

Vývoj a konstrukce modelového zařízení mikrovlnné jednotky

Bc. Michal Biolek

Diplomová práce
2006



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2005/2006

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal BIOLEK**
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Vývoj a konstrukce modelového zařízení mikrovlnné jednotky**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracujte literární studii na dané téma**
- 2. Navrhněte konstrukci modelového zařízení mikrovlnné jednotky se dvěma magnetrony**
- 3. Proveďte rekonstrukci zařízení a ověřte jeho funkci**
- 4. Závěr**

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce

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

Datum zadání diplomové práce: **14. února 2006**

Termín odevzdání diplomové práce: **31. května 2006**

Ve Zlíně dne 12. ledna 2006



prof. Ing. Josef Šimoník, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá chováním elektromagnetického pole uvnitř mikrovlnné (MW) komory. Úkolem je posuzovat vliv přídavného zdroje (magnetronu) na chování mikrovln v MW komoře pro následnou aplikaci v gumárenském průmyslu.

Experiment byl prováděn na navrženém a zkonstruovaném laboratorním zařízení a rozložení elektromagnetického pole bylo testováno na faxovém papíře, který byl vložený mezi pěnový polystyrén.

ABSTRAKT

The diploma thesis is focused by behaviour elektromagnetic field inside of microwawe (MW) box. The aim is to criticize the influence of additive source of microwawe to behaviour microwawe in MW box for follow application in rubber industry.

The experiment was realized on the project and construct laboratory equipment and distributed elektromagnetic field was tested on fax paper, which was put in to foam polystyrene.

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 panu RNDr. Janu Česnekovi, CSc z firmy ROMILL.

Prohlašuji, že jsem na celé diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně, 21. 05. 2006

.....

jméno diplomanta

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 DIELEKTRICKÝ (DE) OHŘEV	12
1.1 ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ.....	12
1.1.1 Charakteristické vlastnosti DE ohřevu.....	16
1.2 UPLATNĚNÍ DIELEKTRICKÉHO OHŘEVU	17
1.2.1 Fyzikální princip	18
1.2.2 Postata DE ohřevu.....	18
1.2.3 Uplatnění DE ohřevu v plastikářském a gumárenském průmyslu	19
1.2.4 Vytvrzování epoxidových pryskyřic v kompozitech.....	21
1.2.5 Vytvrzování slévárenských forem a jader	22
1.2.6 Rozmrazování pomocí DE technologie.....	22
1.2.7 Hlavní přednosti	23
2 MIKROVLNNÁ ZAŘÍZENÍ	25
2.1 VLNOVODY	25
2.2 MAGNETRON	25
2.2.1 Válcový magnetron	27
2.2.2 Rovinný magnetron	31
3 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ MIKROVLNNÝCH ZAŘÍZENÍ	33
3.1 PRŮMYSLOVÉ MIKROVLNNÁ ZAŘÍZENÍ	36
3.1.1 Kontinuální DE vulkanizace	39
4 BEZPEČNOSTNÍ PODMÍNKY PROVOZU ZAŘÍZENÍ	41
5 ENERGETICKÉ VÝPOČTY	42
5.1 ZÁKLADNÍ VZTAHY	43
5.2 MĚŘENÍ DIELEKTRICKÉ KONSTANTY	45
5.3 PENETRAČNÍ HLOUBKA.....	47
5.4 ZÁVISLOST PERMITIVITY NA FREKVENCI.....	48
5.5 POTŘEBNÝ VÝKON PRO OHŘEV KAUČUKU	49
ZÁVĚR	50
II PRAKTICKÁ ČÁST	51
6 CÍL EXPERIMENTU	52
7 POSTUP EXPERIMENTU	53

7.1	DE OHŘEV	53
7.2	MW ZAŘÍZENÍ	54
7.3	KONSTRUKCE LABORATORNÍHO ZAŘÍZENÍ.....	56
7.4	OVĚŘENÍ FUNKCE TANDEMOVÉHO USPOŘÁDÁNÍ MW ZDROJŮ.....	59
7.4.1	Ověření funkce výpočtem	60
7.5	ROZLOŽENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE UVNITŘ MW KOMORY	63
ZÁVĚR		74
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		75
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		76
SEZNAM OBRÁZKŮ		78
SEZNAM TABULEK.....		80

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 po-
~~Mikrovl~~ 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.

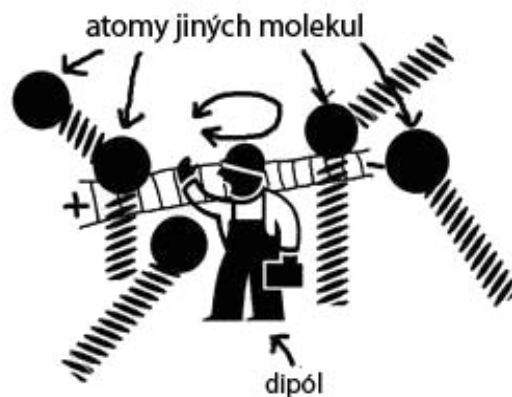
Výhodou mikrovln oproti konvenčnímu ohřevu je současný ohřev materiálu v celém objemu a tím dosažení lepších vlastností. Vyšší kvalita výrobků umožňuje konkurenceschopnost a tím nárůst prodeje, možnost nových výrobků, nedosažitelných jinými metodami. Zpracování na novou jakost neznamena jen vyšší tržby,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

Předmětem úsilí této diplomové práce je navrhnout a zkonstruovat modelové zařízení se dvěma magnetrony. Na tomto zařízení budeme sledovat chování mikrovlnného pole uvnitř mikrovlnné komory a posuzovat vliv přídavného zdroje (magnetronu). Výsledky práce budou adaptivně aplikovány při konstrukci diskontinuálního mikrovlnného zařízení, s několika zdroji mikrovlnného záření, na ohřev gumárenské směsi o váze přibližně 1 tuny.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 DIELEKTRICKÝ (DE) 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 (až několik miliardkrát za sekundu).



Obr. 1. Dielektrický ohřev

Na ohřev mají vliv dva jevy. Jsou to mezimolekulární tření překonávání mezimolekulárních přitažlivých sil a hystereze 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.

[7]

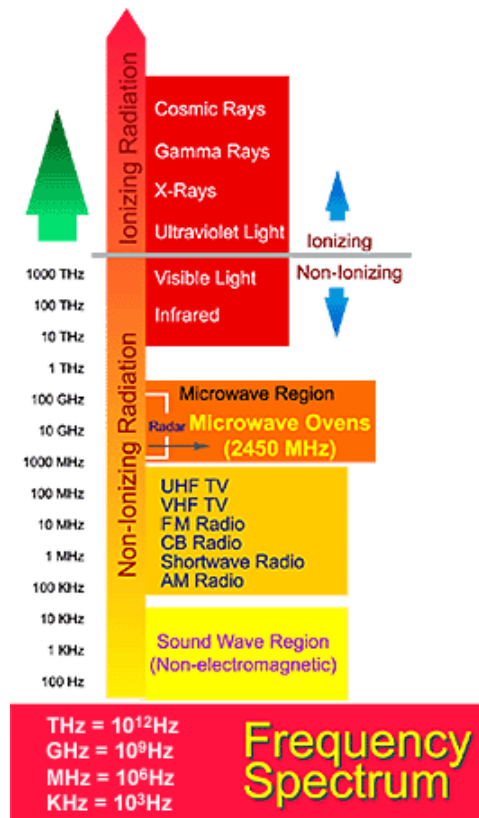
1.1 Elektromagnetické vlnění

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:

$$f \cdot \lambda = c \quad (1)$$

[9]

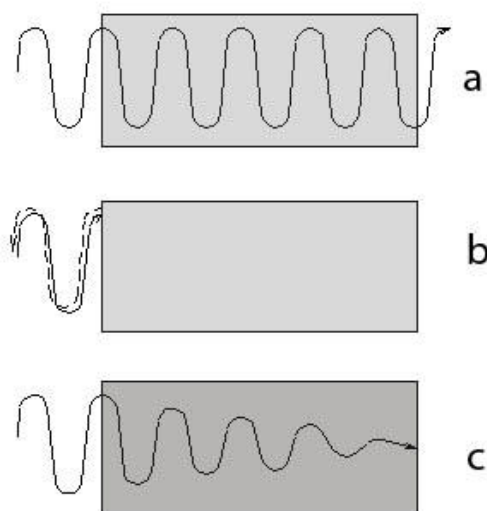
Elektromagnetické vlnění odpovídá frekvencí v intervalu 300 MHz až 300 GHz, což odpovídá délce vlny v rozsahu od 1 m do 1 mm. Pro domácí účely mikrovlnného ohřevu, byla určena frekvence 2,45 GHz, která odpovídá délce vlny 12,2 cm.



Obr. 2. Používaná frekvence (2450MHz)

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.3). 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. 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. [4]



Obr. 3. 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) 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. 2)

[9]

Tab. 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
Olivový olej	20	40

[2]

Některé materiály mohou být také kombinací transparentního, odrážejícího 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. polynorbornen (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).

[3]

Tab. 2. Dielektrické vlastnosti některých materiálů při frekvenci 2,45GHz

Materiál	$\epsilon' (-)$	$\epsilon'' (-)$	Teplota ($^{\circ}\text{C}$)	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
etanol	8	7,5	25	0,7
metanol	24	13,5	25	0,7
metylalkohol	24	15	25	0,6
propanol	5	3,5	25	1
dřevo	4	0,88	25	4,4
borité sklo	4	0,0016	25	2 794

[4]

1.1.1 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. „hot 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.

1.2 Uplatnění dielektrického ohřevu

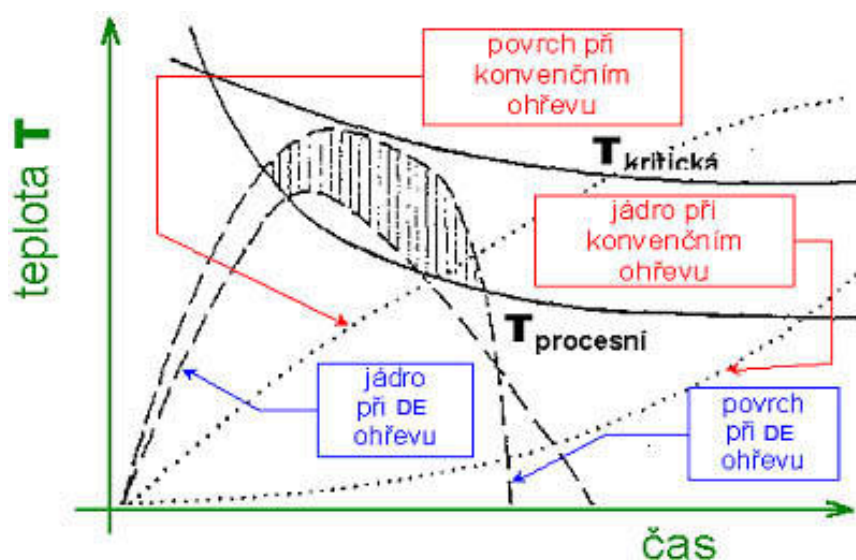
DE ohřev se úspěšně uplatňuje v mnoha průmyslových odvětvích. Nejrozšířenější využití DE ohřevu je při ohřevu potravin, ať v domácnostech či v průmyslu. V potravinářském a farmaceutickém průmyslu umožňuje modernizaci a využívání nových výrobních postupů. V ostatních průmyslových oblastech se elektromagnetické vlnění využívá k sušení textilu, kůže, bavlny, keramiky, tabáku, dřeva, léčiv, chemikálii atd. Známé je i sušení papíru při jeho výrobě v papírnách (USA, Čína). Ve světovém průmyslu prakticky již neexistuje zpracovatelský obor, kde by se DE ohřev neprosadil. DE ohřev je výhodný při rozmrazování hluboce zmrazených materiálů, při pasterizaci a sterilizaci balených potravin. Pasterizace balených potravin zaručuje trvanlivost bez použití konzervačních přísad. Výrobou tohoto zařízení pro průmyslové účely se zabývají desítky firem v USA, Japonsku, Velké Británii, Německu, Francii, Itálii, Švédsku a v dalších zemích. Uplatňují se buďto jako efektivnější technologie nahrazující konvenční ohřevná zařízení nebo, a to častěji, se pořízují proto, že umožňují zcela novou kvalitu zpracování.

1.2.1 Fyzikální princip

Pro ohřev se využívá jevu, kdy permanentní dipóly se v stejnosměrném elektrickém poli orientují do energeticky nepříjemnější polohy. Pokud dojde k přeplování pole, snaží se molekuly nesoucí náboj opět otočit do nejvhodnější polohy. 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. Uplatňují se přitom dva jevy. Mezimolekulární tření při překonávání mezimolekulárních přitažlivých sil a hystereze mezi působícím polem a indukovanou elektrickou odezvou vlivem setrvačnosti, jež závisí na elektrickém náboji, hmotě a tvaru molekul. Nejběžnější molekulou, jejíž permanentní dipólový moment vede k její rotaci při působení elektromagnetického pole je voda. [2]

1.2.2 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. 4).



Obr. 4. Srovnání DE ohřevu a konvenčního 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.

[2]

1.2.3 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 předehřívání pryže před vulkanizací a při vytvrzování 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 ener-

getická 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 s bisfenolem, jež je stimulována sušícími činidly, např. polyaminy. Například je známa japonská aplikace polymerace epoxidových matic plněných uhlíkem anebo kevlarem 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

1.2.4 Vytvrzování epoxidových pryskyřic v kompozitech

Makromolekuly katalyzátoru obsahují polární skupiny a v elektromagnetickém poli proto dochází k lokálnímu přehřívání na molekulární úrovni, vzniká tepelný rozdíl mezi polárními skupinami uvnitř molekuly a ostatními nepolárními částmi molekuly. Čím silnější je dipólový moment, tím vyšší je teplota lokálních horkých míst, a tím rychleji probíhá vytvrzovací reakce. Pokud se elektromagnetické vlnění použije i na odstranění atmosférické vlhkosti svazku skelných a karbidových vláken před smočením v pryskyřici, lze dosáhnout extrémně vysokých mechanických vlastností, resp. snížení tlouštěk profilů. To má význam u vysoce jakostních tažených kompozitů, vesměs plochých profilů.

1.2.5 Vytvrzování slévárenských forem a jader

Slévárenské formy jsou nejčastěji vyráběny z křemičitého písku a přírodního (hlína) nebo syntetického vazebního materiálu. Písek je nalisován kolem modelu, a na velikosti tlaku závisí přesnost reprodukce modelu. Forma je pak důkladně vytvrzena a tím umožňuje manipulaci a naplnění kovem.

Vazební materiály podle míry polarity a tím i velikosti ztrátového činitele dělí do tří kategorií:

- vysoce polární materiály: křemičitan sodný, Covasil, fenol-formaldehydové a močovino-formaldehydové pryskyřice,
- středně polární materiály: melasa, kalafuna,
- nízkopolární materiály: všechny vedlejší ropné produkty

DE vytvrzováním lze dosáhnout i při různorodosti tvarů forem velmi dobré výsledky. V průběhu několika minut se teplota uvnitř forem teplot zvýší na (150 – 200) °C, na povrchu na (200 – 250) °C. Přes velmi rychlý ohřev jsou mechanické vlastnosti velmi dobré, pevnost v tlaku dosahuje (10 – 12) MPa.

[2]

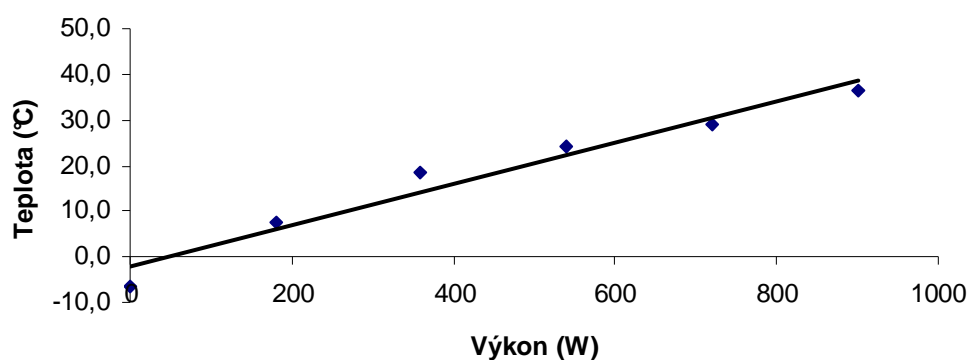
1.2.6 Rozmrazování pomocí DE technologie

Rozmrazování kaučkových směsí je důležité z hlediska simulace podmínek při zpracování kaučkových směsí, kdy kaučuky i jejich směsi jsou dováženy k výrobci ve zmrzlém stavu (doprava železnicí, kamiony atd.).

Při rozmrazovacích pokusech se teplota testovaných vzorků pohybovala okolo -7°C. Rozmrazování bylo provedeno v mikrovlnném zařízení Profesor MTE – 235BX a to po dobu 10 s a poté změřena teplota ve třech místech (a, b a c).

Tab. 3. Závislost teploty na výkonu při rozmrazování DE technologií (10 s)

vzorek č.	čas (s)	výkon (W)	výkon (%)	teplota (°C)			
				a	b	c	průměr
1	0	0	0	-7	-6	-7	-6,7
2	10	180	20	9	7	6	7,3
3	10	360	40	20	17	18	18,3
4	10	540	60	27	24	22	24,3
5	10	720	80	26	27	34	29,0
6	10	900	100	37	37	35	36,3



Obr. 5. Závislost teploty na výkonu při rozmrazování DE technologií (10 s)

Při rozmrazování směsi v mikrovlnném zařízení dochází k téměř lineárnímu průběhu závislosti teploty na výkonu mikrovlnného zařízení.

