

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Analýza vlivu relativní permeability na ohřevy
elektromagnetickou indukcí**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Michal JIRÁK
Osobní číslo: E09B0223P
Studijní program: B2644 Aplikovaná elektrotechnika
Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika
Název tématu: Analýza vlivu relativní permeability na ohřevy elektromagnetickou indukcí
Zadávající 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. Stručně popište teorii dané problematiky se zaměřením na ohřevy elektromagnetickou indukci.
2. Objasněte vliv relativní permeability ve vztahu k hloubce vniku na indukovaných proudů do vsázky.
3. Stanovte optimální fyzikální model, proveďte jednoduchý analytický výpočet a k němu proveďte praktickou simulaci v simulačním programu.
4. Vysvětlete získané výsledky a porovnejte je s teoretickými předpoklady z bodu 2.
5. Uveďte závěry pro praxi a zhodnoťte použití numerického modelu.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

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

Seznam odborné literatury:

1. LANGER E., KOŽENÝ J.: Elektrotepelná zařízení indukční. Plzeň, VŠSE 1982.
2. RADA J., a kolektiv: Elektrotepelná technika. Praha, SNTL, ALFA 1985.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Oldřich Kroupa**
Katedra elektroenergetiky a ekologie


Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jaroslav Bublík**
Úsek prorektora pro strategii a rozvoj

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na analýzu relativní permeability a její vliv ve stínícím materiálu indukčních pecí. Pomocí fyzikálního modelu a simulace ukazuje vliv stínění induktoru ze svazků transformátorových plechů o vysoké hodnotě μ_r .

Klíčová slova

Elektromagnetická indukce, kelímková pec, relativní permeabilita, stínění indukční pece, indukční ohřev

Abstract

The presented bachelor thesis is focused on the analysis of relative permeability and its influence in the shielding material of induction furnaces. Using the physical model and simulation shows the effect of transformer sheets with high value μ_r .

Key words

Electromagnetic induction, crucible furnace, relative permeability, shielding of furnaces, induction heating

Prohlášení

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

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.

V Plzni dne 6.6.2012

Michal Jirák

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Oldřichu Kroupovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále pak rodině, která mě vždy podporovala a v neposlední řadě všem, kteří se jakkoliv podíleli na rozvoji mého vzdělání.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1. OBECNÁ CHARAKTERISTIKA INDUKČNÍCH OHŘEVŮ.....	12
2. TEORIE INDUKČNÍHO OHŘEVU.....	13
2.1. ODVOZENÍ ROVNIC	13
2.2. ODVOZENÍ ELEKTRICKÉ SLOŽKY	15
3. VLIV RELATIVNÍ PERMEABILITY NA OHŘEV	18
4. INDUKČNÍ KELÍMKOVÁ PEC	20
4.1. CHARAKTERISTIKA KELÍMKOVÉ PECE	20
4.2. STÍNĚNÍ KELÍMKOVÝCH PECÍ	23
4.3. STÍNĚNÍ ZE SVAZKŮ TRANSFORMÁTOROVÝCH PLECHŮ	25
4.4. ZTRÁTY VE STÍNÍCÍM PLÁŠTI	26
5. MĚŘENÍ.....	28
5.1. FYZIKÁLNÍ MODEL.....	28
5.1.1 měření bez stínění	33
5.1.2 měření se stíněním	36
5.2. SIMULACE.....	38
5.2.1 simulace bez stínění	39
5.2.2 simulace se stíněním	41
5.3. POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ A SIMULACE.....	43
6. ZÁVĚR	45
7. SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	46

Úvod

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na analýzu relativní permeability a její vliv ve stínícím materiálu indukčních pecí. Indukční ohřev je dnes nedílnou součástí těžkého průmyslu, neboť dosahuje potřebných parametrů pro tavení velkých vsázek a je dobře regulovatelný. Pro zefektivnění a minimalizaci ztrát se indukční pece opatřují stíněním. V této bakalářské práci se zaměřím na kelímkovou pec se stíněním ze svazků transformátorových plechů s velkou relativní permeabilitou.

Nejprve se stručně zaměřím na charakteristiku indukčních ohřevů včetně teorie vlivu relativní permeability na vlastnosti vsázky. Popíšu různé vztahy, díky kterým lze charakterizovat elektromagnetické pole. Další část se bude zabývat popisem kelímkové pece a jejím stíněním. Konkrétněji popíšu stínění pomocí svazků z transformátorových plechů, jež jsou pro tuto funkci výhodné. V poslední fázi teoretické předpoklady ověřím simulací a měřením na fyzikálním modelu, a to pro případy bez stínění a se stíněním. Nakonec naměřené výsledky porovnáám a vyvodím závěry.

Seznam symbolů a zkratk

<u>Veličina</u>	<u>Symbol</u>	<u>Jednotka</u>
intenzita magnetického pole	H	$A.m^{-1}$
intenzita elektrického pole	E	$V.m^{-1}$
magnetická indukce	B	T
proud	I	A
hustota elektrického proudu	J	$A.m^{-2}$
vektorový potenciál	A	$Wb.m^{-1}$
konduktivita	γ	$S.m^{-1}$
objemová hustota náboje	ρ	$C.m^{-3}$
hustota vsázky	ρ_{vs}	$kg.m^{-1}$
permeabilita	μ_0	$H.m^{-1}$
permitivita	ϵ_0	$F.m^{-1}$
relativní permeabilita	μ_r	-
relativní permitivita	ϵ_r	-
rychlost	v	$m.s^{-1}$
úhlová rychlost	ω	$rad.s^{-1}$
hloubka vniku	a	m
rychlost světla ve vakuu	c	$m.s^{-1}$
tepelné ztráty	P_{xx}	J
výkon	P	W
výška vzduť vsázky	l_m	m
příkon na jednotku plochy taveniny	P_1	W
frekvence	f	Hz
napájecí napětí	U_g	V
indukčnost	L	H
odpor	R	Ω
Spřažený magnetický tok	M	Wb
převodní poměr	p_{13}	-

jakost obvodů	Q	-
fázový posun	φ	°
optimální tloušťka stínícího pláště	d_{opt}	m

Poznámka: vektorové veličiny jsou v textu vyznačeny tučně př.: intenzita magnetického pole **H** . Fázory jsou vyznačeny následovně: fázor napětí \bar{U} .

1. Obecná charakteristika indukčních ohřevů

Celý proces indukčních ohřevů je založen na principu elektromagnetické indukce. Z toho plyne, že ohřev je možný pouze za použití elektricky vodivých materiálů. Na takový předmět vložený do střídavého magnetického pole dopadá elektromagnetické vlnění, které v materiálu indukuje vířivé proudy. Tyto proudy mají za následek ohřátí předmětu o velkém elektrickém odporu. Podobný princip lze nalézt i u transformátorů, kde lze sekundární vynutí spojené na krátko považovat jako vsázku, která je zahřívána. U transformátorů ale tento jev považujeme za nežádoucí, vzhledem k rostoucím ztrátám.

Indukční ohřev má některé kladné vlastnosti, které nelze jinými způsoby ohřevu dosáhnout. Zdroj a vsázka nejsou spojeny galvanicky, teplo se do vsázky dopravuje přímo střídavým elektromagnetickým polem. To umožňuje vsázku ohřívát velmi efektivně a rychle bez možných ztrát vlivem ohřevu jiných částí pece. Výhodou je i dobrá regulovatelnost, volbou kmitočtu napájecího proudu induktorem, lze volit hloubku prohřátí vsázky, ve které vzniká teplo.

2. Teorie indukčního ohřevu

Indukční ohřev popisujeme pomocí Maxwellových rovnic, charakterizujících elektromagnetické pole. Pomocí těchto rovnic můžeme dojít k následujícím vztahům.

