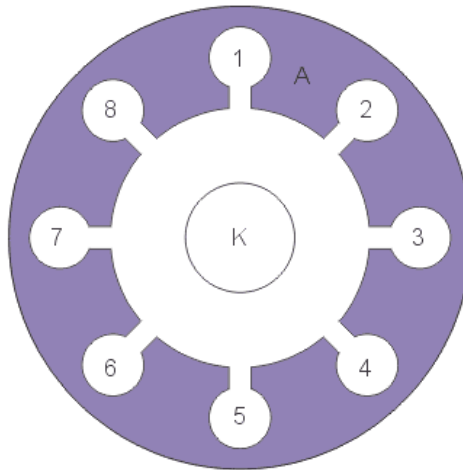
$$U_a = konst \cdot B_k^2 \quad (3.1)$$

což je kritická parabola, která rozděluje rovinu $U_a \cdot B$ na dvě části (Obr. 3.4). Nad parabolou stejnosměrný proud teče, pod parabolou stejnosměrný proud neteče. Bylo pozorováno, že v oblasti, kde stejnosměrný proud neteče vznikají oscilace. [6]



Obr. 3.4 Kritická parabola

Protože nehodláme sledovat historický vývoj magnetronu, přikročíme ihned k popisu současných uspořádání.



Obr. 3.5 Řez magnetronem

Magnetron je válcová dioda. Anodová elektroda však není jednoduchý válec, ale skládá se z bloku opatřeného sudým počtem N dutinových rezonátorů (Obr. 3.5 - $N = 8$). Z důvodů symetrie je vysokofrekvenční elektrické pole ve štěrbinách, které spojují obvodové rezonátory s prostorem katoda - anoda (můžeme je považovat za homogenní) ve všech štěrbinách (1 až N) stejné.

Může být ale obecně fázově posunutá, takže platí:

$$E_1 = E_0 \cdot e^{j\omega t} \quad (3.2)$$

$$E_1 = E_0 \cdot e^{(j\omega - \varphi)} \quad (3.3)$$

$$E_N = E_0 \cdot e^{j[\omega t - (N-1)\varphi]} \quad (3.4)$$

Při obcházení rezonátorů se dalším krokem dostaneme opět do rezonátoru s $N = 1$, takže nutně

$$E_{N+1} = E_1 \quad (3.5)$$

z čehož plyne

$$E_0 \cdot e^{j\omega t} = E_0 \cdot e^{j(\omega t - N\varphi)} \quad (3.6)$$

takže

$$\varphi = \frac{2\pi k}{N} = \varphi(k) \quad (3.7)$$

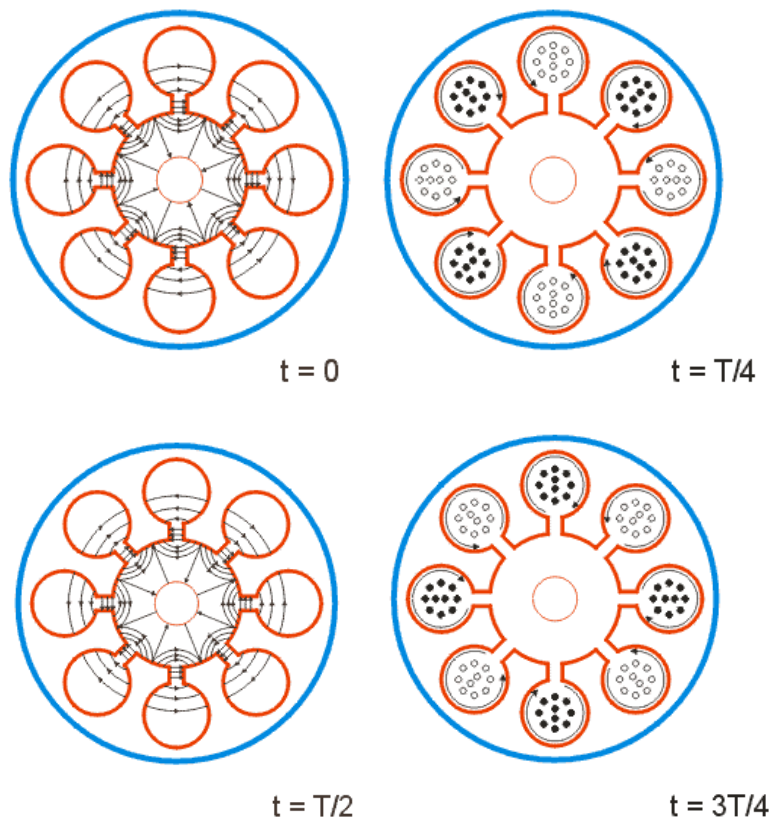
kde

$$k = 0, \dots, \frac{N}{2} \quad (3.8)$$

k zde čísluje modus pole v celé rezonanční dutině magnetronu. Pro $k = N / 2$ (nejvyšší vid) platí

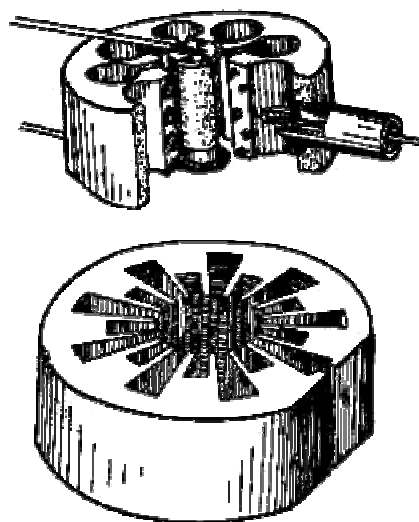
$$\varphi\left(\frac{N}{2}\right) = \pi \quad (3.9)$$

a označuje se též jako π - vid. Tento vid má tu vlastnost, že elektrické pole v sousedních šterbinách je právě v opačné fázi. Pro elektroniku magnetronu má význam jen tento vid, ostatní možné vidy jsou nežádoucí a potlačují se zvláštními opatřeními. Struktura pole v magnetronové dutině při vybuzení π vidu je na Obr. 3.6. [6]



Obr. 3.6 Struktura pole v magnetronové dutině při vybuzení π vidu

Na Obr. 3.7 jsou znázorněny magnetronové dutiny dvou různých typů s odvodem energie pomocí smyčky a štěrbin (v druhé dutině není zakreslena katoda).



Obr. 3.7 Magnetronové dutiny

3.3 Rovinný magnetron

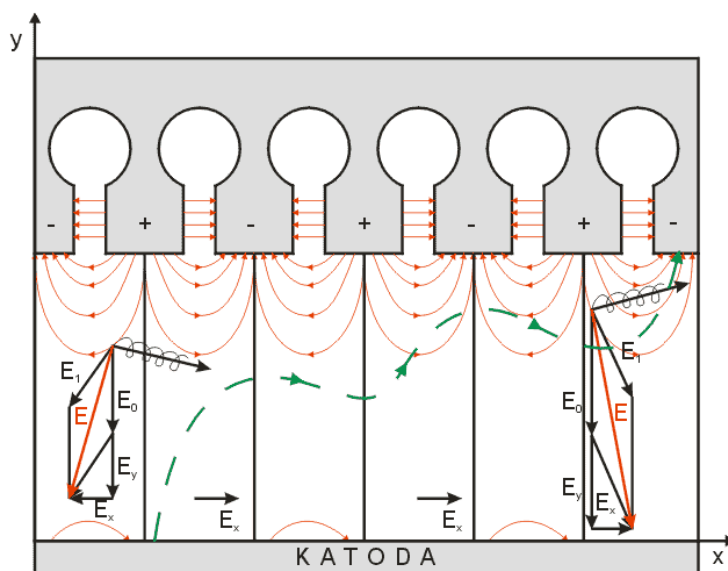
Doposud jsme elektromagnetické pole v magnetronové dutině považovali za kmity. Fázové posunutí mezi sousedními štěrbinami muselo vyhovovat podmínce

$$\varphi = \frac{2\pi}{N}k \quad (3.10)$$

kteřá plynula z toho, že struktura obvodových rezonátorů - neboli periodická struktura - byla kruhově uzavřená. Dospějeme však ke stejnému výsledku, budeme-li elektromagnetické pole v magnetronové dutině považovat za elektromagnetickou vlnu, která postupuje dokola (rotuje). Geometrický úhel mezi středy sousedních štěrbin je

$$\alpha = 2\pi / N. \quad (3.11)$$

Vlna postoupí od jedné štěrbiny k následující za čas Δt , potom úhlová rychlost rotující vlny je ω .



Obr. 3.8 Rovinný magnetron

Rezonanční struktura magnetronové dutiny pracuje jako zpomalovací struktura. Zpomaluje elektromagnetické vlny, čímž je vlastně umožněna jejich silná interakce s elektrony. Je poněkud „nepřirozené“ kmity v uzavřené dutině považovat za rotující vlnu (vlny). Můžeme si však představit, že válcový magnetron rozřízneme a narovnáme. Dostaneme tak rovinný magnetron (Obr. 3.8), kde již elektromagnetická vlna nerotuje, ale postupuje vpřed zpomalenou rychlostí.

4 VLNOVODY

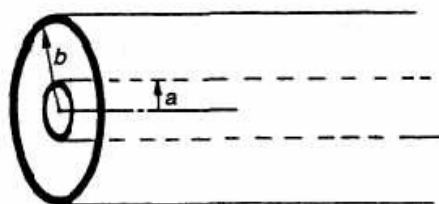
4.1 Přenosové vedení

Rezonanční obvod lze nahradit dutinou, v jejímž nitru pole rezonují. Jiným zajímavým technickým problémem je spojování jednoho prvku s druhým tak, aby mezi nimi byl možný přenos elektromagnetické energie. V nízkofrekvenčních obvodech se spojování realizuje pomocí drátů, ale pro vysoké frekvence se tento způsob dost dobře nehodí, protože v tom případě by obvody vyzařovaly energii do celého okolního prostoru a je problém regulovat, kam energie půjde. Pole se rozptylují kolem drátů; drátěné vodiče „neusměrňuje proudy a napětí dost dobře. V této kapitole chceme prozkoumat způsoby propojení prvků při vysokých frekvencích. Je to jeden z možných přístupů k tomuto tématu.

Nyní je čas podívat se, co se stane, když jsou kmitající pole omezena v jednom nebo více rozměrech. Objevíme nový zajímavý úkaz: jsou-li pole omezena pouze ve dvou rozměrech a ponechá se jim volnost postupovat ve třetím rozměru, budou se šířit ve formě vlnění. Jde o vedené vlny, které jsou předmětem této kapitoly.

Začněme vypracováním obecné teorie přenosového vedení. Obyčejné vysokonapěťové přenosové vedení, které se krajinou táhne od sloupu ke sloupu, vyzáří část přenášeného výkonu. Síťové kmitočty (50-60 Hz) jsou však tak nízké, že jde o nevýznamnou ztrátu. Vyzařování by se dalo zamezit obklopením vedení kovovým potrubím. Tuto metodu nelze však v případě silnoprůdého vedení realizovat, neboť používané proudy a napětí by vyžadovaly velmi velké, nákladné a těžké potrubí. Proto se používají jednoduchá „otevřená“ vedení.

Při frekvencích o něco vyšších, řekněme několik kilohertzů, může už mít vyzařování význam. Lze ho však zmenšit použitím dvojlinek, jako se to dělá u telefonních spojení na krátké vzdálenosti. Při vyšších frekvencích se však záření stává skoro neúnosným, ať už pro únik energie, nebo proto, že se energie dostává do jiných obvodů, v nichž je nežádoucí. Při frekvencích od několika kilohertzů do několika stovek megahertzů se elektromagnetické signály a energie přenášejí obvykle koaxiálním vedením, skládajícím se z vodivého drátu nacházejícího se uvnitř válcového „vnějšího vodiče“ nebo „stínění“. Ačkoli následující úvahy se hodí na přenosové vedení vytvořené dvěma rovnoběžnými vodiči jakéhokoliv tvaru, budeme se při nich odvolávat na koaxiální vedení. [9]

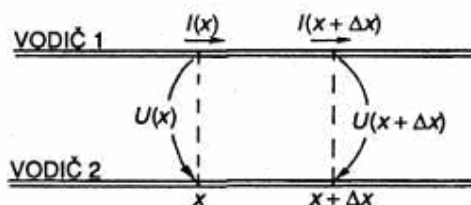


Obr. 4.1 Koaxiální přenosové vedení

Vezmeme nejjednodušší koaxiální vedení, skládající se ze středového vodiče, o němž předpokládáme, že je tenkostěnným dutým válcem, a vnějšího vodiče jiného tenkostěnného válce, sousého s vnitřním vodičem (obr. 4.1). Začneme tím, že přibližně vypočteme, jak se takové vedení chová při poměrně nízkých frekvencích. Něco o jeho nízkofrekvenčním chování jsme naznačili už dříve, když jsme řekli, že takové dva vodiče se vyznačují určitou indukčností a určitou kapacitou, připadající na jednotku jejich délky. Opravdu lze chování každého přenosového vedení při nízkých frekvencích popsat udáním jeho indukčnosti připadající na jednotku délky L_0 a jeho kapacity připadající na jednotku délky C_0 . Vedení tedy můžeme uvažovat jako limitní případ L - C filtru. Takový filtr, který bude imitovat naše vedení, můžeme vytvořit, když spojíme do série malé indukčnosti $L_0\Delta x$, přičemž každou z nich připojíme k zemi malou kapacitou $C_0\Delta x$, kde Δx je element délky vedení. Aplikací našich výsledků na tento nekonečný filtr se přesvědčíme, že podél vedení se budou šířit elektrické signály. Místo sledování tohoto přístupu bychom se však raději na vedení podívali z hlediska diferenciální rovnice.

Představte si, že pozorujeme, co se děje ve dvou sousedních bodech přenosového vedení, nacházejících se řekněme ve vzdálenosti x a $x+\Delta x$ od jeho počátku. Necht' $U(x)$ je rozdíl potenciálů mezi oběma vodiči a $I(x)$ je proud v „horním“ vodiči (obr.4.2). Když se proud ve vedení mění, způsobí indukčnost pokles napětí na malém úseku vedení od x do $x + \Delta x$ o hodnotu

$$U = U(x + \Delta x) - U(x) = -L_0\Delta x \frac{dI}{dt}$$



Obr. 4.2 Proudý a napětí na přenosovém vedení

Nebo, přejdeme-li k limitě pro $\Delta x \rightarrow 0$, dostaneme

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -L_0 \frac{\partial I}{\partial t} \quad (4.1)$$

Změna proudu způsobuje vznik gradientu napětí. Opět se odvoláme na obrázek. Když se napětí v poloze x mění, musí existovat nějaký náboj, který se odevzdává kapacitě této oblasti. Vezme-li se malý kousek vedení mezi x a $x + \Delta x$, je na něm náboj $q = C_0 \Delta x U$. Rychlost změny tohoto náboje v čase je $C_0 \Delta x dU/dt$. Ale náboj se mění jen tehdy, když proud $I(x)$ vstupující do uvažovaného elementu se liší od proudu $I(x + \Delta x)$ z něj vystupujícího.

Označí-li se tento rozdíl ΔI , může se psát, že

$$\Delta I = -C_0 \Delta x \frac{dU}{dt}$$

Přejdeme-li k limitě pro $\Delta x \rightarrow 0$, dostaneme

$$\frac{\partial I}{\partial x} = -C_0 \frac{\partial U}{\partial t} \quad (4.2)$$

Zachování náboje tedy znamená, že gradient proudu je přímo úměrný rychlosti změny napětí v čase.

Rovnice (4.1) a (4.2) představují základní rovnice přenosového vedení. Kdybychom chtěli, mohli bychom je upravit, aby zahrnovaly i účinek odporu vodičů nebo úniku náboje izolací mezi vodiči, ale v naší nynější úvaze zůstaneme u tohoto jednoduchého tvaru.

Obě rovnice přenosového vedení lze zkombinovat derivováním jedné z nich podle té druhé podle x a vyloučením U nebo I . Potom dostaneme rovnici

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = C_0 L_0 \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = C_0 L_0 \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} \quad (4.4)$$

Znovu poznáváme vlnovou rovnici pro proměnnou x . V případě homogenního přenosového vedení se napětí (i proud) šíří podél vedení jako vlny. Napětí podél vedení musí jít vyjádřit ve tvaru $U(x, t) = f(x-vt)$ nebo $U(x, t) = g(x+vt)$, nebo jako součet obou těchto funkcí. A co je zde rychlostí v ? Víme, že součinitel členu s $\partial^2/\partial t^2$ je právě roven $1/v^2$. Proto

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \quad (4.5)$$

Ponecháme na vás, abyste dokázali, že pro každou vlnu na vedení je napětí přímo úměrné proudu v této vlně a že součinitelem úměrnosti je právě charakteristická impedance vedení Z_0 . Označíme-li jako U_+ a I_+ napětí a proud v případě vlny postupující ve směru osy x , měli bychom dostat

$$V_+ = Z_0 I_+ \quad (4.6)$$

Podobně v případě vlny postupující ve směru $-x$ platí vztah

$$V_- = Z_0 I_-$$

Charakteristická impedance, kterou, jak jsme zjistili z našich rovnic pro filtr, udává vztah

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (4.7)$$

představuje čistou rezistanci.

Abychom našli rychlost šíření v a charakteristickou impedanci Z_0 přenosového vedení, musíme znát jeho indukčnost a kapacitu, připadající na jednotkovou délku. Pro koaxiální kabel lze obě snadno vypočítat. Podívejme se proto, jak se to dělá. V případě indukčnosti položíme veličinu $L^2/2$ rovnu magnetické energii, kterou dostaneme integrováním $\varepsilon_0 c^2 B^2/2$ přes objem. Předpokládejme, že středovým vodičem prochází proud I . Víme, že v tomto případě $B = I/2\pi\varepsilon_0 c^2 r$, kde r je vzdálenost od osy. Vezmeme-li jako element objemu válcovou vrstvu s tloušťkou dr a délkou L , dostaneme pro magnetickou energii [9]

$$W = \frac{\varepsilon_0 c^2}{2} \int_a^b \left(\frac{I}{2\pi\varepsilon_0 c^2} r \right)^2 l 2\pi r dr,$$

kde a , b jsou poloměry vnitřního, resp. vnějšího vodiče. Po integrování se dostane

$$W = \frac{I}{4\pi\epsilon_0 c^2} \ln \frac{b}{a} \quad (4.8)$$

Položí-li se tato energie rovnu $-1/2LI^2$, je vidět, že

$$L = \frac{l}{2\pi\epsilon_0 c^2} \ln \frac{b}{a} \quad (4.9)$$

L je - jak to má být přímo úměrné délce vedení l , takže indukčnost připadající na jednotkovou délku L_0 udává vztah

$$L_0 = \frac{\ln(b/a)}{2\pi\epsilon_0 c^2} \quad (4.10)$$

Už je vypočítán náboj ve válcovém kondenzátoru. Vydělí-li se nyní tento náboj rozdílem potenciálů, dostává se

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln(b/a)}$$

Kapacita připadající na jednotkovou délku C_0 je rovna C/L . Porovná-li se tento výsledek je vidět, že součin $L_0 C_0$ je roven $1/c^2$, takže rychlost $v = 1/\sqrt{L_0 C_0}$ je rovna c . Vlna postupuje po vedení rychlostí světla. Tento výsledek závisí na provedených předpokladech: a) že v prostoru mezi vodiči se nenacházejí žádné dielektrické nebo magnetické látky; b) všechny proudy tečou na površích vodičů (jak tomu je u dokonalých vodičů). Později se přesvědčíme, že v případě dobrých vodičů se při vysokých frekvencích všechny proudy rozdělují po površích, jako by šlo o dokonalé vodiče, takže tento předpoklad opravdu platí.

Je zajímavé, že zatímco předpoklady a) i b) jsou splněny, je součin $L_0 C_0$ roven $1/c^2$ pro každý rovnoběžný pár vodičů - i, řekněme, pro šestiboký vnitřní vodič nacházející se kdekoliv uvnitř elipsoidního vnějšího vodiče. Je-li průřez konstantní a prostor mezi vodiči neobsahuje žádnou látku, vlny se šíří rychlostí světla.

Pro charakteristickou impedanci nelze uvést žádné takové obecné tvrzení. Pro koaxiální vedení platí

$$Z_0 = \frac{\ln(b/a)}{2\pi\epsilon_0 c} \quad (4.11)$$

Součinitel $1/\epsilon_0$ c má rozměr odporu a je roven 120π ohmům. Geometrický součinitel $\ln(b/a)$ závisí na rozměrech pouze logaritmicky, takže pro koaxiální vedení - a také většinu jiných vedení - bývají typické hodnoty charakteristické impedance asi od 50 ohmů do několika set ohmů. [9]

4.2 Obdélníkový vlnovod

Úkaz, o kterém chceme dále hovořit, se na první pohled zdá být zarážející: koaxiální vedení bude moci přenášet elektromagnetickou energii, i když je z něj středový vodič odstraněn. Jinými slovy, při dostatečně vysokých frekvencích bude prázdná trubice pracovat právě tak dobře jako trubice s vodičem uvnitř. Souvisí to s tím záhadným způsobem, kterým se rezonanční obvod skládající se z kondenzátoru a indukčnosti při vysokých frekvencích nahradil jen pouzdrem.