[3]

1.2.7 Hlavní přednosti

- zkrácení doby zpracování, často až o 70-85 % i více,
- zvýšení kvality výrobků možnost nových výrobků, nedosažitelných jinými metodami,
- zvýšení výrobní kapacity,
- snížení podlahové plochy až o 50-90 % velikosti, potřebné u jiných metod,
- zlepšení hygieny pracovního prostředí,
- usnadnění a zkrácení doby údržby,
- snížení provozních nákladů, zejména úspora energie,

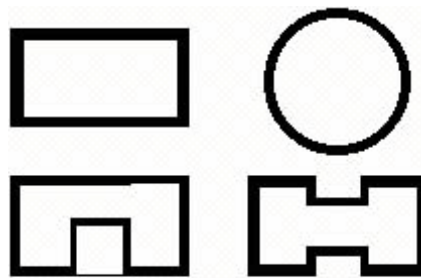
- eliminace odpadů a snížení spotřeby fosilních paliv, což představuje snížení zátěže pro životní prostředí .

2 MIKROVLNNÁ ZAŘÍZENÍ

Každé mikrovlnné zařízení obsahuje takzvaný magnetron, speciální elektronku, v níž magnetická a elektrická pole působí na elektrony tak, aby produkovala záření v elektromagnetickém spektru okolo 2450 MHz. Takto vyprodukované mikrovlnné záření působí na molekuly ohřívaného produktu. Všechny energetické vlny mění svou polaritu z pozitivní na negativní, a to při každém cyklu vlny.

2.1 Vlnovody

Slouží pro přenos energie z vysokofrekvenčního generátoru (magnetronu) do vnitřního prostoru mikrovlnného zařízení. Termínem vlnovod většinou označujeme kovovou trubici, její příčné rozměry jsou srovnatelné s délkou vlny. Vnitřní stěny vlnovodu bývají upraveny tak, aby byly minimalizovány ztráty v kovu (obvykle lze stěny vlnovodu pokládat za dokonalý elektrický vodič). Příčný profil vlnovodu má obvykle obdélníkový nebo kruhový tvar. Ve speciálních případech může mít průřez vlnovodu tvar písmene U nebo H (Obr. 6).



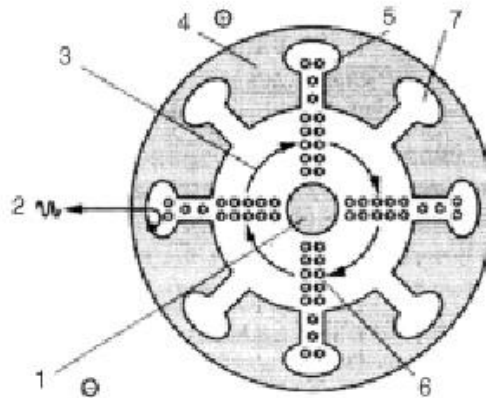
Obr. 6. Vlnovody

[8]

2.2 Magnetron

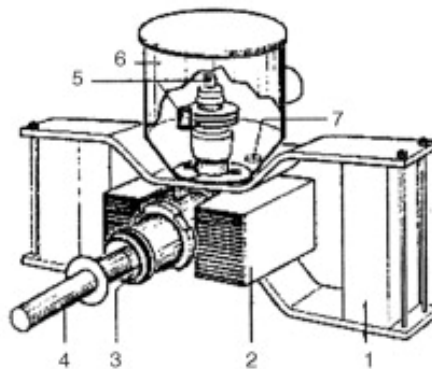
Oscilace magnetronu jako první pozoroval a popsal již ve 20. letech Augustin Žáček, profesor Univerzity Karlovy. Magnetron je zdrojem vysokofrekvenčního záření. Používá se jako generátor vysokých výkonů a pracuje s vysokou účinností. Je reprezentantem velmi vysokofrekvenčních elektronek pracujících ve zkřížených polích. Na rozdíl od klystronů v něm dochází k interakci elektronů s vysokofrekvenčním polem v celém vnitřním prostoru. Z teoretického hlediska je problematika magnetronů složitá. Magnetron je výkonová vaku-

ová elektronka, u které tok elektronů není ovládán mřížkou, ale vnějším magnetickým polem. Magnetron má vyhřívanou střední katodu a železnou válcovou anodu s rezonančními dutinami (viz Obr. 7).



Obr. 7. Uspořádání katody a anody magnetronu (1 – katoda, 2 – vysokofrekvenční výstup s anténou, 3 – směr pohybu daný vnějším magnetickým polem, 4 – anoda, 5 – duté rezonanční prostory, 6 – obíhající svazky elektronů)

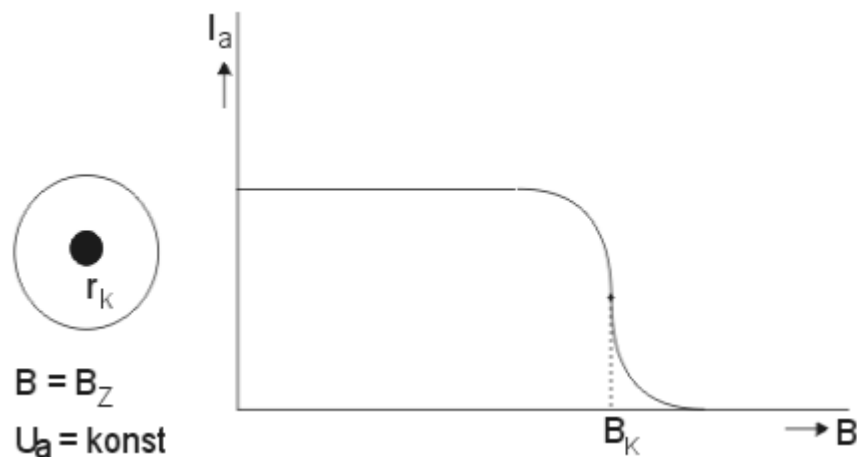
Anoda je připojena na zdroj vysokého napětí. Rezonanční dutiny mají stejnou funkci jako indukčně-kapacitní rezonanční obvod LC. Společně s působením vnějšího magnetického pole se elektrony uvedou do vysokofrekvenčních kmitů požadované hodnoty. Z jedné z rezonančních dutin se vyvádí vysokofrekvenční elektromagnetické vlnění výstupní anténou (viz Obr. 7) do prostoru mikrovlnné ohřívací komory, kde se elektromagnetická energie přeměňuje ve vloženém materiálu v tepelnou energii – teplo. Na Obr. 8 je náčrt magnetronu firmy Philips.



Obr. 8. Magnetron Philips (1 – permanentní magnet, 2 – chladičí žebra, 3 – vysokofrekvenční vazební člen, 4 – anténa, 5 – konektor anody a katody, 6 – vysokofrekvenční odstřihovací pouzdro, 7 – termostat)

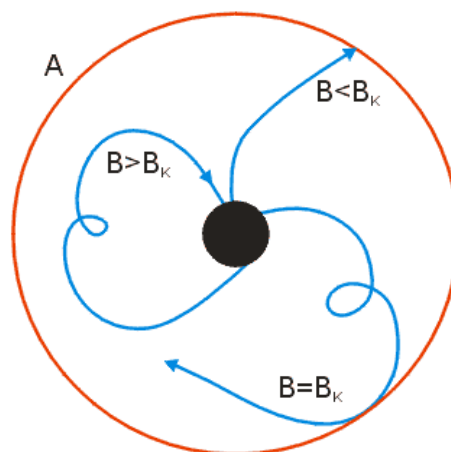
2.2.1 Válcový magnetron

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. 9. 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. 10.

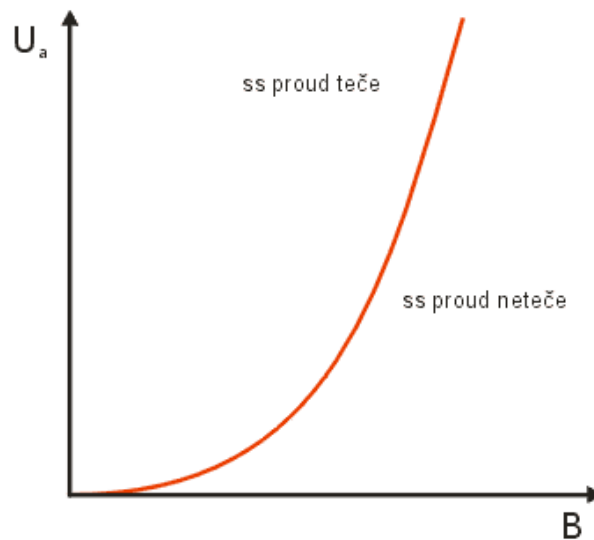


Obr. 10. Schéma trajektorie částice ve zkřížených homogenních polích

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

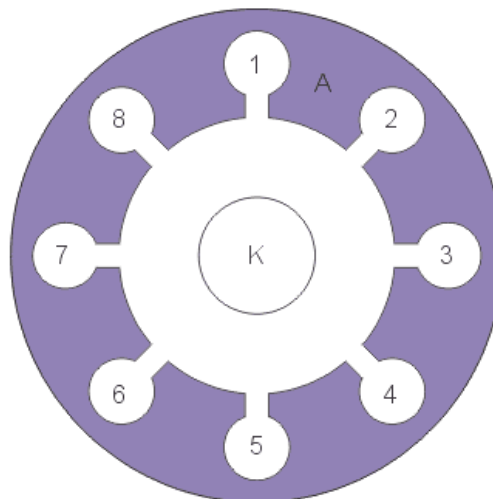
$$U_a = konst. B_k^2, \quad (2)$$

což je kritická parabola, která rozděluje rovinu U_a, B na dvě části (Obr. 11). Nad parabolou stejnosměrný proud teče, pod parabolou stejnosměrný proud neteče. Bylo pozorováno, že v oblasti, kde stejnosměrný proud neteče vznikají oscilace.



Obr. 11. Kritická parabola

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



Obr. 12. Řez magnetronem

Magnetron je válcová dioda. Anodová elektroda však není jednoduchý válec, ale skládá se z bloku opatřeného sudým počtem N dutinových rezonátorů (Obr. 11 - $N = 8$). 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 posunuté, takže platí:

$$E_1 = E_0 \cdot e^{j\omega t} \quad (3)$$

$$E_1 = E_0 \cdot e^{j(\omega t - \varphi)} \quad (4)$$

⋮

$$E_N = E_0 \cdot e^{j[\omega t - (N-1)\varphi]} \quad (5)$$

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

$$E_{N+1} = E_1, \quad (6)$$

z čehož plyne

$$E_0 \cdot e^{j\omega t} = E_0 \cdot e^{j(\omega t - N\varphi)} \quad (7)$$

takže

$$\varphi = \frac{2\pi k}{N} = \varphi(k) \quad (8)$$

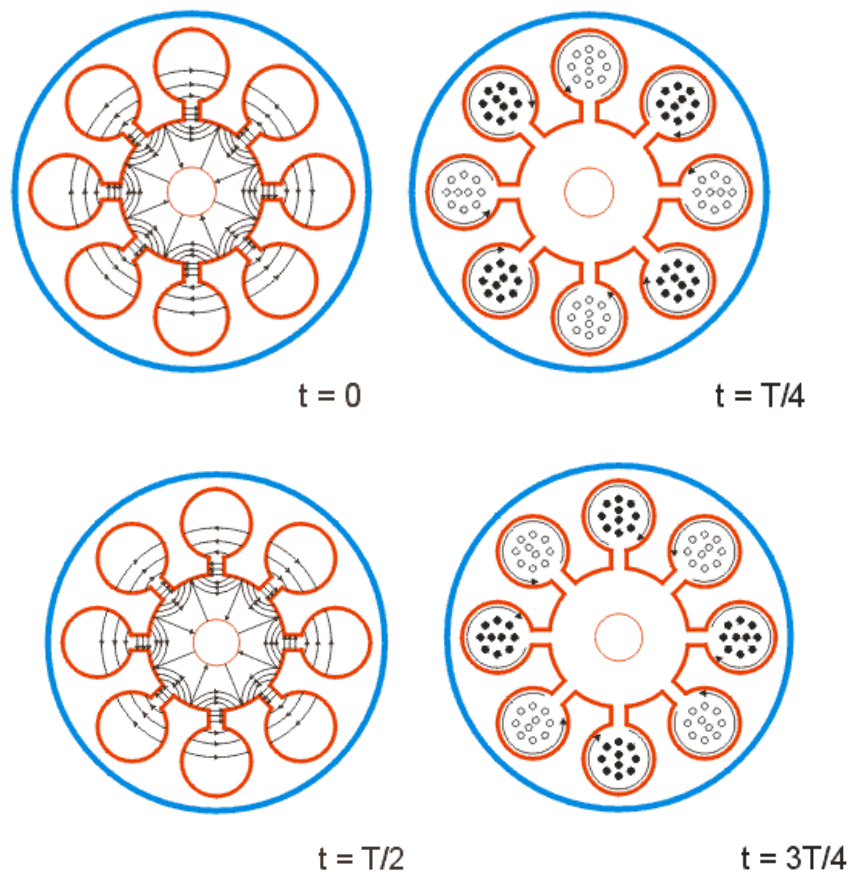
, kde

$$k = 0, \dots, \frac{N}{2} \quad (9)$$

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

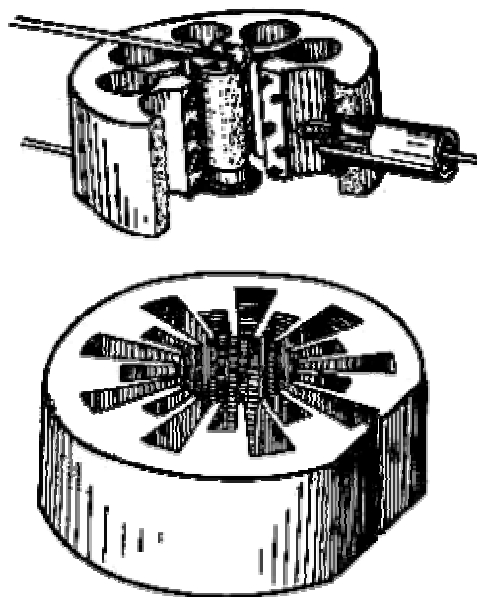
$$\varphi\left(\frac{N}{2}\right) = \pi \quad (10)$$

a označuje se též jako π - vid. Tento vid má tu vlastnost, že elektrické pole v sousedních štěrbinách 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. 13. [6]



Obr. 13. Struktura pole v magnetronové dutině při vybuzení π vidu

Na Obr. 14 jsou znázorněny magnetronové dutiny dvou různých typů s odvodem energie pomocí smyčky a štěrbin (v druhé dutině není zakreslena katoda).



Obr. 14. Magnetronové dutiny

2.2.2 Rovinný magnetron

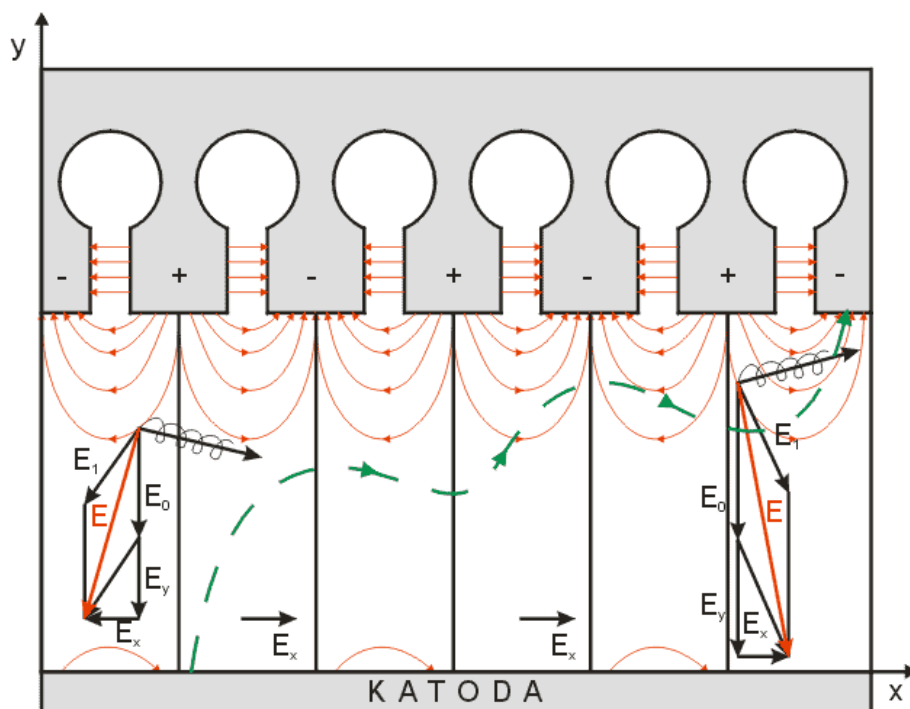
Doposud jsme elektromagnetické pole v magnetronové dutině považovali za kmity. Fázové posunutí mezi sousedními štěrbinami muselo vyhovovat podmínce

$$\varphi = \frac{2\pi}{N} k, \quad (11)$$

která 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

$$\alpha = 2\pi / N. \quad (12)$$

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



Obr. 15. Rovinný magnetron

Rezonanční struktura magnetronové dutiny pracuje jako zpomalovací struktura. Zpomaluje elektromagnetické vlny, čímž je vlastně umožněna jejich silná interakce s elektrony. Je patrně 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. 15), kde již elektromagnetická vlna nerotuje, ale postupuje vpřed

zpomalenou rychlostí.

