

**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: 2014/2015

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr KUČERA**  
Osobní číslo: **E14B0239P**  
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**

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

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 pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí bakalářské práce:

**Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.**


Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2014

Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2015

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



  
Prof. Ing. Václav Kús, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

Popis teorie magnetických polí, použití kelímkových pecí, pro jaký konkrétní účel jsou konstruovány a jednotlivé typy odrušení rozptylového magnetického toku kolem pecí. Zmínka je i o nedestruktivní technologii měření defektů. Experimentální část práce se zabývá indukčním vaříčem a měřením magnetického pole v jeho okolí při provozu zařízení.

## **Klíčová slova**

indukční ohřev, rozptylový mag. tok, indukční kelímkové pece, stínění, NDT, indukční vaříč

## **Abstract**

Description of theory magnetic flux, application of inductive crucible furnace, its specialized application and shielding types around this crucible furnaces. There is a mention about non-destructive degektoscopy technology, measuring final products with leaking magnetic flux. The experimental part of this work is occupied with inductive cook working and its measuring dispersion of magnetic flux in the immediate vicinity.

## **Key words**

inductive heating, dispersion of magnetic flux, inductive crucible furnace, shielding, NDT, inductive cook

## **Prohlášení**

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

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

.....

podpis

V Plzni dne

Petr Kučera

## **Poděkování**

Tímto bych velmi rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Prof. Ing. Jiřímu Koženému, za cenné profesionální rady, za prostudování bakalářské práce a za následné připomínky.

## Obsah

Úvod.....	9
1 Vznik tepla elektromagnetickou indukcí.....	10
2 Účinky elektrického proudu.....	11
3 Rozdělení látek podle magnetických vlastností.....	12
4 Pojmy z magnetismu.....	13
4.1 Maxwellovy rovnice .....	13
4.2 Vlnové rovnice.....	13
4.3 Válcové elektomagnetické vlnění.....	15
5 Elektrický povrchový jev.....	18
6 Indukční kelímkové pece.....	19
7 Rozptylová pole indukčních kelímkových pecí.....	21
7.1 Elektricky vodivý stínící plášť.....	21
7.2 Stínění pláštěm ze svazků transformátorových plechů.....	24
8 Využití rozptylového toku v praxi.....	25
8.1 Zjišťování vad hotových výrobků pomocí prášku.....	25
8.2 Zjišťování vad hotových výrobků pomocí sond.....	26
9 Pole indukčního vařiče.....	28
9.1 Měření na indukčním vařiči.....	29
10 Závěr.....	34
12 Seznam zdrojů.....	35



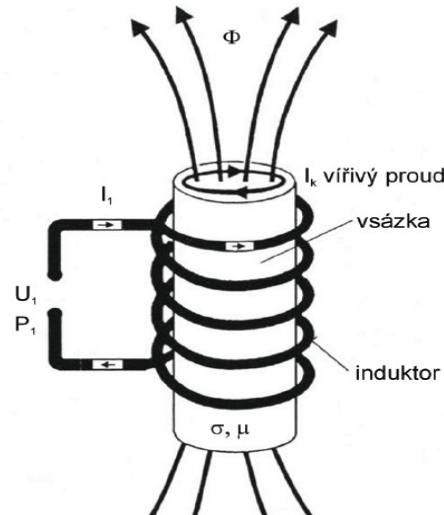
## Seznam použitých symbolů

d	(m)	průměr
l	(m)	výška
S	(m <sup>2</sup> )	plocha
δ	(m)	hloubka vniku naindukovaných proudů
μ <sub>0</sub>	(Hm <sup>-1</sup> )	permeabilita vakua; μ <sub>0</sub> = 4π10 <sup>-7</sup>
μ <sub>R</sub> , ε <sub>R</sub>	(-)	relativní permeabilita
ε <sub>0</sub>	(Fm <sup>-1</sup> )	permitivita vakua
ρ	(Ωm)	měrný elektrický odpor
f	(Hz)	frekvence
ω	(s <sup>-1</sup> )	úhlová frekvence
U	(V)	napětí
I	(A)	proud
P	(W)	výkon
L	(H)	vlastní indukčnost
M	(H)	vzájemná indukčnost
N	(-)	počet závitů
R	(Ω)	činný odpor
Ψ, Φ	(Wb)	magnetický tok
H	(Am <sup>-1</sup> )	intenzita magnetického pole
E	(Vm <sup>-1</sup> )	intenzita elektrického pole
B	(T)	magnetická indukce
J	(Am <sup>-2</sup> )	proudová hustota
η	(-)	účinnost

## Úvod

Tato bakalářská práce je zaměřena na teorii ohřevu elektromagnetickou indukcí v indukčních kelímkových pecích. V první kapitole se seznámíme s indukčním ohřevem. V následujících kapitolách uvádím princip povrchového jevu, jeho využití a omezení. Dále se věnuji praktickému využití kelímkových indukčních pecí v provozech, stručně jaké technologie se používají a příklad jejich použití. Nastíním využití rozptylového magnetického toku pro zjištění defektů nedestruktivním způsobem. Poslední kapitolou práce je měření rozptylových magnetických polí v okolí indukčního vaříče v provozu a následné zhodnocení vlivu.

## 1 Vznik tepla elektromagnetickou indukcí



Obr.1 Schéma indukčního zařízení [1]

### Princip

Nákres indukčního zařízení je na Obr.1, sestává z cívky (induktoru), zdroje střídavého proudu a z ohřívaného předmětu (vsázky). Lze si jej představit jako transformátor, kde induktor je primární a vsázka sekundární stranou. Induktor bývá vyroben z dutého měděného vodiče, jímž protéká chladicí kapalina. Pro dosažení co největší účinnosti ohřevu je potřeba, aby induktor byl co nejbližší ohřívanému tělesu.

Induktor je koncová část zdroje, jímž protéká střídavý proud, a v jeho okolí se vytváří elektromagnetické pole. Uvnitř cívky vzniká válcové elektromagnetické vlnění a indukuje napětí do vsázky, která je zkrátka pro vířivé proudy, a ty následně ohřívají přímo vsázku

Hlavní výhodou tohoto ohřevu je vznik tepla přímo v vsázce, která je navíc galvanicky oddělena a zároveň vše ostatní může zůstat studené. Materiál tavený v indukčních kelímkových pecích vyniká dokonalou homogenitou, kterou nelze dosáhnout v principiálně jiných typech pecí pro ohřev materiálů (klasický odporový, mikrovlnný). [1]

## 2 Účinky elektrického proudu

### a) Magnetické

Navineme-li izolovaný drát v několika závitěch kolem jádra z měkkého železa a necháme protékat takto vzniklou cívku elektrický proud, stává se jádro magnetickým (elektromagnet). Povytáhneme-li železné jádro z cívky ven, vtáhne je opět do sebe.

### b) Indukční

Tvoří-li vodič uzavřenou smyčku a prochází jím časově proměnný proud, indukuje se v jiném blízkém vodiči vlivem magnetických účinků tohoto proudu elektrické napětí (transformátor). Stejná situace nastane, mění-li v blízkosti vodiče magnet svou polohu (stroje na střídavý proud), nebo pohybuje-li se vodič v blízkosti magnetu či v magnetickém poli (stroje na stejnosměrný proud)

### c) Tepelné

Prochází-li vodičem elektrický proud, vodič se zahřívá (elektrické topení). Je-li proud velký, nastane rozžhavení vodiče (žárovky), nebo jeho roztavení (pojistky).

### d) Elektrodynamické

Vodiče protékané elektrickým proudem se navzájem přitahují/odpuzují. Rovnoběžné vodiče se navzájem přitahují, když jimi teče elektrický proud ve stejném směru a vzájemně se odpuzují, mají-li proudy ve vodiči opačný směr.