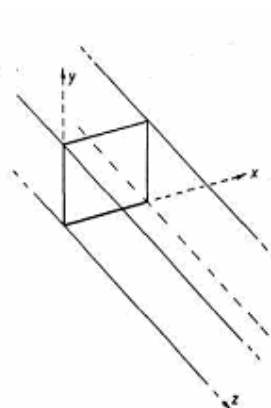
Ačkoliv chápat přenosové vedení jako rozloženou indukčnost a kapacitu se zdá být pozoruhodným, všichni víme, že elektromagnetické vlny se mohou šířit uvnitř prázdné kovové trubice. Vždyť je-li trubice přímá, můžeme skrz ní vidět. Takže elektromagnetické vlny určitě trubicí procházejí. Ale také víme, že vnitřkem samotné kovové trubice se nedají přenášet nízkofrekvenční vlny (střídavý proud nebo telefonní signály). Z toho vyplývá, že elektromagnetické vlny procházejí jen tehdy, je-li jejich vlnová délka dostatečně krátká. Proto se chceme zabývat hraničním případem největší vlnové délky (neboli nejnižší frekvence), která může projít trubicí o daném rozměru. Protože taková trubice se pak používá k přenosu vln, nazývá se vlnovod.

Začněme s trubicí o obdélníkovém průřezu, neboť její analýza je nejjednodušší. Nejdříve podáme matematické zpracování a později se vrátíme a podíváme se na tuto úlohu mnohem elementárnějším způsobem. Elementárnější přístup však lze snadno aplikovat jen na obdélníkový vlnovod. Základní úkazy jsou tytéž v jakémkoliv vlnovodu libovolného tvaru, takže matematická úvaha je principiálně oprávněnější.

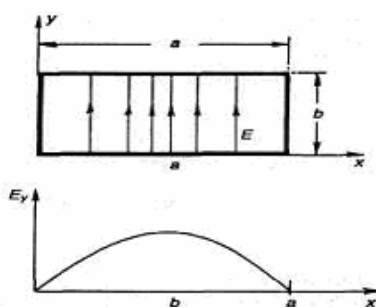
Naší úlohou je tedy najít druh vln, které mohou existovat uvnitř pravoúhlé trubice. Nejdříve si zvolme nějaké vhodné souřadnice; umístíme osu z podél trubice a osy x, y rovnoběžně s jejími stěnami (obr. 4.3).

Víme, že postupují-li podél trubice světelné vlny, je jejich elektrické pole příčné. Hledejme proto nejdříve taková řešení, v nichž je E kolmé k ose z a necht' má pouze y -ovou složku E .

V příčném směru vzhledem k vlnovodu se toto elektrické pole bude nějakým způsobem měnit; u stěn rovnoběžných s osou y musí klesat k nule, neboť ve vodiči se proudy a náboje vždy samy rozdělí tak, aby elektrické pole na povrchu vodiče nemělo tangenciální složku. Graf závislosti E na x bude tedy mít tvar nějakého oblouku (obr. 2.4). Nejde snad o Besselovu funkci? Ne, neboť Besselova funkce se vyskytuje pouze v úlohách s válcovou geometrií. V případě pravoúhlé geometrie se vlny obvykle popisují jednoduchými harmonickými funkcemi. Zkusme tedy něco podobného $\sin k_x x$.



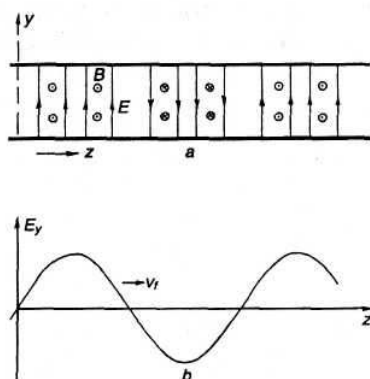
Obr. 4.3 Souřadnicová soustava v případě obdélníkového vlnovodu



Obr. 4.4 Elektrické pole ve vlnovodu při nějaké hodnotě z

Protože potřebujeme vlny, které se šíří podél vlnovodu, hledáme takové pole, které při postupu ve směru osy z bude střídat své znaménko (obr. 4.5) a tyto oscilace se budou pohybovat podél vlnovodu rychlostí v .

Budeme-li mít oscilace při určité frekvenci ω , bude nutné prověřit, zda se vlna může měnit v závislosti na z jako $\cos(\omega t - k_z z)$ nebo - při použití vhodnějšího matematického vyjádření - jako $\exp [i(\omega t - k_z z)]$. Tato závislost na z představuje vlnu pohybující se rychlostí $v = \omega/k_z$.



Obr. 4.5 Závislost pole ve vlnovodu na z

Mohli bychom se tedy domnívat, že vlna ve vlnovodu bude mít následující matematické vyjádření:

$$E_y = E_0 \sin k_x x e^{i(\omega t - k_z z)} \quad (4.12)$$

Přesvědčme se, zda tento odhad vyhovuje rovnicím pole. Zaprvé, elektrické pole nemá mít na vodičích žádné tangenciální složky. Naše pole tomuto požadavku vyhovuje; je kolmé na vrchní a spodní stěnu a na bočních stěnách je nulové. Totiž bude to tak, když zvolíme k_x takové, aby polovina cyklu funkce $\sin k_x x$ připadla přesně na šířku vlnovodu, tj. když

$$k_x a = \pi \quad (4.13)$$

Existují i jiné možnosti, např. $k_x a = 2\pi, 3\pi, \dots$ nebo obecně

$$k_x a = n\pi \quad (4.14)$$

kde n je jakékoli celé číslo. Tyto případy představují různé složité uspořádání pole, ale pro tentokrát vezmeme pouze nejjednodušší z nich, v němž $k_x = \pi / a$, kde a je šířka nitra vlnovodu. [9]

Dále, divergence pole E musí být ve volném prostoru rovna nule, protože tam nejsou žádné náboje. Naše E má pouze y -ovou složku a ta na y nezávisí, takže skutečně dostáváme, že $\nabla E = 0$.

Konečně, naše elektrické pole musí ve volném prostoru uvnitř vlnovodu souhlasit se zbývajícími Maxwellovými rovnicemi. Je to totéž, jako kdybychom řekli, že musí splňovat vlnovou rovnici

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} = 0 \quad (4.15)$$

Musíme prověřit, zda náš typ řešení bude této rovnici vyhovovat. Druhá derivace E_y podle x je $-k_x^2 E_y$. Druhá derivace podle y je rovna nule, neboť ve výrazu (2.12) na y nic nezávisí. Druhá derivace podle z je rovna $-k_z^2 E_y$ a druhá derivace podle t je rovna $-\omega^2 E_y$. Podle rovnice (2.15) má tedy platit

$$k_x^2 E_y + k_z^2 E_y - \frac{\omega^2}{c^2} E_y = 0$$

S výjimkou případu, kdy E je všude rovno nule (což není příliš zajímavé), tato rovnice bude splněna, když

$$k_x^2 + k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} = 0 \quad (4.16)$$

Hodnotu k_z jsme už stanovili, a podle této rovnice tedy vlny takového druhu, jaký jsme předpokládali, mohou existovat, souvisí-li k_z s frekvencí ω tak, aby byla splněna rovnice (4.16); jinými slovy, když

$$k_z = \sqrt{\left(\frac{\omega^2}{c^2}\right) - \left(\frac{\pi^2}{a^2}\right)} \quad (4.17)$$

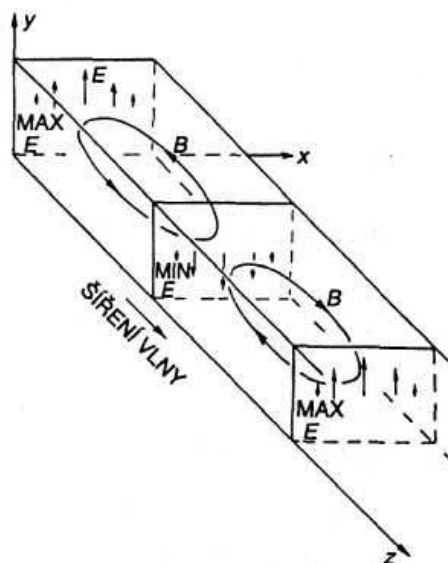
Námi popsané vlnění se šíří ve směru osy z s touto hodnotou k_z .

Vlnové číslo k_z , které vypočteme ze vztahu (4.17), určuje rychlost, jíž se podél vlnovodu pohybují uzly vlny při dané frekvenci ω . Fázová rychlost je dána vztahem

$$v = \frac{\omega}{k_z} \quad (4.18)$$

Vlnovou délku λ postupné vlny udává vztah $\lambda = 2\pi v/\omega$, takže k_z je rovno i $2\pi/\lambda_z$ kde λ_z je vlnová délka kmitů ve směru osy z , tj. vlnová délka vlny ve vlnovodu. Vlnová délka ve vlnovodu se, přirozeně, liší od vlnové délky elektromagnetického vlnění s touž frekvencí ω ve volném prostoru. Označíme-li λ_v vlnovou délku ve volném prostoru, rovnající se $2\pi c/\omega$, můžeme rovnici (4.17) přepsat na tvar

$$\lambda_v = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - (\lambda_0/2a)^2}} \quad (4.19)$$



Obr. 4.6 Magnetické pole ve vlnovodu

Kromě elektrických polí existují i magnetická pole, která se pohybují s vlnou, ale nebudeme se nyní zdržovat odvozením jejich vyjádření. Pokud $c^2 \nabla \times B = \partial E / \partial t$, magnetické indukční čáry budou vytvářet uzavřené křivky kolem oblastí, v nichž je $\partial E / \partial t$ největší, tj. na půl cesty mezi maximem a minimem E . Uzavřené magnetické indukční čáry budou ležet rovnoběžně s rovinou xz mezi vrchy a doly pole E (obr.4.6).

4.3 Mezní frekvence

Je-li rovnice (4.16) řešena vzhledem ke k_z , musí vlastně existovat dva kořeny - jeden kladný a jeden záporný. Měli bychom psát, že

$$k_z = \pm \sqrt{\left(\omega^2 / c^2\right) - \left(\pi^2 / a^2\right)} \quad (4.20)$$

Tato dvě znaménka znamenají pouze to, že mohou existovat vlny, které se šíří zápornou fázovou rychlostí (ve směru osy $-z$), jakož i vlny, které se ve vlnovodu šíří v kladném směru. Protože oba druhy vln mohou existovat současně, budou možná i řešení znamenající stojaté vlnění.

Podle vztahu pro k_z , vedou vyšší frekvence k větším hodnotám k_z a tedy kratším vlnovým délkám až po mezní případ velkých ω , kdy se h stává rovným ω/c - hodnotě, která platí pro vlnění ve vakuu. Světlo, které „vidíme“ trubici, se ještě pohybuje rychlostí ξ . Ale nyní si všimněme, že postupujeme-li k nízkým frekvencím, stane se cosi podivného. Zpočátku se vlnová délka stále prodlužuje, ale při příliš malém ω se výraz pod odmocninou v (4.20) náhle stává záporným. Toto nastane, jakmile ω klesne pod $\pi c/a$ - nebo když překročí hodnotu λ_0 . Jinými slovy, když frekvence klesne pod určitou hodnotu $\omega_m = \pi c/a$, vlnové číslo k_z (a také λ_0) se stane imaginárním a žádné řešení nemáme. Nebo máme? Kdo řekl, že k musí být reálné? Co když vychází imaginární? Naše rovnice pole jsou stále ještě splněny. Možná že imaginární k také představuje vlnění.

Předpokládejme, že ω je menší než ω_m ; pak můžeme psát

$$k_z = \pm ik' \quad (4.21)$$

kde k' je reálné kladné číslo

$$k' = \sqrt{\left(\left(\frac{\pi^2}{a^2}\right) - \left(\frac{\omega^2}{c^2}\right)\right)} \quad (4.22)$$

Vrátíme-li se nyní zpět k našemu výrazu (4.12) pro E_y , dostaneme

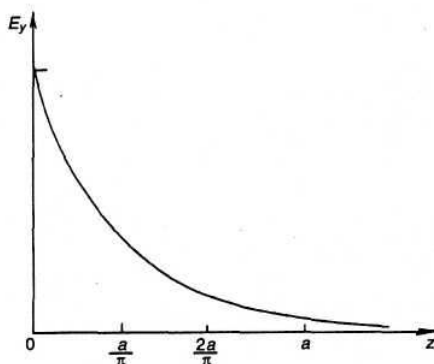
$$E_y = E_0 \sin k_x x e^{i(\omega t - ik'z)} \quad (4.23)$$

což můžeme napsat ve tvaru

$$E_y = E_0 \sin k_x x e^{\pm k'z} e^{i\omega t} \quad (4.24)$$

Tento výraz představuje pole E , které v čase kmitá jako $e^{i\omega t}$, ale mění se z jako $e^{\pm k'z}$. V závislosti na z hladce klesá a stoupá právě tak jako reálná exponenciální funkce. Při tomto odůvodnění nejde o zdroje, z nichž vlnění vychází, ale samozřejmě přitom někde ve vlnovodu musí zdrojové místo být. Znaménko u k' má být takové, aby pole klesalo se zvětšující se vzdáleností od zdroje vlnění.

Tak pro frekvence nižší než $\omega_m = \pi c/a$ vlnění vlnovodem nepostupuje; kmitající pole pronikají do vlnovodu pouze na vzdálenost řádu $1/k'$. Z tohoto důvodu se frekvence ω_m nazývá mezní frekvencí vlnovodu. Podíváme-li se na vztah (4.22), vidíme, že pro frekvence pouze trochu nižší než co je číslo k' malé a pole mohou proniknout ve vlnovodu do velké vzdálenosti.



Obr. 4.7 Závislost E_y na z pro $\omega \ll \omega_m$

Ale je-li ω mnohem menší než ω_m , je exponenciální součinitel k' roven π/a a pole vymizí velmi rychle (obr. 4.7). Pole klesá v poměru $1/e$ na vzdálenosti a/π , tj. pouze asi na třetině šířky vlnovodu. Pole pronikají na velmi malou vzdálenost od zdroje.

Chceme zdůraznit zajímavý rys této analýzy vedených vln - výskyt imaginárního vlnového čísla k . Obvykle, když ve fyzice řešíme rovnici a dostaneme imaginární číslo, neznamená to nic fyzikálního. V případě vlnění však imaginární vlnové číslo k znamená. Vlnová rovnice je stále splněna a imaginární číslo k_z pouze znamená, že příslušné řešení poskytuje exponenciálně klesající pole místo postupných vln. V každé úloze o vlnění, v níž se k stává imaginárním při nějaké frekvenci, znamená to, že se forma vlnění mění - sinusové vlnění se mění na exponenciální.

[9]

4.4 Rychlost šíření vln ve vlnovodu

Výše uvedená rychlost vlnění je tzv. fázová rychlost - rychlost uzlu vlny - a je funkcí frekvence. Dosazením vztahu (4.17) do vztahu (4.18) můžeme dostat vyjádření

$$v_f = \frac{c}{\sqrt{1 - (\omega_m / \omega)^2}} \quad (4.25)$$

Pro frekvence nad mezní frekvenci, při nichž existuje postupné vlnění, je ω_m/ω menší než 1 a v_f je reálná hodnota, větší než rychlost světla. Fázové rychlosti větší než rychlost světla jsou možné, protože jsou to pouze uzly vlny, co se pohybuje, a ne energie nebo informace. Abychom se dověděli jakou rychlostí budou postupovat signály, musíme vypočítat rychlost impulsů nebo modulací vyvolaných interferencí vlny o určité frekvenci s jednou nebo více

vlnami odlišných frekvencí. Rychlost obálky takové skupiny vln jsme nazvali grupovou rychlostí; je rovna ne ω/k , ale $d\omega/dk$:

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} \quad (4.26)$$

Derivujeme-li (4.17) podle ω a napíšeme převrácenou hodnotu výsledku (abychom dostali $d\omega/dk$), dostaneme

$$v_g = c\sqrt{1 - (\omega_m / \omega)^2} \quad (4.27)$$

což je méně, než rychlost světla ve vakuu.

Geometrický průměr hodnot v_f a v_g je přesně roven rychlosti světla c .

$$v_g v_f = c^2 \quad (4.28)$$

To je pozoruhodné, neboť s podobným vztahem jsme se setkali v kvantové mechanice. Hybnost p a energie E částice při jakékoliv rychlosti - i relativistické - souvisejí podle vztahu

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4 \quad (4.29)$$

Ale v kvantové mechanice je energie rovna $\hbar\omega$ a hybnost h/λ , tj. $\hbar k$, takže vztah (4.29) lze napsat ve tvaru

$$\frac{\omega^2}{c^2} = k^2 + \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \quad (4.30)$$

respektive

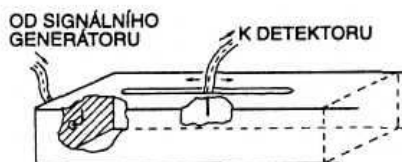
$$k = \sqrt{(\omega^2 / c^2) - (m^2 c^2 / \hbar^2)} \quad (4.31)$$

Grupová rychlost vlnění je i rychlostí, kterou je vlnovodem přenášena energie. Potřebujeme-li zjistit tok energie vlnovodem, můžeme jej najít jako součin hustoty energie a grupové rychlosti. Je-li efektivní hodnota elektrického pole E_0 , je střední hustota elektrické energie rovna $\varepsilon_0 E_0^2 / 2$. I s magnetickým polem je spojena určitá energie. Tu zde dokazovat nebudeme, ale v každé dutině nebo vlnovodu jsou elektrická a magnetická energie stejné, takže celková hustota elektromagnetické energie je rovna $\varepsilon_0 E_0^2$. Vlnovodem přenášený výkon dW/dt je pak

$$\frac{dW}{dt} = \varepsilon_0 E_0^2 abv_g \quad (4.32)$$

4.5 Detekce vedených vln

Energii lze do vlnovodu přivádět pomocí nějaké „antény“. Postačí k tomu například svislý drátek nebo „kolík“. Existenci vedených vln lze detekovat odebráním části elektromagnetické energie pomocí malé přijímací „antény“, která může být opět drátěným kolíkem nebo malou smyčkou. Aby bylo vidět budicí kolík a snímací sondu je na obr. 4.8 ukázán vlnovod s výřezy. Napájecí kolík můžeme koaxiálním kabelem připojit k signálnímu generátoru a snímací sondu lze podobným kabelem spojit s detektorem. Obvykle je výhodné vsunout snímací sondu do vlnovodu dlouhou tenkou štěrbinou. Pak lze posouváním sondy podél vlnovodu měřit pole v různých místech.



Obr. 4.8 Vlnovod s budicím kolíkem a snímací sondou

Je-li signální generátor nastaven na frekvenci ω , která je vyšší než mezní frekvence ω_m , bude se z napájecího kolíku šířit vlnovodem vlnění. Je-li vlnovod nekonečně dlouhý - čehož prakticky lze docílit jeho uzavřením pomocí pečlivě zkonstruovaného absorbátoru, aby se zamezilo odrazům od vzdáleného konce vlnovodu - bude toto vlnění jediné. Pak nebude signál snímáný detektorem záviset na poloze podél vlnovodu, neboť detektor měří střední časovou hodnotu pole ve svém okolí; jeho výstupní signál bude přímo úměrný přenášenému výkonu.

Je-li však zakončení vlnovodu na vzdáleném konci realizováno tak, že vytváří odraženou vlnu jako krajní případ, uzavřeme-li jej kovovou destičkou, bude kromě postupující původní vlny existovat i odražená vlna. Tyto dvě vlny budou interferovat a vytvoří ve vlnovodu stojatou vlnu podobnou stojatým vlnám struny. Budeme-li sondu posouvat podél vlnovodu, bud údaj detektoru periodicky stoupat a klesat, přičemž maximální bude v poloze každé kmitný stojaté vlny a minimální v každém jejím uzlu. Vzdálenost mezi dvěma po

sobě následujícími uzly (nebo kmitnami) bude rovna $\lambda_v/2$. Z toho vyplývá pohodlný způsob měření vlnové délky ve vlnovodu. Když se frekvence přibližuje k ω_m , vzdálenosti mezi uzly se zvětšují, přičemž se ukáže, že vlnová délka ve vlnovodu roste podle vztahu (4.19).

