

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Rozptylová magnetická pole při ohřevech
elektromagnetickou indukcí**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Jan MARIŇÁK
Osobní číslo: E13B0052P
Studijní program: B2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Elektrotechnika a energetika
Název tématu: Rozptylová magnetická pole při ohřevech elektromagnetickou indukcí
Zadávací katedra: Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Zásady pro vypracování:

1. Popište stručně teorii ohřevů elektromagnetickou indukcí.
2. Objasněte původ rozptylových polí a jejich vliv na účinnost ohřevů.
3. Uveďte možnosti k omezení jejich vlivů na proces ohřevu, zejména se zaměřením na proces tavení v indukčních kelímkových pecích.
4. Proveďte měření a vyhodnocení rozptylového pole u indukčního vaříče.
5. Uveďte závěry pro praxi.

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

1. Literaturu určí vedoucí práce při předběžném kontaktu.

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

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2015
Termín odevzdání bakalářské práce: 2. června 2016


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na teorii ohřevu elektromagnetickou indukcí, obsahu také teoretický popis vzniku magnetických polí. Další část práce se zabývá indukčními kelímkovými peci, vznikem rozptylového magnetického toku a možnostmi jeho potlačení. V měřicím pokusu se sleduje indukční vaříč a měří se magnetické pole v jeho okolí, když je vaříč v provozu. Na závěr je zmínka o využití rozptylového toku v praxi.

Klíčová slova

Elektromagnetická indukce, kelímkové indukční pece, rozptylový magnetický tok, stínění, indukční ohřev, indukční vaříč

Abstract

The presented thesis is focused on the theory of electromagnetic induction heating, the contents also the theoretical description of the creation of magnetic fields. Another part of the work deals with inductive crucible furnace, the emergence of the dispersion of the magnetic flux and its suppression. In the measuring experiment follows the induction stove and measure the magnetic field in the vicinity when the stove is in operation. At the conclusion of the mention of the use of the lens of the flow in the practice.

Key words

Electromagnetic induction, inductive crucible furnace, dispersion of the magnetic flux, shading, induction heating, inductive cook

Prohlášení

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

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 27.5.2016

Jan Mariňák

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc. za cenné profesionální rady, za prohlédnutí celé práce a následné připomínky k její úpravě

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOŮ	9
ÚVOD	11
1 OHŘEVY ELEKTROMAGNETICKOU INDUKČÍ	12
1.1 TEORETICKÉ ZÁKLADY VZNIKU TEPLA ELEKTROMAGNETICKOU INDUKČÍ	12
1.2 TEORIE OHŘEVU ELEKTROMAGNETICKOU INDUKČÍ	13
1.2.1 <i>Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru</i>	13
1.2.2 <i>Vyjádření obecných vlnových rovnic</i>	14
1.2.3 <i>Elektromagnetické vlnění válcového charakteru</i>	16
2 INDUKČNÍ KELÍMKOVÉ PECE	21
2.1 OMEZENÍ VLIVU ROZPTYLOVÝCH POLÍ U INDUKČNÍCH KELÍMKOVÝCH PECÍ	22
2.1.1 <i>Stínění elektricky vodivým pláštěm</i>	22
2.1.2 <i>Stínění pomocí transformátorových plechů</i>	26
2.1.3 <i>Porovnání obou možností stínění</i>	27
3 MĚŘENÍ ROZPTYLOVÉHO POLE U INDUKČNÍHO VAŘIČE	28
3.1 PRINCIP INDUKČNÍHO VAŘIČE	28
3.2 POSTUP MĚŘENÍ	29
3.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ NA INDUKČNÍM VAŘIČI	29
4 MOŽNOSTI VYUŽÍVÁNÍ ROZPTYLOVÝCH POLÍ V PRAXI	33
4.1 MAGNETICKÁ PRÁŠKOVÁ METODA	33
4.2 METODA STEJNOSMĚRNÝCH ROZPTYLOVÝCH TOKŮ	35
4.3 METODA STŘÍDAVÝCH ROZPTYLOVÝCH TOKŮ	36
5 ZÁVĚR	38
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	39

Seznam symbolů

B (T)	magnetická indukce
H ($A \cdot m^{-1}$)	intenzita magnetického pole
E ($V \cdot m^{-1}$)	intenzita elektrického pole
J ($A \cdot m^{-2}$)	proudová hustota
Φ, Ψ (Wb)	magnetický indukční tok
η (–)	účinnost
U (V)	napětí
I (A)	proud
R (Ω)	činný odpor
P (W)	výkon
L (H)	vlastní indukčnost
M (H)	vzájemná indukčnost
N (–)	počet závitů
ρ ($C \cdot m^{-3}$)	hustota náboje
γ ($S \cdot m^{-1}$)	měrná elektrická vodivost
μ_0 ($H \cdot m^{-1}$)	permeabilita vakua
ϵ_0 ($F \cdot m^{-1}$)	permitivita vakua
μ_R (–)	relativní permeabilita
ϵ_R (–)	relativní permitivita

f (Hz)	frekvence
ω (s^{-1})	úhlová frekvence
a (m)	hloubka vniku
S (m^2)	plocha
d (m)	průměr
l (m)	délka
ρ ($kg \cdot m^{-3}$)	měrná hustota

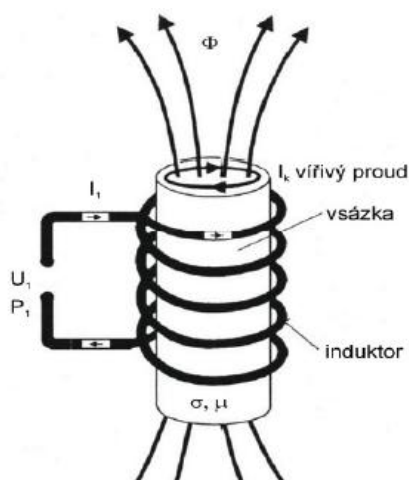
Úvod

Předkládaná bakalářská práce se zabývá teorií rozptylových magnetických polí při ohřevech elektromagnetickou indukcí. V úvodní kapitole je popsán vznik tepla elektromagnetickou indukcí. Teorie ohřevu je dále popsána vlnovou rovnicí, která je odvozena pomocí Maxwellových rovnic. V další části práce je popsána indukční kelímková pec a řeší se problém potlačení rozptylových magnetických toků pomocí různých druhů stínění. Využití rozptylové toku v praxi je popsáno v poslední kapitole. Součástí práce je také měření na indukčním vařiči a měření magnetického pole v jeho okolí.

1 Ohřevy elektromagnetickou indukcí

1.1 Teoretické základy vzniku tepla elektromagnetickou indukcí

Ohřev elektromagnetickou indukcí je možné realizovat pouze u materiálů, které jsou elektricky vodivé. Při vložení vodivého předmětu do střídavého magnetického pole vznikají vířivé proudy, které se indukují do vodivého předmětu. Vlivem těchto vířivých proudů dochází k zahřívání předmětu. Ohřev elektromagnetickou indukcí můžeme zjednodušeně přirovnat k transformátoru, kde je vinutí na výstupu představováno vsázkou a je zde spojeno nakrátko. Důležitost střídavého magnetického pole také spočívá v tom, že pomocí pole je dopravováno do vsázky teplo a ve vsázce dojde k velkému zvýšení teploty. Zvýšením teploty se vsázka stane nejteplejší částí v celé soustavě a další části soustavy mohou být studené. V tom, že dochází ke vzniku tepla přímo ve vsázce, aniž by byla vsázka mechanicky s něčím vázána, můžeme najít jednu z největších výhod indukčního ohřevu.



Obr.č.1: Vznik tepla v indukčních zařízeních [10]

Ohřev elektromagnetickou indukcí si můžeme vysvětlit tak, že se vlastně jedná o přeměnu elektromagnetického vlnění na energii tepelnou. Při dopadu elektromagnetického vlnění na předmět z vodivého materiálu dojde k částečnému odrazu vlnění a část vlnění projde do vodivého materiálu. Průchodem vlnění do vodivého materiálu dochází k vybuzení vířivých proudů.