2.1. Odvození rovnic

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

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

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

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

kde: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$

$$\varepsilon_0 \cong \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \text{F} \cdot \text{m}^{-1} \cong 8,842 \cdot 10^{-12} \text{F} \cdot \text{m}^{-1}$$

\mathbf{H} – vektor intenzity magnetického pole [$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$]

\mathbf{E} – vektor intenzity elektrického pole [$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$]

γ – konduktivita [$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$]

ρ – hustota nábojů [$\text{C} \cdot \text{m}^{-3}$]

Udělejme rotaci první rovnice:

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = \operatorname{rot} \gamma \mathbf{E} + \operatorname{rot} \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \gamma \operatorname{rot} \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial(\operatorname{rot} \mathbf{E})}{\partial t} \quad (5)$$

za rot \mathbf{E} dosadíme z druhé rovnice:

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = -\gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (6)$$

dále víme, že :

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = \operatorname{grad}(\operatorname{div} \mathbf{H}) - \nabla^2 \mathbf{H} \quad (7)$$

použitím těchto úprav dostaneme:

$$\operatorname{grad}(\operatorname{div} \mathbf{H}) - \nabla^2 \mathbf{H} = -\gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (8)$$

a tak platí:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (9)$$

2.2. Odvození elektrické složky

k odvození složky použijeme 2. Maxwellovu rovnici a to tak, že provedeme její rotaci:

$$\text{rot}(\text{rot } \mathbf{E}) = -\mu_0\mu_r \frac{\partial(\text{rot } \mathbf{H})}{\partial t} \quad (10)$$

z první rovnice použijeme $\text{rot } \mathbf{H}$:

$$\text{rot}(\text{rot } \mathbf{E}) = -\gamma\mu_0\mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \varepsilon_0\varepsilon_r\mu_0\mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (11)$$

$$\text{grad}(\text{div } \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} = -\gamma\mu_0\mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \varepsilon_0\varepsilon_r\mu_0\mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (12)$$

3. MX říká: $\text{div } \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0\varepsilon_r}$ (13)

finální úprava pak vypadá následovně:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma\mu_0\mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \varepsilon_0\varepsilon_r\mu_0\mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \text{grad} \frac{\rho}{\varepsilon_0\varepsilon_r} \quad (14)$$

V reálném prostředí se však prakticky pohybujeme buďto ve vodivém nebo nevodivém prostředí. Z toho plyne, že $\gamma = 0$ pro nevodivé a $\varepsilon_r = 0$ pro vodivé prostředí. Výsledné rovnice se tak zjednoduší na následující tvar pro nevodivé prostředí:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \varepsilon_0\varepsilon_r\mu_0\mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (15)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \varepsilon_0\varepsilon_r\mu_0\mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (16)$$

a pro prostředí vodivé:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \gamma\mu_0\mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (17)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma\mu_0\mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (18)$$

Součinitel $\nabla^2 \mathbf{H}$ či u $\nabla^2 \mathbf{E}$ se podle rovnice „ $v^2 \left(\frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = v^2 \nabla^2 \mathbf{u}$ “ rovná v^2 . Kde v je rychlost šíření vlnění v daném prostředí, a tak platí:

$$v = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (19)$$

Po dosazení $\mu_r = 1$ a $\varepsilon_r = 1$ (pro vakuum a přibližně i vzduch)

$$v = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}} = \sqrt{\frac{36}{4} \cdot 10^{16}} = 3 \cdot 10^8 \doteq c$$

c - rychlost světla ve vakuu $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$

U harmonických průběhů \mathbf{E} a \mathbf{H} lze časovou změnu vyjádřit jako fázor v komplexní rovině. Napišme tedy:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_m e^{j\omega t} \quad (20)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_m e^{j\omega t} \quad (21)$$

Výsledné rovnice se tak zjednoduší na následující tvar pro nevodivé prostředí:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial x^2} = -\omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (22)$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial x^2} = -\omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \mathbf{E} \quad (23)$$

a pro prostředí vodivé:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial x^2} = j\omega\gamma\mu_0\mu_r \mathbf{H} \quad (24)$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial x^2} = j\omega\gamma\mu_0\mu_r \mathbf{E} \quad (25)$$

Toto jsou rovnice, z kterých lze vycházet pro rovinné vlnění. Pomocí řešení ve tvaru:

$\mathbf{H} = \mathbf{A}e^{\lambda_2 x} + \mathbf{B}e^{\lambda_1 x}$, kde $\lambda^2 = j\omega\gamma\mu_0\mu_r$ a $\lambda_{1,2} = \pm\sqrt{j}\sqrt{\omega\gamma\mu_0\mu_r}$, lze vyjádřit tzv. hloubku vniku.

$$\text{Protože: } j = e^{j\frac{\pi}{2}} \Rightarrow \sqrt{j} = e^{j\frac{\pi}{4}} = \cos\frac{\pi}{4} + j\sin\frac{\pi}{4} = \frac{1}{\sqrt{2}} + j\frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1+j}{\sqrt{2}} \quad (26)$$

Dosadíme-li:

$$\lambda_{1,2} = \pm(1+j)\sqrt{\frac{\omega\gamma\mu_0\mu_r}{2}} = \pm\frac{1+j}{a} \quad (27)$$

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega\gamma\mu_0\mu_r}} \quad [m] \quad (28)$$

a – hloubka vniku, která závisí na frekvenci napájecího proudu, relativní permeabilitě a vodivosti materiálu.

[1]

3. Vliv relativní permeability na ohřev

Relativní permeabilita μ_r je bezrozměrná veličina, která charakterizuje magnetické vlastnosti látek. Jako relativní permeabilita se označuje podíl permeability daného materiálu a permeability vakua, tedy:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad [-] \quad (29)$$

kde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$

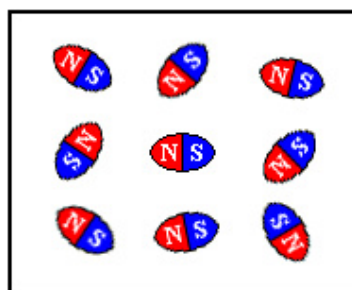
Relativní permeabilita slouží k rozdělení látek na diamagnetické, paramagnetické a feromagnetické:

$\mu_r < 1$ diamagnetické látky

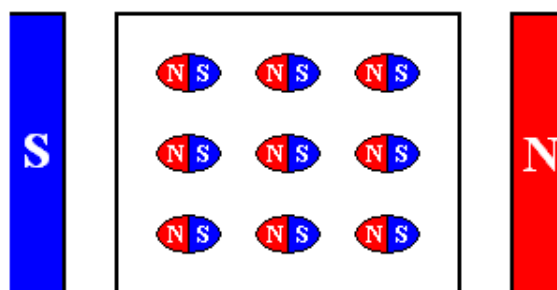
$\mu_r > 1$ paramagnetické látky

$\mu_r \gg 1$ feromagnetické látky

Příčinou magnetizace látky je působení tzv. výměnných sil mezi sousedními atomy. Jejich vlivem nastává i bez vnějšího magnetického pole souhlasné uspořádání magnetických polí v malé oblasti látky. Při této spontánní (samovolné) magnetizaci vznikají v látce zmagnetované mikroskopické oblasti (o objemu) zvané magnetické domény, které jsou orientovány nahodile (viz obr. 3.1). Působením vnějšího magnetického pole se tyto domény orientují souhlasně a látka získává vlastnosti magnetu (viz obr. 3.2). Při tomto ději se objem domén postupně zvětšuje, až při jejich souhlasném uspořádání doménová struktura mizí - látka je magneticky nasycena.



obr. 3.1 [2]



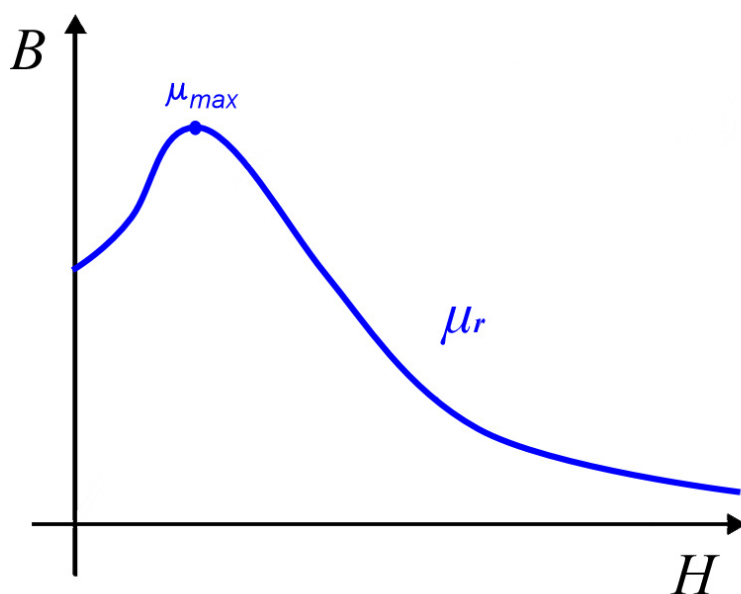
obr. 3.2 [2]