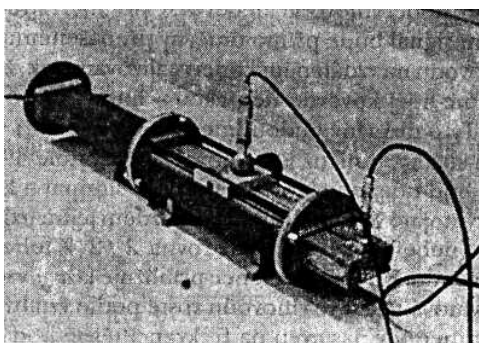
Nechť je náš signální generátor nastaven na frekvenci těsně pod ω_m . Pak se při posouvání snímací sondy ke vzdálenému konci vlnovodu bude údaj detektoru postupně zmenšovat. Sníží-li se frekvence ještě trochu, bude intenzita pole klesat prudce, souhlasně s grafem na obr. 4.7. To je svědectví, že vlny se nešíří. [9]

4.6 Spojování vlnovodů

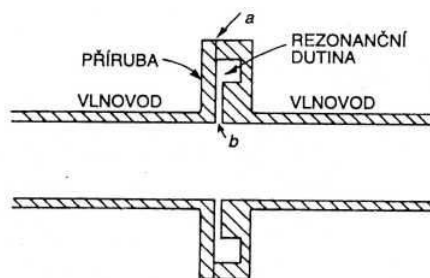
Vlnovody nacházejí důležité praktické použití při přenosu vysokofrekvenčního výkonu, např. při spojení vysokofrekvenčního oscilátoru nebo výstupního zesilovače radiolokační soupravy s anténou. Ve skutečnosti se sama anténa obvykle skládá z parabolického reflektoru, napájeného v ohnisku vlnovodem, na konci se rozšiřujícím do tvaru „trychtýře“, který vyzařuje vlny přicházející vlnovodem. Ačkoliv vysoké frekvence lze přenášet pomocí koaxiálního kabelu, je pro přenos velkých výkonů vlnovod lepší. Zaprvé, maximální výkon, který lze přenášet vedením, je ohraničen průrazným napětím izolace (pevné nebo plynné) mezi vodiči. Ve vlnovodu jsou intenzity polí při daném výkonu obvykle menší než v případě koaxiálního kabelu, takže se jím dají přenášet větší výkony bez vyvolání průrazu. Za druhé, v koaxiálním kabelu jsou obvykle větší ztráty výkonu než ve vlnovodu. Koaxiální kabel musí obsahovat izolační látku, která drží středový vodič a v té to látce dochází ke ztrátám energie - zvláště při vysokých frekvencích. Kromě toho jsou ve středovém vodiči dost vysoké proudové hustoty a protože ztráty rostou s druhou mocninou proudové hustoty, menší proudy, které se objevují na stěnách vlnovodu, způsobují nižší ztráty energie. Aby se tyto ztráty udržely na minimu, vnitřní povrchy vlnovodů se často pokrývají látkou o vysoké vodivosti, například stříbrem.

Problém zapojení obvodu s vlnovody je úplně jiný než odpovídající problém obvodu při nízkých frekvencích. Pro tento účel bylo vyvinuto mnoho speciálních zařízení tzv. mikrovlenné techniky. Například dva vlnové dílce se spolu obvykle spojují pomocí přírub, jak je vidět na obr. 4.9. Taková spojení však mohou vést k velkým ztrátám energie, neboť povrchové proudy musí procházet přes spoj, který může mít relativně vysoký odpor. Jeden způsob zamezení takových ztrát je zhotovovat příruby tak, jak je ukázáno v řezu obr. 4.10. Mezi sousedními dílci vlnovodu je ponechán malý prostor a na lícové ploše jedné z přírub

je vyhloubena drážka tak, aby vznikla malá dutina toho typu. Její rozměry jsou voleny tak, aby dutina byla rezonanční při frekvenci, pro kterou se bude používat. Pro proudy představuje tato rezonanční dutina velkou „impedanci“, takže kovovým stykem (na obr. 4.10) teče poměrně malý proud. Velké proudy ve vlnovodu jen nabíjejí a vybíjejí kapacitu štěrby (v b na obrázku), kde dochází pouze k malé disipaci energie.



Obr. 4.9 Dílce vlnovodu spojené pomocí přírub

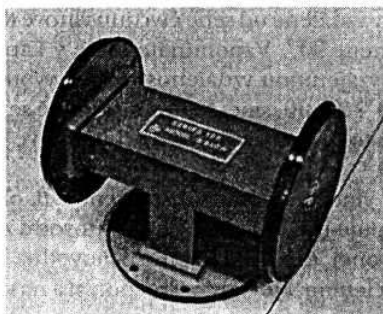


Obr. 4.10 Spoj mezi dvěma vlnovodnými dílci vyznačující se nízkými ztrátami

Dejme tomu, že chcete vlnovod zakončit takovým způsobem, který nepovede ke vzniku odražených vln. Pak musíte na konec dát něco, co imituje nekonečnou délku vlnovodu. Potřebujete „zakončení“, které působí na vlnovod tak, jako charakteristická impedance na přenosové vedení—něco, co pohlcuje přicházející vlny bez jejich odrazu. Vlnovod se pak bude chovat tak, jakoby byl nekonečně dlouhý. Taková zakončení se dělají tak, že se dovnitř vlnovodu vkládají klínovité destičky z odporového materiálu. Jsou pečlivě zkonstruovány tak, aby absorbovaly energii vlny a téměř negenerovaly odražené vlny.

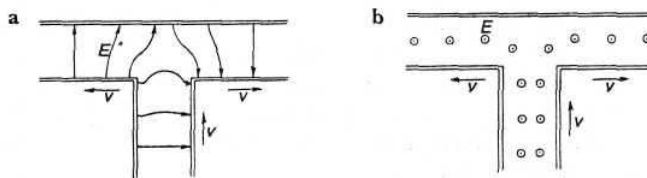
Chcete-li spojit tři součásti, například jeden zdroj připojit ke dvěma různým anténám, pak můžete použít rozdějku tvaru T (obr. 4.11). Výkon přiváděný do střední sekce rozdějky se bude štěpit a rozcházet do obou bočních ramen (a také přitom mohou vznikat odražené

vlny). Z náčrtků na obr. 4.12 se můžete kvalitativně přesvědčit, že pole se budou rozdělovat, když se dostanou na konec vstupní sekce. Vytvoří se taková elektrická pole, která budou počátkem vln vycházejících do obou ramen.



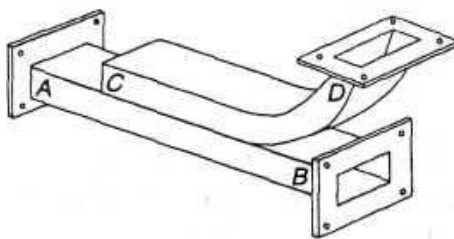
Obr. 4.11 Rozdvojka tvaru T (Na přírubách jsou nasazena plastická víčka, aby se nitro udržovalo čisté, pokud se rozdvojka nepoužívá.)

Pole v rozdvojce budou zhruba taková, jako je vyznačeno v *a* nebo *b* na obr. 4.12. a to podle toho, zda jsou elektrická pole ve vlnovodu rovnoběžná nebo kolmá na „stříšku“ rozdvojky.



Obr. 4.12 Elektrická pole v rozdvojce tvaru T při dvou možných orientacích pole

Nakonec bychom rádi popsali zařízení nazvané směrová odbočka, které je velmi užitečné při zjišťování, co se děje potom, když jste zapojili složité schéma vlnovodů. Představte si, že potřebujete vědět, jakým směrem se pohybují vlny v nějakém dílci vlnovodu; například můžete být zvědaví, zda existuje silná odražená vlna nebo ne. Směrová odbočka odebírá z vlnovodu malou část výkonu, když vlna postupuje jedním směrem, ale nic, když postupuje směrem opačným. Po připojení směrové odbočky k detektoru můžete měřit „jednosměrný“ výkon ve vlnovodu.



Obr. 4.13 Směrová odbočka

Obr. 4.13 představuje náčrtek směrové odbočky; k jedné stěně vlnovodného dílce AB je přiletován jiný vlnovodný dílec CD , vychýlený do strany, aby vznikl prostor pro spojovací příruby. Předtím než se k sobě vlnovody přiletují, provrtají se do každého z nich dva nebo více otvorů navzájem se kryjících, takže něco z polí v hlavním vlnovodu AB může projít do sekundárního vlnovodu CD . Každý z otvorů působí jako malá anténa, která vytváří vlnu v sekundárním vlnovodu. Kdyby byl jen jeden otvor, vlny by se z ní rozcházely na obě strany a byly by obě stejné bez ohledu na to, kterým směrem by postupovala vlna v primárním vlnovodu.

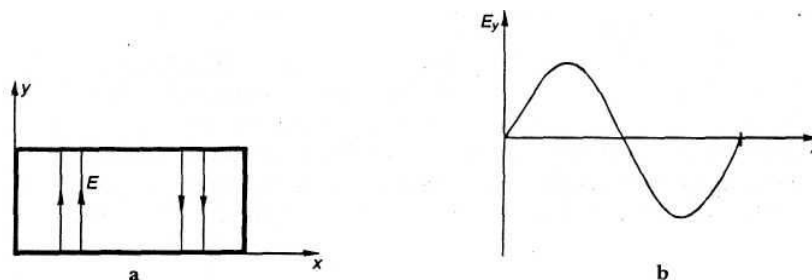
Ale jsou-li vyvrtány dva otvory vzdálené od sebe čtvrtinu vlnové délky ve vlnovodu, budou vytvářet dva zdroje s fázovým posunem 90° . Vlna vybuzená ve vlnovodu CD bude postupovat stejným směrem jako vlna v AB .

Pohybuje-li se v primárním vlnovodu vlna z A směrem k B , objeví se vlna i na výstupu D ze sekundárního vlnovodu. Postupuje-li vlna v primárním vlnovodu z B směrem k A , bude existovat pouze jedna vlna jdoucí ke konci C sekundárního vlnovodu. Tento konec je však opatřen přizpůsobeným zakončovacím členem, který tuto vlnu pohltí a na výstupu z odbočky se žádná vlna neobjeví. [9]

4.7 Mody vlnovodu

Vlna, kterou jsme zvolili při naší analýze, představuje speciální řešení rovnic pole. Existují i mnohá jiná řešení. Každé řešení se nazývá mod vlnovodu. Například v případě pole, které jsme vybrali, se ve směru osy x uložila polovina cyklu sinusoidy. Existuje stejně dobré řešení s plným cyklem; na obr. 4.14 je graf závislosti E na x v tomto případě. Pro takový mod je k_x dvojnásobné, takže mezní frekvence je mnohem vyšší. Kromě toho ve vlně, kterou jsme zkoumali, mělo pole E pouze y -ovou složku. Existují však mody s komplikovanějšími elektrickými poli. Má-li elektrické pole pouze složky ve směru x a ve směru y , tj. je stále

kolmé na směr osy z , nazývá se tento mod „transverzálně elektrický“ (nebo TE) mod. Magnetické pole takových modů bude mít z -ovou složku vždy.



Obr. 4.14 Další možná závislost E na x

Ukazuje se, že má-li E složku ve směru osy z ; tj. ve směru šíření vlny, magnetické pole bude mít vždy jen příčné složky. Taková pole se nazývají transverzálně magnetické (TM) mody. V případě obdélníkového vlnovodu mají všechny jiné mody vyšší frekvenci než jednoduchý TE mod, který jsme popsali. Proto je možné, a obvyklé, používat vlnovod při frekvenci právě převyšující mezní frekvenci pro tento nejnižší mod, ale ležící ještě pod mezní frekvencí všech ostatních modů, takže vlnovodem se šíří pouze jeden mod. Jinak se vlastnosti vlnovodu stávají komplikovanějšími a těžko kontrolovatelnými.

4.8 Jiný pohled na vlnovody

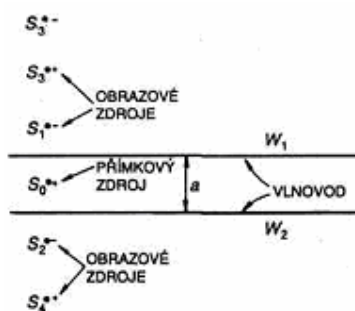
Nyní chceme ukázat jiný způsob chápání, proč vlnovod prudce zeslabuje pole o frekvencích pod mezní frekvencí ω_m . Získá se tím „fyzikálnější“ představa o tom, proč se jeho chování tak drasticky liší při nízkých a vysokých frekvencích. V případě obdélníkového vlnovodu se to může provést analýzou polí pomocí odrazů (nebo obrazů) na stěnách vlnovodu. Tento přístup lze uplatnit jen pro obdélníkové vlnovody; proto se začalo matematictější analýzou, která v principu platí pro vlnovody jakéhokoliv tvaru.

V popsaném modu neměl vertikální rozměr (ve směru osy y) žádný účinek, takže vršek a spodek vlnovodu můžeme zanedbat a myslet si, že ve vertikálním směru se vlnovod táhne do nekonečna. Proto si představujeme, že vlnovod se skládá pouze ze dvou vertikálních desek o vzájemné vzdálenosti a .

Řekněme, že zdrojem polí je vertikální drát umístěný ve středu vlnovodu a napájený proudem, který kmitá s frekvencí ω . Kdyby nebylo stěn vlnovodu, vyzařoval by takový drát válcové vlny.

Nyní si představme, že stěny vlnovodu jsou dokonale vodivé. Pak, přesně jako v elektrostatice, budou podmínky na jeho povrchu splněny, přidáme-li k poli drátu pole jednoho nebo více vhodných zrcadlových obrazů drátu. Představa elektrických zrcadel se uplatňuje v elektrodynamice stejně dobře jako v elektrostatice, samozřejmě za předpokladu, že započteme i časové zpoždění. Víme, že je to pravda, neboť jsme často viděli zrcadlo vytvářející obraz světelného zdroje a obyčejné zrcadlo je právě dokonalým vodičem pro elektromagnetické vlny o optických frekvencích.

Vezměme horizontální řez, nakreslený na obr. 4.15, kde W_1 a W_2 jsou dvě stěny vlnovodu a S_0 je zdrojový drát. Směr proudu v drátu označme jako kladný. Kdyby existovala pouze jedna stěna, řekněme W_1 , mohli bychom ji prostě odstranit, kdybychom do polohy označené S_1 umístili zrcadlový obraz zdroje (o opačné polaritě). Ale v přítomnosti obou stěn bude existovat také obraz S_0 vzhledem ke stěně W_2 - u nás obraz S_2 . Tento zdroj bude také mít obraz v W_1 , který označíme S_3 .



Obr. 4.15 Přímkový zdroj S_0 mezi vodivými rovinnými stěnami W_x a W_2 . Tyto stěny lze zaměnit nekonečnou posloupností zrcadlových zdrojů

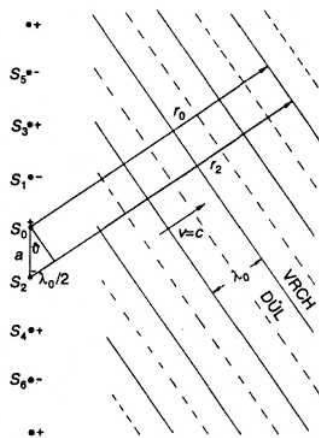
Dále jak S_1 tak i S_3 budou mít své obrazy vzhledem k W_2 v polohách označených S_4 a S_6 atd. V případě našich dvou rovinných vodičů se zdrojem v poloviční vzdálenosti mezi nimi jsou tedy pole stejná jako pole vytvářená nekonečnou posloupností zdrojů, z nich každý je vzdálen a od předcházejícího zdroje. (Je to vlastně totéž, co byste viděli, kdybyste se dívali na drát nacházející

Dále jak S_1 tak i S_3 budou mít své obrazy vzhledem k W_2 v polohách označených S_4 a S_6 atd. V případě našich dvou rovinných vodičů se zdrojem v poloviční vzdálenosti mezi nimi jsou tedy pole stejná jako pole vytvářená nekonečnou posloupností zdrojů, z nich každý je vzdálen a od předcházejícího zdroje. (Je to vlastně totéž, co byste viděli, kdybyste se dívali na drát nacházející se v poloviční vzdálenosti mezi dvěma rovnoběžnými zrcadly.)

Aby byla pole na stěnách nulová, musí se polarita proudů od jednoho obrazu k druhému střídat. Jinými slovy, proudy v nich kmitají s fázovým posunem 180° . Pole vlnovodu je přesně rovno superpozici polí takové nekonečné množině přímkových zdrojů.

Víme, že v blízkosti zdrojů je pole velmi podobné statickému poli. Statické pole mřížky z přímkových zdrojů je podobné poli nabitě desky s výjimkou členů, které klesají se vzdáleností od mřížky exponenciálně. Střední intenzita zdrojů je zde rovna nule, protože znaménko se od zdroje ke zdroji mění. Jakákoliv pole, která existují, musí klesat se vzdáleností exponenciálně. Těsně u zdroje pozorujeme hlavně pole nejbližšího zdroje; ve velkých vzdálenostech k poli přispívají mnohé zdroje a jejich střední účinek je roven nule. Nyní vidíme, proč vlnovod dává pod mezní frekvencí exponenciálně klesající pole. Obzvláště při nízkých frekvencích je statické přiblížení dobré a předpovídá prudké zeslabení polí se vzdáleností.

Nyní stojíme před opačnou otázkou: proč se vlny vůbec šíří? To je záhadná věc. Důvod spočívá v tom, že při vysokých frekvencích může zpoždění polí vyvolat dodatečné změny fáze, což může vést k tomu, že pole fázově posunutých zdrojů se místo vzájemného rušení budou sčítat. U pole generovaného soustavou antén nebo optickou mřížkou je-li několik rádiových antén vhodně uspořádáno, mohou vytvořit takový interferenční obrazec, který v nějakém směru dává silný signál a v jiných směrech signál žádný.



Obr. 4.16 Jedna soustava koherentních vln řady přímkových zdrojů

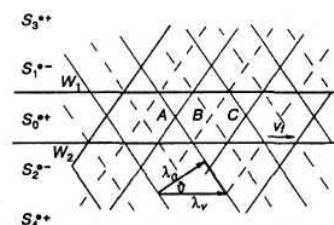
Vraťme se k obr. 4.15 a všimněme si pole ve velké vzdálenosti od řady zrcadlových zdrojů. Pole budou silná pouze v určitých směrech, které závisejí na frekvenci, pouze v těch směrech, v nichž pole všech zdrojů přicházejí ve fázi a sčítají se. Při určité vzdálenosti od zdro-

jů se pole šíří v těchto speciálních směrech jako rovinné vlny. Na obr. 4.16 jsme takovou vlnu znázornili. Plné čáry představují vrchy a čárkované čáry představují doly vlny. Směr vlnění bude ten, pro nějž rozdíl zpoždění vln dvou sousedních zdrojů po hřeben vlny odpovídá polovině periody oscilace vlny. Jinými slovy, rozdíl mezi r_2 a r_0 na obrázku je roven jedné polovině vlnové délky ve volném prostoru:

$$r_2 - r_0 = \frac{\lambda_0}{2}$$

$$\text{Úhel } \vartheta \text{ pak vyjadřuje vztah } \quad \sin \vartheta = \frac{\lambda_0}{2a} \quad (4.33)$$

Samozřejmě existuje i jiná soustava vln, postupujících symetricky dolů pod stejným úhlem vzhledem k řadě zdrojů. Úplné pole ve vlnovodu (ne příliš blízko u zdroje) je rovno superpozici těchto dvou soustav vln (obr. 4.17). Skutečná pole opravdu tak vypadají, ale ovšem jen v prostoru mezi oběma stěnami vlnovodu.



Obr. 4.17 Na pole ve vlnovodu se můžeme dívat jako na superpozici dvou soustav rovinných vln

V takových bodech jako A a C , v nichž se vrchy obou obrazců překrývají, bude mít pole maximum; v takových bodech jako B , kde mají obě vlny své záporné vrcholy, bude mít pole svou minimální (největší zápornou) hodnotu. Pole ve vlnovodu se bude jevit jako v čase postupující podél vlnovodu s vlnovou délkou λ_v , která je rovna vzdálenosti z A do C . Tato vzdálenost souvisí s ϑ podle vztahu

$$\cos \vartheta = \frac{\lambda_0}{\lambda_v} \quad (4.34)$$

Vyjádříme-li ϑ ze vztahu (4.33), dostaneme

$$\lambda_v = \frac{\lambda_0}{\cos \vartheta} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - (\lambda_0/2a)^2}} \quad (4.34)$$

Nyní vidíme, proč k vlnění dochází pouze při frekvencích vyšších, než je mezní frekvence ω_m . Je-li vlnová délka ve volném prostoru větší než $2a$, neexistuje úhel, pod kterým se mohou vlny nakreslené na obr. 4.16 objevit. Konstruktivní interference, která je k tomu potřebná, vzniká tehdy, poklesne-li λ_0 pod $2a$, tj. když ω překročí hodnotu $\omega_m = \pi c/a$.

Je-li frekvence dostatečně vysoká, mohou existovat dva nebo i více přípustných směrů, v nichž se vlny objeví. V našem případě je to tehdy, kdy $\lambda_0 < 2a/3$. Obecně to však může nastat i když $\lambda_0 < a$. Tyto dodatkové vlny přísluší vyšším modům vlnovodu, o nichž jsme se zmínili dříve.

Tato naše analýza také ozřejmila, proč je fázová rychlost vedených vln větší než c a proč závisí na ω . Mění-li se c_0 , mění se úhel šíření volných vln na obr. 2.16, a proto se mění i jejich rychlost ve vlnovodu.