V materiálu jsou obsaženy volné elektrony, u kterých dojde v důsledku vzniku vířivých proudů ke zvýšení kinetické energie. U těchto volných elektronů dochází ke srážkám s dalšími částicemi a elektrony začnou těmto částicím předávat svoji kinetickou energii. Vlivem předání kinetické energie se částice více rozkmitají a díky tomu dojde k růstu termodynamické teploty daného vodivého materiálu. U elektromagnetického vlnění dochází k utlumení v elektricky vodivém prostředí a energie se nemění jen na energii tepelnou, ale i na mechanickou energii. Díky tomu, že u ohřevů elektromagnetickou indukcí se uvažují periodické děje, tak se mechanická energie dále mění na tepelnou energii. Tento jev můžeme považovat za výhodu ohřevů elektromagnetickou indukcí, protože teplo vznikne přímo v daném materiálu, díky čemu se následně docílí menších tepelných ztrát a dosáhne se vyšší rychlosti ohřevu v porovnání s např. odporovým nepřímým ohřevem. [11]

1.2 Teorie ohřevu elektromagnetickou indukcí

Teorie ohřevu elektromagnetickou indukcí má základ v elektrodynamice, která vyplývá z Maxwellových rovnic. Těmito rovnicemi je dán vlnový charakter elektromagnetického pole.

Pomocí obecných vlnových rovnic můžeme popsat elektromagnetické pole u indukčních ohřevů. Nejprve se vlnové rovnice odvodí z Maxwellových rovnic v diferenciálním tvaru. Vlnové rovnice získáme rotací a vektorovým počtem aplikovaným na 1. a 2. Maxwellovu rovnici.

1.2.1 Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru

Maxwellovy rovnice vyjádřené pomocí vektoru intenzity elektrického pole E [V/m], vektoru intenzity magnetického pole H [A/m], permitivity ε a permeability μ :

$$1. \operatorname{rot} H = \gamma E + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1)$$

$$2. \operatorname{rot} E = -\mu_0 \mu_r \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2)$$

$$3. \operatorname{div} \varepsilon_0 \varepsilon_r E = \rho \quad (3)$$

$$4. \operatorname{div} \mu_0 \mu_r H = 0 \quad (4)$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ [H/m]}$$

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ [F/m] [10]}$$

1.2.2 Vyjádření obecných vlnových rovnic

Magnetickou složku vyjádříme pomocí rovnice:

$$\nabla^2 \vec{H} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (5)$$

Elektrickou složku vyjádříme pomocí rovnice:

$$\nabla^2 \vec{E} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \operatorname{grad} \frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \quad (6)$$

Dále nebudeme uvažovat volné náboje ρ , tudíž budeme předpokládat, že $\rho = 0$. Tím získáme tvar rovnice:

$$\nabla^2 \vec{E} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (7)$$

Následně uvažujeme dvě různá prostředí. V elektricky vodivém prostředí zanedbáme ε :

$$\nabla^2 \vec{H} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (8)$$

$$\nabla^2 \vec{E} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (9)$$

V elektricky nevodivém prostředí zanedbáme γ :

$$\nabla^2 \vec{H} = \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (10)$$

$$\nabla^2 \vec{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (11)$$

Rovnice pro magnetickou a elektrickou složku aplikujeme na fázory vyjádřením časových derivací a po úpravě získáme obecné rovnice pro harmonické elektromagnetické vlnění:

$$\nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0 \quad (12)$$

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (13)$$

Tvar pro pravoúhlé souřadnice:

$$\nabla^2 \hat{H} = \frac{\partial^2 \hat{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{H}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \hat{H}}{\partial z^2} \quad (14)$$

Aby bylo matematické řešení jednodušší, budeme uvažovat tyto jevy jako jednosměrné. Tudíž budou \hat{H} a \hat{E} záviset pouze na souřadnici x :

$$\frac{\partial^2 \hat{H}}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \hat{H}}{\partial z^2} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 \hat{E}}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \hat{E}}{\partial z^2} = 0 \quad (16)$$

Pokud uvažujeme, že \hat{H} a \hat{E} jsou konstantní ve všech bodech roviny kolmé k ose x , tak poté můžeme zavést takzvanou rovinou vlnu, pro kterou budou platit tyto vztahy:

$$k^2 = (\omega^2 \mu \varepsilon - j \omega \mu \gamma) = -j \omega \mu (\gamma + j \omega \varepsilon) \quad (17)$$

$$k = \alpha - j\beta \rightarrow k^2 = \alpha^2 - 2j\alpha\beta + \beta^2 \quad (18)$$

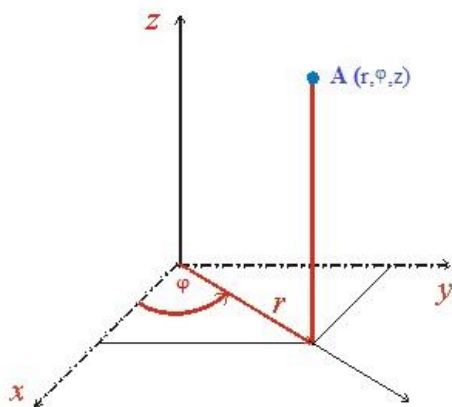
k – konstanta šíření elektromagnetického vlnění v prostředí, kde \hat{H} a \hat{E} mají harmonický průběh a úhlový kmitočet ω .

α – fázová konstanta

β – měrný útlum [10]

1.2.3 Elektromagnetické vlnění válcového charakteru

Velké množství různých vinutí, cívek a vsázek má válcový tvar, proto je zapotřebí se zabírat vlastnostmi a zákonitostmi elektromagnetického vlnění ve válcových útvarech. Teorii válcového elektromagnetického vlnění si ukážeme na nekonečně dlouhých útvarech válcového typu. Pokud přepokládáme nekonečnou délku válce, tak elektromagnetické vlnění závisí většinou pouze na poloměru r .



Obr.č.2: Válcové souřadnice [2]

Na obr.č.2 můžeme vidět, že bod A je určený úhlem φ , poloměrem r a souřadnicí z . Dále můžeme určit převod mezi válcovými a rovinnými souřadnicemi:

$$x = r \cdot \cos\varphi \quad y = r \cdot \sin\varphi \quad z = z$$

Jak už víme z předchozí kapitoly, pro pravoúhlé souřadnice platí rovnice:

$$\nabla^2 \hat{H} = \frac{\partial^2 \hat{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{H}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \hat{H}}{\partial z^2} \quad (19)$$

Poté pro válcové souřadnice bude platit rovnice:

$$\nabla^2 \hat{H} = \frac{\partial^2 \hat{H}}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \hat{H}}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \hat{H}}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \hat{H}}{\partial r} \quad (20)$$

Při konstantním elektromagnetickém jevu pro všechna φ a z a za předpokladu, že závisí pouze na r , platí:

$$\frac{\partial^2 \hat{H}}{\partial \varphi^2} = \frac{\partial^2 \hat{H}}{\partial z^2} = 0 \quad (21)$$

Následně dostaneme vztah pro tento případ ve tvaru:

$$\nabla^2 \bar{H} = \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \bar{H}}{\partial r} = \frac{d^2 \bar{H}}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d\bar{H}}{dr} \quad (22)$$

Dále dosadíme válcové souřadnice do rovnice pro harmonický průběh \bar{H} a řešením dostaneme vztah:

$$\hat{H} = \bar{C}_1 \cdot J_0(kr) + \bar{C}_2 \cdot N_0(kr), \quad (23)$$

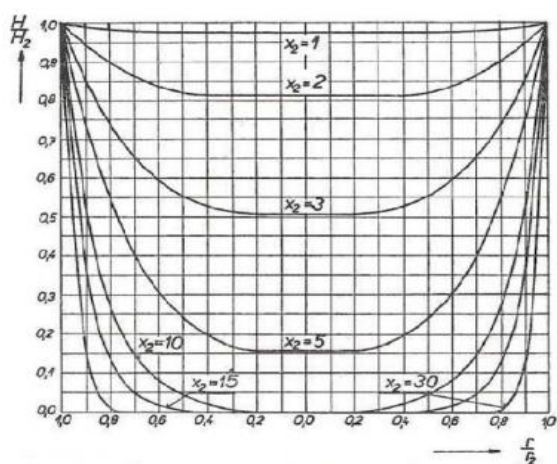
kde \bar{C}_1 a \bar{C}_2 jsou integrační konstanty; $J_0(kr)$ a $N_0(kr)$ jsou cylindrické funkce 0. řádu a argumentu (kr).

