

Laboratorní zařízení pro dielektrický ohřev kaučuku

Bc. Martin Křůmal

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 VÝKONU)

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

Téma práce: **Laboratorní zařízení pro dielektrický ohřev kaučuku**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracujte literární studii na dané téma**
 - a) Teoretické základy dielektrického a mikrovlnného tepla**
 - b) Funkční části a principy zařízení**
 - c) Využití dielektrického ohřevu**
- 2. Zpracujte projekt zařízení pro dielektrický ohřev kaučuku**
 - a) projekt zařízení (návrh linky)**
 - b) energetické nároky**
- 3. Zpracujte konstrukční řešení MW komory**
- 4. Závěr technické a ekonomické vyhodnocení projektu**

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

dle zadání vedoucího DP

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 12. února 2009



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
vedoucí katedry

ABSTRAKT

Cílem práce bylo navrhnout zařízení pro kontinuální ohřev mikrovlnnou technologií. Toto zařízení bude sloužit pro experimentální ohřev kaučuku a jeho směsí. Zároveň bude modelovým zařízením pro případný návrh linky. K návrhu bude využito FEM simulací.

Klíčová slova:

dielektrický ohřev, dielektrické teplo, mikrovlnná zařízení, pásový dopravník.

ABSTRACT

Abstrakt ve světovém jazyce

My dissertation target is to propose some arrangement for continual heating by microwave technology. This arrangement should works as an experimental heater of rubber and its mixture. Further it is model arrangement for potential propose of extension-line. This proposal is exploiting FEM simulation.

Keywords:

dielectric heating, dielectric heat, microwave equipment, belt conveyer.

Touto cestou bych rád poděkoval Ing. Zdeňku Dvořákovi CSc., vedoucímu diplomové práce, za odborné vedení práce, poskytnuté zkušeností, rady a čas, který mi věnoval při vypracování diplomové práce.

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 20. května 2009

.....

Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 TEORETICKÉ ZÁKLADY ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE	10
1.1 ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ	10
1.2 VZNIK ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN	11
1.3 ZÁKLADNÍ ROVNICE ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE.....	12
1.4 VID VLNY	14
1.5 VLNY TEM, TE, TM.....	14
1.6 MIKROVLNNÁ VEDENÍ A VLNOVODY	14
2 MIKROVLNNÝ (DIELEKTRICKÝ) OHŘEV	16
2.1 PRINCIP DIELEKTRICKÉHO OHŘEVU	16
2.2 DIELEKTRICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ.....	17
2.3 ZÁKLADNÍ VÝPOČTY VÁZANÉ K DIELEKTRICKÉMU OHŘEVU	20
2.4 ELEKTRICKÁ PEVNOST	23
2.5 PENETRAČNÍ HLOUBKA	24
2.6 CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI DE OHŘEVU	24
2.6.1 Hlavní výhody MW ohřevu	25
2.6.2 Vliv DE ohřevu na kvalitu ohřívaného materiálu	25
3 VYUŽITÍ MW OHŘEVU V PRŮMYSLOVÝCH APLIKACÍCH	27
3.1 VYUŽITÍ MW V PLASTIKÁŘSKÉM PRŮMYSLU	27
3.1.1 Sušení plastů:	27
3.1.2 Spojování plastů:	27
3.1.3 Tvarování desek	28
3.1.4 Smršťování plastových polotovarů	28
3.1.5 Recyklace plastů a odpadů	28
3.2 VYUŽITÍ MW V GUMÁRENSKÉM PRŮMYSLU.....	28
3.2.1 Dielektrický ohřev.....	28
3.2.2 Kontinuální vulkanizace.....	29
3.2.3 Vulkanizace kombinací mikrovlnného a infračerveného ohřevu.....	29
3.2.4 Mikrovlnná regenerace odpadové pryže	29
3.3 VYUŽITÍ MW V OSTATNÍCH ODVĚTVÍCH.....	30
3.3.1 Potravinářský průmysl	30
3.3.2 Zpracování dřeva, papíru, textilu a přízí	30
4 KONSTRUKCE MIKROVLNNÝCH ZAŘÍZENÍ	31
4.1 ZÁKLADNÍ ČÁSTI ZAŘÍZENÍ PRO MIKROVLNNÝ OHŘEV	31
4.1.1 Zdroje elektromagnetického pole.....	31
4.1.1.1 Cyklotron	32
4.1.1.2 Magnetron.....	33
4.1.1.3 Klystron	36

4.1.2	Obdélníkový vlnovod.....	36
4.1.2.1	Základní matematický popis obdélníkového vlnovodu.....	36
4.1.2.2	Mezní frekvence obdélníkovém vlnovodu.....	39
4.1.2.3	Typizovaná řada obdélníkových vlnovodů.....	41
4.1.2.4	Spojování vlnovodů.....	42
4.2	ZAŘÍZENÍ PRO MIKROVLNNÝ OHŘEV.....	42
4.2.1	Diskontinuální komory.....	43
4.2.2	Kontinuální komory (linky).....	44
4.3	MODELOVÁNÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE POMOCÍ FEM.....	45
4.4	BIOLOGICKÉ ÚČINKY MIKROVLNNÉ ENERGIE A HYGIENICKÉ NORMY.....	46
4.4.1	Biologické účinky.....	46
5	SHRnutí TEORETICKÉ ČÁSTI.....	50
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	51
6	CÍL PRÁCE.....	52
7	KONCEPCE ZAŘÍZENÍ.....	53
8	POHLED NA NAVRŽENÉ ZAŘÍZENÍ.....	55
9	NÁVRH A DIMENZOvání JEDNOTLIVÝCH PRVKŮ ZAŘÍZENÍ.....	56
9.1	FEM PODPORA PŘI NÁVRHU KOMORY.....	56
9.2	NOSNÝ RÁM - STŮL.....	58
9.3	MAGNETRON.....	58
9.3.1	Energetická bilance.....	59
9.3.2	Odhadovaný výkon zařízení.....	61
9.4	VLNOVOD.....	61
9.5	KOMORA.....	61
9.5.1	FEM model navržené komory.....	62
9.5.2	Variabilita.....	65
9.5.3	Přístup pro vizuální pozorování.....	66
9.5.4	Odstínění průběžných stran.....	66
9.6	PÁSOVÝ DOPRAVNÍK.....	67
9.6.1	Pohon dopravníku.....	68
9.6.2	Elektronika krokového motoru.....	70
9.6.3	Programování řídicí jednotky.....	71
9.6.4	Volba materiálu dopravního pásu.....	73
9.7	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ ŘEŠENÉHO PROJEKTU.....	73
	ZÁVĚR.....	75
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	76
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	78
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	80
	SEZNAM TABULEK.....	82
	SEZNAM PŘÍLOH.....	83

ÚVOD

Objev elektromagnetického záření, v jehož spektru jsou mikrovlny, učinil James Clerk Maxwell v roce 1886 svými známými rovnicemi. V roce 1946 Dr. Percy Lebaron Spencer zjistil při výzkumu radaru něco velmi neobvyklého. Při testování nové vakuové trouby zvané magnetron objevil, že čokoláda se v jeho kapse se roztekla.

Od této události prošla mikrovlnná zařízení řadou úprav a rozšířila se do tisíců domácností. V průběhu let také vzrostlo jejich využití v průmyslu. Cílem práce bylo navrhnout laboratorní zařízení pro kontinuální ohřev mikrovlnným zářením. Toto zařízení bude následně sloužit pro experimentální činnost v oblasti dielektrického ohřevu. Po vyhodnocení naměřených dat může sloužit jako modelové zařízení pro návrh zařízení s uplatněním v gumárenském průmyslu. Dielektrický ohřev nabízí nesporné výhody oproti ohřevu proudem či sáláním, neboť k ohřevu může docházet v celém objemu materiálu, nezávisle na koeficientu tepelné vodivosti. Polymerní materiály jsou špatné tepelné vodiče, proto je výhodné aplikovat tuto technologii právě na tyto materiály a využít plně výhod, které mikrovlnný ohřev nabízí. Nasazení mikrovlnného ohřevu může vést v nejrůznějších odvětvích k výraznému zvýšení jakosti výroby, energetickým úsporám a zrychlení procesu ohřevu, což vede ke snížení skladových ploch a ekonomickým úsporám.

V praxi je někdy obtížné prosadit přechod na tuto technologii, neboť i přesto že mikrovlnná trouba v domácnosti je již dávno zažitým standardem, stále kolují mezi veřejností nepřesné informace vedoucí k závěrům, že ohřívání produktů je vlivem mikrovlnného záření modifikováno, což vede k jeho znehodnocení. Ano, mikrovlnné záření má vliv na živou buněčnou strukturu, proto také existují hygienické normy upravující jeho přípustné limity. Nedochází však k žádným nevyzpytatelným chemickým změnám ohřívání produktu, jako například u ozařování gama zářením. Není třeba obávat se neznámého, raději se informujme a využívejme objasněné. Lebaron Spencer se dožil i přes jeho experimenty věku 74 let.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TEORETICKÉ ZÁKLADY ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE

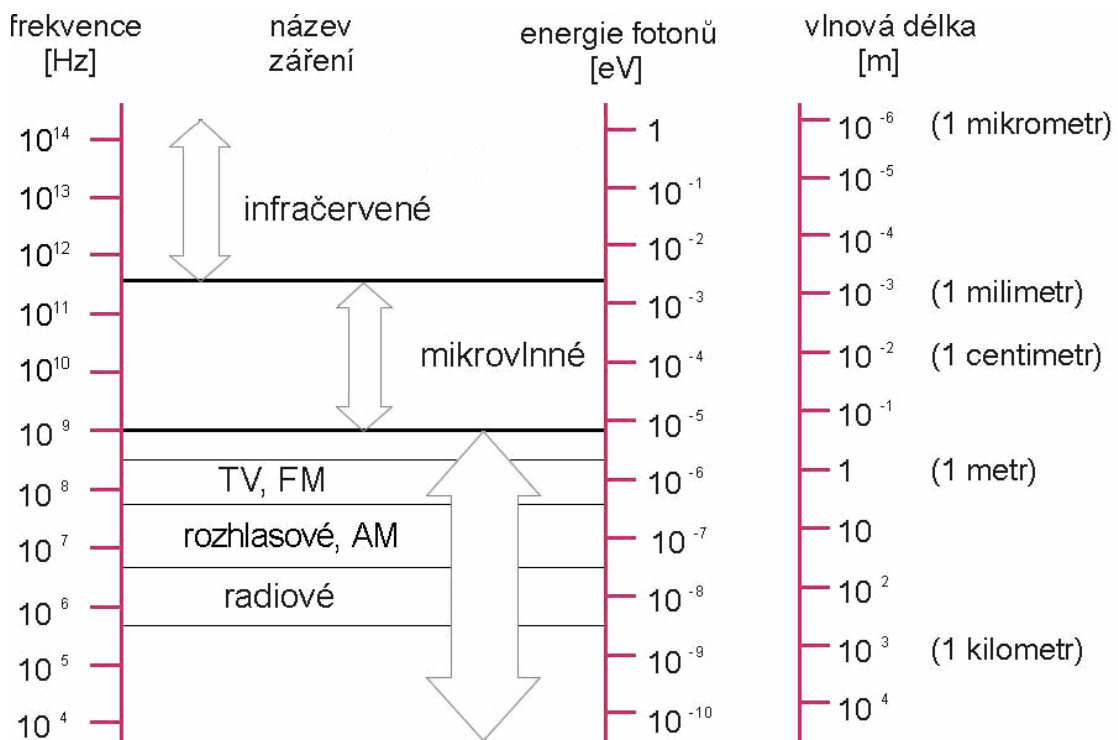
Mikrovlnná technika patří mezi poměrně mladé technické obory, které využívají zákonitostí elektromagnetického pole. V důsledku nových zajímavých aplikací mikrovln ve spojové technice, průmyslu, medicíně a v dalších oblastech se tato problematika v současné době velmi dynamicky rozvíjí.[2]

Při studiu elektromagnetických polí většinou začínáme u šíření vln v neomezeném homogenním prostředí, u něhož se předpokládá linearita a izotropnost. Za této situace se totiž prostředím šíří jediná vlna, která může být nejvýše tlumena v případě ztrátovosti tohoto prostředí.[1]

Podívejme se tedy na základní rozčlenění a fyzikálně matematické vnímání elektromagnetického vlnění.

1.1 Elektromagnetické vlnění

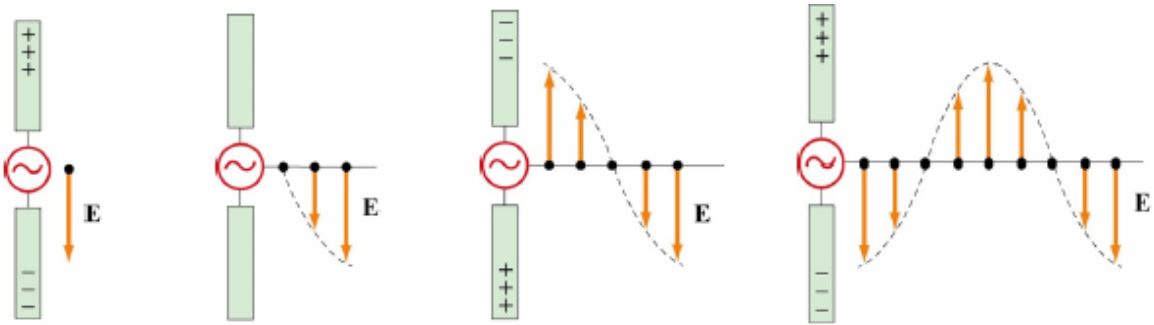
Elektromagnetické vlnění odpovídá frekvenci v intervalu 300 MHz až 300 GHz, což odpovídá délce vlny v rozsahu od 1 m do 1 mm. Pro domácí účely mikrovlnného ohřevu byla určena frekvence 2,45 GHz, která odpovídá délce vlny 12,2 cm (viz Obr. 1).



Obr. 1. Používané frekvence

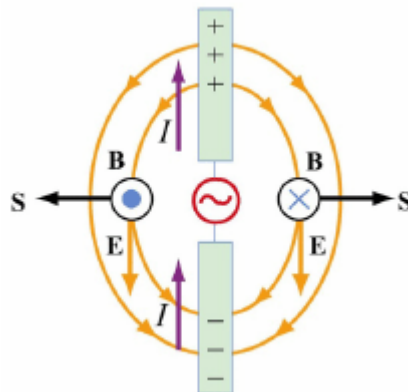
1.2 Vznik elektromagnetických vln

Elektromagnetické vlny vznikají urychlováním elektrických nábojů. Nehybný náboj ani stejnosměrný proud vyzařovat nemůže. Elektromagnetické vlny lze snadno získat přivedením střídavého napětí na anténu. Náboje se shromažďují na koncích antény a při změně polarity se přesunují, čímž se generují elektrické dipólové vlny.



Obr. 2. Dipólová anténa generující elektrické pole

Na počátku jsou kladné náboje shromážděny v horní větvi antény, v dolní je pak stejné množství záporných nábojů. Elektrické pole \mathbf{E} v blízkosti antény míří směrem dolů. Po uplynutí $1/4$ periody elektrické pole na krátkou chvíli vymizí a s obracející se polaritou náboje se tyto náboje přesunují na opačný konec antény. Po uplynutí $1/2$ periody je směr elektrického pole v blízkosti antény opačný, než byl na počátku. Oscilací elektrických nábojů zde tedy vzniká elektrické pole, které se od antény šíří rychlostí světla. Ovšem pohyb nábojů má za následek vznik elektrického proudu a ten pak generuje magnetické pole, které obtáčí tyče antény.[11, 12]



Obr. 3. Křivky elektrického (\mathbf{E}) a magnetického (\mathbf{B}) pole vytvořených dipólovou anténou.

1.3 Základní rovnice elektromagnetického pole

Výpočet veličin elektromagnetického pole znamená řešit známé Maxwellovy rovnice, které jsou základními rovnicemi elektrodynamiky. Jejich zápis v diferenciálním tvaru je dán následujícími rovnicemi, které uvádíme nejprve ve tvaru pro obecnou časovou závislost. Jde o soubor rovnic, z nichž první dvě jsou hlavní Maxwellovy rovnice a vyjadřují vazbu mezi elektrickým a magnetickým polem.

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}_v \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

Další dvě rovnice bývají nazývány jako tzv. doplňující Maxwellovy rovnice. Umožňují určit počáteční a okrajové podmínky a tím i jednoznačné řešení soustavy prvních dvou Maxwellových rovnic.

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

Následující tři rovnice, tzv. materiálové, umožňují řešit Maxwellovy rovnice v tzv. nehomogenním prostředí:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (6)$$

$$\mathbf{J}_v = \sigma \mathbf{E} \quad (7)$$

Ve výše uvedených rovnicích je \mathbf{H} vektor intenzity magnetického pole, \mathbf{E} značí vektor intenzity elektrického pole, \mathbf{D} a \mathbf{B} jsou vektory indukce elektrického resp. magnetického pole. \mathbf{J}_v je vektor hustoty vodivého proudu, t je čas a ρ je hustota volného prostorového náboje. Důležitou roli hrají tzv. materiálové konstanty:

ε - je permitivita prostředí,

μ - je permeabilita prostředí.

σ - je měrná elektrická vodivost prostředí.

Hodnotu permitivity ε permeability μ můžeme dále rozepsat známým způsobem:

$$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \quad (8)$$

kde:

ε_0 - je permitivita vakua ($8,854188 \cdot 10^{-12}$ [F.m⁻¹]),

ε_r - je relativní permitivita daného prostředí[-].

Dále pak:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (9)$$

kde:

μ_0 - permeabilita vakua ($1,256637 \cdot 10^{-6}$) [H.m⁻¹].

Budeme-li se zabývat harmonickým průběhem všech časově proměnných veličin elektromagnetického pole, pak okamžité hodnoty intenzit elektrického a magnetického pole můžeme symbolicky zapsat ve tvaru:

$$\mathbf{E}(u, v, z, t) = \mathbf{E}(u, v, z, t)e^{j\omega t} \quad (10)$$

$$\mathbf{H}(u, v, z, t) = \mathbf{H}(u, v, z, t)e^{j\omega t} \quad (11)$$

Vektorové funkce $\mathbf{E}(u, v, z)$ a $\mathbf{H}(u, v, z)$ jsou tzv. fázory vektorů intenzity elektrického a magnetického pole (též se používá označení komplexní amplituda). Jak je vidět ze zápisu předchozích rovnic, fázory jsou funkcí prostorových souřadnic avšak nezávisí na čase. Při harmonickém časovém průběhu můžeme tedy psát první dvě Maxwellovy rovnice ve fázorovém tvaru.

$$\operatorname{rot}\mathbf{E} = -j\omega\mathbf{B} = -j\omega\mu\mathbf{H} \quad (12)$$

$$\operatorname{rot}\mathbf{H} = \mathbf{J}_v + j\omega\mathbf{D} = \sigma\mathbf{E} + j\omega\varepsilon\mathbf{B} \quad (13)$$

Tvar zápisu ostatních Maxwellových rovnic se pro případ harmonického průběhu veličin nemění. [2]

1.4 Vid vlny

Vlny, které se šíří ve vlnovodu, jsou charakterizovány určitým příčným rozložením pole. O vlně s určitým příčným rozložením pole mluvíme jako o určitém vidu (módu) vlny. Každý vid je charakterizován určitým kritickým kmitočtem, určitou fázovou rychlostí, délkou vlny a rychlostí skupinovou. Vid s nejnižším kritickým kmitočtem nazýváme dominantním videm. Pásmo kmitočtů, pro něž se vlnovodem šíří jediný vid vlny, nazýváme pásmem jednovidovosti.

Každý vid bývá charakterizován určitými celočíselnými konstantami. Tyto konstanty nazýváme vidovými čísly. V případě obdélníkového vlnovodu nám vlnová čísla říkají, kolik půlvln stojatého vedení je naskládáno ve směrech příčných souřadnic. Např. u vidu TM_{11} (příčně magnetická vlna) má podélná složka vektoru intenzity elektrického pole jednu půlvlnu ve směru osy x a jednu půlvlnu ve směru osy y (je-li osa z totožná s osou vlnovodu). U vidu TE_{10} (příčně elektrická vlna, dominantní vid obdélníkového vlnovodu) je ve směru x jedna půlvlna podélné složky vektoru intenzity magnetického pole a ve směru y je tato složka konstantní (v tomto směru máme 0 půlvln stojaté vlny). [1]

1.5 Vlny TEM, TE, TM

Z teorie elektromagnetického pole je známo, že jeho energie se může šířit formou vlny:

- TEM (transverzálně elektromagnetická vlna) - složky elektrického i magnetického pole jsou kolmé ke směru šíření, neexistuje podélná složka ($E_z=0$, $H_z=0$).

- TE (transverzálně elektrická vlna) pole elektrické má jen příčné složky, pole magnetické má i složku podélnou ($E_z=0$, $H_z \neq 0$).

- TM (transverzálně magnetická, vlna) - pole magnetické má jen příčné složky, elektrické pole má i složku podélnou ($E_z \neq 0$, $H_z=0$). [3]

1.6 Mikrovlnná vedení a vlnovody

Princip a konstrukce mikrovlnných obvodů jsou zpravidla založeny na využití úseků vedení s rozloženými parametry. Proto je možné považovat teorii vedení za jeden ze základních principů mikrovlnné techniky. Pro přenos signálu resp. energie v mikrovlnném pásmu lze obecně použít různé typy vedení. [2]

Základní typy mikrovlnných vedení a vlnodů:

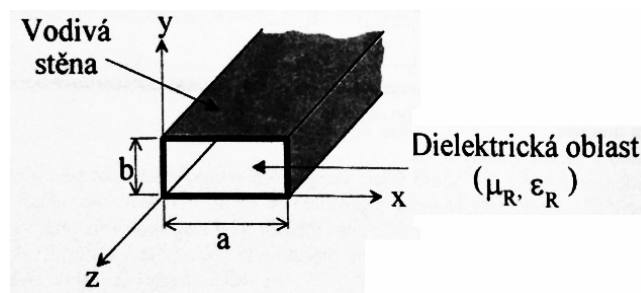
Vlnovody umožňují přenos elektromagnetické energie formou harmonické vlny až nad tzv. mezním kmitočtem (jde o obvod typu horní propust). Tzv. jednovodý přenos energie ve vlnovodu formou vybraného TE resp. TM vidu se využívá řádově v pásmu od stovek MHz až do stovek GHz. Směrem k nižším kmitočtům by rozměry a váha byly značně velké, čímž se vlnovod stává nepoužitelným pro běžné technické aplikace. Směrem k vyšším kmitočtům pak rozměry vlnovodu budou řádově desetiny milimetru, což je technologicky velmi komplikované.

Obecně využíváme:

- obdélníkový vlnovod,
- kruhový vlnovod,
- vlnovody komplikovanějších tvarů.