Ačkoliv jsme vedenou vlnu popsali jako superpozici polí nekonečného seskupení lineárních zdrojů, můžete se přesvědčit, že ke stejnému výsledku bychom dospěli, i kdybychom si dvě soustavy vln ve volném prostoru představili jako kdyby se střídavě odrážely mezi dvěma dokonalými zrcadly - a měli přitom na paměti, že každý odraz znamená změnu znaménka fáze. Tyto množiny mnohonásobně odrážených vln se vždy vzájemně ruší s výjimkou případu, kdy se pohybují právě pod úhlem θ , daným vztahem (4.33). Na tutéž věc se můžeme dívat z mnoha hledisek. [9]

4.9 Značení a normalizace ve vlnodové technice

První norma dutých kovových vlnodů byla vydána ministerstvem obrany USA za 2. světové války. Na tyto úvodní normalizační práce navazovaly pak postupně další státy vydáváním vlastních národních norem. Vycházely přitom z americké normy ASA C.83.10 - 1956 společnosti RETMA (*Radio Electronics Television Manufacturers Assnciation*). V současné době se většina světových výrobců a uživatelů mikrovlnné techniky přidržuje normativních údajů uvedených v doporučení Mezinárodního elektrotechnického výboru (IEC) řady 153. Zde jsou uvedena příslušná kmitočtová pásma, vnitřní rozměry vlnodů, jmenovitá tloušťka stěny vlnodů a normalizované značení vlnodů pro dané pásmo. Některé tyto údaje pro nejpoužívanější obdélníkové vlnodvy řady R podle IEC 153 jsou uvedeny v Tab. 4.1.

Tabulka 4.1. Základní technické parametry obdélníkových vlnodů

Označení pásma	S	C (G)	X _b (J)	X	K _u (P)	K	K _a (R)
Kmitočtový rozsah [GHz]	2,60 - 3,95	3,94 - 5,99	5,38 - 8,17	8,20 - 2,50	11,9 - 18,0	17,6 - 26,7	26,4 - 40,0
Střední kmitočet [GHz]	3,0	5,0	7,5	10,0	15,0	20,0	30,0
Rozsah vlnových délek [cm]	1,55 - 7,60	7,61 - 5,01	5,58 - 3,67	3,66 - 2,40	2,52 - 1,67	1,70 - 1,12	1,14 - 0,75
Střední vlnová délka [cm]	10,0	6,0	4,0	3,0	2,0	1,5	1,0
Mezní kmitočet vidu TE ₁₀ [GHz]	2,080	3,156	4,285	6,560	9,490	14,080	21,100
Označení vlnodů dle IEC	R 32	R 48	R 70	R 100	R 140	R 220	R 320
Vnitřní rozměry [mm]	72,14 x 34,04	47,55 x 22,15	34,85 x 15,80	22,86 x 10,16	15,80 x 7,90	10,67 x 4,32	7,11 x 3,56
Označení příruby dle IEC	UER 32	UER 48	UER 70	UBR 100	UBR 140	UBR 220	UBR 320
Teoretický měrný útlum [dB/m]	0,019	0,0331	0,0509	0,106	0,164	0,378	0,599
Maximální přenášený výkon [MW]	10,565	4,877	2,691	1,046	0,577	0,196	0,107

Jednotlivá kmitočtová pásma jsou v oblasti mikrovln často označována písmeny, toto značení, které vzniklo za 2. světové války jako šifra pro dané pásmo a udrželo se dodnes, je však v celosvětovém měřítku značně nejednotné. Symboly uvedené v Tab. 9.3 odpovídají nejčastěji užívanému způsobu značení (v závorce jsou uvedeny další často se vyskytující symboly).

Kromě technických a technologických údajů je doporučením IEC navržen i jednotný systém značení vlnovodů. Označení se skládá z písmene a čísla. Písmeno udává tvar vnitřního průřezu vlnovodu:

- R** (Rectangle) - běžný obdélníkový vlnovod s poměrem stran $b : a = 1 : 2$,
- F** (Flat) - plochý obdélníkový vlnovod s poměrem stran $b : a = 1 : 8$,
- M** (Middle flat) - středně plochý obdélníkový vlnovod s poměrem stran $h : a = 1 : 4$,
- Q** (Quadrangle) - čtvercový vlnovod,
- C** (Circular) - kruhový vlnovod.

Za toto písmeno se ve značce vlnovodu uvádí číslo, které je přibližná desetinásobkem středního provozního kmitočtu při daném (dominantním) vidu šíření. Tak např. úplné označení běžného obdélníkového vlnovodu pro pásmo X (3 cm, 10GHz) je R 100.

Podobný vývoj jako vlnovody prodělala i normalizace jejich přírub. Platí pro ne mezinárodní doporučení IEC 154, které obsahuje návrhy přírub pro běžné obdélníkové vlnovody typu R, pro ploché vlnovody typu F a pro kruhové vlnovody typu C. Doporučené označení přírub pro vlnovody se skládá ze tří písmen a čísla udávajícího velikost vlnovodu. První písmeno určuje konstrukční provedení čelní plochy příruby, a to:

- P** (Pressurable) - příruba s drážkou pro těsnání,
- C** (Choke pressurizable) - příruba s tlumivkou a drážkou pro těsnění.
- U** (Unpressurizable) - hladká příruba (bez tlumivky a bez drážky).

Druhé písmeno určuje základní tvar příruby. Nejpoužívanější jsou

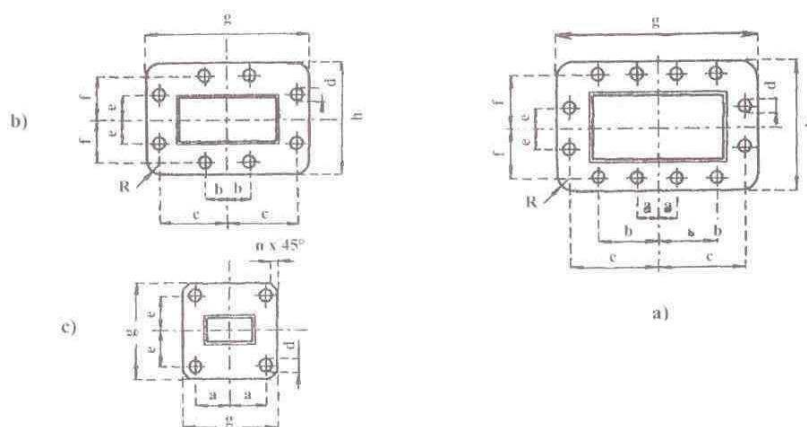
- A** - kruhový tvar, **G** - obdélníkový tvar pro vlnovod typu F,
- B** - čtvercový tvar, **J** - kruhový tvar pro kruhový vlnovod typu C,
- O** - obdélníkový tvar s těsněními, **K** - čtvercový tvar pro čtvercový vlnovod typu Q,

E - obdélníkový tvar bez těsnění.

Třetí písmeno spolu s následujícím číslem určuje druh vlnovodu, pro který je příruba určena a odpovídá výšce uvedenému značení vlnovodů. Laboratorní vlnododové přístroje jsou nejčastěji opatřovány hladkými přírubami obdélníkového, čtvercového a kruhového tvaru tedy UE, UB a UA. Typy nejpoužívanějších přírub podle doporučení IKC jsou pro jednotlivá vlnová pásma uvedeny v Tab. 4.2 a na obr. 4.18..

Tabulka 4.2 Základní rozměry přírub pro obdélníkové vlnovody řady R podle IEC 154

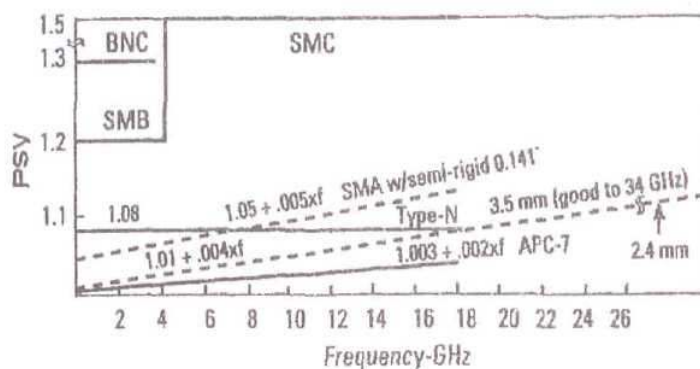
Ozn. příruba	Jmenovité rozměry [mm]						Doporučené rozměry				Spoj. šroub	Obr.
	a	b	c	e	f	d	g	h	n	R		
UER 32	10,3	31,0	44,3	8,51	25,27	4	97,9	59,5	-	8	M4	4.18a
UER 48	-	10,2	30,8	11,89	18,16		70,6	45,2	-	6		4.18b
UER 70	-	8,18	24,5	8,71	14,99		57,8	38,9	-	5		
UBR 100	15,4	-	-	16,26	-	4,17	41,4	-	3	-	M 3	4.18c
UBR 140	12,6	-	-	12,14	-	4	33,3	-	2	-		
UBR 220	8,13	-	-	8,51	-	3	22,4	-	-	-		
UBR 320	6,35	-	-	6,73	-		19,1	-	1,5	-		



Obr. 4.18 Druhy hladkých obdélníkových vlnododových přírub

V koaxiální technice byla hlavní pozornost věnována unifikaci příslušných koaxiálních konektorů. Přes existenci velkého množství různých typů konektorů používají světoví výrobci v současnosti jen asi 10 až 15 druhů (bez uvážení konstrukčních modifikací). K této unifikaci přispěl především celosvětový přechod koaxiální techniky na charakteristickou impedanci 50Ω a dále požadavek zmenšovat rozměry konektoru pro jejich použití v mikrovlnných integrovaných obvodech na kmitočtech až několika desítek GHz.

Jedním z nejrozšířenějších koaxiálních konektorů v současné mikrovlnné technice je konektor typu N (z angl. „Navy“). Tento 50 ohmový konektor byl původně vyvinut za 2. světové války pro vojenské a námořní sdělovací systémy a je dnes používán jako univerzální koaxiální konektor až do kmitočtu kolem 18 GHz. Dalším rozšířeným druhem je konektor typu SMA (Sub-Miniature A), který byl rovněž znám pod označením OSM jako původní výrobek americké firmy Omni-Spectra. Jde o miniaturní koaxiální konektor používaný zejména v mikrovlnných integrovaných systémech, kde se nepředpokládá časté rozpojování konektoru. Ještě menší než typ SMA jsou koaxiální konektory SMB a SMC (Sub-Miniature B a C). Vzhledem ke své miniaturní a křehké konstrukci se používají jen uvnitř mikrovlnných obvodů a systémů, kde jejich rozpojování je jen výjimečné. Konektory SMB a SMC lze použít do kmitočtu kolem 18 GHz, konektory SMA se používají až do 24 GHz.



Obr. 4.19 Kmitočtová závislost vstupních odrazů nejčastěji užívaných koaxiálních konektorů

Rovněž již za 2. světové války vznikl známý konektor I5NC (Bayonet Navy Connector). Tento typ (v kabelovém či panelovém provedení) patří dnes mezi absolutně nejrozšířenější konektory všestranného použití až do kmitočtu 1 GHz, výjimečně do 4 GHz. Nad těmito kmitočty nastává u konektoru BNC nepřipustné vyzařování energie. Tento jev je odstraněn u konektoru TNC (Threaded Navy Connector), který vznikl z typu BNC náhradou bajonetového spojení šroubovým spojem. Konektor TNC může proto pracovat na vyšších kmitočtech, až do 12 GHz,

Pro velmi přesná koaxiální měření je používán přesný konektor APC-7 (Amphenol Precision Connector- 7 mm), při APC-3.5 či APC-2,4, které mají v pásmech až do 34 GHz ze všech předchozích typu nejmenší činitel odrazu ($PSV < 1.1$), jak je zřejmé z obr. 4.19. Konektor APC-7 je konstruován jako „bezpečlivní“; umožňuje rychlé, snadné a přitom velmi

přesné spojování a rozpojování koaxiálních dílů mnohokrát po sobě bez zhoršení svých elektrických parametrů. [7]

4.10 Výroba a technologie vlnodů a koaxiálních konektorů

Kvalita všech elektrických parametrů mikrovlnných přístrojů je bezprostředně závislá na technologii jejich výroby a použitých materiálech. Ke konstrukci vlnodových dílů se nejčastěji používá mosaz, a to pro svou výbornou opracovatelnost i dobré mechanické vlastnosti. Vysoká elektrická vodivost vnitřního povrchu vlnodů se dosahuje jeho stříbrněním v tloušťce 10 až 15 μm . Aby se stříbrná vrstva uchránila před povětrnostními vlivy a před mechanickým otěrem, nanáší se na ni velmi tenký, ale tvrdý povlak rhodia (síla kolem 0,25 μm). Elektricky funkční části koaxiálních konektorů se vyrábějí rovněž z mosazi nebo z mědi, jejich povrch se stříbí nebo často i zlatí. Mechanické, upevňovací části konektorů jsou obvykle z nerezavějící oceli. Jako dielektrikum je v mikrovlnných konektorech nejčastěji užíván teflon.

Vlnodové trubky se obvykle vyrábějí výtlačným lisováním a tahem za studena se zpevňují. Vnitřní povrch trubky je hladký a lesklý. Přesné rozměry a vnitřní tvar vlnodů se dosahují protažením trubky broušeným a leštěným kalibrem z oceli nebo karbidu kovu. Požadavky na tolerance rozměrů a opracování povrchu vnitřních stěn vlnodů jsou přitom velmi přísné.

Geometricky náročné vlnodové útvary, které by mechanicky nebylo prakticky možné vyrobit, se vyrábějí galvanoplasticky. Při výrobě některých složitých dílů lze rovněž využít skutečnosti, že na uvažovaných velmi vysokých kmitočtech protékají vf. proudy jen v tenké vrstvě (jednotky μm) na povrchu kovu. Tvarově složitý vlnodový obvod lze proto vyrobit z levného, dokonce i nekovového materiálu, jehož vnitřní povrch se pak postříbí. [7]

SHRNUTÍ

Cílem teoretické části této studie bylo vyhodnotit chování elektromagnetických vln uvnitř vlnovodu v závislosti na jeho rozměrech a tvaru a díky získaným poznatkům navrhnout několik konstrukčních řešení, které budou nabízet možnost sledovat působení elektromagnetických vln při prováděném experimentu. Snahou navrhovaných řešení je, aby ukázali možné využití k různým účelům. Dnes má mikrovlnný ohřev široké využití především k účinnému a energeticky výhodnému sušení materiálů. Mikrovlny se využívají k sušení papíru, keramických a farmaceutických produktů, různých granulovaných materiálů nebo i přáden v textilním průmyslu.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 STANOVENÍ CÍLŮ A METOD V PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cílem této diplomové práce je zjištění chování elektromagnetického vlnění uvnitř obdélníkového vlnovodu.

V první fázi praktické části bude proveden výpočet a simulace v programu Comsol Multiphysics, který obsahuje RF modul, v němž lze pozorovat šíření elektromagnetického vlnění uvnitř vlnovodu. Na základě výsledků bude navržena délka skutečného vlnovodu s ohledem na amplitudy procházejícího vlnění, pro zjištění optimálního využití v průmyslu.

Dále budou vlnovody vyrobeny externí firmou, instalovány na magnetron a provedeny fyzické experimenty a měření rozložení magnetického pole při různých výkonech zdrojového zařízení, pro nalezení optimální schopnosti termopapíru zaznamenat průběh elektromagnetického působení ve vlnovodu. Výsledky budou zpracovány ve 3D modelu, čemu bude předcházet měření zabarvení termopapíru následkem působení elektromagnetického pole na planimetru PLANIX6.

Na závěr bude provedeno srovnání výsledků z měření a simulace. Bude zkoumán vliv délky vlnovodů na ztráty elektromagnetického vlnění i na způsob rozložení jednotlivých vln při průchodu ve vlnovodu.

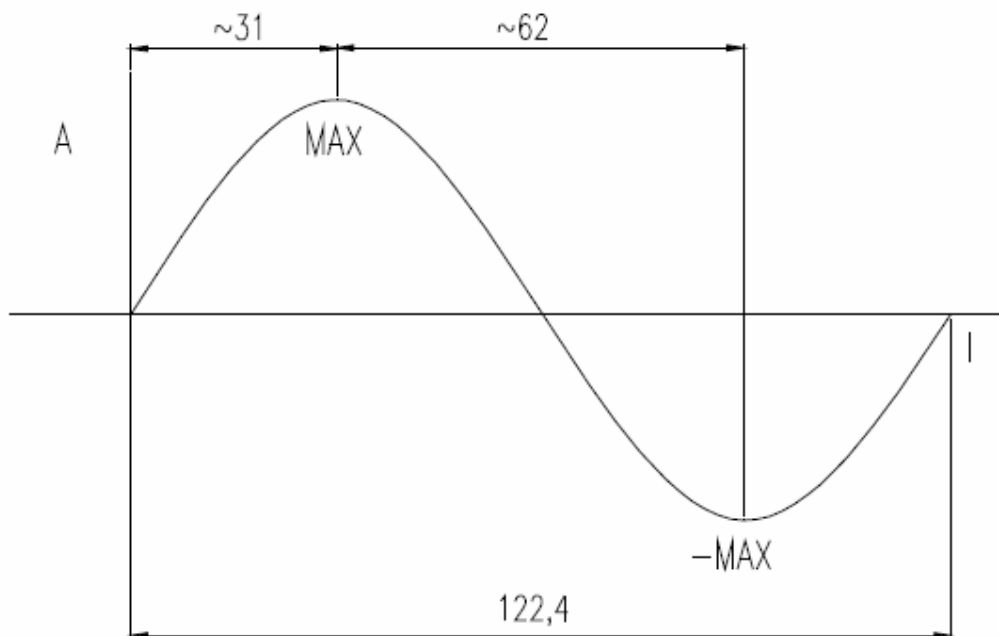
6 VÝPOČET A STANOVENÍ ROZMĚRŮ VLNOVODU

Při návrhu tvaru a rozměrů vlnovodu hrálo roli několik zásadních faktorů. V první řadě bylo nutné vycházet z rozměrů navržených v předešlé práci, která řešila šířku a výšku vlnovodu se systémem napojování pomocí přírub. Šířka vnitřního prostoru vlnovodu byla stanovena na 43mm a výška 88mm.

V případě této práce se jednalo o stanovení délky vlnovodu. Předpokládaná délka vlny se určí ze vzorce při vstupních podmínkách frekvence magnetronu $f = 2,45\text{GHz}$ a rychlosti šíření vlny $c = 300\,000\,000\text{ m/s}$.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{300000000}{2450000} = 122,45\text{mm}$$

Rozložení maxim resp. míst s vyšší intenzitou elektromagnetického pole, lze teoreticky zjistit výpočtem. Vlnová délka je 122,4 mm jak bylo vypočteno. Z toho vyplývá, že maximum vlny je v $\frac{1}{4}$ délky, což je 30,6mm. Proto by se mělo maximum s nejvyšší intenzitou nacházet přímo u zdroje magnetronu (antény) a dále se vyskytovat v intervalech po 62mm.



Obr. 6.1 Rozložení maxim na délce vlny

6.1 Navržení délky vlnovodu

Z výpočtu vyplývá, že požadovaná délka vlnovodu by mohla být koncipována ve dvou případech.

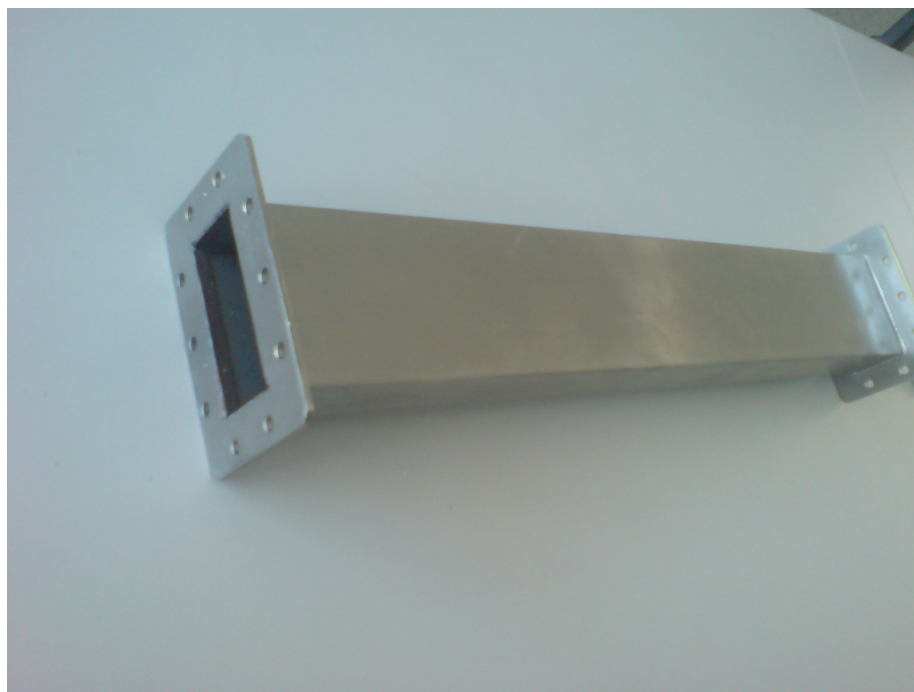
První bude navržen tak, aby délka vlnovodu odpovídala násobkům amplitudy vlnové délky. Tím pádem by na konci vlnovodu mělo být minimum a intenzita nejnižší. Tudíž byla stanovena délka na 212mm. Ale k tomu je ještě třeba připočítat vzdálenost od zdroje (antény) magnetronu v části vlnovodu, který ze zařízení vystupuje. Tato vzdálenost činí 155mm. To znamená, že celková vzdálenost konce vlnovodu od zdroje představuje 367mm. Tato délka odpovídá trojnásobku elektromagnetické vlny a na konci vlnovodu by mělo být očekávané minimum.