Pro \hat{E} je podobný postup, ale výpočtem z 1. Maxwellovy rovnice uvažujeme i vazbu na \hat{H} :

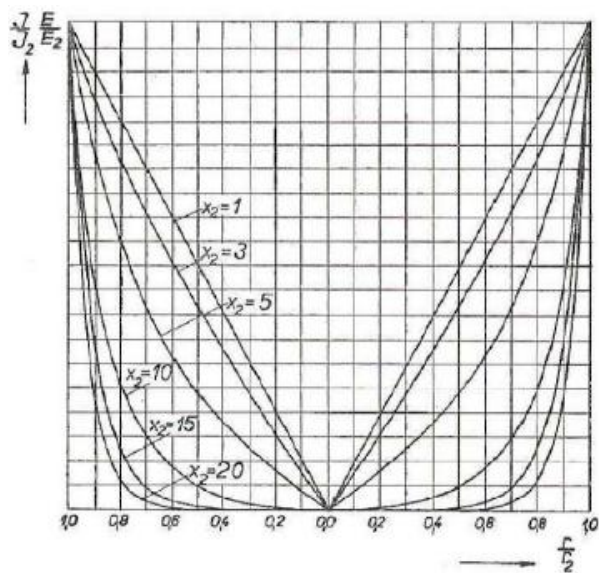
$$\hat{E} = \frac{k}{\gamma} [\bar{C}_1 \cdot J_1(kr) + \bar{C}_2 \cdot N_1(kr)] \quad (24)$$

Zde jsou členy $J_1(kr)$ a $N_1(kr)$ jsou cylindrické funkce 1. řádu a argumentu (kr) .

Pro průběhy intenzit magnetického a elektrického pole obecně platí (v závislosti na poloměru vsázky):



Obr.č.3: Závislost intenzity magnetického pole na poloměru vsázky [10]



Obr.č.4: Závislost intenzity elektrického pole (a proudové hustoty) na poloměru vsázky [10]

Člen x_2 vyjadřuje frekvenci uvnitř vsázky (poloměr r_2). Když se hodnota x_2 zvyšuje, tak se zvyšuje frekvence uvnitř vsázky (to vyplývá ze vztahu: $x_2 = \frac{r_2}{a_2} \cdot \sqrt{2}$)

(25) [10]

1.2.3.1 Vznik rozptylových polí

Následné odvozování bude odpovídat popisu transformátoru. Zjednodušeně budeme přepokládat transformátor s jedním primárním a jedním sekundárním vinutím. Ale konečná zjištění lze aplikovat i na systémy s více magneticky vázanými systémy.

Vycházíme z Faradayova zákona elektromagnetické indukce (Časová změna magnetického pole vytvoří elektrické vírové pole):

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{-d\psi}{dt} \quad (26)$$

Pokud tenký vodič tvoří uzavřenou smyčku, tak se v něm indukují napětí:

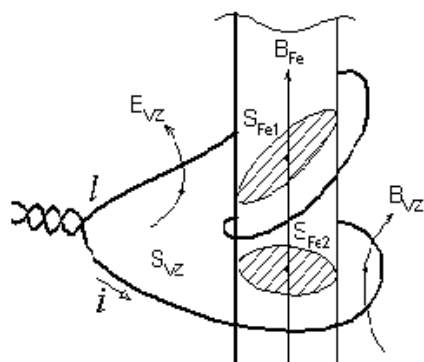
$$u(t) = -\frac{d\psi(t)}{dt} \quad (27)$$

Takový vodič (cívka) začne vytvářet proměnné magnetické pole:

$$\Psi(t) = \oint u(t) \cdot dt = \oint L \cdot \frac{di}{dt} \cdot dt \quad (28)$$

Magnetický tok je úměrný integrálu napětí cívky, s proudem cívkou přímá úměra být nemusí. Pro spřažený magnetický tok cívky platí rovnice:

$$\Psi(t) = \oint \vec{B}(t) \cdot d\vec{S} \quad (29)$$



Obr.č.5: Část mag. obvodu transformátoru se dvěma závity primárního vinutí [3]

Z obrázku č.5 můžeme vidět, že určité indukční čáry B_{vz} neprocházejí jádrem. Jedná se o tzv. rozptyl. Proto přesný časový průběh magnetického spřaženého toku získáme až ze složitějšího vztahu:

$$\Psi(t) = \int \vec{B}_{vz}(t) \cdot d\vec{S}_{vz} + \sum_{i=1}^N \int \vec{B}_{Fe}(t) \cdot d\vec{S}_{Fei} \quad (30)$$

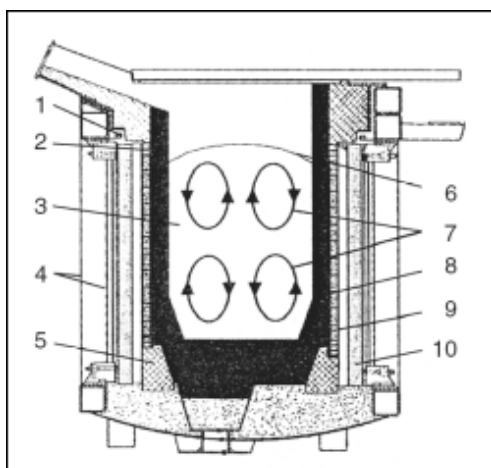
V praxi u reálného stroje je rozptyl (rozptylový tok) zanedbatelný, protože materiál má mnohonásobně větší magnetickou vodivost než okolí).

Vztahy pro indukované napětí můžeme pro sinusové průběhy zjednodušit na:

$$U_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi_m \quad (31)$$

Výše uvedené teoretické vztahy s praxí aplikují pro sestavení indukčních kelímkových pecí a dalších různých ohřívacích zařízení. Vodivé prostředí je představováno kelímkem, nevodivé prostředí představuje vnitřek zařízení, do kterého je vložena vsázka. [3]

2 Indukční kelímkové pece



Obr.č.6: Konstrukce kelímkové indukční pece[1]

- 1- Kroužek spojený nakrátko
- 2- Vodou chlazený prstenec
- 3- Tavenina
- 4- Kostra z oceli
- 5- Prstenec z betonu
- 6- Kopulovitá hladina
- 7- Pohyb taveniny
- 8- Kelímek
- 9- Induktor
- 10- Svazek transformátorových plechů

Na obr.č.6 je vidět zjednodušené schéma indukční kelímkové pece. Tato kelímková pec se používá nejvíce pro tavení oceli. Na vnější straně keramického kelímku se nachází vodou chlazený induktor, který je napájený ze zdroje střídavého napětí o frekvenci 50-1000 Hz. Uvnitř kelímku začne intenzivně proudit tavenina v závislosti na indukovaných vířivých proudech a elektrodynamických silách. V důsledku intenzivního proudění taveniny ke kopulovitým vzedmutím horní hladiny. Pohyb taveniny zaručuje rovnoměrné promísení základní oceli s legovacími přísadami a rovnoměrné rozložení teploty ve vsázce způsobí materiálovou a teplotní homogenizaci.

[1]

2.1 Omezení vlivu rozptylových polí u indukčních kelímkových pecí

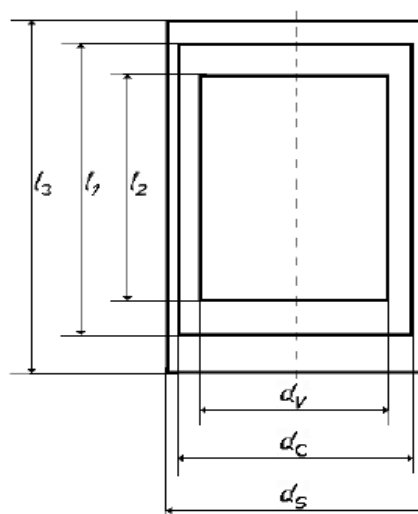
Jak už víme z předchozích kapitol, pokud cívkou prochází střídavý elektrický proud, vzniká v dutině cívky rozptylové magnetické pole, které se vně cívky uzavírá.

Toto rozptylové magnetické pole není možné nechat volně působit, protože v okolí pece se nacházejí ocelové konstrukce, kterými by rozptylový magnetický tok procházel, a docházelo by k jejich ohřevu. Ohřev ocelových konstrukcí by způsoboval vznik nežádoucích ztrát, v jejichž důsledku by se snižovala elektrická účinnost pece. Vlivem tepla by také mohlo dojít k mechanickému poškození ocelových konstrukcí. Z těchto důvodů rozptylový magnetický tok omezuje těmito způsoby: elektricky vodivým pláštěm válcového tvaru, jehož osa je shodná s osou cívky nebo svazky transformátorových plechů okolo cívky. [10]

2.1.1 Stínění elektricky vodivým pláštěm

Magnetické indukční siločáry v dutině cívky nejsou zcela rovnoběžné s osou cívky (u konců cívky se rozbíhají a procházejí jak cívkou, tak i stíněním). Pro lepší znázornění problému ale budeme předpokládat, že tyto siločáry jsou rovnoběžné s osou cívky. Tento předpoklad nebude chybou ovlivňovat výrazy pro vlastní a vzájemnou indukčnost, neboť tyto výrazy vycházejí ze skutečného rozložení magnetického pole.