[6]

3 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ MIKROVLNNÝCH ZAŘÍZENÍ

Místem, kde dochází k ozáření preparátu elektromagnetickým vlněním a v důsledku toho k jeho ohřátí je mikrovlnná trouba. Jedná se o prostor ohraničený kovovými stěnami, v němž se šíří elektromagnetické vlnění. Ty produkuje magnetron, z něhož jsou vlnovodem vedeny do vnitřního prostoru trouby, kde se rozptýlí. Rozptýlení však není rovnoměrné a tak může dojít k některým komplikacím. V troubě dojde k absorpci elektromagnetického vlnění absorbojícím materiálem, a k přeměně elektromagnetického vlnění na teplo. Vnitřní prostor trouby je v rezonanci se vstupním vysokofrekvenčním zářením, čímž se zvyšuje účinnost celého zařízení. Při svém šíření prostorem trouby se tak elektromagnetické vlnění odráží od stěn a skládají se. Vložkami z plastu procházejí naopak bez omezení. Výsledkem je vznik míst s vyšší a nižší intenzitou záření v závislosti na geometrických parametrech vnitřního prostoru. Nebezpečným je vznik stojatého vlnění, pokud je mikrovlnná trouba zapnuta bez zátěže, kdy oproti místům s nulovou intenzitou mohou vzniknout místa s několikanásobnou intenzitou a rázy, které mohou mikrovlnnou troubu poškodit. Aby se minimalizovaly tyto jevy vedoucí k nerovnoměrnému ohřevu, je většina přístrojů vybavena míchadlem mikrovln buď v podobě otáčející se kovové tyče nebo otočného talíře.

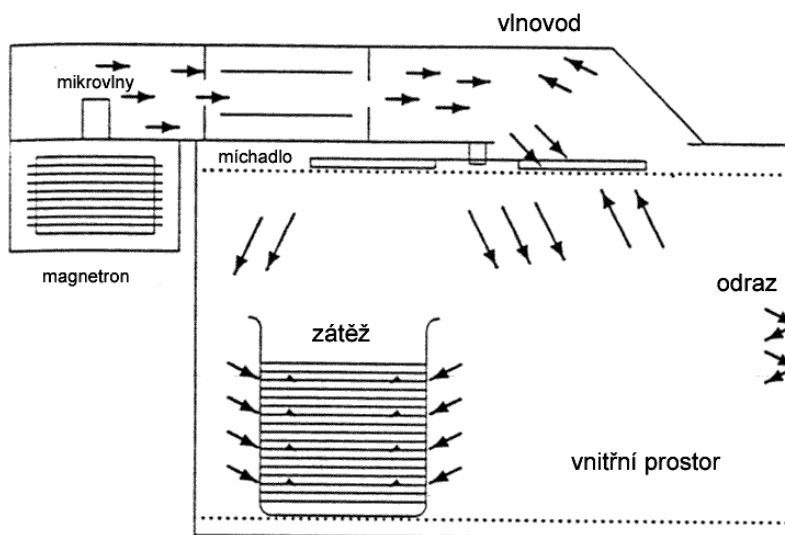
[9]

První mikrovlnná trouba se však vůbec nepochybně neličila od dnešní. Vážila 340kg a byla velká asi jako chladnička.



Obr. 16. Jedna z prvních mikrovlnných trub

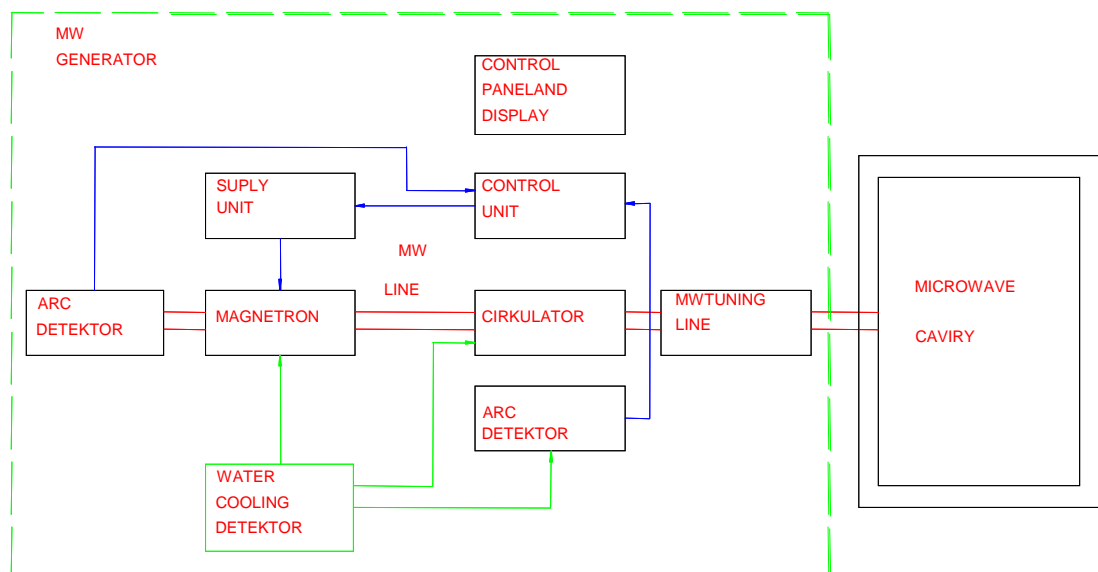
Umístili ji pokusně v jedné restauraci, kde ji přijali zprvu velmi nedůvěřivě. Postupným zdokonalováním a schopností ohřívat jídlo se však počáteční zdrženlivost rychle prolomila. Za skutečný mezník mikrovlnné trouby se považuje rok 1975, kdy prodej „mikrovlnek“ převýšil počet prodaných elektrických a plynových trub.



Obr. 17. Schéma mikrovlnného zařízení

Mikrovlnná zařízení jsou konstruována pro kontinuální, diskontinuální nebo stacionární ohřev kusových, sypkých a kašovitých až tekutých materiálů. Celek tvoří zdroje elektromagnetické energie, ozařovací komory s tzv. aplikátory, jež zabezpečují rovnoměrnost ohřevu, případně komoru pro dohřev, ochranné a měřicí prvky, a řídicí jednotku (Obr. 18). Zařízení vytváří kompaktní celek, pouze v odůvodněných případech se generátory umísťují odděleně od vlastní komory.

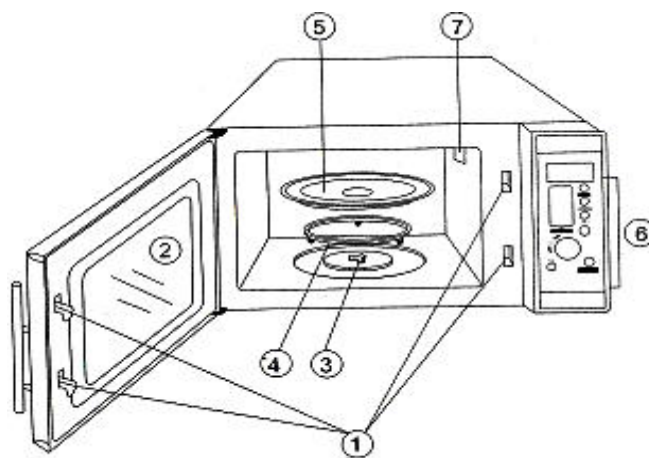
Mikrovlnné generátory, vesměs s plynule nastavitelným výkonem, jsou osazeny zásadně průmyslovými typy magnetronů, jež se vyznačují dlouhou životností. Výkon magnetronů se pohybuje v rozmezí od 0,7 do 6 kW. Elektrické příkony domácích mikrovlnných trub se obvykle pohybují v rozmezí 600 až 1 600 W. Magnetrony vyžadují chladicí vodní nebo vzduchový systém. Magnetrony s výkonem asi do 2 kW jsou chlazeny vzduchem, magnetrony s vyššími výkony se chladí vodou, což klade mimo jiné také vyšší nároky na řídicí techniku. Požadavek vyššího výkonu se obvykle řeší paralelním řazením magnetronů o výkonu 1,5 kW, které jsou z cenových důvodů nejvýhodnější. Není výjimkou paralelní zapojení 100 i více magnetronů. Technická životnost magnetronů je 6 000 až 8 000 provozních hodin.



Obr. 18. Blokové schéma mikrovlnného zařízení

Ke standardní výbavě běžných mikrovlnných trub patří časový spínač a nastavení výkonu magnetronu. Pro použití trouby k laboratorním účelům je vhodný nejlépe digitální časový spínač, který umožňuje i nastavení velmi krátkých časů. U kuchyňských mikrovlnek magnetron pracuje stále v plném výkonu a jeho snížení se docílí periodickým vypínáním. Jedna perioda se označuje jako čas cyklu. Je zřejmé, že pro účely přípravy preparátů je nejvýhodnější co nejkratší čas cyklu, který umožňuje jemné nastavení výkonu. Z bezpečnostních důvodů jsou dvířka mikrovlnné trouby opatřena vypínačem, který automaticky vypne magnetron, dojde-li k jejich otevření za chodu trouby.

[2]



Obr. 19. Příklad mikrovlnné trouby pro domácí použití: 1- bezpečnostní zamykací systém dveří, 2-dveřní sklo s kovovou mřížkou, 3-unášec otočného talíře, 4-kruhový unášec, 5-skleněný otočný talíř, 6-kontrolní panel, 7-výstup mikrovln.

3.1 Průmyslové mikrovlnná zařízení

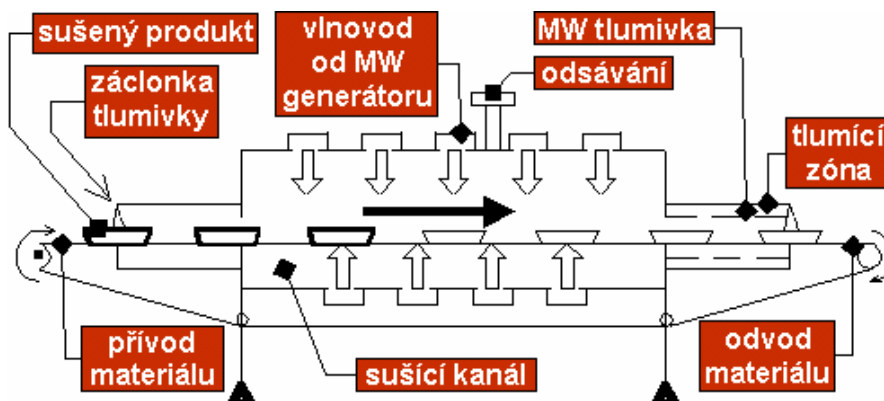
Zařízení pro průmyslové aplikace se zejména v Evropě, podobně jako komerční mikrovlnné trouby pro domácnosti, konstruují většinou na celosvětově nejvíce využívané frekvenci 2450 MHz. Na kmitočtech kolem 915 MHz se penetrační hloubka zvětšuje oproti kmitočtu 2,45 GHz přibližně dvaapůlkrát. To umožňuje zpracovávat materiály odpovídajících větších rozměrů. U mikrovln je penetrační hloubka zpravidla v řádu jednotek až desítek centimetrů (viz Tab. 1).

Současná mikrovlnná zařízení mají výkony 100 kW i více, vykazují velmi dobrou účinnost, lze je přizpůsobit nejrůznějším výrobním procesům a umožňují optimální kombinaci s konvenčními způsoby. Mikrovlnné pásové sušičky se vyrábějí pro výkony 8 až 150 kW, délku dopravního pásu 5 až 30 m a šířku pásu 0,2 až 1 m. Maximální sušicí teploty jsou 230°C. Přívod mikrovlnné energie je ze čtyř stran, takže je zaručeno homogenní ohřátí sušeného materiálu. Jako zdroje mikrovlnného záření se obvykle používají robustní vzduchem chlazené magnetrony o výkonu 800 kW. Funkce magnetronů a vysokonapěťových transformátorů je samostatně jištěna. Na přání se dodává např. plynulá regulace výkonu a plynulé řízení vlhkosti vzduchu.

Vynikající vlastnosti DE ohřevu se u keramických hmot prosadily při sušení, sintrování (spékání) a při odlučování organických substancí. Ve srovnání s konvenčními způsoby ohřevu se dosahuje energetických úspor. Doba sušení může být o jeden řád kratší. Zařízení proto mohou být značně menší a nižší je i potřeba forem. Významné je snížení technologického odpadu (zmetkovitosti) asi o 30 %, neboť při mikrovlnném sušení se netvoří povrchová kůra ani trhliny. Vzhledem k vysoké rovnoměrnosti ohřevu lze proto zpracovat i výrobky nejsložitějších tvarů, ať už v tlustostěnných částech, stěnách nestejně tloušťky nebo v kombinovaných plných a dutých oblastech. Okamžitá pohotovost k provozu umožňuje rychlé reakce na zakázky a tím snížení zásob hotových výrobků. Celkově dochází k rychlé návratnosti investic.

Mikrovlonné sušení se prosadilo u bílé a lité keramiky; u forem pro lití keramiky, ale i u sádrových forem na nové formy. Rozšířené je sušení natvrdo s povlakovou vrstvou a u glazur; provádí se i předsoušení licí hmoty. Mikrovlny se uplatňují v průmyslu porcelánu, kameniny, cihel a obkladaček. Pohotovým nastavením parametrů lze na jednom zařízení sušit různé produkty (nádobí, sanitární a technickou keramiku, aj.). Přesto, že nejrozšířenější jsou procesy sušení, mikrovlnami se také vypalují a spékají materiály - například na bázi SiC.

K úspoře energie dochází vzhledem k tomu, že elektromagnetické vlnění se absorbuje jen v sušeném produktu, zatímco okolní prostor zůstává studený. Při mikrovlnném ohřívání nalitého stěru se nevytváří povlak neboť se suší zevnitř ven. Protože mikrovlonné zařízení nespotřebovává mimo provoz žádný pohotovostní výkon, neexistuje žádný běh naprázdno a v přestávkách se jednoduše vypnou. Nepotřebují také předeheřev neboť jsou okamžitě připraveny k vlastnímu procesu. Voda a pojidla pohlcují elektromagnetické vlnění silněji než suroviny v porézní keramické struktuře, a proto se dané složky ohřívají, resp. vypuzují rychleji. Sušením zevnitř ven se vytváří příznivý teplotní gradient vůči okolí a tím se sušení urychluje. Základní bilance je 1 kW mikrovlnného výkonu na odpaření 1 litru vody za hodinu.



Obr. 20. Průmyslové sušící zařízení

Na Obr.20 je schematické uspořádání mikrovlnného tunelového sušícího zařízení. Sušené předměty procházejí tunelem na dopravním pásu. Sušící zařízení je vytvořeno několika mikrovlnnými moduly, které umožňují požadované odstupňování teplot. Moduly jsou sestaveny tak, aby netěsnosti mezi nimi byly omezeny na přípustné hodnoty a záření nemohlo pronikat do okolí.

Mikrovlnné komorové sušičky (Obr. 21) se vyrábějí pro výkony (4 až 150) kW a objemy (0,5 až 50)m³. Maximální sušicí teplota je 200 °C. Magnetrony jsou umístěny v bočních stěnách sušáren. To zaručuje rovnoměrné ohřátí celého prostoru.



Obr. 21. Mikrovlnná pásová sušička délky 20 m s celkovým výkonem 55 kW



Obr. 22. Mikrovlnná rotační trubková pec

Mikrovlnné rotační trubkové pece se používají pro zpracování granulátů, prášků a vláken. Pec zobrazená na Obr. 22 se vyrábí pro výkony 2,4 a 4,8 kW.



Obr. 23. Vlevo velká stacionární sušička 21 m³/30 kW, vpravo mobilní zkušební komorová sušička 4 m³/14 kW

Na Obr. 23 vlevo je mikrovlnná komorová sušička 30 kW, 21 m³ a na Obr. 23 vpravo mobilní komorová sušička 14 kW, 4 m³.



Obr. 24. Dvoukomorová sintrovací pec

Mikrovlnné vysokoteplotní sintrovací (spékací) pece lze provozovat s ochrannou atmosférou nebo s vakuem do 104 Pa. Na Obr. 24 je dvoukomorová sintrovací pec o výkonu 4,8 kW pro pracovní teplotu 1 800 °C.



Obr. 25. Mikrovlnná průchozí komora

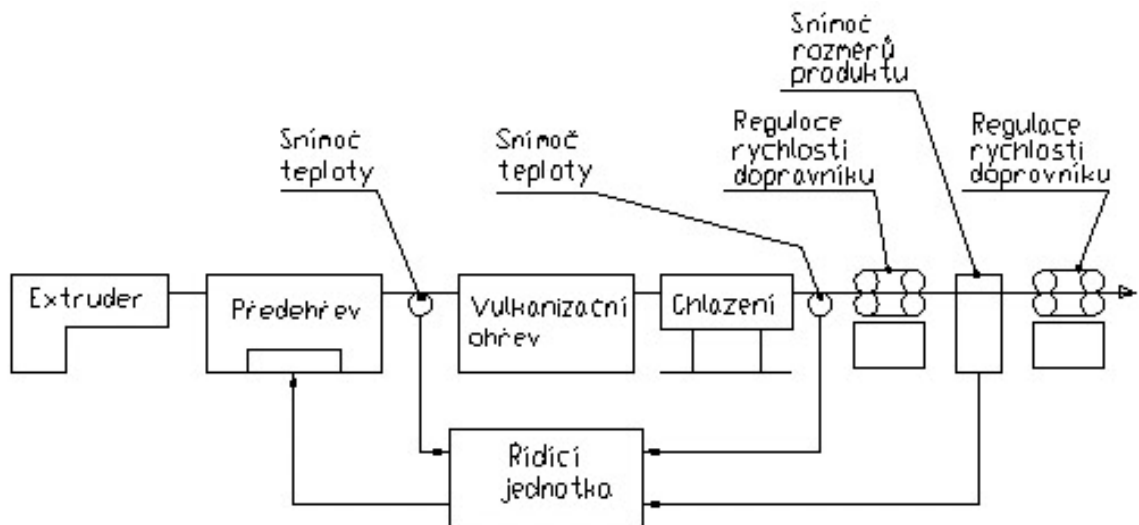
Mikrovlnné průchozí komory jsou určeny pro výrobu kabelů se skleněnými vlákny a plasty vyztužené skleněnými vlákny. Na Obr. 25 je mikrovlnná průchozí komora MEK, která se vyrábí pro výkony 0,8; 1,6 a 2,4 kW.

