

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Provozní vlastnosti indukční kelímkové pece**

**vedoucí práce: prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.  
autor: Bc. Vojtěch Průša**

**2013**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2012/2013

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vojtěch PRŮŠA**  
Osobní číslo: **E11N0166P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Provozní vlastnosti indukční kelímkové pece**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Uveďte stručně teorii indukčního ohřevu se zaměřením na tavicí kelímkovou pec
2. Proveďte kontrolní výpočet elektrických a geometrických parametrů reálné pece (přístup do provozu a sledování pece během provozu je zajištěno)
3. Určete měřením intenzitu magnetického pole v okolí pece
4. Navrhněte opatření k jejímu snížení
5. Proveďte hodnocení zařízení kritériem 3E a stanovte závěry pro praxi

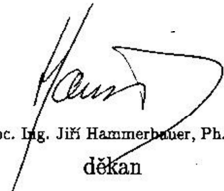


Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:


**1. Určí vedoucí práce**

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.**  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**  
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**

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



  
Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

## **Anotace**

Hlavním cílem této předkládané diplomové práce „Provozní vlastnosti indukční kelímkové pece“ je posoudit vliv magnetického pole na okolí reálné indukční kelímkové pece ECOMELT EGP 500. V práci je dále uvedena teorie indukčního ohřevu, teorie elektromagnetického vlnění a zvláštní kapitolu jsem věnoval stínění indukčních pecí. V další části práce jsem popsal výpočet elektrických a geometrických parametrů pece. Závěrem práce jsem zhodnotil pec kritériem 3E a uvedl závěry pro praxi.

## **Klíčová slova**

Elektrotepelná zařízení, šíření tepla, indukční ohřev, Indukční kelímková pec, elektromagnetické vlnění, hloubka vniku, Poyntingův vektor, elektromagnetické stínění, magnetická indukce, NARDA ETL 400, ECOMELT EGP 500, kritérium 3E.

**Počet stran: 87**

**Počet příloh: 9**

## **Abstract**

The main aim of the thesis "Operating characteristics of induction crucible furnace" is to assess the effect of magnetic field on the outskirts of the real induction crucible furnace ECOMELT EGP 500. The paper is also the theory of induction heating, the theory of electromagnetic waves, and a special chapter is devoted to shielding induction furnaces. In the next section I describe the calculation of electrical and geometrical parameters of the furnace. Finally, the work I reviewed furnace 3E criteria and drew conclusions for practice.

## **Key words**

Electro thermal equipment, heat transfer, induction heating, induction crucible furnace, electromagnetic waves, penetration depth, Poynting vector, electromagnetic shielding, magnetic induction, NARDA ETL 400, ECOMELT EGP 500, criterion 3E.

**The number of pages: 87**

**The number of enclosures: 9**

## Prohlášení

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

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

Dále prohlašuji, že veškerý software, který byl použit při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 5.5.2013

Bc. Vojtěch Průša

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Jirímu Koženému, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>10</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>11</b>
<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>13</b>
<b>2 ELEKTROTEPELNÁ ZAŘÍZENÍ</b> .....	<b>14</b>
2.1 ZÁKLADNÍ PRINCIP ŠÍŘENÍ TEPLA .....	14
2.1.1 Šíření tepla kondukcí.....	14
2.1.2 Šíření tepla konvekcí.....	15
2.1.3 Šíření tepla radiací .....	16
2.2 DRUHY ELEKTROTEPELNÝCH ZAŘÍZENÍ .....	17
<b>3 INDUKČNÍ OHŘEV</b> .....	<b>18</b>
3.1 HISTORIE INDUKČNÍHO OHŘEVU .....	18
3.2 VÝHODY A NEVÝHODY POUŽÍVÁNÍ INDUKČNÍCH PECÍ .....	19
3.3 PRINCIP INDUKČNÍHO OHŘEVU.....	19
3.4 OBECNÉ ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ .....	21
3.5 POYNTINGŮV VEKTOR .....	24
3.6 OBECNÉ VÁLCOVÉ ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ .....	25
3.7 ZÁVISLOST INDUKČNÍHO OHŘEVU NA FREKVENCI .....	29
3.8 VLIV PERMEABILITY NA VLASTNOSTI OHŘEVU .....	31
3.9 TYPY INDUKČNÍCH PECÍ .....	32
3.9.1 Indukční tavicí pec s nevodivým kelímkem.....	32
3.9.2 Indukční tavicí pec s vodivým kelímkem .....	34
3.9.3 Indukční kanálková tavicí pec.....	34
3.10 DALŠÍ VYUŽITÍ INDUKČNÍHO OHŘEVU.....	35
<b>4 ZPŮSOBY STÍNĚNÍ INDUKČNÍCH PECÍ</b> .....	<b>36</b>
4.1 ELEKTROMAGNETICKÉ STÍNĚNÍ .....	36
4.2 STÍNĚNÍ VODIVÝM PLÁŠTĚM .....	36
4.3 STÍNĚNÍ POMOCÍ SVAZKŮ TRANSFORMÁTOROVÝCH PLECHŮ .....	40
4.4 POROVNÁNÍ STÍNĚNÍ .....	43
<b>5 VÝPOČET ELEKTRICKÝCH A GEOMETRICKÝCH PARAMETRŮ PECE</b> .....	<b>45</b>
5.1 VÝPOČET GEOMETRICKÝCH ROZMĚRŮ PECE .....	45
5.2 VÝPOČET ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ PECE BEZ STÍNĚNÍ .....	46
5.3 VÝPOČET ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ PECE SE STÍNĚNÍM TRANSFORMÁTOROVÝMI PLECHY .....	49
5.4 NÁVRH JÁDRA TRANSFORMÁTOROVÝCH PLECHŮ .....	53
5.5 ZHODNOCENÍ VÝPOČTŮ .....	53
<b>6 MĚŘENÍ INTENZITY MAGNETICKÉHO POLE</b> .....	<b>55</b>
6.1 MĚŘENÍ MAGNETICKÝCH POLÍ .....	55
6.2 MĚŘICÍ PŘÍSTROJ NARDA ETL 400.....	56
6.3 POPIS MĚŘENÉ PECE.....	57
6.3.1 Technické údaje pece .....	58
6.4 POPIS REŽIMU TAVENÍ.....	59
6.5 POSTUP A PRŮBĚH MĚŘENÍ.....	59
6.6 REFERENČNÍ HODNOTY MAGNETICKÉHO POLE.....	59

---

6.7	NÁKRES MĚŘENÉ PECE.....	62
6.8	NAMĚŘENÉ HODNOTY MAGNETICKÉ INDUKCE.....	63
6.9	POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT S ICNIRP .....	64
6.9.1	<i>Grafické porovnání naměřených hodnot s ICNIRP .....</i>	<i>69</i>
<b>7</b>	<b>SIMULACE PECE .....</b>	<b>71</b>
7.1	SIMULACE BEZ STÍNĚNÍ.....	71
7.2	SIMULACE SE STÍNĚNÍM .....	73
<b>8</b>	<b>ZHODNOCENÍ ZAŘÍZENÍ KRITÉRIEM 3E.....</b>	<b>75</b>
8.1	EKONOMIKA .....	75
8.2	ENERGETIKA.....	75
8.3	ÉKOLOGIE.....	76
<b>9</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>77</b>
<b>10</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>78</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>80</b>

## Seznam obrázků

OBRÁZEK 3.3.1 SCHÉMA MAGNETICKÉHO POLE OKOLO VODIČE PROTÉKANÉHO STŘÍDAVÝM PROUDEM (PŘEVZATO Z [5]).....	20
OBRÁZEK 3.3.2 PRINCIP INDUKČNÍHO OHŘEVU (PŘEVZATO A UPRAVENO Z [6]) .....	21
OBRÁZEK 3.7.1 ZÁVISLOST POMĚRU $D/A$ NA ÚČINNOSTI OHŘEVU (PŘEVZATO Z [6]) .....	29
OBRÁZEK 3.7.2 MNOŽSTVÍ VYVINUTÉHO TEPLA V POVRCHOVÝCH VRSTVÁCH VSÁZKY V ZÁVISLOSTI NA HLOUBCE VNIKU (PŘEVZATO A UPRAVENO Z [1]).....	30
OBRÁZEK 3.9.1 SCHÉMA INDUKČNÍ KELÍMKOVÉ PECE S NEVODIVÝM KANÁLKEM (PŘEVZATO Z [2]).....	33
OBRÁZEK 3.9.2 SCHÉMA PECE S VODIVÝM KANÁLKEM (PŘEVZATO Z [9]) .....	34
OBRÁZEK 3.9.3 SCHÉMA KANÁLKOVÉ INDUKČNÍ PECE (PŘEVZATO Z [2]) .....	35
OBRÁZEK 4.2.1 NÁHRADNÍ GEOMETRICKÝ A ELEKTRICKÝ MODEL INDUKČNÍ PECE (PŘEVZATO Z [9]) .....	37
OBRÁZEK 4.2.2 ZÁVISLOST ZTRÁT VE STÍNÍCÍM PLÁŠTI NA POMĚRU $D_3/D_1$ (PŘEVZATO Z [9]) .....	40
OBRÁZEK 4.3.1 MODEL ODSTÍNĚNÍ INDUKTORU (VYTVOŘENO V AGROS2D) .....	40
OBRÁZEK 4.3.2 STÍNĚNÍ SVAZKY TRANSFORMÁTOROVÝCH PLECHŮ (PŘEVZATO Z [9]) .....	41
OBRÁZEK 4.3.3 MĚRNÉ ZTRÁTY V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI (PŘEVZATO Z [9]) .....	43
OBRÁZEK 6.2.1 MĚŘICÍ PŘÍSTROJ NARDA ETL – 400 S MĚŘICÍ HLAVOU (PŘEVZATO Z [11]) .....	56
OBRÁZEK 6.2.2 BLOKOVÉ SCHÉMA MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE NARDA ETL – 400 (PŘEVZATO Z [11]) .....	57
OBRÁZEK 6.6.1 GRAF REFERENČNÍCH HODNOT .....	61
OBRÁZEK 6.7.1 NÁKRES PECE S MĚŘENÝMI BODY ZE SHORA PECE.....	62
OBRÁZEK 6.7.2 NÁKRES PECE S MĚŘENÝMI BODY Z PŘEDNÍ STRANY PECE .....	62
OBRÁZEK 6.9.1 GRAF MĚŘENÍ NA POVRCHU VRCHNÍ ČÁSTI PECE .....	69
OBRÁZEK 6.9.2 GRAF MĚŘENÍ $I_M$ NAD POVRCHEM VRCHNÍ ČÁSTI PECE .....	69
OBRÁZEK 6.9.3 GRAF MĚŘENÍ NA POVRCHU PŘEDNÍ ČÁSTI PECE .....	70
OBRÁZEK 6.9.4 GRAF MĚŘENÍ $I_M$ OD POVRCHU PŘEDNÍ ČÁSTI PECE .....	70
OBRÁZEK 7.1.1 NÁKRES PECE V PROGRAMU AGROS2D .....	71
OBRÁZEK 7.1.2 MAGNETICKÝ VEKTOROVÝ POTENCIÁL .....	72
OBRÁZEK 7.1.3 MAGNETICKÁ INDUKCE.....	72
OBRÁZEK 7.2.1 MAGNETICKÝ VEKTOROVÝ POTENCIÁL PECE SE STÍNĚNÍM.....	73
OBRÁZEK 7.2.2 MAGNETICKÁ INDUKCE PECE SE STÍNĚNÍM.....	74
OBRÁZEK 7.2.3 POROVNÁNÍ PECE BEZ STÍNĚNÍ A PECE SE STÍNĚNÍM .....	74



## Seznam tabulek

TABULKA 6.3-1 MOŽNOST APLIKACE SUCHÝCH SMĚSÍ V INDUKČNÍCH PECÍCH PRO RŮZNÉ TAVENINY (PŘEVZATO Z DOKUMENTACE PECE EGP 500) .....	58
TABULKA 6.6-1 REFERENČNÍ HODNOTY PRO PRACOVNÍKY (VYTVOŘENO NA ZÁKLADĚ [12]) .....	60
TABULKA 6.6-2 REFERENČNÍ HODNOTY PRO ŠIROKOU VEŘEJNOST (VYTVOŘENO NA ZÁKLADĚ [12]) .....	60
TABULKA 6.8-1 ZMĚŘENÉ HODNOTY MAGNETICKÉ INDUKCE Z VRCHNÍ STRANY PECE .....	63
TABULKA 6.8-2 ZMĚŘENÉ HODNOTY MAGNETICKÉ INDUKCE Z PŘEDNÍ STRANY PECE .....	64
TABULKA 6.9-1 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ VRCHNÍ ČÁSTI PECE (POVRCH) S ICNIRP .....	65
TABULKA 6.9-2 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ VRCHNÍ ČÁSTI PECE (1M NAD POVRCHEM) S ICNIRP .....	66
TABULKA 6.9-3 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ PŘEDNÍ ČÁSTI PECE (NA POVRCHU) S ICNIRP .....	67
TABULKA 6.9-4 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ PŘEDNÍ ČÁSTI PECE (1M NAD POVRCHEM) S ICNIRP .....	68

## Seznam použitých symbolů a zkratek

$a \left[\frac{m^2}{s}\right]$	součinitel teplotní vodivosti
$a [m]$	hloubka vniku naindukovaných proudů
$B [T]$	indukce magnetického pole
$c \left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$	měrná teplotní kapacita
$c \left[\frac{m}{s}\right]$	rychlost světla
$C [-]$	integrační konstanta
$d [m]$	průměr
$E \left[\frac{V}{m}\right]$	intenzita elektrického pole
$f [Hz]$	frekvence
$F [-]$	Nagaokův koeficient
$h [m]$	vzdutí taveniny
$H \left[\frac{A}{m}\right]$	intenzita magnetického pole
$I [A]$	elektrický proud
$l [m]$	délka
$L [H]$	vlastní indukčnost
$M [H]$	vzájemná indukčnost
$N [-]$	počet závitů
$P [W]$	tepelný tok, výkon
$R [\Omega]$	elektrický odpor
$r [m]$	poloměr
$S [m^2]$	plocha
$S \left[\frac{W}{m^2}\right]$	Poyntingův zářivý vektor
$U [V]$	elektrické napětí
$V [m^3]$	objem
$W [J]$	energie
$z [m]$	válcová souřadnice výšky
$\alpha \left[\frac{W}{m^2 K}\right]$	součinitel přestupu tepla
$\alpha [-]$	fázová konstanta
$\alpha [-]$	Nagaokův koeficient

$\beta [-]$	měrný útlum
$\gamma [\frac{S}{m}]$	měrná elektrická vodivost
$\varepsilon [\frac{F}{m}]$	permitivita
$\kappa [-]$	koeficient vzájemné vazby
$\mu [\frac{H}{m}]$	permeabilita
$\lambda [\frac{W}{m \cdot K}]$	měrná tepelná vodivost, tabulková hodnota
$\lambda [m]$	vlnová délka
$\gamma [\frac{kg}{m^3}]$	měrná hustota materiálu
$\vartheta [K]$	teplota
$\rho [\frac{C}{m^3}]$	hustota náboje
$\varphi [rad]$	souřadnice
$\Phi [Wb]$	magnetický tok
$\omega [\frac{rad}{s}]$	úhlová frekvence

### Důležité konstanty

permitivita vakua  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} [\frac{F}{m}]$

permeabilita vakua  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [\frac{H}{m}]$

### Matematické operátory

Laplaceův operátor  $\nabla$

divergence  $div$

rotace  $rot$

gradient  $grad$

### Rozlišení veličin

Vektorové veličiny jsou značeny **tučně a kurzívou**.

Skalární veličiny jsou označeny *kurzívou*

Fázorové veličiny jsou označeny pruhem nad symbolem (například  $\bar{B}$ ).

# 1 Úvod

Indukční ohřev byl objeven již v 19. století, ale v té době ještě nenašel uplatnění. Až na začátku 20. století se začal indukční ohřev používat k tavení kovových materiálů. K rozvoji indukčního ohřevu přispěly především jeho jedinečné vlastnosti. Při indukčním ohřevu na rozdíl od jiných typů ohřevů vzniká teplo přímo ve vodivé vsázce a nevznikají tak ztráty přenosem tepla. Indukční ohřev je také velmi rychlý, přesný. Díky působení elektrodynamických sil na roztavenou vsázku je vsázka dokonale promíchána, což vede k její homogenizaci a vytvoření dokonale promíchané taveniny. Nejen díky těmto vlastnostem se dnes indukční ohřev používá v hutnictví, průmyslu, ale i v gastronomii.

Jedním z cílů této diplomové práce je popsat teorii indukčního ohřevu. Tomu jsem věnoval kapitolu 3. V této kapitole se stručně věnuji historii indukčního ohřevu, jednotlivým typům indukčních pecí a teorii, která je s indukčním ohřevem spojena. V další části popsuji teorii stínění indukčních pecí a uvádím jednotlivé výhody a nevýhody jednotlivých typů stínění.

V praktické části práce je pak uveden výpočet geometrických a elektrických parametrů indukční kelímkové pece. Dále jsou zde uvedeny výsledky měření magnetického pole v okolí reálné indukční kelímkové pece ECOMELT EGP 500. Výsledky měření magnetické indukce v okolí pece jsem porovnal se standardy a směnicemi a v závěru práce naznačuji možnost snížení vlivu magnetického pole na okolí použitím svazků transformátorových plechů. Závěrem práce provádím zhodnocení pece kritériem 3E a uvádím závěry pro praxi.

## 2 Elektrotepelná zařízení

V průmyslově vyspělých státech středních a vyšších zeměpisných šířek se podle světových statistik spotřebovává 70 – 80 % veškeré vyrobené energie na teplo. Jedná se zejména o teplo technologické (elektrické pece, svařování, chemické procesy s využitím tepla atd.) a teplo určené k vytápění a ohřevu vody pro domácnosti. Velkou část tohoto podílu zaujímá teplo elektrické, které se z celkové vyrobené elektrické energie spotřebovává přibližně 30 – 40 % v elektrotepelných zařízeních. Elektrotepelnými zařízeními jsou myšlena zařízení, u kterých se záměrně mění elektrická energie na energii tepelnou. [1], [2], [3]

V následujících podkapitolách jsou stručně rozebrány druhy těchto elektrotepelných zařízení a principy šíření tepla.

### 2.1 Základní princip šíření tepla

Látky se skládají podle Bohrova modelu z atomů. U pevných látek se tyto atomy sdružují do krystalických mřížek, kde následně kmitají kolem svých rovnovážných poloh a vlivem působení vzájemných přitažlivých sil tyto pozice nemohou opustit. Pokud ale budeme zvyšovat teplotu (tedy rychlost a rozkmit atomů), narušíme přitažlivé síly a atomy se začnou mezi sebou volně pohybovat. Z pevné látky dostaneme látku kapalnou, přičemž budeme-li v tomto procesu pokračovat zvyšováním teploty ještě více, začnou se z kapaliny vypařovat jednotlivé atomy a kapalina přechází v plyn. [1]

Látek popsaných výše se týká proces šíření tepla, kdy teplo volně proudí od místa s vyšší teplotou do míst s nízkou teplotou. Samotný transport tepla vychází z důsledku existence teplotního gradientu. Pokud tedy existuje v prostředí rozdíl teplot, musí docházet k jeho přenosu. Více o této problematice lze nalézt v literatuře např. [1]

Teplo se šíří třemi základními způsoby: [1], [2], [3]

- kondukcí – vedením
- konvekcí – prouděním
- radiací – sáláním – zářením

#### 2.1.1 Šíření tepla kondukcí

Šíření tepla kondukcí (vedením) je základním principem přenosu tepla. Částice látky mající vysokou kinetickou energii, tedy vysokou teplotu předávají prostřednictvím

vzájemných srážek část své energie částici s nižší teplotou. Tento proces se neustále opakuje až do doby, kdy obě částice budou mít stejnou teplotu.

Tento princip přenosu tepla je nejvýraznější u pevných látek a zejména u kovů, kde díky sdíleným elektronům v kovových vazbách dochází k rychlému přenosu tepla z jednoho místa na druhé. Teplo se může vedením šířit i v plynných a kapalných látkách, ale zde jsou částice řídce rozmístěné, čímž tedy klesá možnost jejich vzájemné kolize a předání tepelné energie.

Schopnost látky přenášet teplo lze charakterizovat jeho měrnou tepelnou vodivostí  $\lambda$ . Tuto veličinu lze definovat jako množství přeneseného tepla za jednotku času jednotkovou plochou při jednotkovém teplotním spádu. [1]

V praxi se při výpočtech prostupu tepla vedením používá Fourier – Kirchhoffova rovnice v neustáleném stavu: [1], [3]

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma} \cdot \left[ \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right] = a \cdot \nabla^2 \vartheta \quad (2.1.1.1)$$

$\lambda$  [ $\frac{W}{m \cdot K}$ ] – měrná tepelná vodivost, tabulková hodnota

$\gamma$  [ $\frac{kg}{m^3}$ ] – měrná hustota materiálu

$c$  [ $\frac{J}{kg \cdot K}$ ] – měrná teplotní kapacita

$a$  [ $\frac{m^2}{s}$ ] – součinitel teplotní vodivosti

$\nabla^2$  – Laplace-ův operátor teploty  $\vartheta$

### 2.1.2 Šíření tepla konvekcí

Konvekce (proudění) je přenos tepla uplatňující se zejména u plynných a kapalných látek, které mohou fyzicky proudit. Tímto prouděním (pohybem) z jednoho místa na druhé prostřednictvím své hmoty přenášejí tepelnou energii. Přenos tepla prouděním lze rozdělit na dvě základní kategorie, a to na přirozenou konvekci a nucenou konvekci. U přirozené konvekce dochází k samovolnému proudění způsobeného rozdílnými hustotami částic plynu, nebo kapalin. Nucená konvekce je vyvolána vnějším zdrojem, jako je například ventilátor u plynů nebo čerpadlo u kapalin.

Množství tepla, které se předává při proudění, je dáno Newtonovým vztahem: [1], [2], [3]

$$P = \alpha \cdot S(\vartheta_1 - \vartheta_0) [W] \quad (2.1.2.1)$$

$P [W]$  – tepelný tok

$S [m^2]$  – plocha

$\vartheta_1, \vartheta_0 [K]$  – teplota

$\alpha [\frac{W}{m^2 K}]$  – součinitel přestupu tepla

Součinitel přestupu tepla je složitá funkce. Nejedná se o materiálovou konstantu, ale o závislost, která je ovlivněna mnoha parametry prostředí. Více k této problematice je možné nalézt v literatuře [1], [2], [3].

### 2.1.3 Šíření tepla radiací

Tělesa, která mají vyšší teplotu než je absolutní nula ( $0^\circ K$ ), vyzařují svým povrchem do okolí tepelnou energii. Jedná se o energii šířící se elektromagnetickým vlněním. Toto vlnění se šíří v průzračném prostředí, a to všemi směry, a platí pro něj zákony geometrické optiky. Každé těleso, které energii vyzařuje, tak také energii od ostatních těles přijímá. V konečném důsledku se těleso buďto otepluje, když přijímá více energie, nebo se naopak ochlazuje, pokud převažuje vyzařování.

Dopadající záření se z části v tělese pohltí, část záření se odrazí a část záření projde tělesem dále. Pro tyto případy platí: [1],[2]

$$\text{Činitel pohltivosti} \quad A = \frac{\text{pohlčená energie}}{\text{celková dopadlá energie}}$$

$$\text{Činitel odrazivosti} \quad B = \frac{\text{odražená energie}}{\text{celková dopadlá energie}}$$

$$\text{Činitel propustnosti} \quad C = \frac{\text{propuštěná energie}}{\text{celková dopadlá energie}}$$

Podle zákona zachování energie tedy musí platit:

$$A + B + C = 1 \quad (2.1.3.1)$$

Z těchto vztahů lze vyvodit existenci absolutně černého povrchu ( $A=1$ ;  $B=0$ ;  $C=0$ ). Tento povrch tedy pohltí veškerou dopadající energii. Naprosto opačné vlastnosti má bílé těleso ( $A=0$ ;  $B=1$ ,  $C=0$ ), které veškerou energii odrazuje. Dále je ještě teoreticky možná existence absolutně průzračného (propustného) povrchu ( $A=0$ ;  $B=0$ ;  $C=1$ ). V praxi ale nikdy nedosáhneme takovýchto vlastností. Mluvíme o tzv. šedých tělesech, která mají vlastnosti

všech tří činitelů. Zákony (Kirchoffův, Stefan-Boltzmannův, Wienův, Planckův) popisující výpočty těchto těles lze nalézt v literatuře [1], [2], [3].

Energie tepla se šíří pomocí elektromagnetických vln o určité vlnové délce  $\lambda$ , která je dána vztahem:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{\text{rychlost šíření ve vakuu (vzduchu)}}{\text{frekvence záření}} \text{ [m]} \quad (2.1.3.2)$$

Lze tedy rozlišovat spektrum viditelného spektra o vlnové délce  $\lambda = 380$  nm (fialová) až 780 nm (červená). Pokud se vlnění nachází mimo tyto hranice, jedná se o neviditelné vlnění. Pro vlny o délce větší než 780 nm hovoříme o infračerveném záření, které se projevuje jako sálavé teplo. Pro vlnové délky kratší než 380 nm pak hovoříme o ultrafialovém záření. [2], [3].

## 2.2 Druhy elektrotepelných zařízení

V dnešní době je elektrotepelná technika poměrně rozšířený vědní a technologický obor, který se zabývá přeměnou elektrické energie na teplo. K těmto přeměnám se používají elektrotepelná zařízení pracující na různých principech a lze je rozdělit do následujících skupin: [2]

- zařízení odporová,
- zařízení oblouková (výbojová),
- zařízení indukční,
- zařízení dielektrická,
- zařízení elektronová,
- zařízení plazmová,
- zařízení laserová.

Tato práce se zabývá indukčním ohřevem se zaměřením na tavicí kelímkovou pec. Princip indukčního ohřevu je rozebrán v následující kapitole.