Na obr.č.7 můžeme vidět nahrazení skutečné cívky a stínění sousými válci, které mají nulovou tloušťku: d_c je náhradní průměr cívky, d_s je náhradní průměr stínění, d_v je náhradní průměr vsázky a délky l_1 , l_2 , l_3 náhradních válců jsou rovny skutečným délkám cívky, vsázky a stínění.



Obr.č.7: Tři vodivé sousé válce [10]

V teorii elektromagnetických polí je zavedena tzv. hloubka pronikání (hloubka vniku) elektromagnetického vlnění do elektricky vodivého tělesa.

$$a = \sqrt{\frac{2}{\mu \cdot \gamma \cdot \omega}} \quad (32)$$

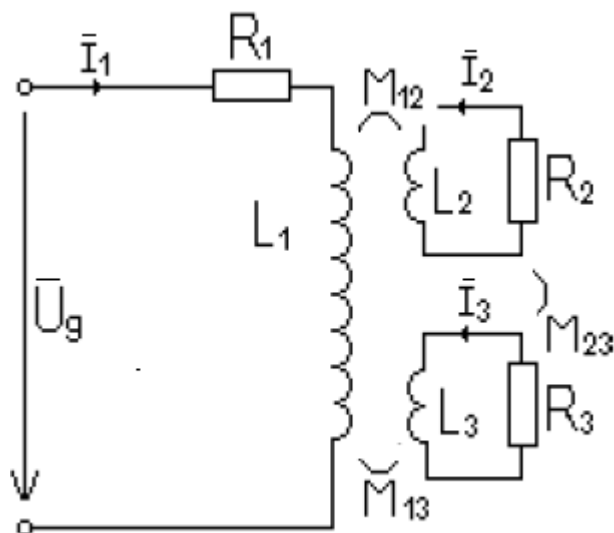
Hloubku vniku naindukovaných proudů budeme uvažovat menší než skutečný průměr. Poté platí vztahy:

$$\text{Pro cívku: } d_c = d_1 + a_1 \quad (33)$$

$$\text{Pro vsázku: } d_v = d_2 - a_2 \quad (34)$$

$$\text{Pro stínící plášť: } d_s = d_3 + a_3 \quad (35)$$

Tuto soustavu tří souosých válců můžeme popsat pomocí ekvivalentního elektrického obvodu:



Obr.č.8: Elektrické schéma kelímkové pece se stínícím vodivým pláštěm [10]

V obr.č.8 jsou vyznačeny: vlastní indukčnosti všech tří částí složeného obvodu (tj. primární cívky, vsázky a stínění) L_1, L_2, L_3 , vzájemné indukčnosti M_{12}, M_{23}, M_{13} , činné odpory všech tří částí R_1, R_2, R_3 a napájecí napětí U_g .

Stínění vodivým pláštěm je založeno na principu Lorentzova zákona a na elektromagnetické indukci. Pole, které vyvolá stínící plášť, pak působí proti poli, které bylo vyvoláno induktorem. U těchto dvou polí dojde k superpozici, v důsledku toho nastane snížení velikosti magnetického pole vně stínícího pláště, což má za následek odstínění pece.

$$\overline{\Phi}_z = \overline{\Phi}_{I1} - \overline{\Phi}_{I3} \quad (36)$$

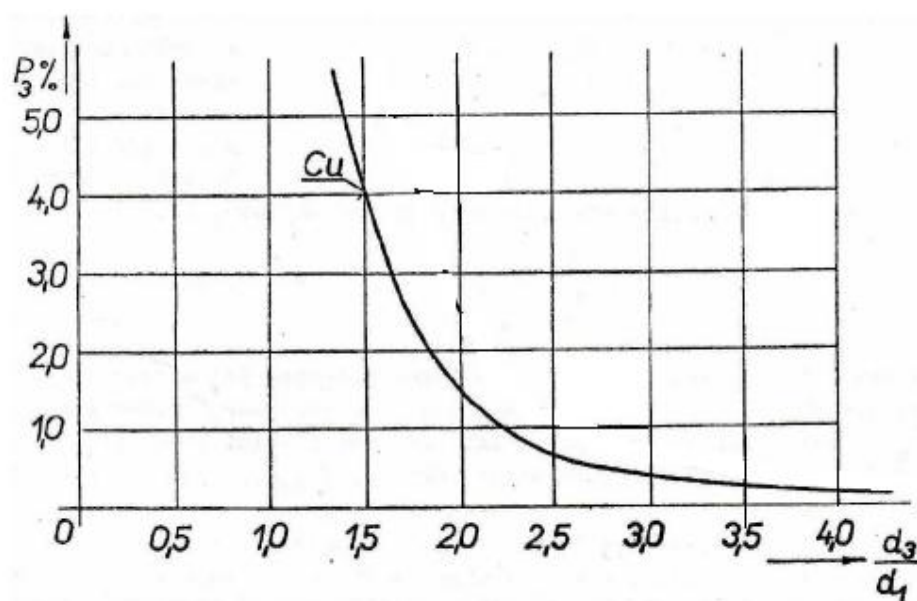
Dále se částečně sníží magnetické pole uvnitř induktoru, což sníží celkovou účinnost ohřevu. Ve stínění poté výsledné pole indukuje napětí U_3 :

$$\overline{U}_3 = R_3 \cdot I_{3e} = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \cdot \Phi_z = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot \Phi_z = 4,44 \cdot f \cdot \Phi_z \quad (37)$$

Z výsledku vyplývá, že ve stínění vznikne takové napětí, aby se ve stínícím plášti mohl vytvořit takový proud I_3 , který bude procházet přes odpor R_3 a který vytvoří pole, které bude působit proti rozptylovému toku vyvolanému induktorem, a tudíž bude stínit.

Aby bylo stínění dostatečně účinné, je vhodné použít materiál s dobrou elektrickou vodivostí. Stínící plášť umístíme kolem induktoru tak, aby vnitřní průměr zvoleného stínícího pláště byl dvojnásobný, než vnitřní průměr induktoru. Tloušťku pláště volíme v závislosti na hloubce vniku. Pro dosažení minimálních ztrát je tloušťka pláště: $d_{opt} = \frac{a \cdot \pi}{2}$. Pokud zvolíme větší tloušťku, bude stínění v provozu mechanicky odolnější. Při optimální tloušťce minimální elektrický odpor a ztráty v plášti odpovídají vztahu:

$$P_3 = R_3 \cdot I_{3e}^2 \quad (38)$$

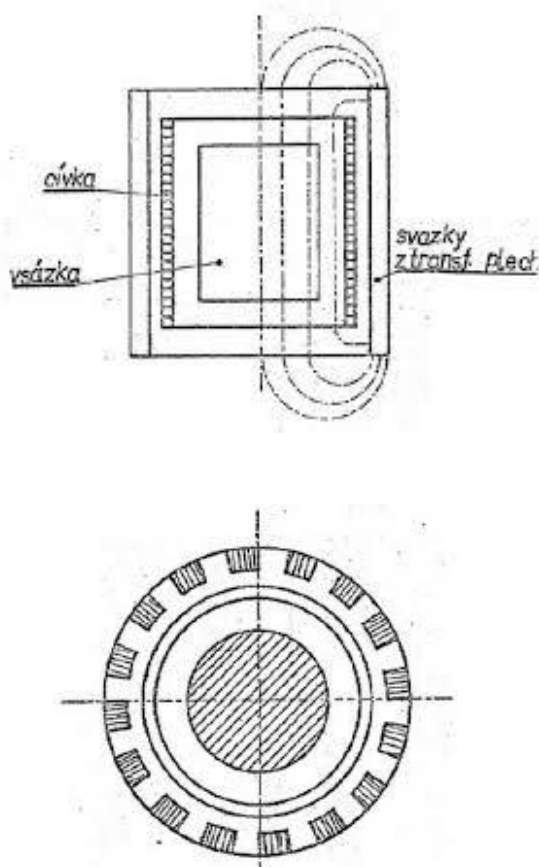


Obr.č.9: Závislost ztrát ve stínícím plášti z mědi na průměru cívky a pláště [10]

Ztráty ve stínění na svislé ose jsou udávány procenty příkonu z pece. Z grafu v obr.č.9 je vidět, že čím je větší průměr cívky a pláště, tím menší ztráty ve stínění jsou.