Pro mikrovlnné vedení pak :

- koaxiální vedení,
- pásková vedení,
- dvou vodičová vedení. [2]



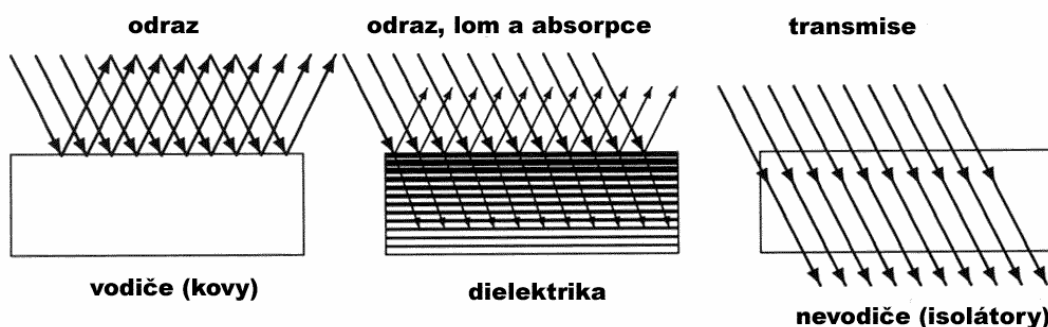
Obr. 4. Obdélníkový vlnovod

2 MIKROVLNNÝ (DIELEKTRICKÝ) OHŘEV

Mikrovlnný ohřev (MW) představuje progresivní technologii se stále širším spektrem průmyslových a potravinářských aplikací. Výrobou zařízení pro průmyslové účely se zabývají desítky firem v USA, Japonsku, Velké Británii, Německu, Francii, Itálii, Švédsku a v dalších zemích. Ve světovém průmyslu prakticky již neexistuje zpracovatelský obor, kde by se mikrovlny neprosadily. Uplatňují se buďto jako efektivnější technologie nahrazující konvenční ohřevná zařízení nebo, a to častěji, se pořizují proto, že umožňují zcela novou kvalitu zpracování. Přestože ve vyspělých zemích se technologie MW používá v širokém spektru aplikací, úroveň informovanosti o jejích možnostech a výhodách je u potenciaálních zákazníků ve střední Evropě prozatím nízká. Přesto informace o aplikacích MW technologie se zájmem posuzuje již značný počet představitelů významných zpracovatelských podniků. Kromě zvýšení kvality a tím i prodejnosti konkurenceschopných výrobků, nedosažitelných jinými technologiemi, umožňuje MW ohřev zkrácení výrobní doby a snížení výrobních nákladů. [19]

2.1 Princip dielektického ohřevu

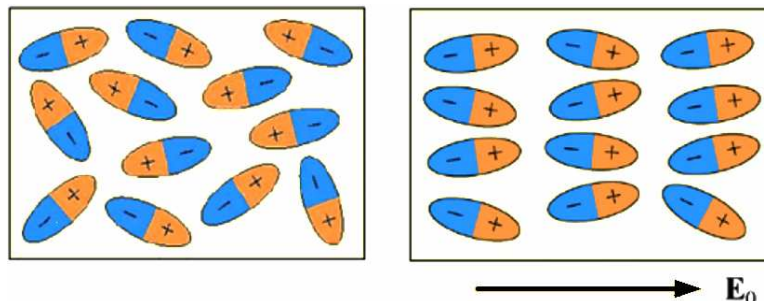
Dielektrický (DE) ohřev zahrnuje mikrovlnný (MW) ohřev a také ohřev na radiových frekvencích (RF), je založen na transformaci energie střídavého elektromagnetického pole na tepelnou energii v materiálech s nerovnoměrným rozložením elektrických nábojů v molekulách tzv. polárních materiálů - dielektrik.



Obr. 5. Reakce rozlišných materiálů na mikrovlny

Ve střídavém elektromagnetickém poli o velmi vysokém kmitočtu se dipóly polárních molekul natáčejí tak, aby jejich póly sledovaly okamžitý směr pole (mění se až několik miliardkrát za vteřinu). 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. Tak se produkt zdánlivě ohřívá sám. Výsledkem je velmi rychlý ohřev materiálu, často během několika sekund nebo minut. [19].



Obr. 6. Orientace polárních molekul. Nalevo nepůsobí vnější pole, napravo je vnější pole nenulové

2.2 Dielektrické vlastnosti materiálů

Dielektrika jsou izolanty, které mají schopnost polarizace. Přestože dielektrikum neobsahuje žádné volné elektrické náboje a jeví se navenek jako neutrální, je složeno z velkého množství elementárních částic, které elektrický náboj obsahují (např. atomy, funkční skupiny, ionty apod.). Vnější elektrické pole, které působí na elementární částice v dielektriku, ovlivňuje rozložení elektrického náboje v dielektriku. Změněné rozložení nábojů pak zpětně ovlivňuje působící pole. Vložení dielektrika do elektrického pole nastává jev, který se nazývá polarizace dielektrika [4, 5].

Může mít různý mechanismus:

elektronová polarizace - posuv elektronů vůči kladným jádrům, nastává při frekvencích v intervalu 10^{13} - 10^{16} Hz.

atomová polarizace - vzájemný posuv atomů v molekule, nastává ve frekvenčním intervalu 10^{11} - 10^{14} Hz.

orientační polarizace - nastává u polárních dielektrik, jedná se o natáčení dipólů ve směru elektrického pole, tento typ polarizace se objevuje při frekvencích 10^0 - 10^{11} Hz.

Polarizace dielektrika je časově závislá, dipóly potřebují čas k uspořádání dipólů, ten je různý podle mechanismu polarizace. Jedna z hlavních charakteristik dielektrických materiálů je relativní permitivita. Jedná se o látkovou konstantu, která vyjadřuje, kolikrát je in-

tenzita elektrického pole v dielektriku menší, než intenzita elektrického pole ve vakuu. Relativní permitivitu lze rovněž chápat jako hodnotu kolikrát se zvětší kapacita kondenzátoru, umístí-li se mezi elektrody dielektrikum, pak: [4, 6]

$$\varepsilon_r = \frac{\mathbf{E}_0}{\mathbf{E}} \quad (14)$$

kde:

ε_r - relativní permitivita [-],

\mathbf{E}_0 - intenzita elektrického pole ve vakuu [$\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$],

\mathbf{E} - intenzita elektrického pole v dielektriku [$\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$].

Ve střídavém elektrickém poli jsou dielektrické vlastnosti testovaného materiálu v závislosti na úhlové frekvenci ω a jsou charakterizovány komplexní permitivitou.

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) \quad (15)$$

kde:

ε' neboli ε_r - reálná složka komplexní permitivity, resp. relativní permitivita,

ε'' - imaginární složka komplexní permitivity, resp. ztrátový faktor,

ε^* - komplexní permitivita.

Reálná složka komplexní permitivity představuje relativní permitivitu a imaginární složka vyjadřuje proudy, které jsou ve fázi s napětím, neboli ztráty.

$$\sigma_{AC} = \omega\varepsilon_0\varepsilon''(\omega) \quad (16)$$

kde:

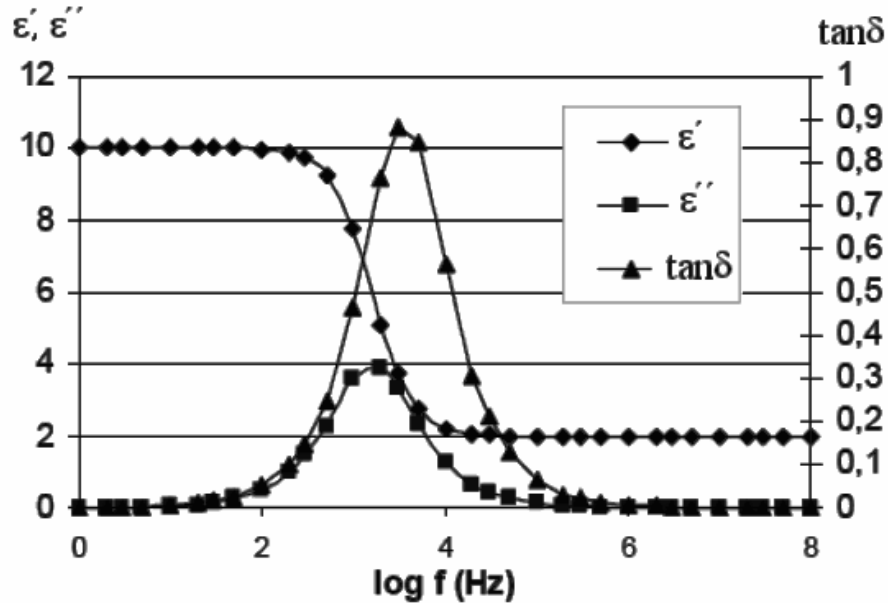
σ_{AC} - střídavá vodivost [$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$]

Podíl mezi ztrátovým faktorem a relativní permitivitou udává tangenta ztrátového úhlu.

$$\text{tg } \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (17)$$

Ztrátový faktor je maximální při kritické frekvenci f_{krit} a odpovídá relaxačnímu času τ . Frekvenční závislosti složek relativní permitivity, ztrátového faktoru a tangenty ztrátového úhlu popisuje model podle Debye, tzv. Debyeovy křivky. Jedná se o jeden z více modelů frekvenční závislosti. Relaxační frekvence f_{krit} nastává v inflexním bodu frekvenční závis-

losti relativní permitivity a maximu tangenty ztrátového úhlu (ztrátového faktoru). Relaxační frekvence odpovídá přibližně frekvenci vlastních brzděných rotací elektrických dipólů [4, 7].



Obr. 7. Příklad frekvenční závislosti složek komplexní permitivity dielektrika dle Debye (Debyeovy křivky).

Pro zajímavost se můžeme podívat na dielektrické vlastnosti vybraných materiálů:

Tab. 1. Dielektrické vlastnosti tkáně v závislosti na kmitočtu

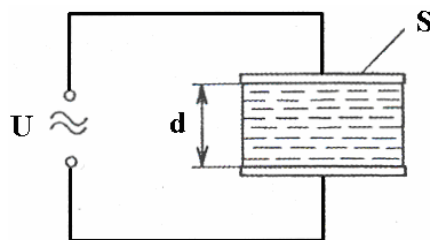
frekvence f [MHz]	relativní permitivita ϵ_r	měrná vodivost a [S/m]	efektivní hloubka vniku $d_{1/2}$ [cm]
13,56	160/-	0,62 / -	7,7 / -
27,12	113/20	0,65/0,02	5,4177
40,68	97/ 14	0,72/0,03	4,2/44
433,92	53 / 5,6	1,20/0,08	1,47/11,5
2450	49 / 5,5	2,21 / 0,16	0,7/3,9

Tab. 2. Dielektrické vlastnosti vybraných materiálů.

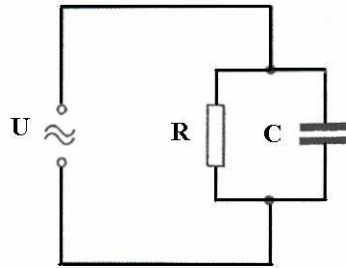
Materiál	$\varepsilon' [-]$	$\varepsilon'' [-]$	Teplota [°C]	PD [cm]
Al ₂ O ₃	9	0,004	25	1 461
Al ₂ O ₃	9,46	0,01	296	599
Al ₂ O ₃	10,15	0,055	683	113
Al ₂ O ₃	11,18	0,241	1 221	27
křemenné sklo	3,78	0,0002	25	18 937
SiC	10,4	0,9	25	7
ZrO ₄	18	2,34	300	4
ZrO ₄	18,8	3,38	500	3
ZrO ₄	22,3	8,25	800	1
PVC	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
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

2.3 Základní výpočty vázané k dielektrickému ohřevu

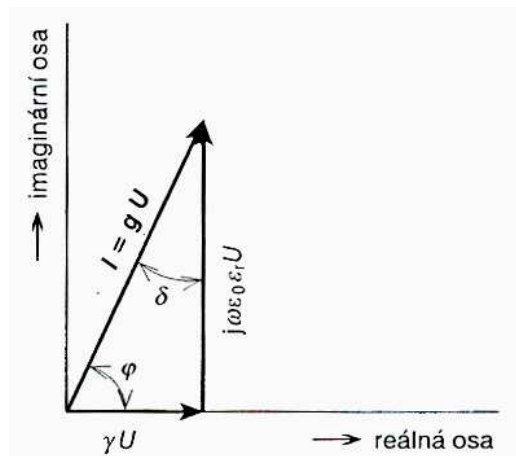
Na obrázku (Obr. 8) je naznačen deskový kondenzátor, jehož dielektrikum je tvořeno elektricky nevodivou látkou, která je charakterizována relativní permitivitou $\varepsilon_r [-]$ a ztrátovým činitelem $\operatorname{tg} \delta [-]$. Ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta$ lze odvodit z náhradního schématu (Obr. 9) a z fázového diagramu na obrázku (Obr. 10).



Obr. 8. Deskový kondenzátor s vloženým dielektrikem.



Obr. 9. Náhradní schéma kondenzátoru se ztrátovým dielektrikem.



Obr. 10. Fázový diagram dielektrických ztrát.

Kapacita kondenzátoru C je dána vztahem:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S \cdot d^{-1} \quad (18)$$

kde:

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

ε_r - relativní permitivita materiálu [-],

C - kapacita kondenzátoru vyplněného [F],

S - plocha desky kondenzátoru [m^2],

d - vzdálenost desek [m].

Kapacita kondenzátoru tvaru jednotkové krychle bude:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (19)$$

Z náhradního schématu plyne výsledná vodivost:

$$G = R^{-1} + j \cdot \omega \cdot C \quad (20)$$

Výsledná vodivost jednotkové krychle je:

$$g = (\rho^{-1} + j \cdot \omega \cdot \epsilon_o \cdot \epsilon_r) = (\gamma + j \cdot \omega \cdot \epsilon_o \cdot \epsilon_r) \quad (21)$$

kde:

ρ - je rezistivita (měrný odpor) [$\Omega \cdot m$],

γ - konduktivita (měrná vodivost) [$S \cdot m^{-1}$],

G - vodivost [R^{-1}],

ω - úhlová frekvence [$rad \cdot s^{-2}$].

Mezi proudem obvodu I [A] a napětím U [V] platí vztah:

$$I = gU = (\gamma + j \cdot \omega \cdot \epsilon_o \cdot \epsilon_r) \cdot U \quad (22)$$

Z fázového diagramu lze odvodit ztrátový činitel:

$$tg \delta = \frac{\gamma}{\omega \cdot \epsilon_o \cdot \epsilon_r} \quad (23)$$

Hodnoty ϵ_r a $tg \delta$ nejsou konstantní, ale mění se s frekvencí a závisejí na teplotě, vlhkosti apod.

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

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (24)$$

Pro malé úhly δ přibližně platí: $\cos \varphi = \sin \varphi = tg \varphi$

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

$$U = \frac{I}{\omega \cdot C} \quad (25)$$

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

$$I = \omega \cdot C \cdot U \quad (26)$$

Příkon kondenzátoru lze pak vyjádřit vztahem:

$$P = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (27)$$

Dosazením do tohoto výrazu se získá praktický vztah:

$$P = 2\pi f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S \cdot d^{-1} \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (28)$$

kde:

P - je výkon absorbovaný materiálem [W],

f - frekvence [Hz],

ε_0 - permitivita vakua [$8,859 \cdot 10^{-12}$ F.m⁻¹],

ε_r - relativní permitivita [-],

U - napětí [V],

S - plocha desky kondenzátoru [m²].

Z uvedeného vztahu je zřejmé, že čím je větší frekvence f , tím menší je potřebná intenzita elektrického pole \mathbf{E} , tj. napěťový gradient. [20, 21]

2.4 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost je charakteristickým parametrem elektroizolačních materiálů. Pokud mluvíme o izolantech, objevuje se spolu s tím i pojem dielektrika. Mezi oběma pojmy je však rozdíl a v praxi dochází k častým nepřesnostem. Dielektrikum je látka, která se po vložení do elektrického pole polarizuje. Na druhé straně izolant se používá k odizolování dvou částí s různým potenciálem elektrického pole. Lze tedy říci, že z velké skupiny dielektrik jsou vybírána ta, která jsou kvalitní a jsou používána jako izolanty. Z toho plyne, že pojem dielektrikum je obecnější, protože ne všechna dielektrika jsou používána jako izolanty.

Elektrická pevnost je definována jako:

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (29)$$

kde:

U_p - průrazné napětí [V]

d - tloušťka izolantu [m]

Jedná se vlastně o intenzitu elektrického pole a značí se E_p . Místo základní jednotky [$V \cdot m^{-1}$] se častěji používají [$kV \cdot mm^{-1}$] (dříve [$kV \cdot cm^{-1}$]), protože základní jednotka je příliš malá a hodnoty elektrické pevnosti by byly velmi velká čísla.[13]

2.5 Penetrační hloubka

Penetrační hloubka PD (Penetration Depth) 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. Penetrační hloubka je vyjádřena vztahem:

$$PD = (\lambda_0/2\pi) \cdot \sqrt{\frac{\epsilon'}{\epsilon''}} \quad (30)$$

kde:

PD – penetrační hloubka [m],

λ_0 - je vlnová délka ve vakuu [m],

ϵ' - reálná část komplexní relativní permitivity [-],

ϵ'' - imaginární část komplexní relativní permitivity [-]. [21, 22]

2.6 Charakteristické vlastnosti DE ohřevu

Základní charakteristické vlastnosti dielektrického ohřevu lze shrnout do těchto bodů:

- 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. Elektromagnetické 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 pohybem, u průmyslových zařízení běžícím pásem.

- Teplotní úlet - dochází k němu jen ve vyjíměčných 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.[22]

2.6.1 Hlavní výhody MW ohřevu

Hlavní výhody můžeme shrnout do těchto bodů:

- zkrácení doby zpracování vede k úspoře energií (30-85 % i více), což představuje snížení zátěže pro životní prostředí,
- zvýšení kvality výrobků (homogenity ohřevu), možnost nových výrobků, nedosažitelných jinými technologiemi,
- snížení podlahové plochy až o 50-90 % velikosti potřebné u jiných metod vede ke zvýšení výrobní kapacity,
- zlepšení hygieny pracovního prostředí,
- usnadnění a zkrácení doby údržby.[21]

2.6.2 Vliv DE ohřevu na kvalitu ohřívaného materiálu

U veřejnosti vznikla obava z možné kvalitativní změny ohřívaných produktů v důsledku mikrovlnného ohřevu. Je nutno uvést, že mikrovlny nemají na rozdíl od rentgenového záření ionizující účinek, tj. nejsou schopny rozbít chemické vazby. Toto tvrzení je možné doložit pomocí principů kvantové fyziky. Při ozařování materiálu světelnými paprsky se mohou uvolnit (emitovat) elektrony v zásadě pouze tehdy, je-li energie fotonů větší než vazební energie elektronů (výstupní práce). Nachází-li se frekvence použitého elektromagnetického záření pod kritickou frekvencí příslušné výstupní práce, potom při zvyšování elektromagnetického výkonu k emisi elektronů nedojde. Tento postulát elegantně objasnil Albert Einstein svou kvantovou hypotézou a položil tím základy kvantové fyziky.

Energie fotonu v elektromagnetickém poli je dána:

$$E = h \cdot f \quad (31)$$

kde:

E - energie [J],

h - je Planckovo účinkové kvantum (konstanta $6,626 \cdot 10^{-34}$) [J.s],

f - frekvence mikrovlnné trouby [Hz].

Po dosazení:

$$E = 6,626 \cdot 10^{-34} \times 2,45 \cdot 10^9 = 1,62 \cdot 10^{-24} \text{ J}$$

Obecně platí jestliže:

$$1 \text{ J} = 6,24 \cdot 10^{18} \text{ eV}$$

Pak:

$$E = 1,62 \cdot 10^{-24} \times 6,24 \cdot 10^{18} = 10^{-5} \text{ eV}$$

Protože typické hodnoty vazební energie se pohybují řádově v jednotkách elektronvoltů, nejsou mikrovlnné fotony narozdíl od rentgenových fakticky schopny rozbít žádnou chemickou vazbu, to platí nezávisle na intenzitě dopadajícího záření. Čistě teoreticky by bylo nicméně možné, aby molekula vody absorpcí postupně získala ionizační energii až asi 10^5 fotonů, a tím se ionizovala. Avšak již přibližný odhad ukazuje, že intenzita v mikrovlnné komoře je na to až příliš malá. Nemohou se zde tedy uvolňovat žádné radikály, tj. snadno reaktivní fragmenty - elektrony, které by mohly reagovat s dalšími materiálovými buňkami, a tím kvalitativně měnit jejich strukturu.

3 VYUŽITÍ MW OHŘEVU V PRŮMYSLOVÝCH APLIKACÍCH

Mikrovlnný ohřev se v dnešní době používá v širokém spektru odvětví jako je: potravinářský průmysl, plastikářský a gumárenský průmysl, chemický průmysl, farmaceutický průmysl, dřevovýroba, výroba slévárenských forem a také v lékařství.

3.1 Využití MW v plastikářském průmyslu

3.1.1 Sušení plastů:

Sušení je pravděpodobně nejrozšířenější aplikací mikrovlnného ohřevu v průmyslu plastů. Mechanismus sušení mikrovlnnou energií nebo energií na radiových frekvencích je zcela rozdílný od konvenčního sušení. U dielektrického ohřevu dochází k současnému zvýšení teploty v celém objemu materiálu a k rychlé generaci páry.

Mimořádně významnou aplikací je sušení hygroskopických granulátů plastů, zejména před vytlačováním. Lze dosáhnout 30–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.

3.1.2 Spojování plastů:

Mikrovlnný ohřev je ověřen ve dvou variantách - spojování přímým ohřevem dvou vrstev polymerů i jiných materiálů anebo s využitím mezivrstvy.

Při spojování (lepení a svařování) plastů se využívá jak mikrovlnný ohřev, tak zejména ohřev na radiových frekvencích, jež je jednou z nejstarších a nejúspěšnějších aplikací. V provozu je řada linek, například pro svařování dílů obalů na krevní konzervy a jiných plastů. 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 mikrovlnami zvyšuje pevnost zkoušených vzorků ve srovnání s lepeními spoji až na trojnásobek a může tím být alternativou.

3.1.3 Tvarování desek

Při tvarování plastových desek umožňuje mikrovlnný ohřev nebo předeřev 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.

3.1.4 Smršťování plastových polotovarů

Při smršťování plastových polotovarů, jako jsou fólie, hadice atp. je hlavní výhodou mikrovln přesné řízení potřebné teploty. Nespotebovává se žádný pohotovostní výkon a při vypnutí nemá aparatura žádnou tepelnou setrvačnost – nedochází proto k přehřátí, jež způsobuje znehodnocení napékáním, seškvařováním aj. Praktické uplatnění je u technologií obalových a ochranných vrstev.

3.1.5 Recyklace plastů a odpadů

Při recyklaci plastů byla ověřena zajímavá aplikace, při níž se z hořlavého plastového materiálu s použitím mikrovlnného ohřevu vyrábí nový materiál se zvýšenou ohnivzdorností, použitelný například k tepelné izolaci.

Mikrovlnami se likvidují i nebezpečné odpady, obsahující vysoký podíl plastů, kupříkladu ze zdravotnických zařízení. Dosahuje se spolehlivé neutralizace na úroveň běžného komunálního odpadu.[19] V lékařství je možná využitelnost při mikrobionální sterilizaci.