## 3 Indukční ohřev

### 3.1 Historie indukčního ohřevu

Základním principem indukčního ohřevu je elektromagnetická indukce, kterou při svých experimentech objevil v roce 1831 významný anglický chemik a fyzik Michael Faraday (1791 – 1867). Faraday sestrojil zařízení složené z železné trubky, kterou na obou koncích ovinul různou vrstvou měděného drátu a odizoloval kartonem. Jeden konec spojil s baterií a na druhý konec připojil galvanometr. Výsledkem tohoto pokusu dokázal existenci magnetické indukce, která při připojení baterie k první cívce vyvolala proudový impuls v cívce druhé. Poté svůj pokus ještě zdokonalil, když vsunoval tyčový magnet do válcové cívky a zaznamenával proudové impulsy. Dokázal tak, že elektřina a magnetismus jsou pouze projevy jediného jevu elektromagnetismu. [4], [5]

Další důležitý krok pro praktické využití elektromagnetismu udělal James Clerk Maxwell (1831 – 1879), který shromáždil Faradayovy teorie a vytvořil matematický aparát popisující elektrické a magnetické jevy. Vytvořil především známé Maxwellovy rovnice, které jsou používány pro popis elektromagnetického pole. Tímto se dostal princip elektromagnetické indukce do povědomí vědecké komunity a mohl tak nastat rozvoj indukčního ohřevu. [4], [5]

V polovině 19. století se hledal způsob tavení kovů pomocí elektrické energie. První využití elektřiny k tavení kovů bylo založeno na odporové a obloukové technologii. V roce 1887 navrhl anglický elektrotechnik Sebastian de Ferranti první indukční pec využívající se k těmto účelům. Dalším vývojem a aplikací indukčních pecí se zabývali E. A. Colby a F. A. Kjelin. Colby vytvořil řadu patentů a vyrobil v roce 1906 jednu z prvních indukčních pecí uvedenou do provozu v USA. Pec měla kapacitu 195 liber (88.45Kg). Paralelně s Colbym se věnoval otázce indukčních pecí také Kjelin, který navrhl v roce 1891 pec s kanálkem a uvedl ji do provozu v roce 1899. Tato pec měla kapacitu 50 Kg. [4], [5]

Indukční pece se začaly používat k tavení různých druhů kovů a slitin. S širokým uplatněním pecí začaly vznikat různé problémy s napájením a frekvenčním rozsahem. Tato omezení byla zmírněna po roce 1922, kdy se začaly používat motor-generátory, které mohly dodávat elektřinu v řádech kW a ve frekvenčním rozsahu až 960 Hz. [4], [5]

K rozmachu indukčního tavení, jakož i většiny vědních oborů, přispěla druhá světová válka, kdy se hojně využívala indukční technologie při výrobě zbraní a těžké techniky. Po druhé světové válce až prakticky do současnosti se rozvoj indukčního ohřevu orientoval především na zvýšení účinnosti a snižování energetické náročnosti tavení. [4], [5]

### 3.2 Výhody a nevýhody používání indukčních pecí

Mezi hlavní přednosti indukčního ohřevu patří galvanicky oddělený zdroj střídavého proudu a prohřívání vsázky. Střídavé elektromagnetické pole vytváří teplo přímo ve vsázce, čímž odpadají ztráty vzniklé ohřevem částí pece, které se přímo nepodílejí na ohřevu. Další velmi důležitá vlastnost indukčních pecí je jejich dobrá regulace. Poměrně snadno pomocí frekvence lze řídit hloubku prohřívání vsázky a rozložení ohříváných zón. Mezi další výhody patří vysoká rychlost ohřevu, regulace přeneseného výkonu do vsázky a relativně dobrá účinnost v porovnání s plynovou nebo odporovou metodou ohřevu. Díky působení elektrodynamických sil se vsázka v roztaveném stavu rovnoměrně promíchává. Toto je velmi cenná vlastnost indukčního ohřevu a využívá se jí při výrobě ocelí a slitin s dokonalým homogenním složením taveniny, kterého nelze dosáhnout v žádném jiném druhu tavicích pecí. [7] Neméně důležitou vlastností je také šetrnost k životnímu prostředí. Při indukčním ohřevu nevznikají žádné spaliny, žádný odpad a provozování pecí je nehlukčné.

Naopak nevýhodou jsou poměrně vysoké pořizovací náklady velkoobjemových indukčních pecí. To je způsobeno zejména konstrukční náročností pecí a použitými materiály. Další nevýhodou jsou drahé a složité měniče frekvence.

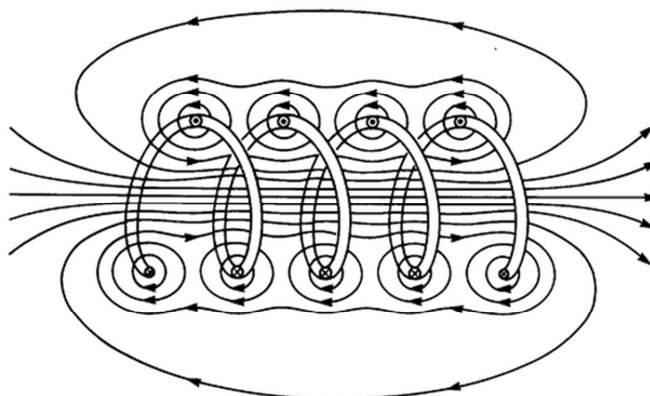
### 3.3 Princip indukčního ohřevu

Elektricky vodivé materiály je možné ohřívat, tavit a jinak technologicky upravovat pomocí indukčního ohřevu. Tento jev je založený na elektromagnetické indukci, která popisuje vznik naindukovaného napětí v uzavřeném obvodu na který působí magnetický indukční tok. Vznik naindukovaného napětí je dán Faradayovým indukčním zákonem

$$u_i = - \frac{d\Phi}{dt} [V] \quad (3.3.1)$$

Z uvedeného vztahu je patrné, že pro vznik naindukovaného napětí je nutná časová závislost magnetického toku  $\Phi [Wb]$ . Toho se dosahuje vytvořením proměnného elektromagnetického pole. Výše popsaného principu lze dosáhnout pomocí induktoru, kterým

protéká střídavý harmonický proud charakterizovaný frekvencí  $f[Hz]$ . Průchodem proudem se v okolí vodiče začne vytvářet magnetické pole.



**Obrázek 3.3.1** Schéma magnetického pole okolo vodiče protékaného střídavým proudem (převzato z [5])

Směr siločar vytvořeného magnetického pole okolo vodiče je popsán Lenzovým zákonem (pravidlem). Indukovaný proud v uzavřeném obvodu má takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického toku, který ho vyvolal. [5]

Pokud do tohoto pole umístíme vodivý předmět (vsázku), začnou se v této vsázce indukovat vířivé proudy [2]. Materiál je charakterizovaný odporem daným vztahem:

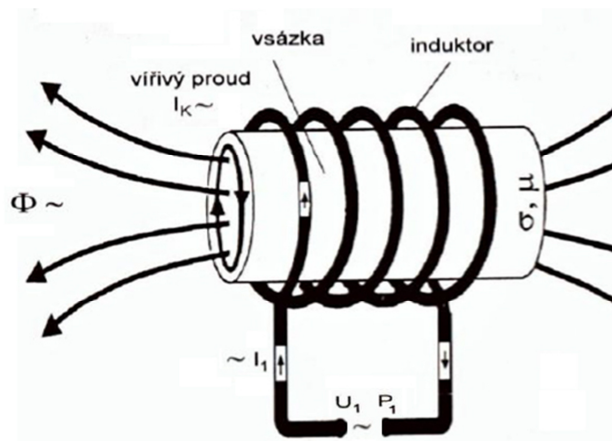
$$R = \frac{\rho l}{S} [\Omega] \quad (3.3.2)$$

kde  $\rho[\Omega \cdot m]$  je měrný elektrický odpor materiálu,  $l[m]$  délka vodiče (vsázky),  $S[m^2]$  je průřez vsázky. Tento odpor materiálu brání průchodu proudů a materiál se díky Joulovým ztrátám

$$P = RI_{ef}^2 [W] \quad (3.3.3)$$

začne ohřívat. Prohřívání se postupně šíří od povrchu vsázky, kde je nejvyšší proudová hustota, k ose symetrie prohřívání tělesa. Teplo se do vsázky neodpravuje tepelným spádem (vedením), ale vzniká přímo ve vsázce. Ostatní tělesa v okolí mohou být relativně studená, protože vsázka není nijak mechanicky s okolím provázána. [2] Právě tato vlastnost patří mezi největší výhody indukčního ohřevu. To však platí pouze za předpokladu, že induktor je dobře odstíněn, tedy že nepůsobí na okolní konstrukční prvky. Detailnější popis problematiky stínění indukčních pecí bude probrán v kapitole 6.

Indukční zařízení si lze představit jako cívku (induktor), zdroj střídavého proudu a ohřívání předmět (vsázku) umístěnou v poli induktoru. Princip odpovídá transformátoru se sekundárním vinutím spojeným dokrátka. Tento model znázorňuje obrázek 3.3.2.



Obrázek 3.3.2 Princip indukčního ohřevu (převzato a upraveno z [6])

Průchodem střídavého proudu rovinným induktorem pak vzniká v okolí rovinné elektromagnetické vlnění. Pokud se jedná o válcovou cívku, jako na obrázku 3.3.2, vzniká válcové elektromagnetické vlnění. Tyto elektromagnetické vlny se částečně od vsázky odrazí a částečně je vsázka pohltí, což způsobuje vznik tepla elektromagnetickou indukcí. Tato problematika je složitější a je nezbytné ji popsat na matematickém modelu. Tomu se bude věnovat následující kapitola 3.4 a 3.5 [6]

### 3.4 Obecné elektromagnetické vlnění

Pro odvození vlnových rovnic obecného elektromagnetického prostředí je uvažováno neohraničené homogenní izotropní klidné prostředí, které lze charakterizovat materiálovými konstantami  $\varepsilon, \mu, \gamma$ . Všechny uvedené vzorce vycházejí z literatury [2], [7], [8].

Elektromagnetické vlny jsou popsány vlnovými rovnicemi pomocí veličin elektrické intenzity  $\mathbf{E}$  a magnetické intenzity  $\mathbf{H}$ . Při odvozování těchto rovnic se vychází z Maxwellových rovnic v diferenciálním tvaru.

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (3.4.1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (3.4.2)$$

$$\operatorname{div} \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} = \rho_v \quad (3.4.3)$$

$$\operatorname{div} \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = 0 \quad (3.4.4)$$

Provedeme-li rotaci 1. Maxwellovy rovnice (3.4.1):

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = \operatorname{rot} \left( \gamma \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) = \gamma \operatorname{rot} \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial(\operatorname{rot} \mathbf{E})}{\partial t} \quad (3.4.5)$$

Dále je z vektorového počtu známý vztah:

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = \operatorname{grad}(\operatorname{div} \mathbf{H}) - \nabla^2 \mathbf{H} \quad (3.4.6)$$

Potom za použití vztahu (3.4.6) a dosazením za  $\operatorname{rot} \mathbf{E}$  z 2. Maxwellovy rovnice (3.4.2):

$$\operatorname{grad}(\operatorname{div} \mathbf{H}) - \nabla^2 \mathbf{H} = -\gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (3.4.7)$$

4. Maxwellova rovnice značí nezhřídlovost pole  $\operatorname{div} \mathbf{H} = 0$ , můžeme tedy napsat výslednou rovnici intenzity  $\mathbf{H}$ :

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (3.4.8)$$

Pro odvození složky elektrické intenzity  $\mathbf{E}$  provedeme rotaci 2. Maxwellovy rovnice (3.4.2):

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{E}) = -\mu_0 \mu_r \frac{\partial(\operatorname{rot} \mathbf{H})}{\partial t} \quad (3.4.9)$$

Za  $\operatorname{rot} \mathbf{H}$  dosadíme z 1. Maxwellovy rovnice (3.4.1) a dále podle ekvivalentního vzorce (3.4.6) dostaneme:

$$\operatorname{grad}(\operatorname{div} \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} = -\gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (3.4.10)$$

3. Maxwellova rovnice (3.4.3) říká:

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \quad (3.4.11)$$

Dostáváme výslednou rovnici  $\mathbf{E}$ :

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \operatorname{grad} \frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \quad (3.4.12)$$

Tyto odvozené rovnice pro elektrickou ( $\mathbf{E}$ ) a magnetickou ( $\mathbf{H}$ ) intenzitu jsou obecnými rovnicemi popisujícími šíření elektromagnetického vlnění v prostředích, kde  $\varepsilon_r$ ,  $\mu_r$ ,  $\gamma$  jsou konstanty. Reálná prostředí však můžeme rozdělit na elektricky vodivá a elektricky nevodivá, v těchto případech se vlnové rovnice značně zjednoduší. Další zjednodušení přináší zanedbání volných nábojů ( $\rho = 0$ ). Pro nevodivé prostředí ( $\gamma = 0$ ) dostáváme tvar rovnic:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (3.4.13)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (3.4.14)$$

Pro vodivé prostředí ( $\gamma \neq 0$ ) dostáváme tvar rovnic:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (3.4.15)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (3.4.16)$$

V případě harmonického průběhu  $\mathbf{E}$  a  $\mathbf{H}$ , dosadíme rotující fázor v komplexní rovině:

$$\bar{\mathbf{E}} = \mathbf{E}_m e^{j\omega t} \quad (3.4.17)$$

$$\bar{\mathbf{H}} = \mathbf{H}_m e^{j\omega t} \quad (3.4.18)$$

Harmonicky vyjádřené intenzity  $\mathbf{E}$  a  $\mathbf{H}$  derivujeme podle času a výsledné vztahy dosadíme do rovnic obecného elektromagnetického vlnění:

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{H}} + \omega^2 \mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r \bar{\mathbf{H}} - j\omega \gamma \mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r \bar{\mathbf{H}} = 0 \quad (3.4.19)$$

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{E}} + \omega^2 \mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r \bar{\mathbf{E}} - j\omega \gamma \mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r \bar{\mathbf{E}} = 0 \quad (3.4.20)$$

Po úpravě:

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{H}} + (\omega^2 \mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r - j\omega \gamma \mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r) \bar{\mathbf{H}} = 0 \quad (3.4.21)$$

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{E}} + (\omega^2 \mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r - j\omega \gamma \mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r) \bar{\mathbf{E}} = 0 \quad (3.4.22)$$

Pro další zjednodušení se zavádí koeficient  $k$ :

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{H}} + k^2 \bar{\mathbf{H}} = 0 \quad (3.4.23)$$

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{E}} + k^2 \bar{\mathbf{E}} = 0 \quad (3.4.24)$$

Koeficient  $k$  je konstanta šíření elektromagnetického vlnění

$$k = \alpha - j\beta; \quad k^2 = -j\omega\mu(\gamma + j\omega\varepsilon) \quad (3.4.25),$$

kde  $\alpha$  je fázová konstanta a  $\beta$  měrný útlum.

### 3.5 Poyntingův vektor

Poyntingův zářivý vektor  $\mathbf{S}$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] je základním pojmem elektromagnetického vlnění. Tento vektor určuje směr a hustotu toku elektromagnetické energie v prostoru. Velikost vektoru v určitém bodě prostoru závisí na elektrické  $\mathbf{E}$  a magnetické  $\mathbf{H}$  intenzitě. Při odvození tohoto vektoru se vychází z množství elektrické energie  $W_E$  (3.5.1) a magnetické energie  $W_H$  (3.5.2) v určitém prostoru charakterizovaném objemem  $V$ . Vztahy použité v této kapitole vychází z literatury [2], [7], [8].

$$W_e = \frac{1}{2} \int_0^V \mathbf{D}\mathbf{E}dV = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r \int_0^V \mathbf{E}^2 dV \quad (3.5.1)$$

$$W_m = \frac{1}{2} \int_0^V \mathbf{B}\mathbf{H}dV = \frac{1}{2} \mu_0 \mu_r \int_0^V \mathbf{H}^2 dV \quad (3.5.2)$$

Sečtením těchto energií a jejich záporným derivováním podle času dostaneme vztah (3.5.3). Časová derivace se provádí za předpokladu, že hustota elektromagnetické energie je v každém bodě časově proměnná (záporná z důvodu úbytku energie).

$$-\frac{\partial}{\partial t}(W_e + W_m) = - \int_0^V (\varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}) dV \quad (3.5.3)$$

Za parciální derivace elektrické a magnetické intenzity lze z Maxwellových rovnic (3.4.1) a (3.4.2) dosadit:

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} (\text{rot} \mathbf{H} - \gamma \mathbf{E}) \quad (3.5.4)$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = - \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \text{rot} \mathbf{E} \quad (3.5.5)$$

Po dosazení a upravení dostáváme:

$$-\frac{\partial}{\partial t}(W_e + W_m) = \int_0^V \gamma \mathbf{E}^2 dV + \int_0^V (\mathbf{H} \cdot \text{rot} \mathbf{E} - \mathbf{E} \cdot \text{rot} \mathbf{H}) dV \quad (3.5.6)$$

Podle vektorových pravidel lze výraz  $(\mathbf{H} \cdot \text{rot} \mathbf{E} - \mathbf{E} \cdot \text{rot} \mathbf{H})$  zaměnit s  $\text{div}(\mathbf{E} \times \mathbf{H})$ :

$$-\frac{\partial}{\partial t}(W_e + W_m) = \int_0^V \gamma \mathbf{E}^2 dV + \int_0^V \text{div}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}) dV \quad (3.5.7)$$

Na vztah (3.5.7) aplikujeme Gauss – Ostrogradského větu, která definuje podmínky záměny plošného integrálu na objemový integrál.

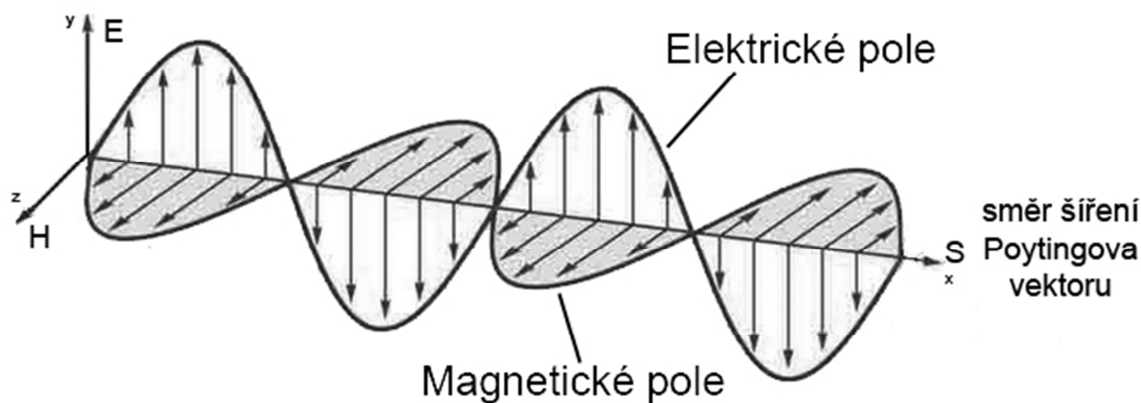
$$\int_0^V \operatorname{div}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}) dV = \oint_V (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) dF = \oint_V \mathbf{S} dF \quad (3.5.8)$$

Dosazením do vztahu (3.5.7) dostáváme:

$$-\frac{\partial}{\partial t}(W_e + W_m) = \int_0^V \gamma \mathbf{E}^2 dV + \oint_V \mathbf{S} dF \quad (3.5.9)$$

V rovnici (3.5.8) se vyskytuje výraz  $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$ , jedná se právě o hledaný Poyntingův zářivý vektor, který vychází z objemu  $V$  a připadá na jednotku plochy. Vektor je dán vektorovým součinem elektrické a magnetické intenzity. Na obrázku můžeme vidět směr šíření Poyntingova vektoru. V prostoru lze Poyntingův vektor nejsnadněji určit pravidlem levé ruky. Prsty ukazují směr elektrické intenzity a magnetická intenzita vstupuje do dlaně, palec udává směr šíření Poyntingova vektoru. [2]

Vztah (3.5.9) obsahuje kromě Poyntingova vektoru ještě výraz  $\gamma \mathbf{E}^2$ , který určuje, jaké množství se v uvažovaném objemu přemění za jednotku času na teplo. [8]



Obrázek 3.5.1 Směr šíření Poyntingova vektoru (vytvořeno na základě [2])

### 3.6 Obecné válcové elektromagnetické vlnění

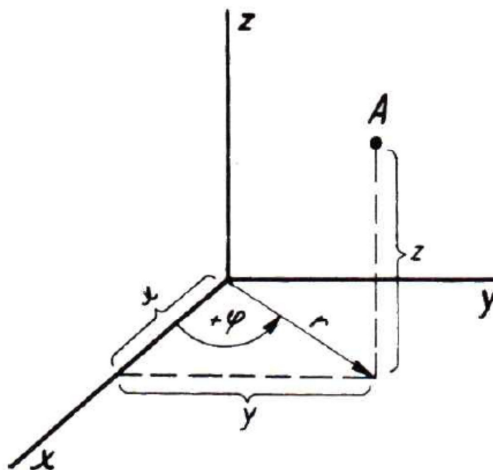
Šíření elektromagnetických vln v prostoru lze rozdělit na dva druhy. Na rovinné a válcové vlnění. Zatímco rovinné vlnění se v praxi příliš neprosadilo, tak válcové vlnění je základem celé řady indukčních zařízení. Zejména pak indukčních tavicích pecí, a to díky konstrukčnímu provedení induktoru, který má válcový tvar. Pro popis a odvození elektromagnetického vlnění ve válcových útvarech se pro zjednodušení zavádějí válcové (cylindrické) souřadnice. Tyto souřadnice nahrazují klasický kartézský souřadný systém ( $x, y,$



z) soustavou složenou ze tří souřadnic  $r, \varphi, z$  určenou vztahy: [2]

$$x = r \cos \varphi; \quad y = r \sin \varphi; \quad z = z \quad (3.6.1)$$

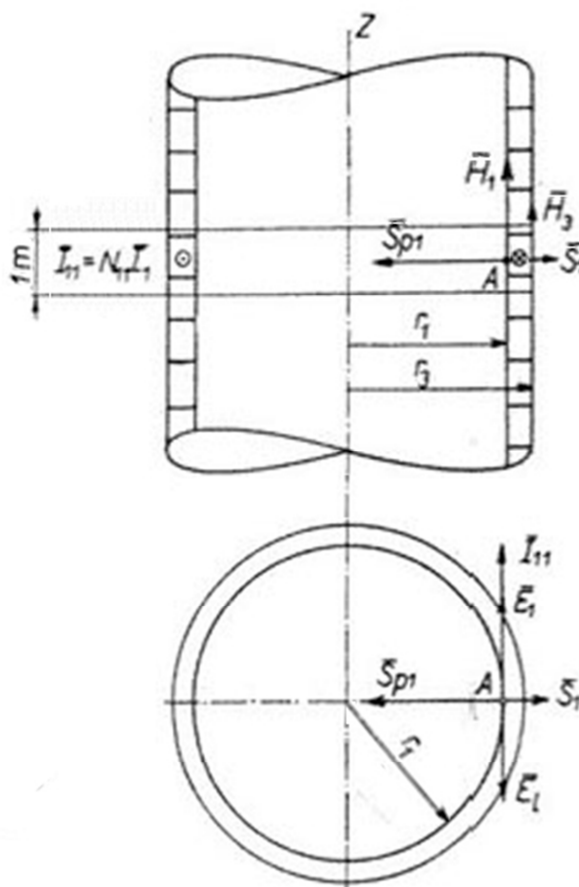
Jako názorná pomůcka může sloužit obrázek 3.6.1:



Obrázek 3.6.1 Válcový souřadnicový systém (převzato z [2])

Zdrojem válcového vlnění je tedy válcová cívka o vnitřním poloměru  $r_1$ , kterou protéká střídavý proud. Směr proudových vláken je vždy kolmý k ose válce. Pro zjednodušení výpočtů se uvažuje cívka nekonečné délky, kde popisované jevy závisí obvykle jen na poloměru  $r$ . Viz obrázek 3.6.2. Takto definovaná válcová cívka pak vyzařuje do své dutiny válcové elektromagnetické vlnění. [2], [7]

Válcová cívka je realizována z vodiče obdelníkového průřezu a nulové tloušťky izolace mezi závity. Stoupání cívky se zanedbává. Pokud cívkou protéká proud  $\overline{I_{11}}$ , pak směr intenzity elektrického pole  $\overline{E_1}$  je stejný. Směr magnetické intenzity  $\overline{H_1}$  je orientován vzhůru. Vektorový součin  $\overline{E_1}$  a  $\overline{H_1}$  poté určuje směr Poytingova zářivého vektoru  $\overline{S_1}$ , který vstupuje kolmo do stěny cívky a udává velikost ztrát v cívce. Průchodem proudu v cívce ( $\overline{I_2}$ ) se vybudí magnetický tok, který vytvoří elektromotorickou sílu  $\overline{E_t}$  opačného směru oproti intenzitě  $\overline{E_1}$ . Poté  $\overline{E_t}$  a  $\overline{H_1}$  vytvoří Poytingův zářivý vektor  $\overline{S_{p1}}$ , který směřuje kolmo do cívky.



**Obrázek 3.6.2** Řez cívkou a orientace vektorů  $E$ ,  $H$ ,  $S$  ve válcové vsázce (převzato a upraveno z [7])

Za předpokladu nekonečně dlouhé cívky se vybuzený magnetický tok v dutině cívky vrací nekonečným prostorem vně cívky zpět, má tedy nekonečný průřez a nulovou intenzitu. Proto je intenzita  $\overline{H}_3$  na vnějším poloměru  $r_3$  rovna nule. Potom tedy platí:

$$\overline{I}_{11} = \oint \overline{H} ds = \overline{H}_1 \cdot 1 - \overline{H}_3 \cdot 1 = \overline{H}_1 \quad (3.6.2)$$

Při odvozování válcového vlnění se vychází z rovnice obecného elektromagnetického vlnění. Uvedené vzorce vycházejí z literatury [2], [7], [8]. Nejprve je třeba definovat Laplaceův diferenciální operátor ve válcových souřadnicích:

$$\nabla^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (3.6.3)$$

Dále lze předpokládat, že intenzita  $\overline{H}$  závisí pouze na poloměru  $r$ . Úhel natočení  $\varphi$  a souřadnice výšky  $z$  nemají žádný vliv, proto je lze položit rovno nule a zanedbat. Po úpravě podle pravidla o derivování součinu bude Laplaceův operátor intenzity  $\overline{H}$ :

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \frac{1}{r} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial r^2} \quad (3.6.4)$$

Poté lze tento výraz, který je analogický i pro intenzitu elektrického pole, dosadit do rovnic pro vodivé a nevodivé prostředí (3.4.13 – 3.4.16). Nás ale více zajímá harmonický průběh intenzit  $\bar{\mathbf{E}}$  a  $\bar{\mathbf{H}}$ , proto dosadíme do rovnice pro harmonický signál (3.4.23) a dostáváme:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \bar{\mathbf{H}}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \bar{\mathbf{H}}}{\partial r^2} + k^2 \bar{\mathbf{H}} = 0 \quad (3.6.5)$$

Po vydělení konstantou  $k^2$  dostáváme diferenciální Besselovu rovnici nultého řádu argumentu ( $kr$ ):

$$\frac{1}{kr} \frac{d\bar{\mathbf{H}}}{d(kr)} + \frac{d^2 \bar{\mathbf{H}}}{d(kr)^2} + \bar{\mathbf{H}} = 0 \quad (3.6.6)$$

Řešením této rovnice je lineární kombinace dvou cylindrických funkcí téhož argumentu:

$$\bar{\mathbf{H}} = C_1 J_0(kr) + C_2 N_0(kr) \quad (3.6.7),$$

kde  $C_1, C_2$  jsou integrační konstanty,  $J_0(kr)$  a  $N_0(kr)$  jsou cylindrické funkce nultého řádu, prvního a druhého druhu (Besselova a Neumannova) argumentu  $kr$ . [2], [7], [8]

Následně můžeme odvodit rovnici pro elektrickou intenzitu. Vycházíme z 1. Maxwellovy rovnice (3.4.1), která definuje vztah mezi  $\mathbf{E}$  a  $\mathbf{H}$  a také z rovnice pro rotaci  $\mathbf{H}$  ve válcových souřadnicích odvozenou v literatuře [7], dostáváme po úpravě:

$$\bar{\mathbf{E}} = \frac{1}{\gamma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial r} \quad (3.6.8)$$

Z derivováním dostáváme rovnici elektrického pole:

$$\bar{\mathbf{E}} = \frac{k}{\gamma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r} [C_1 J_0(kr) + C_2 N_0(kr)] \quad (3.6.9)$$

Dále je potřeba určit integrační konstanty. Určení těchto konstant závisí na konkrétních případech. Řeší se problémy válcového vlnění v prázdné, nebo vodivé vsázce a celá řada dalších problémů. Toto odvození lze nalézt v literatuře [2], [7].