[2]

Při teoretických úvahách počítáme, že relativní permeabilita μ_r je v celém objemu vsázky konstantní. Ve skutečnosti tomu tak ale není, permeabilita se mění v závislosti na teplotě. Ve feromagnetické látce jsou elementární dipóly uspořádány do tzv. domén a domény svým uspořádáním tvoří vlastní magnetické pole látky - magnetizaci. Při teplotě vyšší než Curieova je pravidelnost uspořádání narušena a při chaotickém rozložení magnetických momentů již látka nevykazuje feromagnetické vlastnosti. Ke změně permeability dochází skokově z $\mu_r > 1$ na velikost $\mu_r = 1$. Např. ocel má Curieovu teplotu 760 °C.

Dále pak u magnetických materiálů musíme brát v úvahu intenzitu magnetického pole H . Permeabilita má nejmenší hodnotu na povrchu vsázky, kde má zároveň nejvyšší intenzitu H . S rostoucí hloubkou vniku do vsázky permeabilita vzrůstá a intenzita H analogicky klesá neboť platí vztah:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \text{ [T]} \quad (30)$$



obr. 3.3

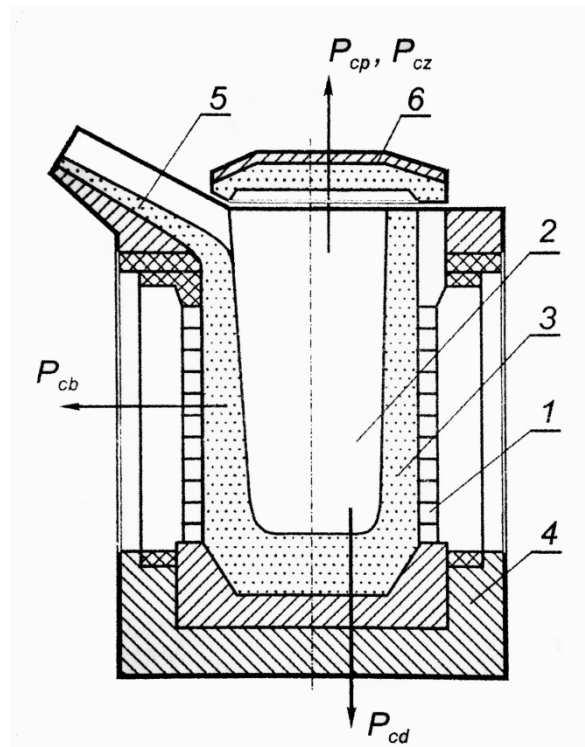
závislost μ_r na intenzitě H a magnetické indukce B ve feromag. materiálu

[3]

4. Indukční kelímková pec

V metalurgickém odvětví se využívá několika typů tavicích pecí (indukční kelímková pec, indukční kanálková pec...) Nejhojněji využívaná je však pec kelímková.

4.1. Charakteristika kelímkové pece



obr. 4.1.1 [4]

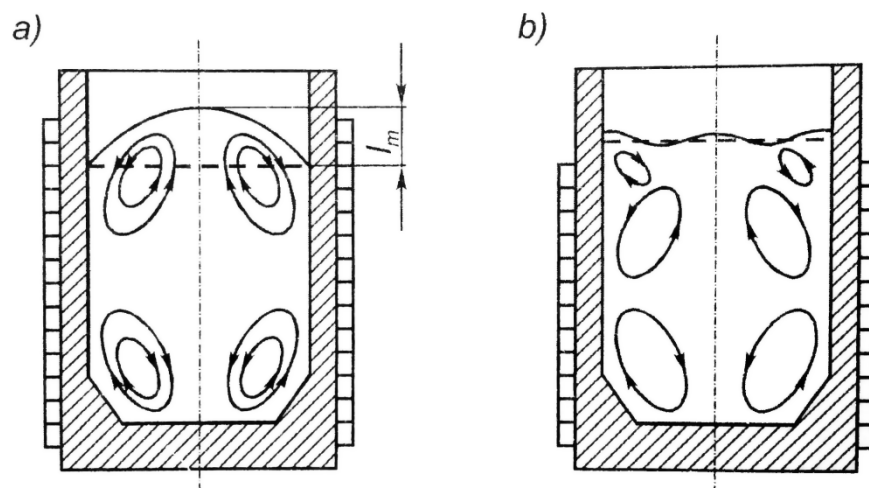
Obr. 4.1.1: 1 – vinutí cívky, 2 – vsázka, 3 – kelímk, 4 – žárupevná vyzdívka dna pece, 5 – hubice pece pro odlévání, 6 – víko, $P_{cp, cz}$ – tepelné ztráty při zavřeném / otevřeném víku, P_{cb} – tep. ztráty povrcem bočních stěn, P_{cd} – tep. ztráty dnem

Charakteristickými vlastnostmi pece jsou:

- velký tavicí výkon
- velká elektrotermická účinnost
- samovolná cirkulace vsázky

Pro napájení pecí se používají tyristorové měniče (až 10 kHz), tranzistorové měniče a elektronkové generátory se používají při tavení menších množství vsázky (max. 100kg), ty dosahují frekvencí do 1 MHz.

Vlivem elektrodynamických sil vznikajících v sázce, dochází k samovolnému víření taveniny uvnitř kelímku. Rozdělujeme pak pohyb při symetrickém jednofázovém napájení, při kterém vzniká vzdutí vsázky, či při nesymetrickém jednofázovém napájení, které omezuje vzdutí taveniny.



obr. 4.1.2 [4]

Víření tekuté vsázky s

- a) symetrickým napájením
- b) nesymetrickým napájením.

l_m [m] – výška vzdutí vsázky

Pro výpočet vzdutí lze použít následující vztah:

$$l_m = K \frac{P_1}{\rho} \sqrt{\frac{\mu_r \gamma}{f}} \quad [m] \quad (31)$$

kde P_1 - příkon na jednotku plochy taveniny (Pointingův vektor)

K - konstanta

ρ - hustota vsázky

μ_r - relativní permeabilita vsázky (nejčastěji $\mu_r = 1$)

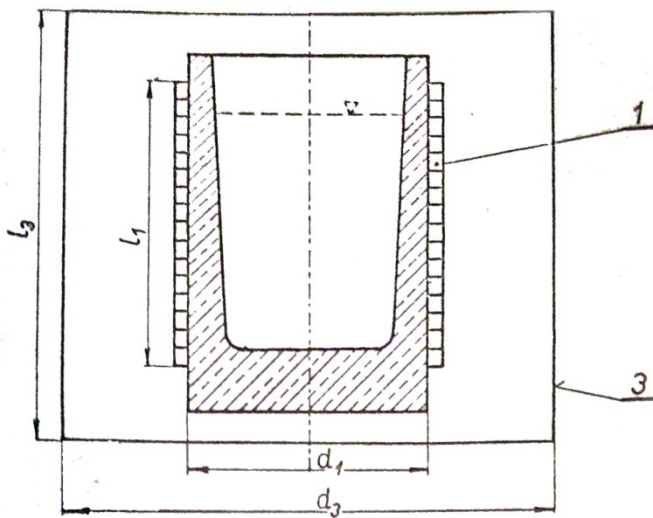
γ - konduktivita vsázky

f - frekvence proudu v cívce

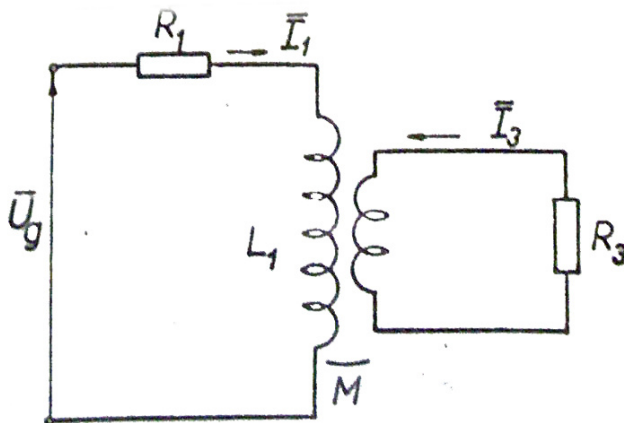
[4], [5]