Ztrátám 1,5% z výkonu odpovídá poměr $\frac{d_3}{d_1} = 2$, tudíž vnitřní průměr stínícího pláště vychází $d_3 = 2 \cdot d_2$. Pec vychází bachratá a vyžaduje větší prostor. [10]

2.1.2 Stínění pomocí transformátorových plechů



Obr.č.10: Uspořádání pece se stíněním transformátorovými plechy [10]

Většina z magnetického toku, který je buzený cívkou, se uzavírá přes dobře magneticky vodivou cestu vně cívky. Díky zařazení svazků z transformátorových plechů (magneticky vodivé svazky) dojde ke zmenšení odporu pro magnetický tok, který tudíž vzroste. Vlivem toho dojde k nárůstu indukčnosti pecní cívky z hodnoty L_1 na L_1' , k nárůstu indukčnosti vsázky z L_2 na L_2' a tudíž nastane změna i u vzájemné indukčnosti M_{12} .

Pro dimenzování magnetického jádra je klíčovou veličinou magnetický tok Φ_z (výsledný magnetický tok buzený cívkou a zeslabený působením vsázky).

Nejvýznamnější ztráty v magnetických materiálech:

1) Hysterezní ztráty:

$P_h = f \cdot V \cdot S_S$ (38), kde f je frekvence magnetického pole, V je objem magnetického materiálu a S_S je plocha hysterezní smyčky.

Hysterezní ztráty vznikají vlivem cyklického magnetování materiálu.

2) Ztráty vířivými proudy:

$P_v = \frac{4}{3} \cdot d^2 \cdot B^2 \cdot f^2 \cdot \frac{V}{\rho}$ (39), kde d je tloušťka magnetického materiálu, B

je indukce magnetického pole, ρ je měrná hustota magnetického materiálu,

V objem magnetického materiálu a f je frekvence magnetického pole.

Další ztráty, které se mohou objevit, jsou ztráty přídavné. Tyto ztráty jsou ovšem zanedbatelné. Celkové ztráty můžeme snížit použitím vhodných transformátorových plechů - materiál (přidání křemíku), tloušťka a počet svazků.

Důležité pro to, aby si transformátorové plechy zachovaly vlastnosti v pracovním prostředí je, aby zvolený materiál byl dimenzován na pracovní kmitočet, na kontrolu povolené hodnoty magnetické indukce při pracovním kmitočtu a na oteplení. Pokud by nebyly dodržovány tyto dané meze, došlo by ke změně magnetických vlastností, což by negativně ovlivňovalo stínící funkci a tím i účinnost zařízení. [10]

2.1.3 Porovnání obou možností stínění

U pece se stínícím vodivým pláštěm je zapotřebí cívka, která má větší počet závitů a větší kondenzátorová baterie, než je tomu u pece se stíněním transformátorovými plechy. Pece se stínícím vodivým pláštěm mají dále menší účinnost, ale jsou ekonomicky levnější variantou. Provedení kelímkové pece se stíněním transformátorovými plechy má lepší technické vlastnosti, ale také má dražší výrobu a vykazuje větší hmotnost.

3 Měření rozptylového pole u indukčního vaříče

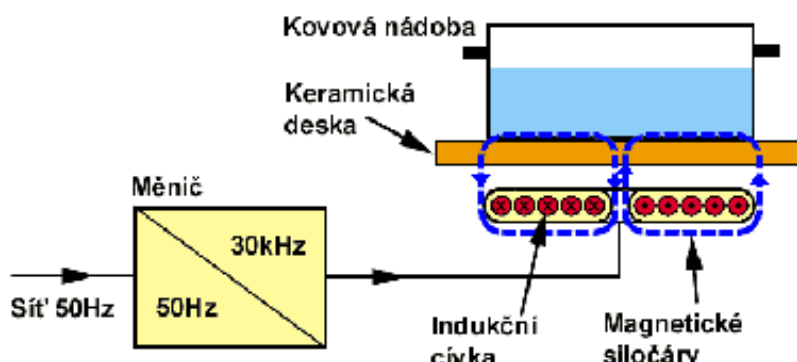
3.1 Princip indukčního vaříče

Indukční vaříč je úsporný zdroj tepla, který pracuje na principu elektromagnetické indukce. Jeho největší výhodou je to, že dokáže snižovat tepelné ztráty, jelikož ohřívá přímo dno kovové nádoby (u jiných typů vaříčů se prvně ohřeje plotna a ta až poté předává teplo nádobě, čímž právě vznikají tepelné ztráty).

Indukční vaříče mají sklokeramickou desku, pod níž jsou zabudovány cívky, které jsou napájeny měničem napětí o frekvenci 25-35 kHz. Na vaříči se nastaví výkon v rozmezí cca 120-1800 W a poté, co se položí kovová nádoba na desku, pod kterou je nainstalovaná elektromagnetická indukční cívka, se vytvoří silné magnetické pole, protože položením nádoby na vaříč vzniknou dva obvody vázané indukční vazbou. Dno nádoby funguje jako sekundární cívka, skrze kterou prochází indukční tok, který vytváří primární cívka. Silné magnetické pole indukuje do dna ohřívané kovové nádoby vířivé proudy. Díky těmto vířivým proudům se dno hrnce zahřeje v krátkém časovém intervalu.

Velkou výhodou indukčního ohřevu je vysoká účinnost. Vlastní elektronika vaříče spotřebuje maximálně pouze 6% energie a v indukční cívce a zbylých konstrukčních prvcích ztráty nepřekročí hodnotu 4%. Z těchto hodnot vyplývá, že přibližně 90% elektrické energie se přemění na teplo uvnitř dna kovové nádoby. Tudíž ohřev či vaření je rychlé a spotřebuje se mnohem menší množství elektrické energie, než by tomu bylo u jiných typů ohřevu. Další výhodou je, že pokud se například odpaří všechna voda v nádobě a mohlo by dojít k přehřátí, indukční cívka se sama vypne a nehrozí poté žádné nebezpečí. Stejně tak se cívka zachová, pokud je na vaříči nějaký cizí předmět (např. hliníková nádoba).

Nevýhodou indukční vaříče je to, že se na ohřev mohou používat pouze nádoby se dnem z feromagnetického materiálu. U nádob ze skla či keramiky k ohřevu na indukčním vaříči nedojde. [6]



Obr.č.12: Princip indukčního vařiče [7]

3.2 Postup měření



Obr.č.11: Foto z měření na indukčním vařiči: uspořádání vařiče a sondy

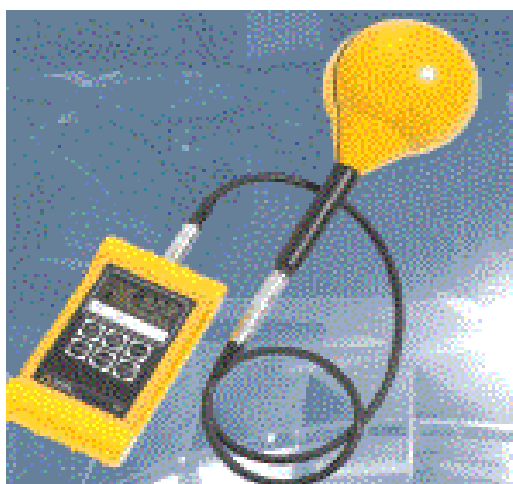
Měření probíhalo tak, že jsem desku s vařičem postupně oddaloval od měřící sondy až do vzdálenosti jednoho metru. Odečítal jsem hodnoty magnetické indukce po 5 cm až do vzdálenosti 30 cm sondy od vařiče, poté byly odečítané hodnoty zaznamenávány vždy až po rozdílu vzdálenosti 10 cm, protože hodnoty magnetické indukce už dosahovali menších změn. Po dokončení měření do vzdálenosti jednoho metru jsem změnil polohu vařiče a měření se opakovalo. Výsledné hodnoty jsou zaznamenány pro tři různé polohy vařiče.