Obr. 6.2 Navržený vlnovod délky 212 mm

Ve druhém případě bylo snahou dosáhnout na konci navrhovaného vlnovodu takové délky, aby vlna vystupovala v jednom ze svých maxim, to znamenalo odečíst nebo přičíst od násobku vlnové délky jednu její čtvrtinu. Ve skutečnosti to představovalo 30.6mm, ale pro snadnější vyrobiteľnost byla tato hodnota zaokrouhlena na 31mm. A tak konečná délka navrhovaného vlnovodu představovala 610mm. Ale opět je nutné připočítat vzdálenost od

zdroje(antény) magnetronu. Takto navržená délka by mohla naznačit i případné ztráty ve vlnovodu, vlivem větší vzdálenosti od zdroje následkem útlumu.



Obr. 6.3 Navržený vlnovod délky 610 mm

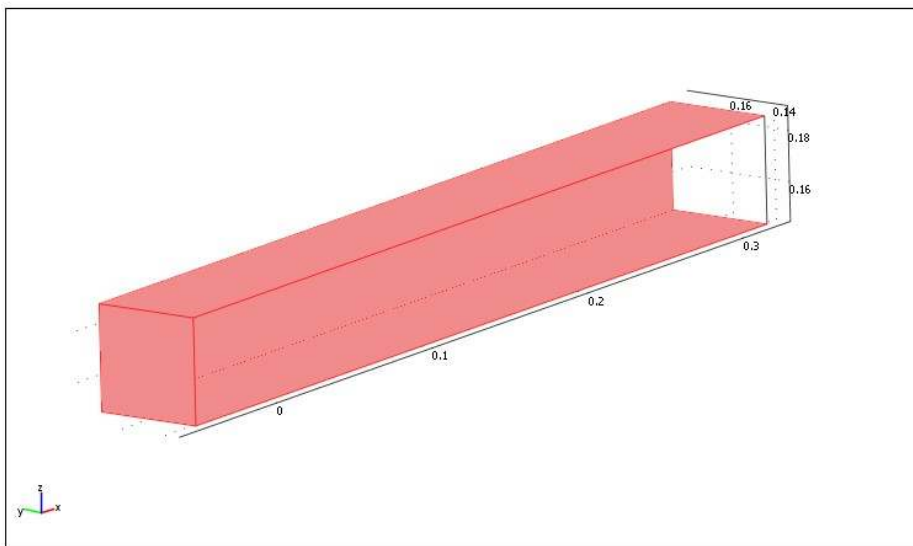
Oba tyto vlnovody obr. 6.1 a 6.2 jsou z nerez oceli, protože nerez ocel je nemagnetická, což je nezbytnou podmínkou funkce vlnovodu. Mají tloušťku stěny 2.5mm a byly vyrobeny firmou Miko – Nerez kovovýroba Uherský Brod.

7 SIMULACE CHOVÁNÍ ELEKTROMAGNETICKHO POLE V OBDÉLNÍKOVÉM VLNOVODU

Pro zpracování modelu, který charakterizuje chování elektromagnetického pole ve vlnovodu, bylo použito programu Comsol Multiphysics. Tento program obsahuje RF modul v němž jsou připraveny nejrůznější modely, mimo jiné model mikrovlnné komory a vlnovodu, ve kterém je provedena tato simulace. Nejprve bylo nutné vytvořit model samotného vlnovodu ve 3D programu. Byl použit v podobě *.stp souboru, jenž je pro tento simulační program dobře čitelný a pro modelaci je tento způsob mnohem jednodušší. Jediným problémem však bylo nastavení počátku vlnovodu, který je přesně určen souřadným systémem modelu.

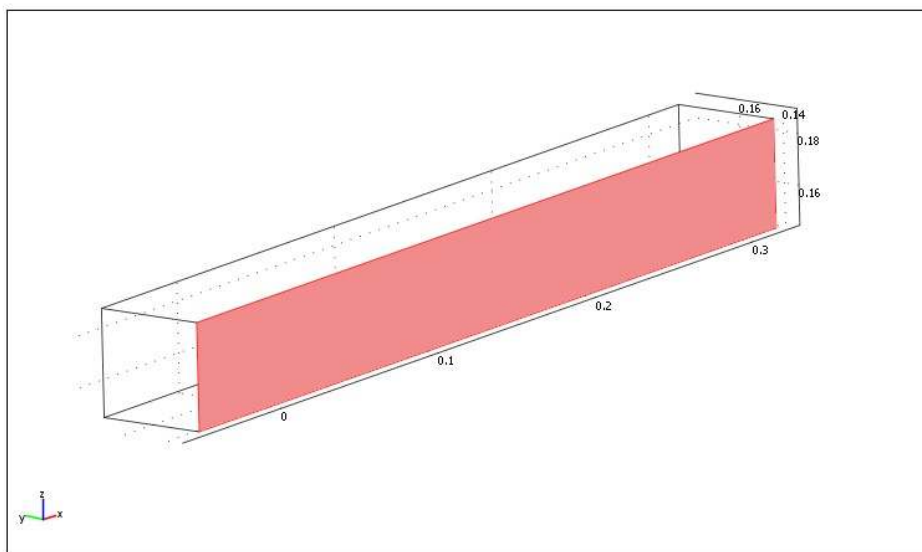
7.1 Okrajové podmínky stěn vlnovodu

V případě vlnovodů byly okrajové podmínky v programu zvoleny následovně. Na obrázku č. 7.1 byly označené stěny nastaveny jako ideálně elektricky vodivé. To znamená, že simulovali charakteristické vlastnosti skutečného vlnovodu.



Obr. 7.1 Ideálně elektricky vodivé stěny vlnovodu

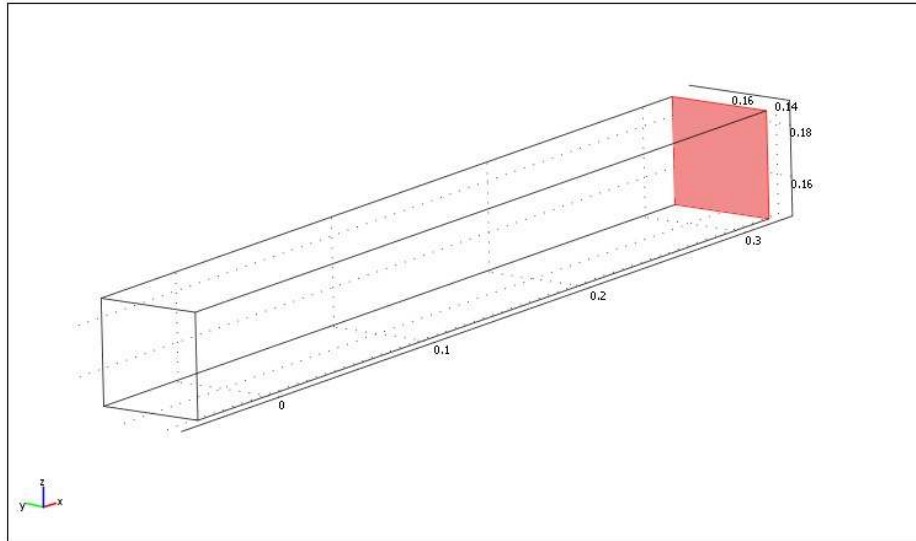
Obrázek č. 7.2 znázorňuje dělicí rovinu, která je nastavena jako ideálně magneticky vodivá. To z toho důvodu, že je možné v tomto programu řešit simulace jen z poloviny pro jednodušší výpočet a tím je možné nastavit jemnější konečně-prvkovou síť. Tím se dostává přesnější vykreslení skutečného stavu. Znamená to tedy, že se jedná pouze o polovinu navrhovaného vlnovodu.



Obr. 7.2 Ideálně magneticky vodivá stěna vlnovodu

V dalším kroku bylo nezbytné nastavit port, který je zdrojem elektromagnetického vlnění. Pro tento případ se vycházelo z veličin magnetronu ROMILL, který byl součástí inventáře laboratoře. Jeho maximální výkon představoval 900W, který bylo možné regulovat v rozsahu od 0 - 900W.

Pro účely simulace bylo voleno hodnot maximálního výkonu tj. 900W, k nalezení možných extrémů. Ale protože se model rozdělil na polovinu, jak již bylo uvedeno, byl i výkon nastaven na jeho poloviční hodnotu. Pozice portu je znázorněna na obr. 7.3.

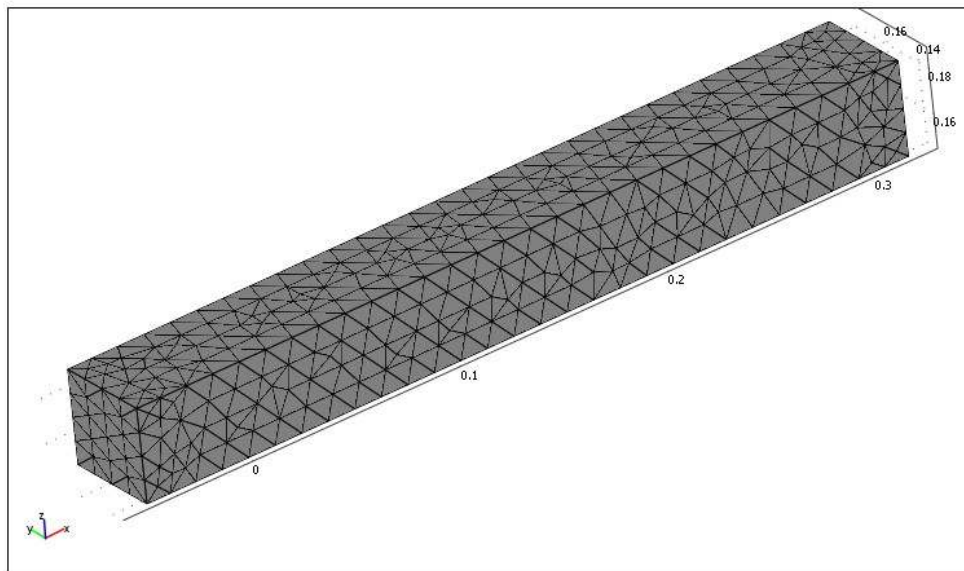


Obr. 7.3 Port vlnovodu

Ještě před samotným výpočtem je nezbytné vytvořit konečně-prvkovou síť. Pro dosažení nejlepších výsledků musí být síť co nejjemnější. Problémem může být nedostatek volné operační paměti. Takže pokusně byly voleny tyto hodnoty:

- maximální měřítko velikosti elementu 0,35
- tempo růstu elementu 1,35
- faktor zakřivení sítě 0,3
- přerušení zakřivení sítě 0,005
- rozložení sousedních regionů 0,85

Po vytvoření konečně-prvkové sítě, která je na obrázku č. 7.4, bylo možné přejít k výpočtu. Parametry výpočtu jsou již přednastaveny v RF modulu pro mikrovlnné zařízení, tudíž nebylo nutné měnit žádné z nich.



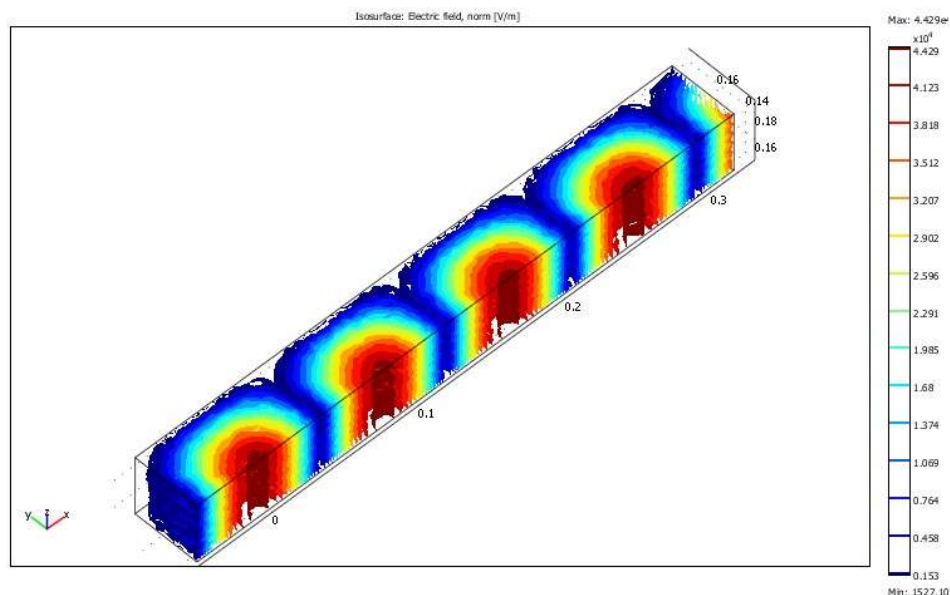
Obr. 7.4 Konečně prvková síť vlnovodu

7.2 Výsledky simulace chování elektromagnetického pole ve vlnovodu l = 212mm

Jak již bylo uvedeno, délka vlnovodu, který je součástí magnetronu, je 155mm od zdroje (antény) k přírubě. Protože je důležité simulovat skutečnou vzdálenost od vysílače, bylo nezbytné prodloužit délku navrhovaného vlnovodu (pouze pro simulaci) o 155mm, tedy celková vzdálenost od zdroje potom činí 367mm.

Výsledek simulace byl velmi překvapivý, viz obr. 7.5, a to z několika důvodů. Tím prvním bylo zjištění, že délka vlny neodpovídá vypočtené hodnotě 122,45mm nýbrž hodnotě přibližně 170mm. Takto lze usuzovat z počtu maxim, které se na délce vlnovodu vyskytují. Očekávané byly v počtu šesti, ale výsledkem byly pouze čtyři maxima na této délce. Vysvětlením je možná interference ve vlnovodu. Toto zjištění potvrzuje, že tvar vlnovodu má zásadní vliv na šíření elektromagnetického vlnění uvnitř.

Z výsledku simulace je dále patrné, že vlnění dosahuje svých maximálních hodnot intenzity elektrického pole v normále periodicky v hodnotách $4,43 \cdot 10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$, bez větších projevů ztrát.

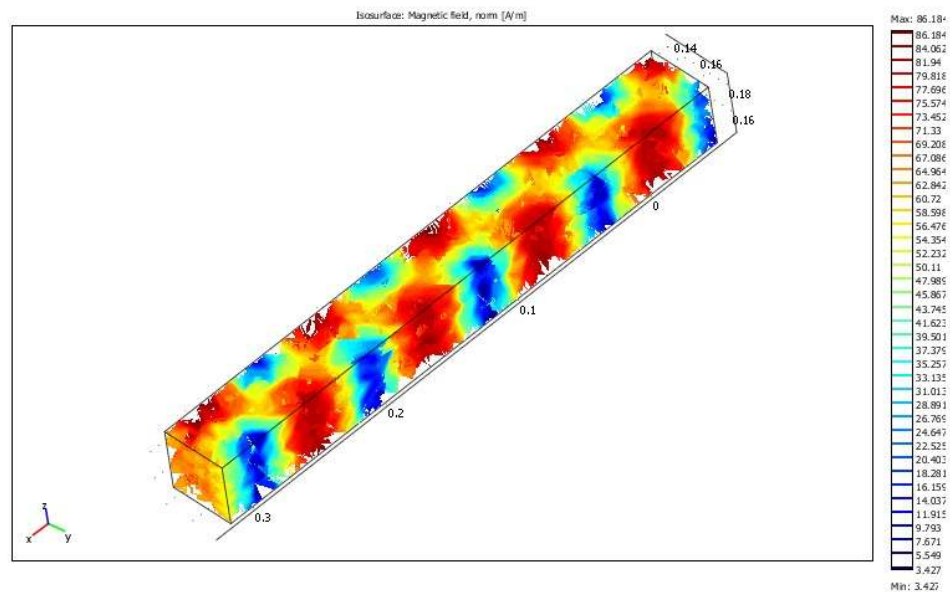


Obr. 7.5 Rozložení maxim elektrického pole při simulaci vlnovodu $l = 212\text{mm}$
 resp. 367mm

Další nepředpokládaný jev byl ten, že se vlnění rozkládá v celých vlnách od konce vlnovodu směrem ke zdroji. To by znamenalo, že na délce vlnovodu nezáleží, co se týče šíření elektrického pole, protože na konci vlnovodu bude vždy minimum, tedy nulové pole.

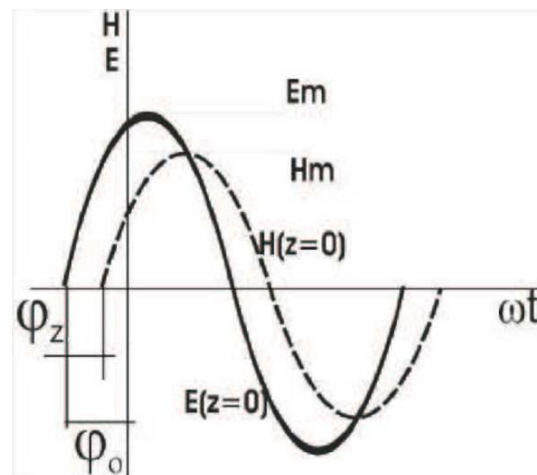
Vysvětlení můžou přinést až fyzické experimenty, které však díky změně délky vlny nemusí mít dostatečně vypovídající charakter, protože snahou bylo navržení délky vlnovodu ve dvou případech. S maximem na konci vlnovodu nebo s minimem.

Na obr. 7.6 je vykreslena intenzita magnetického pole ve své normálové složce a simulace opět dokazuje, že na délce vlnovodu nedochází k téměř žádným ztrátám. Maxima vlnění dosahuje periodicky v hodnotě $86,18 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$.



Obr. 7.6 Rozložení maxim magnetického pole při simulaci vlnovodu $l = 212\text{mm}$
resp. 367mm

Jak je ze simulací obou polí patrné, intenzita elektrického pole je za intenzitou pole magnetického fázově posunuta o úhel φ_z , který je znázorněn na obrázku 8.7.