4.2. Stínění kelímkových pecí

Při konstrukci kelímkových pecí a indukčních pecí obecně, je třeba brát v úvahu, že magnetický tok procházející dutinou cívky (1) se uzavírá vně cívky. To má za následek zahřívání vsázky uvnitř kelímku, ale také se zahřívají ocelové konstrukce pece, skrz které se magnetický tok uzavírá. Tím se konstrukce zahřívají a způsobují nežádoucí ztráty. Abychom tyto ztráty eliminovali, použijeme vodivý stínící plášť nebo dobře magneticky vodivé svazky transformátorových plechů.



obr. 4.2.1 [3]



obr. 4.2.2 [3]

Je-li pec opatřena vodivým stínícím pláštěm (3), výrazně se tím sníží intenzita magnetického pole vně pece. Takovýto plášť je nejčastěji tvořen z železa, z duralu či hliníku a je umístěný vně pece. Vzájemnou polohu částí vidíme na obrázku 4.2.1. Druhou možností je odstínění pece pomocí svazků z transformátorových plechů, tuto variantu více popisují v kapitole 4.3.

Proudy v cívce a stínícím plášti jsou rozděleny prostorově s maximální hustotou na povrchu. Blíže středu od povrchu hustota ubývá podle složitých vztahů

Pro výpočty můžeme na -

hradit cívku a stínící plášť válci nulové tloušťky s ekvivalentními průměry. Náhradní elektrické schéma obou dílů obvodu je na obr 4.2.2. Napíšeme výchozí rovnice pro oba obvody.

$$\bar{U}_g = [(R_1 + p_{13}^2 R_3) + j\omega(L_1 - p_{13}^2 L_3)]\bar{I}_1 = [R_I + j\omega L_I]\bar{I}_1 \quad (32)$$

Protože je u tavicích pecí zpravidla $R_3^2 \ll (\omega L_3)^2$, je převodní poměr p_{13}^2

$$p_{13}^2 = \frac{\omega^2 M_{13}^2}{R_3^2 + (\omega L_3)^2} = \frac{\omega^2 \kappa_{13}^2 L_1 L_3}{R_3^2 + \omega^2 \kappa_{13}^2} \doteq \kappa_{13}^2 \frac{L_1}{L_3} \quad (33)$$

$$R_I = R_1 + p_{13}^2 R_3 \quad (34)$$

$$L_I = L_1 - p_{13}^2 L_3 = L_1 - \kappa_{13}^2 \frac{L_1}{L_3} L_3 = L_1(1 - \kappa_{13}^2) \quad (35)$$

Z těchto rovnic dostaneme proudy \bar{I}_1 a \bar{I}_3 .

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{U}_g}{R_I + j\omega L_I} = \bar{U}_g \frac{R_I - j\omega L_I}{R_I^2 + \omega^2 L_I^2} \quad (36)$$

Jelikož je u tavicích pecí $R_I^2 \ll (\omega L_I)^2$ lze výraz zjednodušit zanedbáním mocniny R_I^2 proti $(\omega L_I)^2$. Ne však, pokud se výraz vyskytuje v prvních mocninách. Při odvozování proudu \bar{I}_3 použijeme stejné pravidlo. Po úpravě tedy dostaneme:

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{U}_g}{j\omega L_I(1 - \kappa^2)} \left[\frac{Q'}{1 - \kappa^2} - 1j \right] [A] \quad (37)$$

$$\bar{I}_3 = \frac{\kappa U_g}{\omega \sqrt{L_1 L_3} (1 - \kappa^2)} \left[\frac{Q''}{1 - \kappa^2} - 1j \right] [A] \quad (38)$$

Symboly Q označují tzv. jakost obvodů

$$Q'' = \frac{Q_1 + Q_3}{Q_1 Q_3} \quad Q''' = \frac{\kappa^2 Q_1 + Q_3}{Q_1 Q_3} \quad (39), (40)$$

kde:

$$Q_1 = \frac{Q_1 + Q_3}{Q_1 Q_3} \quad Q_3 = \frac{\omega L_3}{Q_1 Q_3} \quad (41), (42)$$

Z výrazů výše udělejme absolutní hodnoty proudů I_1 a I_3 :

$$I_1 = \frac{U_g}{\omega L_1(1 - \kappa^2)} \sqrt{\left[1 + \left(\frac{Q'}{1 - \kappa^2}\right)^2\right]} = \frac{U_g}{\omega L_1(1 - \kappa^2)} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{Q'}{1 - \kappa^2}\right)^2\right] [A] \quad (43)$$

a pro I_3 :

$$I_3 = \frac{\kappa U_g}{\omega \sqrt{[L_1 L_3]}(1 - \kappa^2)} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{Q''}{1 - \kappa^2}\right)^2\right] [A] \quad (44)$$

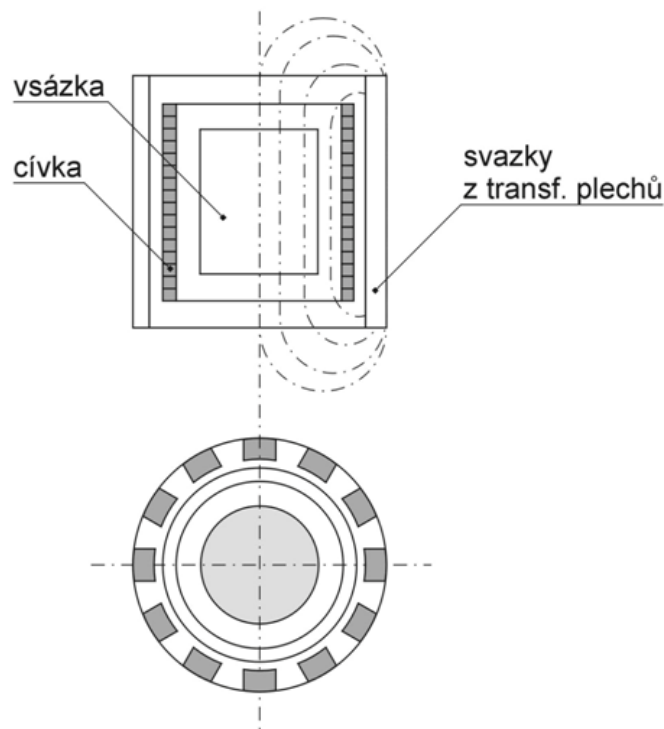
Fázový posun takovýchto proudů je proti napětí U_g vyjádřen takto:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = -\frac{1 - \kappa^2}{Q'} \qquad \operatorname{tg} \varphi_3 = -\frac{1 - \kappa^2}{Q''} \quad (45), (46)$$

[3]

4.3. Stínění ze svazků transformátorových plechů

Podobného účinku jako při realizaci stínění stínícím pláštěm dosáhneme také tak, že vně cívky dáme stínění z většího počtu svazků tvořených transformátorovými plechy, jako na obrázku 4.3.1



obr. 4.3.1

Převážná část magnetického toku buzeného cívkou se bude uzavírat vně cívky magneticky dobře vodivou cestou, tj. svazky transformátorových plechů, uchycených na vnitřní straně pecního pláště z kotlového plechu. Zařazením magneticky vodivých svazků se zmenší magnetický odpor pro magnetický tok buzený cívkou, takže tok poněkud vzroste. Zvětší se vlastní indukčnost pecní cívky, tj. magnetický tok pro jednotkový proud.