3.1.1 Kontinuální DE vulkanizace

Vulkanizace extrudovaných profilů je nejrozšířenější aplikací DE ohřevu v gumárenství. Průřez profilu, vlastnosti daného druhu gumárenské směsi a požadovaná výrobní kapacita ovlivňují rychlost posunu profilu, řízení průběhu a především velikost instalovaného mikrovlnného 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 předeřev 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 (Obr.26).

[2]



Obr. 26 Schéma mikrovlnné linky pro vulkanizaci gumových profilů

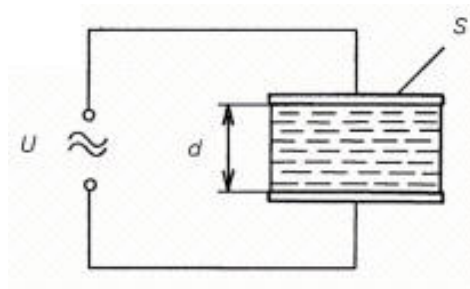
4 BEZPEČNOSTNÍ PODMÍNKY PROVOZU ZAŘÍZENÍ

Moderní vysokofrekvenční ohřevné technologie zajišťují čistý provoz. Nejsou zdrojem prachu, pachu, hluku, vibrací ani záření. Nezpůsobují zvýšení teploty ani vlhkosti a neznečišťují ovzduší. Vysokofrekvenční ohřevná zařízení neprodukují odpady ani nespotečbovávají fosilní paliva, zemní plyn apod. Skutečnost, že se jedná o ohřev bez spalovacího procesu výrazně zvyšuje jeho bezpečnost. Bezpečnost mikrovlnných trub musí splňovat platné mezinárodní předpisy. To je výrobce povinen deklarovat na výrobním štítku. Zdroj mikrovlnného záření i celý pracovní prostor jsou odstíněny a utěsněny proti průniku mikrovln. Podle normy VDE / IEC 27 ve vzdálenosti 5cm od přístroje nesmí být hodnota průniku MW záření při plném výkonu trouby větší než $5 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ a při chodu naprázdno $10 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$. Přípustná maximální hodnota je tak ještě pod hustotou záření, jež vydává mobilní telefon s výkonem 2 W při všesměrovém vyzařování ve vzdálenosti 5 cm od antény. Uzavření dvířek je automaticky kontrolováno a při jejich náhodném otevření je zdroj záření okamžitě odpojen. Mikrovlnné trouby je třeba podle pokynů výrobce umístit v předepsané vzdálenosti od okolních zařízení, aby bylo zajištěno dostatečné chlazení. Musí také splňovat i ostatní předpisy s ohledem na provedení a připojení domácích elektrických spotřebičů, a to včetně elektromagnetické kompatibility.

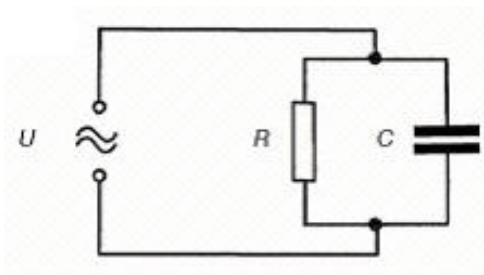
[2]

5 ENERGETICKÉ VÝPOČTY

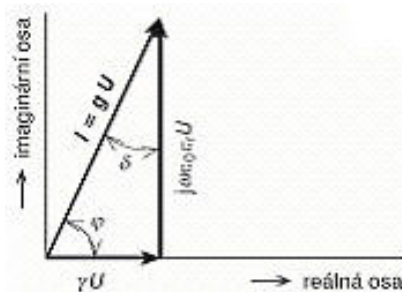
Elektricky nevodivé látky lze ohřívat ve vysokofrekvenčním elektromagnetickém poli tepelnou energií, která vzniká na základě elektrických ztrát uvnitř těchto látek. Elektricky nevodivé látky obsahují polarizované molekuly a disociované kladné a záporné ionty. Molekuly a ionty se chovají jako elektrické dipóly a snaží se sledovat rychlé změny polarizace elektrického pole. V důsledku vzájemného tření těchto částic vzniká tzv. *dielektrické teplo*.



Obr. 27. Deskový kondenzátor s vloženým dielektrikem



Obr. 28. Náhradní schéma kondenzátoru se ztrátovým dielektrikem



Obr. 29. Fázový diagram dielektrických ztrát

5.1 Základní vztahy

Na Obr. 27 je naznačen deskový kondenzátor, jehož dielektrikum je tvořeno elektricky nevodivou látkou, která je charakterizována relativní permitivitou $\epsilon_r (-)$ a ztrátovým činitelem $\operatorname{tg} \delta (-)$. Ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta$ lze odvodit z náhradního schématu na Obr. 28 a z fázového diagramu na Obr. 29.

Kapacita kondenzátoru je dána vztahem

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r S d^{-1} \quad (13)$$

kde

ϵ_0 je permitivita vakua ($8,859 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$),

ϵ_r relativní permitivita materiálu (relativní permitivita je poměr kapacity C kondenzátoru vyplněného dielektrikem a kapacity C_0 stejného kondenzátoru vakuového),

S plocha desky kondenzátoru (m^2),

d vzdálenost desek (m).

Kapacita kondenzátoru tvaru jednotkové krychle bude

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (14)$$

Z náhradního schématu plyne výsledná vodivost

$$G = R^{-1} + j\omega C \quad (15)$$

Výsledná vodivost jednotkové krychle je

$$g = (\rho^{-1} + j\omega \epsilon_0 \epsilon_r) = (\gamma + j\epsilon_r) \quad (16)$$

kde $\rho (\Omega \cdot \text{m})$ je rezistivita (měrný odpor), $\gamma (\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$ konduktivita (měrná vodivost).

Mezi proudem obvodu I a napětím U platí vztah

$$I = gU = (\gamma + j\omega \epsilon_0 \epsilon_r)U \quad (17)$$

Z fázorového diagramu lze odvodit ztrátový činitel:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\gamma}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r} \quad (18)$$

Hodnoty ε_r a $\operatorname{tg} \delta$ nejsou konstantní, ale mění se s frekvencí a závisí na teplotě, vlhkosti apod. [4]

Příkon, který se mění v teplo, je dán vztahem:

$$P = U I \cos \varphi \quad (19)$$

Pro malé úhly $\operatorname{tg} \delta$ přibližně platí: $\cos \varphi \sin \delta = \operatorname{tg} \delta$ (–)

Efektivní hodnota svorkového napětí U kondenzátoru při průchodu sinusového proudu o efektivní hodnotě I je:

$$U = \frac{I}{\omega C} \quad (20)$$

Efektivní hodnota proudu I , který prochází kondenzátorem o kapacitě C po připojení na svorkové sinusové napětí U , je:

$$I = \omega C U \quad (21)$$

Příkon kondenzátoru lze pak vyjádřit vztahem:

$$P = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta \quad (22)$$

Dosazením do tohoto výrazu se získá praktický vztah:

$$P = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r S d^{-1} U^2 \operatorname{tg} \delta \quad (23)$$

Z uvedeného vztahu je zřejmé, že čím je větší frekvence f (Hz), tím menší je potřebná intenzita elektrického pole E ($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$), tj. napěťový gradient Ud^{-1} .

V Tab. 4 jsou pro různé hodnoty ztrátového činitele $\operatorname{tg} \delta$ a různé frekvence f uvedeny potřebné intenzity elektrického pole E a v Tab. 5, jsou uvedeny hodnoty relativní permitivity ε_r a činitele ztrát $\operatorname{tg} \delta$ pro různé materiály.

Tab. 4. Potřebné hodnoty intenzity elektrického pole pro různé hodnoty ztrátového činitele a různé frekvence

$E \text{ (kV}\cdot\text{m}^{-1}\text{)}$			
$\text{tg } \delta$	1 MHz	10 MHz	100 MHz
0,001	7 000	2 200	700
0,01	2 200	700	220
0,1	700	220	70
1	220	70	20

Elektromagnetické vlnění se řídí stejnými fyzikálními zákony jako velmi krátké nebo radarové vlny. Vloženým materiálem mohou být buď odraženy (kovy), propouštěny (teflon, křemičité sklo, polypropylen), nebo absorbovány (většina ostatních materiálů). Materiály, které elektromagnetické vlnění absorbují, mohou být elektromagnetickým vlněním ohřívány.

Pro DE ohřev platí základní vztah:

$$P = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r E^2 V \quad (24)$$

kde

P je výkon absorbovaný materiálem,

f frekvence,

ε_0 permitivita vakua, ($8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$),

ε_r imaginární část komplexní relativní permitivity,

E intenzita elektrického pole,

V objem materiálu.

[4]

5.2 Měření dielektrické konstanty

Obecně bylo pro měření dielektrik vyvinuto mnoho metod. Dielektrikum je izolant, který má schopnost polarizace (tedy být polarizován). Tedy všechna dielektrika jsou izolanty, ale ne všechny izolanty jsou dielektrikem.

Tab. 5. Relativní permitivity a činitele ztrát některých materiálů

Materiál	ϵ_r (-)	$\text{tg } \delta$ (-)
vzduch	1,0	0
voda	80,0	1,0
polystyrén pěnový	2,3-2,5	-
bakelit	4,8-5,3	-
polyamid	3,0-4,0	0,015-0,004
kaučuk přírodní	2,1-2,3	0,004-0,005
sklo	4,5-8,0	0,002-0,015
kaučuk syntetický	2,7-2,9	0,005-0,1
acetylcelulóza	3,5 až 7,0	0,03 až 0,1
dřevo suché	2,5 až 3,6	0,025 až 0,13
dřevo vlhké	3,5 až 26,0	0,01 až 1,0
hedvábí suché	4,0 až 7,0	0,033 až 0,06
kaučuk přírodní	2,1 až 2,3	0,004 až 0,005

Relativní permitivita se stanovuje dle vztahu:

$$\sigma = \omega \cdot \text{tg } \delta \cdot C \cdot \frac{d}{S} \quad (25)$$

kde

σ je vodivost (S/m),

ω úhlová rychlost (s^{-1}),

$\text{tg } \delta$ fázový úhel (-),

d vzdálenost elektrod (m),

S plocha elektrod (m^2).

Do zvoleného vzorce bylo dosazeno za kapacitu C :

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{S}{d} \quad (26)$$

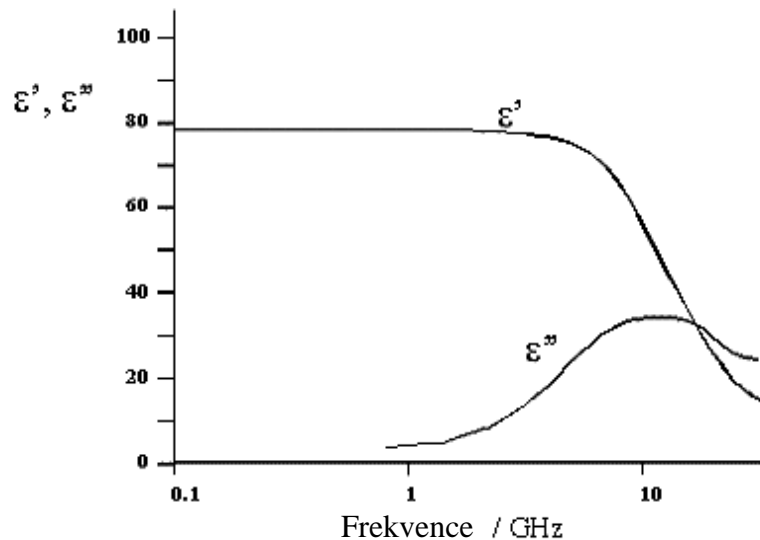
kde

ϵ_0 je permitivita vakua ($\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$),

ϵ_r relativní permitivita (-),

S plocha elektrod (m^2),

d vzdálenost elektrod (m).



Obr. 30. Závislost reálné (ϵ') a komplexní (ϵ'') části relativní permitivity na frekvenci.

Pro některé materiály, se s frekvencí mění obě dielektrické konstanty, reálná i komplexní. Změna těchto konstant ϵ' a ϵ'' s frekvencí, pro vodu je znázorněna na Obr.30. Je patrné že u vody reálná složka s frekvencí klesá. [11]

5.3 Penetrační hloubka

Penetrační hloubka PD (**P**enetration **D**epth) je vyjádřena vztahem:

$$PD = (\lambda_0/2\pi) \cdot \sqrt{\frac{\epsilon'}{\epsilon''}} \quad (27)$$

kde

λ_0 je vlnová délka ve vakuu,

ϵ' reálná část komplexní relativní permitivity,

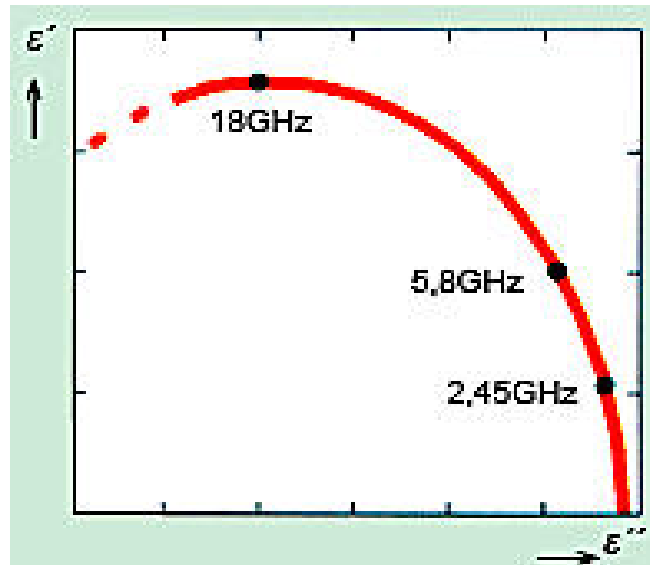
ϵ'' imaginární část komplexní relativní permitivity.

Penetrační hloubka je definována jako vzdálenost, ve které původní intenzita elektrického pole klesne na hodnotu $1/e$ krát násobek původní intenzity (kde „e„ je Eulerovo číslo o hodnotě asi 2,718), tedy přibližně na 37%. V této části dochází k podstatně většímu ohřevu než ve větších hloubkách.

[9]

5.4 Závislost permitivity na frekvenci

Při porovnání frekvencí 2,45 a 5,8 GHz na Obr. 31, je patrné, že odebíraný výkon roste s frekvencí. Teoreticky tedy při stejném množství dodané energie absorbuje materiál při frekvenci 5,8 GHz zhruba dvojnásobek energie než při frekvenci 2,45 GHz.



Obr. 31. Závislost složky reálné a komplexní permitivity ϵ' a ϵ'' vody při teplotě 25°C na frekvenci

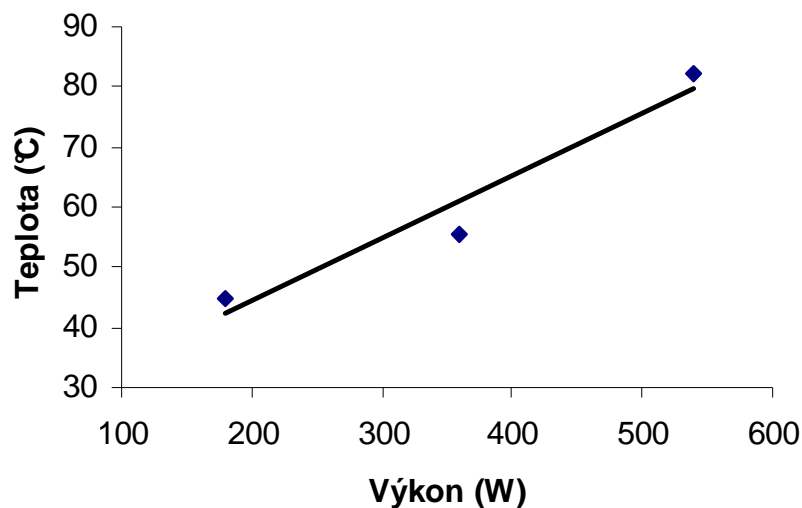
U mnoha materiálů není poměrná permitivita neměnná, ale závisí na teplotě a frekvenci. U většiny materiálů roste permitivita s frekvencí. Na Obr. 5 je zobrazen průběh složek ϵ' a ϵ'' komplexní permitivity vody při teplotě 25 °C. Maximum ϵ'' je při frekvenci 18 GHz. Při frekvenci 5,8 GHz je hodnota ϵ'' asi dvojnásobná než při frekvenci 2,45 GHz. Teoreticky tedy může být pro ohřátí vody na stejnou teplotu spotřebováno při frekvenci 5,8 GHz čtyřnásobné množství energie než při frekvenci 2,45 GHz. To by ale znamenalo podstatné snížení účinnosti. Při frekvenci 2,45 GHz se pohybuje účinnost DE ohřevu mezi 70 a 90 %.

5.5 Potřebný výkon pro ohřev kaučuku

Následující tabulka znázorňuje zvýšení teploty kaučukové směsi při různých stupních výkonu.