3.2 Využití MW v gumárenském průmyslu

3.2.1 Dielektrický ohřev

Dielektrický ohřev zahrnuje jak ohřev na radiových frekvencích, tak mikrovlnný ohřev. Elastomery se obecně vyznačují nízkou tepelnou vodivostí. Při konvenčním ohřevu se od vnějšího zdroje tepla nejdříve ohřeje povrch a vzniká tepelný gradient, který ztěžuje rychlé prohřátí celého objemu materiálu a může negativně ovlivnit jeho vlastnosti. Naproti tomu dielektrický ohřev působí současně do celé hloubky materiálu. Různé druhy přírodních i syntetických kaučuků a používaných plnidel mají odlišné dielektrické vlastnosti, a tím různě reagují na vysokofrekvenční elektromagnetické pole.

3.2.2 Kontinuální vulkanizace

Vulkanizace extrudovaných profilů je nejrozšířenější aplikací mikrovlnného ohřevu v gumárenském průmyslu. Průřez profilu, vlastnosti daného druhu kaučukové 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 mikrovlnný předehřev na teplotu přibližně 130 °C. Po vstupu do tunelu se materiál rychle zahřeje na vulkanizační teplotu např. na 180 °C, podle složení kaučukové směsi. Po průchodu mikrovlnným tunelem se směs udržuje na požadované teplotě po dobu 60-90 sekund 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.

3.2.3 Vulkanizace kombinací mikrovlnného a infračerveného ohřevu

Profil vystupující z vlačovacího stroje je nejdříve předehříván mikrovlnami v celém objemu. Následuje vulkanizace opět mikrovlnným ohřevem, ale stěny komory jsou tvořeny povrchem na bázi sloučenin křemíku nebo hliníku, který jednak lze ohřívat na vysokou teplotu zvenčí, a jednak tento materiál reaguje na mikrovlny. Energie nespotebovaná přímo ve zpracovávaném materiálu proto přispívá k ohřevu stěn tunelu na teplotu, při níž dochází k infračervenému vyzařování. Podstatně se zvýší využití mikrovlnné energie a rovnoměrnost ohřevu. Profil je proto vulkanizován zcela homogenně a má vynikající vlastnosti.

3.2.4 Mikrovlnná regenerace odpadové pryže

Recyklace gumy vyžaduje přerušování můstkových vazeb, vytvořených vulkanizací. Problém je v tom, že devulkanizační a depolymerizační teploty jsou blízké. Je to dáno podobností mezi atomovými vazbami uhlíku a síry, jež musí být přerušeny (S-S a C-S vazby při devulkanizaci a C-C vazby při depolymerizaci). Proto je pro tepelný proces nezbytná přesnost a homogenita pole. [19]

3.3 Využití MW v ostatních odvětvích

3.3.1 Potravinářský průmysl

Potravinářské produkty, které lze mikrovlnně zpracovávat, pokrývají celý zpracovatelský rozsah tohoto sektoru:

- pasterizace a sterilizace (devitalizace - hygienizace potravin a krmiv),
- rozmrazování a temperování potravin,
- inaktivace Enzymů, stabilizace směsí,
- sušení (jedná se využití obecných výhod mikrovlnného sušení podobně jako v jiných oborech),
- vaření, pečení, pražení (ireversibilní tepelná úprava při níž dochází k nevratným změnám v produktu),
- ohřev a přehřev (reversibilní tepelná úprava bez nevratného vlivu na produkt).

3.3.2 Zpracování dřeva, papíru, textilu a přízí

- Sušení (jedná se využití obecných výhod mikrovlnného sušení podobně jako v jiných oborech),
- ohýbání dřeva (při ohýbání dřeva se mikrovlnný ohřev a ohřev na radiových frekvencích uplatňují nejčastěji v kombinaci s párou),
- lepení a laminování dřeva i překližek,
- při potisku k vysoušení tiskařského inkoustu,
- textilní barvení (lepší homogenita zbarvení).

4 KONSTRUKCE MIKROVLNNÝCH ZAŘÍZENÍ

Většina mikrovlnných zařízení používaných v praxi se od sebe obecně příliš neliší. Jejich skladba je vždy stejná, skládá se z daného počtu magnetronů. Jejich výstupy elektromagnetického generátoru - magnetronu jsou spojeny vlnovody patřičné konstrukce a sbíhají se v komoře. K vlnovodům se můžou vázat zařízení pro rozptyl záření mající vliv na následné rozložení elektromagnetického pole v komoře. Obecně tedy můžeme shrnout jednotlivé strojní komponenty či funkční celky mikrovlnných zařízení do tohoto výčtu:

- magnetron,
- napájecí zdroj pro magnetron,
- vlnovody,
- komora se systémem otvírání a ochrany nežádoucího otevření,
- přídatné stínící prvky,
- dopravníky materiálu,
- pomocné elektromotory (posun materiálu, rozptylové zařízení,...),
- pomocné zdroje napětí,
- topná tělesa pro sálavé teplo,
- přídatný zdroj horkého vzduchu,
- elektronika časového spínače a řízení výkonu.

4.1 Základní části zařízení pro mikrovlnný ohřev

4.1.1 Zdroje elektromagnetického pole

Jednotlivé mikrovlnné elektronky popisované v dalším textu se liší jak svojí konstrukční geometrií, tak i principem činnosti, ale přesto mají několik společných vlastností:

- všechny elektronky využívají pro svoji činnost interakci mezi svazkem elektronů a vysoko frekvenčním elektromagnetickým polem ve vakuu uvnitř skleněného nebo kovového pláště,

- výstup vysoko frekvenční energie zpravidla umožňuje koaxiální sonda nebo smyčka, resp. rezonanční okno, rozžhavená katoda emituje elektrony. Tyto katody se zpravidla konstruují z kovu, na jehož povrchu je wolfram nebo barium oxid,
- proud elektronů je fokusován do úzkého svazku anodou s vysokým napětím. Alternativně se pro fokusaci elektronů používá solenoidální elektromagnet,
- pro pulzní provoz se používá elektroda k modulaci svazku elektronů (kladné předpětí elektrony urychluje, záporné předpětí je zpomaluje).

Mikrovlnné elektronky můžeme podle typu interakce elektronového svazku s elektromagnetickým polem rozdělit do dvou skupin:

- elektronky s lineárním svazkem (proud elektronů prochází elektronkou a je rovnoběžný s orientací elektromagnetického pole),
- elektronky s příčným polem (fokusující pole je kolmé k urychlujícímu elektrickému poli). [2]

4.1.1.1 *Cyklotron*

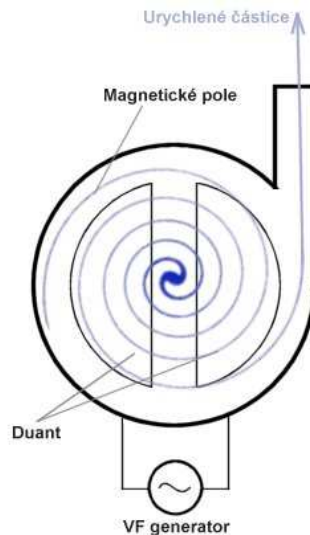
Konstrukce cyklotronu není tak masivní, jako u lineárních urychlovačů částic, je však obvykle složitější. Cyklotron se skládá ze tří hlavních částí a to:

- velmi silný elektromagnet,
- zdroj napětí o vysoké frekvenci,
- urychlovací komora s párem dutých urychlovacích elektrod (duantů).

Částice se pohybují uvnitř dutých urychlovacích elektrod svou setrvačností a jejich dráha je zakřivována magnetickým polem, orientovaným kolmo na rovinu dráhy částic. Duté elektrody působí jako Faradayova klec, a proto uvnitř nich neovlivňuje dráhu částic elektrické, ale pouze magnetické pole. Urychlování probíhá pouze v mezeře mezi duanty. Ty jsou napájeny vysokofrekvenčním střídavým proudem vhodné frekvence. Elektrické pole mezi duanty působí vždy takovým směrem, aby zvýšilo rychlost částic. Kinetická energie urychlené částice může po mnoha obězích dosáhnout hodnoty až 50 MeV.

U cyklotronu je magnetické pole využíváno pouze k vedení svazku částic a nikoliv k jejich urychlování. Pole je orientováno kolmo na dráhu částic (ve schématu kolmo na rovinu kresby). Způsobuje zakřivování dráhy do kruhu. Při rostoucí rychlosti částic se poloměr

tohoto kruhu zvětšuje, takže částice se pohybují po přibližně spirálové dráze. Doba průchodu jednotlivými smyčkami spirály je ale konstantní (rychlejší částice se pohybují po kruhu o větším poloměru).



Obr. 11. Schéma cyklotronu.

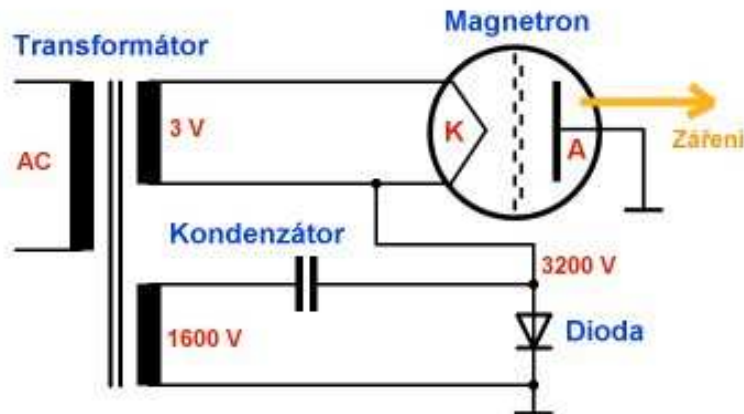
Cyklotronová frekvence (f) vychází z velikosti elektrického náboje částice (Q), z velikosti magnetické indukce (\mathbf{B}) a z hmotnosti částice (m). [14]

4.1.1.2 Magnetron

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:

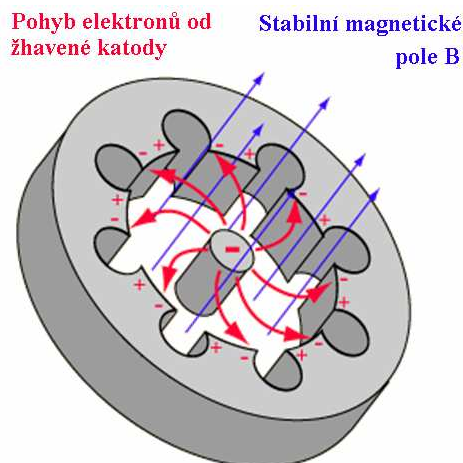
- silný prstencový permanentní magnet,
- vakuová trubice s elektrodou (katoda),
- keramická zátka, oddělující vlnovod a vakuum,
- anodový blok (anoda),
- vlnovod,
- chlazení (vzduchem/kapalinou),
- kondenzátor.

Na katodu je přiváděno žhavicí napětí řádově několika 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. [14]



Obr. 12. Schématické zapojení magnetronu.

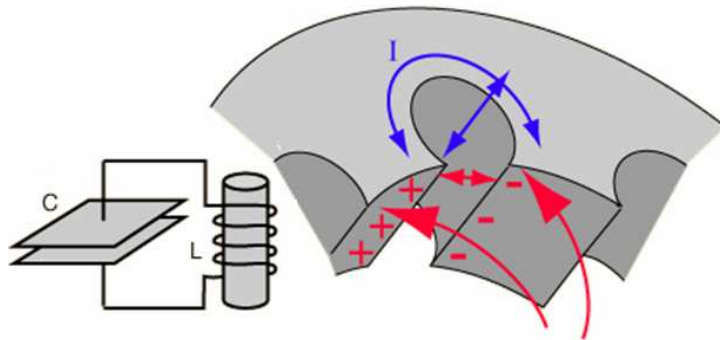
Váleček tvořící katodu je tedy zahříván elektrickým proudem a díky tomu se z něj uvolňují elektrony, které jsou urychlovány připojeným elektrickým polem směrem k anodě. Feritové magnety vytvářejí v trubici magnetické pole, jehož indukční čáry jsou kolmé k dráze elektronů a ovlivňují tak jejich pohyb. Elektrony se v magnetickém poli nepohybují přímočaře od středu k obvodu, ale stáčí se směrem doleva, viz (Obr. 13). To znamená, že nedopadnou doprostřed nejbližšího kovového segmentu, ale na jeho levou část.



Obr. 13. Princip magnetronu

Jednotlivé komory anodového bloku se začnou chovat jako miniaturní oscilační (LC) obvody. Štěrbina mezi okraji komory hraje roli kondenzátoru, vodivý zbytek komory, který spojuje okraje štěrby, hraje roli miniaturní cívky. Elektrony nabíjí jeden okraj komory

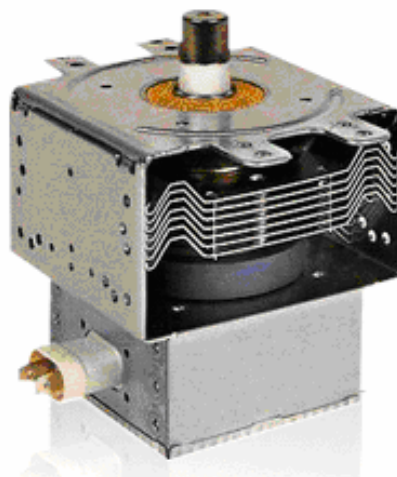
(jednu desku kondenzátoru), takže začne okamžitě procházet proud kolem komory (cívkou) na druhý okraj komory.



Obr. 14. Resonanční dutina magnetronu.

Průchod tohoto proudu vytvoří malé magnetické pole, které potom ve druhé polovině cyklu indukuje opačný proud komorou. V komorách tak vzniká stejně jako v oscilačním obvodu střídavý proud vysoké frekvence (2,45 GHz), který vyvolává elektromagnetické vlnění vysílané anténou do prostoru trouby. Energie odnášená vyzařováním mikrovln způsobuje vybíjení oscilačních obvodů, které proto musí být neustále nabíjeny elektrony z katody. [15]

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. [14]



Obr. 15. Magnetron značky LG o výkonu 1,1 kW a frekvenci 2,45 GHz.

4.1.1.3 Klystron

Klystron je elektronika s lineárním svazkem. Bývá využíván jako oscilátor i jako zesilovač. Podle toho se liší konstrukce jeho variant, má jednu, dvě nebo i více rezonančních dutin. V případě jedné rezonanční dutiny hovoříme o reflexním klystronu, který se využívá pro generování mikrovlnného signálu. Tato rezonanční dutina má kladné předpětí, za ní je umístěn tzv. reflektor (elektroda se záporným předpětím). Tím vzniká kladná zpětná vazba a také i oscilace. Klystrony lze přeladovat mechanicky změnou rozměru rezonanční dutiny.

4.1.2 Obdélníkový vlnovod

Jak již bylo uvedeno v kapitole 1.6. „Mikrovlnná vedení a vlnovody“ využíváme různých geometrií vlnovodů. V této kapitole je uveden obdélníkový vlnovod, kterému se budeme věnovat i v praktické části.

4.1.2.1 Základní matematický popis obdélníkového vlnovodu

Předpokladem je, že vlna ve vlnovodu je popisována následujícím matematickým vyjádřením:

$$E_y = E_0 \sin k_x x e^{i(\omega t - k_z z)} \quad (32)$$

Uvedený vztah musí vyhovovat rovnicím pole. Zaprvé, elektrické pole nemá mít na vodičích žádné tangenciální složky. Pole tomuto požadavku vyhovuje, když je kolmé na vrchní a spodní stěnu a na bočních stěnách je nulové. Proto bude k_x takové, aby polovina cyklu funkce $\sin k_x x$ připadla přesně na šířku vlnovodu, tj. když:

$$k_x a = \pi n \quad (33)$$

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

$$k_x a = n\pi \quad (34)$$

kde n je jakékoli celé číslo. Tyto případy představují různé složité uspořádání pole. Pro řešení je použito pole, v němž $k_x = \pi / a$, kde a je šířka nitra vlnovodu. Dále, divergence pole \mathbf{E} musí být ve volném prostoru rovna nule, protože tam nejsou žádné náboje a \mathbf{E} má pouze y-novou složku, která nezávisí na y , pak:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (35)$$

Dále elektrické pole musí ve volném prostoru uvnitř vlnovodu souhlasit se zbývajícími Maxwellovými rovnicemi. To znamená, že musí splňovat vlnovou rovnici ve tvaru:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} = 0 \quad (36)$$

Je nutno prověřit, zda uvedený typ řešení $E_y = E_0 \sin k_x x e^{i(\omega t - k_z z)}$ 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 $E_y = E_0 \sin k_x x e^{i(\omega t - k_z z)}$ 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 předchozí rovnice bude platit:

$$k_x^2 E_y + k_z^2 E_y - \frac{\omega^2}{c^2} E_y = 0 \quad (37)$$

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

$$k_x^2 + k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} = 0 \quad (38)$$

Hodnota k_z je již stanovena, a podle této rovnice vlny takového druhu, jaký jsme předpokládali, mohou existovat, pokud souvisí k_z s frekvencí ω tak, aby byla splněna předešlá rovnice, jinými slovy když:

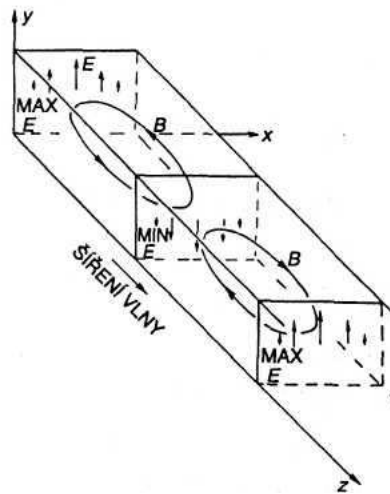
$$k_z = \sqrt{\left(\left(\frac{\omega^2}{c^2}\right) - \left(\frac{\pi^2}{a^2}\right)\right)} \quad (39)$$

Popsané vlnění se šíří ve směru osy z s touto hodnotou k_z . Vlnové číslo k_z , které je vypočteno ze vztahu (39), určuje rychlost, kterou se podél vlnovodu pohybují uzly vlny při dané frekvenci ω . Fázová rychlost je dána vztahem:

$$v = \frac{\omega}{k_z} \quad (40)$$

Vlnovou délku A postupné vlny udává vztah $\lambda = 2\pi v/\omega$, takže k_z je rovno i $2\pi/\lambda_v$ kde λ_v je vlnová délka kmitů ve směru osy z , tj. vlnová délka vlny ve vlnovodu. Vlnová délka ve vlnovodu se liší od vlnové délky elektromagnetického vlnění se stejnou frekvencí ω ve volném prostoru. Označíme-li λ_0 vlnovou délku ve volném prostoru, rovnající se $2\pi c/\omega$, můžeme rovnici (39) přepsat na tvar:

$$\lambda_v = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - (\lambda_0/2a)^2}} \quad (41)$$



Obr. 16. Magnetické pole ve vlnovodu.

Kromě elektrických polí existují i magnetická pole, která se pohybují s vlnou, ale nebudeme se nyní zabývat odvozením jejich vyjádření. Pokud $c^2 \nabla \times \mathbf{B} = \partial \mathbf{E} / \partial t$, magnetické indukční čáry budou vytvářet uzavřené křivky kolem oblastí, v nichž je $\partial \mathbf{E} / \partial t$ největší, tj. na půl cesty mezi maximem a minimem \mathbf{E} . Uzavřené magnetické indukční čáry budou ležet rovnoběžně s rovinou xz mezi vrchy a doly pole \mathbf{E} (Obr. 10). [16]

4.1.2.2 Mezní frekvence obdélníkovém vlnovodu

Je-li rovnice $k_x^2 + k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} = 0$ řešena vzhledem ke k_z , musí vlastně existovat dva kořeny - jeden kladný a jeden záporný. Pak platí že:

$$k_z = \pm \sqrt{\left(\left(\frac{\omega^2}{c^2}\right) - \left(\frac{\pi^2}{a^2}\right)\right)} \quad (42)$$

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

Podle našeho 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“ trubicí, se ještě pohybuje rychlostí ξ . Při postupu k nízkým frekvencím se stane, že z počátku se vlnová délka stále prodlužuje, ale při příliš malém ω se výraz pod odmocninou v (42) náhle stává záporným. Toto nastane, jakmile ω klesne pod $\pi c/a$ - nebo když překročí λ_0 hodnotu $2a$. 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. Pokud však k_z bude v imaginární oblasti, pak představuje vlnění. Za předpokladu, že ω je menší než ω_m můžeme psát:

$$k_z = \pm ik' \quad (43)$$

kde k' je reálné kladné číslo

$$k' = \sqrt{\left(\left(\frac{\pi^2}{a^2}\right) - \left(\frac{\omega^2}{c^2}\right)\right)} \quad (44)$$

Vrátíme-li se nyní zpět k našemu výrazu $E_y = E_0 \sin k_x x e^{i(\omega t - k_z z)}$ pro E_y , dostaneme

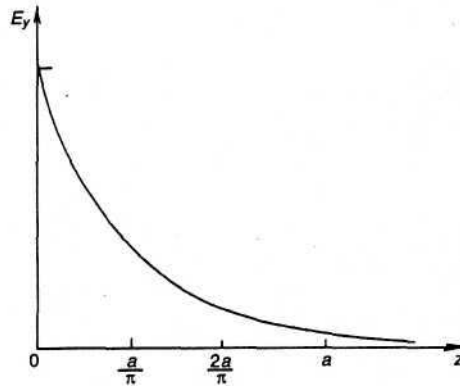
$$E_y = E_0 \sin k_x x e^{i(\omega t - ik'z)} \quad (45)$$

což můžeme napsat ve tvaru

$$E_y = E_0 \sin k_x x e^{\pm k'z} e^{i\omega t} \quad (46)$$

Tento výraz představuje pole \mathbf{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. Toto řešení nezahrnuje zdroje, z nichž vlnění vychází. 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 $k' = \sqrt{\left(\left(\pi^2 / a^2\right) - \left(\omega^2 / c^2\right)\right)}$, vidíme, že pro frekvence pouze trochu nižší než ω_m je číslo k' malé a pole mohou proniknout ve vlnovodu do velké vzdálenosti.



Obr. 17. 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. 17). 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.

Obvykle, když ve fyzice řešíme rovnici a dostaneme imaginární číslo, neznamená to nic fyzikálního. V případě vlnění však imaginární vlnové číslo fyzikální význam má. Vlnová rovnice je stále splněna a imaginární číslo k_z 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.

4.1.2.3 Typizovaná řada obdélníkových vlnovodů

V praxi jsou pro konstrukci vlnovodu používané typizované řady obdélníkových vlnovodů. V tabulce (Tab.3) jsou uvedeny vlnovody dle značení obvyklého u domácích výrobců i dle značení EIA, které se využívá v zahraničí. Tradiční tuzemské značení se skládá z písmene R (rectangular = obdélníkový) a čísla, které určuje doporučené frekvenční pásmo pro využití vlnovodu. Toto frekvenční pásmo je označeno v 10^2 MHz. Tedy například vlnovod R 100 je obdélníkový vlnovod doporučený pro kmitočtové pásmo 10 GHz atp.