U pece s pláštěm je užitečný výkon nižší a ztráty v cívce jsou vyšší než u pece s transformátorovými plechy. Elektrická účinnost je při tomto řešení také vyšší než u pece se stínícím pláštěm. Nejdůležitějším výsledkem porovnání je zjištění, že účinnost pece stíněná svazky je tak téměř o 5 % vyšší než u pece se stínícím pláštěm. To přináší v provozu značné úspory elektrické energie, zejména u velkých pecí s nepřetržitým provozem

Provedení indukční kelímkové pece se stíněním tvořeným transformátorovými plechy je proto technicky dokonalejším řešením. Další nevýhodou pece se stínícím pláštěm je, že vyžaduje cívku s poněkud vyšším počtem závitů a větší kondenzátorovou baterii než pec s jádrem.

4.4. Ztráty ve stínícím plášti

Za předpokladu dodržení optimální tloušťky stínícího pláště jsou ztráty minimální. Tato tloušťka je dána vztahem:

$$d_{opt} = \frac{\pi}{2} a \quad [m] \quad (47)$$

V praxi pak volíme tloušťku vždy o něco větší, vzhledem k mechanickému poškozování pecí při hrubém provozu.

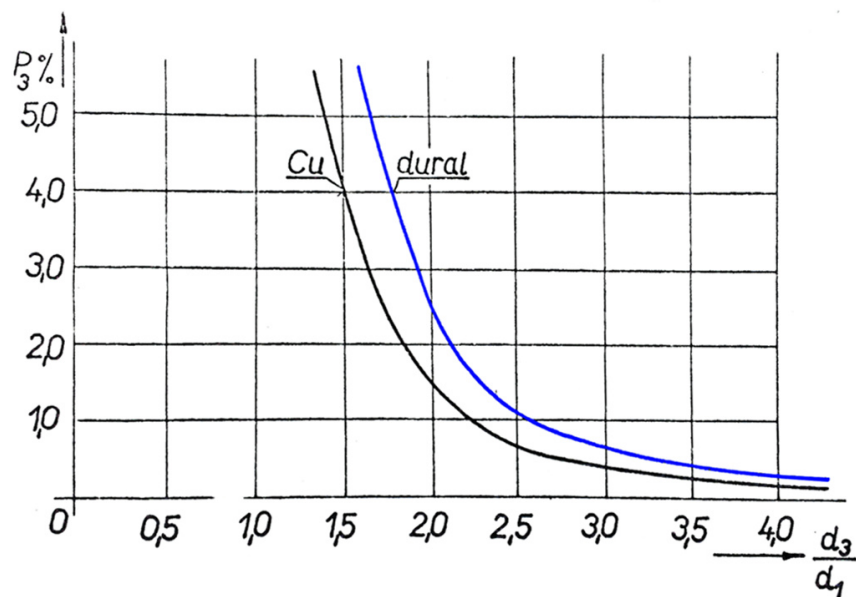
Činný odpor cívky R_1 a odpor stínění R_3 je roven odporu povrchové vrstvy o tloušťce rovné hloubce vniku a . Ztráty v cívce a ve stínění potom budou:

$$P_1 = R_1 I_1^2 \quad P_3 = R_3 I_3^2 \quad [W, \Omega, A] \quad (48), (49)$$

Příklad ztrát ve stínění

Mějme průměr stínícího pláště od $d_3 = 1,00\text{ m}$ do $d_3 = 2,80\text{ m}$. Pecní cívka z mědi má 29 závitů, vnitřní průměr $d_1 = 0,70\text{ m}$, délka cívky $l_1 = 0,77\text{ m}$. Napětí $U_g = 3000\text{ V}$ a kmitočet $f = 580\text{ Hz}$.

Při takovýchto parametrech vycházejí ztráty v plášti vyobrazené v grafu. Jako materiál pro stínící plechy jsme použili měď a dural.



obr. 4.4.1 [3]

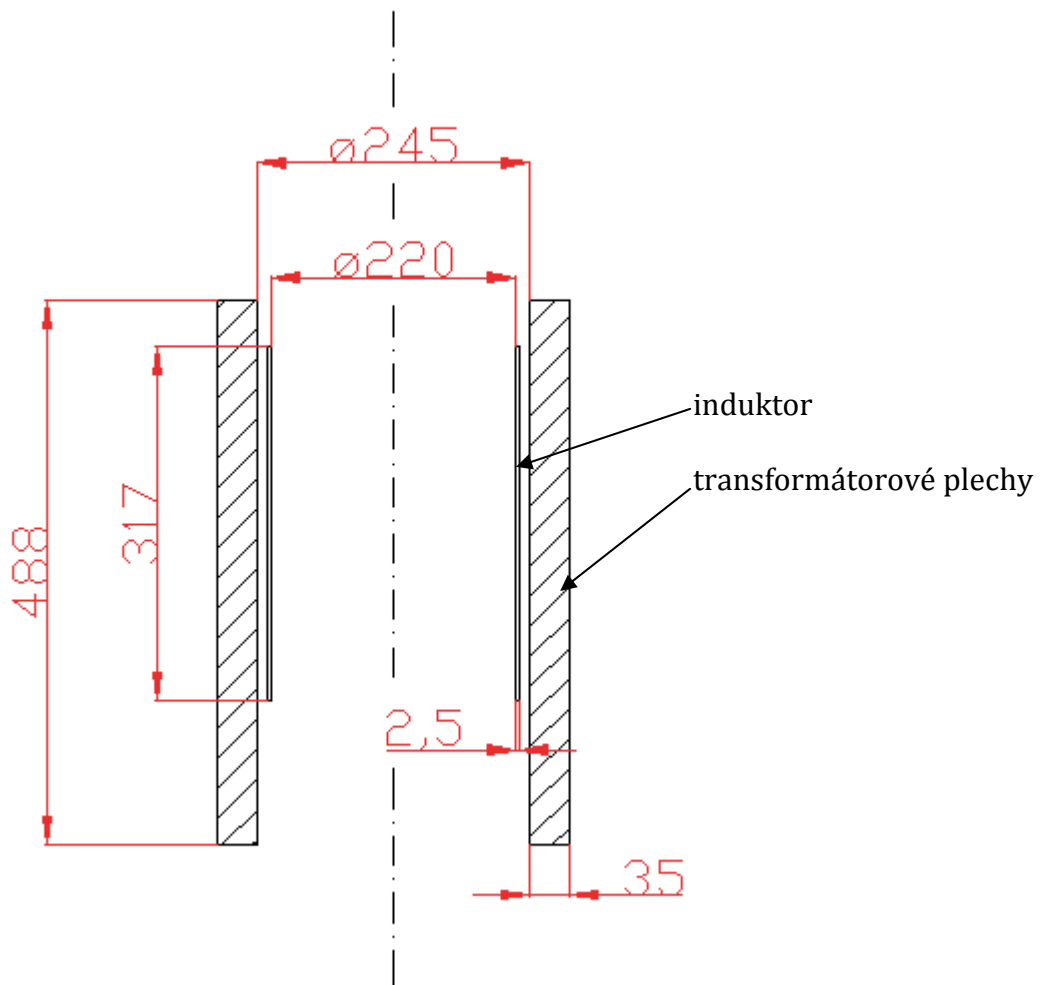
Svislá osa reprezentuje ztráty P_3 ve stínění z příkonu přiváděného do pece. Z grafu lze vidět, že ztráty klesají s rostoucím poměrem průměru pláště k průměru cívky. Z hlediska úspory místa však nelze plášť zvětšovat na veliké hodnoty, volí se proto zpravidla průměr pláště d_3 jako dvojnásobek vnitřního pláště cívky d_1 . Při takovýchto parametrech vychází ztráty přibližně 1,51% při použití mědi jako stínícího materiálu. Při použití duralu se ztráty pohybují kolem 2,50%. Respektováním velikosti a tvarů vsázky však lze u skutečných pecí tyto hodnoty snížit až na polovinu. [3]