### 3.7 Závislost indukčního ohřevu na frekvenci

Důležitým parametrem, se kterým se musí počítat při tavení elektricky vodivých materiálů v indukčních pecích, je hloubka vniku pronikání elektromagnetického vlnění do ohřívaného materiálu. Tento parametr stanovuje vzdálenost od povrchu materiálu, kam prostoupí elektromagnetické vlnění a kde se jeho energie přemění na teplo [6]. V ohřívané vsázce se jak je popsáno v kapitole 3.3, indukují proudy. Vznik těchto proudů je závislý na napájecím napětí, které je charakterizované frekvencí. Frekvence způsobuje v indukčních zařízeních takzvaný skin efekt. Jedná se o jev, při kterém je proudová hustota vytlačována k povrchu taveného tělesa. Čím vyšší je frekvence, tím jsou proudové siločáry více nahuštěné u povrchu tělesa. Tohoto jevu lze využít například při indukčním kalení atd. Více o využití indukčního ohřevu je popsáno v kapitole 3.11.

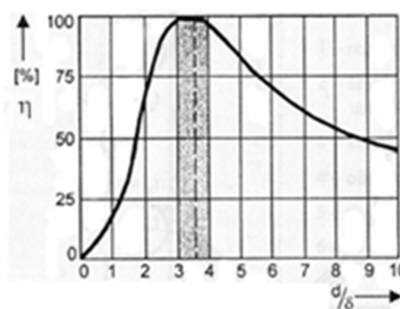
Veličinou popisující vliv skin efektu je hloubka vniku  $a$  [m]. Tato fyzikální veličina je definována podle vztahu [6], [8]:

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\gamma}} [m] \quad (3.7.1)$$

Do výrazu je možné dosadit za úhlovou frekvenci  $\omega = 2\pi f$  a magnetickou permeabilitu  $\mu = \mu_0\mu_r$  ( $\mu_r = 4\pi 10^{-7}$ ). Dosazením dostáváme vztah, ze kterého je přímo vidět frekvenční závislost:

$$a = 503,3 \sqrt{\frac{1}{f\mu_r\gamma}} [m] \quad (3.7.2)$$

Ze vzorce je patrná nepřímá závislost frekvence na hloubce vniku. Pokud volíme vysokou frekvenci, dochází k ohřevu tenké vrstvy tělesa, naopak volbou nízké frekvence dochází k prohřátí větší vrstvy tělesa. Pro efektivní prohřátí materiálu v nejkratším čase je vhodné, aby byl zvolen poloměr prohřívajícího tělesa přibližně 2 – 3 krát větší oproti hloubce vniku. [6]



Obrázek 3.7.1 Závislost poměru  $d/a$  na účinnosti ohřevu (převzato z [6])

Ještě existují dvě teorie, které definují hloubku vniku. První z nich vychází z množství tepla ve vsázce absorbované z elektromagnetického vlnění. Vznik tepla ve vsázce je spojen s proudovou hustotou, která jak již bylo zmíněno, má nejvyšší hodnoty na povrchu vsázky a směrem od povrchu postupně klesá. Z toho vyplývá, že nejvíce tepla se vytvoří na povrchu a se zvětšující se vzdáleností klesá. Rozložení vzniklého tepla ve vsázce je dáno vztahem odvozeným v literatuře [7], [9]:

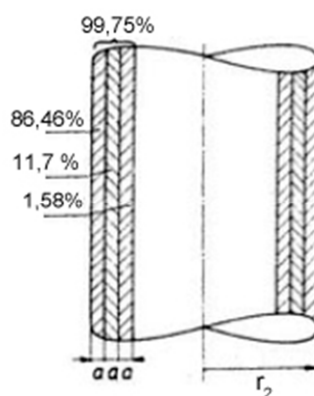
$$P_a = \rho \frac{2\pi r_2}{a} (N_{11} I_{1ef})^2 (1 - e^{-2}) = P_{21} 0,8647 \text{ [W/m]} \quad (3.7.3)$$

Tento vztah popisuje množství tepla, které vznikne v povrchové vrstvě o tloušťce jednonásobku hloubky vniku. Alternativně lze napsat vztahy pro dvojnásobek a trojnásobek hloubky vniku:

$$P_{2a} = \rho \frac{2\pi r_2}{a} (N_{11} I_{1ef})^2 (1 - e^{-4}) = P_{21} 0,9817 \text{ [W/m]} \quad (3.7.4)$$

$$P_{3a} = \rho \frac{2\pi r_2}{a} (N_{11} I_{1ef})^2 (1 - e^{-6}) = P_{21} 0,9975 \text{ [W/m]} \quad (3.7.5)$$

U tavicích pecí, kde hloubka vniku bývá malá oproti poloměru vsázky ( $a \ll r_2$ ), se utlumí převážná část dopadajícího elektromagnetického vlnění v oblasti odpovídající jednonásobku hloubky vniku. V této vrstvě se utlumí 86,46% celkového vyvinutého tepla. V dvojnásobné hloubce ( $2a$ ) se utlumí dalších 11,7% a v trojnásobné hloubce ( $3a$ ) dalších 1,58%. Z toho tedy vyplývá, že 99,75% celkového vyvinutého tepla se vyvine ve vzdálenosti trojnásobku hloubky vniku. Zbylý zanedbatelný podíl se přemění v ostatních vrstvách.



**Obrázek 3.7.2** Množství vyvinutého tepla v povrchových vrstvách vsázky v závislosti na hloubce vniku (převzato a upraveno z [1])

Druhá teorie hloubky vniku definuje  $a$  jako vzdálenost, kde se utlumí elektromagnetická vlna na 36,78%. Útlum elektromagnetického vlnění je charakterizován exponenciálou, která se zcela utlumí ve vzdálenosti  $6a$  od povrchu. [8]

Nežádoucí jev, který se může vyskytnout při tavení materiálů je elektromagnetická průzařnost. Při zvolení příliš nízké frekvence vzhledem k rozměrům vsázky se ve vsázce vyvine málo tepla. To je způsobeno tím, že na vsázku působí elektromagnetické vlnění z obou stran proti sobě, čímž se vzájemně zeslabuje. Elektromagnetické vlnění prochází materiálem aniž by se přeměnilo na teplo a ohřívání materiál můžeme označit za průzařný. Pokud ale vhodně zvolíme frekvenci, bude se vsázka prohřívat jen v povrchových vrstvách a elektromagnetické vlnění se vzájemně nebude ovlivňovat. Poté bude materiál neprůzařný. Při ohřevu je tedy vhodné zvolit vyšší frekvenci, při které by se tento jev omezil, ale nikoli tak vysokou, aby se prohřívala jen tenká vrstva. V tom případě by se značně prodloužila doba tavení materiálu a vznikaly by velké tepelné ztráty. Více o tomto jevu lze nalézt v literatuře [9].

### 3.8 Vliv permeability na vlastnosti ohřevu

Permeabilita  $\mu$  [ $H \cdot m^{-1}$ ] je fyzikální veličina. Charakterizuje vlastnosti daného materiálu (prostředí), které ovlivňují magnetické pole. Vliv permeability na magnetické veličiny zobrazuje následující vztah:

$$\mu = \frac{B}{H} [H \cdot m^{-1}] \quad (3.8.1)$$

Některé materiály mají zásadní vliv na magnetické pole, protože ho dokáží zesílit. Materiály mající permeabilitu  $\mu \gg 1$  zesilují magnetické pole. Tyto materiály označujeme jako feromagnetické. Do skupiny feromagnetických látek patří například železo, nikl, kobalt a různé speciální slitiny. Dále je permeabilita u feromagnetických materiálů značně závislá na teplotě. Například při tavení železa se po dosažení teploty odpovídající magnetické přeměně skokově změní relativní permeabilita z  $\mu_r > 1$  na  $\mu_r = 1$ . Tato skutečnost zásadně ovlivní indukční ohřev. Jak je zmíněno v předchozí kapitole, ovlivňuje permeabilita hloubku pronikání elektromagnetického vlnění (hloubku vniku). Při této skokové změně se tedy změní podmínky pro optimální tavení a je třeba změnit frekvenci. Jevo magnetické přeměny materiálu je označován jako Curieův bod (teplota), při dosažení této teploty látka ztrácí své feromagnetické vlastnosti. Pro tavení železa je Curieova teplota přibližně 768 °C. [9]

Materiály s relativní permeabilitou přibližně rovnou jedné označujeme jako paramagnetické. Tyto materiály zásadně neovlivňují magnetické pole při tavení a nejsou tepelně závislé. Existují ještě látky diamagnetické, které mohou magnetické pole naopak zeslabovat.

Může nastat případ, kdy budeme tavit (prohřívat) feromagnetické materiály na teploty nižší než je Curieova. Potom lze zavést střední permeabilitu  $\mu_{stř}$ , kterou pak uvažujeme jako konstantní po dobu ohřevu v celém objemu. Odvození této střední permeability je zdlouhavé a lze ji nalézt v literatuře [7].

### 3.9 Typy indukčních pecí

V praxi je možné se setkat s několika typy indukčních pecí. Jednou z nejčastěji používaných pecí je kelímková indukční pec, ale využívají se i pece kanálkového typu.

#### 3.9.1 Indukční tavicí pec s nevodivým kelímkem

Kelímkové indukční pece s nevodivým kelímkem jsou v dnešní době nejrozšířenějším typem pecí, které se používají k tavení kovových materiálů. Využívají se zejména v hutnictví a slévárnách pro výrobu jakostních druhů ocelí. Dosažením vysokých jakostí ocelí se dosahuje díky víření vsázky. Víření je způsobeno elektromagnetickými silami ve vsázce, které začnou na vsázku automaticky působit, prochází-li cívkou proud. Víření vsázky je naznačeno na obrázku 3.9.1.1. Z obrázku je také vidět, že víření vsázky způsobuje vzduť taveniny  $h$ . Vzduť lze vyjádřit vztahem [2], [3], [9]:

$$h = K \frac{P_1}{\rho} \sqrt{\frac{\mu_r \gamma}{f}} \quad (3.9.1.1),$$

kde:  $P_1$  je příkon na jednotku plochy vsázky (Poyntingův vektor)

$K$  konstanta

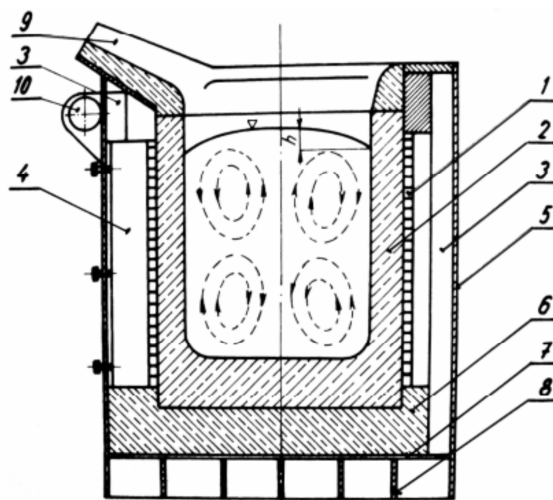
$\rho$  hustota vsázky

$\mu_r$  relativní permeabilita vsázky

$\gamma$  vodivost vsázky

$f$  frekvence proudu v cívce.

Z uvedeného vztahu je patrné, že vzduť vsázky nejvíce ovlivňuje měrný výkon vodivosti a frekvence. [2]



**Obrázek 3.9.1** Schéma indukční kelímkové pece s nevodivým kanálkem (převzato z [2])

Pec je složena z kruhové ohřívací cívky 1. Ta je nejčastěji tvořena čtyřhranným měděným vodičem s dutým středem. Cívkou protékají vysoké proudy stovky až tisíce ampér díky tomu v cívce vznikají velké ztráty a je potřeba, aby byla cívka dobře chlazená. Proto mají její vodiče dutinu, ve které protéká chladicí kapalina. Vsázku od induktoru odděluje keramická (nevodivá) vyzdívka 2, nejčastěji z udusáných materiálů na bázi křemičitého písku. Kelímek se často zhotovuje přímo v peci pěchováním, které musí být provedeno velmi pečlivě. Nedokonale provedený kelímek podstatně zkrátí počet taveb pece a v některém případě může dojít k protavení kelímku, a tím k zničení celé pece. Za induktorem jsou umístěny svazky transformátorových plechů 3, které slouží k odstínění pece. Některé typy pecí nemají transformátorové plechy, ale aktivní stínící plášť, nebo stínění vůbec nemají. Problematice stínění je věnována kapitola 4. Pod číslem 4 jsou umístěny žárobetonové trámce pro cívku. Celá pec je obklopena ocelovým pláštěm 5. Na dně pece je cihlová keramická vyzdívka 6. Mřížové dno pece 8, které je odstíněno měděným plechem 7. V horní viditelné části pece se potom nachází hubice pro odlévání taveniny 9. Pro vyklápění roztavené vsázky je pec vybavena hydraulickými válci, které mohou pec naklápět kolem osy 10. [2], [6]

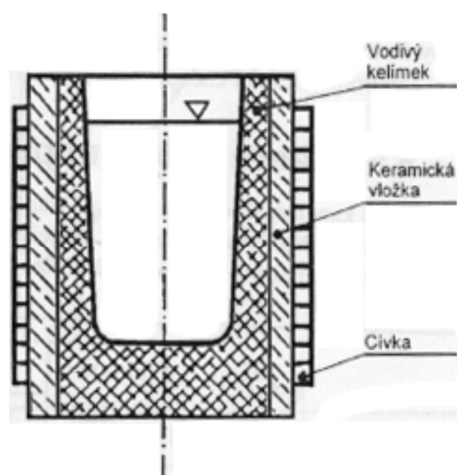
Pec se vyrábějí od obsahu 10 kg až do několika desítek tun. Pro napájení pecí se používají tyristorové měniče, a to zejména pro velkoobjemové pece. Pro malé objemy do 100 kg se lze setkat také s tranzistorovými měniči nebo elektronkovými generátory. Napájecí zdroje mívají rozsah od 500 Hz až do 10 kHz, ale existují i pece pracující na síťové kmitočtu 50 (60) Hz. Pece na síťový kmitočet, se spíše než na tavení používají jako pece udržovací. [2], [6]



### 3.9.2 Indukční tavící pec s vodivým kelímkem

V praxi se také používají pece s elektricky vodivým kelímkem, které mají podstatně větší elektrickou účinnost pro tavení dobře vodivých materiálů, jakou jsou měď, hliník a jejich slitiny. Schéma pece je znázorněno na obrázku 3.9.2.1, princip je stejný jako u pece s nevodivým kelímkem. Kelímkem je ale vodivý a oddělený keramickou vložkou pro snížení tepelných ztrát. Pro nižší teploty tavení vsázky (Al a jeho slitiny) se používají kelímky z ocelolitiny. Pro vyšší teploty se pak kelímky zhotovují ze směsi grafitu a šamotu. [6], [9]

Tavení vsázky probíhá předáváním tepelné energie. Po přivedení proudu do cívky dopadá elektromagnetické vlnění na vodivý kelímkem, který se ohřívá a předává teplo vsázce. [6], [9]

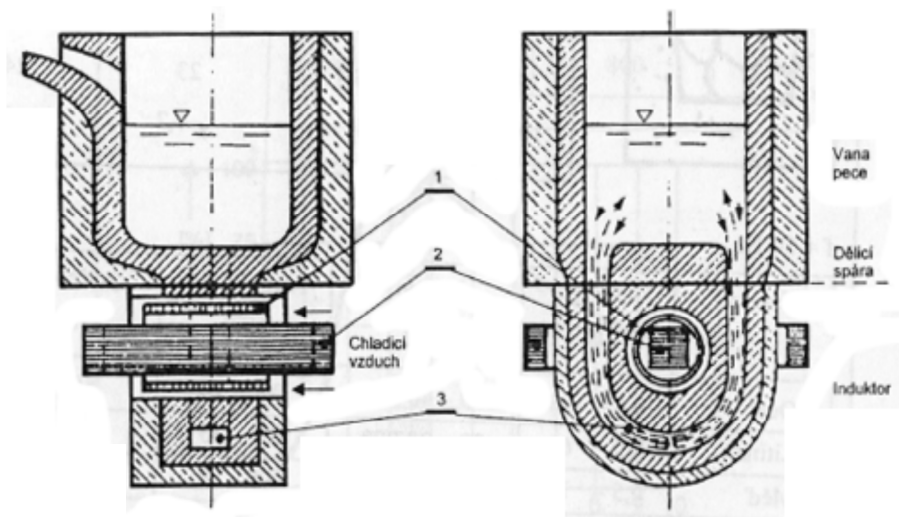


Obrázek 3.9.2 Schéma pece s vodivým kanálkem (převzato z [9])

### 3.9.3 Indukční kanálková tavící pec

Dalším typem indukčních pecí jsou pece kanálkové. Schéma pece je znázorněno na obrázku 3.9.3.1. Pec je složena z ohřívací cívky 1, která je chlazena nuceným prouděním vzduchu. Dále pak z jádra z elektrotechnických plechů 2, na jehož středním sloupku je umístěna ohřívací cívka 1. Kanálková pec je tedy v podstatě transformátor s uzavřeným jádrem. Podstatný konstrukční prvek je kanálek 3, který obepíná cívku jako závit nakrátko. [2], [6]

Tyto pece se obvykle staví přímo pro síťový kmitočet. Díky tomu, že jejich jádro je z elektrotechnických plechů, převážná část magnetického toku prochází právě jádrem. V ohřívací cívce je tedy menší magnetizační proud a stačí ji chladit okolním vzduchem. Elektromagnetické pole vzniká kolem kanálku a způsobuje tlak na kov v kanálku. Roztavený kov odtéká středem kanálku do vany a po stranách kanálku přitéká kov nový. Tím je docíleno hlavní výhody indukčních pecí, a to je dokonalé promíchání kovu. [2], [6]



**Obrázek 3.9.3** Schéma kanálkové indukční pece (převzato z [2])

Jednou z velkých nevýhod těchto typů pecí je, že se do nich musí při první tavně nalít již roztavený kov. Není proto vhodné tyto pece používat v provozech, kde se často mění složení taveného kovu nebo kde se provoz často přerušuje. Při odlévání se v peci ponechává třetina taveniny, která se musí udržovat na provozní teplotě i mimo pracovní dobu, což s sebou nese nárůst spotřeby elektrické energie. [2]

### 3.10 Další využití indukčního ohřevu

Indukčního ohřevu se v praxi využívá také k jiným účelům než k tavení kovů a slitin. Můžeme se setkat s indukčním kalením, svařováním, prohříváním nebo pájením. Specifickou oblastí využití indukčního ohřevu je ohřívání pokrmů v domácnostech za použití indukčních vařičů. Jedná se o cívku stočenou do tvaru ploténky. Cívky podle principu popsaného v kapitole 3.3 vytvářejí okolo sebe magnetické pole, které se uzavírá dnem vodivé nádoby. Dno se postupně díky vířivým proudům ohřívá a předává tepelnou energii obsahu hrnce.

## 4 Způsoby stínění indukčních pecí

### 4.1 Elektromagnetické stínění

Elektromagnetické stínění je ochranný prvek, který se snaží zamezit pronikání elektromagnetických polí do oblastí okolo zdrojů elektromagnetického pole. Vliv těchto polí může nepříznivě ovlivňovat ostatní přístroje, konstrukční prvky anebo působit na živé organismy. Nežádoucí působení elektromagnetických veličin na okolí může způsobovat rušení signálů, oteplování vodičů a konstrukčních prvků v důsledku naindukovaných proudů.

U indukčních zařízení prochází cívkou střídavý proud, který vytváří magnetické pole. Pole ohřívá vsázku, ale zároveň působí i vně cívky. V okolí pecí nebo jiných indukčních zařízení se nachází řada konstrukčních prvků, které mohou být tímto polem nepříznivě ovlivněny. Proto je potřeba učinit vhodné opatření k omezení těchto polí a jejich vlivu na okolí. Toho se dosahuje za použití stínění. Indukční pece lze odstínit pomocí svazků transformátorových plechů nebo vodivým pláštěm.

Při návrhu efektivního stínění indukční pece se bere v potaz řada technických parametrů jako například geometrické rozměry, ztráty, hmotnost a cena stínění. V následujících kapitolách rozeberu dva základní druhy stínění, které se používají u indukčních kelímkových pecí a uvedu jejich výhody a nevýhody.

### 4.2 Stínění vodivým pláštěm

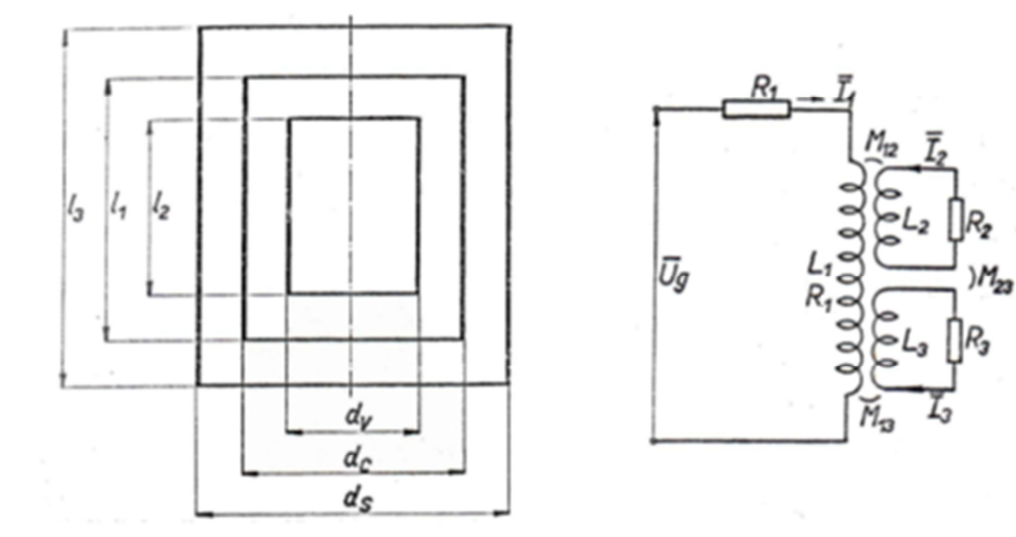
Jednou z možností jak odstínit magnetický tok vně cívky je použití vodivého pláště. Pláštěm protéká naindukovaný proud, který vytváří elektromagnetické pole. Pole vyvolané v okolí pláště působí proti polí, které vyvolal induktor pece. Spojením obou těchto polí se sníží intenzita magnetického pole za stínícím pláštěm. Odstíní se tedy magnetické pole vně pece, ale také dochází ke snížení elektrické účinnosti indukční pece. [9]

Pokud uvažujeme indukční kelímkovou pec se stínícím pláštěm, můžeme ji nahradit modelem tvořeným třemi sousými válci. Tento model znázorňuje obrázek 4.2.1. Obvod je tvořen cívkou 1 s vnitřním průměrem  $d_1$ , vsázkou 2 s průměrem  $d_2$  a stínícím pláštěm 3 s průměrem  $d_3$ . Délky jednotlivých náhradních částí jsou  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  a tloušťka sousých válců je nulová. Jelikož tavící pece mají obvykle hloubku vniku naindukovaných proudů malou oproti poloměru vsázky, cívky i stínění je možno proto použít jednodušších výrazů pro stanovení náhradních průměrů. [9]

$$d_c = d_1 + a_1 [m] \text{ pro cívku} \quad (4.2.1)$$

$$d_v = d_2 - a_2 [m] \text{ pro vsázku} \quad (4.2.2)$$

$$d_s = d_3 + a_3 [m] \text{ pro stínění} \quad (4.2.3)$$



**Obrázek 4.2.1** Náhradní geometrický a elektrický model indukční pece (převzato z [9])

Takto uspořádanou soustavu tří souosých válců, lze převést na elektrické schéma znázorněné na obrázku 4.2.1. Na obrázku jsou vyznačeny vlastní indukčnosti jednotlivých částí  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  a jejich vzájemné vazby (indukčnosti)  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ , dále pak vlastní odpor cívek  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ . [9]

Vlastní indukčnosti cívek lze určit z geometrických rozměrů a pomocí Nagaokových koeficientů  $\alpha$ , které lze nalézt v příloze I.

$$L_1 = \mu_0 \pi r_c^2 \frac{N_1^2}{l_1} \alpha_1 [H] \quad (4.2.4)$$

$$L_2 = \mu_0 \pi r_v^2 \frac{\alpha_2}{l_2} [H] \quad (4.2.5)$$

$$L_3 = \mu_0 \pi r_s^2 \frac{\alpha_2}{l_3} [H] \quad (4.2.6)$$

U indukčností  $L_2$  a  $L_3$  neuvažujeme počet závitů  $N_2$  a  $N_3$ . Hodnota je rovna jedné, jelikož se jedná o závit nakrátko. Dále pak neuvažujeme vlastní permeabilitu  $\mu_r$ , protože se ve všech případech blíží nebo rovná nule. Vzájemné indukčnosti je možné opět vyjádřit pomocí geometrických parametrů pece a koeficientů tentokrát označených  $F$ , které lze nalézt v příloze II.

$$M_{12} = \mu_0 \pi r_v^2 \frac{N_1 N_2}{l_2} F_{12} [H] \quad (4.2.7)$$

$$M_{13} = \mu_0 \pi r_s^2 \frac{N_1 N_3}{l_3} F_{13} [H] \quad (4.2.8)$$

$$M_{23} = \mu_0 \pi r_c^2 \frac{N_2 N_3}{l_1} F_{23} [H] \quad (4.2.9)$$

Dále je pro výpočty stínících plášťů důležitý součinitel vzájemné vazby  $K$ . Koeficient dostaneme, pokud dosadíme z výrazu (4.2.4) a (4.2.7).

$$\kappa_{12} = \sqrt{\frac{M_{12}^2}{L_1 L_2}} = \sqrt{\left(\frac{d_v}{d_c}\right)^2 \frac{l_1}{l_2} \frac{F_{12}^2}{\alpha_1 \alpha_2}} \quad (4.2.10)$$

$$\kappa_{13} = \sqrt{\frac{M_{13}^2}{L_1 L_3}} = \sqrt{\left(\frac{d_c}{d_s}\right)^2 \frac{l_3}{l_1} \frac{F_{13}^2}{\alpha_1 \alpha_3}} \quad (4.2.11)$$

$$\kappa_{32} = \sqrt{\frac{M_{23}^2}{L_2 L_3}} = \sqrt{\left(\frac{d_v}{d_s}\right)^2 \frac{l_3}{l_2} \frac{F_{23}^2}{\alpha_2 \alpha_3}} \quad (4.2.12)$$

Pokud vycházíme z pravidla, že hloubka naindukovaných proudů bývá zpravidla u indukčních pecí malá oproti poloměru cívky, vsázky a stínění. Je v takovém případě odpor vsázky a stínění roven odporu povrchové vrstvy o tloušťce rovné hloubce vniku  $a_2$  respektive  $a_3$ . [9]

$$R_2 = \rho_2 \frac{\pi d_v}{a_2 l_2} [\Omega] \quad (4.2.13)$$

$$R_3 = \rho_3 \frac{\pi d_s}{a_3 l_3} [\Omega] \quad (4.2.14)$$

Odpor cívky je o něco složitější, respektuje totiž mezizávitové izolační mezery. Namáhání izolace je zde stanoveno na  $15\,000 \text{ Vm}^{-1}$ , potom bude odpor cívky úměrný následujícímu vztahu (4.2.15).

$$R_1 = \rho_{12} \frac{\pi d_v N_1^2}{a_1 \left(l_1 - \frac{U_g}{15000}\right)} [\Omega] \quad (4.2.15)$$

Jednotlivé proudy  $\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3$  (efektivní hodnoty) naznačené na obrázku 4.2.2 jdou vyjádřit z rovnic druhého Kirchhoffova zákona.

$$\bar{U}_g = \bar{Z}_1 \bar{I}_1 + j\omega M_{12} \bar{I}_2 + j\omega M_{13} \bar{I}_3 \quad (4.2.16)$$

$$0 = \bar{Z}_2 \bar{I}_2 + j\omega M_{23} \bar{I}_3 + j\omega M_{12} \bar{I}_1 \quad (4.2.17)$$

$$0 = \overline{Z}_2 \overline{I}_2 + j\omega M_{13} \overline{I}_1 + j\omega M_{23} \overline{I}_2 \quad (4.2.18)$$

Impedanci jednotlivých částí  $\overline{Z}_1, \overline{Z}_2, \overline{Z}_3$  lze vyjádřit pomocí následujících vztahů.