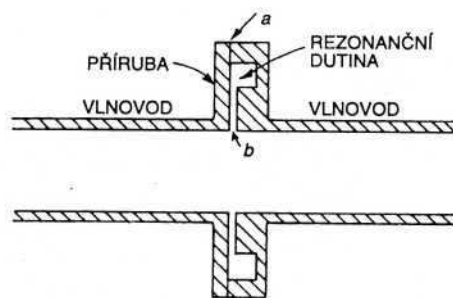
Značení dle EIA se skládá z písmen WR (Waveguide Rectangular) a čísla, které značí délku širší stěny uvažovaného vlnovodu v setinách palce. Například u obdélníkového vlnovodu WR-650 je rozměr širší stěny 7,7 palce, tj. 16,51 cm.[2]

Tab. 3. Typizovaná řada obdélníkových vlnovodů

Značení		Pásmo	f_{cTE10}	Pásmo [GHz]	Rozměry axb [cm]	P_{max} [kW]	α_{min} [dB/m]
EIA	ČR		[GHz]				
WR-650	R 14	L	0,91	1,12-1,70	16,51x8,26		
WR-430	R22	R	1,37	1,70-2,60	10,92x5,46		
WR-284	R32	S	2,08	2,60-3,95	7,21x3,40	10 350	0,02
WR-187	R48	H	3,15	3,95-5,85	4,76x2,22	4 380	0,03
WR-137	R70	C	4,3	5,85-8,20	3,49x1,58	2 290	0,06
WR-112	R84	W	V.26	7,05-10,0	2,85x1,26		
WR-90	R 100	X	6,55	8,20-12,4	2,29x1,02	990	0,12
WR-62	R 140	Ku	9,49	12,4-18,0	1,58x0,79	530	0,18
WR-42	R220	K	14,05	18,0-26,5	1,07x0,43	194	0,39
WR-28	R320	Ka	21,08	26,5-40,0	0,71x0,36	107	0,7
WR-22	R400	Q	26,34	33,0-50,5	0,57x0,28		
WR-19	R500	U	31,36	40,0-60,0	0,48x0,24		
WR-15	R620	V	39,86	50,0-75,0	0,38x0,19		
WR-12	R740	E	48,35	60,0-90,0	0,31x0,015		
WR-10	R900	W	59,01	75,0-110,0	0,254x0,127		
WR-8	R1200	F	73,84	90,0-140,0	0,203x0,102		
WR-6	R1400	D	90,85	110,0-170,0	0,170x0,083		
WR-5	R1800	G	115,75	140,0-220,0	0,130x0,065		

4.1.2.4 Spojování vlnodů

Problém zapojení obvodu s vlnovody je jiný, než odpovídající problém zapojení obvodu při nízkých frekvencích. Pro tento účel bylo vyvinuto mnoho speciálních zařízení tzv. mikrovlnné techniky. Například dva vlnové dílce se spolu obvykle spojují pomocí přírub. 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. 18). Mezi sousedními dílci vlnovodu je ponechán malý prostor a na lícové ploše jedné z přírub je vyhloubena drážka tak, aby vznikla malá dutina. 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 teče poměrně malý proud. Velké proudy ve vlnovodu jen nabíjejí a vybíjejí kapacitu šterbiny (b na Obr. 18), kde dochází pouze k malé disipaci energie.

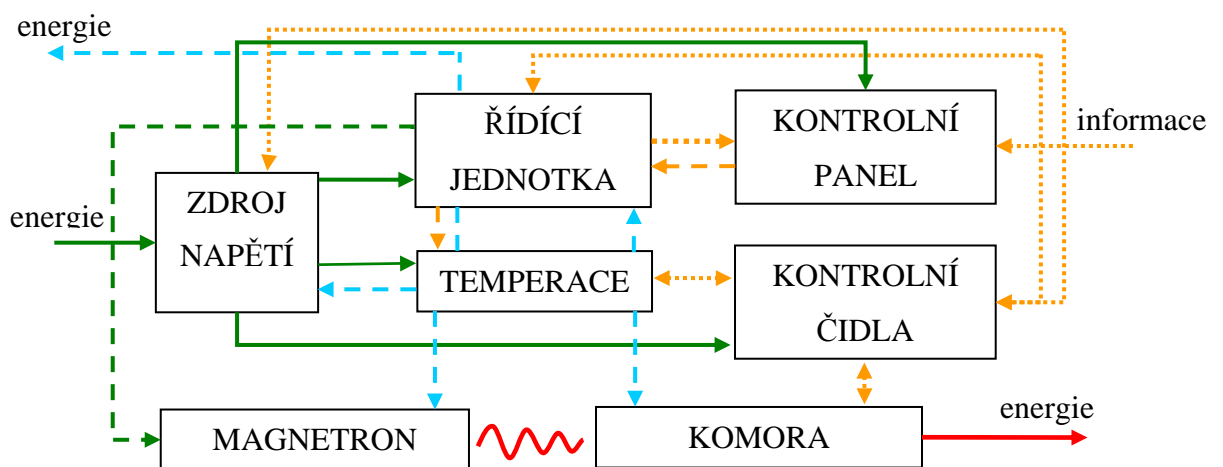


Obr. 18. Spoj mezi dvěma vlnovody, s nízkými energetickými ztrátami.

4.2 Zařízení pro mikrovlnný ohřev

Mikrovlnná zařízení jsou konstruována pro kontinuální, či diskontinuální ohřev kusových, sypkých, kašovitých i tekutých materiálů. Z hlediska jejich vnitřní stavby jsou si zařízení podobná (Obr. 19). Jádrem mikrovlnného zařízení je generátor mikrovlnného záření – magnetron. Výkony používaných magnetronů se pohybují od 0,7 do 10 kW. Zařízení o vyšším výkonu bývá obvykle konstruováno pomocí paralelního zapojení více magnetronů. Účinnost magnetronu je dána jeho velikostí. U magnetronů s malými výkony je účinnost 65%. Pro velké magnetrony nad 5 kW je účinnost až 90%. Při chodu magnetronu vznikají ztráty, které jsou ve formě ztrátového tepla. Pro nižší výkony (do 2 kW) je použito chlazení vzduchem, pro vyšší výkony bývá použito chlazení kapalinou. Řízení výkonu bývá obvykle realizováno řídicí jednotkou, která je programovatelná obsluhou skrze kont-

rovní panel. Řízení výkonů bývá v nejjednodušších případech realizováno cyklickým vypínáním magnetronu. O bezpečnost procesu se starají měřicí čidla. K nejčastěji používaným čidlům patří teplotní a pohybová čidla. Teplotní čidla mohou sledovat kritické teploty strojních komponent, či aktuální teplotu ohřívaného materiálu. Polohová čidla sledují např. otevření bezpečnostních krytů za chodu zařízení, popřípadě jiné kolizní stavy. Mikrovlnné zařízení bývá vybaveno transformátorem napětí, který dodává potřebné napětí jednotlivým částem (magnetron 4,6V 1kV, řídicí jednotka 48V, 12V, pomocné zařízení 230V, apod.).



Obr. 19. Blokové schéma mikrovlnného zařízení.

4.2.1 Diskontinuální komory

Diskontinuální komory umožňují zpracovávat rozměrné kusové výrobky, které kvůli limitujícímu výškovému rozměru nelze ohřívat na kontinuální lince s otevřeným vstupem, kde by docházelo k nepřijatelnému vyzáření elektromagnetického pole do okolního prostoru. Dále se používají tzv. šaržové ohřevy a to v případech, kdy musí být průběh ohřevu pozvolný, nebo vyžaduje prodlevy. K odstranění nevýhod stacionárního působení elektromagnetických vln jsou zařízení vybavena mechanismy, jež zabezpečují pohyb materiálu, čímž se dosáhne zlepšení prohřevu materiálu a nebo zařízení sloužící k rozptylu mikrovlnného pole uvnitř komory. Výsledkem je rovnoměrnější rozložení teploty v ohřívaném produktu.

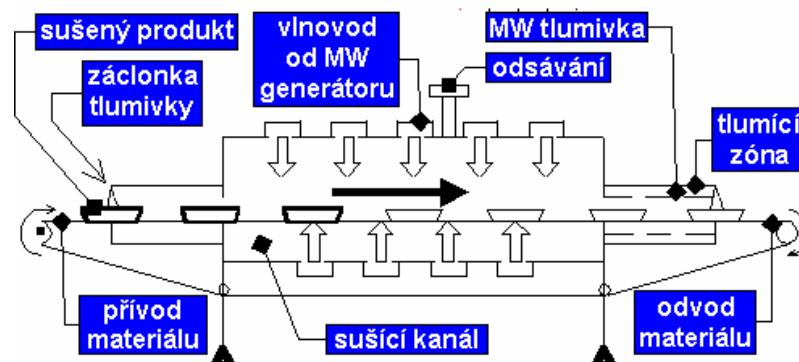
Pro minimalizaci ztrátových časů spojených se zakládáním a vyjímáním vsádky slouží příslušenství k zavádění, akumulaci a vyprazdňování. Podobně jako kontinuální linky mohou být šaržová zařízení vybavena horkovzdušnými systémy, ventilací, chlazením atp. [19]



Obr. 20. Univerzální MW komora 850x1400x800 mm o výkonu 24 kW.

4.2.2 Kontinuální komory (linky)

Umožňují zpracování většiny sypkých i kusových, balených nebo volně ložených produktů. Při ohřevu projíždějí produkty na dopravním pásu tunelem tvořeným jednou nebo více komorami. Tímto způsobem je ale možné zpracovávat materiál jen do určitého rozměru, jenž je limitován maximální možnou výškou tunelu. Ta je omezena proto, aby se zabránilo vyzáření do okolního prostoru. Kvůli nežádoucímu vyzáření se na vstup a výstup instalují tzv. tlumivky.



Obr. 21. Schéma kontinuálního sušícího zařízení.

Na kontinuálních linkách lze taktéž zpracovávat pastovité suspenze, které se přepravují v potrubí pomocí šneku či spirály, nebo tekutiny, jež potrubím protékají. Tímto způsobem se dosahuje vysoké teplotní homogenity v celém objemu materiálu. Tepelné dávky se regulují řízením rychlosti transportu a velikostí vyzářeného výkonu.

Mikrovlnné komory mohou být doplněny prvky horkovzdušných systémů, ventilací, chlazením atp. Tak lze např. pomocí soustavy škrťících klapek pro regulaci přívodu a odvodu vzduchu v jednotlivých komorách dosáhnout kombinace teplotních režimů (náhřev – pro- pařování – sušení). Používá se však i obrácený způsob, kdy se průběžná mikrovlnná komo- ra integruje do existující linky s konvenčním systémem nebo se předradí na její vstup či doplní na konec linky. [19]



Obr. 22. Mikrovlnná pásová sušička s výkonem 64kW pro vysoušení keramiky.

4.3 Modelování elektromagnetického pole pomocí FEM

Pro analýzy elektromagnetického pole se v současné době využívá různých softwarů, zmiňme nejznámější: COMSOL Multiphysics 3.5 (RF module), MicrowaveLab a QuickWave. V práci bude využíván software COMSOL Multiphysics.

Švédská společnost COMSOL®. COMSOL Multiphysics umožňuje modelování a simulaci fyzikálních procesů popsaných parciálními diferenciálními rovnicemi (PDE) s následným řešením metodou konečných prvků. Program má k dispozici specializované moduly s definovanými parciálními diferenciálními rovnicemi a uživatelskými dialogy pro zadávání vlastností materiálů i okrajových podmínek. V současné době existují Structural Mechanics Module (Modul pro pružnost a pevnost), Heat Transfer Modul (Modul pro výpočet přestupu tepla), MEMS Module (Modul pro mikroelektromechanické systémy), AC/DC

Module (Modul pro výpočet jevů v prostředí stejnosměrného a střídavého proudu nízkých frekvencí), RF Module (Modul pro výpočet vysokofrekvenčních obvodů), Chemical Engineering Module (Chemickotechnologický modul) a Earth Science Module (Modul pro přírodní vědy).[17]

RF Module - Radiofrekvenční modul umožňuje modelovat mikrovlnná zařízení a součásti z optiky a obecně usnadňuje návrh systémů pracujících s elektromagnetickým vlněním ve vysokých frekvencích. Lze vytvářet prototypy zařízení, které přenášejí, přijímají nebo zpracovávají elektromagnetické vlny ve frekvenčním rozsahu od radiových do optických vln. Uživatel má možnost brát v úvahu multifyzikální vlivy zahrnující například interakce mezi přestupem tepla a mechanickým zatížením konstrukce. Je možné zkoumat např. vliv tepla na frekvenční odezvu mikrovlnného filtru nebo výkonové vlnovody. Modul nabízí připravené multifyzikální aplikace například pro mikrovlnné teplo. Uživatel tak nemusí složitě zkoumat, kterou aplikaci do multifyzikální úlohy zařadit.[18]

Oblasti použití: antény, vlnovody a dutiny, cirkulátory a směrové spojovací prvky, generování tepla v plazmě, vysokorychlostní spoje, mikrovlnné a RF vyzařování, mikrovlnné ozařování zhoubných nádorů, mikrovlnná zařízení, mikrovlnné spékání, výzkum ropy a ropné plošiny, formulace rozptýlených polí, analýza S-parametrů při návrhu antén, vliv teploty na antény a vlnovody, zahřívání mozkové tkáně mobilním telefonem.

4.4 Biologické účinky mikrovlnné energie a hygienické normy

Biologické účinky elektromagnetických vln jsou v mnoha zemích světa včetně ČR předmětem výzkumů již více než 50 let. Jedná se ale o velmi komplikovanou problematiku, a tak do uzavření a vyhodnocení těchto studií zbývá ještě mnoho práce.

Realizace a vyhodnocení mnohých experimentů pro studium biologických účinků elektromagnetického pole je navíc komplikováno tím, že tyto experimenty nemohou být aplikovány na lidi. Proto se experimentuje na zvířatech, ne vždy se však zjištěné účinky dají přímočaře a jednoznačně přenášet do humánní medicíny.[2]

4.4.1 Biologické účinky

Dle přehledu literatury existuje již několik tisíc prací publikovaných v této oblasti, mnoho z nich má ale dosti spekulativní charakter a výsledky některých studií jsou protichůdné. To je dáno tím, že realizace experimentů tohoto druhu není snadná, zabránit rušivým vlivům

je často obtížné až nemožné. Ve skutečnosti absorpce a tedy i účinky jsou výrazně závislé na vlastnostech biologických tkání, zejména na těchto faktorech:

- dielektrických vlastnostech tkáně,
- geometrickém tvaru a rozměrech tkáně,
- trojrozměrném nehomogenním prostorovém rozložení tkání,
- orientaci a polarizaci EM pole,
- kmitočtu EM pole,
- zdroji vyzařování EM pole,
- podmínkách ozáření,
- délce trvání experimentu,
- intenzitě elektrického resp. magnetického pole.

V Odborné literatuře bývá zvykem dělit biologické účinky na tepelné a netepelné:

Netepelné účinky

Netepelné účinky jsou vlastně skutečné účinky elektromagnetického pole, a to i při velmi nízké energetické úrovni, kdy nedojde k absorpci většího výkonu a tudíž ani ke zvýšení teploty sledované biologické tkáně. Studium vlivu elektromagnetického pole na buňku "in vitro" se zatím neprokázaly škodlivé účinky na enzymy, DNA, buněčnou membránu, ani na jiné části buněk.

Tepelné účinky

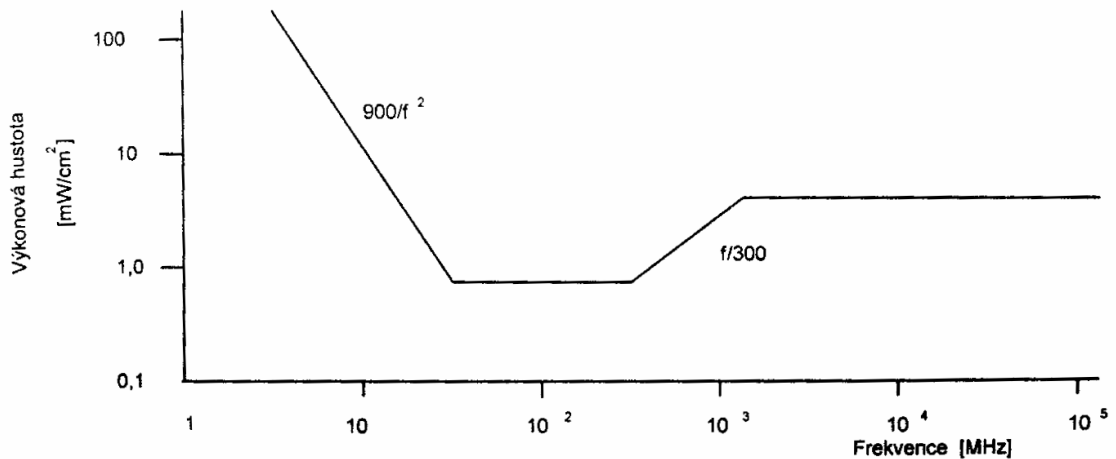
Jsou chápány jako projev nucené zvýšené teploty při absorpci vyšší úrovně elektromagnetické energie, kdy již dojde k ohřevu biologické tkáně.

Ve skutečnosti mohou být tyto tepelné účinky doprovázeny i vlastními účinky elektromagnetického pole. Obecně je pak velmi obtížné odděleně vyhodnotit výsledný efekt tepelných a výsledný efekt netepelných účinků.[2]

1) Hygienická norma dle ANSI

V USA dospěli k názoru, že hranice bezpečné absorpce elektromagnetické energie v biologické tkáni je přibližně na úrovni $SAR = 4 \text{ W/kg}$. Nad touto hranici již dochází ke zvyšování teploty exponované biologické tkáně. Pro dosažení bezpečnostního faktoru 10x pak

byla zvolena hranice hygienické normy SAR = 0,4 W/kg. Na obrázku (Obr. 23) je znázorněna frekvenční závislost přípustné hodnoty výkonové hustoty. Všimněte si výrazně přísnějších požadavků na hodnoty limitu ve frekvenčním intervalu 30 až 300 MHz. V tomto frekvenčním pásmu totiž dochází k rezonancím lidského těla, pokud jej zjednodušeně interpretujeme jako dipól. Právě při rezonanci by se mohla absorbovaná energie několikanásobně zvýšit, proto je v této frekvenční oblasti norma mnohem přísnější.



Obr. 23. Hygienická norma ANSI pro vysokofrekvenční elektromagnetické pole.

2) Výnos hlavního hygienika ČR

Výnos hlavního hygienika ČR definuje dávku účinku elektromagnetického pole na živé organismy resp. biologickou tkáň jako součin hustoty výkonu elektromagnetického pole s dobou, po kterou působí na živý organismus resp. biologickou tkáň. Radiofrekvenční a mikrovlnné kmitočtové spektrum je pak rozděleno do tří kmitočtových pásem, ve kterých jsou definovány maximální přípustné hodnoty zmíněného součinu $(|E|^2 t)_{\max}$ nebo $(pt)_{\max}$. První ze série tabulek uvádí únosné hodnoty ozáření elektromagnetickým polem platné pro obyvatelstvo, které není pravidelně lékařsky kontrolováno.

Tab. 4. Maximální povolené hodnoty ozáření elektromagnetickým polem pro obyvatelstvo.

Kmitočtové pásmo [MHz]	$(E ^2 t)_{\max} [(V/m)^2 \cdot h]$	$(pt)_{\max} [mW \cdot h \cdot cm^{-2}]$
$f < 30$	700	1,87
$30 < f < 300$	100	0,27
$300 < f$	45	0,12

Tab. 5. Přípustná denní dávka mikrovlnného ozáření pro pracovníky obsluhující mikrovlnná zařízení s lékařskou kontrolou.

Kmitočtové pásmo [MHz]	$(E ^2t)_{\max}$ [(V/m) ² .h]	$(pt)_{\max}$ [mW/.h.cm ⁻²]
f<30	7000	18,7
30<f<300	800	2,16
300 <f	300	0,8

Následující tabulky pak uvádí nepřekročitelné limity pro okamžité hodnoty ozáření elektromagnetickým polem.

Tab. 6. Nepřekročitelné limity pro okamžité hodnoty veličin E_{\max} a p_{\max} pro obyvatelstvo.

Kmitočtové pásmo [MHz]	$(E ^2t)_{\max}$ [V/m]	$(pt)_{\max}$ [mW/.cm ⁻²]
f<30	80	17
30<f<300	30	2,4
300 <f	10	0,25

Tab. 7. Nepřekročitelné limity pro okamžité hodnoty veličin E_{\max} a p_{\max} pro obsluhy mikrovlnných zařízení s lékařskou kontrolou.

Kmitočtové pásmo [MHz]	$(E ^2t)_{\max}$ [V/m]	$(pt)_{\max}$ [mW/.cm ⁻²]
f<30	300	238
30<f<300	100	26,5
300 <f	31,6	2,65

5 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

V teoretické části jsme se zabývali problematikou mikrovlnného záření. Byly uvedeny základní matematické popisy elektromagnetického pole. Poznání těchto zákonitostí umožňuje efektivní použití FEM software pro modelování a simulaci fyzikálních procesů, což vede k efektivnímu návrhu mikrovlnného zařízení.

Ze studie také vyplývá, že ne všechny materiály vykazují obdobné chování v elektromagnetickém poli. Dielektrické vlastnosti materiálu jsou silně závislé na použité frekvenci a jejich teplotě. Při dielektrickém ohřevu dochází ke stejnoměrnému ohřevu v celém objemu, což přináší hlavní výhody této technologie. Pouze při ohřevu dielektricky heterogenních materiálů může docházet k nestejnomyernému objemovému ohřevu. Tohoto se v praxi využívá například při selektivním mikrovlnném ohřevu. Mezi další výhody dielektrického ohřevu můžeme uvést zvýšení kvality a rychlosti ohřevu, což vede k energetickým úsporám, které pozitivně ovlivňují ekonomickou i ekologickou podstatu.

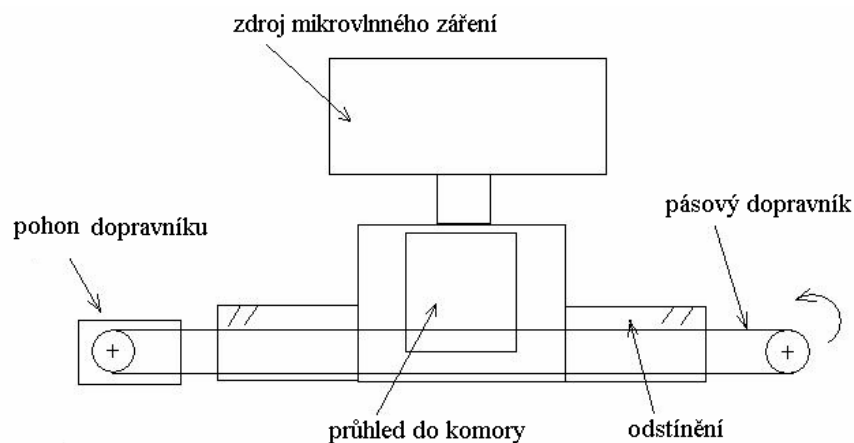
II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍL PRÁCE

Mikrovlnná technologie je perspektivní náhradou konvenčních metod ohřevu. Nabízí nesporné výhody vedoucí k úsporám prostředků a zefektivnění procesu výroby. Dané problematice se již nějakou dobu věnuje ústav výrobního inženýrství ve spolupráci s firmou Barum Continental s.r.o.. Ze strany Barum Continental byl projevěn zájem o zařízení na němž bude možné provádět experimentální simulace adaptované na kontinuální technologii mikrovlnného ohřevu. Cílem práce bylo navrhnout takové zařízení, které bude sloužit jako modelové laboratorní zařízení ke studiu rozložení elektromagnetických polí, energetických ztrát a tepelných zisků na ohřívaném vzorku. Poznáním těchto jevů bude možno určit správné procesní podmínky, vedoucí k návrhu reálného zařízení pro průmyslové využití. Uvažuje se o využití dielektrického předeřevu pro teplé zásobování extrudéru konfekčních dílů. Další eventuální využití připadá na následnou předvulkanizaci konfekčních dílů.