3.3 Výsledky měření na indukčním vařiči

Měření probíhalo na vysokofrekvenčním vařiči CLATRONIC, typ EKI 3005, s maximálním výkonem 1800 W. Prováděl jsem dvě měření pro dvě různé nádoby. Jedna nádoba měla poloměr dna 15 cm a druhá nádoba byla s poloměrem 17,5 cm. Pro

měření magnetického pole indukčního vařiče se používal měřicí přístroj ELT-400 se sondou .

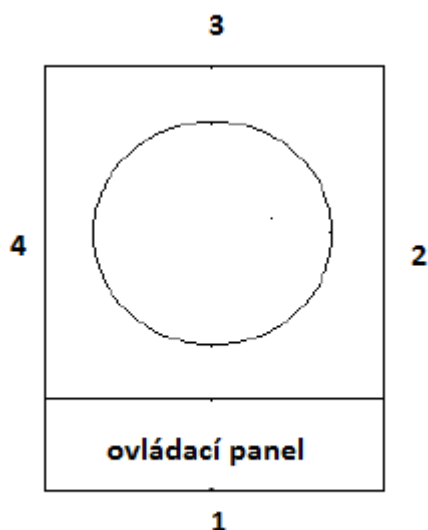
Měřicí přístroj ELT-400 od výrobce NARDA SAFETY TEST SOLUTIONS je optimální pro monitoring elektromagnetických polí podle využívaných národních a mezinárodních standardů bezpečnosti v magnetických polích. Používá se pro měření nízkofrekvenčních záření. Přístroj má v sobě integrovanou funkci Shaped Time Domain, která automaticky vyhodnocuje všechny přítomné nízkofrekvenční zdroje elektromagnetických polí. Výsledek se okamžitě zobrazuje v požadovaných hodnotách. Sílu magnetického pole si, po přepnutí tlačítka, můžeme nechat zobrazit i v jednotkách mT. Pomocí této metody má uživatel přístup k efektivní i maximální hodnotě.



Obr.č.13: Přístroj ELT-400 se sondou [8]

Sonda, se kterou je přístroj používán, měří magnetická pole nezávisle na směru, jímž je natočena (sonda obsahuje tři cívky, které jsou prostorově natočené do tří os). Sonda má plochu průřezu 100 cm^2 , čímž splňuje požadavky všech současných norem. Sonda může být používána i odděleně (odpojena od měřícího přístroje). [8]

Vzdálenosti ve výsledcích měření odpovídají vzdálenosti sondy od okraje vaříče.



Obr.č.14: Nákres vaříče s označením jednotlivých poloh

Polohy 1, 2, 3, 4 značí natočení do směru k sondě. Pro polohy 2 a 4 jsou hodnoty magnetické indukce přibližně stejné, proto je měření prováděno pouze pro polohu 2.

Naměřené hodnoty:

Tab. č.1: Nádoba se dnem o průměru 15 cm

d [cm]	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
B ₁ [μT]	5,41	3,51	2,18	1,5	1,08	0,66	0,46	0,38	0,34	0,32	0,31	0,3
B ₂ [μT]	3,04	2,06	1,39	1,03	0,79	0,52	0,39	0,33	0,31	0,3	0,29	0,29
B ₃ [μT]	5,54	3,34	2,2	1,46	1,02	0,6	0,4	0,32	0,29	0,28	0,28	0,28

Tab. č.2: Nádoba se dnem o průměru 17,5 cm

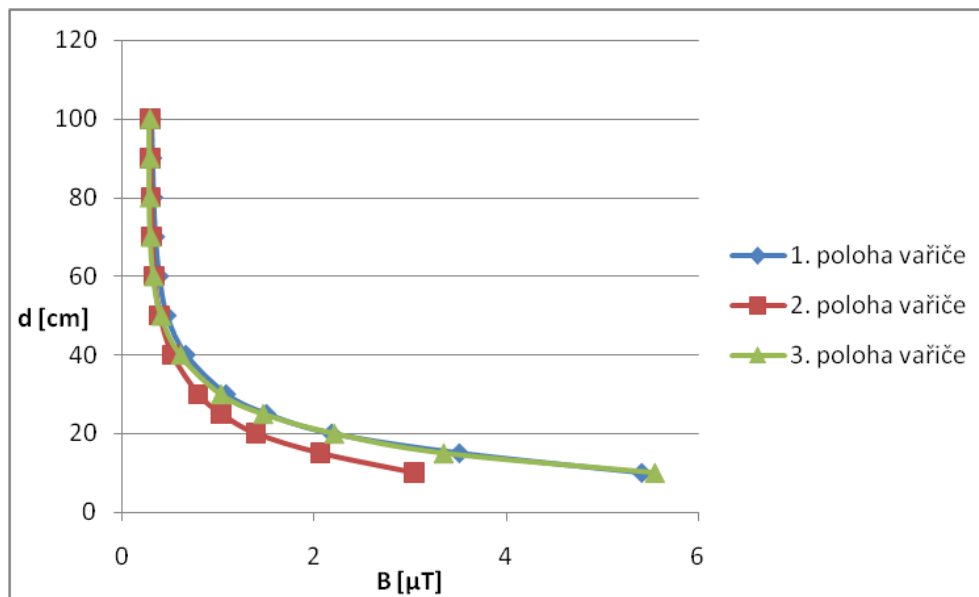
d [cm]	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
B ₁ [μT]	7,15	4,2	2,7	1,8	1,27	0,75	0,52	0,4	0,36	0,33	0,32	0,32
B ₂ [μT]	3,7	2,42	1,67	1,24	0,94	0,61	0,45	0,38	0,34	0,32	0,31	0,31
B ₃ [μT]	7,54	4,8	2,77	1,86	1,24	0,72	0,48	0,37	0,32	0,3	0,29	0,29

V následující tabulce můžeme vidět mezní hodnoty pro rozmezí frekvencí v normálním prostředí:

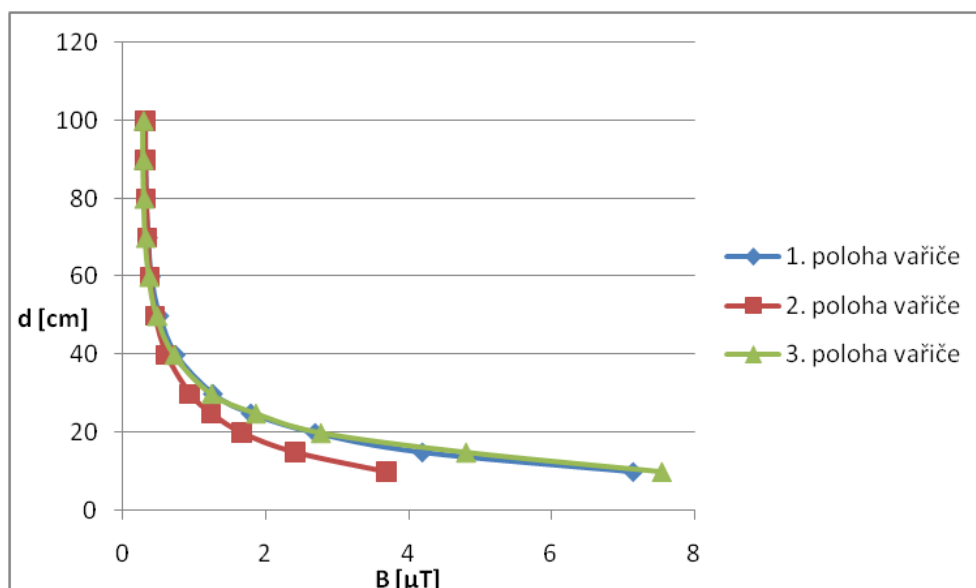
Frequency range	E-field strength ($V\ m^{-1}$)	H-field strength ($A\ m^{-1}$)	B-field (μT)	Equivalent plane wave power density S_{eq} ($W\ m^{-2}$)
up to 1 Hz	—	3.2×10^4	4×10^4	—
1–8 Hz	10,000	$3.2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	—
8–25 Hz	10,000	$4,000/f$	$5,000/f$	—
0.025–0.8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	—
0.8–3 kHz	$250/f$	5	6.25	—
3–150 kHz	87	5	6.25	—
0.15–1 MHz	87	$0.73/f$	$0.92/f$	—
1–10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0.73/f$	$0.92/f$	—
10–400 MHz	28	0.073	0.092	2
400–2,000 MHz	$1.375f^{1/2}$	$0.0037f^{1/2}$	$0.0046f^{1/2}$	$f/200$
2–300 GHz	61	0.16	0.20	10

Obr.č.15: Mezní hodnoty indukčních vaříčů pro různé frekvence

V grafech z měření můžeme vidět závislost velikosti magnetického pole na vzdálenosti vaříče od měřicí sondy.