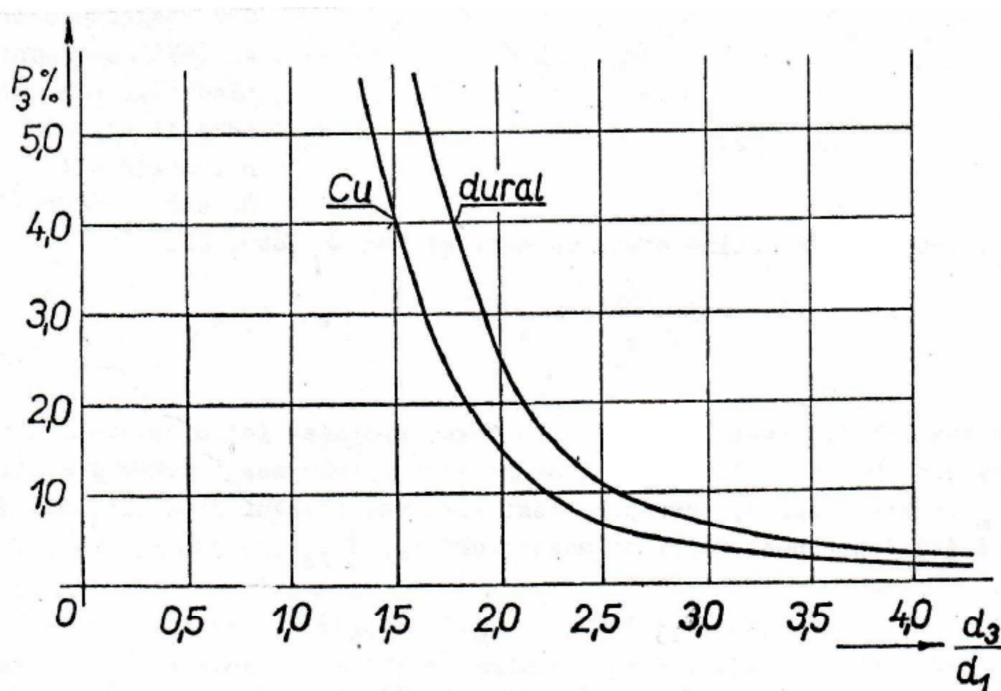
$$\overline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1 \quad (4.2.19)$$

$$\overline{Z}_2 = R_2 + j\omega L_2 \quad (4.2.20)$$

$$\overline{Z}_3 = R_3 + j\omega L_3 \quad (4.2.21)$$

Z těchto rovnic (4.2.16 – 4.2.21) se určují jednotlivé proudy. Je potřeba vyřešit soustavu tří rovnic o třech neznámých. Z důvodu velkého množství koeficientů a celkové nepřehlednosti zde neuvádím výsledný vztah. V literatuře [9] lze nalézt kompletní odvození. Pokud známe odpor a proud jednotlivých částí obvodu, můžeme pak snadno určit ztráty.

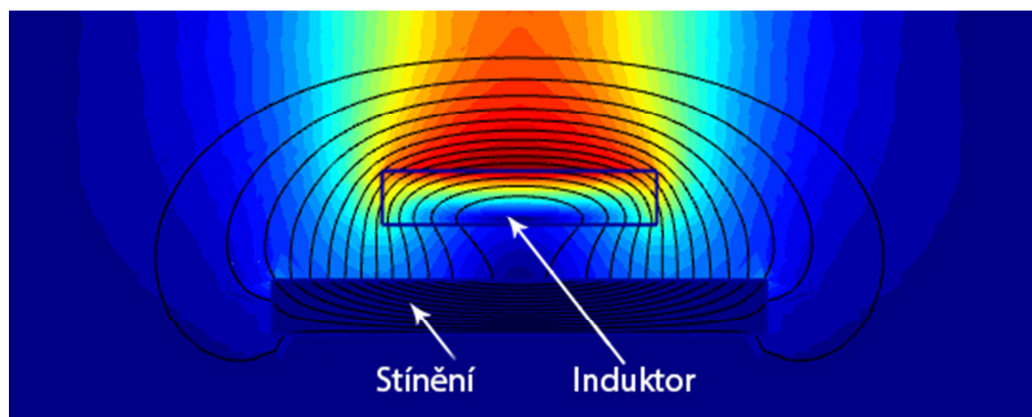
Pokud chceme navrhnout efektivní odstínění indukční kelímkové pece, musíme se řídit několika základními pravidly. Jedním z nich je zhotovení pláště z dobře elektricky vodivého materiálu. Nejčastěji se používá měď, dural anebo by bylo vhodné použít supravodivý materiál, který by pohltil veškerý magnetický tok směřující od induktoru do okolí. Další vhodnou zásadou je volit průměr stínícího pláště  $d_3$  jako dvojnásobek vnitřního průměru cívky  $d_1$ . Je-li tloušťka stínícího pláště rovna  $\delta_3 = \frac{\pi}{2} a_3$ , jsou ztráty v stínícím plášti minimální. Na obrázku 4.2.2 je vidět příklad ztrát ve stínícím plášti k poměru  $d_3/d_1$ . Z obrázku je patrné, že čím je větší poměr  $d_3/d_1$ , tím menší jsou ztráty. Při dvojnásobném průměru stínění oproti cívce, což odpovídá optimálnímu poměru stínění, tvoří ztráty pláště 1,51% z příkonů pece pro měď a 2,5% pro dural. V praxi bývají ztráty ještě přibližně dvakrát menší, jelikož se respektuje vliv vsázky, která v tomto případě nebyla uvažována. [9]



Obrázek 4.2.2 Závislost ztrát ve stínícím plášti na poměru  $d_3/d_1$  (převzato z [9])

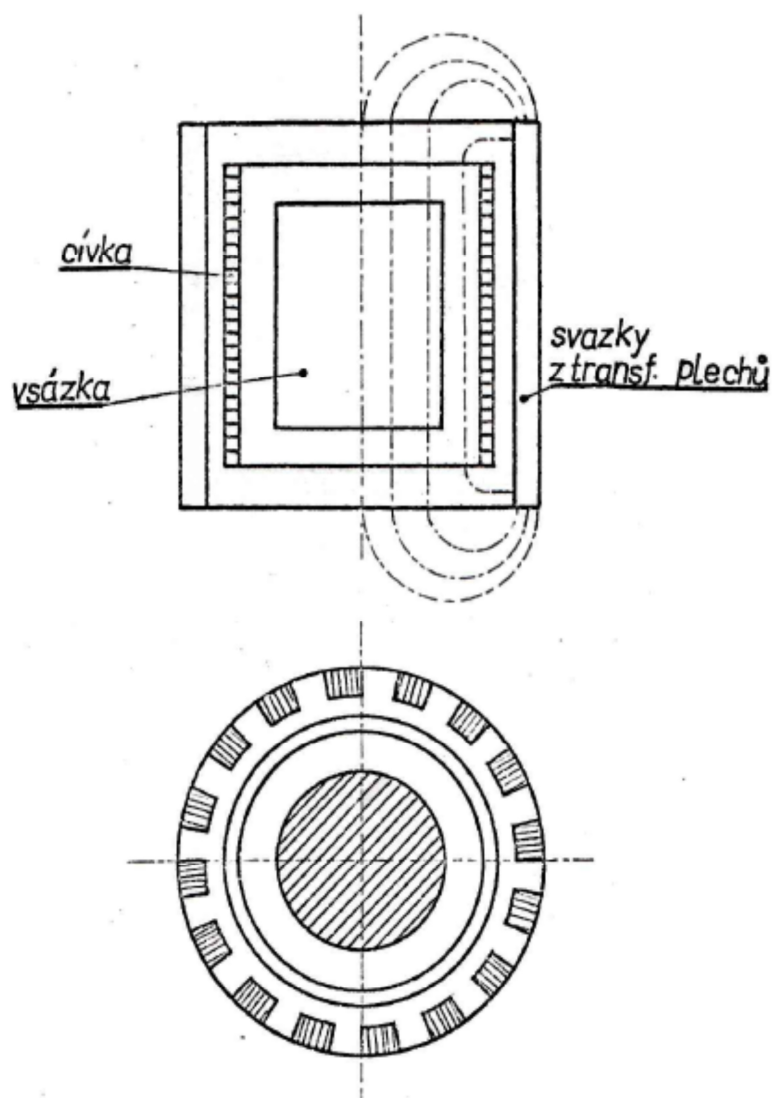
### 4.3 Stínění pomocí svazků transformátorových plechů

Podobných výsledků jako při použití vodivého pláště je možné dosáhnout použitím svazků transformátorových plechů (trafoplech). Transformátorové plechy jsou slitiny složené ze železa a křemíku. Obsah křemíku může být maximálně 5% z důvodu křehkosti plechů. Toto složení dává transformátorovým plechům vlastnosti magneticky měkkých materiálů. Plechy jsou tenké a vzájemně je skládají do potřebných rozměrů, přičemž jednotlivé vrstvy jsou od sebe odizolovány. Transformátorové plechy se kromě odstínění indukčních zařízení dále používají na výrobu magnetických obvodů transformátorů, generátorů a elektromotorů. [10]



Obrázek 4.3.1 Model odstínění induktoru (vytvořeno v Agros2D)

Místo stínícího pláště tedy použijeme svazky transformátorových plechů. Plechy umístíme na vnitřní stranu pecního pláště jako na obrázku 4.3.2. Magnetický rozptylový tok buzený cívkou indukční pece bude vně cívky procházet cestou nejmenšího odporu, tedy přes transformátorové plechy. Oblast za nimi bude odstíněná. Použitím transformátorových plechů se zmenší odpor pro magnetický tok buzený cívkou, takže tento tok poněkud vzroste. [9]



**Obrázek 4.3.2** Stínění svazky transformátorových plechů (převzato z [9])

Při použití svazků transformátorových plechů můžeme na obvod nahlížet obdobně jako na pec s vodivým pláštěm, pouze nebudeme uvažovat v třetí části proud  $I_3$ . Jak je popsáno v předchozím odstavci vzroste, magnetický tok cívky, a tak se změní indukčnost  $L_1$  na  $L_1'$ . Změní se také indukčnost  $L_2$  na  $L_2'$  a vzájemná indukčnost  $M_{12}$  na  $M_{12}'$ . [9]



$$L_1 = \mu_0 \pi r_c^2 \frac{N_1^2}{l_1} \alpha_1 [H] \quad (4.3.1)$$

$$L_2 = \mu_0 \pi r_v^2 \frac{\alpha_2}{l_2} [H] \quad (4.3.2)$$

$$M_{12} = \mu_0 \pi r_v^2 \frac{N_1 N_2}{l_2} F'_{12} [H] \quad (4.3.3)$$

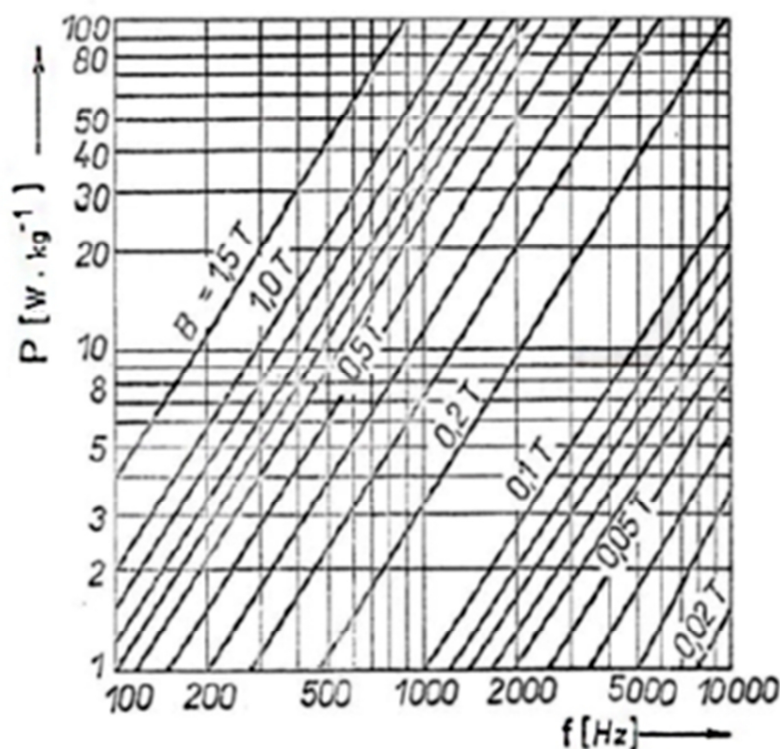
Zvýšené součinitele  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $F'_{12}$  se zjišťují měřením na již zhotovené peci. Nejprve se vypočítají nezměněné indukčnosti pro pec bez přiloženého jádra a výsledky se ověří měřením. Poté se cívka vloží do pláště s uchycenými jádry a změří se změněné indukčnosti a podle vztahů uvedených v literatuře [9, s. 89] se dopočítají potřebné koeficienty.

Při dimenzování magnetického jádra se nejprve stanovuje výsledný magnetický tok  $\Phi$  [Wb] vybuzený cívkou a zeslabený působením vsázky. Nejprve se podle obrázku 4.3.3 určí podle příslušné frekvence a zvoleného magnetického sycení  $B$  měrné ztráty. Dále pak podle vztahu (4.3.4) se určí plocha, podle které se určí počet svazků transformátorových plechů. [9]

$$S = \frac{\Phi}{B} [m^2] \quad (4.3.4)$$

$$G_{FE} = \text{svazky} \times \text{základna} \times \text{výška} \times \text{délka} \times \text{měrná hm. FE} \quad (4.3.5)$$

Dále se ještě stanoví celková hmotnost (4.3.5) jádra. Vynásobíme měrnými ztrátami podle obrázku 4.3.3, čímž dostaneme celkové ztráty stínění převedené na svazky transformátorových plechů. [9]



Obrázek 4.3.3 Měrné ztráty v závislosti na frekvenci (převzato z [9])

#### 4.4 Porovnání stínění

V předchozích kapitolách (4.2 a 4.3) jsou popsány dva základní druhy stínění indukčních kelímkových pecí. Každý druh stínění má několik kladných a několik záporných vlastností. Hlavními parametry, které ovlivňují správný výběr stínění, je vliv stínění na elektrickou účinnost, geometrické rozměry, hmotnost a cenu.

Z hlediska vlivu stínění na elektrickou účinnost je výhodnější použití svazků transformátorových plechů. Transformátorové plechy mají vyšší elektrickou účinnost, protože jejich magnetický obvod napomáhá zvýšení magnetického toku buzeného cívkou. Celkový magnetický tok je vyšší a tím se zvýší i elektrická účinnost. Naopak použitím vodivého stínícího pláště se účinnost pece o několik procent sníží. To je způsobeno rozdílným působením magnetického pole stínícího pláště a magnetického pole induktoru, což způsobuje snížení elektrické účinnosti. Dále vzniklé Joulovy ztráty jsou rovněž vyšší u stínění vodivým pláštěm než u svazků transformátorových plechů.

Z druhé strany jsou transformátorové plechy dražší a hmotnější. V případě protavení kelímku bývá poškození pecí, které využívají transformátorové plechy, zpravidla větší, protože dochází k jejich zničení. Stínění vyrobené z mědi nebo duralu je díky svým geometrickým rozměrům levnější a lehčí, nicméně při hrubé manipulaci může být lehce

poškozeno.

Výrobci indukčních pecí proto nejčastěji používají stínění vodivým pláštěm pro menší pece do 250 Kg a pro velkoobjemové pece používají svazky transformátorových plechů. U pecí, které jsou v nepřetržitém provozu, se vyplatí použití dražších transformátorových plechů, protože zvyšují účinnost celé pece, což přináší úsporu elektrické energie a ekonomická návratnost takovéto investice se zkracuje.

## 5 Výpočet elektrických a geometrických parametrů pece

V této kapitole je proveden kontrolní výpočet pece EGP 500 s uvažováním stínění zhotoveného z transformátorových plechů. Hmotnost vsázky  $m = 500$  Kg, měnič frekvence dodává výkon  $P = 350$  kW, při napětí  $U = 1000$ V a frekvenci  $f = 700$  Hz.

### 5.1 Výpočet geometrických rozměrů pece

Z hmotnosti vsázky a hustoty lze určit objem válcové dutiny kelímku. Dále lze určit průměr a délku kelímku při uvažování poměru průměru a délky 0,8.

$$V = \frac{G}{S} = \frac{m}{\rho} = \frac{500}{6950} = 0,072 \text{ m}^3 \quad (5.1.1)$$

$$V = \pi \left(\frac{d_2}{2}\right)^2 \frac{d_2}{0,8} = \frac{\pi d_2^3}{3,2} = 0,98175 d_2^3 = 0,072 \text{ m}^3 \quad (5.1.2)$$

$$d_2 = \sqrt[3]{\frac{0,072}{0,98175}} = 0,4185 \doteq 0,42 \text{ m} \quad (5.1.3)$$

$$\frac{d_2}{l_2} = 0,8 \Rightarrow l_2 = \frac{d_2}{0,8} = \frac{0,42}{0,8} = 0,525 \text{ m} \quad (5.1.4)$$

Pokud víme, že vnitřní průměr cívky  $d_1$  je 53 cm z technického výkresu cívky viz příloha V, pak lze stanovit rozměry vyzdívky a izolační vrstvy. Vyzdívka pece je 5cm a izolační vrstva je 0,5 cm. Rozměry cívky jsou tedy:

$$d_1 = 0,53 \text{ m} \quad (5.1.5)$$

$$l_1 = 10\% l_2 = 1,1 \cdot 0,525 = 0,58 \quad (5.1.6)$$

Cívka je navinutá z mědi a hloubku vniku lze vypočítat následovně.

$$a_1 = 503,3 \sqrt{\frac{\rho_1}{f\mu_r}} = 503,3 \sqrt{\frac{1,92 \cdot 10^{-8}}{700 \cdot 1}} = 0,00264 \text{ m} \quad (5.1.7)$$

Hloubka vniku do roztavené vsázky  $a_2$ .

$$a_2 = 503,3 \sqrt{\frac{\rho_2}{f\mu_r}} = 503,3 \sqrt{\frac{10^{-6}}{700 \cdot 1}} = 0,019 \text{ m} \quad (5.1.8)$$

Nyní lze stanovit náhradní průměry cívky a vsázky.

$$\text{cívkka: } d_c = d_1 + a_1 = 0,53 + 0,00264 = 0,53264 \text{ m} \quad (5.1.9)$$

$$\text{vsázka: } d_v = d_2 - a_2 = 0,42 - 0,019 = 0,4 \text{ m} \quad (5.1.10)$$

## 5.2 Výpočet elektrických parametrů pece bez stínění

Nejprve je potřeba z tabulek uvedených v příloze I a II určit pomocné součinitele.

$$\alpha_1 = f\left(\frac{d_c}{l_1}\right) = f(0,92) = 0,70634 \quad (5.2.1)$$

$$\alpha_2 = f\left(\frac{d_v}{l_2}\right) = f(0,762) = 0,7452 \quad (5.2.2)$$

$$F_{12} = f\left(\frac{d_c}{l_1}; \frac{d_v}{l_2}; \frac{l_1}{l_2}\right) = f(0,92; 0,76; 1,11) = 0,63724 \quad (5.2.3)$$

Nyní lze stanovit součinitele vzájemné vazby.

$$\kappa_{12}^2 = \left(\frac{d_v}{d_c}\right)^2 \frac{l_1}{l_2} \frac{F_{12}^2}{\alpha_1 \alpha_2} = \left(\frac{0,4}{0,53264}\right)^2 \frac{0,58}{0,525} \frac{0,63724^2}{0,70634 \cdot 0,7452} = \quad (5.2.4)$$

$$\kappa_{12}^2 = 0,4807$$

Z vypočtených hodnot můžeme vypočítat pomocné konstanty

$$k_1 = \omega(1 - \kappa_{12}^2)\mu_0\pi\left(\frac{d_c}{2}\right)^2 \frac{\alpha_1}{l_1} = 2\pi \cdot 700(1 - 0,4812) \quad (5.2.5)$$

$$4\pi \cdot 10^{-7} \pi \left(\frac{0,53624}{2}\right)^2 \frac{0,70634}{0,58} = 0,7788 \cdot 10^{-3}$$

$$k_2 = \left[ \rho_1 \frac{\pi d_c}{a_1(l_1 - \frac{U_g}{15000})} + \rho_2 \frac{\pi d_v}{a_2 l_2} \left(\frac{F_{12}}{\alpha_2}\right)^2 \right] = 1,1583 \cdot 10^{-4} \quad (5.2.6)$$

Na základě zkušeností se odhadují ztráty  $\dot{P}_c$  na 2 – 6 % z příkonu  $P_g$ . Na základě výpočtů jsem určil optimální odhad na 2,427% z příkonu.

$$\dot{P}_c = 0,02636 \cdot P_g = 0,02427 \cdot 350 = 8,495 \text{ kW} \quad (5.2.7)$$

$$P_c = P_g - \dot{P}_c = 350 - 9,226 = 341,506 \text{ kW} \quad (5.2.8)$$

Pokud máme odhad ztrát, tak můžeme vypočítat pecní proud  $I_1$  a počet závitů cívky  $N_1$

$$I_1 = \frac{k_1 P_c}{k_2 U_g} = \frac{0,7788 \cdot 10^{-3} \cdot 340506}{1,1583 \cdot 10^{-4} \cdot 1000} = 2296,28 \text{ A} \quad (5.2.9)$$

$$N_1 = \sqrt{\frac{k_2 U_g^2}{k_1^2 P_c}} = \sqrt{\frac{1,1583 \cdot 10^{-4} \cdot 1000^2}{(0,7788 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 340506}} = 23,5 \doteq 24 \text{ záv.} \quad (5.2.10)$$

Známe-li počet závitů, můžeme vypočítat vlastní indukčnost cívky a také výslednou indukčnost  $L_I$ , odpor cívky  $R_1$  a vsázky  $R_2$ , převodní poměr  $p^2$  a výsledný odpor  $R_I$ .

$$L_1 = \mu_0 \pi \left(\frac{d_c}{2}\right)^2 \frac{\alpha_1}{l_1} N_1^2 = 4\pi \cdot 10^{-7} \pi \left(\frac{0,53624}{2}\right)^2 \frac{0,7063}{0,58} 24^2 = \quad (5.2.11)$$

$$L_1 = 1,9642 \cdot 10^{-4} \text{ H}$$

$$L_I = L_1(1 - \kappa_{12}^2) = 1,7144 \cdot 10^{-4}(1 - 0,4812) = \quad (5.2.12)$$

$$L_I = 1,02 \cdot 10^{-4} \text{ H}$$

$$R_1 = \rho_1 \frac{\pi d_c N_1^2}{a_1(l_1 - \frac{U_g}{15000})} = 1,92 \cdot 10^{-8} \frac{\pi \cdot 0,53264 \cdot 24^2}{0,00264(0,58 - \frac{1000}{15000})} \quad (5.2.13)$$

$$R_1 = 0,01365 \Omega$$

$$L_2 = \mu_0 \pi \left(\frac{d_v}{2}\right)^2 \frac{\alpha_2}{l_2} = 4\pi \cdot 10^{-7} \pi \left(\frac{0,4}{2}\right)^2 \frac{0,7452}{0,525} \quad (5.2.14)$$

$$L_2 = 2,2415 \cdot 10^{-7} \text{ H}$$

$$p^2 = \kappa_{12}^2 \frac{L_1}{L_2} = 0,4807 \frac{1,9642 \cdot 10^{-4}}{2,2415 \cdot 10^{-7}} = 421,23 \quad (5.2.15)$$

$$p = 20,524$$

$$R_2 = \rho_2 \frac{\pi d_v}{a_2 l_2} = 10^{-6} \frac{\pi \cdot 0,4}{0,019 \cdot 0,525} = 1,2598 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (5.2.16)$$

$$p^2 R_2 = 421,23 \cdot 1,2598 \cdot 10^{-4} = 0,05305 \quad (5.2.17)$$

$$\check{R}_I = p^2 R_2 + R_1 = 0,05305 + 0,01365 = 0,0667 \Omega \quad (5.2.18)$$

$$R_I = R_1 + p^2 R_2 + \check{R}_c = \frac{P_g}{I_1^2} = \frac{350000}{(2296,28)^2} = 0,0664 \Omega \quad (5.2.19)$$

Výpočet potřebné kapacity, činitele jakosti  $Q_I$  a proudu  $I_c$  v kondenzátorové baterii.

$$\check{C} = \frac{L_I}{R_I^2 + \omega^2 L_I^2} = \frac{1,02 \cdot 10^{-4}}{0,0664^2 + 4398,2^2 \cdot (1,02 \cdot 10^{-4})^2} \quad (5.2.20)$$

$$\dot{C} = 4,96 \cdot 10^{-4} F$$

$$Q_I = \frac{\omega L_I}{R_I} = \frac{4398,2 \cdot 1,02 \cdot 10^{-4}}{0,0664 \Omega} = 6,752 \quad (5.2.21)$$

$$I_c = I_1 \frac{Q_I}{\sqrt{(1 + Q_I^2)}} = 2492,7244 \frac{6,752}{\sqrt{(1 + 6,752^2)}} \quad (5.2.22)$$

$$I_c = 2271,503 A$$

Kontrola dielektrických ztrát  $P_K$ . Ztrátový úhel  $tg\delta = 3,4 \cdot 10^{-3}$

$$P_K = I_c U_g tg\delta = 2271,503 \cdot 1000 \cdot 3,4 \cdot 10^{-3} = 7723,11 W \quad (5.2.23)$$

Celkové dielektrické ztráty  $\dot{P}_c = P_K + P_V = 1,1 P_K = 8495,421 W$ . Na začátku výpočtu byl odhad ztrát  $8495 W$ . Při výpočtu tedy vyšla dobrá shoda mezi odhadem a skutečností. Rozdíl je pouze  $0,421 W$ . Nyní můžeme vypočítat odpor  $R_c$ .

$$\dot{R}_c = \frac{\dot{P}_c}{I_c^2} = \frac{8495,421}{2271,503^2} = 1,646 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (5.2.24)$$

$$\text{poměr: } \frac{X_c}{\dot{R}_c} = \frac{1}{\omega \dot{C}} = \frac{1}{4398,2 \cdot 4,96 \cdot 10^{-4}} = 278,5 \Omega \quad (5.2.25)$$

Odpor  $\dot{R}_c$  a kapacita  $\dot{C}$  jsou v sérii a úbytky na odporu  $\dot{R}_c$  jsou minimální, proto můžeme odpor přesunout do vedlejší větve a stanovit tak výsledný odpor oscilačního obvodu  $R_I$ .

$$R_I = R_1 + p^2 R_2 + \dot{R}_c = 0,01365 + 0,05305 + 1,646 \cdot 10^{-3} \quad (5.2.26)$$

$$R_I = 0,0683 \Omega$$

Opět jsme dostali dobrou shodu  $R_I$  určený z  $P_g$  a  $I_1^2$  vyšel  $0,0664 \Omega$ . Kontrola vyšla  $0,0683 \Omega$ . Drobná odlišnost vznikla zaokrouhlením při výpočtu.

$$\text{poměr} = \frac{0,0683}{0,0664} = 1,03 \quad (5.2.27)$$

Vyladěný pecní obvod se jeví vůči zdroji jako činný zatěžovací odpor  $R_Z$ .

$$R_Z = \frac{L_I}{C \dot{R}_I} = \frac{1,02 \cdot 10^{-4}}{4,96 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0683} = 3 \Omega \quad (5.2.28)$$

Kontrola výpočtu.

$$P_Z = \frac{U_g^2}{R_Z} = \frac{1000^2}{3} = 333kW \quad (5.2.29)$$

Zde vyšla odlišnost, která může být spojená se zaokrouhlováním. Elektrická účinnost indukční pece je vypočtená níže.