### e) Světelné

Přerušíme-li elektrický proud, v místě přerušení se objeví světelná jiskra; slabší jiskra se také ukáže při opětném uzavření obvodu. Je-li proud dostatečně silný, udrží se tato jiskra ve formě světelného oblouku, není-li ovšem vzdálenost konců vodičů v místě přerušení příliš veliká (obloukové lampy)

### f) Chemické

Prochází-li ponořenými póly v tekutině (elektrolytem) elektrický proud, rozkládá elektrody na chemické sloučeniny. Pochod ustanává se zánikem průchodu elektrického proudu (akumulátory). [2]

### 3 Rozdělení látek podle magnetických vlastností

podle velikosti relativní permeability

- a) diamagnetické
- b) paramagnetické
- c) feromagnetické

#### a) Diamagnetické látky

- nejsou magnetické:  $\mu_R$  menší než 1
- zeslabují původní magnetické pole a od magnetu se odpuzují

Příklady: inertní plyny, voda, zlato, měď, rtuť

#### b) Paramagnetické látky

- chovají se jako slabý magnet:  $\mu_R$  nepatrně větší než 1
- vnějším magnetickým polem nelze zajistit, aby látka zesilovala magnetické pole
- přitahuje se k magnetu a bude přitahovat kovové předměty pouze v přítomnosti mag. pole
- nelze trvale zmagnetovat

Příklady: draslík, sodík, hliník, modrá skalice

#### c) Feromagnetické látky

- výrazně zesilují magnetické pole.
- $\mu_R$  mnohem větší než 1 (řádově i tisíce)

Materiály: železo, kobalt, nikl a jejich sloučeniny s ostatními látkami

Základní vlastnosti

1. Lze z nich pomocí vnějšího magnetického pole vytvořit permanentní magnet
2. Feromagnetismus se projevuje jen tehdy, je-li látka v krystalickém stavu - v kapalném nebo plynném stavu se chovají jako paramagnetika.
3. Pro každou feromagnetickou látku existuje tzv. Curieova teplota, při jejím překročení látka ztrácí feromagnetické vlastnosti a stává se paramagnetikem. [3]

## 4 Pojmy z magnetismu

Teorie indukčního ohřevu je založena na elektrodynamice, vyplývající z Maxwellových rovnic. Tyto rovnice určují vlnový charakter elektromagnetického pole.

### 4.1 Maxwellovy rovnice

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

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

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

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

Kde  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 \cdot c^2} = \frac{1}{4\pi 10^{-7} \cdot c^2} \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ (Fm}^{-1}\text{)}$$

Tyto čtyři rovnice jsou Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru, díky těmto rovnicím se odvozují obecné vlnové rovnice pro šíření elektromagnetického vlnění. Vlnové rovnice se získají aplikací další operace rotace a vektorového počtu na 1. a 2. Maxwellovu rovnici.

$$\text{rot}(\text{rot } \vec{H}) = \text{grad div } \vec{H} - \nabla^2 \vec{H}$$

### 4.2 Vlnové rovnice

První člen rozdílu je roven nule. Tím získáváme vlnové rovnice

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

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

Kde rovnice (5) je magnetická složka vlnových rovnic a rovnice (6) je elektrická složka vlnových rovnic. Tyto rovnice platí v prostředí, kde  $\gamma$ ,  $\mu_0$  a  $\mu_r$  jsou konstanty. Budeme uvažovat prostředí bez volných nábojů ( $\rho = 0$ ), platí tvar rovnice (6):

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

Dále budeme uvažovat dvě prostředí. V prvním prostředí, elektricky vodivé, zanedbáme  $\varepsilon$ :

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

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

Pro druhé prostředí, elektricky nevodivé, zanedbáme  $\gamma$ :

$$\nabla^2 \vec{H} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (10)$$

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

Úpravami rovnic (5) a (7) pomocí vyjádření časových derivací a následnou úpravou se dostáváme k rovnicím pro harmonické elektomagnetické vlnění:

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

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

Pro pravoúhlé souřadnice platí:

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

Pro snazší matematické řešení a názornost uvažujeme tyto jevy jako jednosměrné. To znamená, že  $\hat{H}$  a  $\hat{E}$  již nebudou záviset na všech souřadnicích  $x, y, z$ , ale jen na souřadnici  $x$ . Následně pak:

$$\frac{\partial^2 \hat{H}}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \hat{H}}{\partial z^2} = 0 \quad (14)$$

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

Budeme uvažovat  $\hat{H}$  a  $\hat{E}$  konstantní v každém bodě roviny kolmé k ose  $x$ . Díky tomu zavedem takzvanou rovinnou vlnu, pro kterou platí:

$$k^2 = (\omega^2 \mu \varepsilon - j\omega\mu\gamma) = -j\omega\mu(\gamma + j\omega\varepsilon) \quad (16)$$

$$k = \alpha - j\beta, \quad k^2 = \alpha^2 - 2j\alpha\beta - \beta^2 \quad (17)$$

$k$  – konstanta šíření elektomagnetického vlnění

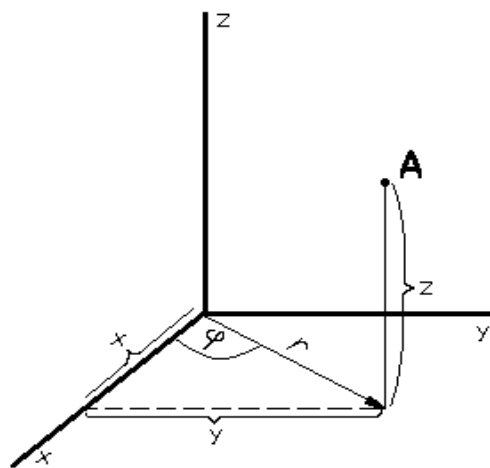
$\alpha$  – fázová konstanta

$\beta$  – měrný útlum

$k$  je konstanta, charakterizující šíření elektromagnetické vlnění v uvažovaném prostředí, kde  $\hat{E}$  a  $\hat{H}$  jsou o harmonickém průběhu s úhlovým kmitočtem  $\omega$ . [4]

### 4.3 Válcové elektromagnetické vlnění

V praxi se vyskytují různé předměty a součásti válcového tvaru, které je nutné indukčně ohřívat. Také válcový tvar má i mnoho cívek a různá vinutí. Proto je nutné uvažovat vlastnosti a zákonitosti pro elektromagnetické vlnění v těchto útvarech. Pro zjednodušení provedeme studii na nekonečně dlouhých válcových útvarech. Tyto jevy potom závisí pouze na jednom rozměru, obvykle na poloměru  $r$ .



Obr.2 Válcové souřadnice [4]

Na Obr. 2 je A libovolný bod určený průvodičem  $r$  (poloměr), úhlem  $\varphi$  a souřadnicí  $z$ . Z obrázku pak lze určit převod mezi rovinnými a válcovými souřadnicemi:

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

Potom pro pravoúhlé souřadnice platí rovnice:

$$\nabla^2 \hat{H} = \frac{\partial^2 \hat{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{H}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \hat{H}}{\partial z^2} \quad (18)$$

Následně pro válcové souřadnice platí rovnice:

$$\nabla^2 \hat{H} = \frac{\partial^2 \hat{H}}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \hat{H}}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \hat{H}}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \hat{H}}{\partial r} \quad (19)$$

Pokud bude jev konstantní pro všechna  $\varphi$  a  $z$  a bude záviset pouze na  $r$ , potom platí:



$$\frac{\partial^2 \hat{H}}{\partial \varphi^2} = \frac{\partial^2 \hat{H}}{\partial z^2} = 0 \quad (20)$$

Výsledný vztah pro náš případ má tvar:

$$\nabla^2 H = \frac{\partial^2 H}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H}{\partial r} = \frac{d^2 H}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dH}{dr} \quad (21)$$

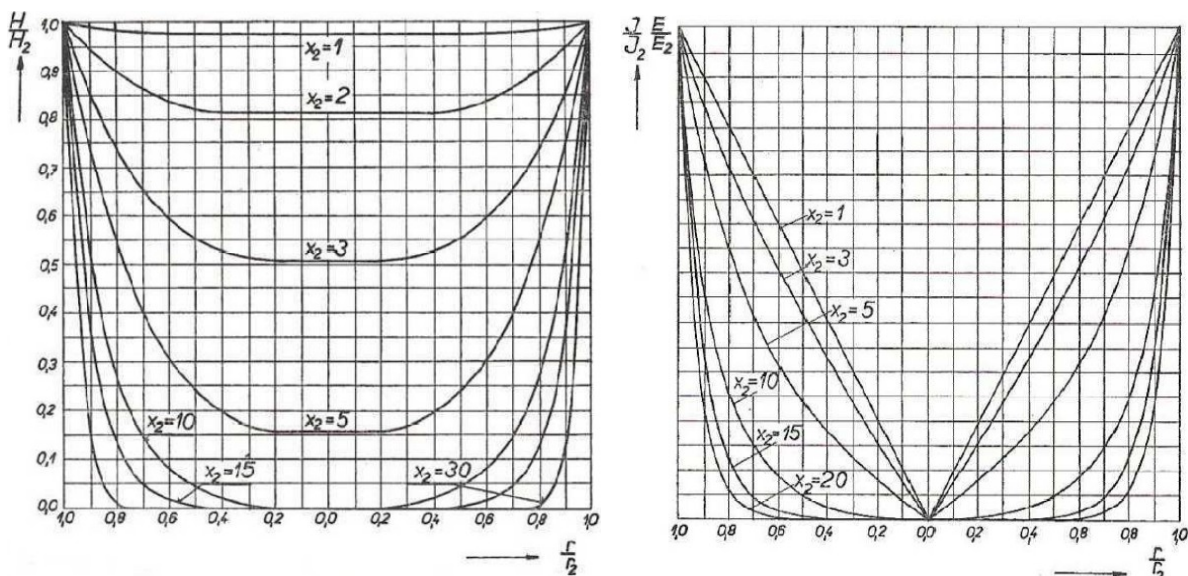
Následným dosazením válcových souřadnic do rovnice pro harmonický průběh  $\vec{H}$  (12) a jejím řešením získáme následující vztah:

$$\hat{H} = C_1 J_0(kr) + C_2 N_0(kr) \quad (22)$$

Obdobný postup bude i pro  $\hat{E}$  s respektováním vazby na  $\hat{H}$  (vypčteno z 1. Maxwellovy rovnice)

$$\hat{E} = \frac{k}{\gamma} [C_1 J_1(kr) + C_2 N_1(kr)] \quad (23)$$

$C_1$  a  $C_2$  jsou integrační konstanty.  $J_1$  a  $N_1$  jsou cylindrické funkce nultého řádu,  $J$  je prvního druhu a  $N$  druhého druhu argumentu  $kr$ . Pro  $\hat{H}$  a  $\hat{E}$  ( $\hat{J}$ ) obecně platí:



Obr.3 Průběhy ve vsázce [4]

Argument  $x_2$  reprezentuje frekvenci ve vsázce (poloměr  $r_2$ ). Čím vyšší hodnota  $x_2$ , tím vyšší

$$\text{kmitočet je ve vsázce: } x_2 = \frac{r_2}{\delta_2} \sqrt{2} \quad [4] \quad (24)$$

Vznik tepla ve vsázce jsme si objasnili, nyní objasním původ rozptylových magnetických polí.

Pro lepší názornost je vše vztaženo na transformátor - principiálně není transformátor nic jiného než soustava vzájemně magneticky vázaných cívek (pro jednoduchost je uvažován transformátor s jedním primárním a jedním sekundárním vinutím, přičemž všechny závěry je možné rozšířit i na složitější systémy).

Při odvozování vyjdeme z *Faradayova zákona elektromagnetické indukce*, který říká, že časová změna magnetického pole vytvoří elektrické pole vírové:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Psi}{dt} \quad (25)$$

Tvoří-li tenký vodič uzavřenou smyčku, indukuje se v něm napětí:

$$u(t) = \frac{d\Psi(t)}{dt} \quad (26)$$

Takováto cívka vytvoří časově proměnné magnetické pole:

$$\Psi(t) = \oint_c u(t) \cdot dt = \oint_c L \frac{di}{dt} \cdot dt \quad (27)$$

Velikost magnetického toku je úměrné pouze velikosti integrálu napětí na cívce, nemusí být přímo úměrné proudu cívkou. Magnetický tok bude stejný jak pro vzduchové cívky, tak pro cívky s jádrem (rozdíl bude pouze v průběhu a velikosti proudu). Sycení jádra transformátoru napájeného ze zdroje napětí je závislé pouze na průběhu tohoto napětí. Pro spřažený magnetický tok cívky dále platí:

$$\Psi(t) = \oint_S \vec{B}(t) \cdot d\vec{S} \quad (28)$$

kde plochu  $S$  uvažujeme jako kolmou plochu na závitů cívky. Přesné vyjádření toku pak:

$$\Psi(t) = \int \vec{B}_{vně} \cdot d\vec{S}_{vně} + \sum_{i=1}^N \int \vec{B}_{pr}(t) \cdot d\vec{S}_{pr} \quad (29)$$

Ze vztahu je vidět, že ne celý magnetický tok se uzavírá přes jádro; část se uzavírá také přes okolí jádra (nejčastěji vzduch). Tento úbytek od hlavního (pracovního) toku nazýváme rozptylovým tokem. Reálný stroj složený z feromagnetických materiálů má malý rozptyl (magnetická vodivost materiálu je mnohonásobně vyšší než magnetická vodivost okolí) a je tak zanedbatelný. [5]

Pro sinusové průběhy se vztahy zjednoduší na

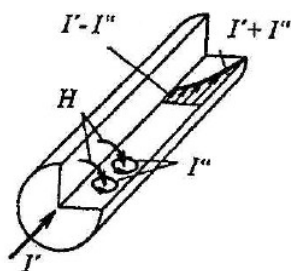
$$U_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 \cdot \Phi_m \cdot f \cdot N_2 \quad (30)$$

Pro sekundární vinutí o jednom závitě platí:

$$U_2 = 4,44 \cdot \Phi_m \cdot f \quad \text{sekundární proud } I_2 \text{ přibližně } I_1 N_1 \quad (31)$$

## 5 Elektrický povrchový jev

Cívka pece je vinuta zpravidla z měděné trubky obdélníkového průřezu (chlazení vodou), kterou prochází proud pracovního kmitočtu. Vnitřní povrch cívky vyzařuje do své dutiny elektromagnetické vlnění, které dopadá kolmo na povrch vsázky, je jí pohlcováno a elektromagnetická energie se mění na energii tepelnou. Kdyby se proud cívkou s časem neměnil, rozložení proudové hustoty  $J$  je po průřezu rovnoměrné – povrchový jev nevznikne. Ten bude tím výraznější, čím rychlejší je časová změna proudu, resp. proudové hustoty.

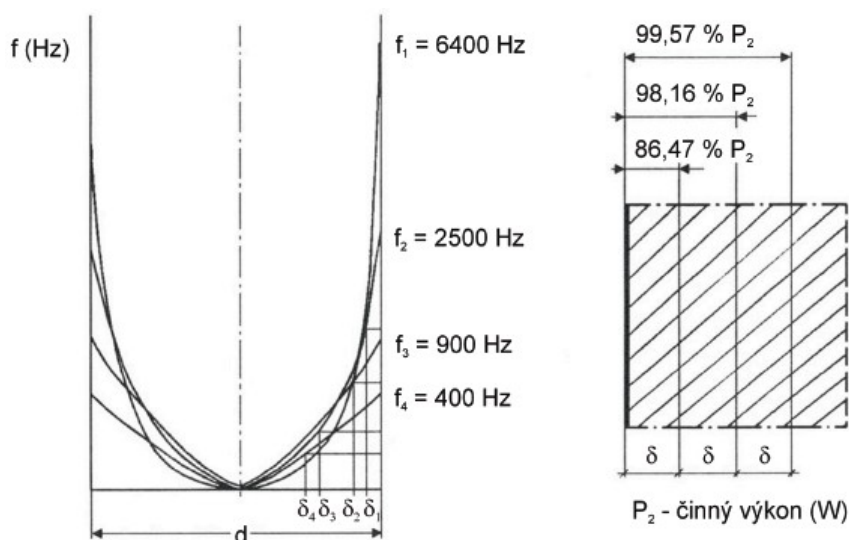


U elektrického povrchového jevu indukuje magnetické pole proudu ve vodiči vířivé proudy, které se uzavírají a superponují s proudem ve vodiči. Při povrchu vodiče se tak výsledná proudová hustota zvětší, v jeho ose se zmenší, viz *Obr. 4*. Tento jev nazýváme skin efektem. [6]

*Obr.4 Vířivé proudy ve vodiči [6]*

Vysokofrekvenční elektromagnetické pole se ve vodivých materiálech rychle tlumí. Hloubkou vniku rozumíme vzdálenost, na které se v daném materiálu amplituda veličin pole utlumí  $e^{-1}$ , kde  $e$  je Eulerovo číslo. Tato hloubka se označuje  $\delta$  a speciálně pro vodiče s harmonickým proudem platí:

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \quad (m, \Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}, rad \cdot s^{-1}, H \cdot m^{-1}) \quad (32)$$

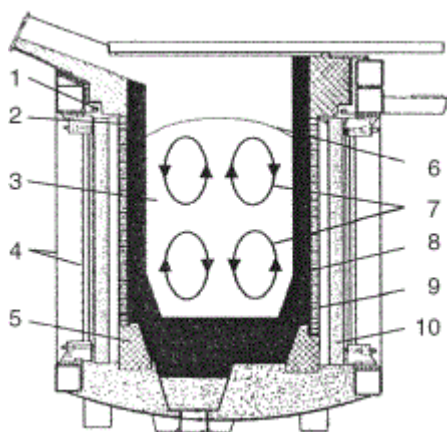


Obr.5 Závislost hloubky vniku na kmitočtu a celkový výkon v vsázce [6]

Pro hloubku vniku existují ještě další dvě definice, jedna z nich ji popisuje jako vzdálenost, na které se vlna utlumí na 36,78% a dopadající vlnění se utlumí v hloubce  $6\delta$ . Druhá definice říká, že v hloubce  $\delta$  vzniká 86,47% naindukovaného tepla. [6]

Může nastat jev, při kterém se vsázka neohřívá, ale je odběr elektrické energie – jev, nazývaný se elektromagnetická průzařnost. Nastává při nevhodně zvolené frekvenci vzhledem ke geometrickému tvaru vsázky. [1]