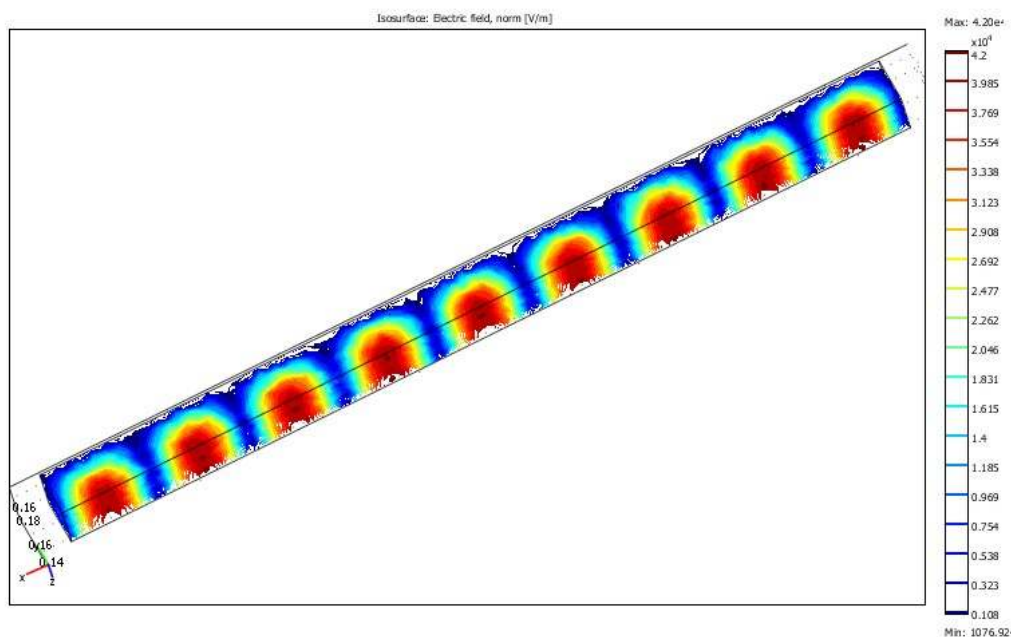


Obr. 7.7 Fázové posunutí magnetické a elektrické intenzity

7.3 Výsledky simulace chování elektromagnetického pole ve vlnovodu $l = 610\text{mm}$

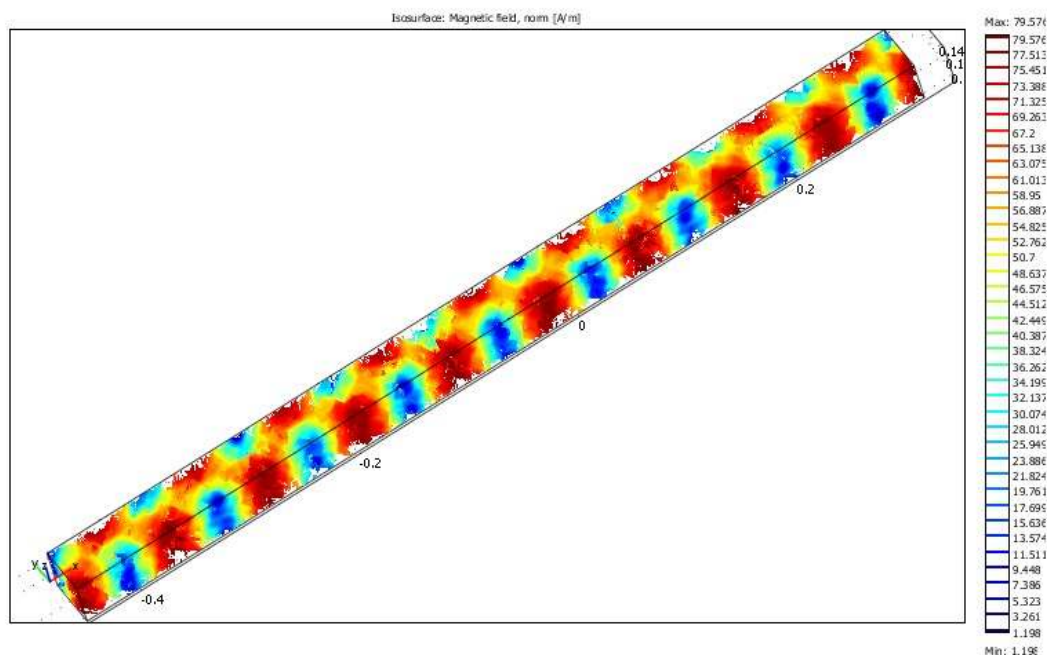
Na obr. 7.8 je vidět simulace chování intenzity elektrického pole vlnovodu délky $610\text{mm} + 155\text{mm}$ (od zdroje magnetronu). Tato simulace už jen potvrdila hypotézy vznesené v případě předešlé délky vlnovodu. Opět se neprojevila vypočtená délka vlny a na základě jasného rozložení maxim elektrického pole uvnitř vlnovodu bylo možné stanovit skutečnou délku vlny. Jestliže se na vzdálenosti 765mm od zdroje elektromagnetického vlnění po konec vlnovodu vyskytlo 9krát maximum, je tedy délka vlny uvnitř vlnovodu této geometrie rovna 170mm .

Z obrázku je dále patrné, že ztráty intenzity elektrického pole jsou téměř zanedbatelné, kde maximální hodnota dosahuje $4,2\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$. Tato hodnota je ve srovnání s kratší variantou o $0,23\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ nižší. To je způsobené větším objemem vlnovodu, který je přímo úměrný relativní permitivitě prostředí (v tomto případě vzduchu) a dalších veličin, které už zůstávají konstantní, a nepřímo úměrný výkonu magnetronu. Vytváří se tím větší odpor prostředí proti průchodu elektromagnetického vlnění a následkem toho dochází ke snížení elektrické intenzity.



Obr. 7.8 Rozložení maxim elektrického pole při simulaci vlnovodu $l = 610\text{mm}$

V případě simulace se jedná o idealizovaný případ, kdy program počítá s dokonale rovnými plochami stěn vlnovodu, minimálními ztrátami v připojení jednotlivých dílů vlnovodu a v neposlední řadě také permitivitou prostředí zcela suchého vzduchu. Těchto hodnot se v praxi jen těžce dosahuje a proto je nutné tyto hodnoty brát s určitou rezervou. Možné srovnání ukáže až samotný experiment.



Obr. 7.9 Rozložení maxim magnetického pole při simulaci vlnovodu $l = 610\text{mm}$

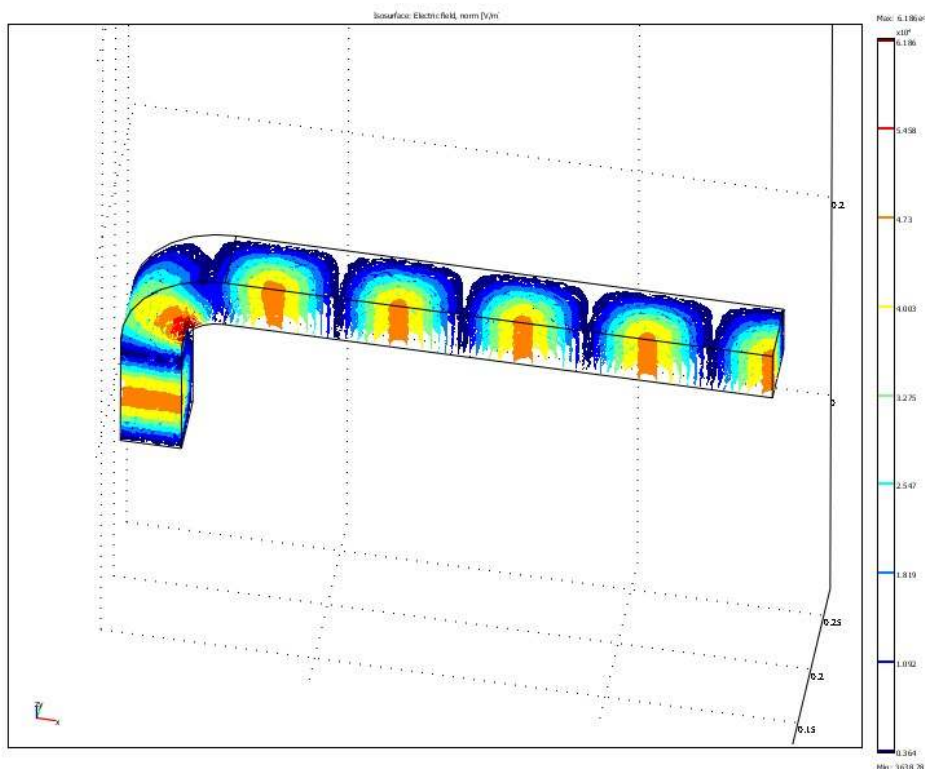
Rozložení magnetického pole je na obr. 7.9. Maximální hodnota je $79,58\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$, což jen dokazuje, že se zvětšující se délkou vlnovodu dochází ke snižování elektromagnetického pole. Ale v celém jeho objemu stejnou měrou u každé vlny. V případě délky $212\text{mm} + 155\text{mm}$ byla maximální hodnota magnetické intenzity $79,58\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$.

Rozdíl mezi oběma tvoří $6,6\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$, vyjadřující přibližně $7,5\%$. Na základě této skutečnosti lze tedy aproximovat procentuální úbytek na jednotku délky. Tento by v případě rozdílové vzdálenosti mezi oběma vlnovody, která je 398mm , představoval $0,018\%$ na 1mm délky vlnovodu. Taktéž u intenzity elektrického lze tento úbytek vztáhnout na jednotku délky. Při rozdílu $0,23\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ na rozdílové délce 398mm to je $0,013\%$ na 1mm .

7.4 Vlnovod s pravouhlým odbočením

Z důvodu možného využití vlnovodů na větší vzdálenosti v členitém prostoru objektů, budov, je nezbytné počítat i s případnou nutností přesměrování přímého směru vlnovodu.

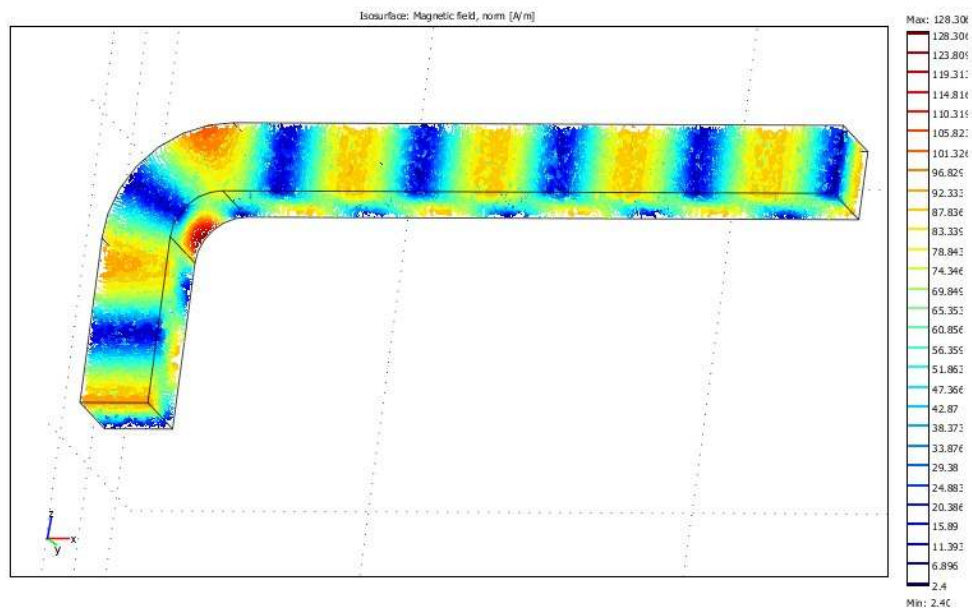
K ilustraci slouží obr. 7.10, na kterém je provedena simulace pravouhlého odbočení ve směru kolmém k šíření vlnění. Je zde patrná jistá kumulace intenzity elektrického pole v místě odbočení. Tento jev lze přisuzovat interferenci vlnění. V dalším průběhu se vlnění chová jako v první přímé části.



Obr. 7.10 Rozložení maxim elektrického pole při simulaci odbočení

Hodnoty maxim elektrického pole jsou přibližně $4,7 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$, mimo odbočení, kde díky interferenci dosahují hodnoty $6,2 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$.

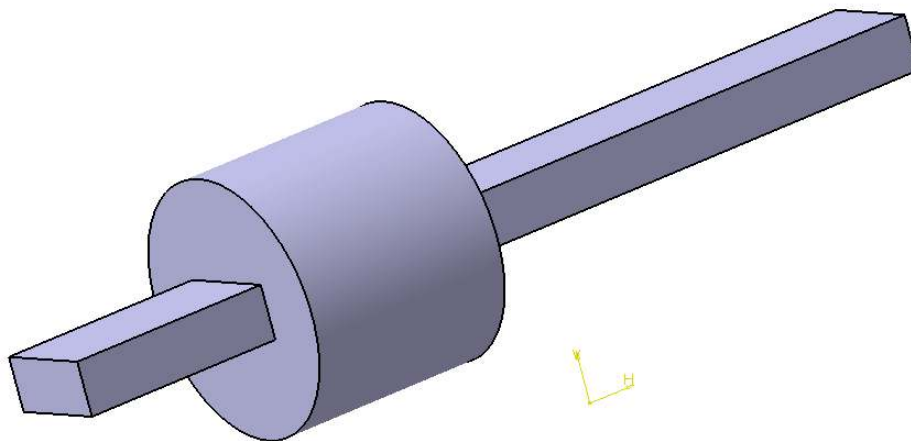
Obrázek 7.11 znázorňuje magnetické pole vlnovodu. Tato veličina také nabývá zvýšené hodnoty v části odbočení a to řádově o několik desítek $\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$, než v částech přímého vedení vlnovodu.



Obr. 7.11 Rozložení maxim magnetického pole při simulaci odbočení

7.5 Vlnovod s jednoduchou konstrukcí zeslabovače

Jedním z nejčastěji používaných mikrovlnných obvodu jsou tzv. zeslabovače neboli atenuátory. Umožňují oslabení výkonu postupné vlny z generátoru na žádanou nižší úroveň, mohou však sloužit i jako oddělovací členy chránící mikrovlnný generátor před odraženou vlnou nebo zabezpečující dostatečné přizpůsobení zátěže a vedení (vlnovodu).

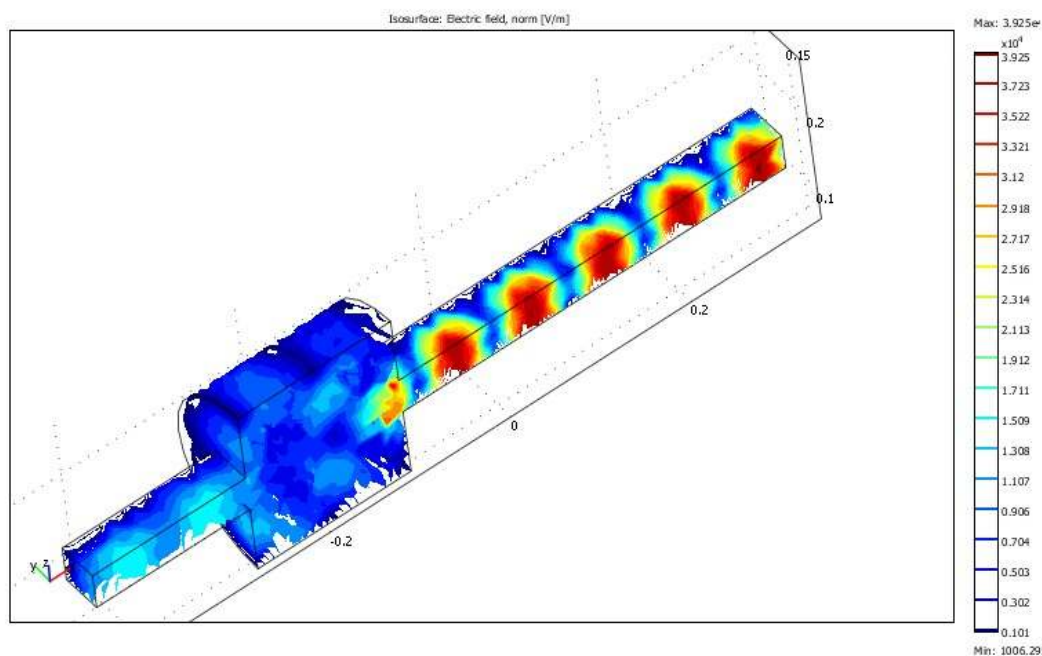


Obr. 7.12 Vlnovod se zeslabovačem

Pro představu funkce zeslabovače intenzity elektromagnetického pole byla provedena simulace zeslabení na kruhovém profilu, jenž je vidět na 3D modelu, viz obr. 7.12. Toto zařízení bývá součástí spojovacích prvků vlnovodů a bývá nejrůznějších tvarů.

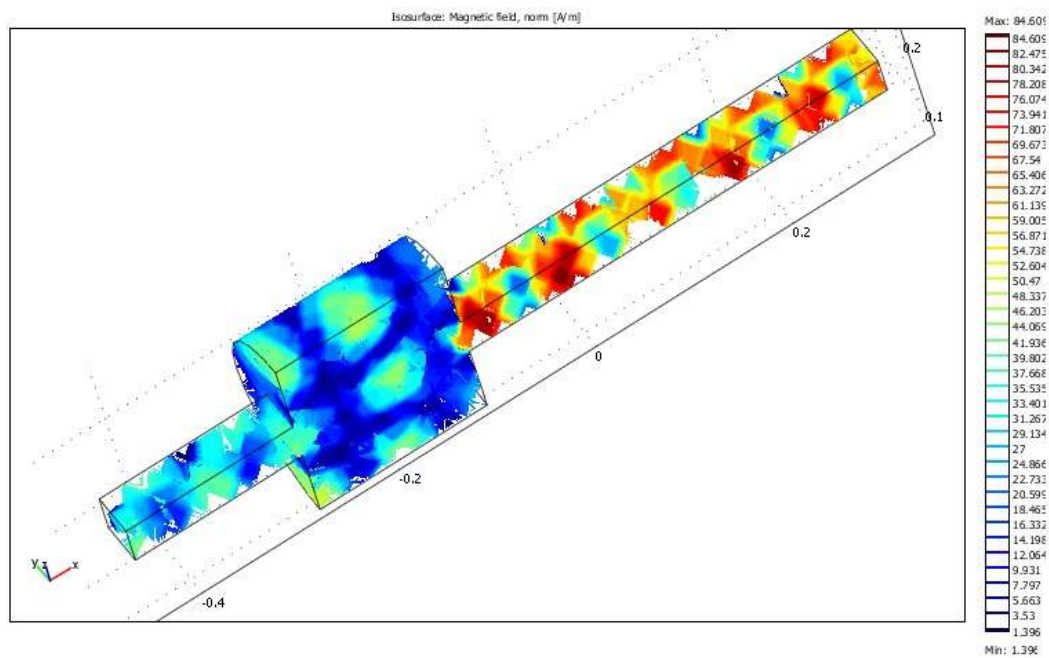
V praxi se nejčastěji používají zeslabovače s nastavitelnou regulací. Jsou otočné a mají přesně nastavitelný odpor, dále jsou opatřeny přechodkami z obdélníkového vlnovodu na kruhový a tato kruhová část bývá opatřena dielektrickou destičkou.

Zobrazení elektrického pole na obr. 7.13 ukazuje významné zeslabení maximálních hodnot, které po průchodu tlumiče doznaly. Před vstupem do kruhové komory jsou maxima na hodnotě $3,9 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ a po jejím průchodu tyto hodnoty činí $1,5 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$.



Obr. 7.13 Rozložení maxim elektrického pole při simulaci zeslabovače

Taktéž jako u elektrického pole je tomu i u pole magnetického, které je na obr. 7.14. Magnetické vlnění před vstupem do tlumiče nabývá hodnot $85 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ a na výstupu pouhou polovinu $41 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$.



Obr. 7.14 Rozložení maxim magnetického pole při simulaci zesilovače

8 PROVEDENÍ EXPERIMENTU A MĚŘENÍ

Prvním krokem byla volba vhodného řešení pro detekci elektrického pole. Zaznamenávat magnetické pole je možné pouze pomocí speciálního zařízení, které ovšem nebylo k dispozici. Proto se bude experiment zabývat zachycením průběhu elektrického pole.

V předešlé práci, která se problematikou šíření elektromagnetických vln zabývala, bylo použito vlastnosti termopapíru. Tento papír je charakteristický tím, že při působení tepla na papír začne aktivní část povrchu papíru černat. Samotný papír však při působení elektromagnetického pole neprokazuje žádnou barevnou změnu, ani když je papír předem navlhčený. Voda se totiž vypaří dříve, nežli se stačí ohřát na teplotu, při které by zabarvila papír. Proto je lepší vkládat papír mezi materiály, které by absorbovaly elektromagnetické vlny, ale jen v zanedbatelné míře a termopapír by působením tepla z tohoto materiálu zčernal.

Vhodným materiálem se ukázal buď bakelit, nebo běžný pěnový polystyrén (PS). Pro lepší dostupnost bylo vhodnější volit PS. Z těchto komponentů se vytvořil finální model, který vypadal tak, že se postupně kladla jedna vrstva PS (2cm) a na tuto vrstvu se položil termopapír, poté opět PS atd.

8.1 DE ohřev

Mikrovlny vznikají přeměnou elektrické energie na energii elektromagnetického vlnění v generátoru, který se nazývá magnetron. Tato energie se přenáší mikrovlnami a dále se mění na energii tepelnou (DE ohřev), působením na polární molekuly materiálu.

Pro ohřev se využívá jevu, kdy permanentní dipóly se v stejnosměrném elektrickém poli orientují do energeticky nejpříjemnější polohy. Pokud dojde k přepólování pole, snaží se molekuly nesoucí náboj opět otočit do nejvhodnější pozice. Snaha vyrovnat se s měnícím se elektrickým polem elektromagnetického vlnění vede k rotačnímu pohybu, při němž dochází ke kolizím a tření se sousedními molekulami a ke vzniku tepla.

8.2 Zdroj elektromagnetického vlnění

K experimentu bude použitý jako zdroj elektromagnetického vlnění magnetron MWG-LAB, o výkonu 900W od firmy Romill, který je součástí vybavení laboratoře.



Obr. 8.1 Magnetron ROMILL MWG-LAB

Ovládací prvky MWG-LAB (Obr. 8.1) tvoří hlavní vypínač, kterým uvedeme zařízení do pohotovostního stavu. Činnost magnetronu se spustí bílým tlačítkem 1 (start) a přerušit se černým tlačítkem 0 (stop). Dále ovládací panel obsahuje regulaci výkonu magnetronu, které se provádí šedým kolečkem (nastavení výkonu) a hodnotu výkonu v procentech lze odečíst z dobře čitelného displeje (výkon %). O činnosti magnetronu upozorňuje modře blikající dioda (MW).

8.3 Připojení vlnovodů a postup experimentu

Na magnetron bude v prvním případě napojen vlnovod délky 212mm pomocí příruby. Do vlnovodu budou vkládány termopapíry s polystyrenem tloušťky 2cm nejprve v příčném směru a následně ve směru podélném. To proto, aby bylo možné ze zobrazení maxim elektrického pole odečíst délku vlny a podrobit srovnání s délkou vypočtenou a s délkou, která vyšla při simulaci.