Ztráty v cívce a jejich procentuální vyjádření z příkonu pece.

$$P_1 = R_1 I_1^2 = 0,01365 \cdot 2296,28^2 = 71,9kW = 20,5\% \quad (5.2.30)$$

Užitečný výkon

$$P_2 = p^2 R_2 I_1^2 = 0,05305 \cdot 2296,28^2 = 279,7kW = 79,9\% \quad (5.2.31)$$

Dielektrické ztráty a ztráty ve vedení.

$$\dot{P}_c = P_K + P_V = 1,1 \cdot P_K = 1,1 \cdot 7723,11 = 8,5kW = 2,4\% \quad (5.2.32)$$

Kontrola  $\sum P = 360kW = 103\%$  drobná chyba je způsobená zaokrouhlováním při výpočtech. Dále lze vypočítat celkovou účinnost cívky  $\eta_c$  a celkovou účinnost  $\eta_v$ .

$$\eta_c = \frac{P_2}{P_1 + P_2} = \frac{279,7}{71,9 + 279,7} = 79,5\% \quad (5.2.33)$$

$$\eta_v = \frac{P_2}{\sum P} = \frac{279,7}{360} = 77,7\% \quad (5.2.34)$$

### 5.3 Výpočet elektrických parametrů pece se stíněním transformátorovými plechy

Pokud uvažujeme stínění svazky transformátorových plechů, způsobí jádro transformátorových plechů zvýšení vlastní a vzájemné indukčnosti.

Hodnoty koeficientů vyhledaných v tabulkách jsou uvedeny v předchozí kapitole 5.2 pod označením 5.2.1 – 5.2.3. Tyto koeficienty jsou na základě měření [15] zvýšené.

$$\alpha'_1 = 1,14 \cdot \alpha_1 = 1,14 \cdot 0,70634 = 0,8052 \quad (5.3.4)$$

$$\alpha'_2 = 1,06 \cdot \alpha_2 = 1,06 \cdot 0,7452 = 0,7899 \quad (5.3.5)$$



$$F'_{12} = 1,1 \cdot F_{12} = 1,1 \cdot 0,63724 = 0,7009 \quad (5.3.6)$$

Nyní lze stanovit součinitele vzájemné vazby.

$$\kappa_{12}^2 = \left(\frac{d_v}{d_c}\right)^2 \frac{l_1}{l_2} \frac{F_{12}^2}{\alpha_1 \alpha_2} = \left(\frac{0,4}{0,53264}\right)^2 \frac{0,58}{0,8052 \cdot 0,7899} = \quad (5.3.7)$$

$$\kappa_{12}^2 = 0,4812$$

Z vypočtených hodnot můžeme vypočítat pomocné konstanty.

$$k_1 = \omega(1 - \kappa_{12}^2)\mu_0\pi\left(\frac{d_c}{2}\right)^2 \frac{\alpha_1}{l_1} = 2\pi \cdot 700(1 - 0,4812) \quad (5.3.8)$$

$$4\pi \cdot 10^{-7}\pi\left(\frac{0,53624}{2}\right)^2 \frac{0,8052}{0,58} = 0,899 \cdot 10^{-3}$$

$$k_2 = \left[ \rho_1 \frac{\pi d_c}{a_1(l_1 - \frac{U_g}{15000})} + \rho_2 \frac{\pi d_v}{a_2 l_2} \left(\frac{F'_{12}}{\alpha_2}\right)^2 \right] = 1,229 \cdot 10^{-4} \quad (5.3.9)$$

Na základě zkušeností se odhadují ztráty  $\dot{P}_c$  na 2 – 6 % z příkonu  $P_g$ . Na základě výpočtů jsem určil optimální odhad na 2,636% z příkonu.

$$\dot{P}_c = 0,02636 \cdot P_g = 0,02636 \cdot 350 = 9,226 \text{ kW} \quad (5.3.10)$$

$$P_c = P_g - \dot{P}_c = 350 - 9,226 = 340,774 \text{ kW} \quad (5.3.11)$$

Pokud máme odhad ztrát, tak můžeme vypočítat pecní proud  $I_1$  a počet závitů cívky  $N_1$

$$I_1 = \frac{k_1 P_c}{k_2 U_g} = \frac{0,899 \cdot 10^{-3} \cdot 340774}{1,229 \cdot 10^{-4} \cdot 1000} = 2492,7244 \text{ A} \quad (5.3.12)$$

$$N_1 = \sqrt{\frac{k_2 U_g^2}{k_1^2 P_c}} = \sqrt{\frac{1,229 \cdot 10^{-4} \cdot 1000^2}{(0,899 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 340774}} = 21,12 \doteq 21 \text{ záv.} \quad (5.3.13)$$

Známe-li počet závitů, můžeme vypočítat vlastní indukčnost cívky a také výslednou indukčnost  $L_I$ , odpor cívky  $R_1$  a vsázky  $R_2$ , převodní poměr  $p^2$  a výsledný odpor  $R_I$ .

$$L_1 = \mu_0 \pi \left(\frac{d_c}{2}\right)^2 \frac{\alpha_1}{l_1} N_1^2 = 4\pi \cdot 10^{-7} \pi \left(\frac{0,53624}{2}\right)^2 \frac{0,8052}{0,58} 21^2 = \quad (5.3.14)$$

$$L_1 = 1,7144 \cdot 10^{-4} \text{ H}$$

$$L_I = L_1(1 - \kappa_{12}^2) = 1,7144 \cdot 10^{-4}(1 - 0,4812) = \quad (5.3.15)$$

$$L_I = 8,894 \cdot 10^{-5} \text{ H}$$

$$R_1 = \rho_1 \frac{\pi d_c N_1^2}{a_1(l_1 - \frac{U_g}{15000})} = 1,92 \cdot 10^{-8} \frac{\pi 0,53264 \cdot 21^2}{0,00264(0,58 - \frac{1000}{15000})} \quad (5.3.16)$$

$$R_1 = 0,01045\Omega$$

$$L_2 = \mu_0 \pi \left(\frac{d_v}{2}\right)^2 \frac{\dot{\alpha}_2}{l_2} = 4\pi \cdot 10^{-7} \pi \left(\frac{0,4}{2}\right)^2 \frac{0,7899}{0,525} \quad (5.3.17)$$

$$L_2 = 2,3759 \cdot 10^{-7} H$$

$$p^2 = \kappa_{12}^2 \frac{L_1}{L_2} = 0,4812 \frac{1,7144 \cdot 10^{-4}}{2,3759 \cdot 10^{-7}} = 347,224 \quad (5.3.18)$$

$$p = 18,634$$

$$R_2 = \rho_2 \frac{\pi d_v}{a_2 l_2} = 10^{-6} \frac{\pi 0,4}{0,019 \cdot 0,525} = 1,2598 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (5.3.19)$$

$$p^2 R_2 = 347,224 \cdot 1,2598 \cdot 10^{-4} = 0,043743 \quad (5.3.20)$$

$$\acute{R}_I = p^2 R_2 + R_1 = 0,043743 + 0,01045 = 0,054243\Omega \quad (5.3.21)$$

$$R_I = R_1 + p^2 R_2 + \acute{R}_c = \frac{P_g}{I_1^2} = \frac{350000}{(2492,7244)^2} = 0,05633\Omega \quad (5.3.22)$$

Výpočet potřebné kapacity, činitele jakosti  $Q_I$  a proudu  $I_c$  v kondenzátorové baterii.

$$\acute{C} = \frac{L_I}{R_I^2 + \omega^2 L_I^2} = \frac{8,894 \cdot 10^{-5}}{0,05633^2 + 4398,2^2 \cdot (8,894 \cdot 10^{-5})^2} \quad (5.3.23)$$

$$\acute{C} = 5,6943 \cdot 10^{-4} F$$

$$Q_I = \frac{\omega L_I}{R_I} = \frac{4398,2 \cdot 8,894 \cdot 10^{-5}}{0,05633} = 6,9444 \quad (5.3.24)$$

$$I_c = I_1 \frac{Q_I}{\sqrt{(1 + Q_I^2)}} = 2492,7244 \frac{6,9444}{\sqrt{(1 + 6,9444^2)}} \quad (5.3.25)$$

$$I_c = 2467,2749 A$$

Kontrola dielektrických ztrát  $P_K$ . Ztrátový úhel  $tg\delta = 3,4 \cdot 10^{-3}$

$$P_K = I_c U_g tg\delta = 2467,2749 \cdot 1000 \cdot 3,4 \cdot 10^{-3} = 8388,735 W \quad (5.3.26)$$

Celkové dielektrické ztráty  $\acute{P}_c = P_K + P_V = 1,1 P_K = 9227,61 W$ . Na začátku výpočtu byl odhad ztrát  $9226 W$ . Při výpočtu tedy vyšla dobrá shoda mezi odhadem a skutečností. Rozdíl je pouze  $1,61 W$ . Nyní můžeme vypočítat odpor  $R_c$ .

$$\check{R}_c = \frac{\check{P}_c}{I_c^2} = \frac{9227,61}{2467,2749^2} = 1,5158 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (5.3.27)$$

$$\text{poměr: } \frac{X_c}{\check{R}_c} = \frac{1}{\omega \check{C}} = \frac{1}{4398,2 \cdot 5,6943 \cdot 10^{-4}} = 263,4 \Omega \quad (5.3.28)$$

Odpor  $\check{R}_c$  a kapacita  $\check{C}$  jsou v sérii a úbytky na odporu  $\check{R}_c$  jsou minimální, proto můžeme odpor přesunout do vedlejší větve a stanovit tak výsledný odpor oscilačního obvodu  $R_I$ .

$$\begin{aligned} R_I &= R_1 + p^2 R_2 + \check{R}_c = 0,01045 + 0,043743 + 1,5158 \cdot 10^{-3} \\ R_I &= 0,0557 \Omega \end{aligned} \quad (5.3.29)$$

Opět jsme dostali dobrou shodu  $R_I$  určený z  $P_g$  a  $I_1^2$  vyšel  $0,05633 \Omega$ . Kontrola vyšla  $0,0557 \Omega$ .

$$\text{poměr} = \frac{0,05633}{0,0557} = 1,01 \quad (5.3.30)$$

Vyladěný pecní obvod se jeví vůči zdroji jako činný zatěžovací odpor  $R_Z$ .

$$R_Z = \frac{L_I}{C \check{R}_I} = \frac{8,894 \cdot 10^{-5}}{5,6943 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0557} = 2,8 \Omega \quad (5.3.31)$$

Kontrola výpočtu.

$$P_Z = \frac{U_g^2}{R_Z} = \frac{1000^2}{2,8} = 357 \text{ kW} \quad (5.3.32)$$

Zde vyšla odlišnost, která může být spojená se zaokrouhlováním. Elektrická účinnost indukční pece je vypočtená níže.

Ztráty v cívce a jejich procentuální vyjádření z příkonu pece.

$$P_1 = R_1 I_1^2 = 0,01045 \cdot 2492,7244^2 = 65 \text{ kW} = 18,6\% \quad (5.3.33)$$

Užitečný výkon

$$P_2 = p^2 R_2 I_1^2 = 0,043743 \cdot 2492,7244^2 = 272 \text{ kW} = 77,7\% \quad (5.3.34)$$

Dielektrické ztráty a ztráty ve vedení.

$$\check{P}_c = P_K + P_V = 1,1 \cdot P_K = 1,1 \cdot 8388,735 = 9,23 \text{ kW} = 2,64\% \quad (5.3.35)$$

Kontrola  $\sum P = 346 \text{ kW} = 101\%$  drobná chyba je způsobená zaokrouhlováním při výpočtech. Dále lze vypočítat celkovou účinnost cívky  $\eta_c$  a celkovou účinnost  $\eta_v$ .

$$\eta_c = \frac{P_2}{P_1 + P_2} = \frac{272}{65 + 272} = 80\% \quad (5.3.36)$$

$$\eta_v = \frac{P_2}{\sum P} = \frac{272}{346} = 78\% \quad (5.3.37)$$

## 5.4 Návrh jádra transformátorových plechů

Při návrhu jádra transformátorových plechů vycházím z výpočtů pece bez stínění (5.2). Při dimenzování magnetického jádra je rozhodující magnetický tok  $\Phi$  [Wb] buzený cívkou a zeslabený působením vsázky.

$$\Phi = \frac{L_I}{N} I_1 \sqrt{2} = \frac{1,02 \cdot 10^{-4}}{23,5} 2296,28 \sqrt{2} = 1,41 \cdot 10^{-2} \text{Wb} \quad (5.4.1)$$

Při uvažování kmitočtu  $f = 700$  Hz a zvoleném sycení  $B = 0,3$  T odečteme hodnotu měrných ztrát z obrázku 3.9.3.3. Hodnota ztrát  $P = 4$  W.kg<sup>-1</sup>. Dále můžeme určit potřebný celkový průřez  $S$ .

$$S = \frac{\Phi}{B} = \frac{1,41 \cdot 10^{-2}}{0,3} = 0,038 \text{ m}^2 = 380 \text{ cm}^2 \quad (5.4.2)$$

Celkem zvolíme 14 svazků z transformátorových plechů o základně 6 cm a o výšce 4,5 cm. Rozteč mez sousedními svazky bude 13,5 cm. Délku svazků transformátorových plechů zvolíme 70 cm. Nyní můžeme spočítat hmotnost celého železného jádra (měrná hmotnost železného jádra je 7700 kg.m<sup>-3</sup>).

$$G_{FE} = \text{svazky} \times \text{základna} \times \text{výška} \times \text{délka} \times \text{měrná hm. FE} \quad (5.4.3)$$

$$G_{FE} = 14 \times 0,06 \times 0,045 \times 0,7 \times 7700 = 203,75 \text{Kg}$$

Ztráty v železném jádře poté budou.

$$P_{FE} = G_{FE} P = 203,75 \times 4 = 815 \text{W} \quad (5.4.4)$$

Ztráty v železném jádru transformátorových svazků tvoří 0,23% z celkového příkonu pece.

## 5.5 Zhodnocení výpočtů

Z výpočtů vyplývá, že celková účinnost pece se stíněním ze svazků transformátorových plechů je o něco vyšší než u pece bez stínění. Výpočtem bylo tedy dokázáno, že svazky transformátorových plechů zvyšují celkovou účinnost pece. Totéž platí i pro celkovou účinnost cívky, která opět vyšla o něco vyšší u pece se stíněním ze svazků transformátorových plechů.

Pec bez stínění se v praxi nemůže provozovat, jelikož by rozptylové magnetické pole výraznou měrou ovlivňovalo okolí. Vždy je potřeba pec vybavit nějakým druhem stínění. V kapitole 5.4 je popsán návrh jádra transformátorových svazků k vypočítané peci. Okolo vnějšího průměru cívky by mohlo být umístěno stínění zhotovené ze 14 svazků transformátorových svazků. Ve stínění by vznikly ztráty odpovídající 0,23% příkonu pece.

## 6 Měření intenzity magnetického pole

### 6.1 Měření magnetických polí

Magnetické pole je charakterizováno magnetickou indukcí  $B$  a intenzitou magnetického pole  $H$ . Mezi těmito veličinami platí vztah:

$$B = \mu_0 \mu_r H [T] \quad (6.1.1)$$

Pro určení intenzity magnetického pole v okolí vodičů protékaných proudem, nebo v okolí elektrotechnických zařízení, je dobré provést kontrolní měření magnetického pole. Měření se provádí pomocí magnetických převodníků, které převádějí měřenou magnetickou veličinu na elektrický signál. Převodníky používající se v technické praxi jsou měřicí cívky, Hallovy sondy, feromagnetické sondy, Rogowskiho potenciometr a další. Popis jednotlivých převodníků lze nalézt v literatuře [10].

Měřicí přístroj NARDA ETL 400, který jsem použil pro měření magnetického pole a který je podrobněji popsán v následující kapitole (6.2), používá jako převodník měřicí cívky.

Měřicí cívkou prochází magnetický rozptylový tok  $\Phi$ . Pokud je magnetický tok proměnný, začne se v cívce indukovat napětí. [10]

$$u(t) = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N S \frac{dB}{dt} [V] \quad (6.1.2)$$

Toto napětí lze detekovat použitím střídavého voltmetru. Naměřená efektivní hodnota napětí je pak dána vztahem 6.1.3.

$$u = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N S B [V] \quad (6.1.3)$$

Vyjádření maximální amplitudy

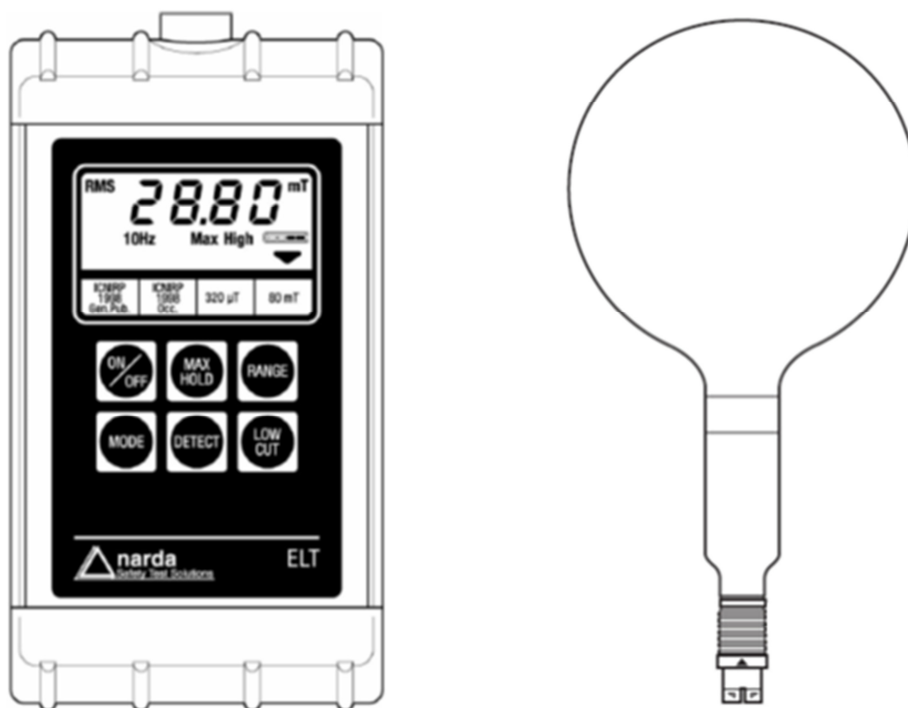
$$B_{max} = \frac{U \sqrt{2}}{2\pi f N S} [T] \quad (6.1.4)$$

$$B_{max} = k \frac{U}{4,44f} [T] \quad (6.1.5)$$

## 6.2 Měřicí přístroj NARDA ETL 400

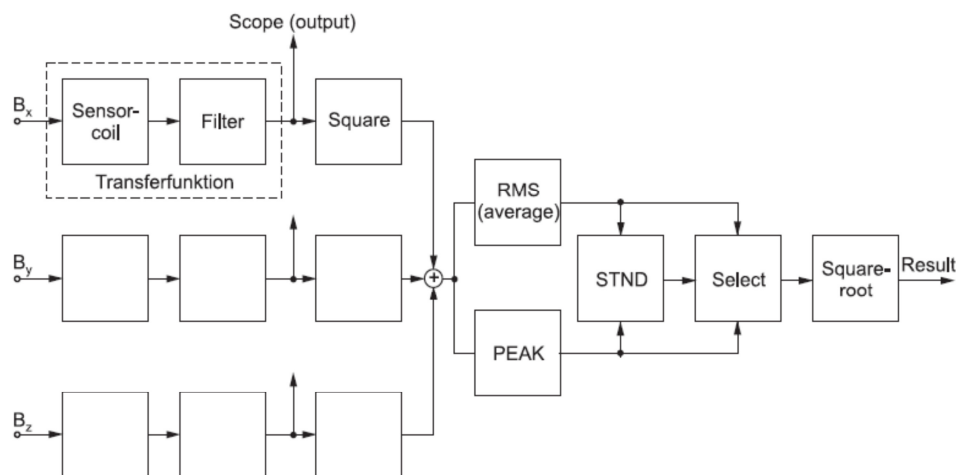
Měřicí přístroj NARDA ETL – 400 je přístroj určený k měření magnetických polí. Přístroj je možné díky přenosné konstrukci snadno přenášet a provádět měření v různých oblastech. Lze měřit ve zpracovatelském průmyslu, energetice, ale i kontrolovat hodnoty magnetické indukce ve veřejné sféře. Měření se často provádí v těchto oblastech, aby se zamezilo působení nadměrného magnetického pole na živé organismy a nepříznivého působení pole na ostatní elektrické přístroje.

ETL – 400 pokrývá široký frekvenční rozsah od 1 Hz do 400 kHz. Je zhotoven z robustního krytu a lze s ním jednoduše manipulovat. Pokud není vhodné měřit sondou přímo u zařízení například z konstrukčních důvodů, lze měřicí hlavici připojit přes prodlužovací kabel. Tento kabel je speciálně upraven, aby neovlivňoval měření. Výsledky měření se zobrazují na přehledném LCD displeji. Přístroj má k dispozici několik druhů měření magnetického pole. Režim STD měří magnetickou indukci a přímo ji porovnává s normou EN 50366 a zobrazuje procentuálně výsledek na displej. Dále je možné měřit aktuální hodnotu magnetické indukce pomocí módu RMS. Numerické znázornění výsledku měření se zobrazuje na displeji v jednotkách mT, nebo  $\mu\text{T}$ . Stisknutím tlačítka MAX HOLD přístroj zaznamená nejvyšší dosaženou hodnotu magnetického pole a zobrazí ji na displeji.



Obrázek 6.2.1 Měřicí přístroj NARDA ETL – 400 s měřicí hlavou (převzato z [11])

Přístroj zaznamenává indukované napětí ve třech měřících cívkách, které prostorově umístěné v kulové sondě. Napěťový signál je digitalizován a zpracován v procesoru DSP. Procesor vypočítává podle filtrů hodnoty magnetického toku, který odpovídá daným napěťovým poměrům. Blokové schéma měřícího přístroje je znázorněno na obrázku 6.2.2.



**Obrázek 6.2.2** Blokové schéma měřícího přístroje NARDA ETL – 400 (převzato z [11])

Přístroj měří současně efektivní a maximální hodnotu magnetického pole pomocí tří osových cívek. Efektivní hodnota magnetické indukce je složena z jednotlivých změřených indukcí v osách měřících cívek a výsledná hodnota se poté vypočítává z následujícího vzorce.

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (6.2.1)$$

Přístroj každých 250 ms aktualizuje a zobrazuje aktuální výsledky měření. Informace uvedené v této kapitole vycházejí z překladu literatury [11]. Technické parametry měřícího přístroje NARDA ETL 400 jsou uvedeny v příloze III.

### 6.3 Popis měřené pece

Měření elektromagnetické indukce bylo provedeno na reálné indukční kelímkové peci. Pec vyrobila společnost ABB pod označením ECOMELT EGP 500. Objem kelímku je 500 kg. Náskres pece je možné si prohlédnout v příloze IV. Tato indukční pec není vybavena žádným typem stínění, proto jsem tedy provedl měření magnetické indukce v okolí pece. Okolní konstrukční prvky jsou nemagnetické. Naměřené hodnoty a závěry pro praxi lze nalézt v dalších kapitolách práce. Induktor pece je vybaven zemněním, které má v případě protavení kelímku pec odpojit od zdroje napětí. Samotný induktor je chlazen pomocí jednookruhového vodního chlazení. Vodní nádrž je umístěna v prostoru pod pecí a pomocí vodního čerpadla je vedena voda gumovými hadicemi k cívce. Forma kelímku je obvykle pýchována



z práškového materiálu, který odděluje roztavenou vsázku od induktoru. Přehled materiálů používajících se k pechování kelímku je uveden v 6.3-1. Tento práškový materiál má různou životnost. Životnost závisí na charakteru tavby, je potřeba pečlivě kontrolovat stav této vyzdívky a případně opravit, nebo vyměnit.

**Tabulka 6.3-1** Možnost aplikace suchých směsí v indukčních pecích pro různé taveniny (převzato z dokumentace pece EGP 500)

Typ taveniny	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SiO <sub>2</sub>	MgO	MgO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
litina	X					
ocelolitina	X					
ocel a legovaná ocel			X		X	X
feroslitiny			X		X	X
nikl a niklové slitiny	X		X			X
měď a měděné slitiny	X			X		
hliník a hliníkové slitiny		X		X		

Pec je napájena měničem, který je umístěn poblíž pece. Na ovládací skříně pece, která je s měničem propojená, je několik kontrolních, signalizačních a ovládacích prvků. Pomocí ovládacích prvků je možné měnit výkon a frekvenci zdroje. Na kontrolním displeji lze sledovat aktuální výkon, frekvenci, napětí a proud pece.

### 6.3.1 Technické údaje pece

Technické parametry indukční kelímkové pece ECOMELT EGP 500, udávané za podmínek ohřáté žáruvzdorné vyzdívky, suchého a kvalitního šrotu.

Typ pece	ECOMELT EGP 500
Jmenovitý příkon pece	350 kW
Tavený materiál	Ocelolitina, nebo šedá litina
Napětí pece	3 × 380 V AC
Vstupní napětí	1000 V
Chladicí systém	Vodní chlazení
Výkonová měrná spotřeba	595 kWh/t – ocel 576 kWh/t – litina
Kapacita kelímku pece	500 kg
Frekvenční rozsah	650 – 800 Hz
Výkon tavení (rychlost)	620 kg/h – ocel 690 kg/h – litina

Licí teplota materiálu	1600 °C – ocel
	1450 °C – litina
Tlak vodního chlazení	6 bar
Příkon vodního čerpadla	3 kW

#### 6.4 Popis režimu tavení

Slévárna, kde je pec umístěna, provádí každý pracovní den 4 – 5 taveb. Při první tavbě běží pec zpočátku na nízký výkon z důvodu postupného zahřívání kelímku. Posléze se výkon navyšuje na maximální hodnotu. Ostatní tavby již probíhají na maximálním výkonu pece.

Obsluha pece (tavič) nastavuje výkon pece a v průběhu tavby plní kelímek kusy šrotu z litiny a železa. Tento šrot musí být důkladně suchý. Pokud by byl šrot vlhký nebo dokonce mokrý, mohlo by dojít k zničení pece nebo ohrožení obsluhy. Když se do roztavené vsázky hodí kus šrotu, který je mokrý, pec začne okamžitě chrlit vsázku do okolí a hrozí popálení pracovníků. V průběhu tavby obsluha pece průběžně odebírá strusku z povrchu vsázky. Když je kelímek plný, tavič zkontroluje teplotním čidlem teplotu vsázky a pokud splňuje licí teplotu, přivolá ostatní pracovníky a odlije jim vsázku k dalšímu zpracování. Po vylití obsahu kelímku začne tavič připravovat další tavbu.

#### 6.5 Postup a průběh měření

Po příchodu do slévárny se chýlila tavba ke konci, takže jsem měl dostatek času vše připravit. Nejprve jsem si prohlédl pec a sestavil její nákres. Poté jsem určil několik bodů v okolí pece, kde jsem později provedl měření. Dále jsem připravil měřicí přístroj NARDA ETL 400 do RMS módu na měření okamžité efektivní hodnoty magnetické indukce. Když začala další tavba, odečetl jsem provozní hodnoty z kontrolního displeje a mohl jsem přistoupit k samotnému měření. V jednotlivých bodech zakreslených na obrázku 6.3.1.1 a 6.3.1.2 jsem odečetl hodnoty magnetické indukce. Stejný postup jsem pak aplikoval při měření magnetické indukce ve vzdálenosti jednoho metru.