7 KONCEPCE ZAŘÍZENÍ

Vycházíme-li z požadavků, které se přímo odvíjí od požadované funkce navrženého zařízení, je jasné, že hledáme zařízení, které bude svojí variabilitou umožňovat nezávisle měnit základní parametry ovlivňující rychlost a homogenitu ohřevu. Základní schéma (Obr. 24) vystihuje konstrukční uspořádání jednotlivých celků navrženého zařízení.



Obr. 24. Základní schéma navrhovaného zařízení

Shrneme-li technické požadavky, dostaneme výchozí informace pro návrh zařízení:

a) Kontinuální provoz

Navržené zařízení má plnit funkci laboratorního modelového zařízení. V případě, že se osvědčí aplikace kontinuálního ohřevu gumárenských směsí, bude navržené zařízení sloužit jako modelové pro návrh reálného zařízení pro gumárenskou praxi.

b) Regulace výkonu

Vzhledem k rozličným dielektrickým vlastnostem materiálů plánovaných pro ohřev v tomto zařízení, bude nezbytné umožnit regulaci výkonu v širokém spektru. Navržené zařízení bude umožňovat regulaci energie dodávané ohřívanému vzorku dvěma způsoby. Prvním způsobem regulace bude nastavení konstantní rychlosti pásu, tedy materiálového toku, a regulace výkonu magnetronu. Druhým způsobem regulace bude nastavení výkonu magnetronu a regulování rychlosti pásu. Regulací se budeme snažit nalézt optimální poměr mezi výkonem magnetronu a materiálovým tokem. Dá se předpokládat, že pokud použijeme nižší výkon magnetronu a nižší rychlost pásu, materiálový tok bude pro dosažení stejné výstupní teploty nižší, ale homogenita teplotního pole ohřívaného vzorku bude vyšší, neboť se uplatní vedení tepla.

V praxi obvykle vycházíme ze zadaného materiálového toku a hledáme optimální výkon, neboť kontinuální zařízení bývá vázáno na další komponenty výrobní linky.

c) Optimalizace rozložení teplotního pole

Do jisté míry bude možno rozložení teplotního pole ovládat regulací výkonu (viz odstavec Regulace výkonu). Uvažujeme-li nízkou tepelnou vodivost ohřívaného materiálu je nezbytné optimalizovat geometrii komory tak, aby elektromagnetické pole a následné dielektrické ztráty byly v rovině materiálu homogenní a nevznikaly takzvané teplotní špičky.

d) Možnost měření, optická kontrola

Vzhledem k využití zařízení pro experimentální činnost a na ni vázané měření bude výhodou, aby byl prostor přístupný pro vizuální kontakt či snímání procesu termokamerou.

e) Snadný servis – úpravy zařízení

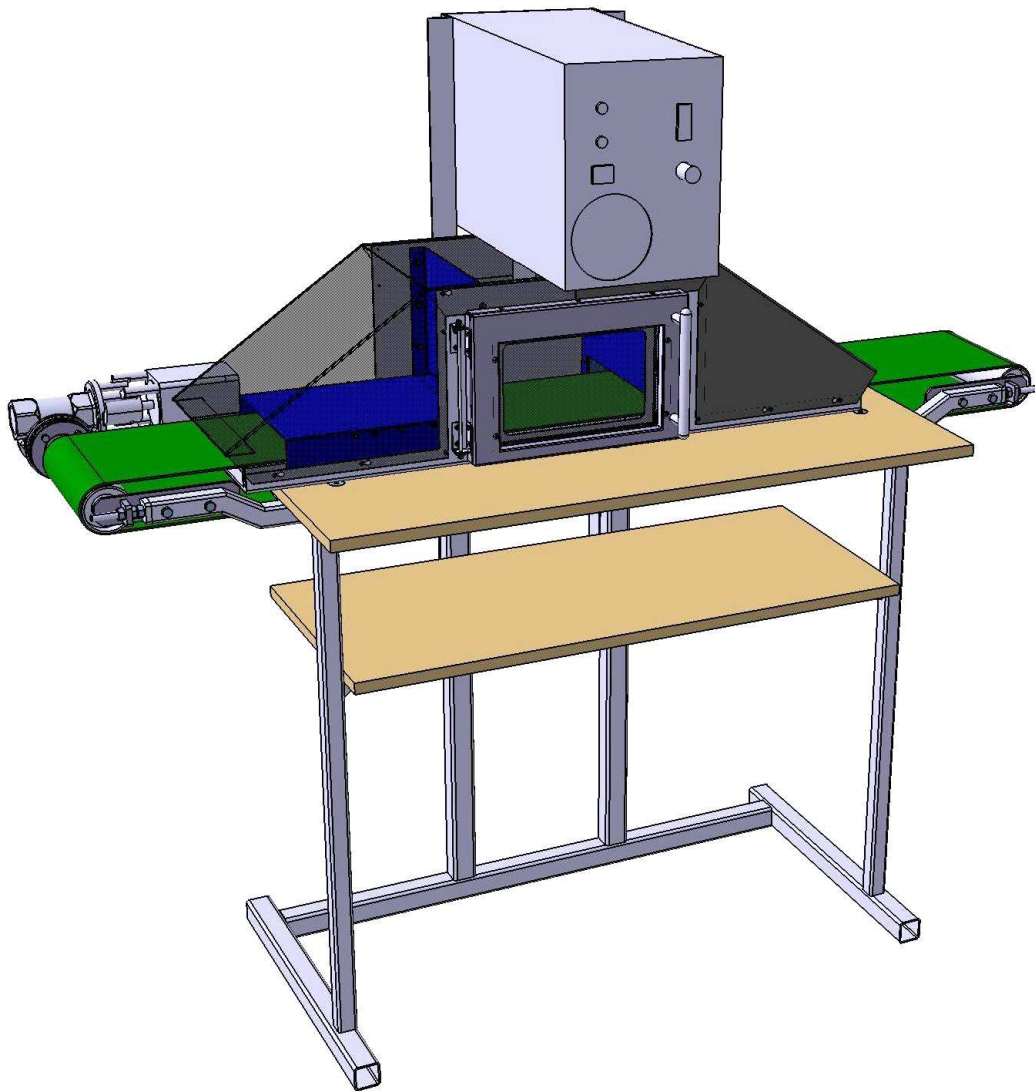
Zařízení musí být navrženo s ohledem na možnost rychlé a snadné změny, aby uplatnilo svoji variabilitu při experimentech. V případě potřeby servisu musí být jednotlivé prvky krytování snadno odnímatelné.

e) Ergonomie

Posledním kritériem navrženého zařízení jsou základní ergonomické požadavky vycházející z potřeb obsluhy.

8 POHLED NA NAVRŽENÉ ZAŘÍZENÍ

Po odborné konzultaci se zadávající stranou se dospělo k závěru, že technickým požadavkům vyhovuje nejlépe toto navržené řešení (Obr. 25 Pohled na navržené řešení se zprůhledněnou částí levého stínícího krytu). S ohledem na požadavek studia rozložení elektromagnetického pole uvnitř komory bude možné měnit geometrii komory pomocí výškového polohování zdroje záření vůči komoře. Dále bude možné vkládat do prostoru komory stínící či rozptylové prvky upravující výsledné rozložení teplotního pole. Toto pole bude možno sledovat například pomocí termokamery, neboť prostor komory bude přístupný. Rozměry jednotlivých celků byly voleny s ohledem na funkčnost zařízení, opírají se také o příslušné FEM analýzy.



Obr. 25. Pohled na navržené řešení

9 NÁVRH A DIMENZOVÁNÍ JEDNOTLIVÝCH PRVKŮ ZAŘÍZENÍ

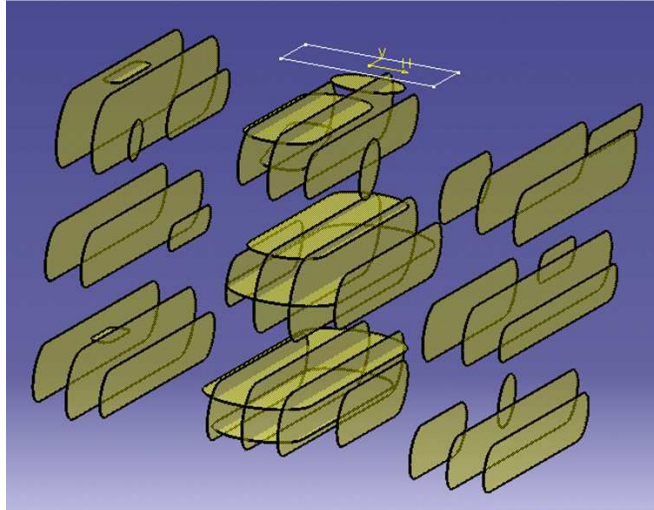
9.1 FEM podpora při návrhu komory

V průběhu návrhu komory bylo použito software využívající metodiku FEM (Finite Element Method). Konkrétně byl použit program COMSOL Multiphysics.

COMSOL Multiphysics nabízí širokou škálu modulů, při návrhu komory byl využit RF Module - Radiofrekvenční modul (viz. kapitola 4.3). Tento modul umožnil optimální návrh geometrie komory s ohledem na rozložení elektromagnetického pole a jeho návaznosti na následné rozložení pole teplotního.

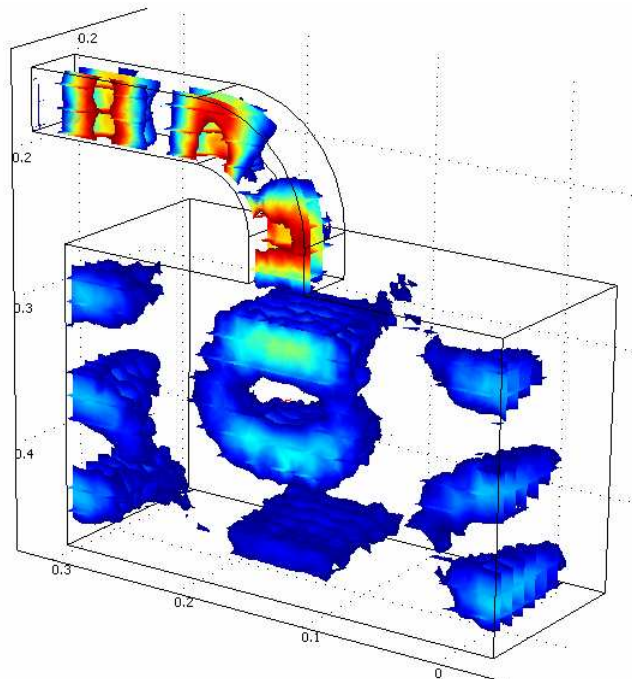
Samotné modelování daného problému spočívá v aplikování vhodných okrajových podmínek na daný 3D model. Při tomto procesu je možno chybně reprezentovat některé z podmínek definujících fyzikální model, což by vedlo ke zkresleným výstupům. Při modelování pevnostních problémů jsou obvykle výsledky analýz předvídatelné. V případě chybné definice je zkušený návrhář schopen definovat chybu a následně model upravit. V problematice vysokofrekvenčních obvodů a jejich následné reprezentaci si nemůžeme být tak jisti, neboť 3D modely představují složité těžce předvídatelné systémy.

Jako demonstrativní příklad byl vytvořen 3D model mikrovlnné komory, kterou ve své diplomové práci využíval Ing. Michal Biolek. Jeho práce obsahovala experimentální měření rozložení elektromagnetického pole uvnitř komory. Měření spočívalo v rozložení termopapíru v prostoru komory. Při tepelné expozici došlo v místě nejvyšší intenzity ke zčernání termopapíru. Výsledná data byla překreslena do 3D, tím vznikl model definující místa maximální intenzity ohřevu. V COMSOL Multiphysics reprezentuje tento model scattered electric displacement (ztrátový elektrický posun – elektrická indukce) s fyzikální jednotkou ($C \cdot m^{-2}$).



Obr. 26. 3D model reálného rozložení maxim ohřevu v mikrovlnné komoře.

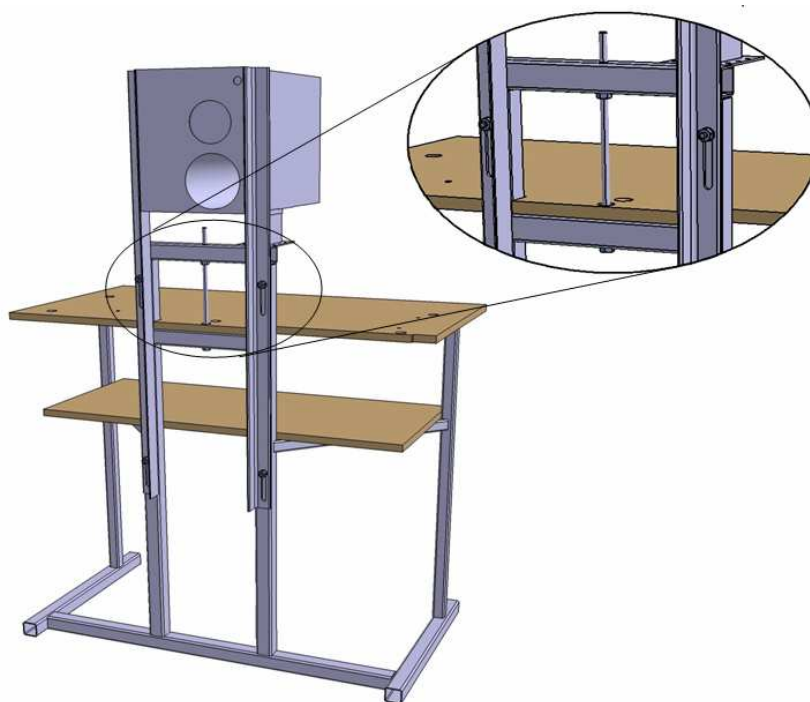
Srovnáme-li výsledky FEM analýzy s výsledky měření dostáváme téměř identické modely. Při FEM analýze bylo využito předpokládané symetrie dané úlohy pro zjednodušení výpočtového modelu. Na obrázku (Obr. 26) vidíme celý 3D model, který je výsledkem měření a na obrázku (Obr. 27) poté symetrickou polovinu modelu jako výsledek RF analýzy. Vzhledem ke shodě naměřených dat s výsledky analýz můžeme fyzikální modely v COMSOL Multiphysics RF module považovat za realistické. Hledání optimální geometrie se proto bude opírat o tyto analýzy.



Obr. 27. Výsledek RF analýzy - rozložení elektrické indukce.

9.2 Nosný rám - stůl

Navržený pracovní stůl bude plnit funkci nosného rámu pro vzájemné ustavení jednotlivých částí systému v celek. Při jeho návrhu byla řešena především problematika vzájemného ustavení prvku komora vůči zdroji mikrovlnného záření. Zdroj mikrovlnného záření je upevněn na pomocném rámu, který je polohovatelný v jednom směru, čímž je možné měnit pracovní výšku komory. Změnou pracovní výšky komory měníme její objem a celkovou geometrii, což vede ke změně rozložení elektromagnetického pole v návaznosti na změnu teplotního pole ohřívaného vzorku.



Obr. 28. Rám s detailem polohovacího mechanismu

9.3 Magnetron

Jako zdroj záření bude použit externí zdroj elektromagnetického záření, který byl vyroben firmou Romill MWG-LAB. Zdroj byl zakoupen univerzitou pro projekty výzkumu dielektrického ohřevu. Jeho maximální výkon je 900W, tento výkon je možno plynule regulovat v celém rozsahu.



Obr. 29. Externí zdroj elektromagnetického vlnění od firmy ROMILL

Ovládací prvky MWG-LAB tvoří hlavní vypínač, kterým uvedeme zařízení do pohotovostního stavu. Činnost magnetronu se spustí bílým tlačítkem 1 (start) a přeruší 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 %). Na činnost magnetronu upozorňuje modře blikající dioda (mw).[22]



Obr. 30. Ovládací panel zdroje ROMILL

9.3.1 Energetická bilance

Pro následný návrh pásového dopravníku potřebujeme znát výkon zařízení. Proto vytvoříme zjednodušený bilanční model. Obecná bilanční rovnice říká: „Vstup plus vznik rovná se výstup plus akumulace“. Pro naše řešení poté obecně platí:

$$\dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{DE} = \dot{Q}_z + \dot{Q}_{out} \quad (47)$$

kde:

\dot{Q}_{in} - tepelný tok dodávaný se vstupem vzorku [W]

\dot{Q}_{DE} - tepelný tok dodávaný DE ohřevem [W]

\dot{Q}_z - tepelný tok odvedený v tepelných ztrátách [W]

\dot{Q}_{out} - tepelný tok odvedený ve vzorcích [W]

Rozbor jednotlivých složek tepla pak lze popsat:

Tepelný tok dodávaný ve vzorcích:

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m} \cdot c_s \cdot t_{in} \quad (46)$$

kde:

c_s – střední měrná tepelná kapacita vzorku [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

\dot{m} – hmotnostní tok ohřívaného materiálu [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]

t_{in} – průměrná teplota vzorku na vstupu [K]

Pro teplotní tok dodávaný DE ohřevem platí:

$$\dot{Q}_{DE} = P \cdot \eta \quad (49)$$

kde:

P – výkon magnetronu [W]

η – celková účinnost DE ohřevu

Tepelný tok odvedený ve ztrátách:

$$\dot{Q}_z = A \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (50)$$

kde:

A – ochlazovaná plocha vzorku [m^2]

α – koeficient přestupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

ΔT – rozdíl teploty povrchu vzorku a teploty okolního prostředí [K]

Tepelný tok odvedený ve vzorcích:

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m} \cdot c_s \cdot t_{out} \quad (51)$$

kde:

c_s – střední měrná tepelná kapacita vzorku [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

\dot{m} – hmotnostní tok ohřívaného materiálu [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]

t_{out} – průměrná teplota vzorku na výstupu [K]

9.3.2 Odhadovaný výkon zařízení

Zanedbáme-li tepelné ztráty a dosadíme do rovnice energetické bilance konkrétní hodnoty ($P = 900 \text{ W}$, $\eta = 0,4$, $c_{es} = 2100 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $t_{in} = 293 \text{ K}$, $t_{out} = 343 \text{ K}$) dostáváme orientační materiálový tok $0,0086 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ (1 kg ohřeji o 50°C za 116 s). Pro ověření konzultuji tento výsledek s výsledky diplomové práce Ing. Petry Loučkové, kde ohřev 1 kg 100 MW bude trvat 1,1 s [20] (vztaženo na 900W ohřeji 1kg za 122 s).

Při návrhu dopravníku můžeme vycházet z tohoto odhadu. Rychlost pásu a maximální průchodný profil pásu bude volen s dostatečnými kapacitními rezervami.

9.4 Vlnovod

Externí zdroj elektromagnetického záření má vlnovod obdélníkového tvaru o vnitřních rozměrech 87,4 x 42 mm. Délka vlnovodu od středu antény po přírubu činí 145 mm.

Po konzultaci s výrobcem zdroje byla zvolena vertikální poloha upevnění zdroje přímo na stropní část komory. Díky tomuto řešení odpadá nutnost prodloužení vlnovodu, snižuje se počet spojů vlnovodu na minimum.

9.5 Komora

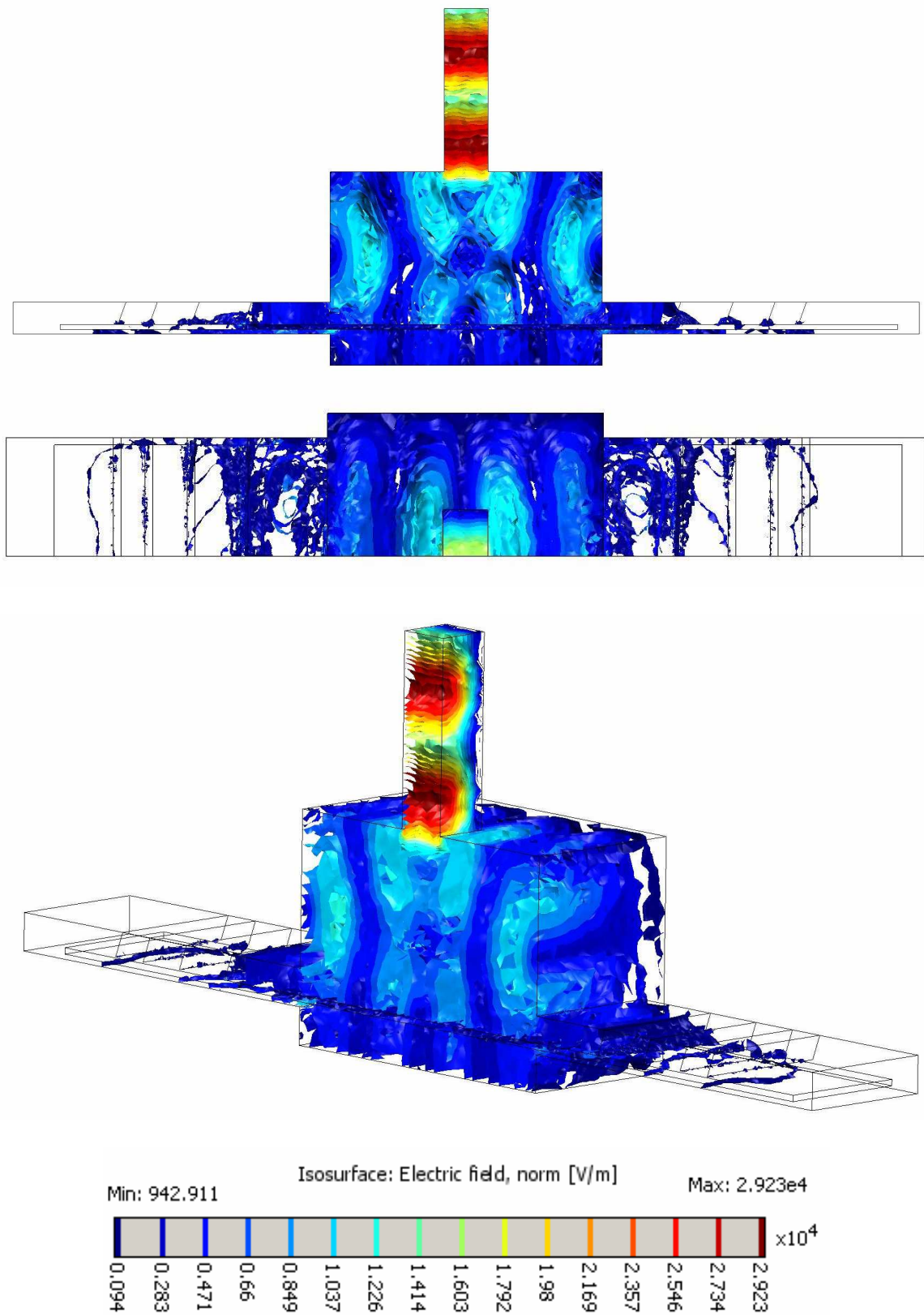
Vzhledem ke geometrii ohřívaného materiálu byly zvoleny základní půdorysné rozměry komory 260 x 270 mm. Výšku komory bude možno regulovat v rozmezí od 145 – 210 mm (počítáno od pásu po strop komory). Regulační rozsah pokrývá polovinu vlnové délky použitého záření (ve volném prostoru). Na základě FEM analýzy lze při změně výšky pozorovat změnu rozložení teplotního pole v materiálu.