V druhém případě bude napojen vlnovod délky 610mm a zároveň i vlnovod délky 212mm. To z toho důvodu, abychom dosáhli větší vzdálenosti od zdroje elektromagnetického vlnění a mohli tak pozorovat případné ztráty ve vlnovodu.

Vlnovody budou v obou případech na konci odstíněny barelem s vodou, kde by mělo dojít k záchytu převážné části elektromagnetického vlnění. Nemělo by proto dojít k významnému úniku do prostoru, kde budou pokusy prováděny. A tak bude dostatečně

zabezpečena ochrana zdraví i zajištěn chod elektronických zařízení, která jsou na silnější elektromagnetické pole citlivé. Na obr. 8.2 je znázorněno napojení vlnovodu délky 212mm.



Obr. 8.2 Napojení vlnovodu $l = 212\text{mm}$

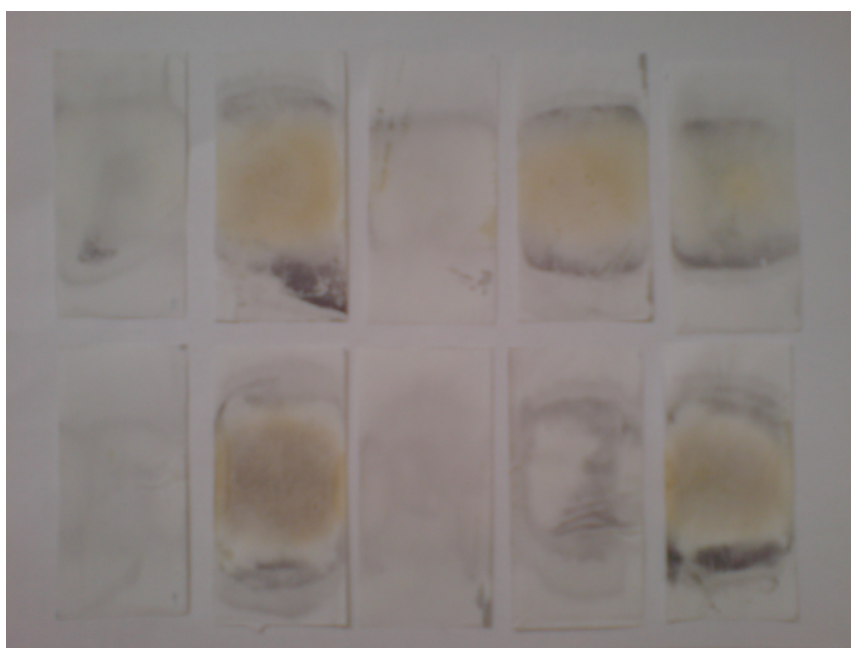
8.4 Působení elektromagnetického pole na termopapír

V první řadě bylo nutné stanovit optimální výkon magnetronu a časovou délku působení elektromagnetického pole na vložený materiál ve vlnovodu, aby došlo k co nejlepšímu zobrazení na termopapíru. Nejprve se mezi polystyrénové vrstvy, které byly tloušťky 2cm, vkládaly ještě gumové vložky jak je patrné z obr. 8.3 a až mezi ně byl umístěn termopapír.



Obr. 8.3 Rozložení vrstev PS, gumy a termopapíru

Výsledky ukázaly, že se vlivem prohřívání gumy roztékal polystyrén a to i přes snížení výkonu magnetronu a doby působení na minimum. Termopapír v tomto případě neposkytoval použitelné výsledky, jak je patrné z obr 8.4. Povrch papíru byl ve svém středu spálený, jeho barva zažloutlá a nebyly vidět zřetelné kontury působení elektromagnetického vlnění.



Obr. 8.4 Zobrazení působení elmag. pole na termopapír

V dalším postupu při experimentu byly gumové vložky vyjmuty. Výkon zdrojového zařízení byl pokusně stanoven na 90W a délka expozice elektromagnetického pole na 10s. Na každém vlnovodu bylo provedeno pět měření.

Výsledky jsou patrné na následujících obrázcích, které dokumentují rozložení jednotlivých maxim intenzity elektrického pole. Kontury obrysů jsou naprosto zřetelné.



Obr. 8.5 Rozložení maxim na termopapíru

Obrázek 8.5 nepoukazuje na žádný rozdíl mezi oběma vlnovody. V případě označení a) jde o výsledky vlnovodu délky 212mm a označení b) ukazuje výsledky měření vlnovodu délky 610mm. Při pohledu na drobnou neshodu mezi výsledky a) a b) ve velikosti zčernalé plochy termopapíru na levé straně, tedy na konci vlnovodu, je možné tento rozdíl přisoudit drobným nepřesnostem, které vznikají při velmi pracném nasunutí vzorků s polystyrenem. Ten musí dokonale utěsnit prostor vlnovodu, aby nedocházelo k vedlejším prostupům vlnění. A tak se mohlo stát, že se termopapír nenacházel vždy v naprosto stejné vzdálenosti od hrdla vlnovodu. Tento fakt ne zcela potvrzuje zjištění ze simulace, že následkem prodlužující se délky vlnovodu klesá hodnota maxim elektromagnetického pole.

Potvrzením je ale skutečnost, že se vlna rozkládá vždy s minimem intenzity elektrického pole na konci vlnovodu směrem ke zdroji. Toto bylo velkým překvapením při simulaci a

z toho plynula i obava z nesprávné funkce nebo nesprávného nastavení simulačního programu.

Z obrázků 8.6 a 8.7, které zobrazují maxima intenzity elektrického pole v podélném směru u obou zkoumaných vlnovodů je možné popsat oba sledované rozpory.

Ztráty se v tomto případě dají vyloučit zcela, protože u kratšího vlnovodu je plocha zbarvení o poznání menší. A přitom výsledek by měl být dle simulace opačný. Ale toto může být způsobeno, jak již bylo popsáno, drobnými nepřesnostmi nastavení termopapíru i ne zcela jistou homogenitou PS v celém jeho objemu. Obrázek 8.6 na tuto nedostatečnost ukazuje, kde je vidět na stopě maxima dělicí rovina dvou dílů polystyrenu.

Co se týče rozložení elektromagnetického vlnění je zřejmé, že se vlnění rozkládá v násobcích vlny od konce vlnovodu.



Obr. 8.6 Rozložení maxim v podélném vlnovod $l = 212\text{mm}$



Obr. 8.7 Rozložení maxim v podélném směru vlnovod $l = 610\text{mm}$

A v neposlední řadě je třeba upozornit na délku vlny, která byla v úvodu spočtena z parametrů zdroje elektromagnetického pole na 122,45mm. Tuto hodnotu už vyvrátily výsledky simulace, které ukazovaly na hodnotu přibližně 170mm. Experiment tuto délku jen potvrzuje, když bylo možné odečíst z termopapíru vzdálenost středů maxim intenzity elektrického pole. Tato hodnota představovala 85mm a vzhledem k tomu, že tato distance

je polovinou délky vlny, je tedy skutečná délka vlny 170mm. A to v obou případech vlnovodů.

8.5 Planimetrie vzorků termopapíru

Plocha je definována spojitým rozhraním dvou částí povrchu tělesa, omezena křivkou. Na měření rovinných ploch se užívá přístrojů zvaných planimetry.

Měření bylo provedeno na digitálním přístroji PLANIX 5 obr. 8.8, který má tyto parametry:

Rozlišení: jednotka měření odpovídá 0.1cm^2 nebo 0.01in^2

Přesnost: $\pm 0.2\%$ ($\pm 2/1000$ pulzů)

Rozsah měření: průměr 356mm nebo 14"

Váha: 900g

Rozměry: (délka polární ruky) 64 x 213 x 39mm (222mm)



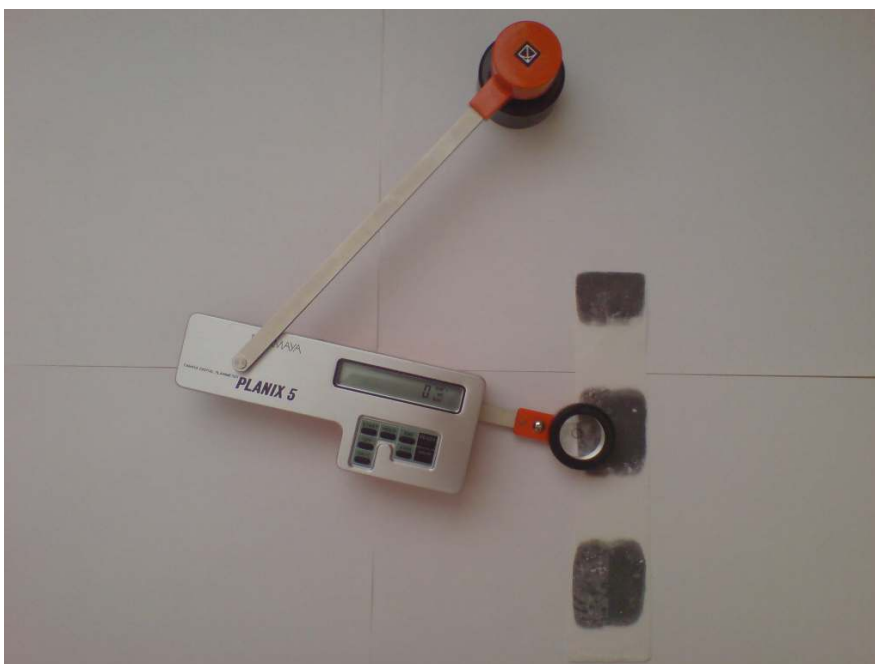
Obr. 8.8 Planimetr PLANIX 5

Ke změření zbarvených částí termopapíru vlivem působení elektromagnetického pole bylo nutné použít přesné měřicí zařízení. Díky tomu, že zbarvení termopapíru vlivem působení elektromagnetického pole vykazovalo tvarově naspecifikovatelnou plochu, bylo digitální

měřicí zařízení ideálním řešením. Nejen že výraznou měrou uspořilo samotnou dobu měření, ale také výsledky měření byly určeny s přesností $0,1\text{ cm}^2$.

Všechny vzorky obou vlnodů byly měřeny 5krát a byly stanoveny hodnoty průměrů, které jsou uvedeny v tabulce. Z naměřených hodnot bude vytvořen přibližný 3D model.

Na obrázku 8.9 je vidět funkce digitálního planimetru. Nejprve je nutné na měřené ploše určit a zakreslit výchozí bod, a potom už jen obkroužit ve směru hodinových ručiček tvar měřené plochy zpět k výchozímu bodu. Výhodou tohoto zařízení je lupa s křížovým fokusem, díky níž je na detail tvaru lépe vidět.



Obr. 8.9 Měření povrchu zbarvené plochy termopapíru

Tabulka 8.1 Odměřené plochy zbarvení termopapíru vlnovod $l = 212\text{ mm}$ – kolmé na směr procházejícího vlnění

Vzd. vzorku od okraje [cm]	2	4	6	8	10	12	14	
$S_{\text{stř}} [\text{cm}^2]$	Sada vzorků č.1	9,1	19,4	15,2	0	0	18,0	16,8
	Sada vzorků č.2	9,5	19,9	16,1	0	0	18,2	17,1
	Sada vzorků č.3	9,3	19,8	16,0	0	0	18,2	17,3
	Sada vzorků č.4	9,2	19,3	15,8	0	0	18,1	17,1
	Sada vzorků č.5	9,5	20,1	16,2	0	0	18,2	17,2

Tabulka 8.2 Odměřené plochy zbarvení termopapíru vlnovod $l = 212\text{mm}$ – rovnoběžné se směrem procházejícího vlnění

Plocha maxima č.		I.	II.
$S_{\text{stř}} [\text{cm}^2]$	Sada vzorků č.1	21,2	21,4
	Sada vzorků č.2	21,6	21,5
	Sada vzorků č.3	21,0	20,9
	Sada vzorků č.4	20,6	20,4
	Sada vzorků č.5	21,8	21,1

Tabulka 8.3 Odměřené plochy zbarvení termopapíru vlnovod $l = 610\text{mm}$ – kolmé na směr procházejícího vlnění

Vzd. vzorku od okraje [cm]	2	4	6	8	10	12	14	
$S_{\text{stř}} [\text{cm}^2]$	Sada vzorků č.1	9,4	19,5	15,7	0	0	17,8	16,9
	Sada vzorků č.2	9,2	19,7	16,0	0	0	18,1	17,0
	Sada vzorků č.3	9,2	19,6	15,5	0	0	18,0	17,1
	Sada vzorků č.4	9,3	19,3	15,7	0	0	17,8	17,0
	Sada vzorků č.5	9,2	20,3	16,1	0	0	18,1	16,8

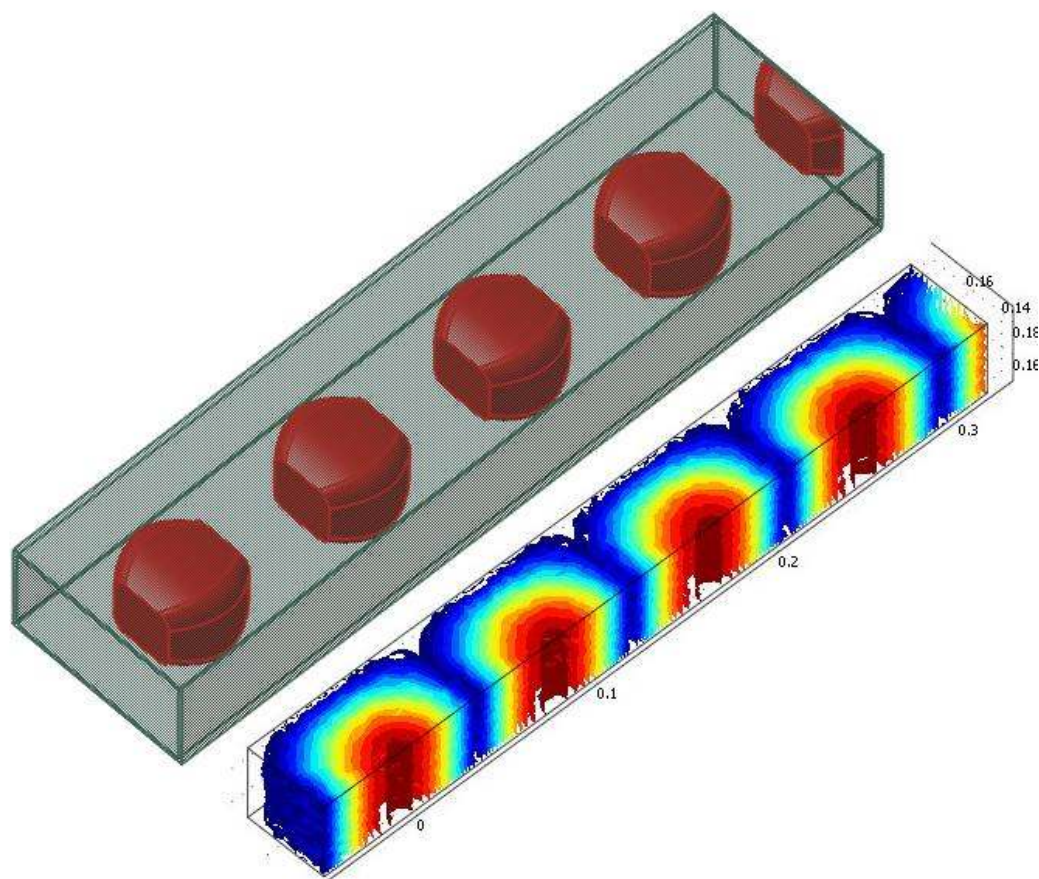
Tabulka 8.4 Odměřené plochy zbarvení termopapíru vlnovod $l = 610\text{mm}$ – rovnoběžné se směrem procházejícího vlnění

Plocha maxima č.		I.	II.
$S_{\text{stř}} [\text{cm}^2]$	Sada vzorků č.1	20,7	20,8
	Sada vzorků č.2	20,9	21,1
	Sada vzorků č.3	21,1	21,0
	Sada vzorků č.4	21,8	21,4
	Sada vzorků č.5	20,8	20,9

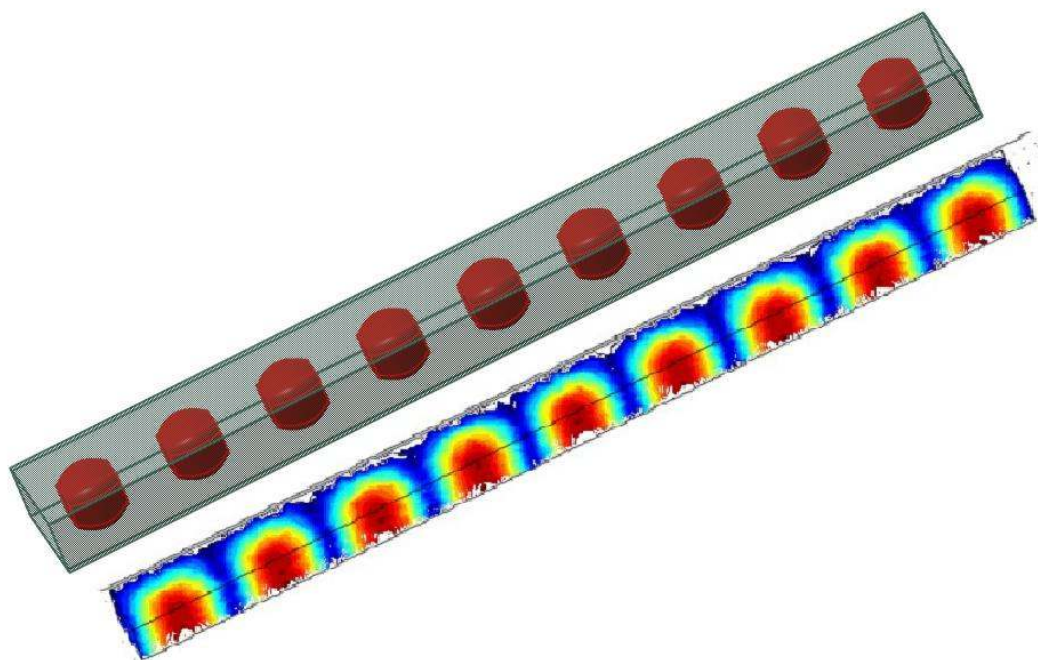
Z výsledků měření obou vlnovodů je vidět, že velikost plochy maxim na termopapíru nejeví známky výraznějšího rozdílu. V podélném směru je plocha zbarvení v průměru o 1cm^2 větší než ve směru kolmém. To je ale dáno geometrií vlnovodu.

8.6 Výsledky experimentu zobrazené ve 3D

Převedení odměřených zabarvení ploch z termopapíru do 3D modelu mělo za cíl připravit vizuální prezentaci průchodu elektromagnetického pole ve vlnovodu, především ve svých maximálních hodnotách, které bylo možné odečíst z termopapíru. K vytvoření modelu byl použit program CATIA V5R17. Díky 3D modelu bylo možné srovnání s výsledky simulace, která je se skutečným stavem téměř totožná, což potvrzují obr. 8.10 a 8.11.



Obr. 8.10 Srovnání 3D modelu s výsledky simulace (vlnovod $l=212\text{mm}$)



Obr. 8.11 Srovnání 3D modelu s výsledky simulace (vlnovod $l=610\text{mm}$)

I přes drobné nepřesnosti způsobené samotným experimentem s vkládáním termopapíru do vlnovodu, odměřováním zbarvené plochy na planimetru a v neposlední řadě také jistými ústupky při výstavbě 3D modelu, je totožnost obou obrázků zcela zřejmá. A to také dokazuje úspěšnost experimentu, protože se potvrdily vzájemné vazby mezi simulací a praktickým provedením.

9 DISKUZE VÝSLEDKŮ PRÁCE

Řešil se problém vlivu délky vlnovodu o známém průřezu na chování elektromagnetického pole v průběhu jeho postupu ve vlnovodu, jeho rozložení a možné ztráty vedením.

Problematika byla řešena nejprve teoretickým výpočtem, dále pak simulačním modelováním pomocí FEM programu Comsol Multiphysics a následně experimentálně v laboratorních podmínkách univerzity.

Jak se předpokládalo, postup vlny vzhledem k rozměru a tvaru vlnovodu, má minimální ztráty. Použitou metodou měření je nebylo možné objektivně změřit. Dalším důležitým zjištěním byla délka vlny, která je taky závislá na geometrii vlnovodu. Nedá se tedy při výpočtu vycházet jen ze základních vztahů, ale je nutné zahrnout více faktorů.

Pro ověření vlivu napojení vlnovodů, jak je uváděno v teorii, je možné použití buď přímé, nebo pomoci speciálních spojovacích prvků, které mohou sloužit také jako tlumiče. I přesto, že toto řešení nebylo součástí zadání, byl zpracován model problému tlumení alespoň v simulačním programu.