#### 6.6 Referenční hodnoty magnetického pole

ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) je veřejná nezisková organizace, která vznikla v roce 1973 a sídlí v Německu. ICNIRP se snaží šířit informace a rady o možných zdravotních rizicích, která mohou vzniknout při působení neionizujícího záření, statického a časově proměnného elektrického a magnetického pole,

radiofrekvenčního záření a ultrazvuku.

Pro ICNIRP pracují nezávislí experti z vědních disciplín, které souvisí s neionizujícím zářením. Experti pracují ve skupinách a zveřejňují informace a rady o jednotlivých tématech v odborné literatuře, sbornících, na konferencích a na webových stránkách organizace.

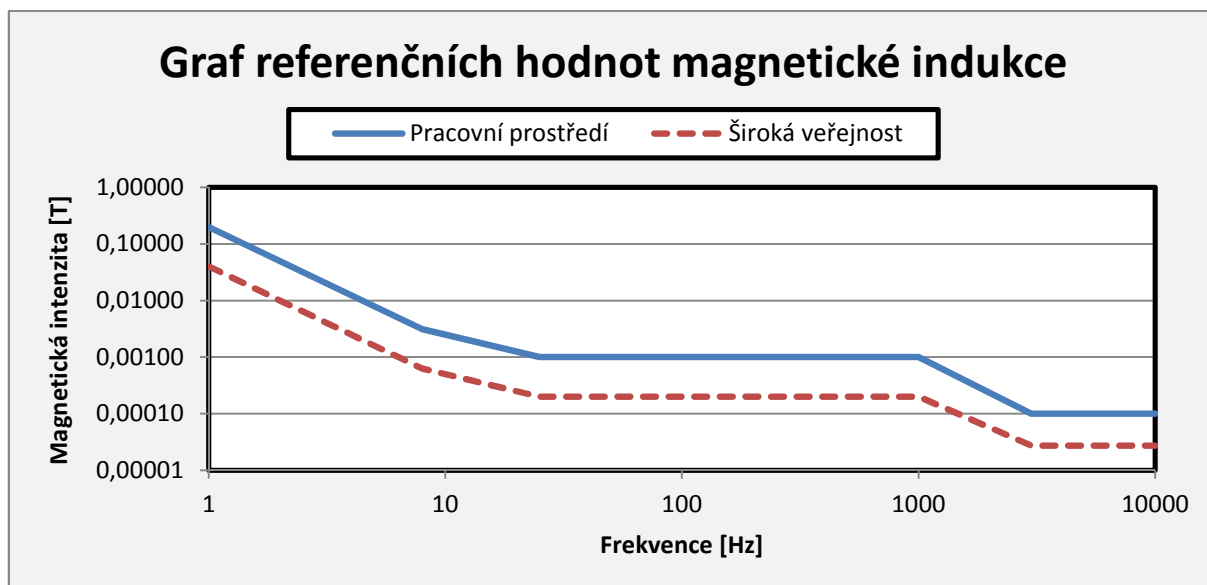
Jednou z oblastí, kterou se tato organizace zabývá, je stanovení limitů expozice magnetickým polem. V publikaci [12] jsou uvedeny limity vystavení elektrickým a magnetickým polím v nízkofrekvenčním a středofrekvenčním pásmu od 1 Hz až do 100 kHz. Následující tabulky definují dovolené hodnoty magnetické indukce pro jednotlivá frekvenční pásma. [12]

**Tabulka 6.6-1** Referenční hodnoty pro pracovníky (vytvořeno na základě [12])

Referenční hodnoty pro pracovní expozici (RMS hodnoty)			
Frekvenční rozsah	Elektrická intenzita E [KV m-1]	Magnetická intenzita H [A m-1]	Magnetická indukce B [T]
1 – 8 Hz	20	$1,63 \times 10^5 / f^2$	$0,2 / f^2$
8 – 25 Hz	20	$2 \times 10^5 / f^2$	$2,5 \times 10^{-2} / f$
25 – 300 Hz	$5 \times 100 / f$	$8 \times 10^2$	$1 \times 10^{-3}$
300 – 3000 Hz	$5 \times 100 / f$	$2,4 \times 10^5 / f$	$0,3 / f$
3 kHz – 10 MHz	0,17	80	$1 \times 10^{-4}$
Poznámka: f – frekvence v Hz			

**Tabulka 6.6-2** Referenční hodnoty pro širokou veřejnost (vytvořeno na základě [12])

Referenční hodnoty pro širokou veřejnost (RMS hodnoty)			
Frekvenční rozsah	Elektrická intenzita E [KV m-1]	Magnetická intenzita H [A m-1]	Magnetická indukce B [T]
1 – 8 Hz	5	$3,2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^{-2} / f^2$
8 – 25 Hz	5	$4 \times 10^3 / f$	$5 \times 10^{-3} / f$
25 – 50 Hz	5	$1,6 \times 10^2$	$2 \times 10^{-4}$
50 – 400 Hz	$2,5 \times 10^2 / f$	$1,6 \times 10^2$	$2 \times 10^{-4}$
400 Hz – 3 kHz	$2,5 \times 10^2 / f$	$6,4 \times 10^4 / f$	$8 \times 10^{-2} / f$
3 kHz – 10 MHz	$8,3 \times 10^{-2}$	21	$2,7 \times 10^{-5}$
Poznámka: f – frekvence v Hz			



Obrázek 6.6.1 Graf referenčních hodnot

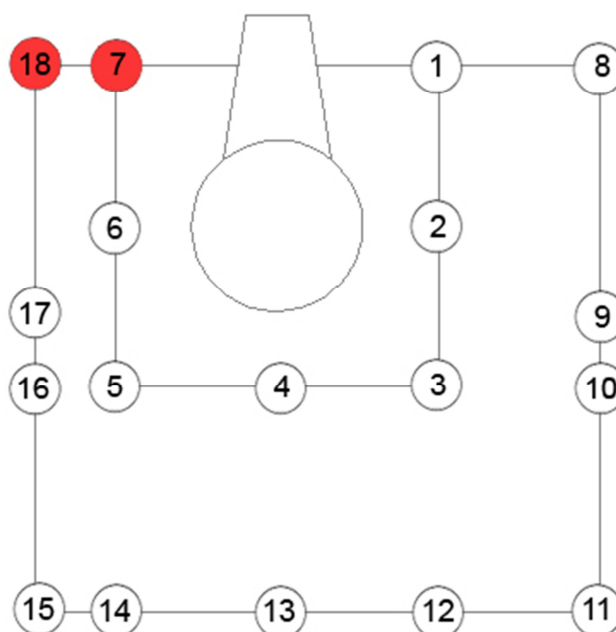
Další organizací, která se zabývá posuzováním vlivu magnetických polí na lidskou populaci je WHO (World Health Organisation), která ve své publikaci [13] stanovuje některá doporučení týkající se maximálních expozičních magnetického pole. Jedna část publikace je zaměřena na expozici magnetickým polem v blízkosti indukčních pecí. Nicméně WHO doporučuje zavést standardy podle ICNIRP.

Směrnice evropského parlamentu a rady 2004/40/ES stanovila minimální požadavky na bezpečnost a ochranu zdraví před expozicí zaměstnanců spojených s riziky působení elektromagnetického pole. Tato směrnice udává limity v rozsahu 0 Hz – 300 GHz. Směrnice se vztahuje na ohrožení zdraví zaměstnanců v důsledku působení krátkodobých škodlivých účinků v lidském těle, které jsou způsobeny naindukovanými proudy a absorpcí energie. [14]

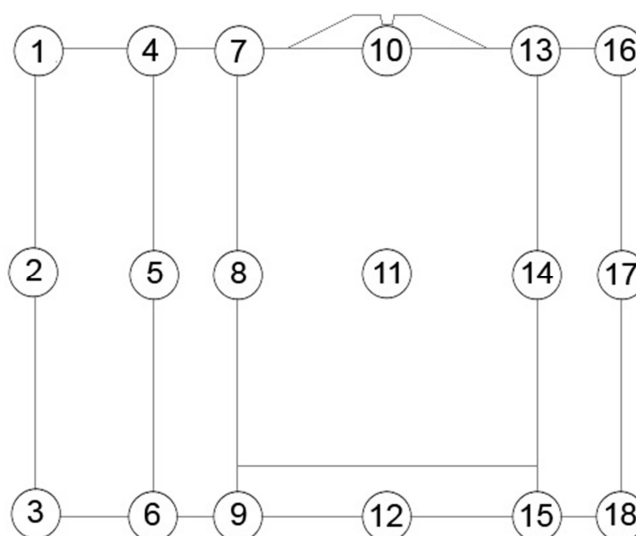
Norma EN 50366 se zabývá měřením elektromagnetických polí v okolí domácností a v okolí elektrických spotřebičů. Definiuje standardní provozní podmínky a stanovuje metodologii měření. Tato norma není přímo vhodná na posouzení vlivu indukční pecí, ale uvádím ji zde z důvodu toho, že se používá k hodnocení zařízení používajících se v okolí domácností a zejména se zabývá hodnocením indukčních vařičů. Dále také proto, že měřicí přístroj NARDA ETL – 400, který byl použit pro měření, dokáže s touto normou pracovat a vyhodnocovat aktuální měření magnetického pole. V režimu měření STD zobrazuje přístroj na displeji přímo procentuální hodnotu pole vůči referenčním hodnotám, které stanovuje tato norma. Nicméně norma je určena pro veřejnost, tedy jsem ji nemohl použít pro vyhodnocení výsledků změřených v průmyslovém prostředí.

## 6.7 Nákres měřené pece

Na následujících obrázcích je znázorněn souřadný systém měření. V každém označeném bodu bylo provedeno odečtení magnetické indukce. Na prvním obrázku 6.7.1 je znázorněn nákres pece ECOMELT EGP 500 z vrchní strany, tedy ze strany obsluhy. Červeně vyznačené body (7,18) jsou body, ve kterých nebylo provedeno měření z důvodu horšího přístupu a rizika poškození měřicího přístroje sáláním tepla od roztavené vsázky. Na obrázku 6.7.2 je znázorněn souřadný systém měření magnetické indukce z přední strany pece ECOMELT EGP 500.



**Obrázek 6.7.1** Nákres pece s měřnými body ze shora pece



**Obrázek 6.7.2** Nákres pece s měřnými body z přední strany pece

## 6.8 Naměřené hodnoty magnetické indukce

V okolí indukční kelímkové pece ECOMELT EGP 500 jsem provedl kontrolní měření magnetického pole. Souřadný systém měření je zakreslen na obrázku 6.7.1 pro vrchní stranu pece a na obrázku 6.7.2 pro přední stranu pece. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v následujících tabulkách.

**Tabulka 6.8-1** Změřené hodnoty magnetické indukce z vrchní strany pece

Měření vrchní části pece ECOMELT EGP 500								
Bod měření	Měření č. 1 (na povrchu)		Měření č. 2 (na povrchu)		Měření č. 3 (1m nad povrchem)		Měření č. 4 (1m nad povrchem)	
	B [ $\mu$ T]	f [Hz]	B [ $\mu$ T]	f [Hz]	B [ $\mu$ T]	f [Hz]	B [ $\mu$ T]	f [Hz]
1	2730	663	3150	675	535	663	300	825
2	4260	663	3900	675	570	663	370	825
3	2240	663	2430	675	530	663	350	825
4	4820	663	3810	675	585	663	380	825
5	3180	663	3810	675	540	663	370	825
6	4700	663	5340	675	570	663	410	825
7	X	663	X	675	X	663	X	825
8	750	663	800	675	255	663	180	825
9	900	663	990	675	290	663	222	825
10	900	663	920	675	256	663	195	825
11	310	663	360	675	158	663	146	825
12	750	663	770	675	210	663	196	825
13	830	663	990	675	240	663	215	825
14	700	663	800	675	230	663	200	825
15	420	663	460	675	215	663	185	825
16	1390	663	1660	675	365	663	300	825
17	1910	663	2410	675	X	663	330	825
18	X	663	X	675	X	663	X	825

Tabulka 6.8-2 Změřené hodnoty magnetické indukce z přední strany pece

Měření přední části pece ECOMELT EGP 500								
Bod měření	Měření č. 1 (na povrchu)		Měření č. 2 (na povrchu)		Měření č. 3 (1m nad povrchem)		Měření č. 4 (1m nad povrchem)	
	B [ $\mu$ T]	f [Hz]	B [ $\mu$ T]	f [Hz]	B [ $\mu$ T]	f [Hz]	B [ $\mu$ T]	f [Hz]
1	416	663	485	675	117	663	143	675
2	193	663	227	675	108	663	137	675
3	250	663	285	675	115	663	137	675
4	630	663	660	675	144	663	150	675
5	420	663	475	675	132	663	159	675
6	540	663	680	675	136	663	71	675
7	1680	663	1580	675	173	663	176	675
8	1100	663	830	675	173	663	180	675
9	1460	663	1345	675	204	663	193	675
10	2450	663	2090	675	265	663	245	675
11	805	663	810	675	217	663	210	675
12	2280	663	2000	675	213	663	220	675
13	2200	663	1130	675	188	663	172	675
14	1180	663	760	675	176	663	170	675
15	1350	663	1100	675	205	663	170	675
16	545	663	710	675	160	663	153	675
17	430	663	550	675	160	663	134	675
18	540	663	700	675	180	663	152	675

## 6.9 Porovnání naměřených hodnot s ICNIRP

V následujících tabulkách je vyhodnocení naměřených hodnot magnetické indukce v porovnání s referenčními hodnotami, které doporučuje ICNIRP. Červeně označené buňky v tabulkách znázorňují překročení referenčních hodnot.

Tabulka 6.9-1 Porovnání naměřených výsledků vrchní části pece (povrch) s ICNIRP

Měření vrchní části pece ECOMELT EGP 500						
Bod měření	Měření č. 1 (na povrchu)			Měření č. 2 (na povrchu)		
	Referenční hodnota			Referenční hodnota		
	$B_{\max} [\mu T] = 452,5$			$B_{\max} [\mu T] = 444,4$		
	B [ $\mu T$ ]	B [%]	f [Hz]	B [ $\mu T$ ]	B [%]	f [Hz]
1	2730	603	663	3150	709	675
2	4260	941	663	3900	878	675
3	2240	495	663	2430	547	675
4	4820	1065	663	3810	857	675
5	3180	703	663	3810	857	675
6	4700	1039	663	5340	1202	675
7	X	X	X	X	X	X
8	750	166	663	800	180	675
9	900	199	663	990	223	675
10	900	199	663	920	207	675
11	310	69	663	360	81	675
12	750	166	663	770	173	675
13	830	183	663	990	223	675
14	700	155	663	800	180	675
15	420	93	663	460	104	675
16	1390	307	663	1660	374	675
17	1910	422	663	2410	542	675
18	X	X	X	X	X	X

Podle doporučení ICNIRP [12] je stanovena referenční hodnota magnetické indukce ve frekvenčním rozsahu 300 – 3000 Hz podle následujícího vztahu.

$$B_{MAX} = \frac{0,3}{f} [T] \quad (6.9.1)$$

Podle vztahu (6.9.1) jsou referenční hodnoty měření magnetické indukce stanoveny následovně.

$$B_{MAX} = \frac{0,3}{663} = 452,5 [\mu T], \text{ pro měření č. 1} \quad (6.9.2)$$

$$B_{MAX} = \frac{0,3}{675} = 444,44 [\mu T], \text{ pro měření č. 2} \quad (6.9.3)$$



Tabulka 6.9-2 Porovnání naměřených výsledků vrchní části pece (1m nad povrchem) s ICNIRP

Měření vrchní části pece ECOMELT EGP 500						
Bod měření	Měření č. 3 (1m nad povrchem)			Měření č. 4 (1m nad povrchem)		
	Referenční hodnota			Referenční hodnota		
	$B_{\max} [\mu\text{T}] = 452,5$			$B_{\max} [\mu\text{T}] = 363,6$		
	B [ $\mu\text{T}$ ]	B [%]	f [Hz]	B [ $\mu\text{T}$ ]	B [%]	f [Hz]
1	535	118,235	663	300	82,5	825
2	570	125,97	663	370	101,75	825
3	530	117,13	663	350	96,25	825
4	585	129,285	663	380	104,5	825
5	540	119,34	663	370	101,75	825
6	570	125,97	663	410	112,75	825
7	X	X	X	X	X	X
8	255	56,355	663	180	49,5	825
9	290	64,09	663	222	61,05	825
10	256	56,576	663	195	53,625	825
11	158	34,918	663	146	40,15	825
12	210	46,41	663	196	53,9	825
13	240	53,04	663	215	59,125	825
14	230	50,83	663	200	55	825
15	215	47,515	663	185	50,875	825
16	365	80,665	663	300	82,5	825
17	X	X	X	330	90,75	825
18	X	X	X	X	X	x

Referenční hodnoty magnetické indukce jsou vypočtené podle vzorce 6.9.1.

Tabulka 6.9-3 Porovnání naměřených výsledků přední části pece (na povrchu) s ICNIRP

Měření přední části pece ECOMELT EGP 500						
Bod měření	Měření č. 1 (na povrchu)			Měření č. 2 (na povrchu)		
	Referenční hodnota			Referenční hodnota		
	$B_{\max} [\mu\text{T}] = 452,5$			$B_{\max} [\mu\text{T}] = 444,4$		
	B [ $\mu\text{T}$ ]	B [%]	f [Hz]	B [ $\mu\text{T}$ ]	B [%]	f [Hz]
1	416	91,936	663	485	109,125	675
2	193	42,653	663	227	51,075	675
3	250	55,25	663	285	64,125	675
4	630	139,23	663	660	148,5	675
5	420	92,82	663	475	106,875	675
6	540	119,34	663	680	153	675
7	1680	371,28	663	1580	355,5	675
8	1100	243,1	663	830	186,75	675
9	1460	322,66	663	1345	302,625	675
10	2450	541,45	663	2090	470,25	675
11	805	177,905	663	810	182,25	675
12	2280	503,88	663	2000	450	675
13	2200	486,2	663	1130	254,25	675
14	1180	260,78	663	760	171	675
15	1350	298,35	663	1100	247,5	675
16	545	120,445	663	710	159,75	675
17	430	95,03	663	550	123,75	675
18	540	119,34	663	700	157,5	675

Referenční hodnoty magnetické indukce jsou vypočtené podle vzorce 6.9.1.

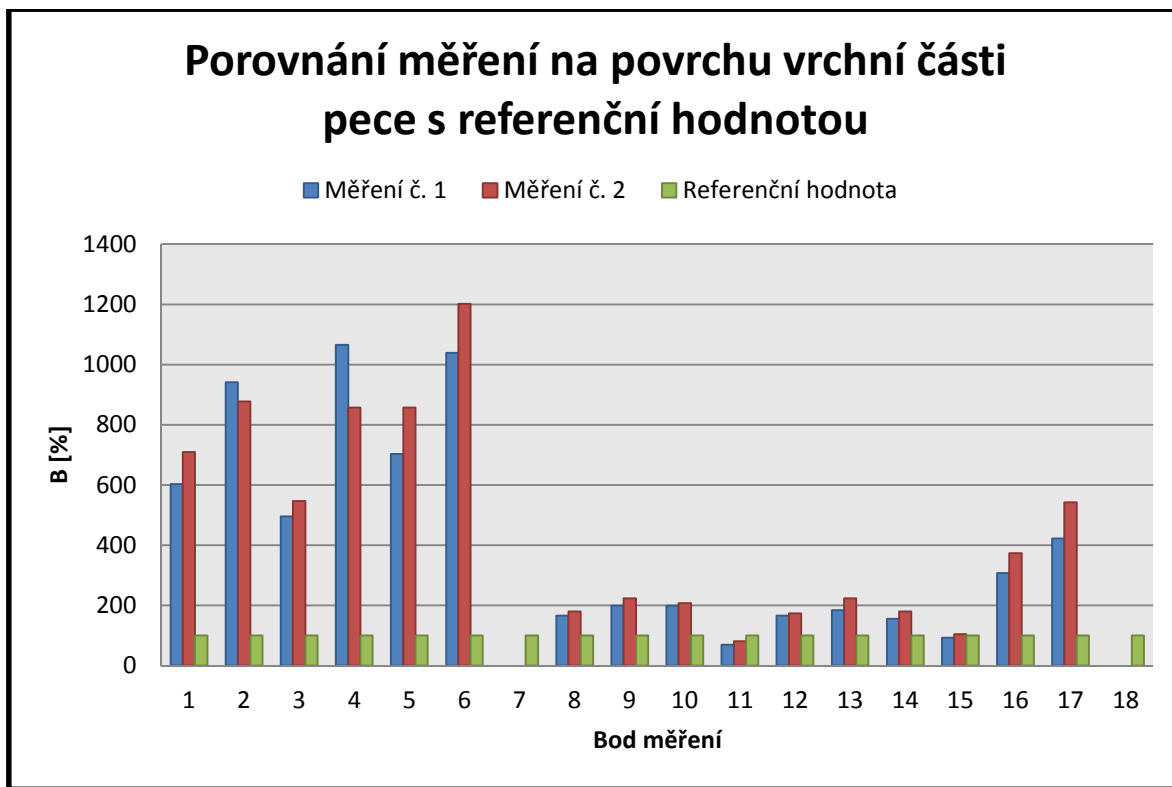
Tabulka 6.9-4 Porovnání naměřených výsledků přední části pece (1m nad povrchem) s ICNIRP

Měření přední části pece ECOMELT EGP 500						
Bod měření	Měření č. 3 (1m nad povrchem)			Měření č. 4 (1m nad povrchem)		
	Referenční hodnota			Referenční hodnota		
	$B_{\max} [\mu T] = 452,5$			$B_{\max} [\mu T] = 444,4$		
	B [ $\mu T$ ]	B [%]	f [Hz]	B [ $\mu T$ ]	B [%]	f [Hz]
1	117	25,857	663	143	32,175	675
2	108	23,868	663	137	30,825	675
3	115	25,415	663	137	30,825	675
4	144	31,824	663	150	33,75	675
5	132	29,172	663	159	35,775	675
6	136	30,056	663	71	15,975	675
7	173	38,233	663	176	39,6	675
8	173	38,233	663	180	40,5	675
9	204	45,084	663	193	43,425	675
10	265	58,565	663	245	55,125	675
11	217	47,957	663	210	47,25	675
12	213	47,073	663	220	49,5	675
13	188	41,548	663	172	38,7	675
14	176	38,896	663	170	38,25	675
15	205	45,305	663	170	38,25	675
16	160	35,36	663	153	34,425	675
17	160	35,36	663	134	30,15	675
18	180	39,78	663	152	34,2	675

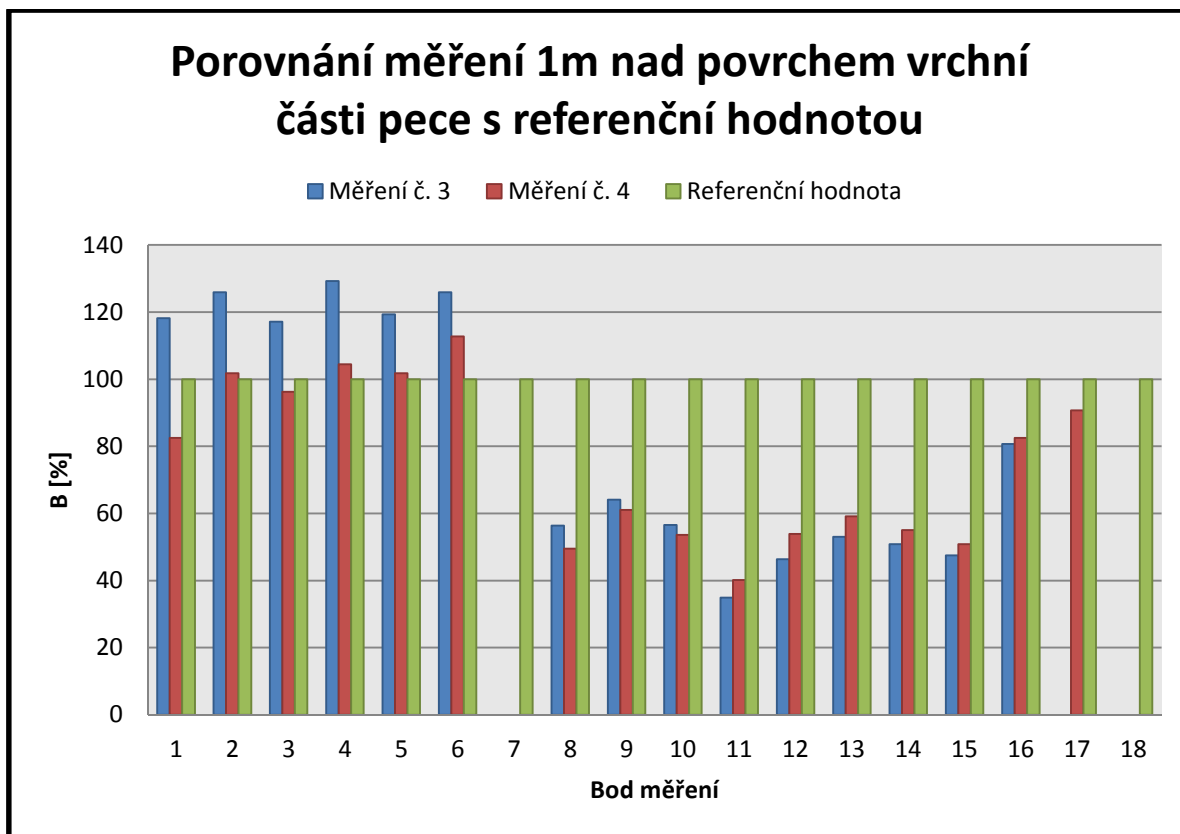
Referenční hodnoty magnetické indukce jsou vypočtené podle vzorce 6.9.1.

Z výsledků měření a porovnání (tabulky 6.9–1 až 6.9–4) s referenčními hodnotami stanovenými podle ICNIRP [12] je patrné, že v povrchových částech pece jsou překročeny limity expozice magnetické indukce. Nejvyšší překročení referenčních hodnot bylo zjištěno na vrchní straně pece, někde i o více jak 1000%. Naopak v přední části pece ve vzdálenosti 1m od povrchu pecní konstrukce překročení limitů nebylo. Pro omezení magnetických toků vně induktoru by bylo vhodné použít svazky transformátorových plechů, které by zvýšily celkovou účinnost pece a ještě by snížily vyzařování magnetické indukce do okolí. Stínění pomocí svazků transformátorových plechů je naznačeno v kapitole 5.