Původní myšlenka byla upravit běžnou mikrovlnnou komoru pro ohřev potravin v domácnosti, avšak propojení upravené mikrovlnné komory s pásovým dopravníkem by bylo komplikované. Proto bylo od myšlenky upuštěno.

9.5.1 FEM model navržené komory

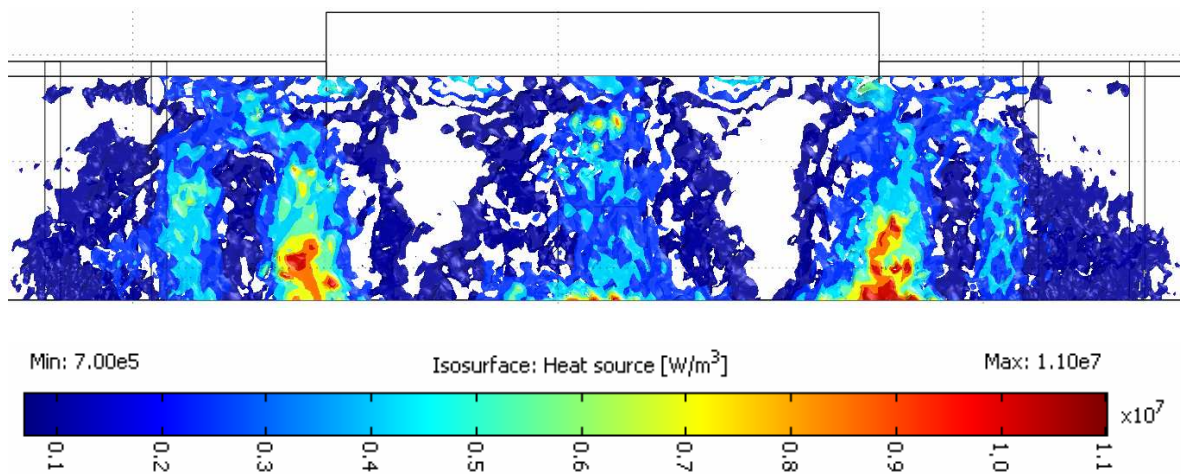
Pro analýzy byly vytvořeny vždy zjednodušené 3D modely komory, které využívaly předpokladu symetrické úlohy. Veškeré ukázky výsledků analýz v této práci jsou vždy symetrickou polovinou reálného modelu. Využití symetrie bylo nezbytné, neboť matematický model řešené úlohy narážel svojí složitostí na strop systémových požadavků, které byly pro naše podmínky akceptovatelné. Dalším krokem bylo přiřazení příslušných okrajových podmínek plochám, definice materiálových vlastností, vysíťování tetrahedral objemovými elementy a spuštění samotného výpočtu. Při hledání vhodné geometrie komory bylo takto vytvořeno přes 30 modelů, až bylo nalezeno optimální řešení.

Výsledky analýz nabízí celou řadu závislých veličin. Pro naše řešení jsou nejdůležitější intenzita elektrického pole (electric field) a intenzita tepelného zdroje (heat source), na obrázku (Obr. 31) jsou zachyceny tři prostorové pohledy na výsledné rozložení elektrického pole komory s pracovní výškou 155 mm. Elektrické pole je na obrázku (Obr. 31) reprezentováno izoplochami.

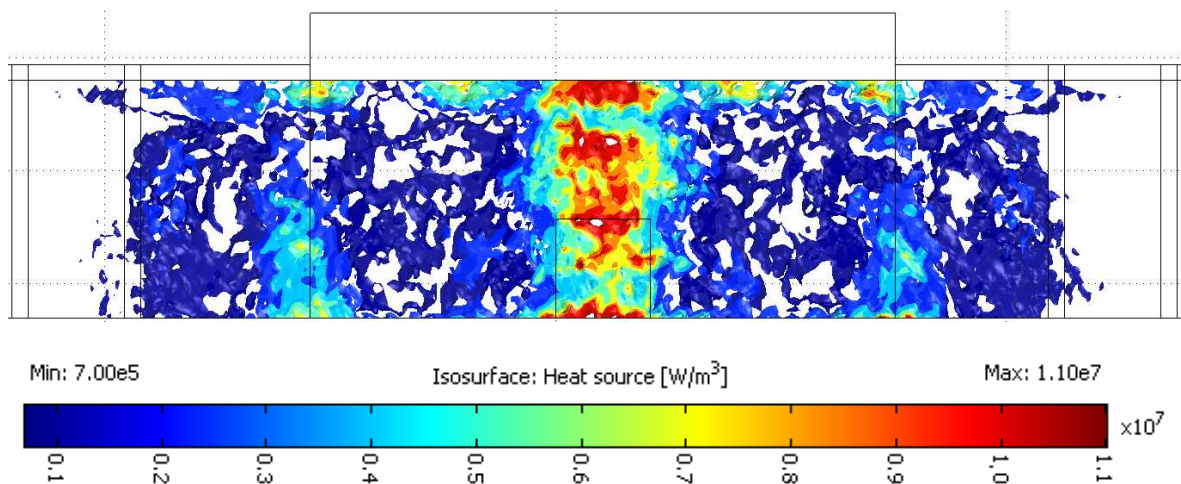


Obr. 31. Rozložení elektrického pole pro nastavení výšky 155 mm

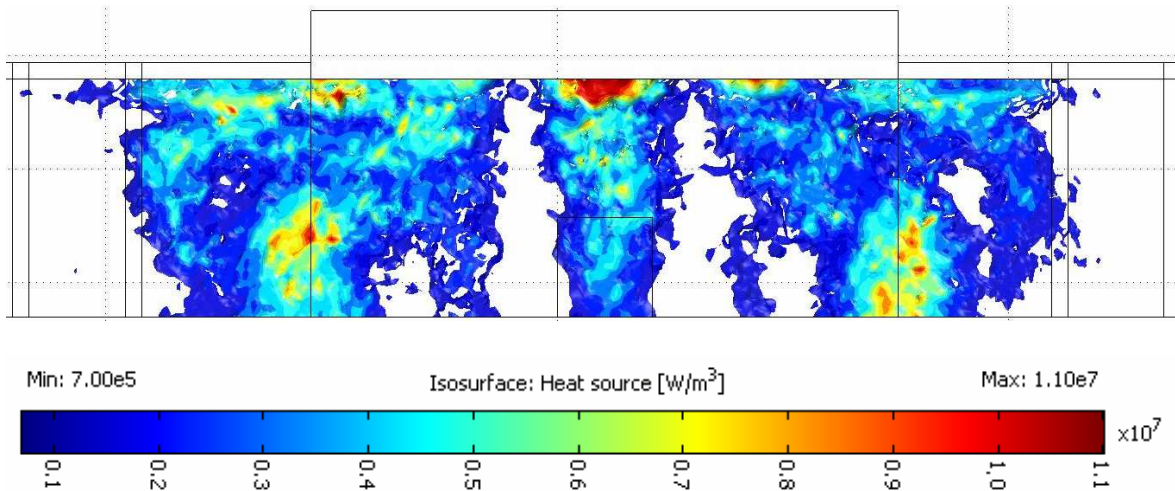
Následující tři obrázky (Obr. 32, 33, 34) reprezentují rozložení intenzity vnitřního zdroje, tato veličina v Comsol Multiphysics definuje míru energie, kterou je materiál ohříván přeměnou mikrovlnné energie. Veličina je materiálově závislou, avšak pro posouzení výsledného rozložení teplotních polí ji lze považovat za univerzální pro libovolné materiály, neboť se změnou dielektrických materiálových konstant dochází pouze k úměrné změně intenzity, nikoli ke změně samotného rozložení v prostoru. Při nastavení minimální konstrukční výšky 145 mm bude docházet k nejintenzivnějšímu ohřevu v místě napojení komory s výstupními tunely. Toto nastavení není z hlediska rozložení polí výhodné, nejvhodněji vychází teplotní rozložení kolem 155 mm. Při dalším zvyšování pracovní výšky klesá intenzita vnitřního zdroje v oblasti středu materiálu a přesouvá se k okrajům. Bude zajímavé porovnat výsledné rozložení teplotních polí na zhotoveném zařízení a srovnat jej s těmito studiemi.



Obr. 32. Rozložení intenzity vnitřního zdroje pro výšku 145 mm



Obr. 33. Rozložení intenzity vnitřního zdroje pro výšku 155 mm



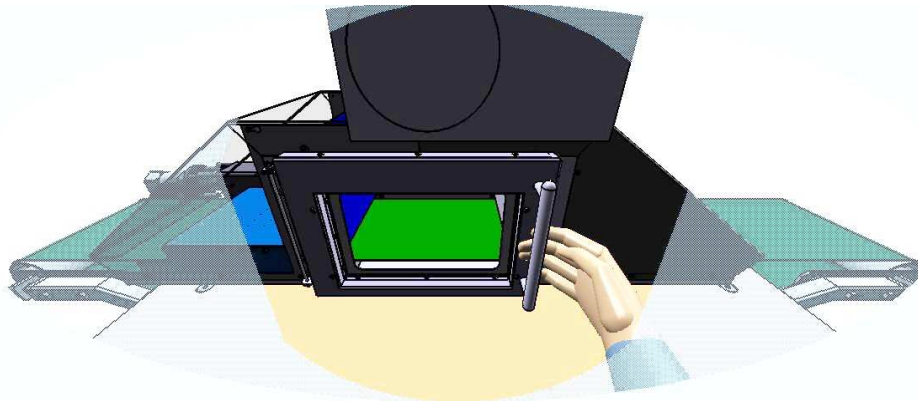
Obr. 34. Rozložení intenzity vnitřního zdroje pro výšku 200 mm

9.5.2 Variabilita

Koncepce základního rámu komory vychází z nároků na vysokou variabilitu, proto byla navrhnutá jako samonosný U profil ohýbaný z plechu tloušťky 2 mm. K tomuto profilu jsou připevněny další stěny a stínící prvky komory. Toto řešení nabízí snadné modifikace komory. Síla stěny 2 mm umožňuje zhotovení závitů v libovolné pozici pro případné ustavení přídatných stínících prvků. Stínící prvky komory jsou uchyceny pomocí šroubů, které stačí povolit, kryt posunout a hlavy šroubu se provléct skrz otvory ve tvaru klíčové dírky. Demontáž bude rychlá a snadná.

9.5.3 Přístup pro vizuální pozorování

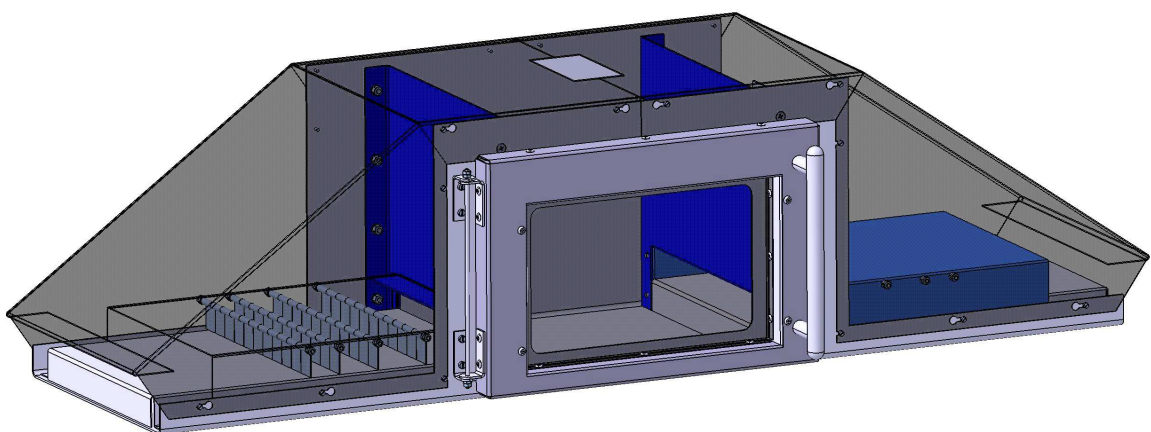
Komora je opatřena výřezem pro osazení dveřmi, které budou umožňovat pozorovací vertikální úhel až 60°. Průhledová část dveří je odstíněna od elektromagnetického záření děrovaným plechem tak, jak jej známe z mikrovlnných komor pro ohřev potravin. Také bezpečnostní mechanismus vypnutí magnetronu při náhlém otevření komory bude přejat se zmíněného zařízení. Jedná se o koncový spínač reagující na otevření dveří.



Obr. 35. Simulace binokulárního vidění z aplikace Catia V5R18

9.5.4 Odstínění průběžných stran

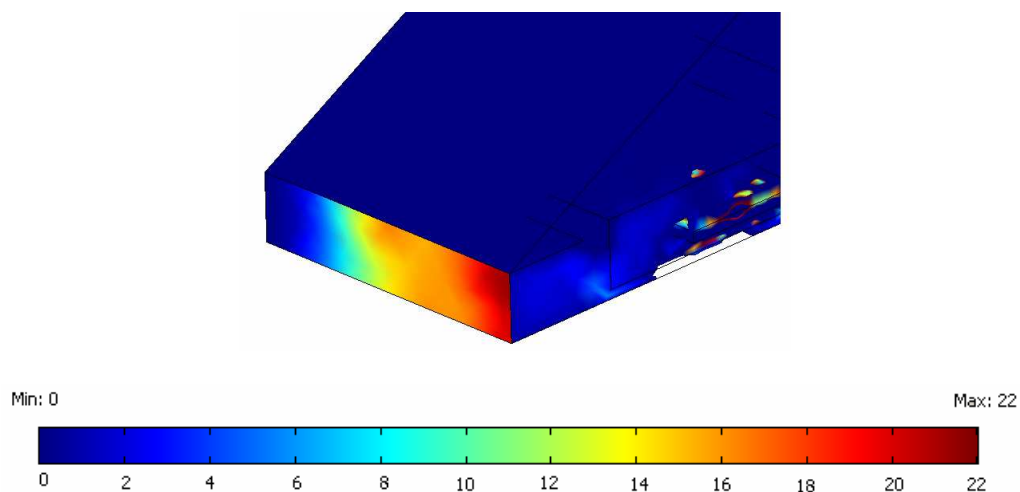
Dalším prvkem, kterému byla věnována nemalá pozornost byl tunel se stínícími prvky. Provoz mikrovlnných zařízení je vázán bezpečnostními normami. Stínění je řešeno pomocí jedenácti nezávisle kyvně uložených plechů v čtyřech řadách.



Obr. 36. Pohled na dvojitě stínící prvky komory

Navržené řešení bylo konzultováno s firmou Romill, která se zabývá výrobou mikrovlnných zařízení pro průmyslové aplikace a bylo v tomto směru shledáno vyhovujícím. Pro

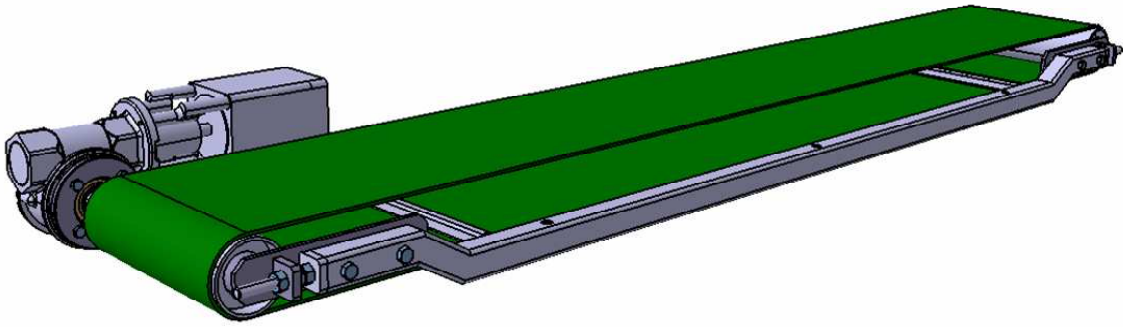
bezpečný provoz je po odborné montáži celku nezbytné měření hygienických limitů. Proběhla také FEM simulace na zjednodušeném modelu, který počítal s nejhorším nastavením výšky komory a maximálním výkonem magnetronu. Výstupní hodnoty vyzářeného výkonu byly v povolených mezích.



Obr. 37. Vyzářený výkon do okolí [$W.m^{-2}$]

9.6 Pásový dopravník

Posun materiálu prostorem komory bude řešen pomocí pásového dopravníku. Při volbě pohonu pásového dopravníku byl kladen nárok na možnost řízení otáček. V úvahu připadal dvoufázový či třífázový asynchronní motor v kombinaci se šnekovou převodovkou a frekvenčním měničem. Toto konstrukční řešení bylo problematické, neboť pro dosažení minimálních otáček pásu by bylo zapotřebí převodovky s převodovým poměrem kolem 300. V případě nutnosti řízení pásu systémem vypnuto zapnuto a použitím běžného asynchronního třífázového motoru by zřejmě došlo k jeho poškození vlivem proudového přetížení. Další komplikace by byla ve snímání otáček motoru, k pohonu by bylo nutné instalovat snímač otáček, abychom mohli sledovat rychlost pásu. Proto byl jako pohon dopravníku zvolen programovatelný krokový motor.



Obr. 38. Pásový dopravník s pohonem

9.6.1 Pohon dopravníku

Pohon dopravníku bude řešen kombinací krokového motoru a šnekové převodovky. Toto řešení nabízí širokou možnost řízení rychlosti pohybu. Neodmyslitelnou výhodou krokového motoru je jeho vysoký statický rozběhový moment a snadné řízení otáček v širokém spektru. Zvolený krokový motor má funkční rozsah otáček $0 - 19 \text{ s}^{-1}$ ($0 - 3800$ kroků. s^{-1}), v kombinaci se šnekovou převodovkou bude maximální rychlost pásu $137,3 \text{ mm.s}^{-1}$. Nabízený rozsah rychlostí s možností programovatelných časových prodlev plně pokrývá požadavky daného řešení.

Výpočet základních parametrů nutných pro správný návrh:

Vstupní data:

- převodový poměr šnekové převodovky $i = 30$,
- maximální otáčky krokového motoru $n_{max} = 19 \text{ s}^{-1}$,
- průměr hnacího válce dopravníku $D = 69 \text{ mm}$,
- účinnost převodovky $\eta = 0.96$,
- maximální statický moment $Mk_{max} = 3,4 \text{ N.m}$,
- minimální dynamický moment $Mk_{min} = 0,6 \text{ N.m}$,
- dovolené zatížení pásu $z = 24 \text{ N.mm}^{-1}$,
- šířka pásu $b = 200 \text{ mm}$.

Kontrolní výpočty:

Výpočet maximální rychlosti pásu:

$$v_{\max} = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{\max}}{i} = \frac{\pi \cdot 69 \cdot 19}{30} = 137,3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$$

Výpočet maximálního kroutícího momentu na hnacím válci:

$$Mk_{H \max} = Mk_{\max} \cdot i \cdot \mu = 3,4 \cdot 30 \cdot 0,96 = 95,88 \text{ Nm}$$

Tažná síla na válci:

$$F_{\max} = \frac{2 \cdot Mk_{H \max}}{D} = \frac{2 \cdot 95,88}{0,069} = 2779 \text{ N}$$

Výpočet minimálního kroutícího momentu na hnacím válci:

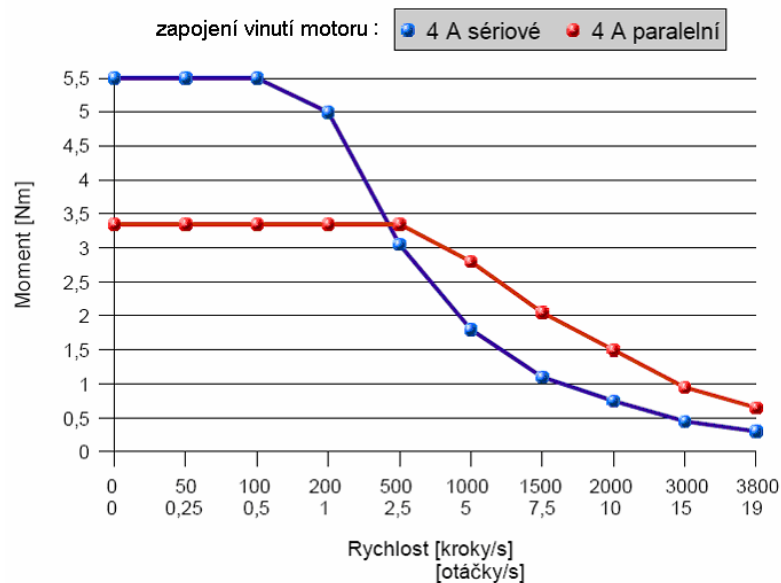
$$Mk_{H \min} = Mk_{\min} \cdot i \cdot \mu = 0,6 \cdot 30 \cdot 0,96 = 17,28 \text{ Nm}$$

Tažná síla na válci:

$$F_{\min} = \frac{2 \cdot Mk_{H \min}}{D} = \frac{2 \cdot 17,28}{0,069} = 501 \text{ N}$$

Maximální dovolená tažná síla v dopravníkovém pásu dána výrobcem:

$$F_{\max} = z \cdot b = 24 \cdot 200 = 4800 \text{ N}$$



Obr. 39. Momentová charakteristika krokového motoru SX34-3080

9.6.2 Elektronika krokového motoru

Na základě doporučení výrobce byla pro krokový motor zvolena řídicí jednotka CD40x. Programovatelná jednotka typu CD40x obsahuje řídicí část realizovanou kontrolerem M1486 i výkonovou část pro bipolární napájení krokového motoru s pulsní regulací proudu. Řídicí část jednotek je realizována kontrolerem M1486, který obsahuje:

- programovatelné řízení krokového motoru (délka dráhy, rychlost, zrychlení, mikrokrokování),
- malý programovatelný automat (vstupy/výstupy, smyčky, podmíněné skoky, čekací doby).

Povely jsou uchovány v paměti i po vypnutí napájení, bez potřeby zálohování. Kontroler je ovládán jednoduchými ASCII povely po sériové lince. Povely kontroleru jsou snadno zapamatovatelné, znakem povelu je vždy první písmeno anglického názvu povelu. Např. povel pro zadání rychlosti "Velocity" 500 kroků za sekundu: V500. Uživatel se tak nemusí zabývat složitým programováním, ale jednoduchým zápisem povelů.

Všechny jednotky typu CD mají pouze jedno napájecí napětí. Vzhledem k pulsní regulaci proudu není potřeba k napájení stabilizovaný zdroj, stačí jen transformátor a diodový můstek. Zdroj může obsahovat kondensátor o kapacitě cca 4 700 μ F. V našem případě bude použit napájecí zdroj PS35 s parametry:

- jmenovité napájecí napětí: 230 VAC, 50 Hz,
- výstupní napětí (při zatížení 0,5 A): 47 VDC, výstupní kondenzátor 4G4,
- jmenovitý výstupní proud: 3 A (5 A max. ve špičce).