## 6 Indukční kelímkové pece

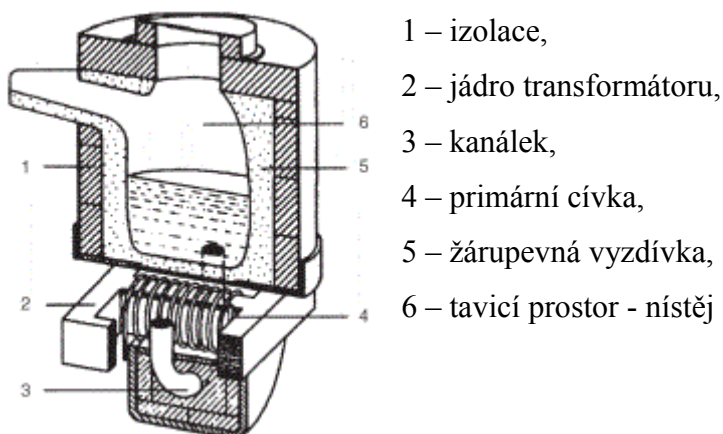


Obr.6 Konstrukce pece [1]

Konstrukce pece

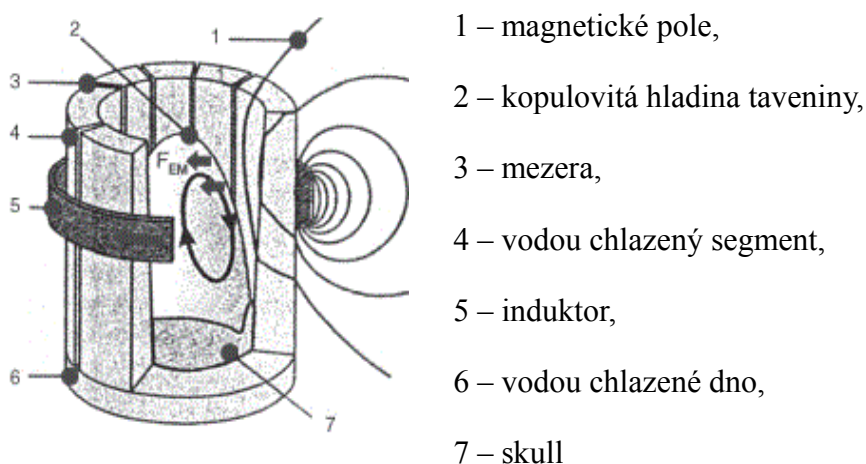
- 1 – kroužek spojený nakrátko,
- 2 – vodou chlazený prsteneček,
- 3 – tavenina,
- 4 – ocelový plášť pece,
- 5 – betonový prsteneček,
- 6 – kopulovitá hladina taveniny,
- 7 – pohyb taveniny,
- 8 – kelímek,
- 9 – induktor,
- 10 – svazek tr. plechů

Na *Obr. 6* je zjednodušeně naznačena kelímková indukční pec, která se používá zejména pro tavení oceli. Na vnější straně keramického kelímku je vodou chlazený induktor, napájený z měniče kmitočtu. V důsledku indukovaných vířivých proudů a elektromagnetických sil dochází uvnitř kelímku k ohřevu a intenzivnímu víření materiálu, což se projevuje i kopulovitým vzdutím horní hladiny. Pohyb taveniny zaručuje rovnoměrnost a také teplotní homogenitu vsázky.



*Obr.7 Kanálková pec [1]*

Na *Obr. 7* je kanálková pec, určená k tavení neželezných kovů. Tavenina je v nístěji s žáruvzdornou vyzdívkou. Pod nístějí je uložena primární indukční cívka, navinutá na feromagnetickém jádru. Induktor je tvořen jedním nebo několika kanálky, které jsou vyústěny do taveniny. Roztavený kov uvnitř kanálek tvoří sekundární závit nakrátko a působením elektromagnetických sil proudí z kanálek do taveniny, takže vsázka je intenzivně promísena.



*Obr.8 Kelímková pec s chladnými stěnami [1]*

Na *Obr. 8* je princip indukční kelímkové pece s chladnými stěnami (tzv. studený kelímek), která je vhodná pro tavení jak kovových, tak i nekovových materiálů s vysokým bodem tání. Pracovní prostor je tvořen z dutých měděných, vodou chlazených segmentů, které jsou navzájem odděleny tenkou mezerou. Induktor je napájen z měniče kmitočtu. Dno kelímku je rovněž chlazeno vodou.

V důsledku velkého teplotního rozdílu mezi taveninou a stěnami kelímku, se na vnějším povrchu taveniny vytvoří tuhá tenká vrstva, tzv. skull, takže tavenina zůstává oddělena od postranních segmentů. Tyto pece jsou založeny na technologii SMT (Skull-Melting-Technology – tavicí technologie skull). Skull chrání cívku i dno od vysoké teploty taveniny. Tavicí teplota takto tavených materiálů je vysoká (až 3 000 °C).

Tento typ pecí se používá např. při výrobě oxido-keramických materiálů, materiálů na bázi titanu a hliníku, skleněných materiálů a speciálních skel, laserových krystalů a pro výrobu monokrystalických křemíkových polovodičů, a různých speciálních slitin. [7]

## 7 Rozptylová pole indukčních kelímkových pecí

Prochází-li cívku střídavý proud, vznikne vně cívky magnetické pole, které se uzavírá vně cívky, jak jsem uvedl v kapitole 4.

V okolí pece jsou obvykle různé ocelové konstrukce. Kdybychom nechali toto rozptylové pole volně působit, procházel by magnetický tok těmito konstrukcemi a zahříval by je. To by vyvolalo nežádoucí ztráty, které by snižovaly elektrickou účinnost pece, potažmo eventuální následné mechanické deformace konstrukcí vlivem tepla. Proto se nežádoucí magnetický tok vně pece omezuje následujícími způsoby: dobře vodivým válcovým pláštěm sousedícím s cívku nebo svazky transformátorových plechů vně cívky.

### 7.1 Elektricky vodivý stínící plášť

Pro větší názornost předpokládejme, že magnetické indukční siločivky v dutině cívky a stínění jsou rovnoběžné s její osou. Ve skutečnosti se u konců cívek rozbíhají a protínají cívku i stínění. Výrazy pro vlastní a vzájemnou indukčnost (pro výpočty), vycházejí ze skutečného rozložení magnetického pole a předpoklad rovnoběžnosti indukčních siločivky nevnese chybu.

Skutečná cívka i stínění jsou zde nahrazeny sousedními válci o nulové tloušťce, *Obr. 10*, které mají náhradní průběhy  $d_c$ ,  $d_v$ ,  $d_s$ . Délky jsou potom  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$ . Pro zjednodušení výrazů uvažujeme hloubku

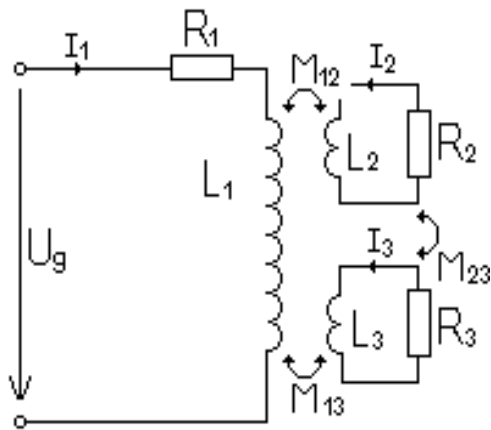
vniku naindukovaných proudů velmi malou proti poloměru. Potom platí vztahy pro náhradní průběhy:

$$d_c = d_1 + \delta_1 \quad \text{pro cívku} \quad (33)$$

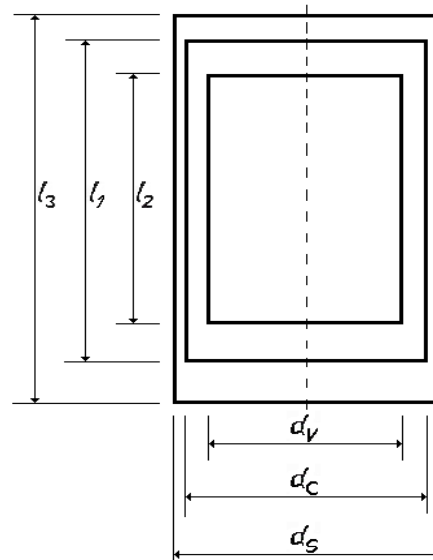
$$d_v = d_2 - \delta_2 \quad \text{pro vsázku} \quad (34)$$

$$d_s = d_3 + \delta_3 \quad \text{pro stínicí plášť} \quad (35)$$

Tato soustava tří sousých válců lze popsat ekvivalentním elektrickým obvodem, *Obr. 9*