Obr.č.16: Graf pro ohřev nádoby s průměrem dna 15 cm



Obr.č.17: Graf pro ohřev nádoby s průměrem dna 17,5 cm

V domácnostech se nejvíce objevují vařiče s rozsahem frekvencí 20-50 kHz. Pokud se podíváme do tabulky mezních hodnot pro různé rozsahy frekvencí, tak pro indukční vařiče odpovídají hodnoty v rozsahu 3-150 kHz. Mezní hodnota magnetické indukce v tomto rozsahu je 6,25 μT . Člověk pracuje s indukčním vařičem přibližně ve vzdálenosti 30-40 cm. V této vzdálenosti by hodnota magnetické indukce neměla překračovat mezní hodnotu pro danou frekvenci, protože při překročení mezní hodnoty by mohlo nastat negativní ovlivňování lidského organismu vlivem rozptylových polí, které vystupují z vařiče (hodnoty magnetické indukce, které jsme sondou naměřili, patří právě vystupujícím rozptylovým polí z vařiče). [8]

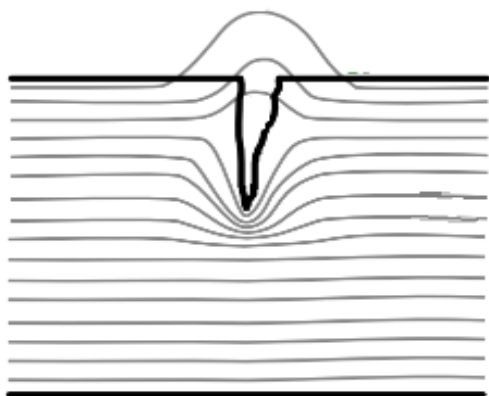
4 Možnosti využívání rozptylových polí v praxi

4.1 Magnetická prášková metoda

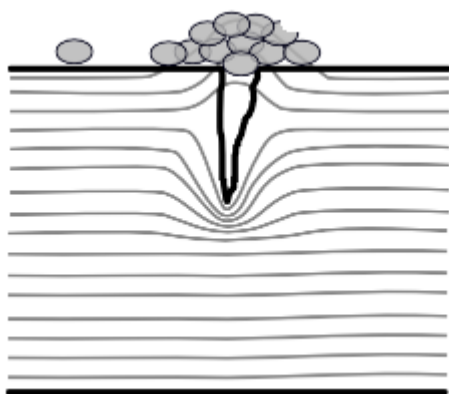
Magnetická prášková metoda (Inkar) je způsob testování (nedestruktivní test) feromagnetických materiálů, při kterém se zjišťují povrchové vady nebo vady, které jsou těsně pod povrchem materiálu. Za přijatelných podmínek lze zjistit i vady na délce menší než 1 mm a šířky od 10 μm .

Princip zkoušky je takový, že materiál je zmagnetován (dojde k jeho magnetickému nasycení). Zmagnetování se provádí dvěma způsoby: Přímou průchodem

elektrického proudu nebo nepřímo vnějším zdrojem magnetického pole (v cívice nebo elektromagnetem). V poškozeném místě nemůže dojít k takové koncentraci magnetického pole jako v nepoškozeném feromagnetickém materiálu. Proto v tomto poškozeném místě dochází k vystoupení magnetického pole na povrch materiálu (na povrch vystupují siločáry). Pole vystoupené na povrch tvoří magnetický rozptylový tok (nese informaci o změnách magnetických vlastností). Bod, ve kterém siločáry vystupují na povrch a kde se opět vrací do materiálu, se nazývá magnetický pól. Díky tomu se v místě vady vytvoří malý magnet. Následně se na povrch materiálu nanese feromagnetický prášek. Zrnka prášku přitahuje rozptylový tok nad vadu a prášek zde vytvoří viditelnou indikaci. Tato indikace je vizuálně vyhodnocena podle jasového a barevného kontrastu.



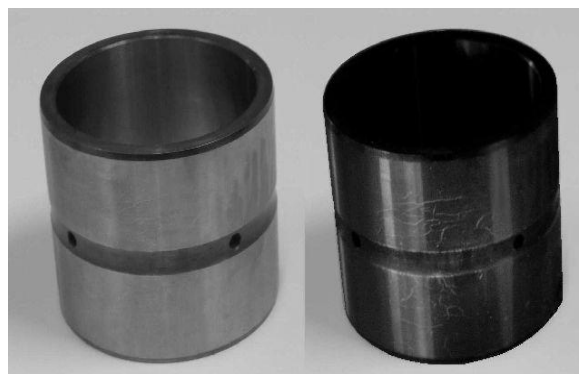
Obr.č.18: Rozložení čar intenzity magnetického pole v okolí vady [9]



Obr.č.19: Indikace tvořená zrnky detekčního prostředku [9]

Magnetická prášková metoda je nejčastější metodou pro hledání vad materiálu nedestruktivním způsobem. Vzhledem k tomu, že je tato metoda celkem jednoduchá a nenáročná na provedení, je jednou z nejvýznamnějších metod při servisu provozních zařízení. Touto metodou zjistíme trhliny, praskliny apod. Nelze takto zkoušet jiné materiály než feromagnetické.

Z předchozích odstavců už víme, že ke zviditelnění rozptylových polí, které indikují poruchu, dosáhneme tak, že na povrch materiálu nasypeme feromagnetický prášek. Nanesení prášku lze provést dvěma způsoby: Suchou metodou (ruční nebo elektrostatické nanášení) anebo mokrou metodou (polévání, nástřik ze spreje, ponoření do suspenze prášku v kapalině). Suchá metoda se provádí pro zrnka prášku o velikosti od 40 do 400 μm a mokrá metoda je pro zrnka od 1 do 40 μm . U suché metody mají zrnka prášku vyšší hodnotu permeability a zkouška je více citlivá na podpovrchové a rozsáhlejší vady. Vhodným osvětlením povrchu se posléze indikace vyhodnotí. [9]

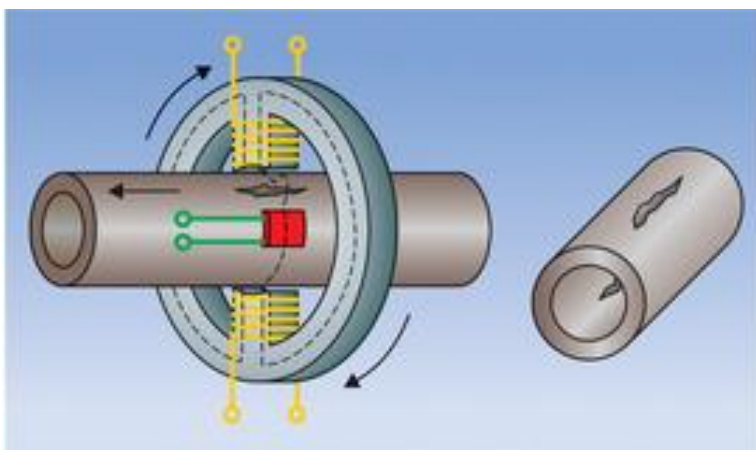


Obr.č.20: Vyhodnocení zkoušky po osvětlení[4]

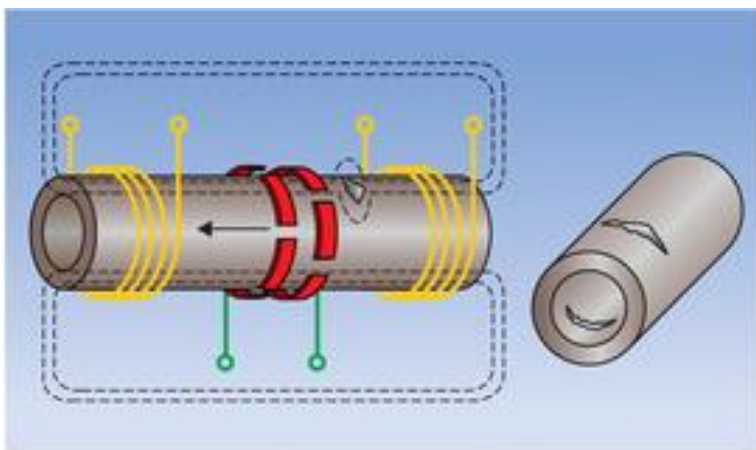
4.2 Metoda stejnosměrných rozptylových toků

U metody stejnosměrných toků dochází ke zmagnetizování celého průřezu materiálu. Pomocí této magnetizace lze detekovat vady jak na vnějším, tak i na vnitřním povrchu zkoušené trubky. Čím větší je tloušťka stěny trubky, tím více se snižuje schopnost detekovat vady na vnitřní straně stěny.