Obr. 40. Zleva: Oldhamova spojka, krokový motor, řídicí jednotka, zdroj napětí.

9.6.3 Programování řídicí jednotky

Jak bylo řečeno, řídicí jednotka CD40x je plně programovatelná. Pro vytváření, editování a ověřování uživatelského programu kontroleru M1486 s využitím nabídek v okénkách je určen program Inmotion PC Utilities, který je funkční pod operačním systémem Windows XP. Program kontroluje formát a parametry každého povelu před vysláním a komunikuje s kontrolery řady M1486 prostřednictvím sériového rozhraní RS232 (COM1 nebo COM2).

K minimalizaci počtu klávesových povelů se používají tzv. horké klávesy např. příkazy k práci se soubory či často se opakující příkaz k pohybu. Všechna dialogová okna, která vyžadují od uživatele vstup textu, si uchovávají rolovací seznam předchozích příkazů, takže lze znovu užít předcházející vstupy jejich výběrem z tohoto seznamu. Dále má program Inmotion PC Utilities v sobě zabudovanou kalkulačku, tabulku ASCII znaků a prohlížeč adresářů. Program obsahuje kalkulátor pohybu, který vypočte libovolný parametr pohybu po zadání ostatních hodnot. Např. při zadání start/stop rychlosti, maximální rychlosti, zrychlení a dráhy určí časy jednotlivých úseků i celkový potřebný čas. K prohlížení posledních 100 povelů poslaných po sériové lince RS232 z počítače do kontroleru je možno použít okno trasovací paměti (Trace Window). Obsah je možno uložit do souboru na disk a v případě potřeby znovu vyslat. Program Inmotion PC Utilities umožňuje vysílání jednotlivých povelů z nabídky v menu i vytvoření uceleného povelového souboru s následným vysláním. [23]

Tab. 8. Přehled povelů kontroleru M1486

POVEL	POPIS
\	Reset uvedení kontroleru do výchozího stavu
@	(Num) "Address" zadané číslo návěští se přiřadí této programové řádce
A	(Num) "Acceleration" zrychlení, rozsah = 1 až 65 000 m.s^{-2}
B	(Num) "Backward" zpět, zadání dráhy v negativním směru, rozsah = 1 až 16 000 000
C	(Num 1 to 21) "Clear" nastav zadaný výstup do hodnoty logická nula, rozsah 1 až 21
C	(Num 40 to 63) "Clear" potlačení zadané přídavné funkce
C75	Clear Kill obnovení vykonávání programu
D	Direction směr, změna směru příštího pohybu
E	End of loop konec smyčky
F	(Num) "Forward" dopředu, zadání dráhy v pozitivním směru, rozsah = 1 až 16 000 000
G	(Num) "Go absolute" dráha zadána absolutní polohou
G+	Go positive trvalý pohyb v pozitivním směru až do externího přerušení
G-	Go negative trvalý pohyb v negativním směru až do externího přerušení
H	(Num)(Value)(Num) "If" jestliže na zadaném vstupu je zadaná hodnota skoč na zadané návěští ("H" High - logická jedna, "L" Low - logická nula)
J	(Num) "Jump" skok na zadané návěští
K	Kill okamžitý přechod do brzdného režimu, přerušení vykonávání programu
L	(Num) "Loop" smyčka, opakuj provádění následujících instrukcí
M	(Num) "Microstepping" počet mikrokroků na celokrok v dolním pásmu rychlostí (až do 64)
N	(Num) "Number" výběr tvaru průběhu proudu při mikrokrokování
O	(Num) "One" čekej, dokud zadaný vstup nebude mít hodnotu logická jedna
P	(Num) "Profile" rychlost, při které se lineární rozběhová charakteristika mění na parabolickou
Q	(Num) "Qualification" počet mikrokroků na celokrok v horním pásmu rychlostí (1, 2, 4)
R	Run vykonej pohyb s aktuálními hodnotami parametrů
S	(Num) "Start/stop" rychlost start/stop; rozsah = 16 až 1950 m.s^{-1}
T	(Num 1 to 21) "Turn on" nastav zadaný výstup do hodnoty logická jedna, rozsah 1 až 21
T	(Num 40 to 63) "Turn on" zapnutí zadané přídavné funkce
U	(Num) "Upload" vyšli hodnotu čítače absolutní polohy či hodnotu interní proměnné
V	(Num) "Velocity" maximální rychlost
W	(Num) "Wait" čekej zadaný počet milisekund; rozsah = 1 až 16 000 000
X	(Num) "indeX" volba kontroleru
Z	(Num) "Zero" čekej, dokud vstup nebude mít hodnotu logická nula
[Disable odklad provedení následujících povelů??

]]	Enable provedení předchozích povel??
(((Num) "Seek negative" jdi na limit v negativním směru
))	(Num) "Seek positive" jdi na limit v pozitivním směru
= =	(Num) "Equal" přiřazení zadané hodnoty čítači absolutní polohy
: :	(Num) "Load" ulož zadanou hodnotu do interní proměnné
? ?	(Num) "Query" načti data na specifikovaných vstupech a ulož do interní proměnné
! !	(Num) "Order" zapiš hodnotu interní proměnné na specifikované výstupy
+ +	(Num) "Add" přičti zadanou hodnotu k interní proměnné
- -	(Num) "Substract" odečti zadanou hodnotu od interní proměnné
/ /	(Num) "Divide" dělení interní proměnné zadanou hodnotou
* *	(Num) "Multiply" násobení interní proměnné zadanou hodnotou
> >	(Num) "Move to register" přesun dat z interní proměnné do zadaného registru
< <	(Num) "Move from register" přesun dat ze zadaného registru do interní proměnné
' '	(Num) "Subroutine" podprogram
. .	(Num) "End of subroutine" konec podprogramu

9.6.4 Volba materiálu dopravního pásu

Materiál pásu bude cyklicky vystavován dielektrickému ohřevu, je nezbytné, aby byl použit materiál odolávající zvýšeným teplotám. Pokud bude mít materiál pásu nižší permitivitu než ohříváný vzorek, potom bude docházet k ohřevu pásu na nižší teplotu. Po konzultaci s firmou Romill byl zvolen dopravníkový pás TACWELD 69 ze skelné tkaniny s vícenásobnou vrstvou teflonu (dodavatel: fy. Reko s.r.o., www.reko-sro.cz). Tento dopravníkový pás disponuje rozsahem teplotní použitelnosti -40 až 260°C, což s dostatečnou rezervou pokrývá teplotní rozsah pro ohřev kaučukových směsí..

9.7 Ekonomické zhodnocení řešeného projektu

Na toto téma byla provedena již celá řada studií, které jednoznačně hovoří ve prospěch uplatnění mikrovlnných zařízení v praxi. Podíváme-li se na experimenty a ekonomická hodnocení provedená v rámci bakalářských a diplomových prací zaměřených na toto téma, hovoří se zde o úspoře na energiích 25-50 % s návratností 4 let při zavedení DE přehřevu surovin před procesem míchání [20, 25]. Výsledkem další práce na toto téma se stal patent „Energeticky úsporný způsob přípravy gumárenských směsí, polotovarů nebo výrobků a zařízení k provádění tohoto způsobu“, ve kterém je uveden praktický příklad využití mikrovlnného přehřevu při průmyslovém míchání gumárenských směsí. Příklad je založen na energetické bilanci a uvádí, že pokud použijeme 50 % energie potřebné ke zpracování suroviny v hnětiči pro její mikrovlnný přehřev, docílíme 17% úspory

energie při následném míchání, neboť takto přehřátý materiál vykazuje nižší nároky na výkon hnětiče. Zároveň se sníží doba míchání nutná pro dosažení srovnatelné jakosti výsledného produktu.[24] Toto tvrzení také deklarují experimenty provedené v Barum Continental s.r.o. s úsporami od 8 do 24 % [(„know how“) - nepublikovány].

Shrneme-li tyto informace, je nesporné, že technologie mikrovlnného ohřevu je perspektivní možností jak snížit výrobní náklady za energie až o desítky procent a zefektivnit tak proces výroby. Navržené zařízení bude poskytovat prostor pro optimalizaci procesu a hledání nových aplikací této technologie na další zpracovatelské procesy.

Vezmeme-li v potaz odhadované náklady na navržené zařízení (90-110 tisíc Kč) zjistíme, že dosahují jednotek procent ceny reálných zařízení, jejichž návratnost byla stanovena na 4 roky.[20] Nebude tedy problém zařízení zahrnout do investičních nákladů spojených s nákupem reálného zařízení a očekávat tak pozitivní výsledky plynoucí z experimentální činnosti.

ZÁVĚR

V současné době bylo na naší fakultě zpracováno několik prací zaměřených na využití dielektrického tepla v gumárenském průmyslu. Ty se staly podmětem k novým myšlenkám a experimentům, které pro svoji realizaci nezbytně potřebují specializované zařízení.

Cílem této práce bylo navrhnout laboratorní zařízení pro kontinuální ohřev mikrovlnnou technologií, které umožní studium dielektrického ohřevu v kontinuálním režimu. Kontinuální provoz nabízí možnosti uplatnění technologie dielektrického ohřevu ve výrobních linkách, což může vést k nemalým energetickým úsporám, které vedou k ekologickým a ekonomickým přínosům v procesu výroby.

Studijní část byla zaměřena na poznání základních fyzikálních principů spojených s dielektrickým teplem, seznámení se se současným využitím technologie dielektrického ohřevu v praxi a rozboru jednotlivých prvků, které tyto zařízení tvoří.

Hlavní náplní praktické části byl samotný návrh zařízení. Pro tvorbu 3D modelu a výrobní výkresové dokumentace byl použit software Catia V5R18. Před tvorbou modelu byly na základě vstupních požadavků na laboratorní zařízení provedeny základní výpočty pro návrh jednotlivých strojních celků. Bylo nezbytné zvolit rozsah rychlosti pásu pro použitý zdroj mikrovlnného záření. Od tohoto se poté odvíjela volba samotného pohonu dopravníku. Pro své výhody byl jako pohon nadimenzován krokový motor SX34 – 3080 s příslušnou řídicí elektronikou, připojený ke šnekové převodovce pomocí Oldhamovy vyrovnávací spojky. Toto zapojení umožní plně programovat rychlost pásu v rozmezí 0 – 137,3 mm.s⁻¹. Dalším krokem byl návrh samotné geometrie komory. Požadavkem byla možnost měnit geometrii komory. Byly navrženy základní půdorysné rozměry a poté byla pomocí výsledků analýz, které vznikly v prostředí Comsol Multiphysics RF Module, modifikována výška komory tak, aby stavitelný rozsah výšky vykrýval optimální nastavení. Analýzy posloužily také pro optimalizaci stínících prvků průběžné části komory.

Z takto navrženého celku byla zpracována výkresová výrobní dokumentace z vytypovaných dílů. Samotná realizace projektu je nyní vázána na získání finančních prostředků pro pokrytí nákladů spojených s výrobou.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Multimediální učebnice: Mikrovlnná technika* [online]. 2009 [cit. 2009-01-20]. Dostupný z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php>
- [2] VRBA, J. *Úvod do mikrovlnné techniky*. Vydavatelství ČVUT, 2000, 235 s, ISBN 80-01-02112-2.
- [3] VRBA, J. *Aplikace mikrovlnné techniky*. Vydavatelství ČVUT, 2003, 147 s, ISBN 80-01-022943-3.
- [4] WINKLER, M. *Elektrický perkolační práh a dielektrické vlastnosti elastomerních nanokompozitů*. [Diplomová práce] Univerzita Tomáše Bati, 2008.
- [5] STOKLASA, K. *Přednášky z předmětu Vlastnosti polymerních materiálů*. [Přednášky] : UTB Zlín
- [6] CHEN, L., F., ONG, C., K., NEO C., P., VARADAN, V. *Microwave Electronics*, WILEY-VCH, Weinheim, s. 12, 2005
- [7] *Měření komplexní permitivity dielektrik* [online]. [cit. 2009-01-28]. Dostupný z WWW:<http://k312.feld.cvut.cz/vyuka/UEM/laborator146/dielektrika_navod.pdf>
- [9] KŘŮMAL, M., *Konstrukční řešení míchací komory*. [Bakalářská práce] Univerzita Tomáše Bati, 2007.
- [10] ŠPAČEK, J. *Technologie gumárenská a plastikařská II*. Brno : Rektorát vysokého učení technického v Brně, 1980
- [11] KARTOUSEK, J. *Studie rozložení teplotních polí v dielektricky ohřívaných materiálech*. [Diplomová práce] Univerzita Tomáše Bati, 2008.
- [12] *Elektrina a magnetismus* [online]. 2009 [cit. 2009-1-26]. Dostupný z: <www.aldebaran.cz/elmg/kurz.html>.
- [13] *Elektrická pevnost* [online]. 2009 [cit. 2009-1-26]. Dostupný z: <zcu.cz/fel/ket/ETM/Cviceni/5.%20cviceni/Elektricka%20pevnost.pdf>.
- [14] [online], [cit. 2009-1-29]. Dostupný z: <<http://cs.wikipedia.org/>>.
- [15] [online], [cit. 2009-1-29]. Dostupný z: <fyzweb.cuni.cz/dilna/krouzky/mikrov/podr1.htm>.
- [16] FEYNMAN, R. *Feynmanovy přednášky s fyziky s řešenými příklady*. FRAGMENT, 2001, 806 s, ISBN 80-7200-420-4.
- [17] [online], [cit. 2009-1-27]. Dostupný z: <<http://scienceworld.cz/>>.

- [18] [online], [cit. 2009-1-27]. Dostupný z: <http://www.humusoft.cz>>.
- [19] *Romill-Krmivářské stroje : Průmyslový mikrovlnný ohřev* [online]. 2000 [cit. 2009-01-27]. Dostupný z WWW: <www.romill.cz>.
- [20] LOUČKOVÁ, P. *Ohřev kaučuku MW technologií*. [Diplomová práce] Univerzita Tomáše Bati, 2009.
- [21] DVOŘÁK, Z. *Přednášky z předmětu Procesní inženýrství III*. [Přednášky]: UTB Zlín
- [22] BIOLEK, M. *Vývoj a konstrukce modelového zařízení mikrovlnné jednotky* [Diplomová práce] Univerzita Tomáše Bati, 2006.
- [23] [online], [cit. 2009-3-20]. Dostupný z: <<http://www.microcon.cz/>>.
- [24] *Patent: Energeticky úsporný způsob přípravy gumárenských směsí, polotovarů nebo výrobků a zařízení k provádění tohoto způsobu* [online], [cit. 2009-5-11]. Dostupný z: <<http://isdv.upv.cz/portal/pls/portal/portlets.pts.frm>>.
- [25] PEŠKA, Z. *Vypracování projektu pro dielektrický ohřev kaučuku*. [Diplomová práce] Univerzita Tomáše Bati, 2009.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

E	intenzita elektrického pole [$V.m^{-1}$]
H	intenzita magnetického pole [$A.m^{-1}$]
D	elektrická indukce [$C.m^{-2}$]
B	magnetická indukce [T]
J_v	hustota elektrického proudu [$A.m^{-2}$]
f	frekvence [Hz]
m	délková jednotka - metr [m]
F	farad [$m^{-2}.kg^{-1}.s^4.A^2$]
ϵ	permitivita prostředí [-]
ϵ_0	permitivita vakua [$8,859.10^{-12} F.m^{-1}$]
ϵ_r	relativní permitivita materiálu [-]
ϵ'	reálná část relativní permitivity [-]
ϵ''	komplexní část relativní permitivity [-]
μ	permeabilita prostředí [$H.m^{-1}$]
λ_0	vlnová délka ve vakuu [m]
σ	měrná elektrická vodivost prostředí [$S.m^{-1}$]
C	kapacita [F]
S	plocha desky kondenzátoru [m^2]
d	vzdálenost desek [m]
ρ	rezistivita (měrný odpor) [$\Omega.m$]
γ	konduktivita (měrná vodivost) [$S.m^{-1}$]
G	vodivost [R^{-1}]
ω	úhlová frekvence [$rad.s^{-2}$]

P	příkon [W]
U	napětí [V]
I	proud [A]
E	energie [J]
h	Planckovo účinkové kvantum (konstanta $6,626 \cdot 10^{-34}$ [J.s])
LC	oscilační obvod kondenzátor cívka
k_z	vlnové číslo [-]
U_P	průrazné napětí [V]
E_p	elektrická pevnost [$V \cdot m^{-1}$]
σ_{AC}	střídavá vodivost [$S \cdot m^{-1}$]
PD	penetrační hloubka [m]
EM	elektromagnetické
FEM	finite element metod

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Používané frekvence</i>	10
<i>Obr. 2. Dipólová anténa generující elektrické pole</i>	11
<i>Obr. 3. Křivky elektrického (E) a magnetického (B) pole vytvořených dipólovou anténou.</i>	11
<i>Obr. 4. Obdélníkový vlnovod</i>	15
<i>Obr. 5. Reakce rozlišných materiálů na mikrovlny</i>	16
<i>Obr. 6. Orientace polárních molekul. Nalevo nepůsobí vnější pole, napravo je vnější pole nenulové</i>	17
<i>Obr. 7. Příklad frekvenční závislosti složek komplexní permitivity dielektrika dle Debye (Debyeovy křivky)</i>	19
<i>Obr. 8. Deskový kondenzátor s vloženým dielektrikem.</i>	20
<i>Obr. 9. Náhradní schéma kondenzátoru se ztrátovým dielektrikem.</i>	21
<i>Obr. 10. Fázový diagram dielektrických ztrát.</i>	21
<i>Obr. 11. Schéma cyklotronu.</i>	33
<i>Obr. 12. Schématické zapojení magnetronu.</i>	34
<i>Obr. 13. Princip magnetronu</i>	34
<i>Obr. 14. Resonanční dutina magnetronu.</i>	35
<i>Obr. 15. Magnetron značky LG o výkonu 1,1 kW a frekvenci 2,45 GHz.</i>	35
<i>Obr. 16. Magnetické pole ve vlnovodu.</i>	38
<i>Obr. 17. Závislost E_y na z pro $\omega \ll \omega_m$.</i>	40
<i>Obr. 18. Spoj mezi dvěma vlnovody, s nízkými energetickými ztrátami.</i>	42
<i>Obr. 19. Blokové schéma mikrovlnného zařízení.</i>	43
<i>Obr. 20. Univerzální MW komora 850x1400x800 mm o výkonu 24 kW.</i>	44
<i>Obr. 21. Schéma kontinuálního sušícího zařízení</i>	44
<i>Obr. 22. Mikrovlnná pásová sušička s výkonem 64kW pro vysoušení keramiky.</i>	45
<i>Obr. 23. Hygienická norma ANSI pro vysokofrekvenční elektromagnetické pole.</i>	48
<i>Obr. 24. Základní schéma navrhovaného zařízení</i>	53
<i>Obr. 25. Pohled na navržené řešení</i>	55
<i>Obr. 26. 3D model reálného rozložení maxim ohřevu v mikrovlnné komoře.</i>	57
<i>Obr. 27. Výsledek RF analýzy - rozložení elektrické indukce.</i>	57
<i>Obr. 28. Rám s detailem polohovacího mechanismu</i>	58
<i>Obr. 29. Externí zdroj elektromagnetického vlnění od firmy ROMILL</i>	59

<i>Obr. 30. Ovládací panel zdroje ROMILL.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 31. Rozložení elektrického pole pro nastavení výšky 155 mm.....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 32. Rozložení intenzity vnitřního zdroje pro výšku 145 mm.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 33. Rozložení intenzity vnitřního zdroje pro výšku 155 mm.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 34. Rozložení intenzity vnitřního zdroje pro výšku 200 mm.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 35. Simulace binokulárního vidění z aplikace Catia V5R18.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 36. Pohled na dvojitě stínící prvky komory.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 37. Vyzářený výkon do okolí [$W.m^{-2}$].....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 38. Pásový dopravník s pohonem.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 39. Momentová charakteristika krokového motoru SX34-3080.....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 40. Zleva: Oldhamova spojka, krokový motor, řídicí jednotka, zdroj napětí.....</i>	<i>70</i>

SEZNAM TABULEK

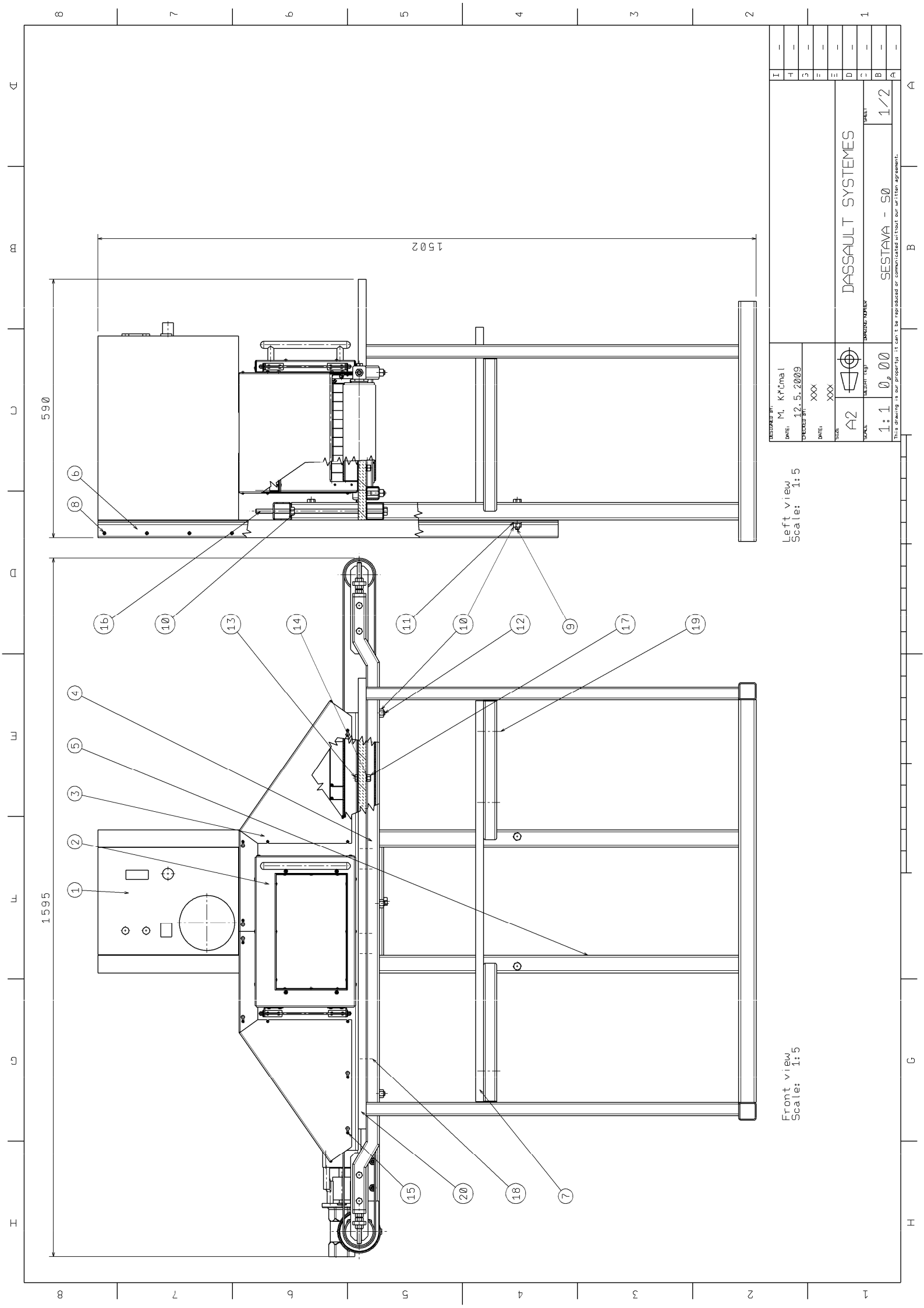
<i>Tab. 1. Dielektrické vlastnosti tkáně v závislosti na kmitočtu</i>	19
<i>Tab. 2. Dielektrické vlastnosti vybraných materiálů.</i>	20
<i>Tab. 3. Typizovaná řada obdélníkových vlnovodů</i>	41
<i>Tab. 4. Maximální povolené hodnoty ozáření elektromagnetickým polem pro obyvateľstvo.</i>	48
<i>Tab. 5. Přípustná denní dávka mikrovlnného ozáření pro pracovníky obsluhující mikrovlnná zařízení s lékařskou kontrolou.</i>	49
<i>Tab. 6. Nepřekročitelné limity pro okamžité hodnoty veličin E_{max} a p_{max} pro obyvateľstvo.</i>	49
<i>Tab. 7. Nepřekročitelné limity pro okamžité hodnoty veličin E_{max} a p_{max} pro obsluhy mikrovlnných zařízení s lékařskou kontrolou.</i>	49
<i>Tab. 8. Přehled povelů kontroleru M1486.</i>	72

SEZNAM PŘÍLOH

Součástí diplomové práce:

- P I. Výkres: SESTAVA – S0
P II. Výkres: SESTAVA KOMORA – S1
P III. Výkres: SESTAVA DVEŘE – S2
P IV. Výkres: SESTAVA DOPRAVNÍK – S3

- CD: - Diplomová práce ve formátu pdf a doc,
- kompletní 3D dokumentace v softwaru Catia V5R18 (+ 3D tělesa *.stp),
- výkresová dokumentace (+ rozvinuté tvary plechových dílu v formátu *.dxf),
- vybrané modely FEM analýz v softwaru COMSOL Multiphysics 3.3 (*.mph).