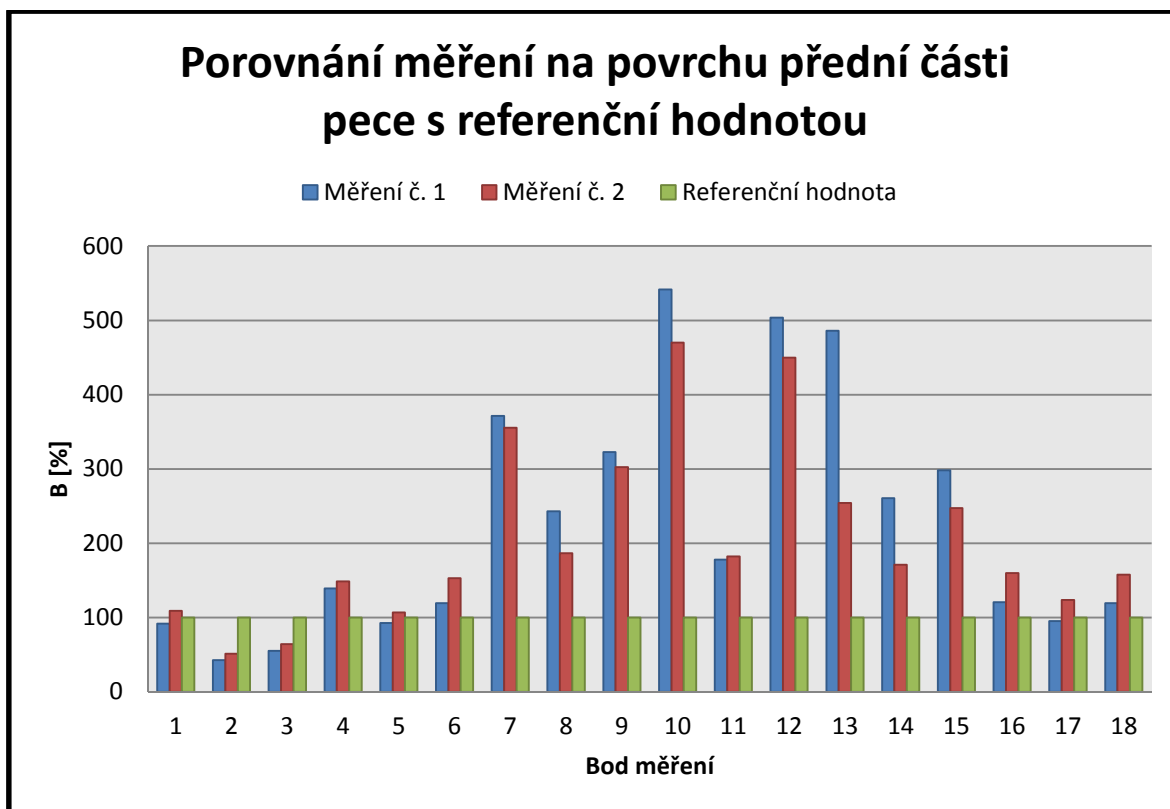
### 6.9.1 Grafické porovnání naměřených hodnot s ICNIRP



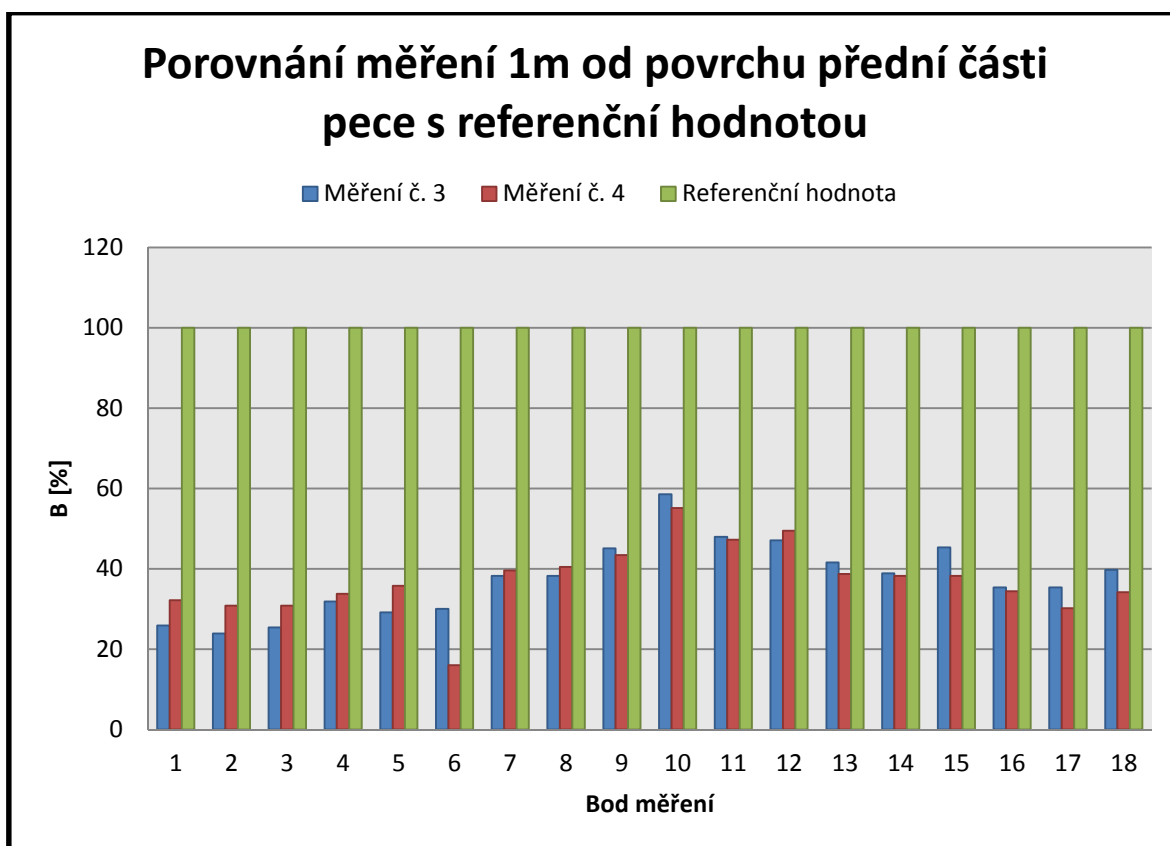
Obrázek 6.9.1 Graf měření na povrchu vrchní části pece



Obrázek 6.9.2 Graf měření 1m nad povrchem vrchní části pece



Obrázek 6.9.3 Graf měření na povrchu přední části pece



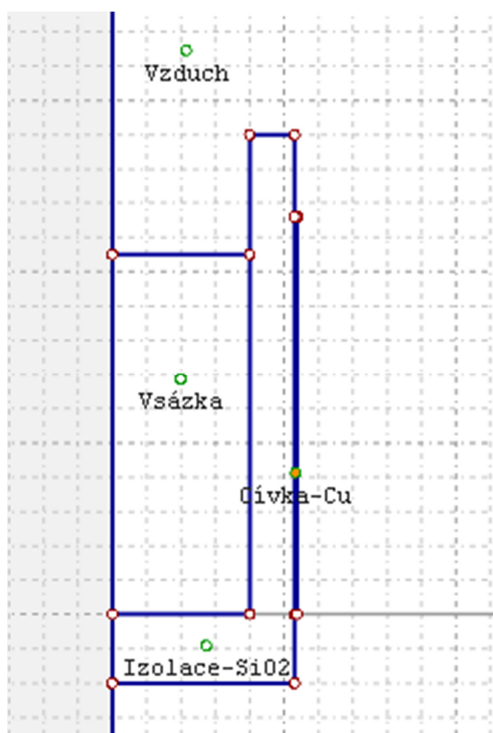
Obrázek 6.9.4 Graf měření 1m od povrchu přední části pece

## 7 Simulace pece

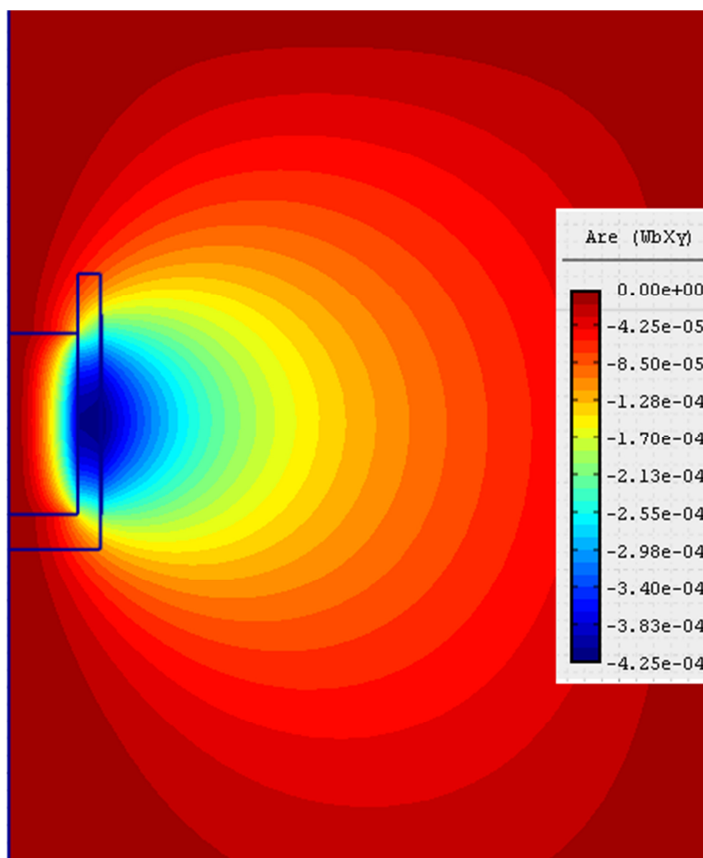
Podle známých a vypočítaných hodnot jsem v programu Agros2D provedl kontrolní simulaci měřené pece.

### 7.1 Simulace bez stínění

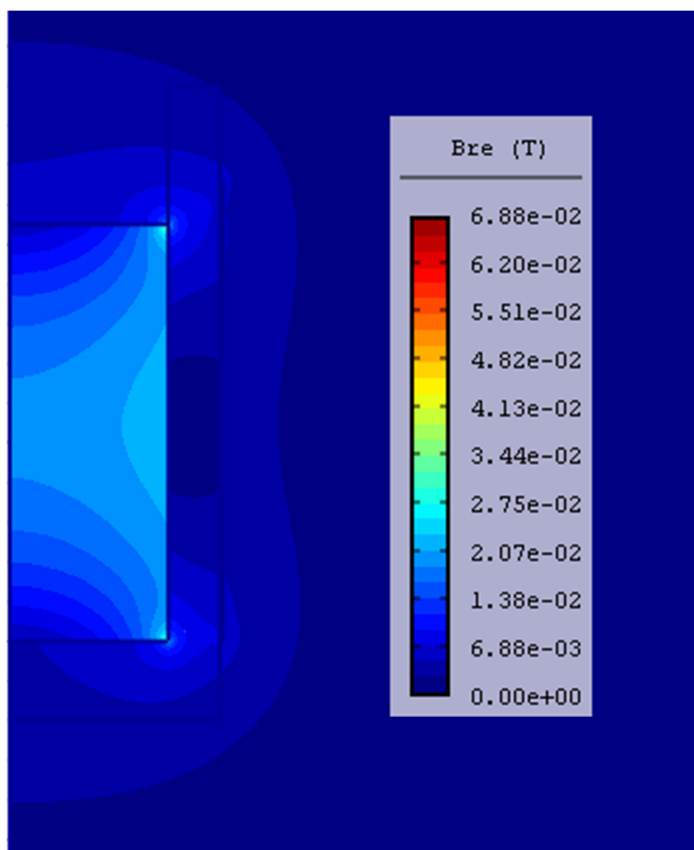
Na následujících obrázcích je nasimulována indukční kelímková pec EGP 500. Simulace je poněkud zjednodušená. V simulaci nejsou zahrnuty okolní konstrukční prvky. Simulace je provedena ve válcových souřadnicích a okolní prvky nejsou vždy válcové, proto je v simulaci zahrnuta pouze vsázka, cívka a kelímek. Permeabilita vsázky volím 7000, izolace, okolní vzduch a cívka má permeabilitu 1. Proudová hustota cívky je vypočítána z procházejícího proudu spočítaného v 5.2.9 a podělena plochou cívky. Rozměry cívky a kelímku jsou vypočítané v kapitole 5.1. Na obrázku 7.1.1 je naznačen náčrt pece.



Obrázek 7.1.1 Náčrt pece v programu Agros2D



Obrázek 7.1.2 Magnetický vektorový potenciál



Obrázek 7.1.3 Magnetická indukce

## 7.2 Simulace se stíněním

Na následujících obrázcích je nasimulovaná indukční kelímková pec EGP 500. K této peci jsem v kapitole 5 navrhl stínění ze svazků transformátorových plechů. Plochu plechů jsem převedl na válcovou plochu.

$$V_{pl} = S_{pl} \cdot l \cdot \text{počet svazků} = 0,06 \cdot 0,045 \cdot 0,7 \cdot 14 = 0,0265 \text{ m}^3 \quad (7.2.1)$$

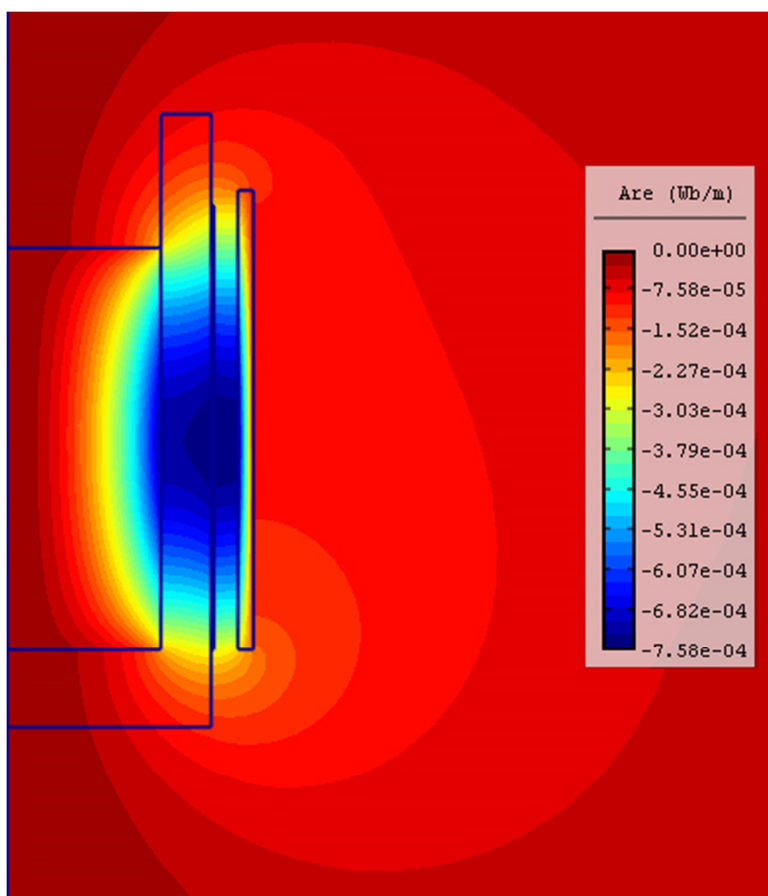
Ze znalosti výpočtu objemu válce lze vypočítat tloušťku stínění.

$$V = \frac{\pi d_3^2}{4} h - \frac{\pi d_2^2}{4} h \rightarrow d_3 \quad (7.2.2)$$

$$d_3 = \sqrt{\frac{4V + \pi d_2^2 h}{\pi h}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0265 + \pi \cdot 0,6^2 \cdot 0,7}{\pi \cdot 0,7}} = 64 \text{ cm} \quad (7.2.3)$$

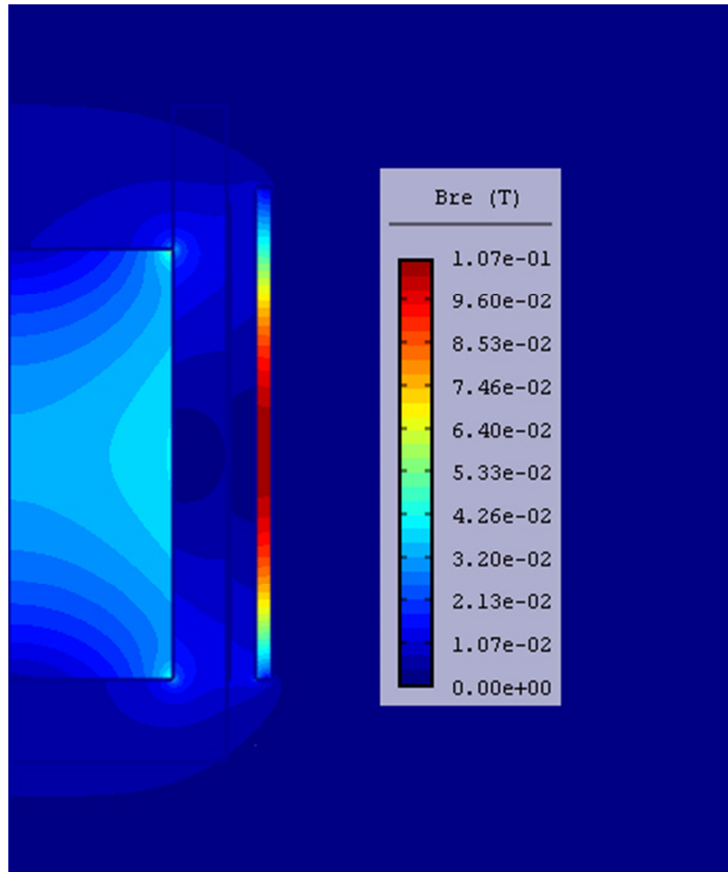
$$x = \frac{d_3 - d_2}{2} = \frac{64 - 60}{2} = 2 \text{ cm} \quad (7.2.3)$$

Parametry pece, cívky a izolace jsou stejné jako v předchozím případě (7.1). Přidané ideální transformátorové plechy mají permeabilitu 30 000.

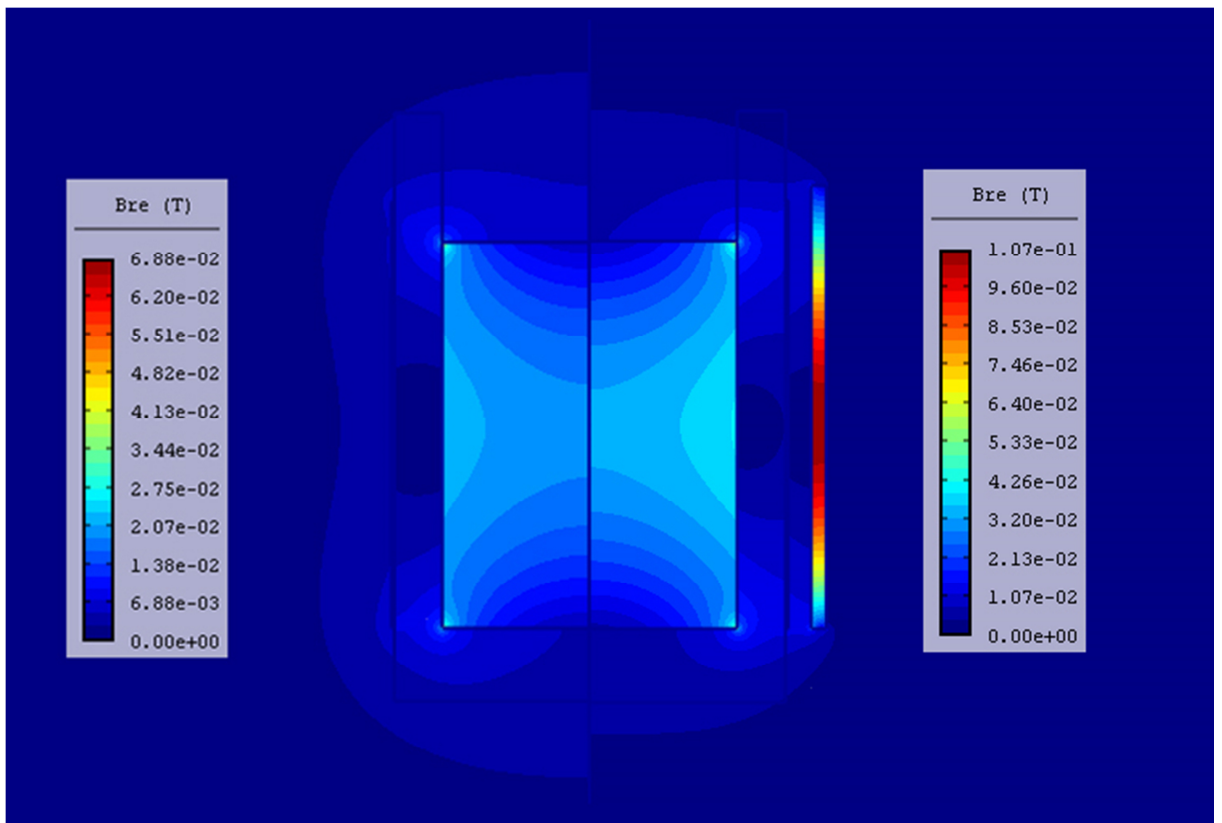


Obrázek 7.2.1 Magnetický vektorový potenciál pece se stíněním





Obrázek 7.2.2 Magnetická indukce pece se stíněním



Obrázek 7.2.3 Porovnání pece bez stínění a pece se stíněním

## 8 Zhodnocení zařízení kritériem 3E

### 8.1 Ekonomika

Z ekonomického pohledu mají indukční zařízení vyšší pořizovací cenu oproti klasickým druhům ohřevů, jako jsou dielektrický, odporový, nebo plynový. Nárůst ceny způsobuje zejména drahý měnič frekvence a materiály používající se k výrobě indukčních pecí. Ačkoliv vyžadují indukční pece vyšší pořizovací náklady, tak návratnost investice do indukční pece se brzo vyplatí. To je způsobeno relativně nižšími provozními náklady a efektivitou ohřevu. Indukční pece ohřívají pouze elektricky vodivou vsázku, kdežto jiné druhy ohřevů jsou založené na ohřevu pomocí tepelného spádu. Při tomto druhu ohřevu vznikají značné tepelné ztráty, které se projeví zvýšením provozních nákladů. Indukční ohřev ohřívá rovnoměrně vsázku a vzniklé tepelné ztráty jsou podstatně menší. Další parametr, který ovlivňuje ekonomickou náročnost ohřevu, je rychlost ohřevu. Indukční ohřev je v porovnání s plynovým nebo odporovým ohřevem rychlejší. S kratší dobou ohřevu se snižují provozní náklady.

Parametr, který má vliv na cenu indukční pece je přítomnost stínění. Stínění omezuje rozptylové magnetické toky vně pece. Je dobré pec vybavit vhodným typem stínění, aby se omezily ztráty, které vznikají naindukovanými proudy do konstrukčních prvků okolo pece. Tyto ztráty snižují účinnost pece, čímž se její provoz prodraží. Existují dva druhy stínění, a to stínění pomocí svazků transformátorových plechů a stínění pomocí vodivého pláště. Jaké výhody přináší použití jednoho či druhého typu stínění, je rozebráno v kapitole 4.

Co se týče měřené pece EGP 500, tak pec nemá stínění ze svazků transformátorových svazků. Pokud by v budoucnu bylo doinstalováno, tak by mohlo přispět k snížení provozních nákladů na chod pece. O něco by se zvýšila účinnost a snížily by se ztráty, které jsou způsobeny naindukovanými proudy v konstrukčních prvcích v okolí pece. Na druhou stranu je na zvážení majitelů pece, zda jsou ochotni investovat finanční prostředky do stínění.

### 8.2 Energetika

Hlavní energetický parametr, pomocí kterého posuzujeme energetickou náročnost indukčních pecí je jejich příkon. V tomto ohledu jsou na tom indukční pece lépe než klasické druhy ohřevů, u kterých je díky větším ztrátám nutný vyšší příkon pece. Vliv ztrát také snižuje účinnost pece.

Pec údajně nemá připojenou kompenzační baterii. Společnost kompenzuje jalový výkon

jako celek, ale díky tomu ve vedení mezi pecí a kompenzačními kondenzátory vznikají proudové rázy. Z tohoto hlediska by bylo vhodné kompenzovat pec přímo u zdroje, aby se tyto nepříznivé účinky omezily.

### **8.3 Ekologie**

Z hlediska posouzení vlivu na životní prostředí, mají indukční pece jen malý vliv na zhoršování znečištění. Na rozdíl od jiných druhů ohřevů, kde je nutné spalovat fosilní paliva, ze kterých se uvolňují znečišťující látky. Při indukčním ohřevu nedochází k žádnému uvolňování nebezpečných chemických sloučenin. Lze tedy říci, že indukční ohřev je šetrnější k životnímu prostředí než palivový ohřev. Z druhé strany naopak indukční ohřev využívá elektrickou energii, která se z převážné části vyrábí právě z fosilních paliv.

Při indukčním ohřevu se uvolňuje jen minimum zplodin. Většina nových pecí je vybavena odsáváním a filtrační stanicí. Stanice zajišťuje, aby se do okolí uvolňovalo jen množství emisí splňující environmentální standardy.

## 9 Závěr

Cílem této práce bylo přiblížit princip a teorii indukčního ohřevu se zaměřením na kelímkovou indukční pec. Indukční kelímkové pece se nejvíce využívají v hutnictví a slévárnách. V pecích se taví elektricky vodivé materiály a nejčastěji se pece využívají k tavení litiny a oceli. Indukční pece jsou hojně využívány zejména díky specifickým vlastnostem ohřevu (3.2).

Hlavním cílem práce bylo provedení měření rozptylového magnetického pole reálné indukční kelímkové pece ECOMELT EGP 500. Změřené hodnoty magnetické indukce v okolí pece byly porovnány s doporučením International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, pro nízkofrekvenční a středofrekvenční zařízení od 1Hz do 100 kHz. Z výsledků vyplývá, že v okolí pece je v některých oblastech překročena referenční hodnota magnetické indukce. V tabulkách 6.9-1 až 6.9-4 je uvedeno porovnání naměřených hodnot magnetické indukce s referenčními hodnotami. K největšímu překročení referenčních hodnot dochází na vrchní straně pece a to i o více jak 1000%. S rostoucí vzdáleností od induktoru, klesá i hodnota magnetické indukce, ale i ve vzdálenosti 1m od povrchu pece bylo v některých místech naměřeno překročení referenčních hodnot. Zvýšená hodnota magnetické indukce zejména na vrchní části pece může nepříznivě působit na obsluhu pece, která se v tomto prostoru pohybuje.

Na základě kontrolních výpočtů uvedených v kapitole 5 jsem navrhl stínění pece, které by mohlo být zhotoveno ze svazků transformátorových plechů. Z výpočtů vyplývá, že svazky transformátorových plechů mírně zvyšují účinnost pece. A dále svazky transformátorových plechů pohlčí magnetické pole směřující vně induktoru pece. Použitím svazků by se snížila hodnota magnetické indukce v okolí pece. Model, jak by mohla být tato situace zrealizována je uveden ve výpočtech v kapitole 5. V kapitole 7 je uvedena simulace pece bez stínění a pece se stíněním. Ze simulací je prokazatelně vidět, že použití transformátorových plechů zvýší efektivitu ohřevu vsázky a zamezí pronikání magnetického pole do okolí pece.

Závěrem této práce je tedy doporučení instalovat k peci svazky transformátorových svazků. Svazky transformátorových plechů by omezily rozptylové magnetické toky vně pece a byly by tak splněny limity a mezinárodní standardy stanovující maximální expozici magnetického pole.