Magnetický rozptylový tok se vytváří jinak pro hledání podélných vad a jinak pro hledání příčných vad. U hledání podélných vad se magnetický tok vytváří cirkulárně dvěma rotujícími hřídelemi. Snímače magnetického pole, zaznamenávající vystupující magnetický rozptylový tok na místě s vadou, také rotují. U vyhledávání příčných vad je magnetický tok vytvořen dvěma cívkami, které jsou umístěné v podélném směru. Vystupující rozptylový tok zaznamenávají magnetické snímače, které jsou umístěné po obvodu. [5]



Obr.č.21: Zjišťování podélných vad [5]

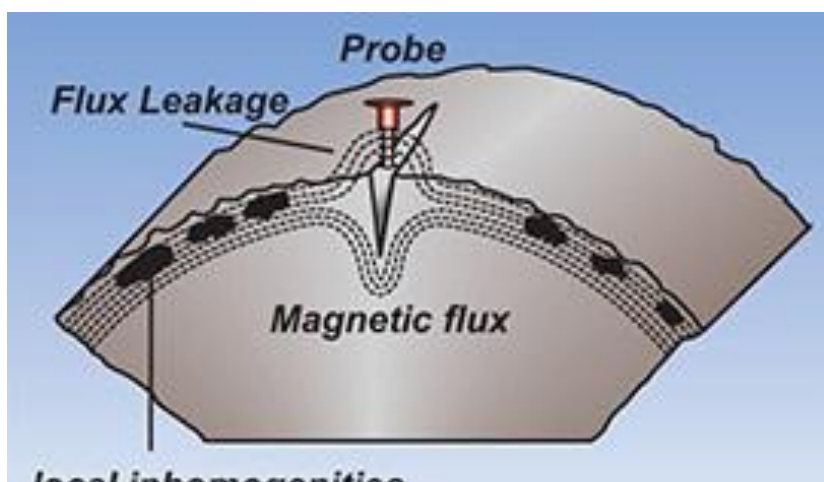


Obr.č.22: Zjišťování příčných vad [5]

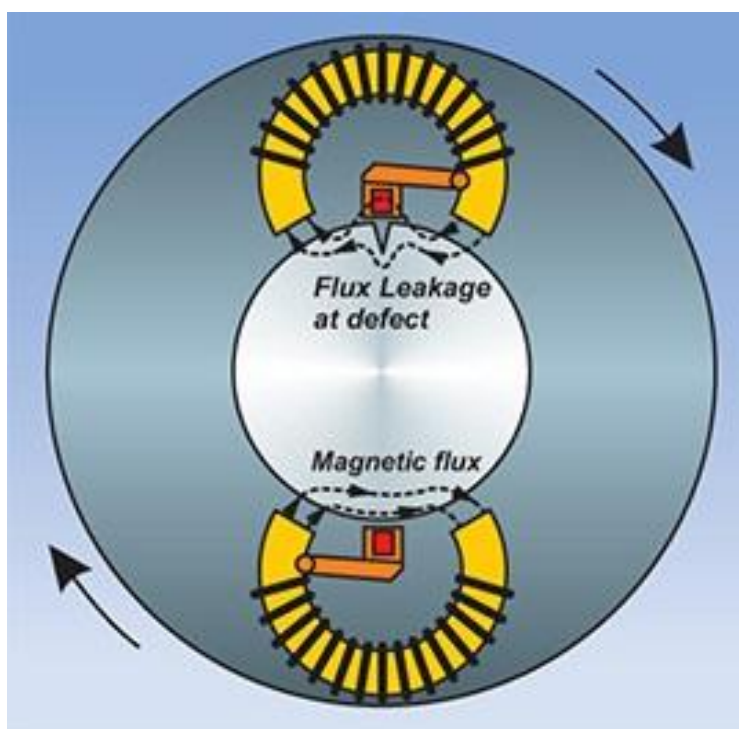
4.3 Metoda střídavých rozptylových toků

U metody střídavých rozptylových toků dochází k soustředění magnetického toku na povrchu materiálu. Tato metoda je citlivá pro vyhledávání velmi malých povrchových vad (cca od hloubky 100 μm).

Princip této metody je založen na dvou rotujících hřídelích, které vytvářejí magnetický tok. Na snímače magnetického pole je na místě vady zaznamenáván vystupující rozptylový magnetický tok. [5]



Obr.č.23: Sonda snímající vady materiálu [5]



Obr.č.24: Rotace u metody střídavých rozptylových toků [5]

5 Závěr

Indukční ohřev je ve srovnání s jinými druhy ohřevů velmi úsporná technologie, která využívá principu elektromagnetické indukce. Jedná se galvanicky oddělený zdroj, který je přestavován induktorem, od ohřivaného předmětu (vsázka).

Jedním z hlavních bodů této práce bylo popsat řešení k omezení rozptylových polí na proces ohřevu. Pro indukční zařízení zapojená do provozu jsou rozptylová pole velmi nežádoucí. Mají špatný účinek na okolí ohřevu. Působením rozptylových polí vzniká nežádoucí teplo v konstrukčních prvcích v okolí pece. Ohřevem konstrukčních prvků v okolí pece vznikají ztráty, díky kterým se snižuje celková účinnost pece. Z tohoto důvodu je snaha o co největší potlačení rozptylového pole. Potlačení rozptylového pole se provádí dvěma způsoby: stíněním vodivým pláštěm nebo pomocí svazků transformátorových plechů. Stínění vodivým pláštěm má menší účinnost, ale je ekonomicky výhodnější. Provedení se stíněním pomocí svazků transformátorových plechů je technicky dokonalejší, ale dražší a má vyšší hmotnost.

Dalším bodem práce bylo provedení měření na indukčním vařiči. Měřil jsem velikost rozptylového pole v závislosti na vzdálenosti od vařiče. Toto měření bylo provedeno z důvodu porovnání naměřených hodnot s hodnotami rozptylového pole bezpečných pro lidský organismus. V domácnostech se nejvíce objevují vařiče s rozsahem frekvencí 20-50 kHz. V tabulce mezních hodnot toto rozmezí spadá do rozsahu 3-150kHz. V těchto frekvenčních mezích by hodnota rozptylového toku neměla překračovat mezi 6,25 μT . Větší hodnota už by mohla mít negativní vliv na lidský organismus.

Člověk pracuje s indukčním vařičem asi ve vzdálenosti 30-40 cm. Při měření na vařiči CLATRONIC jsme (při pohledu do grafu či tabulek) naměřili v této vzdálenosti hodnotu rozptylového toku přibližně kolem 1 μT . Tato hodnota je v bezpečných mezích, tudíž elektronika vařiče dokáže sama dostatečně omezit vliv rozptylového pole. Mezní hodnota 6,25 μT byla překročena pouze v těsné blízkosti vařiče při měření s nádobou o větším průměru. V tomto případě by člověk s citlivým organismem mohl vliv rozptylového pole zaznamenat.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/indukcni-ohrev-3—14655>
- [2] <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F2/F2k21b-mod-cs.htm>
- [3] <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05032/index.html#kapitola2.1>
- [4] http://www.gamalux.cz/cz/pouzivane_metody/magnetic_particle_testing.php
- [5] <http://www.foerstergroup.cz/Metoda-rozptylovych-toku.96.0.html>
- [6] <http://fyzmatik.pise.cz/826-indukcni-ohrev.html>
- [7] <http://www.chadt.cz/abc/index.php?zam=2&dal=85>
- [8] <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/bezpecnost-v-nizkofrekvencnich-polich-s-elt-400—14163>
- [9] Krejča, Roxer(2012) *Magnetická metoda prášková I, II, III* ATG s.r.o.
- [10] Langer,E.; Kožený,J. *Elektrotepelná zařízení indukční: Základy teorie, výpočty, konstrukce* Ediční středisko VŠSE Plzeň, 1982
- [11] Rada, J a KOL. *Elektrotepelná technika* SNTL/ALFA 1985