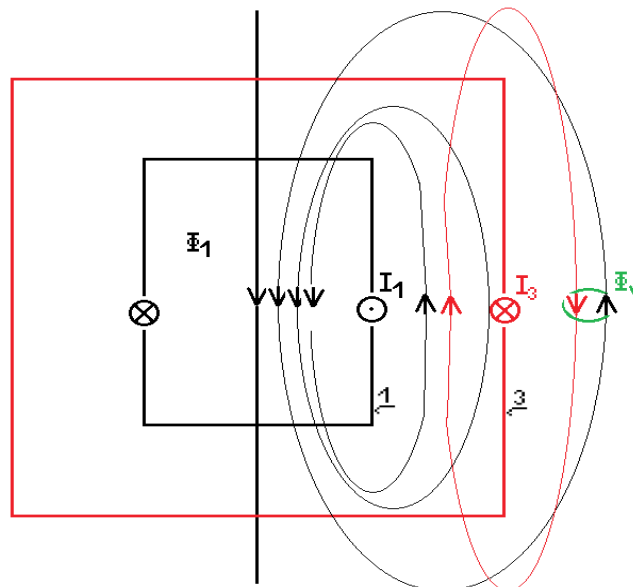


*Obr.9 Elektrické schéma [1]*



*Obr.10 Tři sousé vodivé válce [1]*

Kde  $U_g$  je napájecí napětí;  $L_1, L_2, L_3$  jsou vlastní indukčnosti primární cívky, vsázky a stínění; odpory  $R_1, R_2, R_3$  představují činný odpor primární cívky, vsázky a stínění;  $M_{12}, M_{13}, M_{23}$  vzájemné indukční vazby



*Obr.11 Nákres rozptylových toků se stínicí pláštěm*

Tento druh stínění využívá Lorentzův zákon a elektromagnetickou indukci. Díky tomu pole naindukované do stínícího pláště, působí proti poli vyvolané induktorem. Dochází tak k superpozici těchto dvou polí a následkem toho se sníží velikost magnetického pole vně stínícího pláště, což odstíní pec.

$$\overline{\Phi}_Z = \overline{\Phi}_{II} - \overline{\Phi}_{I3} \quad (36)$$

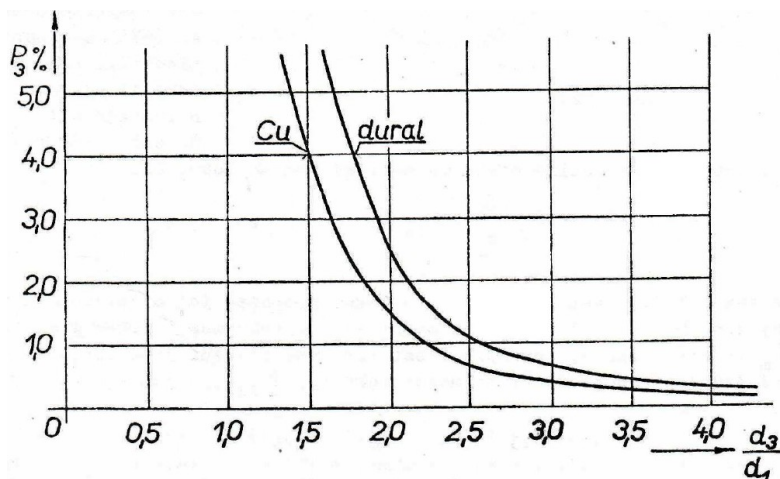
Dalším důsledkem je částečné snížení magnetického pole uvnitř induktoru, které celkově snižuje elektrickou účinnost ohřevu. Výsledné pole pak ve stínění naindukuje napětí  $U_3$ :

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

Výsledek znamená, že ve stínění se vytvoří právě takové napětí, aby se ve stínícím válci vytvořil proud  $I_3$  procházející přes odpor  $R_3$  stínění a působil proti rozptylovému toku vyvolanému induktorem, tedy stíní.

Pro účinné použití stínění s vodivým pláštěm je doporučeno použít materiál s dobrou elektrickou vodivostí, např. měď, dural. Ten se pak umístí vně induktoru tak, aby vnitřní průměr stínícího pláště byl dvojnásobkem vnitřního průměru induktoru. Pro minimální ztráty se volí optimální tloušťka stínícího pláště  $d_{opt} = \delta \cdot \pi / 2$ . Někdy se volí větší, je pak mechanicky odolnější v provozu. Při této tloušťce je elektrický odpor minimální a ztráty ve vodivém plášti jsou:

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



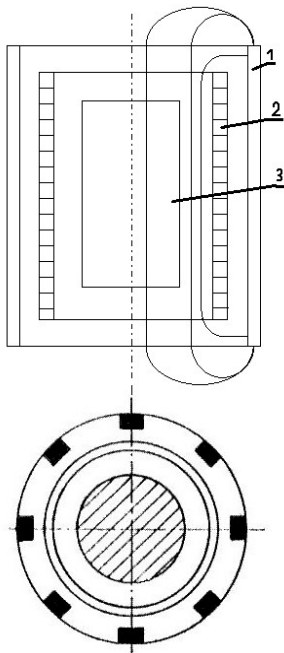
Obr.12 Ztráty ve stínícím plášti z mědi a duralu [1]

Na svislé ose jsou ztráty ve stínění  $P_3$ , udávané procenty z příkonu pece.

Ztráty ve stínění se zmenšují se zvětšujícím se poloměrem pláště a cívky – stínění zvětšuje rozměry pece a pec zaujímá více prostoru.



## 7.2 Stínění pláštěm ze svazků transformátorových plechů



Převážná část magnetického toku, buzeného cívkou, se uzavírá vně cívky magneticky dobře vodivou cestou. Zařazením magneticky vodivých svazků (1 na obr.13) se zmenší odpor pro magnetický tok, takže ten poněkud vzroste. Zvětší se vlastní indukčnost  $L_1$  pecní cívky (2) na  $L_1'$ , indukčnost vsázky (3)  $L_2$  na  $L_2'$  a tím se i změní vzájemná indukčnost  $M_{12}$ .

Pro dimenzování magnetického jádra je rozhodující výsledný magnetický tok  $\Phi_z$  buzený cívkou a zeslabený působením vsázky (viz vodivý stínící plášť). Hlavní ztráty v mag. materiálech jsou:

Obr.13 Návrh stínění svazků s tr. plechy [1]

### a) Ztráty vířivými proudy

$$P_v = \frac{4}{3} \cdot d^2 \cdot B^2 \cdot f^2 \cdot \frac{V}{\rho} \quad \text{- důsledek elektrické vodivosti materiálu} \quad (39)$$

$d$  – tloušťka feromagnetika,  $V$  – objem feromagnetika,  $\rho$  – rezistivita feromagnetika,

$B$  – indukce mag. pole,  $f$  – frekvence mag. pole

### b) Hysterézní ztráty

$$P_h = f \cdot V \cdot S_s \quad \text{- důsledek cyklického magnetování materiálu} \quad (40)$$

$f$  – frekvence mag. pole,  $V$  – objem feromagnetika,  $S_s$  – plocha hysterézní smyčky

Další, zanedbatelné, ztráty jsou přídavné a měrné. Přidáním křemíku do materiálu se sníží celkové ztráty.

Důležité je dimenzování zvoleného materiálu na pracovní kmitočet a kontrolu hodnoty dovolené magnetické indukce při pracovním kmitočtu pece a velikost oteplení (Curieova teplota), důležité pro zachování vlastností plechů v pracovním prostředí. Překročením těchto mezí, dochází k výrazným změnám mag. vlastností a stínění neplní svou funkci podle požadovaných parametrů. [1]

Pro porovnání stínění pecí, jsem vybral za příklad z tabulky [1] tyto hodnoty:

výkon 550kW, 825Hz

Tab.1 [1]

	Pec se stínícím pláštěm	Pec bez stínění	Pec s jádrem vně cívky
$I_3$ [A]	3240	3120	3090
$N_1$	22,9	22,3	21,9
$Q_1$	13,05	12,5	12,44
$I_g$ [A]	8,84	8,8	8,88
$\eta$ [%]	67	71	71,6

$I_1$  je proud ze zdroje,  $N_1$  počet závitů primární strany,  $Q_1$  jakost obvodu primární strany  $Q_1 = \frac{\omega L_1}{R_1}$

$I_g$  proud ze zdroje,  $\eta$  celková účinnost pece.

Pec se stínícím pláštěm vyžaduje cívku s vyšším počtem závitů a větší kompenzaci (kondenzátorovou baterii) než pec s jádrem. Elektrická účinnost je u pece s vodivým pláštěm nižší než u pece se svazky tr. Plechů, ale ekonomicky levná varianta stínění. Provední indukční kelímkové pece se železným jádrem je technicky dokonalejší, zároveň je dražší a hmotnější.