Left view
Scale: 1:5

Front view
Scale: 1:5

DESIGNER: M. Krčmal	DATE: 12.5.2009	PROJECT: XXX	DATE: XXX	SIZE: XXX	SCALE: A2	PROJECT TAG:	PROJECT: DASSAULT SYSTEMES	SCALE: 1:1	PROJECT TAG: 0,00	PROJECT: SESTAVA - 50	SCALE: 1/2
THIS DRAWING IS OUR PROPERTY - IT CAN'T BE REPRODUCED OR COMMERCIALIZED WITHOUT OUR WRITTEN AGREEMENT.											

D

C

B

A

4

4

3

3

2


2

1

1

KUSOVNÍK

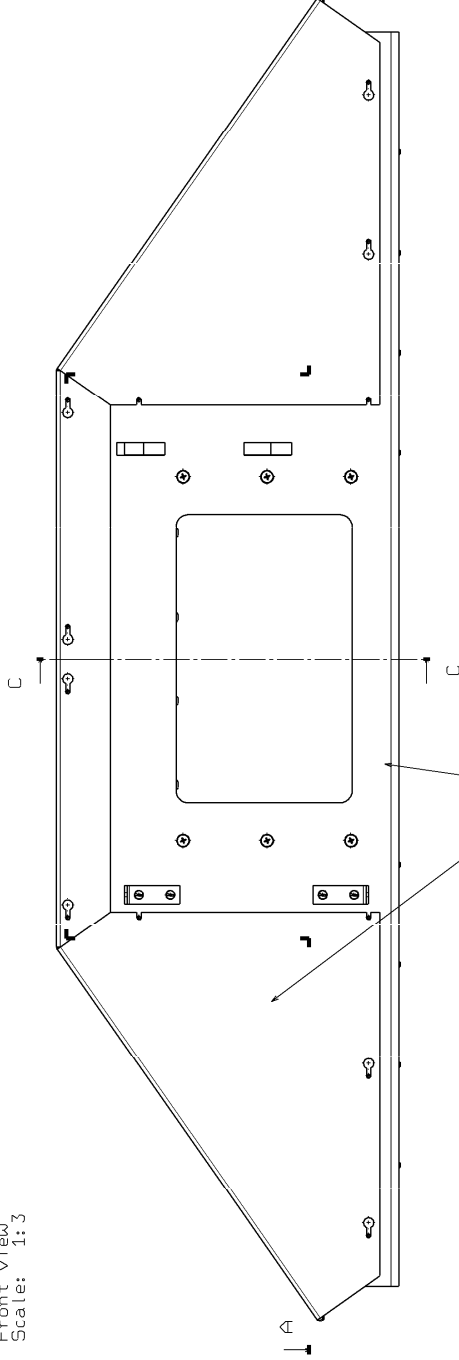
POZ.	KS.	NAZEV - Č. VÝKRESU	POLOTOVAR
1	1	ZDROJ ZÁŘENÍ	HOTOVÝ DÍL
2	1	SESTAVA DVEŘE - S2	SESTAVA
3	1	SESTAVA KOMORA - S1	SESTAVA
4	1	SESTAVA DOPRAVNÍK - S3	SESTAVA
5	1	STŮL - S0-05	SVARENEC
6	1	RÁM ZDROJE S0-06	SVARENEC
7	1	POLICE - S0-07	918x400x18 LAMINO F509
8	1	ŠROUB S VÁLCOVOU HL.	M4x10 ISO 8676-8.8
9	4	ŠROUB SE ŠESTIHR. HL.	M10x60 ISO 4017-8.8
10	13	MATICE	M10 ISO 4032-05
11	4	PODLOŽKA	B10 ČSN 02 1702.10
12	6	ŠROUB SE ZÁPUSTNOU HL.	M10x60 EN ISO 10642
13	4	ŠROUB SE ŠESTIHR. HL.	M8x30 ISO 4017-8.8
14	4	PODLOŽKA	B8 ČSN 02 1702.10
15	24	ŠROUB S VÁLCOVOU HL.	M3x8 ISO 8676-8.8
16	1	ZÁVITOVÁ TYČ M10	DIN975 M10x300-8.8
17	4	MATICE	M8 ISO 4032-05
18	6	VRUT S ROVNÝM SEDLEM	4x16
19	4	VRUT S ROVNÝM SEDLEM	4x45
20	1	DESKA STOLU - S0-20	1030x550x18 LAMINO F509

DESIGNED BY: M. Křůmal				I	-
DATE: 6. 5. 2009				H	-
CHECKED BY: XXX				G	-
DATE: XXX				F	-
SIZE A4		DASSAULT SYSTEMES		E	-
SCALE 1:1	WEIGHT (kg) 0,00	DRAWING NUMBER SESTAVA - S0	SHEET 2/2	D	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.				C	-
				B	-
				A	-

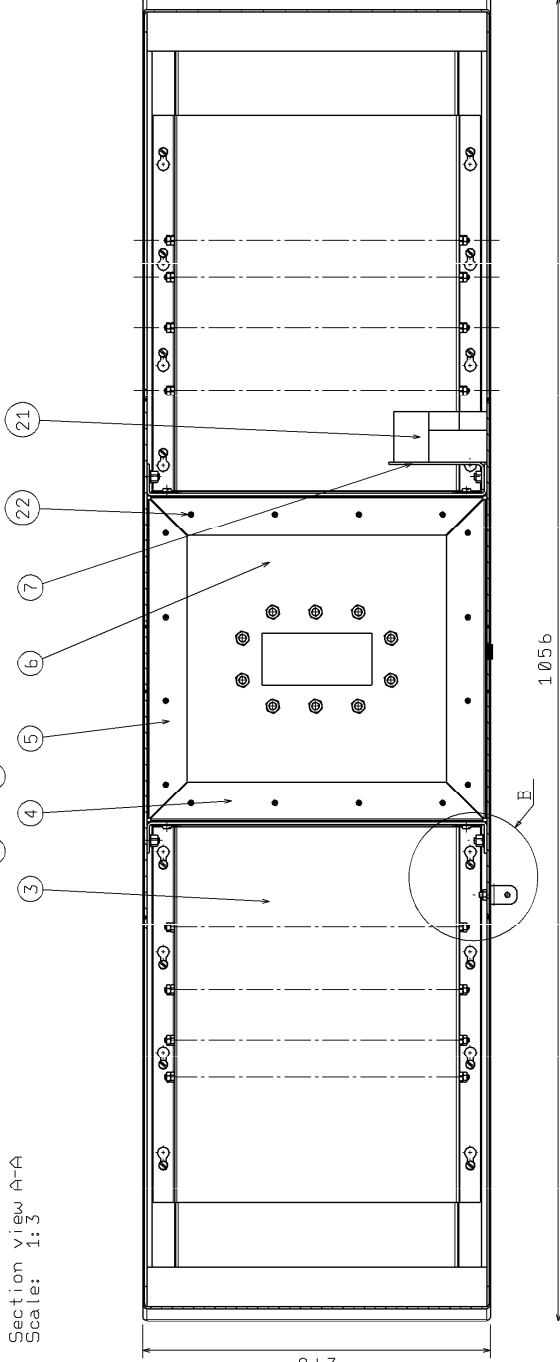
D

A

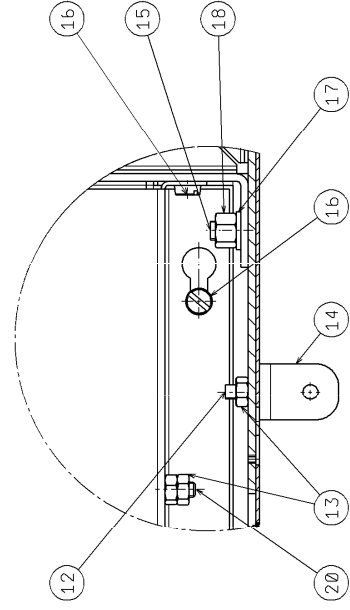
Front view
Scale: 1:3



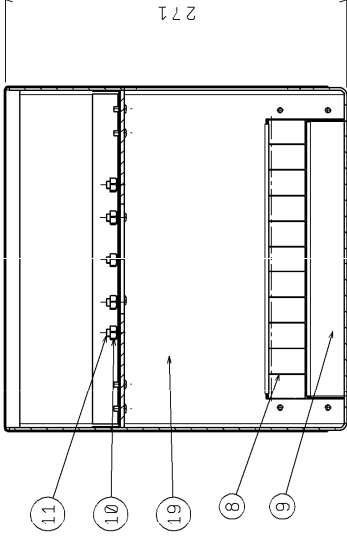
Section view A-A
Scale: 1:3



Detail E
Scale: 1:1



Section view C-C
Scale: 1:3



POZ.	KS.	NAZEV - Č. V.	KUSOVNIK	MAT.
1	DND S1-01	P2-1000x810	CSN 42 53151.1	17020
2	KRYT V S1-02	P1-730x645	CSN 42 53151.1	17020
3	TUNEL S1-03	P1-390x320	CSN 42 53151.1	17020
4	KRYT B S1-04	P1-270x55	CSN 42 53151.1	17020
5	KRYT P S1-05	P1-260x55	CSN 42 53151.1	17020
6	VRCH S1-06	P3-275x265	CSN 42 53151.1	17020
7	ZAVĚS S1-07	P2-175x95	CSN 42 53001.1	11373
8	88 STINĚNÍ	P1-42x22	CSN 42 53151.1	17020
9	DND T S1-09	P1-320x365	CSN 42 53151.1	17020
10	MATICE	M6 ISO 4032-05		
11	SROUB SE ZAPUŠT. HL.	M6x14 EN ISO 2009-8.8		
12	4 SROUB S VALCOVOU HL.	M4x10 ISO 8676-8.8		
13	32 MATICE	M4 ISO 4032-05		
14	2 PANT S1-14	P2-65x18	CSN 42 53151.1	17020
15	16 SROUB SE ZAPUŠT. HL.	M6x12 EN ISO 7046-8.8		
16	24 SROUB S VALCOVOU HL.	M4x10 ISO 8676-8.8		
17	16 PODLOŽKA	B5 CSN 02 1702.10		
18	16 MATICE	M5 ISO 4032-05		
19	2 BOK S1-19	P2-320x270	CSN 42 53151.1	17020
20	8 TYC S1-20	KR 4h12x245	CSN 426510.12	11373
21	1 ZAMEK	HOTOVÝ DÍL		
22	16 NYT	Al 4x6PH	CSN ISO 15977	

RESTAVURANT BYT: M. Krčmář I
 DATE: 6. 5. 2009
 DESIGNED BY: XXXX
 DATE: XXXX
 DRAWN: XXXX
 DATE: XXXX
 TITLE: A2

1:1 XXXX
 1:1

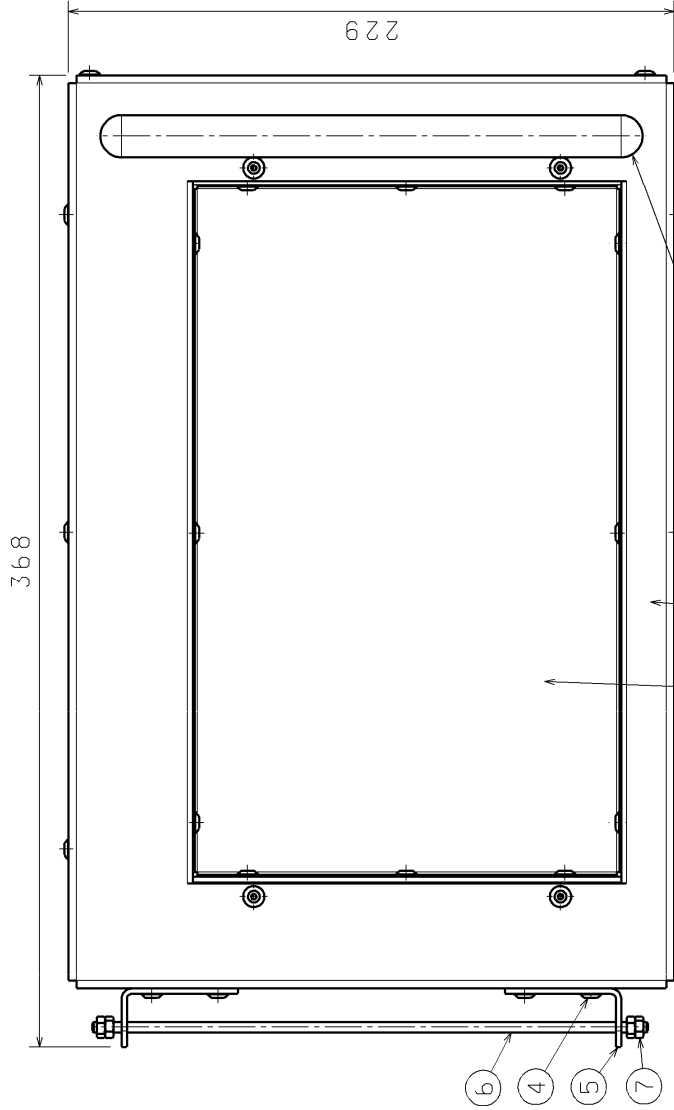
SESTAVA KJMORA - S1 1/1

DASSAULT SYSTEMES

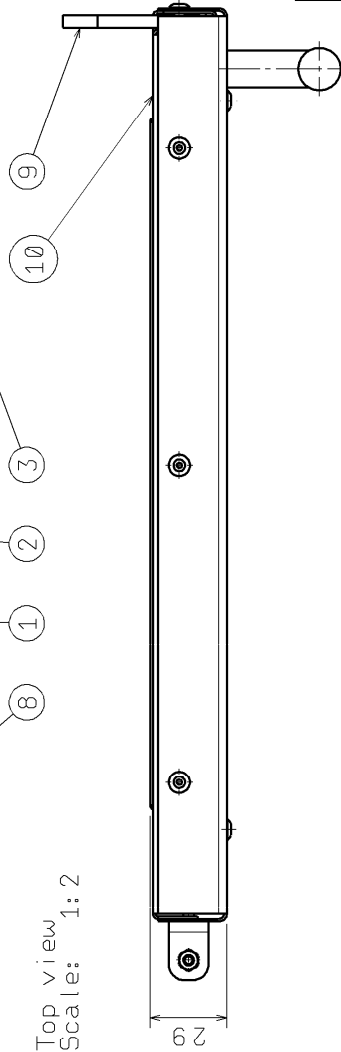
SESTAVA KJMORA - S1
 B A

This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.

Front view
Scale: 1:2



Top view
Scale: 1:2



KUSOVNÍK

POZ.	KS.	NÁZEV - Č. V.	MAT.
1	1	SÍŤ S2-01	POLOTOVÁŘ Z HOTOVÉHO DÍLU
2	1	DVĚŘE_L S2-02	P1-400x280 ČSN 42 53151.1
3	1	MADLO	HOTOVÝ DÍL
4	4	NÝT	Al 4x8PH ČSN ISO 15977
5	2	PANT S1-14	P2-65x18 ČSN 42 53151.1
6	1	TYČ S2-06	KR 4h12x215 ČSN 426510.12
7	4	MATICE	M4 ISO 4032-05
8	12	NÝT	Al 4x6PH ČSN ISO 15977
9	1	KU_LISA	HOTOVÝ DÍL I S PRUŽINOU
10	1	DVĚŘE_R S2-10	P1-405x265 ČSN 42 53151.1

DESIGNED BY:

M. Křůmal

DATE:

6. 5. 2009

CHECKED BY:

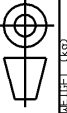
XXX

DATE:

XXX

SIZE

A3



SCALE

1:1

XXX

DASSAULT SYSTEMES

UNPACKING NUMBER

SESTAVA_DVĚŘE - S2

1/1

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

H

G

F

E

D

C

B

A

4

3

2

1

4

3

2

1

K

M

L

P

W

U

O

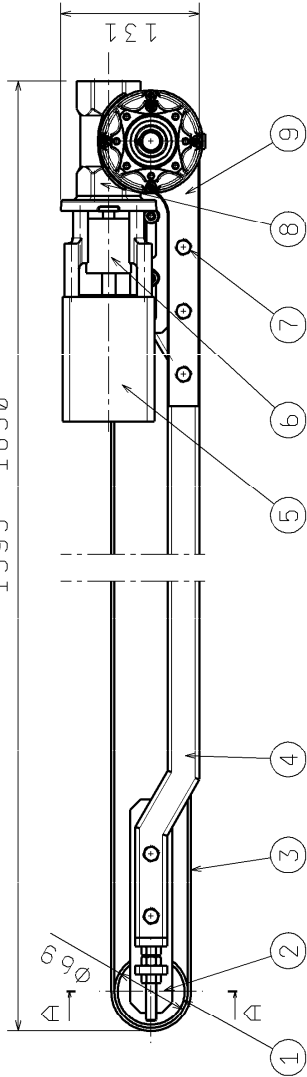
I

B

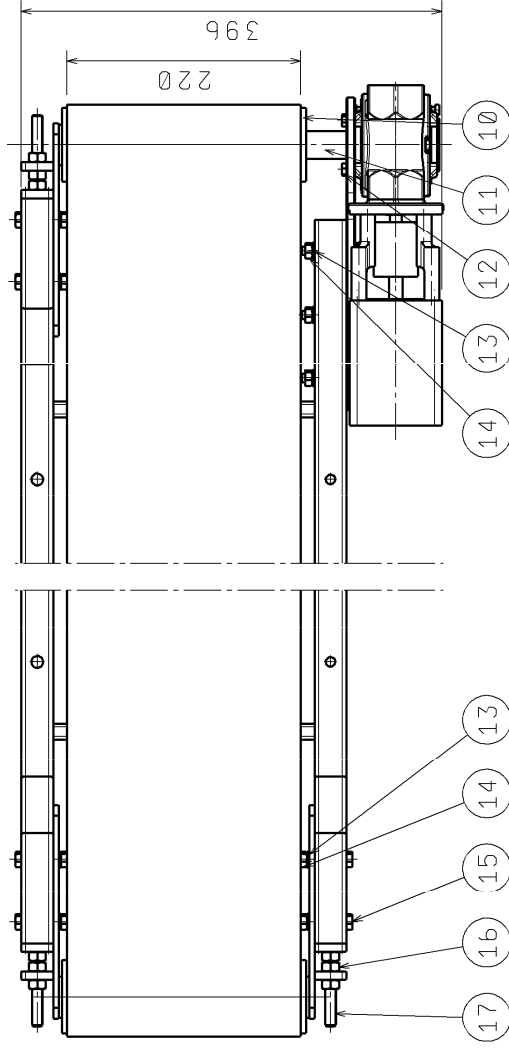
A

Front view
Scale: 1:5

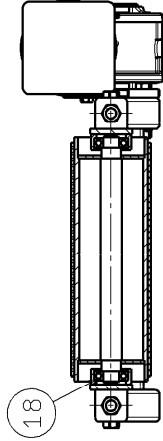
1595 - 1630



Top view
Scale: 1:5



Section view A-A
Scale: 1:5



POZ.	KS.	NAZEV - Č. V.	POLOTOVAR	MAT.
1	1	VÁLEČN S3-01	SVAŘENEC	
2	3	NAPÍNAK S3-02	SVAŘENEC	
3	1	PÁS	REKO 220x3225 TACWELD 69	
4	2	ŘAM DOPRAVNÍKU S3-04	SVAŘENEC	
5	1	KROKOVÝ MOTOR	MICROCON SX34-3080, +VYROVŇAVACÍ SLOUPKY	
6	1	OLDHAMOVÁ SPOJKA	MICROCON XY41 12.7 / 11	
7	3	SROUB SE ŠESTIHR. HL.	M8x50 ISO 4017-8.8	
8	1	PŘEVODOVKA	TOS ZNDJMD MRT 40A-30- A/B3	
9	1	PŘÍRUBA S3-09	PL0-100x8Zx300 ČSN 42 55221.11	11523
10	1	VÁLEC_P S3-10	SVAŘENEC	
11	1	DISTANČ S3-11	Ø28x65 ČSN 425510.50	11600
12	4	SROUB SE ŠESTIHR. HL.	M6x16 ISO 4017-8.8	
13	3	PODLOŽKA	B8 ČSN 02 1702.10	
14	9	MATICE	M8 ISO 4032-05	
15	6	SROUB SE ŠESTIHR. HL.	M8x45 EN ISO 7046-8.8	
16	9	MATICE	M10 ISO 4032-05	
17	3	ZÁVITOVÁ TYČ	DIN975 M8x300-8.8	
18	3	LOŽISKO	LOŽISKO 6002 ČSN 02 4630	

DESIGNED BY:

M. Krůna l

DATE:

7.5.2009

CHECKED BY:

XXX

DATE:

XXXX

SIZE

A3



SCALE

1:1

WORKING NUMBER

XXX

SESTAVA DOPRAVNÍK - S3

1/1

This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.

DASSAULT SYSTEMES

H

G

B

A

4

3

2

1

1

2

3

4