5. Měření

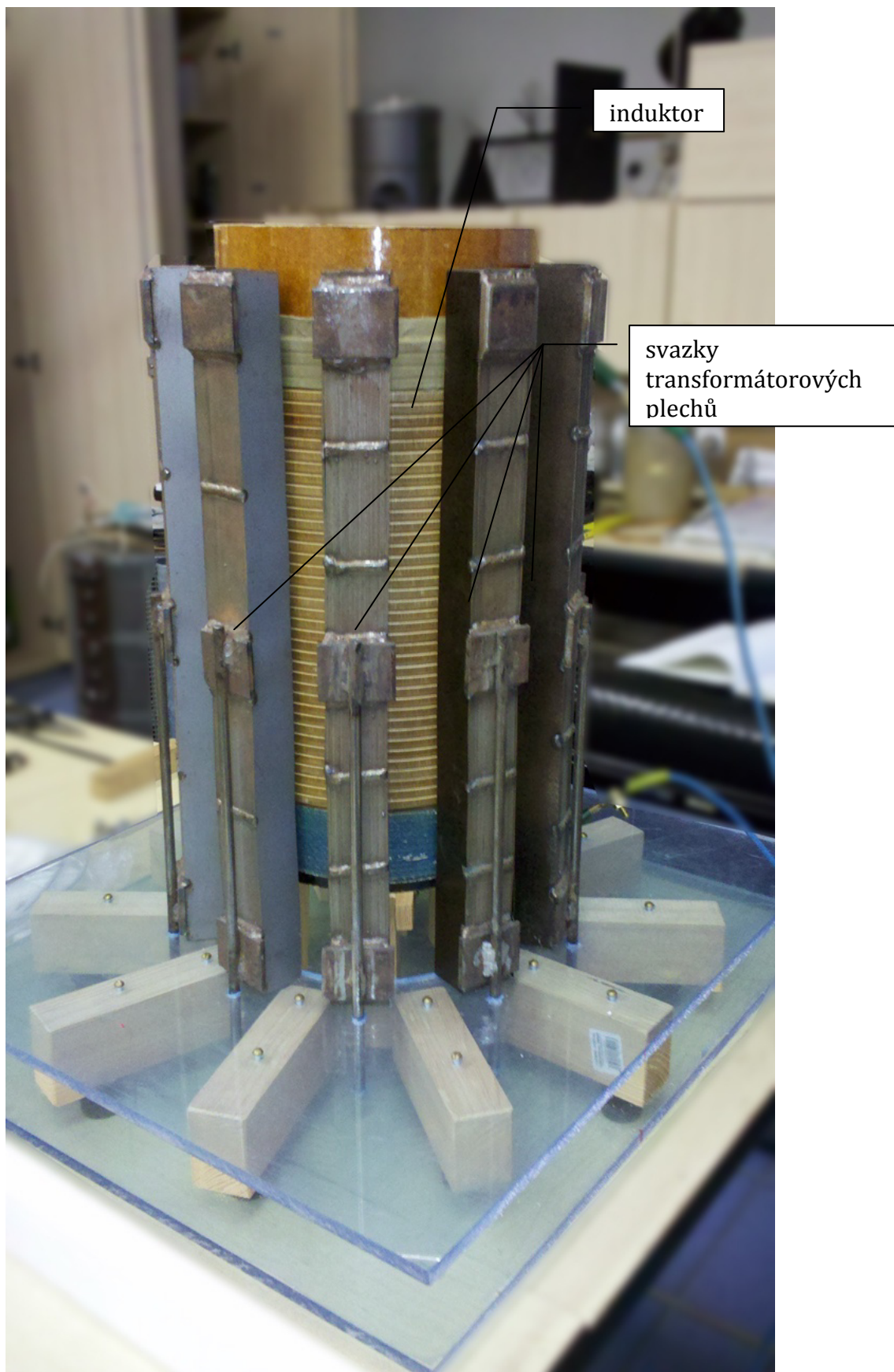
Zjištění vlivu relativní permeability na ohřev jsem provedl měřením induktoru bez stínění a následně se svazky z transformátorových plechů o vysoké hodnotě μ_r , přes které se bude uzavírat magnetický tok díky své dobré magnetické vodivosti. Stejně měření jsem pak zrealizoval pomocí počítačové simulace a porovnal s měřením na reálném fyzikálním modelu.

5.1. fyzikální model

Měření probíhalo na modelu skládajícím se z induktoru a posléze i ze stínění viz schematický obrázek 5.1.1



obr. 5.1.1



obr. 5.1.2 – fyzikální model indukčního ohřevu

Dovnitř induktoru byl vložen přípravek s předvrtanými otvory s nadefinovanou polohou pomocí značených os, které sloužily pro měření. Každá poloha musela být změřena ve směru axiálním a radiálním, aby se z hodnot následně mohla vypočítat velikost magnetické indukce a intenzity magnetického pole a hodnota vynést do grafu.



obr. 5.1.3 – fyzikální model s přípravkem



obr. 5.1.4 – starší cívka



obr. 5.1.5 – nová cívka

Při měření jsem použil nově zkonstruovanou cívku (obr. 5.1.5) o parametrech:

$$\begin{aligned}
 N &= 21000 \\
 R &= 8,4 \text{ k}\Omega \\
 d_1 &= 8,5 \text{ mm} \\
 d_2 &= 20 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

kde d_1 je vnitřní průměr cívky a d_2 je vnější průměr cívky. Díky znalosti těchto parametrů můžeme dopočítat konstantu cívky potřebnou pro další výpočty.

Konstantu spočteme jako:

$$k = \frac{1}{NA} [m^{-2}] \quad (50)$$

kde A – střední účinná plocha závitu [m^2]

$$k = \frac{1}{21000\pi \left[\left(\frac{d_2}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_1}{2}\right)^2 \right]} = \frac{1}{21000\pi \left[\left(\frac{0,02}{2}\right)^2 - \left(\frac{0,0085}{2}\right)^2 \right]} \doteq 0,185 m^{-2}$$

Pro vyloučení závady na cívce, jsem měl k dispozici starší měřicí cívku, se kterou jsem kontrolně proměřil náhodně vybrané body a výsledky porovnal s hodnotami naměřenými cívku novou.

K měření bylo vyzkoušeno několik druhů multimetrů a z nich vybrán model MS 8217 od firmy MASTECH (obr. 5.1.6).

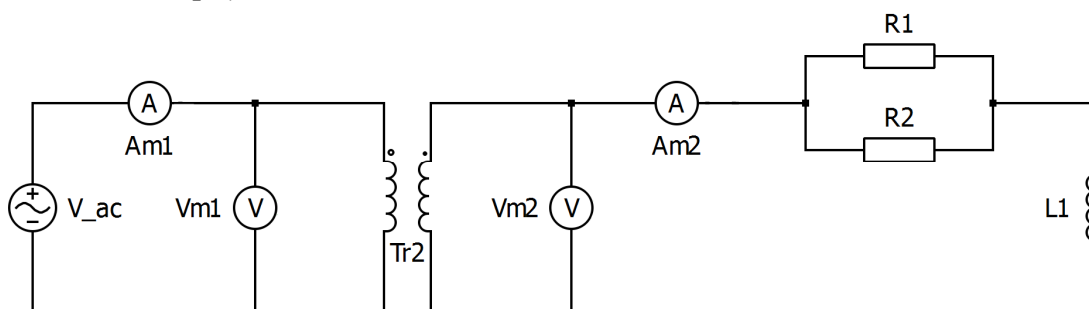


obr. 5.1.6 – multimetr MS 8217



obr. 5.1.7 – použité odpory 2x 8,4 kΩ

Schéma zapojení:



Značka	Název	Hodnota
V _{ac}	zdroj napětí	230 V, 50Hz
Am1	ampérmetr na primární straně	-
Vm1	voltmetr na primární straně	-
Tr2	transformátor	$p \doteq 1,82$
Vm2	voltmetr na sekundární straně	-
Am2	ampérmetr na sekundární straně	-
R1	rezistor	6,4 k Ω
R2	rezistor	6,4 k Ω
L1	induktor	-

5.1.1 měření bez stínění

Při tomto měření jsem vyndal stínící svazky transformátorových plechů a proměřil jsem všechny pozice. U_x znázorňuje polohu axiální, U_r reprezentuje polohu radiální.