Tab. 6. Závislost teploty na výkonu při ohřevu mikrovlnnou technologií (30 s)

vzorek č.	čas (s)	výkon (W)	výkon (%)	teplota (° C)			teplota(° C) (průměr)
				a	b	c	
1	30	180	20	47	39	49	45
2	30	360	40	50	53	63	55,3
3	30	540	60	109	76	62	82



Obr. 32. Závislost teploty na výkonu při ohřevu mikrovlnnou technologií

Z grafu je patrné, že při ohřevu směsi v mikrovlnném zařízení dochází k téměř lineárnímu průběhu závislosti teploty na výkonu mikrovlnného zařízení, a to jak při ohřevu po dobu 10 s, tak i 20 s a 30 s.

ZÁVĚR

Z provedené studie plyne reálné využití DE, pro materiály vykazující dielektrické chování. Technicky je tato metoda využívána v řadě oborů. Z výše uvedených informací o principu, vlastnostech a možnostech využití DE ohřevu vyplývá řada výhod, ale i omezení této metody. Použití DE je jistě přínosné jak z hlediska kvality, tak z hlediska ekonomického. Zajisté najde tato progresivní metoda v gumárenském průmyslu řadu dalších uplatnění. Aby DE sloužil úspěšně danému účelu, je třeba ke každému případu přistupovat individuálně za předem zjištěných optimálních podmínek. Pro další studium je zapotřebí postavit laboratorní zařízení, na kterém provedeme potřebné experimenty. Na zařízení budou kladeny určité požadavky plynoucí z literární studie, jako například zajištění rotačního pohybu ohřívaného materiálu, regulace výkonu zdroje s dostatečnou přesností a v neposlední řadě dodržení bezpečnostních předpisů provozu. Na základě těchto informací se přistoupilo ke stavbě přídavného zdroje s renomovanou firmou ROMILL.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍL EXPERIMENTU

Cílem experimentu bylo navrhnout a zkonstruovat modelové MW zařízení s propojením dvou zdrojů (magnetronů) do jedné MW komory. Mikrovlnný ohřev představuje progresivní technologii se stále širším spektrem průmyslových aplikací. Uplatňuje se jako efektivnější technologie nahrazující konvenční ohřevná zařízení a umožňuje zcela novou kvalitu zpracování. Na základě literární studie bylo cílem vyhodnotit na tomto zařízení chování elektromagnetického pole uvnitř mikrovlnné komory a posoudit vliv přídavného zdroje (magnetronu). Součástí experimentu bylo dále posoudit kvalitu a homogenitu elektromagnetického pole vlivem změny tvaru mikrovlnné komory (dle možností).

7 POSTUP EXPERIMENTU

V této kapitole je pojednáno o samotném postupu realizace laboratorního zařízení, jsou zde popsána jednotlivá úskalí, vyskytující se při zabývání se touto problematikou.

7.1 DE ohřev

DE ohřev se úspěšně uplatňuje v mnoha průmyslových odvětvích. Nejrozšířenější využití DE ohřevu je při ohřevu potravin, ať v domácnostech či v průmyslu. V potravinářském a farmaceutickém průmyslu umožňuje modernizaci a využívání nových výrobních postupů. V ostatních průmyslových oblastech se elektromagnetické vlnění využívá k sušení textilu, kůže, bavlny, keramiky, tabáku, dřeva, léčiv, chemikálii atd.

Mikrovlny vznikají přeměnou elektrické energie na energii elektromagnetického vlnění v generátoru, který se nazývá magnetron. Tato energie se přenáší mikrovlnami (Obr. 33) a dále se mění na energii tepelnou (DE ohřev), působením na polární molekuly materiálu.



Obr. 33. Princip DE ohřevu

Pro ohřev se využívá jevu, kdy permanentní dipóly se v stejnosměrném elektrickém poli orientují do energeticky nejvýhodnější polohy. Pokud dojde k přeplování 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.

Materiál se tak může ohřívat v celém objemu. V důsledku nerovnoměrnému ohřevu může dojít k lokálnímu přehřátí materiálu. Tento jev nemusí nastat 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. „hot spots“), která mohou způsobit až místní přepálení materiálů. Při spojení lokálního přehřátí s jevem nazvaným teplotní úlet, při kte-

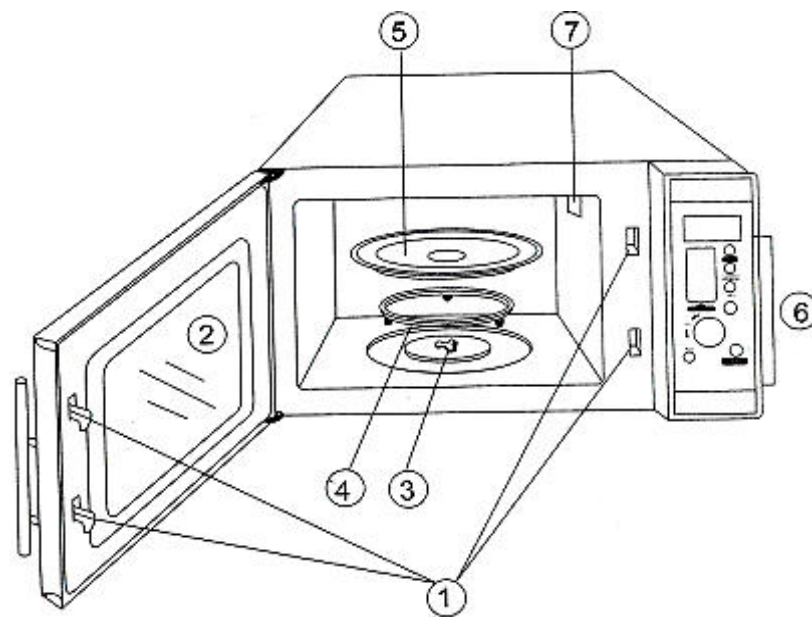
rém prudce stoupá velikost absorpce elektromagnetického vlnění při růstu teploty materiálu, může nastat totální lokální spálení uvnitř materiálu vlivem těchto jevů. Proto v kuchyňských mikrovlnných troubách se tento jev potlačuje rotačním pohybem talíře, u průmyslových zařízení běžícím pásem nebo kovovým rotačním míchadlem umístěné hned za ústí vlnovodu (Obr. 17). Proto problematika rozložení elektromagnetického pole a vliv tvaru MW komory by v rámci kvality a produktivity MW procesu neměla být zanedbána.

7.2 MW zařízení

Každé mikrovlnné zařízení obsahuje takzvaný magnetron, speciální elektronku, v níž magnetická a elektrická pole působí na elektrony tak, aby produkovala záření v elektromagnetickém spektru okolo 2450 MHz (+-50Hz). Takto vyprodukované mikrovlnné záření působí na molekuly ohřívaného produktu. Všechny energetické vlny mění svou polaritu z pozitivní na negativní, a to při každém cyklu vlny. Pro přenos elektromagnetického záření slouží vlnovody. Vnitřní stěny vlnovodu bývají upraveny tak, aby byly minimalizovány ztráty v kovu. Příčný profil vlnovodu má obvykle obdélníkový tvar o rozměrech přibližně (86x43)mm.

Základní část experimentálního vybavení tvořilo digitální mikrovlnné zařízení PROFESSOR MTE – 235BX. Základní parametry tohoto zařízení:

- objem 23 litrů,
- výkon 900W (5 výkonových stupňů),
- příkon 1400W,
- frekvence mikrovln 2450 MHz.



Obr. 34. Mikrovlnné zařízení Profesor MTE – 235BX

Popis zařízení:

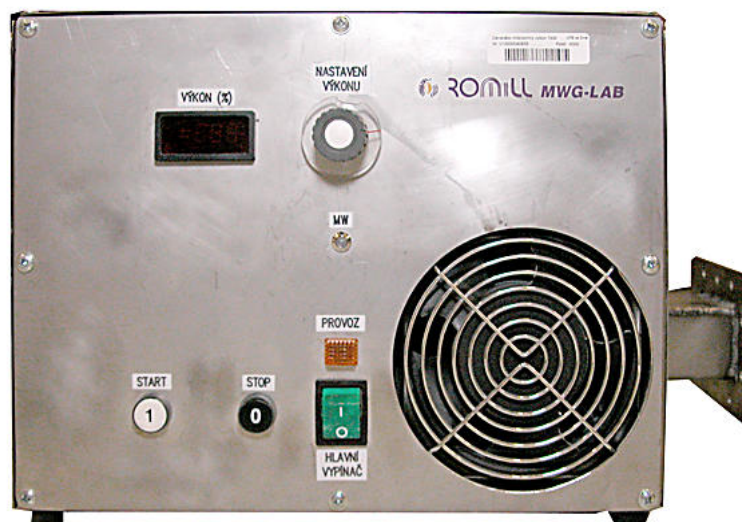
1. bezpečnostní zamykací systém dveří,
2. dvevní sklo s kovovou mřížkou,
3. unašeč otočného talíře,
4. kruhový unašeč,
5. skleněný otočný talíř,
6. kontrolní panel,
7. výstup mikrovln.

K tomuto zařízení byl nainstalován externí zdroj elektromagnetického záření (magnetron) MWG-LAB, o výkonu 900W, který byl vyroben firmou ROMILL (Obr. 35).



Obr. 35. Externí zdroj elektromagnetického vlnění od firmy ROMILL

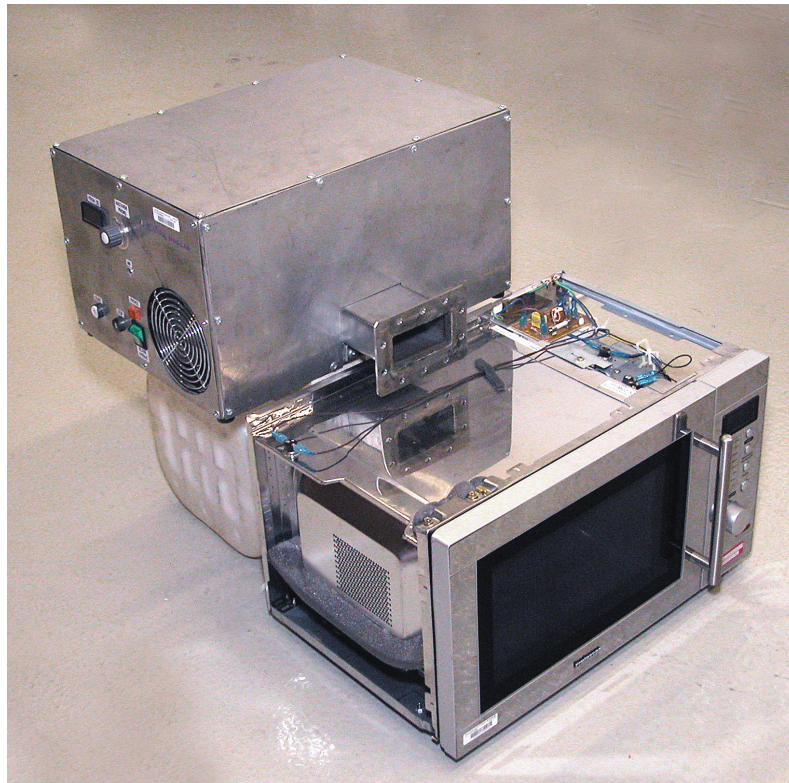
Ovládací prvky MWG-LAB (Obr. 36) tvoří hlavní vypínač, kterým uvedeme zařízení do pohotovostního stavu. Činnost magnetronu se spustí bílým tlačítkem 1 (START) a přerušit se černým tlačítkem 0 (STOP). Dále ovládací panel obsahuje regulaci výkonu magnetronu, které se provádí šedým kolečkem (NASTAVENÍ VÝKONU) a hodnotu výkonu v procentech lze odečíst z dobře čitelného displeje (VÝKON %). O činnosti magnetronu upozorňuje modře blikající dioda (MW). O činnosti magnetronu upozorňuje modře blikající dioda (MW).



Obr. 36. Ovládací panel zdroje ROMILL

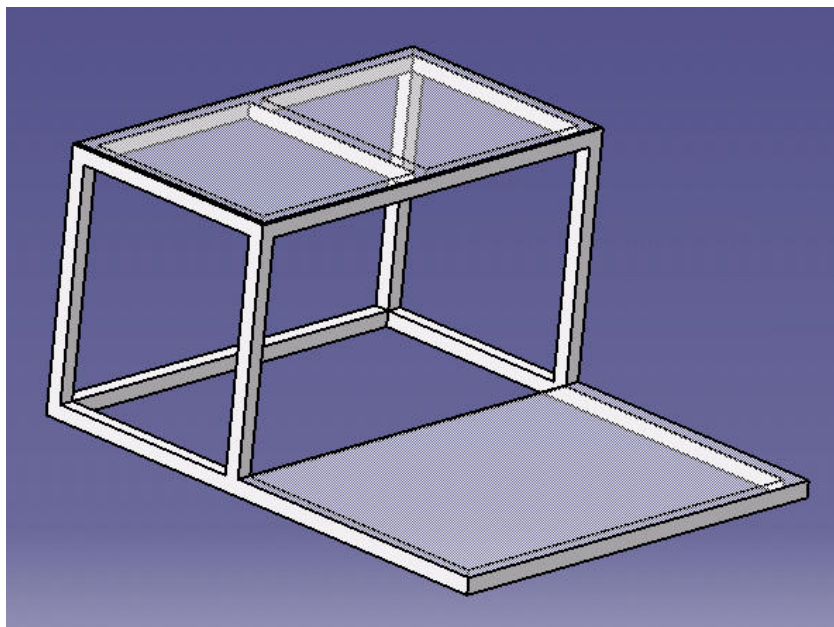
7.3 Konstrukce laboratorního zařízení

Při konstrukci laboratorního zařízení se muselo vycházet z bezpečnostních podmínek provozu. Proto byla nejdříve navržena vzájemná poloha komponentů (Obr. 37), která vlastně vycházela z umístění ovládacího panelu na externím zdroji (Obr.36) a z vyústění vlnovodu z tohoto zdroje.



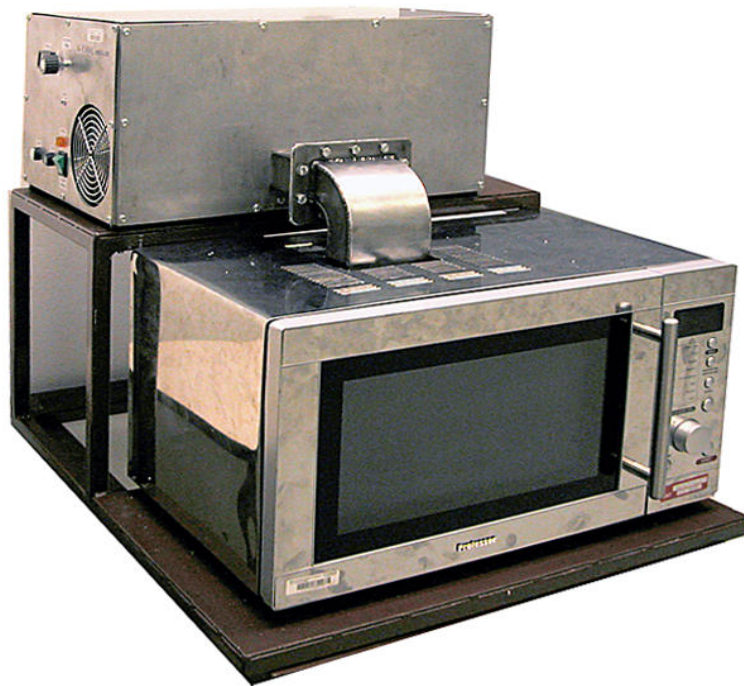
Obr. 37. Návrh tandemového propojení komponentů

Podle této polohy byl navržen stojan (Obr. 38), který by umožnil pozdější propojení mikrovlnné zařízení PROFESSOR MTE – 235BX a přídatného zdroje elektromagnetického záření MWG-LAB od firmy ROMILL.



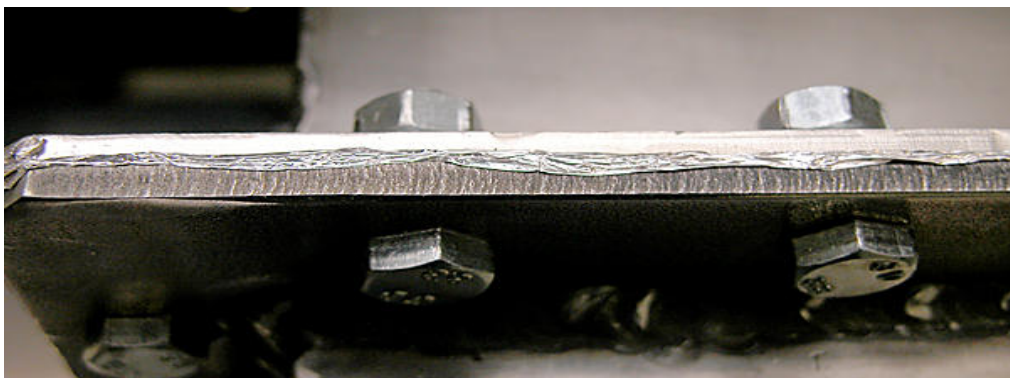
Obr. 38. Stojan

Po realizaci stojanu se obě tyto zařízení zafixovaly ke stojanu šrouby, aby nedošlo k mechanickému poškození vlnovodu vlivem manipulace. Dále byl navržen vlnovod, který by sloužil pro přenos elektromagnetického záření z externího zdroje do mikrovlnné komory základního zařízení. Jde de facto o zapojení dvou magnetronů do tandemu.



Obr. 39. Zapojení zdrojů do tandemu.