Výsledek DP spočívá především v tom, že byl ověřen vliv vlnovodu na podmínky rozvodu elektromagnetického vlnění i na větší vzdálenosti, než bylo předpokládáno u malých MW zdrojů. Proto lze zdroje konstrukčně umisťovat do větších vzdáleností od vlastní komory, aniž by se snížil výkon zařízení.

Pro delší vlnovody je třeba použít jejich stínění, aby nedošlo k ovlivnění např. řídicích systémů balastními vlnami, které mají relativně malý výkon, ale mohou být na ně některé el. prvky, obsahující zejména cívky, citlivé.

ZÁVĚR

Pro pochopení problematiky byla zpracována teoretická část, která řešila v jednotlivých kapitolách podstatu vzniku elektromagnetického vlnění, jeho důsledek v podobě dielektrického ohřevu a v neposlední řadě také konstrukční řešení vlnovodů.

Na základě provedené studie byly upřesněny cíle práce a metoda řešení experimentu, který spočíval ve studiu chování elektromagnetického pole ve vlnovodu v závislosti na jeho délce a jak se dále ukázalo i na jeho geometrii.

Pro ověření předpokladů a výpočtů byly provedeny simulační modely v programu Comsol Multiphysics. Výsledky simulace byly s některými předpoklady v rozporu, proto bylo nutné provést experiment.

Byly vyrobeny vlnovody a připraveny experimenty, při kterých bylo provedeno několik měření. Zaznamenáno bylo mnoho vzorků, které bylo nutné změřit planimetrem a dále graficky zpracovat. Výsledky grafického zpracování experimentu byly porovnány se simulací.

Pro základní zjištění, že vlivem přenosu elektromagnetického pole vlnovodem nedochází k výrazným ztrátám byla tato metoda dostatečná. Více však vypověděla o průběhu a chování vlny uvnitř vlnovodu. Přesnějších výsledků pro detekci ztrát vlnovodem by bylo dosaženo pomocí speciálních přístrojů, které jsou ovšem velmi drahé. Kladně lze hodnotit výsledky simulací, které se z experimentální složkou ve všech sledovaných aspektech shodovaly. To potvrzuje správnost zvolených postupů a metod při experimentu.

Nabízí se řešení v pokračování této práce studiem vlivu geometrie a použitého materiálu vlnovodu na kvalitu přenosu elektromagnetického pole a také na vlivu povrchové úpravy uvnitř vlnovodu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HAŇKA, Ladislav. *Teorie elektromagnetického pole*. 1. vyd. Praha : STNL, 1975. 580 s. ISBN 04-519-75.
- [2] BIOLEK , Michal. *Vývoj a konstrukce modelového zařízení mikrovlnné jednotky* . [s.l.], 2006. 78 s. UTB Zlín. Vedoucí diplomové práce Dvořák.
- [3] HÁJEK, Milan. Mikrovlny v akci. *Otevřená věda* [online]. 2005, roč. 1 [cit. 2008-01-20], s. 130-141. Dostupný z WWW: <<http://www.otevrena-veda.cz/ov/index.php?p=seminare>>.
- [4] DVOŘÁK, Zdeněk, SVOBODA, Ivan. Vývoj spotřeby energií na přípravě gumárenských směsí : Nové směry v gumárenství. *Sborník přednášek*. Zlín : Univerzita Tomáše Bati , 2003. s. 37. ISBN 80-7318-149-5.
- [5] MEISSNER, Bohumil, ZILVAR, Václav. *Fyzika polymerů : Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. 1. vyd. Praha : STNL, 1987. 308 s. ISBN 04-634-87.
- [6] *Magnetrony: Magnetrony* [online]. 2002 [cit. 2008-1-20]. Dostupný z WWW: <<http://lucy.troja.mff.cuni.cz/>>
- [7] HANUS, Stanislav, SVAČINA, Jiří. *Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika*. 2. dopl. vyd. Brno : VUT v Brně, 2004. 210 s. ISBN 80-214-2222-X.
- [8] *Multimediální učebnice: Mikrovlnná technika* [online]. 2005 [cit. 2008-1-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.urel.feec.vutbr.cz/>>
- [9] PAVEL, Sedlák. *Vlnovody*. 1. vyd. Praha : STNL, 2000. 541 s. ISBN 80-312-1547.
- [10] DVOŘÁK, Zdeněk; SVOBODA, Ivan. *Fenomén energie a jejich podíl na výrobě gumárenských výrobků*. Přednášky
- [11] *Elektronová mikroskopie pro biology: Mikrovlny v přípravě preparátů pro TEM* [online]. 2005 [cit. 2008-1-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.paru.cas.cz/>>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

f	Hz	Vlnová frekvence
λ	m	Vlnová délka
c	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Rychlost světla
B	T	Intenzita magnetické indukce
E_r	$\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$	Intenzita radiálního elektrického pole
I	A	Elektrický proud
U	V	Elektrické napětí
N	1	Počet dutinových rezonátorů
ω	s^{-1}	Úhlová rychlost
ϵ_r	-	Relativní permitivita
ϵ_0	$\text{C}\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$	Permitivita vakua
ϵ'	-	Reálná část relativní permitivity
ϵ''	-	Komplexní část relativní permitivity
$\text{tg } \delta$	-	Ztrátový činitel
PD	1	Penetrační hloubka
C	m	Kapacita
S	F	Plocha desky kondenzátoru
d	m^2	Vzdálenost desek kondenzátoru
G	m	Vodivost
R	$1/\rho$	Odpor
ρ	Ω	Měrný odpor
γ, σ	$\Omega\cdot\text{m}$	Měrná vodivost
t	$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$	Čas
T	s	Teplota

Q	°C	Měrné teplo
m	J	Hmotnost
c_p	kg	Měrná tepelné kapacita
P	$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$	Výkon
	W	

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1.1 Dielektrický ohřev</i>	10
<i>Obr. 1.2. Působení elektromagnetického vlnění na různé druhy materiálů: a- vlny projdou (sklo, keramika, papír), b-odrazí se (kovy), c-absorbují (voda)</i>	12
<i>Obr. 1.3. Srovnání DE ohřevu a konvečního ohřevu</i>	14
<i>Obr. 2.1 Schéma mikrovlnné trouby: 1 vysokofrekvenční zdroj; 2 magnetron; 3 vlnovod; 4 rozptylovač mikrovln; 5,6 varný prostor</i>	19
<i>Obr. 3.1 Schématické zapojení magnetronu</i>	22
<i>Obr. 3.2 Válcová dioda v homogenním magnetickém poli</i>	22
<i>Obr. 3.3 Schéma trajektorie částice ve zkřížených homogenních polích</i>	23
<i>Obr. 3.4 Kritická parabola</i>	24
<i>Obr. 3.5 Řez magnetronem</i>	24
<i>Obr. 3.6 Struktura pole v magnetronové dutině při vybuzení π vidu</i>	26
<i>Obr. 3.7 Magnetronové dutiny</i>	26
<i>Obr. 3.8 Rovinný magnetron</i>	27
<i>Obr. 4.1 Koaxiální přenosové vedení</i>	29
<i>Obr. 4.2 Proudů a napětí na přenosovém vedení</i>	30
<i>Obr. 4.3 Souřadnicová soustava v případě obdélníkového vlnovodu</i>	34
<i>Obr. 4.4 Elektrické pole ve vlnovodu při nějaké hodnotě z</i>	34
<i>Obr. 4.5 Závislost pole ve vlnovodu na z</i>	35
<i>Obr. 4.6 Magnetické pole ve vlnovodu</i>	37
<i>Obr. 4.7 Závislost E_y na z pro $\omega \ll \omega_m$</i>	39
<i>Obr. 4.8 Vlnovod s budícím kolíkem a snímací sondou</i>	41
<i>Obr. 4.9 Dílce vlnovodu spojené pomocí přírub</i>	43
<i>Obr. 4.10 Spoj mezi dvěma vlnovodnými dílci vyznačující se nízkými ztrátami</i>	43
<i>Obr. 4.11 Rozdvojka tvaru T (Na přírubách jsou nasazena plastická víčka, aby se nitro udržovalo čisté, pokud se rozdvojka nepoužívá)</i>	44
<i>Obr. 4.12 Elektrické pole v rozdvojce tvaru T při dvou možných orientacích pole</i>	44
<i>Obr. 4.13 Směrová odbočka</i>	45
<i>Obr. 4.14 Další možná závislost E na x</i>	46
<i>Obr. 4.15 Přímkový zdroj S_0 mezi vodivými rovinnými stěnami W_x a W_2. Tyto stěny lze zaměnit nekonečnou posloupností zrcadlových zdrojů</i>	47

<i>Obr. 4.16</i> Jedna soustava koherentních vln řady přímkových zdrojů.....	48
<i>Obr. 4.17</i> Na pole ve vlnovodu se můžeme dívat jako na superpozici dvou soustav rovinných vln	49
<i>Obr. 4.18</i> Druhy hladkých obdélníkových vlnodových přírub	53
<i>Obr. 4.19</i> Kmitočtová závislost vstupních odrazů nejčastěji užívaných koaxiálních konektorů	54
<i>Obr. 6.1</i> Rozložení maxim na délce vlny.....	59
<i>Obr. 6.2</i> Navržený vlnovod délky 212 mm	60
<i>Obr. 6.3</i> Navržený vlnovod délky 610 mm	61
<i>Obr. 7.1</i> Ideálně elektricky vodivé stěny vlnovodu	62
<i>Obr. 7.2</i> Ideálně magneticky vodivá stěna vlnovodu	63
<i>Obr. 7.3</i> Port vlnovodu	64
<i>Obr. 7.4</i> Konečně prvková síť vlnovodu	65
<i>Obr. 7.5</i> Rozložení maxim elektrického pole při simulaci vlnovodu $l = 212\text{mm}$ resp. 367mm	66
<i>Obr. 7.6</i> Rozložení maxim magnetického pole při simulaci vlnovodu $l = 212\text{mm}$ resp. 367mm	67
<i>Obr. 7.7</i> Fázové posunutí magnetické a elektrické intenzity	67
<i>Obr. 7.8</i> Rozložení maxim elektrického pole při simulaci vlnovodu $l = 610\text{mm}$	68
<i>Obr. 7.9</i> Rozložení maxim magnetického pole při simulaci vlnovodu $l = 610\text{mm}$	69
<i>Obr. 7.10</i> Rozložení maxim elektrického pole při simulaci odbočení.....	70
<i>Obr. 7.11</i> Rozložení maxim magnetického pole při simulaci odbočení.....	71
<i>Obr. 7.12</i> Vlnovod se zeslabovačem	71
<i>Obr. 7.13</i> Rozložení maxim elektrického pole při simulaci zeslabovače	72
<i>Obr. 7.14</i> Rozložení maxim magnetického pole při simulaci zeslabovače	73
<i>Obr. 8.1</i> Magnetron ROMILL MWG-LAB	75
<i>Obr. 8.2</i> Napojení vlnovodu $l = 212\text{mm}$	76
<i>Obr. 8.3</i> Rozložení vrstev PS, gumy a termopapíru	77
<i>Obr. 8.4</i> Zobrazení působení elmag. pole na termopapír.....	77
<i>Obr. 8.5</i> Rozložení maxim na termopapíru.....	78
<i>Obr. 8.6</i> Rozložení maxim v podélném vlnovod $l = 212\text{mm}$	79
<i>Obr. 8.7</i> Rozložení maxim v podélném směru vlnovod $l = 610\text{mm}$	79
<i>Obr. 8.8</i> Planimetr PLANIX 5	80

<i>Obr. 8.9</i> Měření povrchu zabarvené plochy termopapíru	81
<i>Obr. 8.10</i> Srovnání 3D modelu s výsledky simulace (vlnovod $l=212\text{mm}$)	83
<i>Obr. 8.11</i> Srovnání 3D modelu s výsledky simulace (vlnovod $l=610\text{mm}$)	84

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1 Penetrační hloubka mikrovln v různých materiálech.....	12
Tabulka 1.2 Dielektrické vlastnosti některých materiálů při frekvenci 2,45GHz.....	13
Tabulka 4.1. Základní technické parametry obdélníkových vlnovodů	51
Tabulka 4.2 Základní rozměry přírub pro obdélníkové vlnovody řady R podle IEC 154	53
Tabulka 8.1 Odměřené plochy zbarvení termopapíru vlnovod $l = 212\text{mm}$ – kolmé na směr procházejícího vlnění.....	81
Tabulka 8.2 Odměřené plochy zbarvení termopapíru vlnovod $l = 212\text{mm}$ – rovnoběžné se směrem procházejícího vlnění	82
Tabulka 8.3 Odměřené plochy zbarvení termopapíru vlnovod $l = 610\text{mm}$ –kolmé na směr procházejícího vlnění.....	82
Tabulka 8.4 Odměřené plochy zbarvení termopapíru vlnovod $l = 610\text{mm}$ – rovnoběžné se směrem procházejícího vlnění	82

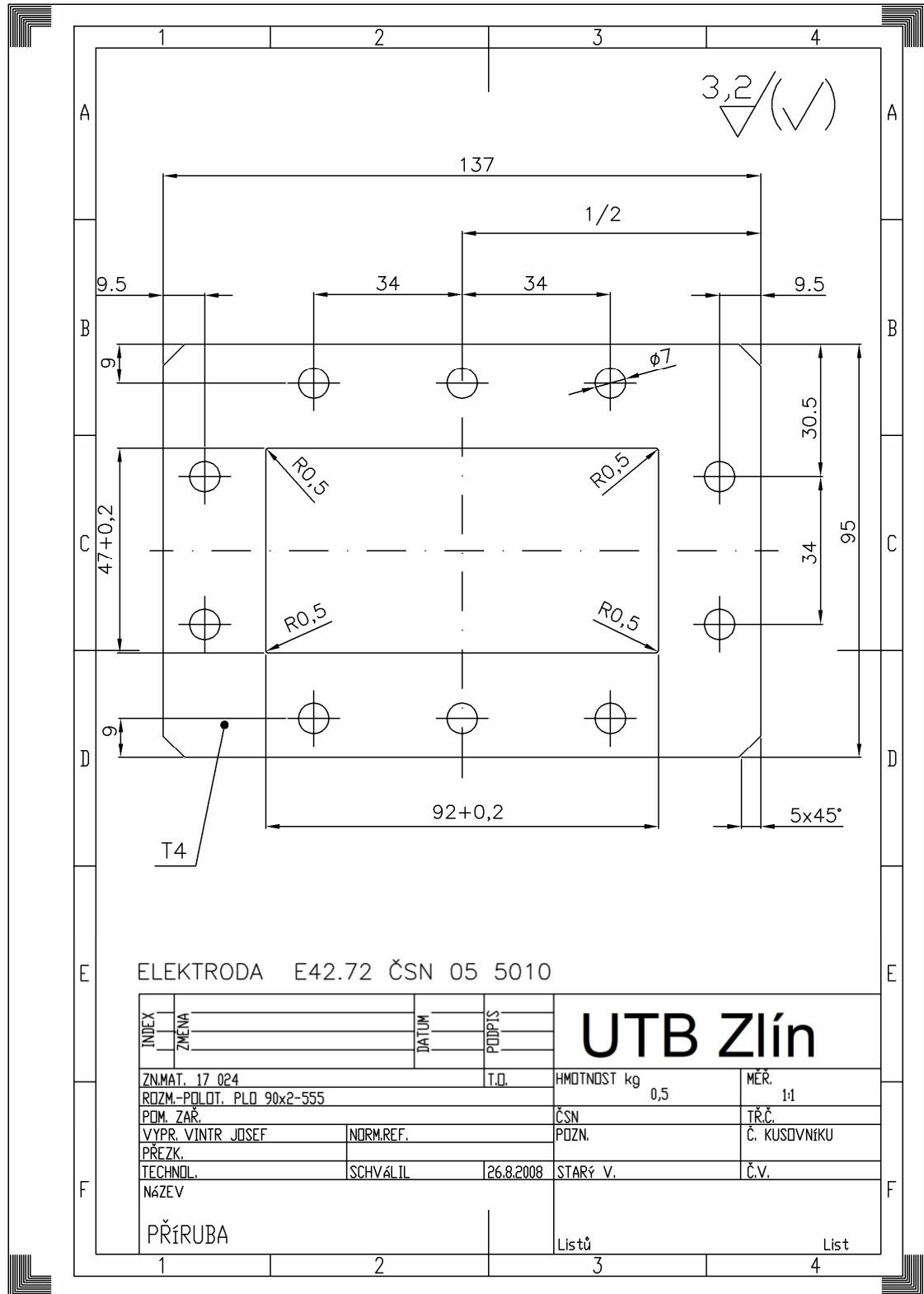
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: VÝKRES PŘÍRUBY

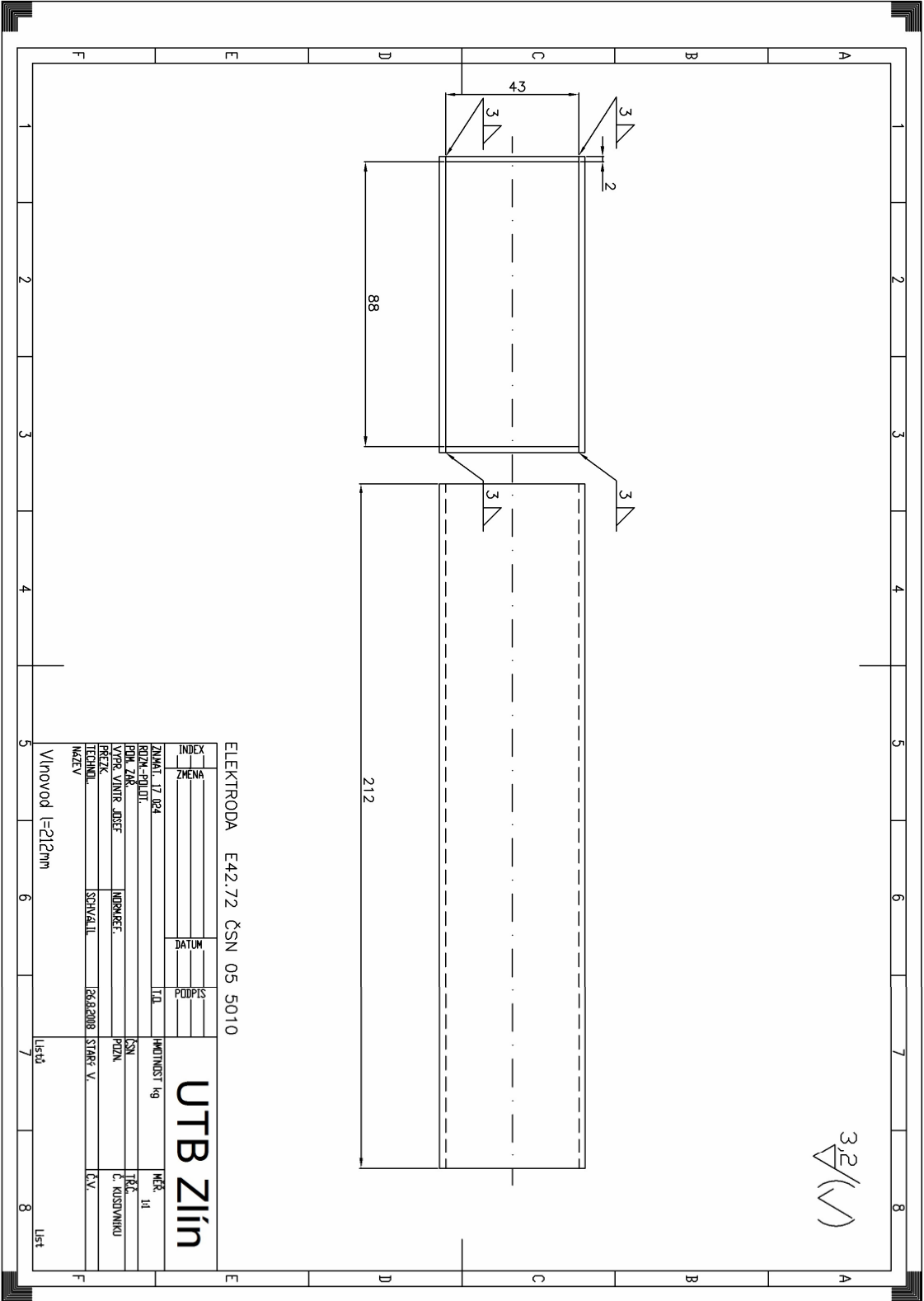
Příloha P II: VÝKRES VLNOVODU L=212mm

Příloha P III: VÝKRES VLNOVODU L=610mm

PŘÍLOHA PI: VÝKRES PŘÍRUBY



PŘÍLOHA P II: VÝKRES VLNOVODU L=212MM



ELEKTRODA E42.72 ČSN 05 5010

INDEX	ZMENA	DATUM	PODPIS	HMOTNOST kg	HEB: 111
ZNAK: 17 024			T.L.	ČSN	TRK
ROZM-PRILIT.				POZN	C. KOSOVANOU
PRM. ZAB.					
VYPR. VINTR. JARJE					
PŘEZK.					
TECHNOL.	SEHYVALI	126.8.2008	STARÝ V.		Č.V.
NAZEV	Vlnovod l=212mm				

UTB Zlín

7 Listů 8 List