Malé pece s obsahem vsázky do 100 – 250 kg se zpravidla konstruují s vodivým pláštěm a větší pece s transformátorovými plechy vně cívky. [1]

## 8 Využití rozptylového toku v praxi

### 8.1 Zjišťování vad hotových výrobků pomocí prášku

#### Princip metody

Vhodným zmagnetováním feromagnetického materiálu dojde k jeho magnetickému nasycení. Případná vada v materiálu má jiné magnetické vlastnosti - většinou bývá nemagnetická (vzduch v trhlině, struska, plyn v póru). V místě vady dochází k deformaci magnetického pole, jeho siločáry vystupují nad povrch. Vzniká tzv. rozptylový magnetický tok, který je nositelem informace o místní změně magnetických vlastností. Na povrch materiálu se nanáší jemný feromagnetický prášek, jenž se magneticky přichytí na povrch, avšak pouze v místě rozptylového toku. Prášek na povrchu vytváří indikaci, zobrazující reliéf rozptylového toku způsobené vadou. Indikace se hodnotí na základě vizuálního vjemu barevného nebo jasového kontrastu. Detekční schopnost metody začíná při šířce vady jednotek tisícín milimetru. [8]

Magnetické testování je nejpoužívanější metodou nedestruktivního defektoskopie materiálu

(NDT). Vzhledem ke své relativní jednoduchosti a nenáročnosti na provádění je jednou z nejdůležitějších metod i při servisu provozovaných zařízení. Tímto jsou zjišťovány povrchové a podpovrchové vady typu trhlin, prasklin, pórů, přeložky u výkovků apod. feromagnetických materiálů. Pro jiné materiály nelze použít. [8]

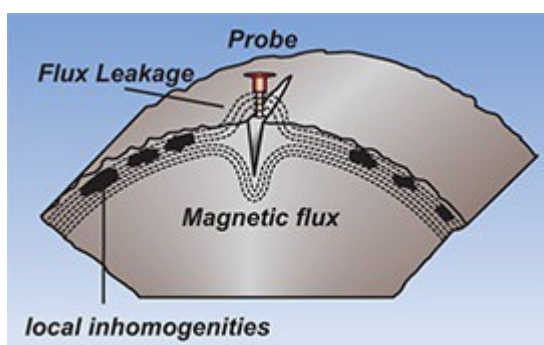
#### Zviditelnění rozptylových polí

Zviditelnění rozptylových polí je založeno na pokrytí tělesa barevným nebo fluorescenčním feromagnetickým práškem. Pokrytí práškem lze provést suchou metodou s ručním nebo elektrostatickým „naprašováním“ (zrna od 40 do 400 um) a nebo mokrou metodou (zrna od 1 do 40 um) s poléváním, nástříkem ze spreje, stříkací pistolí nebo ponořením do suspenze prášku v oleji, vodě nebo jiné kapalině. V místě vady je nad objektem rozptylové magnetické pole a na částice prášku působí síla jež je přitahuje na místo největší koncentrace siločar. Při suché metodě mají částice vyšší hodnotu permeability v porovnání s mokrou metodou a zkoušení je citlivější na podpovrchové a rozsáhlé necelistvosti. Indikace vad se vyhodnocuje vhodným osvětlením povrchu. Při fluorescenčním pokrytí se osvětlení obvykle realizuje zdrojem monochromatického ultrafialového UV-A záření 365 nm. Na automatizované měření se vyrábějí sensorová pole tvořená větším počtem Hallových sond, kdy se magnetizace realizuje stejnosměrným proudem.

Detekční prášek je buďto barevný nebo mnohem častěji používán fluoreskující a pak jsou indikace zřetelné pod UV světlem. [9]

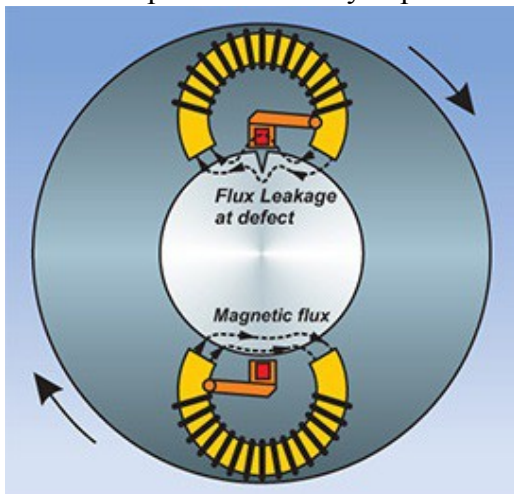
## 8.2 Zjišťování vad hotových výrobků pomocí sond

### Metoda střídavých toků



Obr.14 Zjišťování vad pomocí sondy [10]

Metoda střídavých rozptylových toků soustřeďuje magnetický tok na povrchu materiálu a je tak obzvláště citlivá pro detekci malých povrchových vad od hloubky cca 100  $\mu\text{m}$ .

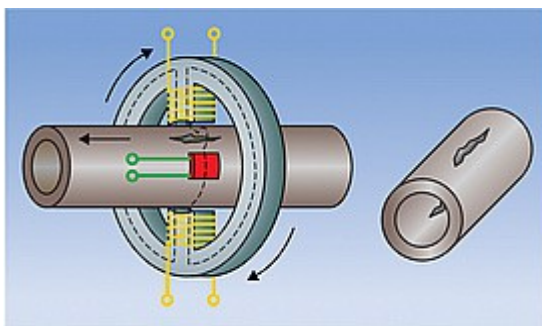


Obr.15 Zjišťování vad rotací [10]

Dvě rotující jha vytvářejí magnetický tok, integrované snímače magnetického pole na místě s vadou zaznamenají vystupující rozptylový tok.

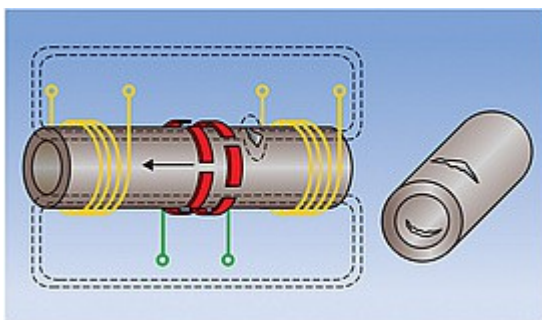
#### Metoda stejnosměrných toků

Metoda stejnosměrných rozptylových toků magnetizuje celý průřez materiálu. Díky tomu lze detekovat vady na vnějším i vnitřním povrchu trubky. Detekce vnitřních vad se snižuje v závislosti na zvyšující se tloušťce stěny.



Obr.16 Metoda stejnosměrných toků – podélně [10]

Pro detekci podélných vad se magnetický tok vytváří cirkulárně dvěma rotujícími jhy. Rovněž rotující snímače magnetického pole na místě s vadou zaznamenávají vystupující rozptylový tok.

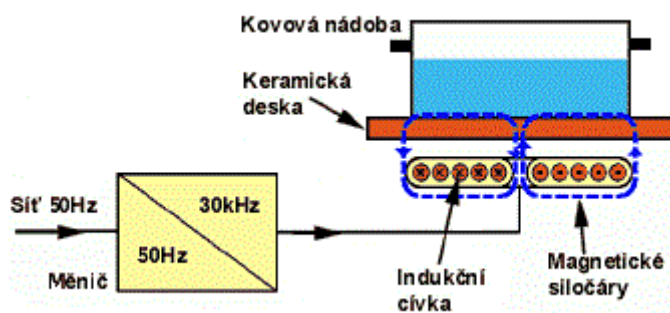


Obr.17 Metoda stejnosměrných toků – příčně [10]

Pro detekci příčných vad se magnetický tok vytváří dvěma stacionárními průchozími cívkami, umístěnými v podélném směru. Několik stacionárních, po obvodu umístěných snímačů magnetického pole detekuje vystupující rozptylový tok. [10]

Průmyslové využití je realizováno zejména v letectví, kontrole trubek a drátů, apod.

## 9 Pole indukčního vařiče



Obr.18 Princip vařiče [11]

Primárním obvodem sklokeramické varné indukční desky je plochá cívka (induktor) uložená pod sklokeramickou deskou, zatímco sekundárním obvodem je varná nádoba. Ze spotřebitelské sítě je odebrán proud o frekvenci 50 Hz. Měníčem je převeden na hodnotu 20 – 50 kHz a dodán ploché indukční cívkce pod sklokeramickou deskou. Cívkou začne procházet vysokofrekvenční proud a zároveň se kolem ní vytváří silné magnetické pole. Umístěním varné nádoby na varnou zónu desky získáváme dva obvody vázané indukční vazbou. Dno nádoby supluje sekundární cívku, kterou prochází indukční tok generovaný primární cívkou. Ve dnu varné nádoby zhotoveném z elektricky vodivého a magnetického materiálu dochází ke vzniku vířivých proudů. Následkem je ohřátí dna nádoby, které přímo předává tepelnou energii obsahu varné nádoby. Nejjednodušším způsobem pro stanovení vhodnosti varné nádoby je přiložení permanentního magnetu ke dnu nádoby. Magnet se přichytí, protože

dno nádoby musí být magnetické.