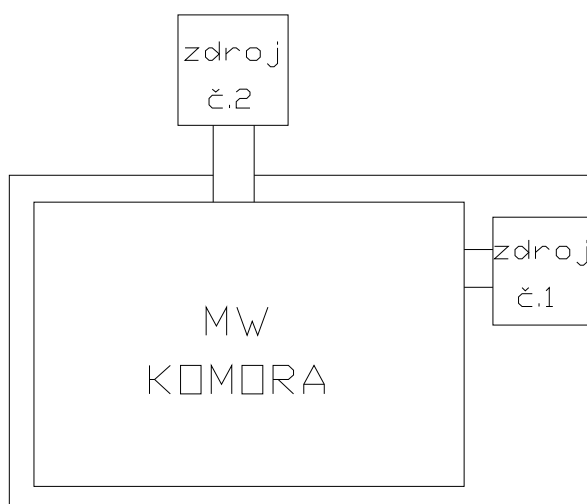
Spojení vlnovodu se utěsnilo AL fólií proti průniku elektromagnetického vlnění (Obr. 40).



Obr. 40. Utěsnění vlnovodu AL folií.

7.4 Ověření funkce tandemového uspořádání MW zdrojů

Po zkompletování všech potřebných komponentů nebylo zřejmé, zda zařízení bude fungovat bez problému, jako je například přílišné přehřívání. Proto se nejprve muselo ověřit zda zařízení je schopno laboratorního provozu a zda je funkční. Proto bylo zařízení odzkoušeno se zátěží, kterou tvořilo 0,7 l vody. Nejprve byla zatěžována voda konvenčním magnetronem mikrovlnného zařízení PROFESSOR MTE – 235BX (dále zdroj č.1), poté magnetronem MWG-LAB vyrobeným firmou ROMILL (dále zdroj č.2) a nakonec oběma zdroji najednou. V průběhu ohřevu se postupně měřilo v předem stanovených intervalech teplota vody.

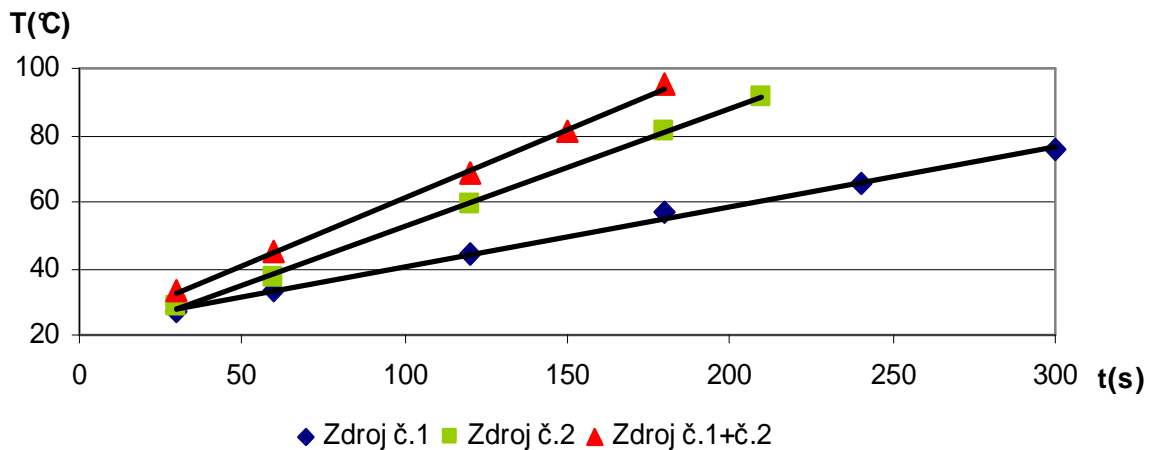


Obr. 41. Schéma zapojení zdrojů elektromagnetického vlnění (magnetronů)

Zatěžování vody probíhalo při výkonu 100% ve všech případech. V komoře byl ponechán původní skleněný talíř, který také absorbuje určité množství energie, čímž se snížila účinnost.

Tab. 7. Zatěžování 0,7 l vody.

$T_o=21^{\circ}\text{C}$	Zdroj č.1	Zdroj č.2	Zdroj č.1+ č.2
t(s)	T($^{\circ}\text{C}$)	T($^{\circ}\text{C}$)	T($^{\circ}\text{C}$)
30	27	28,8	33
60	33	37	45
120	44,5	59	69
150	-	-	81
180	56,5	81	95
210	-	91	-
240	65,5	-	-
300	75,5	-	-



Obr. 42. Srovnání rychlosti ohřevu vody různými zdroji.

Na grafu je patrné, že ohřev má lineární průběh ve všech případech. Experiment byl prováděn při výkonu 100%, do maximálních teplot mezi (75-95) °C. Z naměřených dat vyplývá, že zdroj č.2 je kvalitnější a prokazuje vyšší výkon navzdory stejnému štítkovému výkonu. Při zatěžování oběma zdroji najednou hraje dominantní roli právě zdroj č.2, protože hodnoty se mezi zatěžování oběma zdroji a zdrojem č.2 příliš neliší.

7.4.1 Ověření funkce výpočtem

Experiment byl ověřen výpočtem. Výchozí parametry udávala teplota vody, která byla v průběhu experimentu ohřívána.

Teplo vzniklé při ohřevu vody je dáno vztahem:

$$Q_i = m \cdot c_p \cdot \Delta T_i \quad (J) \quad (28)$$

kde

m je hmotnost ohřívané vody (kg),

c_p měrná tepelná kapacita ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$),

ΔT rozdíl počáteční teploty T_0 (°C) a koncové teploty T_i (°C).

Výsledný výkon je dán vztahem:

$$P_i = \frac{Q_i}{t_i} \quad (W) \quad (29)$$

kde

Q_i je teplo (J),

t_i čas (s).

Z těchto jednotlivých výkonů vytvoříme střední (průměrnou) hodnotu:

$$P_{str} = \frac{\sum P_i}{n} \quad (W) \quad (30)$$

kde n je počet měření.

Jednotlivé hodnoty měření jsou znázorněny v Tab. 8 až Tab. 10.

Tab. 8. Zatěžování vody zdrojem č.1

Zdroj č.1						
T(°C)	To(°C)	ΔT(°C)	t(s)	Q(J)	P(W)	P _{str} (W)
27	21	6	30	17711,4	590,4	570,8
33		12	60	35422,8	590,4	
44,5		23,5	120	69369,7	578,1	
56,5		35,5	180	104792,5	582,2	
65,5		44,5	240	131359,6	547,3	
75,5		54,5	300	160878,6	536,3	

Tab. 9. Zatěžování vody zdrojem č.2

Zdroj č.2						
T(°C)	To(°C)	ΔT(°C)	t(s)	Q(J)	P(W)	P _{str} (W)
28,8	21	7,8	30	23024,8	767,5	891,5
37		16	60	47230,4	787,2	
59		38	120	112172,2	934,8	
81		60	180	177114,0	984,0	
91		70	210	206633,0	984,0	

Tab. 10. Zatěžování vody zdrojem č.1 + zdrojem č.2

Zdroj č.1+č.2						
T(°C)	To(°C)	ΔT(°C)	t(s)	Q(J)	P(W)	P _{str} (W)
33	21	12	30	35422,8	1180,8	1174,5
45		24	60	70845,6	1180,8	
69		48	120	141691,2	1180,8	
81		60	150	177114,0	1180,8	
95		74	190	218440,6	1149,7	

I když štítkové hodnoty výkonu jsou u obou zdrojů stejné (900W), výkony se značně liší. U konvenčního zdroje č.1 je průměrná hodnota výkonu 570,8 W a u zdroje č.2 vyrobený firmou ROMILL je průměrná hodnota výkonu 891,5 W. Zdroj č.1 prokazuje značně nižší

účinnost než zdroj č.2. Při zatěžování vody oběma zdroji najednou, nedochází ke sčítání výkonu. Jestliže by byl součet obou výkonů 100%, pak by provoz obou zdrojů současně vykazoval výkon přibližně 80%. Odlišné hodnoty by mohly být naměřeny se dvěma kvalitními zdroji s vysokou účinností.

Z vypočítaných hodnot výkonu lze stanovit intenzitu elektrického pole. Po vyjádření ze základního vzorce (24) dostaneme vztah:

$$E = \sqrt{\frac{P_{str}}{2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r V}} \quad (V.m^{-1}) \quad (31)$$

kde

P_{str} je výkon absorbovaný materiálem,

f frekvence,

ϵ_0 permitivita vakua, ($8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$),

ϵ_r relativní permitivita,

V objem materiálu.

Tab. 11. Vypočítané hodnoty intenzity elektrického pole pro jednotlivé zdroje

P_{str} (W)	E (kV/m)
570	74,7
891,5	116,9
1174,5	154,0

Hodnoty intenzity elektromagnetického by se měly pohybovat v rozmezích (10-200)kV.m⁻¹, což odpovídá vypočítaným hodnotám. [2]

Podle vztahu (27) lze také vypočítat hodnotu penetrační hloubky pro vodu:

Víme, že

$$\text{tg } \delta = \epsilon'' / \epsilon' \quad (-) \quad (32)$$

Podle Tab. 5 je $\epsilon' = 80$ a $\text{tg } \delta = 1$. Dále podle vztahu (1) lze získat velikost vlnové délky ($\lambda_0 = 122,4 \text{ mm}$).

Pak tedy

$$PD = (\lambda_0/2\pi) \cdot \sqrt{\frac{\epsilon'}{\epsilon''}} \quad (mm) \quad (33)$$

kde

λ_0 je vlnová délka ve vakuu,

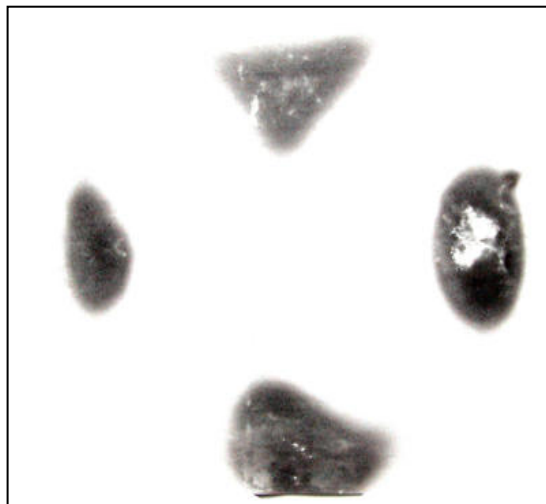
ϵ' reálná část komplexní relativní permitivity,

ϵ'' imaginární část komplexní relativní permitivity.

Po dosazení získáme hodnotu penetrační hloubky $PD = 19,4$ mm.

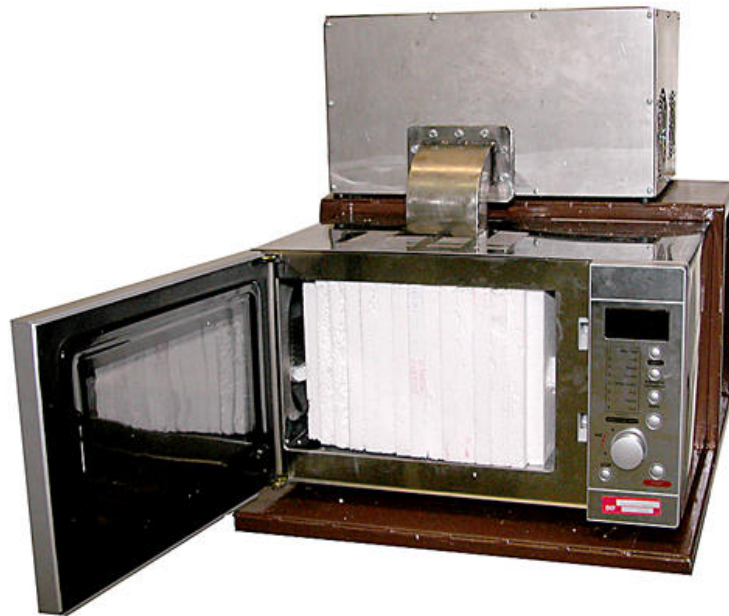
7.5 Rozložení elektromagnetického pole uvnitř MW komory

Jak již bylo zmíněno v kapitole 7.1, zkoumání rozložení elektromagnetického pole uvnitř MW komory je z hlediska vývoje nových MW zařízení pro ohřev důležité. Tato kapitola se zabývá vlivem polohy umístění ústí vlnovodu do MW komory a tvarem samotné komory. Nejprve se muselo stanovit a ověřit, jak je možné tuto problematiku zkoumat. Po konzultaci s odborníky z firmy ROMILL, se dospělo k určitému závěru, testovat rozložení pole pomocí termopapíru (faxového papíru). 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 dříve vypaří nežli se stačí ohřát na teplotu při které by zabarvila papír. Proto se ukázala lepší varianta vkládat papír mezi materiály, které by absorbovaly elektromagnetické vlny, ale jen v zanedbatelné míře a termopapír by působením tepla z tohoto materiálu zčernal (Obr. 43).



Obr. 43. Příklad zčernání termopapíru

Vhodným materiálem se ukázal buďto bakelit nebo běžný pěnový polystyrén (PS). Pro lepší dostupnost se nakonec ukázal vhodnější 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. Celý model měl tedy tvar MW komory aby vyšetřil celý objem komory. Vrstvy se nejdříve kladly vertikálně (Obr. 44), a poté i horizontálně (Obr. 45), aby bylo možno vytvořit alespoň přibližný 3D obraz o stavu elektromagnetického pole.



Obr. 44. Vertikálně kladený model

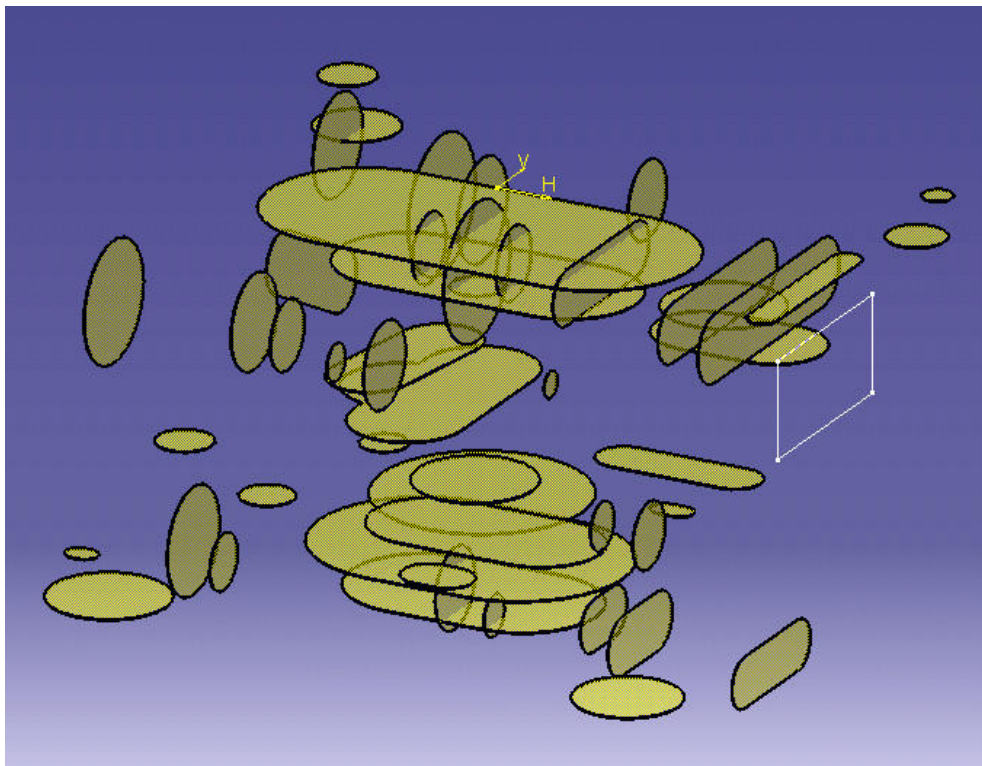


Obr. 45. Horizontálně kladený model

Nejdříve se model vystavil působení elektromagnetického pole z bočního zdroje č.1, poté z horního zdroje č.2, a poté z obou zdrojů najednou. Získané výsledky z těchto testů byly převedeny v programu CATIA do výsledného „3D“ modelu, aby bylo možno sledovat oblasti se zvýšenou intenzitou elektromagnetického vlnění („piky“) ze všech úhlů pohledu. Každé měření se provádělo pětkrát. Téměř ve všech opakovaných případech, byly výsledky naprosto identické.

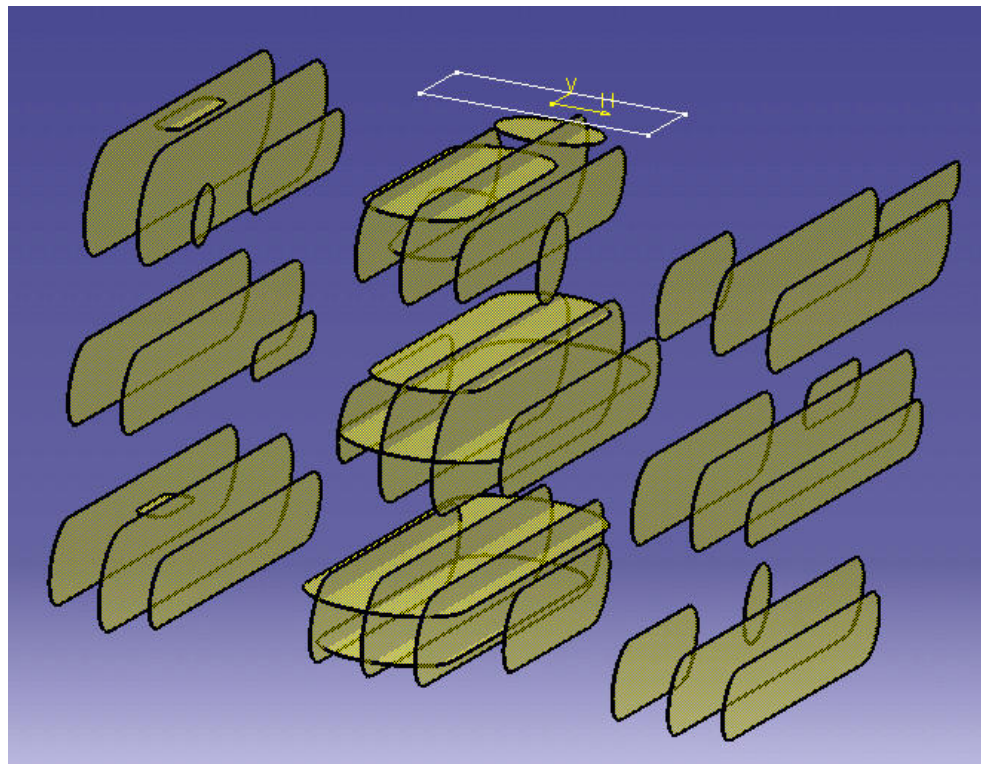
Žluté skvrny na následujících obrázcích představují zaznamenanou zvýšenou intenzitu elektromagnetické pole. Bílý rámeček znázorňuje buďto boční zdroj č.1 nebo horní zdroj č.2. Obraz je vždy natočen tak aby přední strana představovala vstupní otvor do MW komory.