Primární strana:

Sekundární strana:

$U_1 = 224 V$	$U_2 = 122 V$
$I_1 = 17 A$	$I_2 = 31 A$

Teploty:

$T_{induktor} = 25^\circ C$
$T_{vzduch} = 19^\circ C$

Naměřené hodnoty:

$U [mV]$		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	U_x	13	16	20	25	31	38	43	50	54	59	61	62	61	58
	U_r	21	24	25	26	27	25	22	21	14	9	5	0	6	15
2	U_x	13	17	22	29	36	44	51	60	66	72	76	78	76	72
	U_r	25	27	29	31	33	30	31	27	22	15	12	1	7	18
3	U_x	13	17	23	30	39	49	59	71	81	92	97	99	96	90
	U_r	29	32	36	39	40	41	40	37	31	24	15	1	10	25
4	U_x	11	16	23	32	43	56	71	87	108	129	149	163	169	150
	U_r	33	37	43	47	52	52	57	50	45	33	19	1	14	32
5	U_x	7	15	21	33	45	65	83	108	129	149	163	169	164	150
	U_r	38	43	50	57	64	69	70	69	62	42	28	5	15	40
6	U_x	5	12	18	27	46	70	96	129	169	199	223	230	223	200
	U_r	42	57	70	85	84	89	100	97	87	69	49	5	40	63
7	U_x	1	8	18	27	97	82	125	165	227	285	325	335	310	278
	U_r	46	57	70	85	102	123	142	142	138	100	71	2	56	105
8	U_x	3	3	9	18	39	73	123	216	299	405	470	499	468	387
	U_r	50	63	80	102	128	156	109	225	236	187	109	1	96	172
9	U_x	10	7	3	3	27	45	122	244	403	595	737	777	720	378
	U_r	51	68	87	115	153	200	262	325	335	285	177	22	155	312
10	U_x	20	19	15	15	0	45	100	248			1210	1240	1127	904
	U_r	51	69	91	120	173	245	340	482			320	18	276	550
11	U_x	30	30	34	41	40	24	21	127						
	U_r	48	66	90	129	184	270	428	680						
12	U_x	39	47	56	74	92	114	148	223						
	U_r	44	60	84	120	174	263	429	749						
13	U_x	46	59	77	100	131	175	272	472						
	U_r	32	44	64	94	141	216	340	503						
14	U_x	55	69	93	120	166	232	343	548						
	U_r	23	29	40	60	87	143	186	279						

Z naměřených hodnot nyní lze vypočítat velikost magnetické indukce ze vzorce:

$$B = k \frac{u_{ef}}{4,44 f} \quad (51)$$

konstantu cívky k jsme si připravili ve výpočtu (50). Magnetická indukce B se musí vypočítat zvlášť pro radiální a axiální složku. Z těchto složek lze pak spočítat celkovou velikost vzorcem

$$B = \sqrt{B_r^2 + B_x^2} \quad (52)$$

Vzorový výpočet pro bod [H:6]

výpočty jsem provedl v programu MS Excel podle následujících kroků

$$B_x = 0,185 \frac{129}{4,44 * 50} = 0,1075 \text{ T} \quad (53)$$

$$B_r = 0,185 \frac{97}{4,44 * 50} = 0,0808 \text{ T}$$

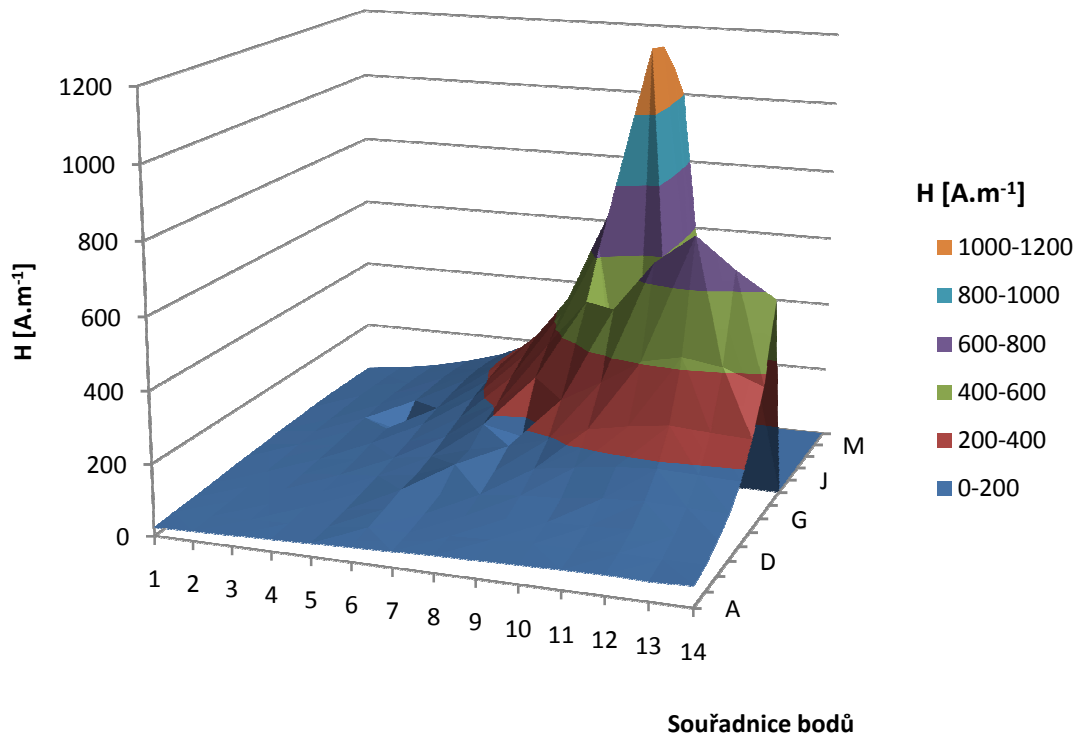
$$B = \sqrt{0,1075^2 + 0,0808^2} = 0,13448 \text{ T}$$

Nyní lze z výrazu $B = \mu_0 H$ vyjádřit a spočítat velikost magnetického pole H .

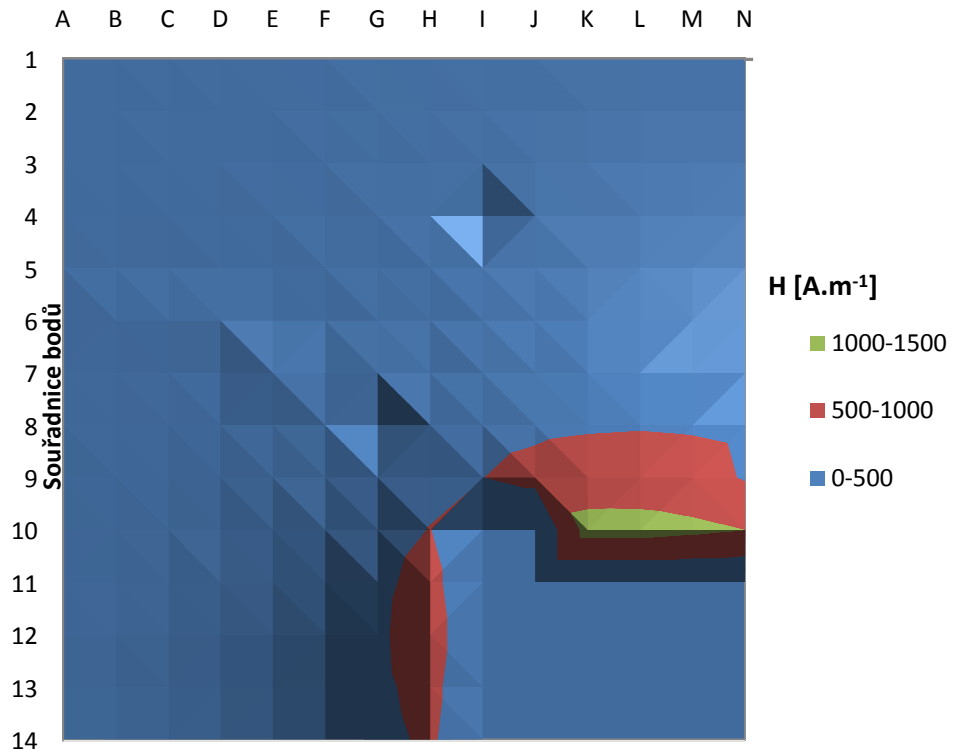
$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{0,13448}{4\pi 10^{-7}} = 107015 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \quad (54)$$

po spočítání intenzit magnetického pole ve všech bodech můžeme výsledky vynést do grafů. Pro názornost jsem zvolil zobrazení do 3D roviny a klasické plošné zobrazení, kde jsou hodnoty barevně odlišeny podle velikosti.