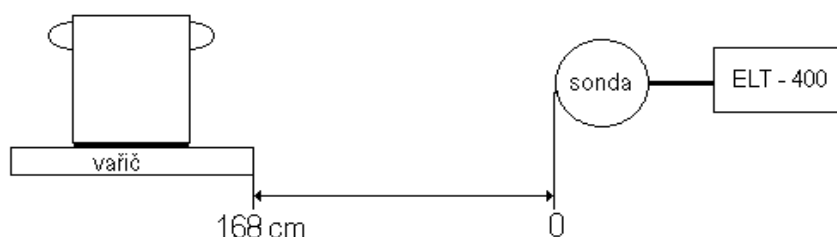
Hlavní výhodou tohoto způsobu ohřevu je především vysoká účinnost, protože vlastní elektronika spotřebuje maximálně 6 % energie a ztráty v indukční cívice a dalších konstrukčních prvcích nepřesahují 4 %. Z toho vyplývá, že zhruba 90% elektrické energie je přeměněno na teplo ve dně varné nádoby. Vaření probíhá rychleji při podstatně menší spotřebě elektrické energie, která se dá v průběhu procesu regulovat.

Nevýhodou tohoto způsobu vaření je nutnost použít pro vaření jen nádobí určené pro indukční ohřev. Vhodné je nádobí z plechu, litiny a oceli (magneticky vodivé), naopak u nádobí ze hliníku, skla, keramiky a dalších podobných materiálů k ohřevu nedojde. [11]

### 9.1 Měření na indukčním vaříči

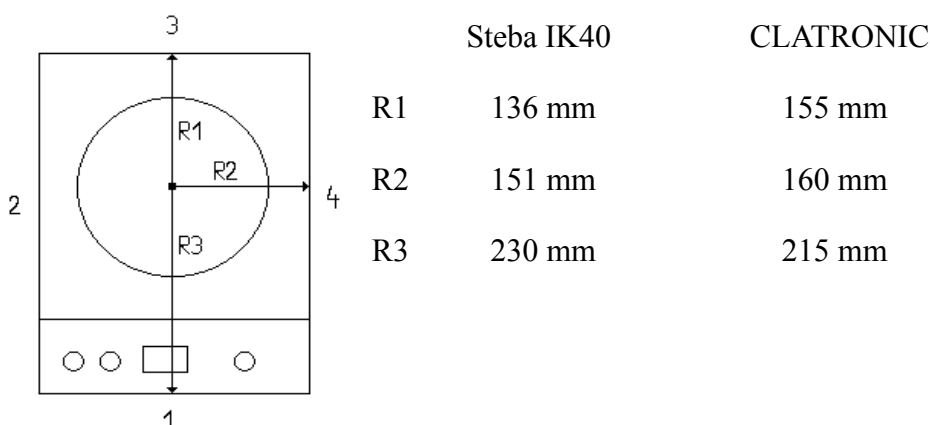
Při měření bylo měřeno ELT-400 (měřicí přístroj s sondou) a měřené byly 2 vysokofrekvenční vaříče Steba IK40 a CLATRONIC, rychlovarná konvice a infrazáříč.

nákres měření



Obr.19 Nákres měření

rozměry vaříčů



Obr.20 Nákres rozměrů vaříče

V měření není důležité, jak vysoko se nachází sonda nad vaříčem, protože velikost mag. pole vaříče závisí na jednom rozměru - vzdálenosti obsluhy od vaříče.

## Naměřené hodnoty

vařič Steba IK40, typ MC-SF207B, 2000W

Tab.2

cm \ str	Strana 1	Strana 2	Strana 3	Strana 4
0	9921	22911	22401	21641
1	8800	20103	19753	18963
2	8041	17809	17502	16621
3	7222	15801	15850	15421
4	6579	14031	14126	14163
5	6002	12600	12653	12702
6	5520	11300	11259	10458
7	5102	10021	10250	9361
8	4721	9033	9231	8493
18	2479	3783	3953	3774
28	1603	2083	2206	2179
38	1210	1371	1483	1524
48	968	1034	1131	1209
58	641	744	830	950
68	280	371	445	550
78	139	177	211	228
88	98	122	138	128
98	82	93	104	99
108	73	77	86	86
118	66	68	75	77
128	62	62	68	71
138	59	57	63	66
148	55	53	58	62
158	54	50	55	59
168	52	48	52	56

vařič CLATRONIC, typ EKI 3005, 1800W

Tab.3

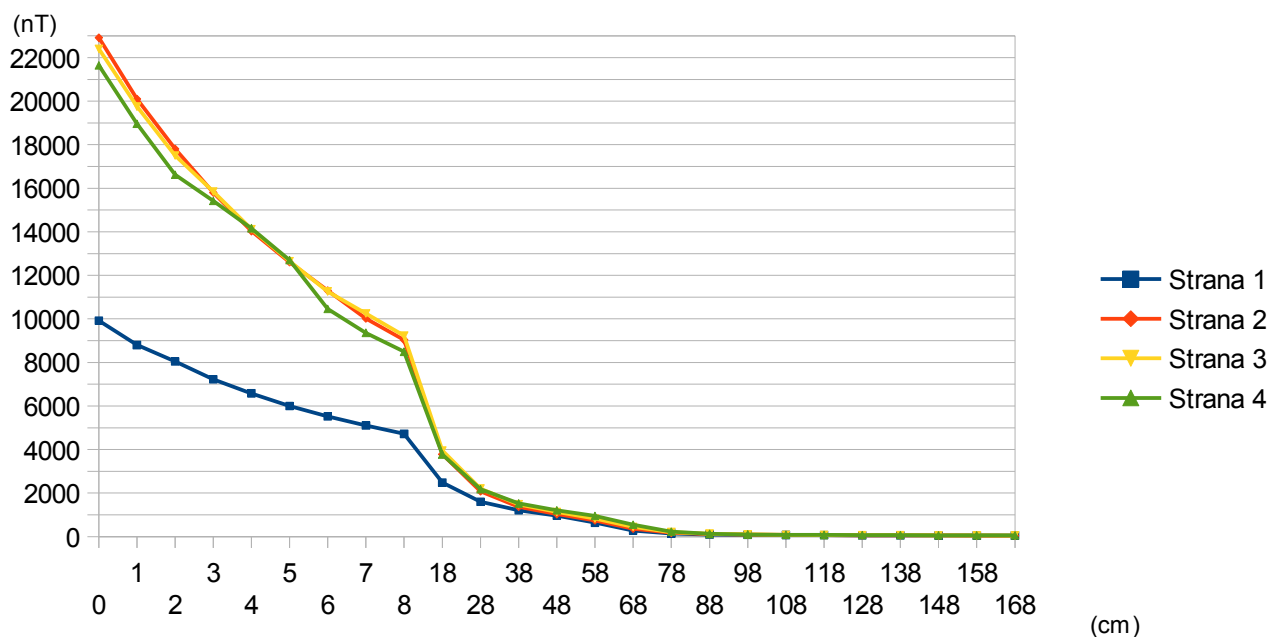
cm \ str	Strana 1	Strana 2	Strana 3	Strana 4
0	5020	8491	8430	8700
1	4545	7488	7453	7634
2	4146	6853	6591	6768
3	3776	5817	5915	6028
4	3445	5233	5353	5423
5	3153	4659	4801	4855
6	2901	4211	4341	4392
7	2652	3771	3947	3922
8	2457	3435	3618	3573
18	1223	1505	1615	1555
28	709	832	892	850
38	485	560	591	553
48	369	447	468	427
58	217	356	364	325
68	162	155	159	148
78	127	103	105	113
88	81	73	74	78
98	61	55	56	60
108	51	48	48	51
118	44	44	44	45
128	41	40	41	41
138	38	38	39	39
148	37	37	37	37
158	36	37	37	36
168	35	36	36	35

V následující tabulce jsou doporučené maximální hodnoty podle ICNIRP pro rozmezí frekvencí v normálním prostředí. Všechno jsou efektivní hodnoty.