Měření č.1:



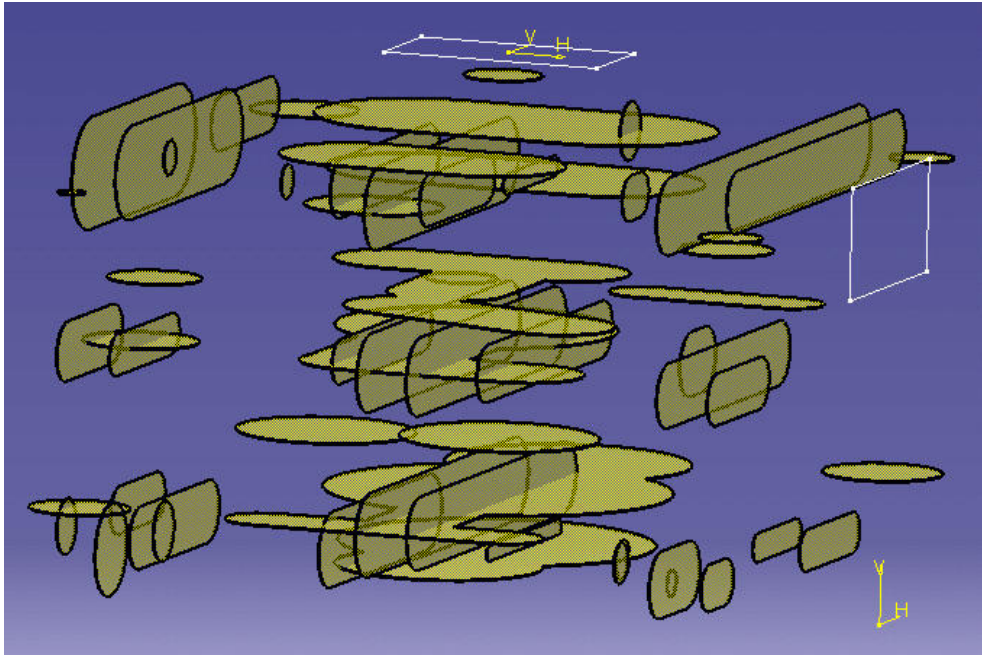
Obr. 46. Původní tvar komory-aktivní boční zdroj č.1

Při prvním pokusu, bylo testováno rozložení elektromagnetického pole původního tvaru komory bez jakýchkoliv změn při aktivním zdroji č.1. V tomto případě je patrné, že zvýšená intenzita elektromagnetické pole je ihned za ústím vlnovodu a dále převažuje střed komory a horní část komory. Ve zbytku komory je elektromagnetické pole poměrně rozptýleno a netvoří podstatné shluky intenzit.

Měření č.2:

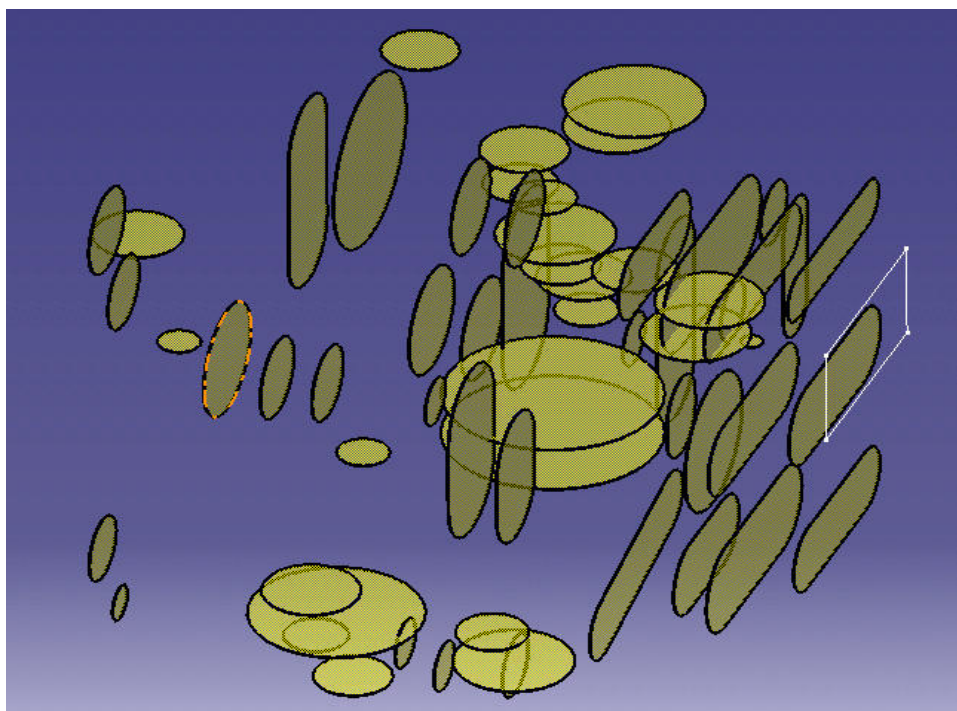
Obr. 47. Původní tvar komory – aktivní horní zdroj č.2

Při stejném tvaru komory jako u případu 1, ale při působení zdroje č.2 (shora), je rozložení elektromagnetické pole pravidelnější. Tvoří viditelné shluky intenzity a to v devíti místech komory. Nejsilnější intenzity jsou uprostřed komory, přímo za ústím vlnovodu a u dna komory. Podle tohoto případu je zřejmé že poloha shora je pravděpodobně výhodnější pro objemné předměty, které nejsou situovány pouze u dna komory.

Měření č.3:

Obr. 48. Původní tvar komory –aktivní zdroj č.1 + zdroj č.2

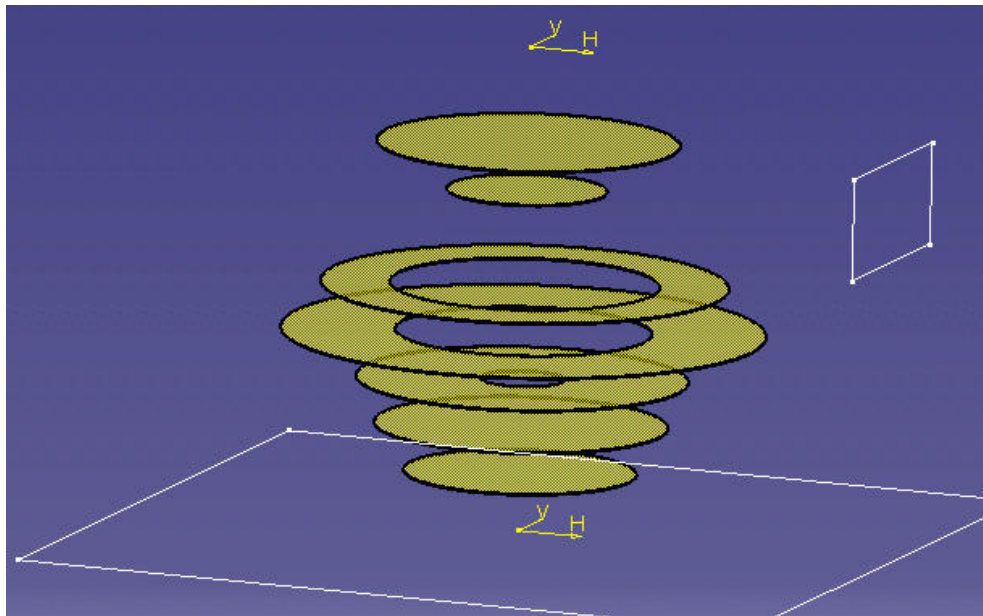
U třetího případu jsme nechali působit zdroj č.1 společně se zdrojem č.2. Došlo de facto k sečtení intenzit. Převažující v tomto případě byl zdroj č.2. Zvýšené intenzity elektromagnetické pole se vytvářeli kolem vertikální osy komory.

Měření č. 4:

Obr. 49. Komora s plechovými odrazení v rohu – aktivní boční zdroj č.1

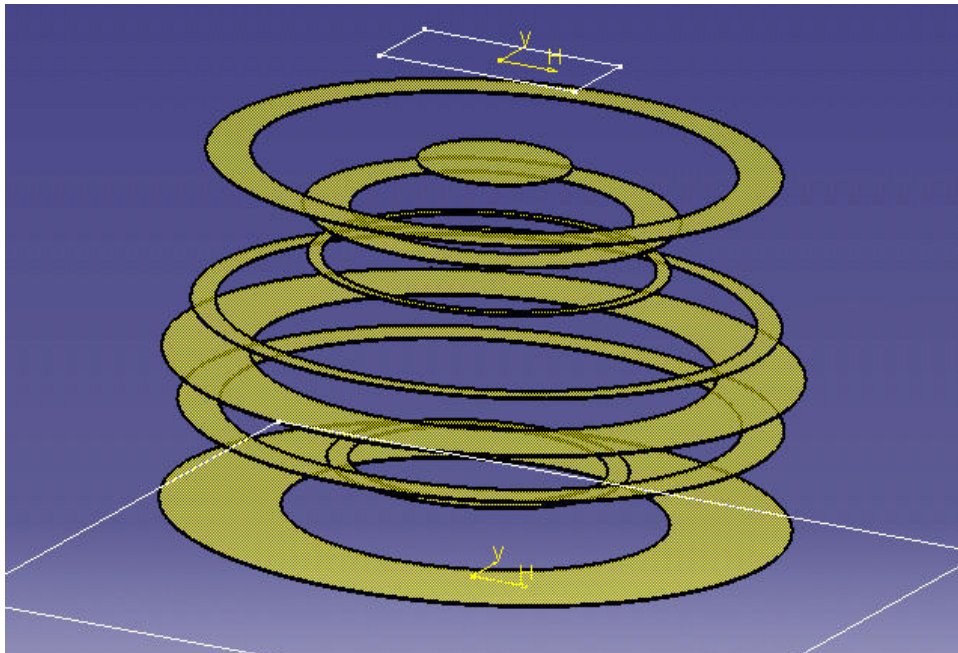
V další části jsme přidali do rohů komory plechové odražeče, které změnilly půdorys komory z obdélníku na šestiúhelník s různě dlouhými stranami. Nechali jsme nejprve působit zdroj č.1 (zboku). Zvýšená intenzita elektromagnetické pole byla pozorována opět ihned za ústím vlnovodu, na zadní stěně komory a u dna komory. Celkově elektromagnetické pole bylo rozloženo spíše u stěn komory nežli uprostřed. Při tomto pokusu bohužel nebylo možné zajistit bezpečnost provozu, protože přítomností odražečů vznikalo jiskření, které bylo způsobeno zřejmě nekvalitním materiálem a opracováním rožků. Proto nebylo možno dále provést pokus při působení zdroje č.2.

Měření č.5:



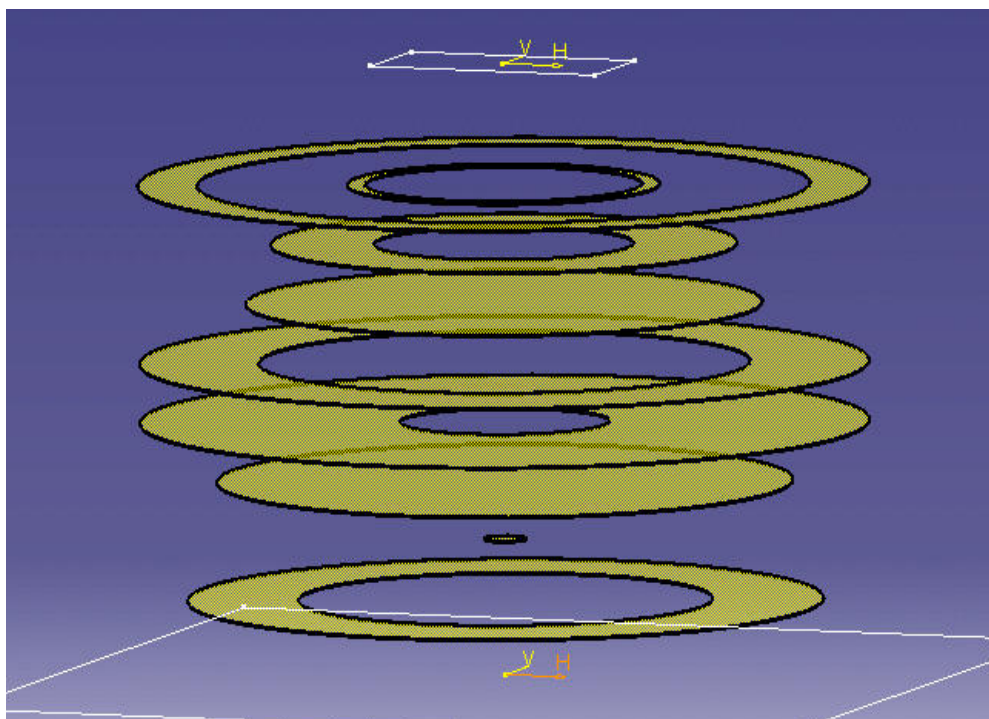
Obr. 50. Původní tvar komory, s rotací modelu – aktivní boční zdroj č.1

U tohoto případu jsme opět nechali komoru v původním tvaru, ovšem kruhový model jsme nechali rotovat. Tento experiment ukázal, že při rotaci materiálu se vytvoří lokality s vyšší intenzitou ve tvaru kruhu. Zde je již zřejmé, že při ohřevu materiálu a současné rotaci by se minimalizovala lokální přehřátí materiálu. Spodní bílý rámeček znázorňuje půdorysný tvar MW komory.

Měření č.6:

Obr. 51. Původní tvar komory s rotací modelu – aktivní horní zdroj č.2

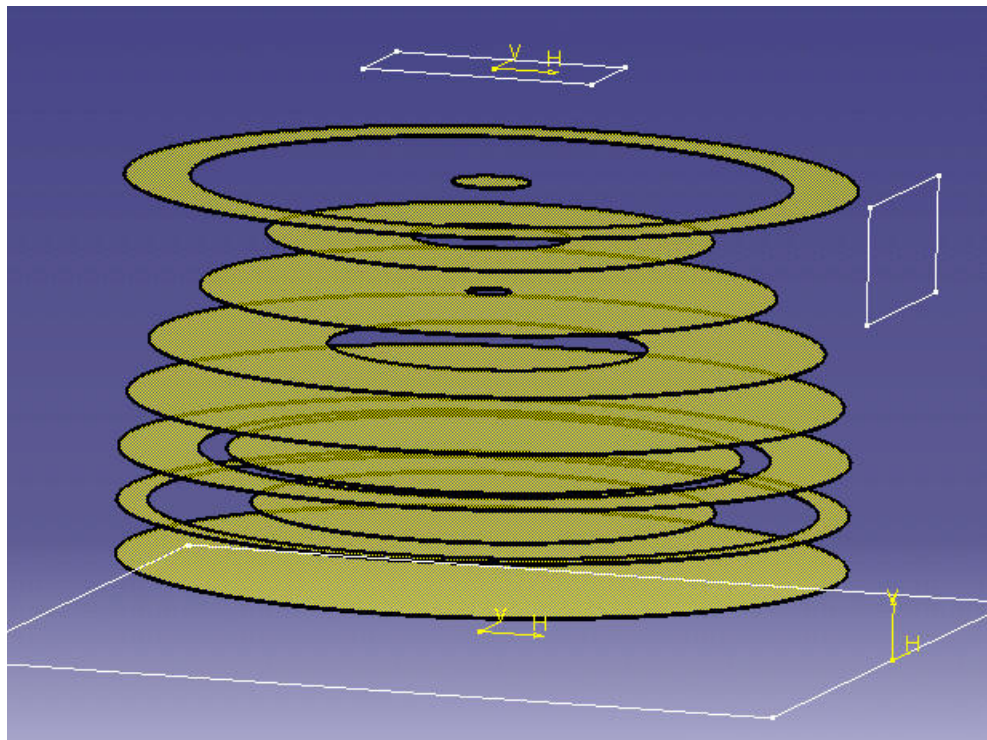
Při rotaci modelu a aktivním horním zdroji, docházelo také ke kruhovým lokalitám. Místa s vyšší intenzitou elektromagnetické pole byla ovšem dále od středu než tomu bylo při aktivním bočním zdroji.