## 10 Použitá literatura

- [1] LANGER, Emil. *Elektrotepelná technika*. 2. vyd. Plzeň: VŠSE, 1974.
- [2] RADA, Josef. A KOLEKTIV. *Elektrotepelná technika*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství SNTL/ALFA, 1985.
- [3] BAXANT, Petr, Jiří DRÁPELA a Ilona LÁZNIČKOVÁ. *Elektrotepelná technika*. Brno, 2006. Dostupné z: <[http://www.umel.feec.vutbr.cz/VIT/images/pdf/studijni\\_materialy/ing/Elektrotepelná\\_technika\\_S.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/VIT/images/pdf/studijni_materialy/ing/Elektrotepelná_technika_S.pdf)>
- [4] MÜHLBAUER, A. *History of induction heating and melting*. Essen: Vulkan, 2008, 202 p. ISBN 38-027-2946-3. Dostupné z: <[http://www.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=vHn1ge59cZsC&oi=fnd&pg=PR5&dq=induction+heating+history&ots=DNVwniD\\_jz&sig=TCTEeGB7p3TaWHjGUZjDtIJU hEw&redir\\_esc=y](http://www.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=vHn1ge59cZsC&oi=fnd&pg=PR5&dq=induction+heating+history&ots=DNVwniD_jz&sig=TCTEeGB7p3TaWHjGUZjDtIJU hEw&redir_esc=y)>
- [5] ZINN, S a S. L. SEMIATIN. *Elements of Induction Heating: Design, Control, and Applications*. USA: Carnes Publication Services, 2002. Dostupné z: <[http://www.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=zXmTLYwO3McC&oi=fnd&pg=PA1&dq=induction+heating+history&ots=zdAGTMv1Br&sig=TKN5Wyh\\_qNMdOsGJU2f oCXgn3Is&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](http://www.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=zXmTLYwO3McC&oi=fnd&pg=PA1&dq=induction+heating+history&ots=zdAGTMv1Br&sig=TKN5Wyh_qNMdOsGJU2f oCXgn3Is&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)>
- [6] HRADÍLEK, Zdeněk. A KOLEKTIV. *Elektrotepelná zařízení*. 1. vyd. Praha: IN-EL, 1997. ISBN 80-902333-2-5.
- [7] LANGER, Emil. *Teorie indukčního a dielektrického tepla*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1964.
- [8] KOŽENÝ, Jiří. *Přednášky z předmětu ZETP*. 2012.
- [9] LANGER, Emil a Jiří KOŽENÝ. *Elektrotepelná zařízení indukční: Základy teorie, výpočty a konstrukce*. 1. vyd. Plzeň: VŠSE, 1982.
- [10] BEJČEK, Ludvík, Miroslav ČEJKA a Jiří REZ. *Měření v elektrotechnice*. Brno, Dostupné z: <[http://vkafa.wz.cz/eltech/Mereni\\_v\\_elektrotechnice.pdf](http://vkafa.wz.cz/eltech/Mereni_v_elektrotechnice.pdf)>
- [11] NARDA. *ETL 400 Manual*. Germany, 2004. Dostupné z: <[http://www.narda-sts.us/pdf\\_files/OperatingManuals/ELT400\\_ExpLevTester.pdf](http://www.narda-sts.us/pdf_files/OperatingManuals/ELT400_ExpLevTester.pdf)>
- [12] *ICNIRP GUIDELINES: FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS (1HZ-100kHz)*. ICNIRP PUBLICATION, 2010. Dostupné z: <<http://www.icnirp.de/documents/LFgdl.pdf>>

- [13] *Extremely Low Frequency Fields: Environmental Health Criteria Monograph No.238*. WHO, 2007, xiii, 1326 p. ISBN 978-92-4-157238-5. Dostupné z: <[http://www.who.int/peh-emf/publications/Compleet\\_DEC\\_2007.pdf](http://www.who.int/peh-emf/publications/Compleet_DEC_2007.pdf)>
- [14] *Corrigendum to Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council*. EU, 2004. Dostupné z: <<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:184:0001:0009:EN:PDF>>
- [15] KOŽENÝ, Jiří, A MÜHLBAUER a B NACKE. Příspěvek k výpočtům indukčních kelímkových pecí z hlediska praktických zkušeností. *Elektrotechnický obzor*. 1987, roč. 76, č. 7, s. 5.

## 11 Seznam příloh

PŘÍLOHA I.	TABULKA HODNOT NAGAOKOVÝCH SOUČINITELŮ .....	81
PŘÍLOHA II.	TABULKA HODNOT SOUČiniteLE F .....	82
PŘÍLOHA III.	TECHNICKÉ PARAMETRY NARDA ETL – 400 .....	83
PŘÍLOHA IV.	NÁKRES PECE EGP 500 .....	84
PŘÍLOHA V.	TECHNICKÝ VÝKRES VRCHNÍ ČÁSTI PECE EGP 500.....	84
PŘÍLOHA VI.	SCHÉMA CELÉ PECE.....	85
PŘÍLOHA VII.	INDUKTOR MĚŘENÉ PECE.....	86
PŘÍLOHA VIII.	MĚŘENÁ PEC NAPLNĚNÁ ROZTAVENOU VSÁZKOU .....	86
PŘÍLOHA IX.	ODLÉVÁNÍ ROZTAVENÉ VSÁZKY .....	87

## Příloha I. Tabulka hodnot Nagaokových součinitelů

$\frac{d}{f}$	$\alpha$	$\frac{d}{f}$	$\alpha$	$\frac{d}{f}$	$\alpha$
0,00	1,000000	0,54	0,806046	1,20	0,6475
0,02	0,991562	0,56	0,800125	1,25	0,6381
0,04	0,983223	0,58	0,794285	1,30	0,6290
0,06	0,974985	0,60	0,788525	1,35	0,6201
0,08	0,966846	0,62	0,782843	1,40	0,6115
0,10	0,958807	0,64	0,777240	1,45	0,6031
0,12	0,950867	0,66	0,771713	1,50	0,5950
0,14	0,943026	0,68	0,766262	1,55	0,5871
0,16	0,935284	0,70	0,760885	1,60	0,5795
0,18	0,927639	0,72	0,755582	1,65	0,5721
0,20	0,920093	0,74	0,750350	1,70	0,5649
0,22	0,912643	0,76	0,745190	1,75	0,5579
0,24	0,905290	0,78	0,740100	1,80	0,5511
0,26	0,898033	0,80	0,735079	1,85	0,5444
0,28	0,890871	0,82	0,730126	1,90	0,5379
0,30	0,883803	0,84	0,725239	1,95	0,5316
0,32	0,876829	0,86	0,720418	2,00	0,5255
0,34	0,869948	0,88	0,715662	2,10	0,5137
0,36	0,863159	0,90	0,710969	2,20	0,5025
0,38	0,856461	0,92	0,706339	2,30	0,4918
0,40	0,849853	0,94	0,701770	2,40	0,4816
0,42	0,843335	0,96	0,697262	2,50	0,4719
0,44	0,836905	0,98	0,692813	3,00	0,4292
0,46	0,830563	1,00	0,688423	3,50	0,3944
0,48	0,824307	1,05	0,6777	4,00	0,3654
0,50	0,818136	1,10	0,6673	5,00	0,3198
0,52	0,812049	1,15	0,6573	10,00	0,2033



## Příloha II. Tabulka hodnot součinitele F

$\frac{d_c}{l_1}$	$\frac{d_v}{l_2}$	$l_1/l_2$								
		0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
0,1	0,08	1,22007	1,09103	0,98551	0,89803	0,82451	0,70810	0,62027	0,55172	0,49677
	0,10	1,22022	1,09112	0,98557	0,89807	0,82454	0,70812	0,62028	0,55172	0,49677
	0,12	1,22041	1,09123	0,98564	0,89811	0,82457	0,70813	0,62028	0,55173	0,49677
0,2	0,16	1,14452	1,03935	0,94757	0,86862	0,80074	0,69110	0,60707	0,54091	0,48759
	0,18	1,14553	1,03994	0,94793	0,86886	0,80090	0,69119	0,60712	0,54094	0,48763
	0,20	1,14666	1,04060	0,94834	0,86913	0,80108	0,69128	0,60717	0,54098	0,48763
	0,22	1,14790	1,04132	0,94879	0,86942	0,80128	0,69138	0,60723	0,54101	0,48765
	0,24	1,14926	1,04211	0,94928	0,86974	0,80150	0,69150	0,60730	0,54105	0,48769
0,3	0,26	1,05756	0,97680	0,89964	0,83013	0,76872	0,66720	0,58797	0,52496	0,47387
	0,28	1,06040	0,97846	0,90068	0,83081	0,76918	0,66744	0,58811	0,52505	0,47393
	0,30	1,06343	0,98023	0,90179	0,83154	0,76969	0,66770	0,58826	0,52515	0,47399
	0,32	1,06665	0,98212	0,90296	0,83232	0,77022	0,66798	0,58843	0,52525	0,47406
	0,34	1,07006	0,98411	0,90421	0,83314	0,77078	0,66828	0,58860	0,52536	0,47413
0,4	0,32	0,97837	0,91585	0,85042	0,78896	0,73335	0,63959	0,56527	0,50565	0,45702
	0,36	0,98763	0,92131	0,85386	0,79124	0,73493	0,64043	0,56577	0,50596	0,45723
	0,40	0,99786	0,92735	0,85766	0,79377	0,73668	0,64136	0,56632	0,50631	0,45747
	0,44	1,00901	0,93394	0,86182	0,79653	0,73860	0,64238	0,56692	0,50670	0,45773
	0,48	1,02105	0,94105	0,86631	0,79952	0,74067	0,64349	0,56758	0,50712	0,45801
0,5	0,40	0,92510	0,86862	0,80854	0,75158	0,69971	0,61167	0,54146	0,48489	0,43863
	0,45	0,94053	0,87783	0,81442	0,75552	0,70247	0,61317	0,54236	0,48548	0,43902
	0,50	0,95747	0,88797	0,82088	0,75987	0,70552	0,61482	0,54335	0,48612	0,43946
	0,55	0,97581	0,89896	0,82791	0,76460	0,70884	0,61663	0,54444	0,48683	0,43995
	0,60	0,99546	0,91075	0,83546	0,76969	0,71242	0,61859	0,54562	0,48759	0,44047
0,6	0,45	0,88143	0,82671	0,76961	0,71574	0,66674	0,58352	0,51702	0,46334	0,41936
	0,50	0,89782	0,83667	0,77605	0,72013	0,67052	0,58524	0,51808	0,46404	0,41984
	0,55	0,91561	0,84748	0,78306	0,72492	0,67088	0,58714	0,51924	0,46480	0,42037
	0,60	0,93469	0,85911	0,79061	0,73007	0,67124	0,58919	0,52049	0,46562	0,42095
	0,65	0,95497	0,87149	0,79866	0,73558	0,67162	0,59138	0,52184	0,46651	0,42156
0,7	0,70	0,97631	0,88455	0,80718	0,74142	0,67209	0,59382	0,52328	0,46747	0,42223
	0,55	0,86387	0,80125	0,74459	0,68743	0,63913	0,55825	0,49422	0,44273	0,40064
	0,60	0,88091	0,81183	0,74857	0,69228	0,64263	0,56025	0,49546	0,44357	0,40122
	0,65	0,89907	0,82313	0,75605	0,69747	0,64638	0,56239	0,49681	0,44446	0,40185
	0,70	0,91825	0,83509	0,76398	0,70299	0,65038	0,56469	0,49824	0,44543	0,40253
0,8	0,75	0,93835	0,84766	0,77234	0,70862	0,65460	0,56712	0,49977	0,44645	0,40325
	0,80	0,95926	0,86078	0,78108	0,71494	0,65905	0,56968	0,50139	0,44754	0,40402
	0,55	0,84910	0,77889	0,71641	0,66158	0,61360	0,53445	0,47245	0,42288	0,38247
	0,70	0,86542	0,78930	0,72345	0,66657	0,61726	0,53660	0,47383	0,42381	0,38313
	0,75	0,88261	0,80030	0,73090	0,67185	0,62115	0,53889	0,47529	0,42480	0,38384
0,9	0,80	0,90059	0,81183	0,73874	0,67742	0,62525	0,54131	0,47684	0,42586	0,38459
	0,85	0,91927	0,82385	0,74693	0,68326	0,62956	0,54386	0,47847	0,42697	0,38538
	0,90	0,93857	0,83632	0,75545	0,68934	0,63406	0,54653	0,48019	0,42815	0,38622
	0,70	0,81812	0,74756	0,68600	0,63257	0,58611	0,50990	0,45045	0,40302	0,36441
	0,75	0,83237	0,75690	0,69247	0,63724	0,58959	0,51199	0,45181	0,40395	0,36508
1,0	0,80	0,84735	0,76675	0,69930	0,64217	0,59328	0,51422	0,45325	0,40495	0,36579
	0,85	0,86302	0,77709	0,70648	0,64738	0,59717	0,51657	0,45479	0,40600	0,36655
	0,90	0,87934	0,78787	0,71400	0,65283	0,60126	0,51904	0,45640	0,40712	0,36735
	0,95	0,89623	0,79908	0,72183	0,65952	0,60554	0,52163	0,45809	0,40829	0,36819
	1,00	0,91365	0,81068	0,72995	0,66444	0,60999	0,52434	0,45987	0,40951	0,36908
	1,05	0,93153	0,82264	0,73836	0,67058	0,61461	0,52718	0,46172	0,41079	0,37000
	0,80	0,79991	0,72584	0,66305	0,60947	0,56342	0,48868	0,43090	0,38506	0,34787
0,85	0,81289	0,73462	0,66927	0,61405	0,56689	0,49081	0,43231	0,38603	0,34857	
0,90	0,82649	0,74384	0,67581	0,61887	0,57054	0,49306	0,43380	0,38707	0,34932	
0,95	0,84070	0,75349	0,68267	0,62393	0,57439	0,49544	0,43536	0,38816	0,35011	
1,00	0,85548	0,76355	0,68984	0,62922	0,57841	0,49792	0,43701	0,38930	0,35094	
1,05	0,87080	0,77401	0,69731	0,63475	0,58261	0,50052	0,43873	0,39050	0,35181	
1,10	0,88663	0,78484	0,70506	0,64049	0,58699	0,50324	0,44053	0,39176	0,35272	
1,15	0,90293	0,79604	0,71309	0,64645	0,59153	0,50606	0,44241	0,39307	0,35367	

## Příloha III. Technické parametry NARDA ETL – 400

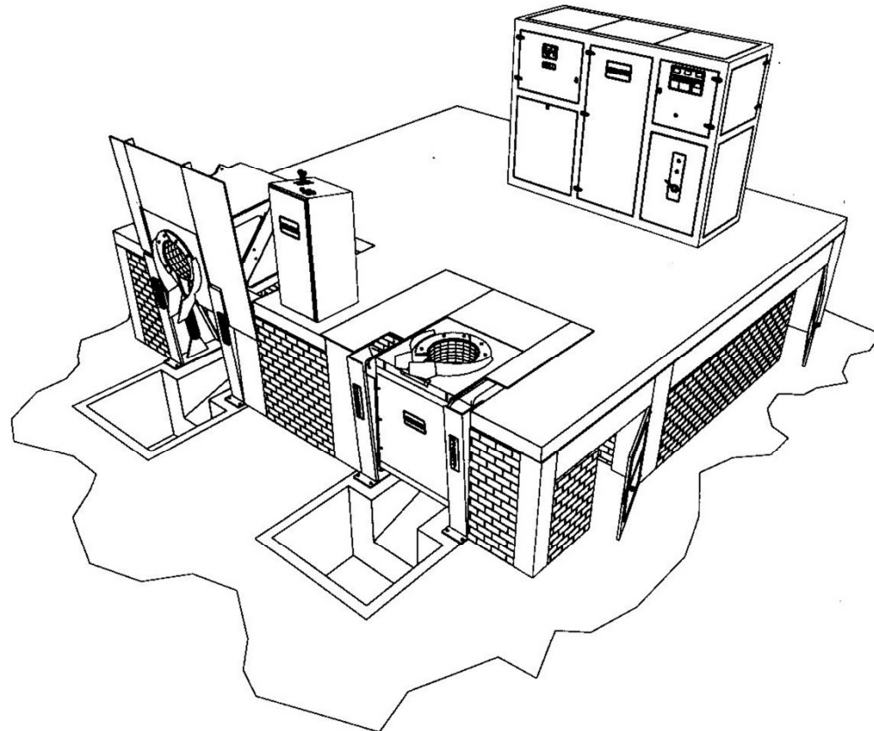


## Electric and Magnetic Field Measurement

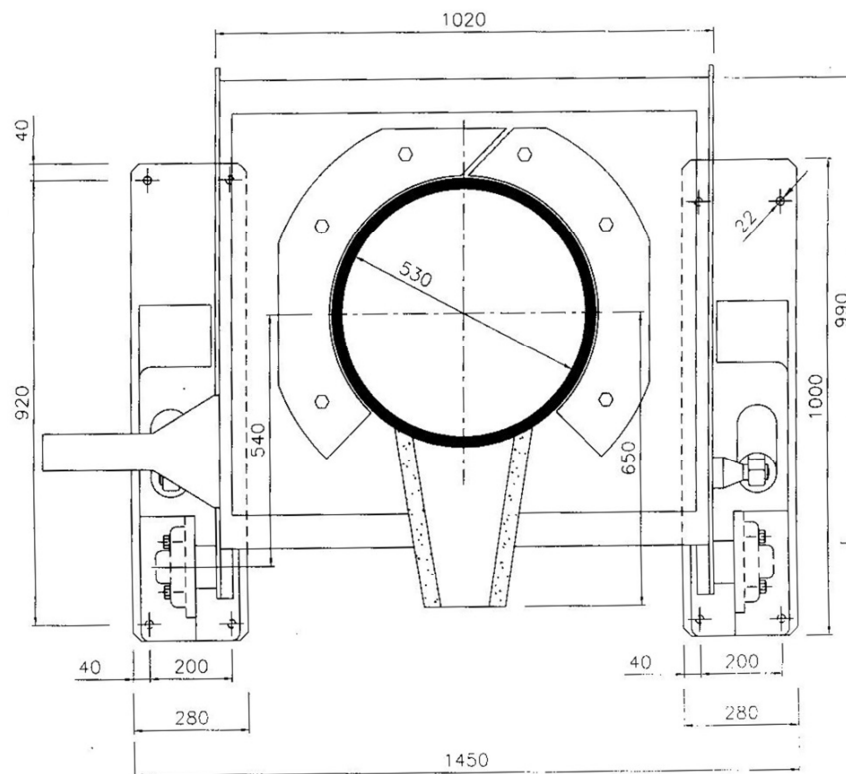
## ELT-400 Exposure Level Tester

Specifications<sup>a</sup>

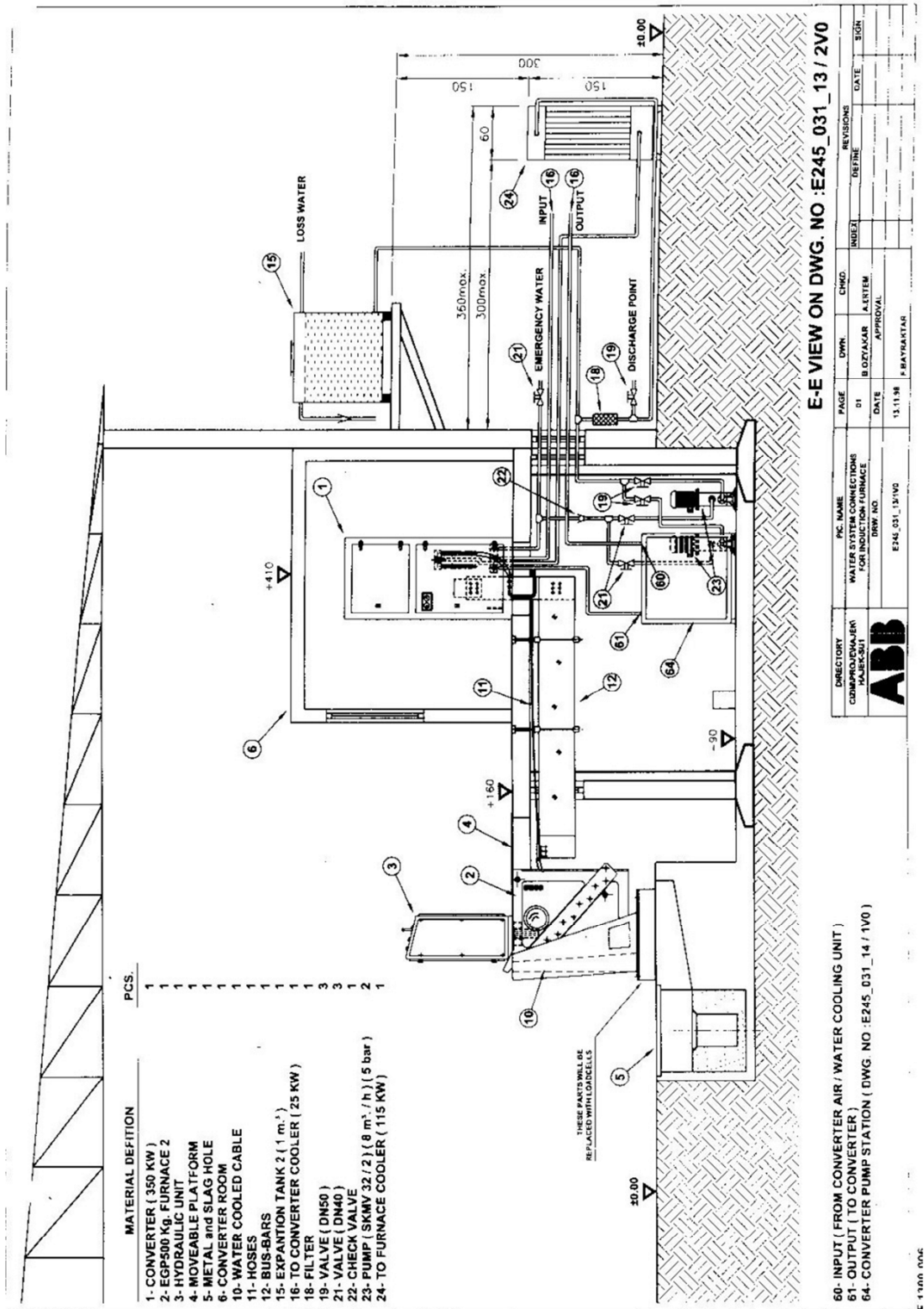
ELT - 400 with 100 cm <sup>2</sup> Probe						
Frequency Range (-3 dB), selectable	1 Hz to 400 kHz, 10 Hz to 400 kHz, 30 Hz to 400 kHz					
Antenna Type	Magnetic (B) Field					
Sensor Type	Isotropic Coil 100 cm <sup>2</sup>					
Damage Level RMS	160 mT The damage level reduces linearly with increasing frequency above 77.5 Hz (1/f)					
Damage Level Peak	226 mT The damage level reduces linearly with increasing frequency above 620 Hz (1/f) The damage level (peak) applies for pulse duration ≤15.6 ms and duty cycle ≤1/64					
Measurement Uncertainty <sup>d</sup>	±4% (50 Hz to 120 kHz)					
Mounting Thread	1/4-20UNC-2B (standard thread)					
EXPOSURE STD MODE						
Exposure Evaluation	Comparison with Standard (see Ordering Information)					
MODE <sup>b</sup>	ICNIRP		BGV B11		EN 50366	
RANGE	LOW	HIGH	LOW	HIGH	LOW	HIGH
Overload Limit	160%	1600%	160%	1600%	160%	1600%
Noise Level <sup>c</sup> , typical	1%	5%	0.4%	2%	0.4%	2%
Resolution (Range: Low)	0.001%					
Detection, selectable	Automatic according to Selected Standard or RMS (averaging time 1 s) or Peak Value					
Display Mode, selectable	Instantaneous or Max Hold					
FIELD STRENGTH MODE						
Frequency Response	Flat					
MODE <sup>b</sup>	320 μT		8 mT		80 mT	
RANGE	LOW	HIGH	LOW	HIGH	LOW	HIGH
Overload Limit	32 μT	320 μT	800 μT	8 mT	8 mT	80 mT
Noise Level, typical <sup>e</sup>	60 nT	320 nT	1 μT	8 μT	10 μT	80 μT
Resolution (RANGE: LOW)	1 nT					
Detection, selectable	RMS (averaging time 1 s) or Peak Value					
Display Mode, selectable	Instantaneous or Max Hold					
OUTPUT						
Analog Scope Output	Three Channel (X-Y-Z)					
Analog Output Level	The open-circuit analog output voltage is 800 mV when the field strength value corresponds to the overload limit (sensitivity = 800 mV / overload limit) (ELT-400 output impedance = 50 Ω, load impedance ≥ 10 kΩ)					
Interface (Remote Control and Readout)	RS-232 (19200 baud, 8n1, XON/XOFF), 3-Wire, 2.5 mm Stereo Jack					
GENERAL SPECIFICATIONS						
Operating Temperature Range	-10°C to +50°C					
Operating Humidity Range	<95% (30°C) or <29 g/m <sup>3</sup> , non-condensing					
Weight, Typical	2 lbs. (910 g) with probe					
Dimensions, Typical	7.1 x 3.9 x 2.2 inches (180 x 100 x 55 mm) without probe / probe 11.8 x 4.9 Ø inches (300 x 125 Ø mm)					
Display Type	LCD with Backlight; refresh rate 4 times per second					
Battery	NiMH Batteries (4 x Mignon, AA), exchangeable					
Operating Life, Typical	12 hours					
Charger Unit	100 to 240 V AC / 47 to 63 Hz, fits all AC line connectors					
Charging Time, Typical	2 hours					
Calibration Interval, recommended	24 Months					

**Příloha IV. Náskres pece EGP 500**

Společnost, u které bylo provedeno měření, vlastní pouze jednu indukční pec. Levá pec na obrázku ve společnosti chybí. Jinak je náskres pece shodný s realitou.

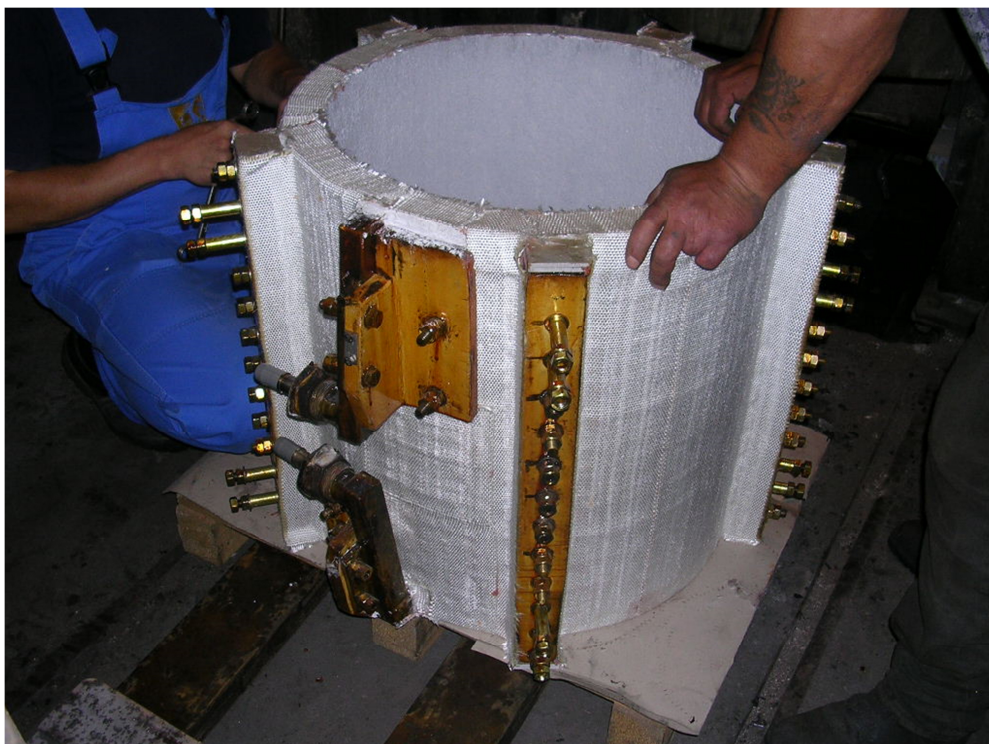
**Příloha V. Technický výkres vrchní části pece EGP 500**

Příloha VI. Schéma celé pece





**Příloha VII. Induktor měřené pece**



**Příloha VIII. Měřená pec naplněná roztavenou vsázkou**



## Příloha IX. Odlévání roztavené vsázky