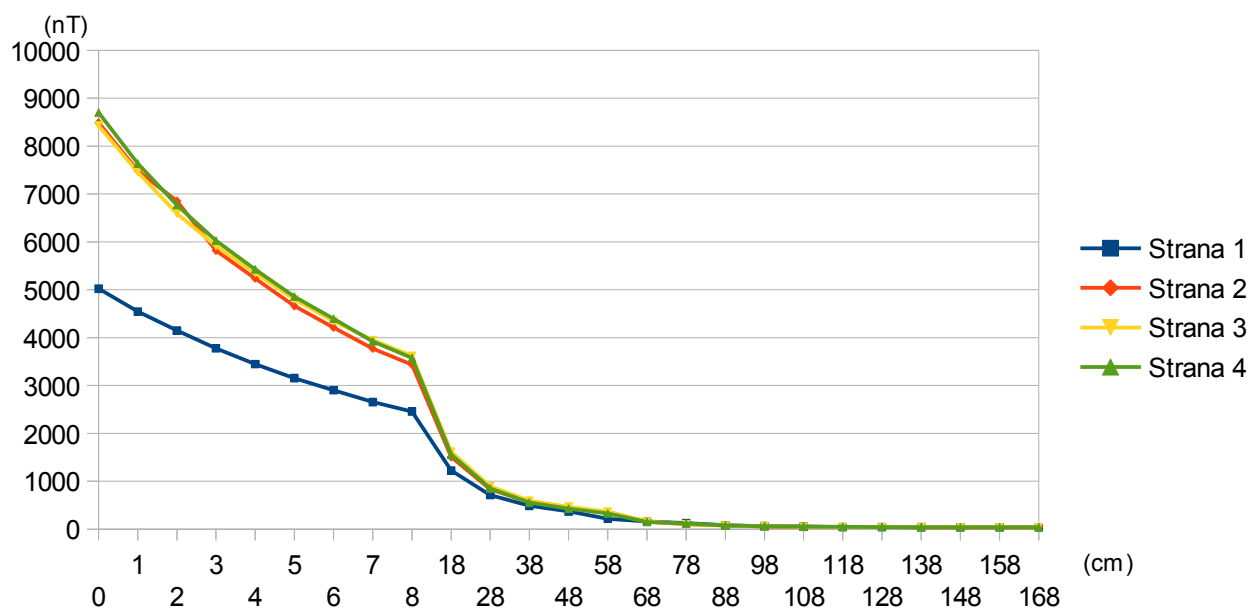
Frequency range	E-field strength E (kV m <sup>-1</sup> )	Magnetic field strength H (A m <sup>-1</sup> )	Magnetic flux density B (T)
1 Hz–8 Hz	5	$3.2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^{-2}/f^2$
8 Hz–25 Hz	5	$4 \times 10^3/f$	$5 \times 10^{-3}/f$
25 Hz–50 Hz	5	$1.6 \times 10^2$	$2 \times 10^{-4}$
50 Hz–400 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	$2.7 \times 10^{-5}$

Obr.21 Referenční hodnoty pro sinusový průběh podle ICNIRP [12]

Níže uvedené grafy ukazují průběh mag. pole v závislosti na vzdálenosti vaříče od měřící sondy.



Obr.22 Graf pro vaříč Steba



Obr.23 Graf pro vaříč CLATRONIC



Několik snímků z průběhu měření:



*Obr.24 Vaříč Steba na počátku měření*



*Obr. 25 Vaříč CLATRONIC při měření*

Na trhu se vyskytuje mnoho vaříčů s různými pracovními frekvencemi od 20 kHz do 50 kHz, což spadá do rozmezí hodnot v pásmu od 3 kHz do 10 MHz. Referenční bod jsem stanovil ve vzdálenosti 30 cm od vaříče, protože v této vzdálenosti je obvykle obsluhován.

Dale jsem pro ilustraci změřil rychlovarnou konvici (2,2 kW) a infrazáříč (1 kW). Varná konvice ohřívala 1l vody ve vzdálenosti 10cm od měřicí sondy. Infrazáříč, s ohledem na svou vysokou povrchovou teplotu, byl vzdálen 20cm od sondy. Oba spotřebiče byly na síťový kmitočet (50 Hz), bez

stínění (když pomíneme nádobu na vodu u konvice).

Změřené magnetická indukce byla u rychlovarné konvice 0.5 – 0.6  $\mu\text{T}$ , u infrazářiče 0.25 – 0.3  $\mu\text{T}$ .



Obr. 26 Rychlovarná konvice



Obr. 27 Infrazářič

Pro sinusové průběhy o frekvenci 25 – 400 Hz je doporučena podle Mezinárodní komise pro ochranu před neionizujícím zářením (ICNIRP) referenční hodnota magnetické indukce na 200  $\mu\text{T}$ . Tyto by neměly být překročeny. [12]

Referenční hodnoty byly stanoveny na základě kombinací elektrického a magnetického pole skrz celém prostorem, kde je lidské tělo relativně malé. Ve většině případů je zdroj polí tak blízko, že celé pole je nejednotné nebo soustředěné do malé části těla. V těchto případech mají výsledky z měření pole být v bezpečných mezích. Pro velmi soustředěný zdroj vzdálený několik centimetrů od těla, je dobré pro velké ozáření stanovit dozimetricky indukované pole případ od případu. Pro vzdálenosti od 20cm výš, se pole stává méně lokální, ale stále nerovnoměrné. V tomto případě je možno určit prostorový průměr podél subjektu nebo jeho části bez překročení referenční hodnoty. Lokální expozice může překročit referenční hodnoty, ale s důležitou podmínkou: Základní omezení nesmí být překročeno. Je povinností standardizačních orgánů, poskytnout další pokyny týkající se specifické expoziční situace, které má být člověk vystaven. [12]

ICNIRP samo upozorňuje, že stanovení referenčních hodnot je pouze na základě matematického modelování a součtu všech polí v daném místě, čímž má být zajištěna maximální ochrana.

## 10 Závěr

Indukční ohřev je progresivní a energeticky úsporná technologie, využívající principu elektromagnetické indukce a tím galvanického oddělení zdroje (induktoru) a ohřívaného předmětu (vsázky). Indukční jednoúčelová zařízení lze snadno zapojit do procesu automatické výroby. Kromě toho se vyrábějí i malé víceúčelové přístroje, jež jsou vhodné pro kusovou výrobu.

V provozu je rozptylové pole nežádoucí jev, a to jeho účinkem na okolí. Jeho působením vzniká nežádoucí teplo v konstrukčních prvcích, proto je snaha ho co nejvíce omezit, až potlačit. Levné, jednoduché a zároveň účinné stínění je z elektricky vodivého materiálu. Účinnější, dražší a hmotnější je stínění svazky transformátorových plechů.

Důležitým bodem této práce je posouzení vlivu rozptylového pole indukčních vaříčů na lidské tělo. Indukční vaříče prodávané na trhu, pracují s frekvencemi od 20 kHz do 50 kHz, referenční hodnota pro pásmo 3 kHz – 10 MHz, do které spadají tyto přístroje, je podle ICNIRP stanovena na 27  $\mu\text{T}$ , což ani jeden vaříč nepřekračuje. V stanoveném referenčním bodě (30 cm od okraje vaříče) jsou tyto hodnoty: 2 $\mu\text{T}$  u vaříče Steba a 0.9 $\mu\text{T}$  u vaříče CLATRONIC. Pouze v těsné blízkosti vaříče značky Steba, se naměřené hodnoty velmi blíží referenční hodnotě a citliví jedinci toto záření můžou pocítit.

Z grafů je vidět, že ovládací elektronika vaříče už sama od sebe dostatečně odstiňuje magnetické pole. Přidáním kovového opláštění (vaříč CLATRONIC) se velikost tohoto pole zmenší na zhruba třetinu, srovnáváno s druhým vaříčem (Steba), který je bez stínění.

Rychlovarná konvice a sálavý panel, oba na síťový kmitočet 50 Hz, nepřekračují stanovenou hodnotu magnetické indukce (200 $\mu\text{T}$ ), dokonce jsou hluboko pod ní.

## 12 Seznam zdrojů

- [1] Langer, E.; Kožený, J. *Elektrotepelná zařízení indukční* Ediční středisko VŠSE Plzeň, 1982
- [2] <http://elektrika.cz/terminolog/eterminologitem.2005-06-13.8801417136/view?searchterm=rozptylov%C3%A9%20OR%20magnetick%C3%A9%20OR%20pole>
- [3] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/295-magneticke-vlastnosti-latek>
- [4] Langer, E.; Kožený, J. *Elektrotepelná zařízení indukční: Základy teorie, výpočty a konstrukce* Ediční středisko VŠSE Plzeň, 1982
- [5] <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05032/index.html>
- [6] Mayer, D. *Teorie magnetického pole* Tiskové středisko ZČU, 2001
- [7] [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=25267](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25267)
- [8] <http://www.gamalux.cz>
- [9] [www.ndt.cz](http://www.ndt.cz)
- [10] <http://www.foerstergroup.cz/Metoda-rozptylovych-toku.96.0.html>
- [11] [http://www.techmania.cz/edutorium/art\\_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=456c656b74726f6d61676e657469636be120696e64756b6365h&key=463](http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=456c656b74726f6d61676e657469636be120696e64756b6365h&key=463)
- [12] <http://www.icnirp.org/en/frequencies/low-frequency/index.html>  
*ICNIRP GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING  
ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS (1 HZ – 100 KHZ)  
PUBLISHED IN: HEALTH PHYSICS 99(6):818-836; 2010*