Měření č.7:

Obr. 52. Původní tvar komory s rotací zatíženého modelu – aktivní horní zdroj č.2

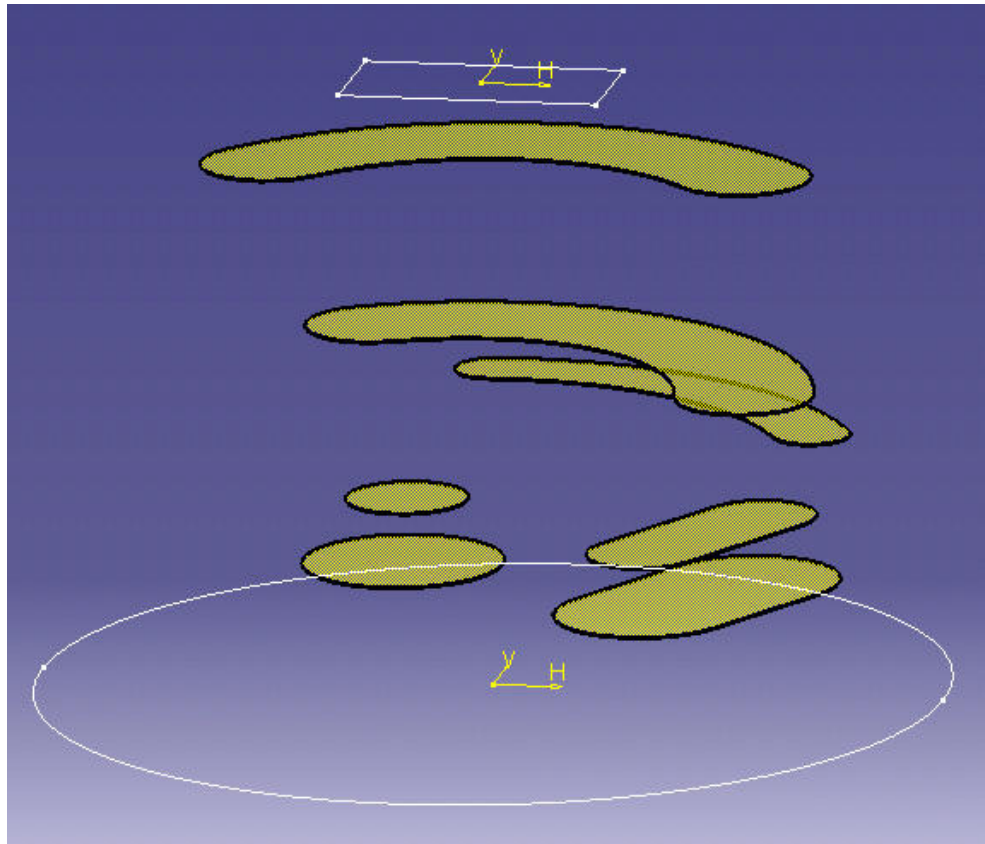
Tento případ je vlastně opakování pokusu č.6 pouze s tím rozdílem, že model byl zatížen keramickou dlaždicí o váze 330g. Skvrny na termopapíře byly znatelnější a čas potřebný pro zmapování elektromagnetické pole se tím zkrátil. Vliv zátěže na zmapování rozložení elektromagnetického pole byl minimální.

Měření č.8:



Obr. 53. Původní tvar komory s rotací zatíženého modelu – aktivní zdroj č.1 a zdroj č.2

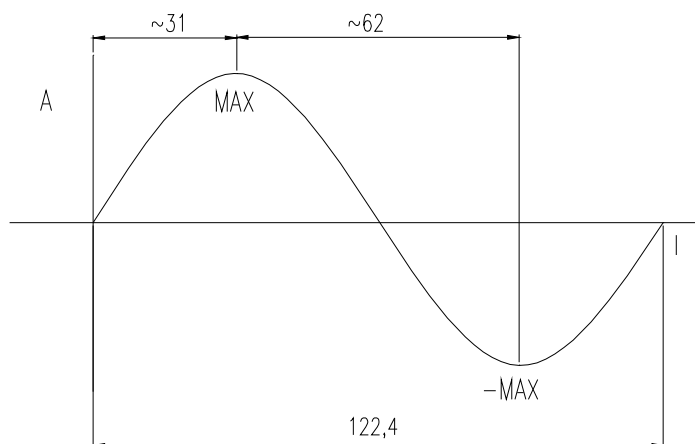
Poslední rotační případ byl proveden při zatěžování oběma zdroji najednou. Rozložení elektromagnetické pole je v tomto případě nejrovnoměrnější. Pouze v horní části komory je uprostřed místo s nulovou intenzitou elektromagnetické pole.

Měření č.9:

Obr. 54. Simulace kruhového tvaru komory – aktivní horní zdroj č.2

V dalším případě jsme do komory vložili rotační plechovou trubku, která měla za úkol simulovat komoru kruhovým půdorysem. Zatěžování mohlo probíhat pouze z horního zdroje, protože boční zdroj byl zakrytý právě touto trubkou. Zvýšené intenzity byly zaznamenány v zadní části rotační komory mezi středem a stěnou trubky. Opět tyto kumulace nastaly vertikálně ve třech místech, jako tomu bylo ve všech případech zatěžování horním zdrojem č.2. Mezi těmito místy jsou prostory s nulovou intenzitou.

Místa s vyšší intenzitou elektromagnetického pole, lze také teoreticky zjistit výpočtem. Podle výchozího vztahu (1) zjistíme, že vlnová délka je 122,4 mm. Z toho vyplývá že maximum vlny je v $\frac{1}{4}$ délky (Obr. 55), což je 30,6mm. Proto maximum s nejvyšší intenzitou, by se mělo nacházet ve vzdálenosti přibližně 31mm od stěny komory a dále se vyskytovat v intervalech po 62mm.



Obr. 55. Znárodnění maxim podle délky vlny.

Podle naměřených výsledků se tato skutečnost neprojevila ve znatelné míře, avšak náznaky v některých případech byly zaznamenány. Nejvíce tomu tak bylo v měření č.2. Vzdálenosti maximálních intenzit nemohly být dodrženy, protože vlnové délce neodpovídají rozměry MW komory. Mikrovlnná komora nemá rozměry násobku vlnové délky z toho důvodu, aby v ní bylo dosaženo co nejvýhodnější rozložení elektromagnetických vln.

8 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

Cíl experimentu – plnění:

Bylo navrženo a zkonstruováno propojení dvou zdrojů (magnetronů).

Ověřila se funkce laboratorního zařízení.

Stanovilo se a ověřilo, jakým způsobem zkoumat homogenitu elektromagnetického pole.

Nejpříjemnější a funkční způsob se ukázal pomocí termopapíru, vložený mezi PS desky.

Stanovil se vliv vstupu vlnovodu do MW komory. Horní vstup se ukázal jako přijatelnější pro celkovou homogenitu v celé MW komoře.

Při změně tvaru MW komory nedocházelo k výrazným změnám v homogenitě elektromagnetického pole. Kruhová komora neprokázala ani pozitivní ani negativní vliv.

Největší a nejpozitivnější vliv na homogenitu elektromagnetického pole prokázal rotační pohyb materiálu.

I když rotační pohyb prokazuje nejlepší homogenitu, uprostřed komory je intenzita elektromagnetického pole slabá. Proto navrhuji jako další postup umístit do MW komory kovové míchadlo s rotujícími lopatkami, s možností regulace otáček a vyšetřit vliv otáček míchadla na homogenitu elektromagnetického pole uvnitř MW komory.

Jako další vhodný prvek pro homogenitu pole se jeví pohyb materiálu uvnitř MW komory v osách x a y . Nevýhodou tohoto řešení zřejmě bude větší potřeba půdorysné plochy MW komory.

Při podrobném zkoumání rozložení elektromagnetického pole v MW komoře se ukázalo, že zvýšené intenzity se vyskytují převážně u kovových stěn (tj. na zadních a bočních stěnách), avšak nikoliv v přední části u dveřního skla s kovovou mřížkou. Toto sklo zřejmě absorbuje určité množství elektromagnetického vlnění (elektromagnetických vln). Proto pro další postup navrhuji umístit před tyto dveře plechový odražeč.

ZÁVĚR

Cílem DP bylo vypracování literární studie na téma vývoj a konstrukce modelového zařízení mikrovlnné jednotky. Popsán byl zejména DE ohřev a jeho úskalí. Tato literární studie byla aplikována v experimentální části.

V experimentu bylo navrženo a zkonstruováno adaptační modelové MW zařízení s propojením dvou zdrojů do jedné MW komory. Tyto dva zdroje byly také porovnány. Dále byla ověřena funkce tohoto zařízení. Bylo vyšetřeno elektromagnetické pole uvnitř MW komory a vliv tvaru komory na rozložení elektromagnetického pole. Ukázalo se že nejlepší homogenita elektromagnetického pole byla zjištěna právě při rotaci modelu.

Ještě lepších výsledků by se dalo dosáhnout posuvem ohřívaného materiálu v MW komoře buď to v ose x , nebo v ose y , nebo v obou osách současně při stálém rotačním pohybu materiálu. Zaručila by se tak homogenita i v místech, které nedokáže pokrýt rotační pohyb. Další neméně podstatným prvkem by bylo umístění rotačního kovového míchadla do MW komory (ihned za ústí vlnovodu) a vyšetření vlivu otáček míchadla na homogenitu a rozložení MW pole uvnitř MW komory. Pro toto zařízení, jak už pro posun v osách x , y , nebo pro rotační míchadlo, by se muselo upravit již stávající modelové zařízení tak, aby splňovalo všechny bezpečnostní podmínky.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HAŇKA, L.: *Teorie elektromagnetického pole*, SNTL Praha, 1975
- [2] *Romill-Krmivářské stroje : Průmyslový mikrovlnný ohřev* [online]. 2000 [cit. 2005-11-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.romill.cz>>.
- [3] Bc. CEJPKOVÁ, Libuše: *Vliv MW ohřevu gumárenské směsi na fyzikální a chemické vlastnosti vulkanizátu*
- [4] *Stránky časopisu ELEKTRO: Elektrický ohřev mikrovlnný* [online]. 2005 [cit. 2005-11-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.automa.cz/elektro/2005/>>
- [5] *Maser-service: Mikrovlny podrobněji* [online]. 2005 [cit. 2005-11-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.maser-service.cz/mv-podrobneji.htm>>
- [6] *Magnetrony: Magnetrony* [online]. 2002 [cit. 2005-11-20]. Dostupný z WWW: <<http://lucy.troja.mff.cuni.cz/>>
- [7] *Prečo je v mikrovlnke teplo: Doc. RNDr. František Kundracik, CSc* [online]. 2005 [cit. 2005-11-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.uniba.sk/>>
- [8] *Multimediální učebnice: Mikrovlnná technika* [online]. 2005 [cit. 2005-11-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.urel.feec.vutbr.cz/>>
- [9] *Elektronová mikroskopie pro biology: Mikrovlny v přípravě preparátů pro TEM* [online]. 2005 [cit. 2005-11-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/5.2.html>>
- [10] MEISSNER,B, ZILVARV: Fyzika polymerů
- [11] *Microwave chemistry: Microwave heating mechanism* [online]. 2005 [cit. 2006-4-5]. Dostupný z WWW: <<http://www.tan-delta.com/ch1a.html>>
- [12] 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.
- [12] DVOŘÁK, Zdeněk; SVOBODA, Ivan. *Fenomén energie a jejich podíl na výrobě gumárenských výrobků*. Přednášky
- [13] Firemní literatura

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

<i>Symbol</i>	<i>Jednotky</i>	<i>Název</i>
f	Hz	Vlnová frekvence
λ	m	Vlnová délka
c	m.s^{-1}	Rychlost světla
B	T	Intenzita magnetické indukce
E_r	V.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	1	Relativní permitivita
ϵ_0	1	Permitivita vakua
ϵ'	1	Reálná část relativní permitivity
ϵ''	1	Komplexní část relativní permitivity
$\text{tg } \delta$	1	Ztrátový činitel
PD	m	Penetrační hloubka
C	F	Kapacita
S	m^2	Plocha desky kondenzátoru
d	m	Vzdálenost desek kondenzátoru
G	$1/\rho$	Vodivost
R	Ω	Odpor
ρ	$\Omega.\text{m}$	Měrný odpor
γ, σ	S.m^{-1}	Měrná vodivost
t		

T	s	Čas
Q	°C	Teplota
m	J	Měrné teplo
c_p	kg	Hmotnost
P	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Měrná tepelné kapacita
MW	W	Výkon
	-	Mikrovlnný
DE	-	Dielektrický

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Dielektrický ohřev</i>	12
<i>Obr. 2. Používaná frekvence (2450MHz).....</i>	13
<i>Obr. 3. Působení elektromagnetického vlnění na různé druhy materiálů).....</i>	14
<i>Obr. 4. Srovnání DE ohřevu a konvečního ohřevu</i>	18
<i>Obr. 5. Závislost teploty na výkonu při rozmrazování DE technologií (10 s)</i>	23
<i>Obr. 6. Vlnovody</i>	25
<i>Obr. 7. Uspořádání katody a anody magnetronu</i>	26
<i>Obr. 8. Magnetron Philips</i>	26
<i>Obr. 9. Válcová dioda v homogenním magnetickém poli</i>	27
<i>Obr. 10. Schéma trajektorie částice ve zkřížených homogenních polích.....</i>	27
<i>Obr. 11. Kritická parabola</i>	28
<i>Obr. 12. Řez magnetronem</i>	28
<i>Obr. 13. Struktura pole v magnetronové dutině při vybuzení π vidu.....</i>	30
<i>Obr. 14. Magnetronové dutiny.....</i>	30
<i>Obr. 15. Rovinný magnetron.....</i>	31
<i>Obr. 16. Jedna z prvních mikrovlnných trub</i>	33
<i>Obr. 17. Schéma mikrovlnného zařízení.....</i>	34
<i>Obr. 18. Blokové schéma mikrovlnného zařízení.....</i>	35
<i>Obr. 19. Příklad mikrovlnné trouby pro domácí použití.</i>	36
<i>Obr. 20. Průmyslové sušicí zařízení</i>	37
<i>Obr. 21. Mikrovlnná pásová sušička délky 20 m s celkovým výkonem 55 kW.....</i>	38
<i>Obr. 22. Mikrovlnná rotační trubková pec</i>	38
<i>Obr. 23. Vlevo velká stacionární sušička 21 m³/30 kW, vpravo mobilní zkušební komorová sušička 4 m³/14 kW.....</i>	38
<i>Obr. 24. Dvoukomorová sintrovací pec</i>	39
<i>Obr. 25. Mikrovlnná průchozí komora</i>	39
<i>Obr. 26 Schéma mikrovlnné linky pro vulkanizaci gumových profilů</i>	40
<i>Obr. 27. Deskový kondenzátor s vloženým dielektrikem.....</i>	42
<i>Obr. 28. Náhradní schéma kondenzátoru se ztrátovým dielektrikem</i>	42
<i>Obr. 29. Fázový diagram dielektrických ztrát</i>	42

Obr. 30. Závislost reálné (ϵ') a komplexní (ϵ'') části relativní permitivity na frekvenci.	47
Obr. 31. Závislost složky reálné a komplexní permitivity ϵ' a ϵ'' vody při teplotě 25°C na frekvenci	48
Obr. 32. Závislost teploty na výkonu při ohřevu mikrovlnnou technologií	49
Obr. 33. Princip DE ohřevu.....	53
Obr. 34. Mikrovlnné zařízení Profesor MTE – 235BX	55
Obr. 35. Externí zdroj elektromagnetického vlnění od firmy ROMILL	55
Obr. 36. Ovládací panel zdroje ROMILL	56
Obr. 37. Návrh tandemového propojení komponentů.....	57
Obr. 38. Stojan.....	57
Obr. 39. Zapojení zdrojů do tandemu.	58
Obr. 40. Utěsnění vlnovodu AL folií.	58
Obr. 41. Schéma zapojení zdrojů elektromagnetického vlnění (magnetronů).....	59
Obr. 42. Srovnání rychlosti ohřevu vody různými zdroji.....	60
Obr. 43. Příklad zčernání termopapíru	63
Obr. 44. Vertikálně kladený model	64
Obr. 45. Horizontálně kladený model.....	64
Obr. 46. Původní tvar komory-aktivní boční zdroj č.1	65
Obr. 47. Původní tvar komory – aktivní horní zdroj č.2.....	66
Obr. 48. Původní tvar komory –aktivní zdroj č.1 + zdroj č.2.....	67
Obr. 49. Komora s plechovými odrazení v rohu – aktivní boční zdroj č.1	67
Obr. 50. Původní tvar komory, s rotací modelu – aktivní boční zdroj č.1.....	68
Obr. 51. Původní tvar komory s rotací modelu – aktivní horní zdroj č.2.....	69
Obr. 52. Původní tvar komory s rotací zatíženého modelu – aktivní horní zdroj č.2	69
Obr. 53. Původní tvar komory s rotací zatíženého modelu–aktivní zdroj č.1 a zdroj č.2....	70
Obr. 54. Simulace kruhového tvaru komory – aktivní horní zdroj č.2.....	71
Obr. 55. Znázornění maxim podle délky vlny.	72

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Penetrační hloubka mikrovln v různých materiálech	15
Tab. 2. Dielektrické vlastnosti některých materiálů při frekvenci 2,45GHz	16
Tab. 3. Závislost teploty na výkonu při rozmrazování DE technologií (10 s).....	23
Tab. 4. Potřebné hodnoty intenzity elektrického pole pro různé hodnoty ztrátového činitele a různé frekvence	45
Tab. 5. Relativní permitivity a činitele ztrát některých materiálů.....	46
Tab. 6. Závislost teploty na výkonu při ohřevu mikrovlnnou technologií (30 s).....	49
Tab. 7. Zatěžování 0,7 l vody.....	59
Tab. 8. Zatěžování vody zdrojem č.1	61
Tab. 9. Zatěžování vody zdrojem č.2.....	61
Tab. 10. Zatěžování vody zdrojem č.1 + zdrojem č.2.....	61
Tab. 11. Vypočítané hodnoty intenzity elektrického pole pro jednotlivé zdroje	62