Velikost H - induktor bez stíneň



Velikost H - induktor bez stíneň



5.1.2 měření se stíněním

Všech deset svazků jsem umístil do polohy k induktoru. Zapojení a umístění přípravku bylo stejné jako v předešlém měření, kvůli minimalizaci chyb měření.

Primární strana:

Sekundární strana:

$U_1 = 226 V$	$U_2 = 124 V$
$I_1 = 17 A$	$I_2 = 31 A$

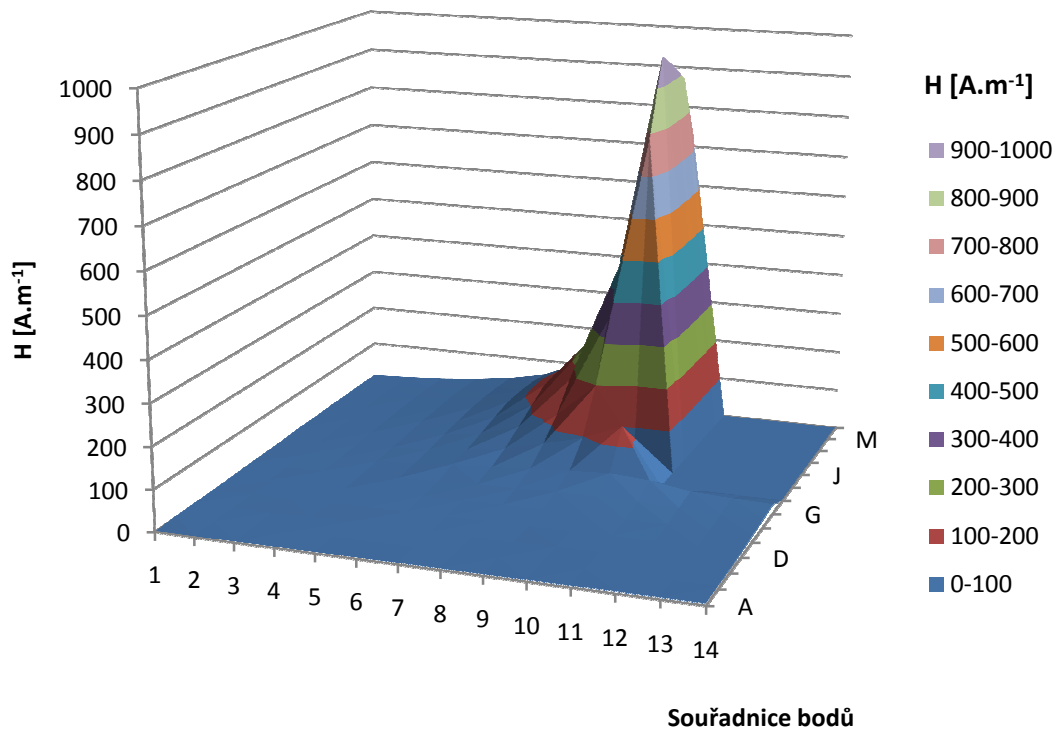
Teploty:

$T_{induktor} = 27^{\circ}C$
$T_{svazek} = 22^{\circ}C$
$T_{vzduch} = 22^{\circ}C$

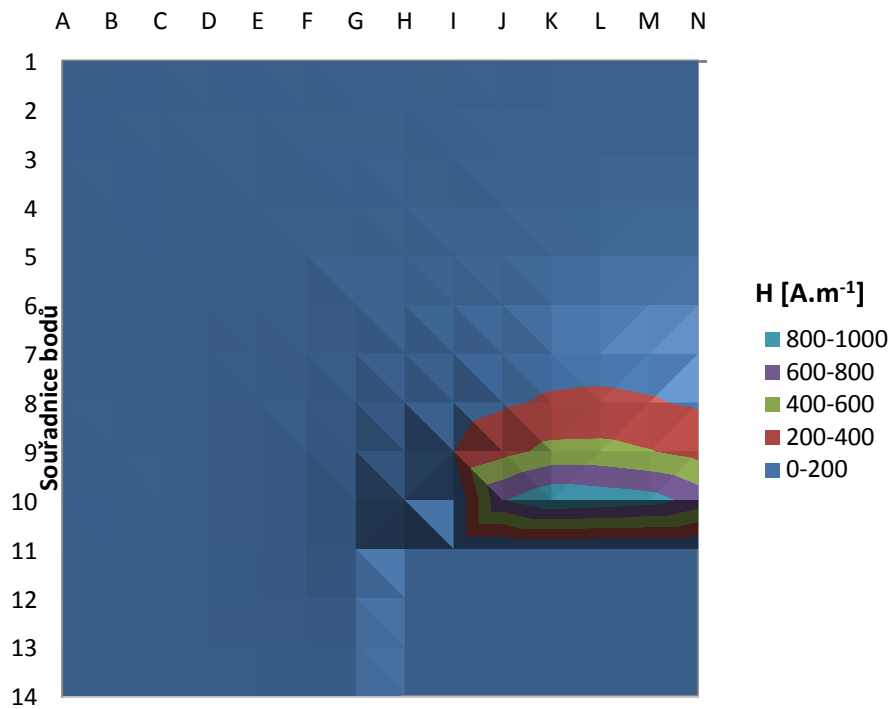
Naměřené hodnoty:

$U [mV]$	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1 U_x	0	0	0	1	2	4	4	6	9	9	11	11	12	11
U_r	1	3	3	3	4	4	5	4	4	2	1	0	0	2
2 U_x	0	0	0	1	3	4	6	8	11	13	15	16	16	15
U_r	2	3	3	4	5	6	7	6	6	4	3	0	0	3
3 U_x	0	0	0	1	2	5	7	10	15	18	21	23	22	20
U_r	3	3	4	6	7	8	9	9	9	8	5	1	2	5
4 U_x	0	0	0	0	2	5	8	13	19	26	30	33	32	29
U_r	3	4	5	7	9	10	13	14	13	12	8	2	2	8
5 U_x	1	1	0	0	1	5	9	16	27	37	45	49	47	41
U_r	3	4	6	8	11	15	18	21	21	18	13	3	4	16
6 U_x	2	2	2	0	0	3	19	20	35	54	71	76	73	60
U_r	3	4	6	9	13	18	25	32	35	32	22	6	10	25
7 U_x	3	3	3	3	3	0	4	20	47	84	123	135	123	95
U_r	3	4	6	9	15	23	34	48	63	66	50	7	18	51
8 U_x	4	4	5	6	8	8	3	12	57	140	215	248	220	148
U_r	2	3	5	9	15	24	43	76	108	122	96	22	56	112
9 U_x	4	6	7	9	13	20	26	27	43	243	433	486	414	239
U_r	1	2	3	7	12	22	42	99	205	258	208	28	128	248
10 U_x	5	6	9	12	18	28	52	132		462	922	985	873	472
U_r	0	1	1	3	5	9	18	60		694	448	45	341	600
11 U_x	5	7	10	13	18	28	45							
U_r	0	0	0	0	0	2	18							
12 U_x	6	7	10	12	17	22	24							
U_r	1	2	2	3	6	10	22							
13 U_x	5	6	9	11	14	16	18							
U_r	2	3	4	6	9	14	21							
14 U_x	5	6	8	10	12	14	15							
U_r	3	4	6	8	11	15	20							

Velikost H - induktor + stínení

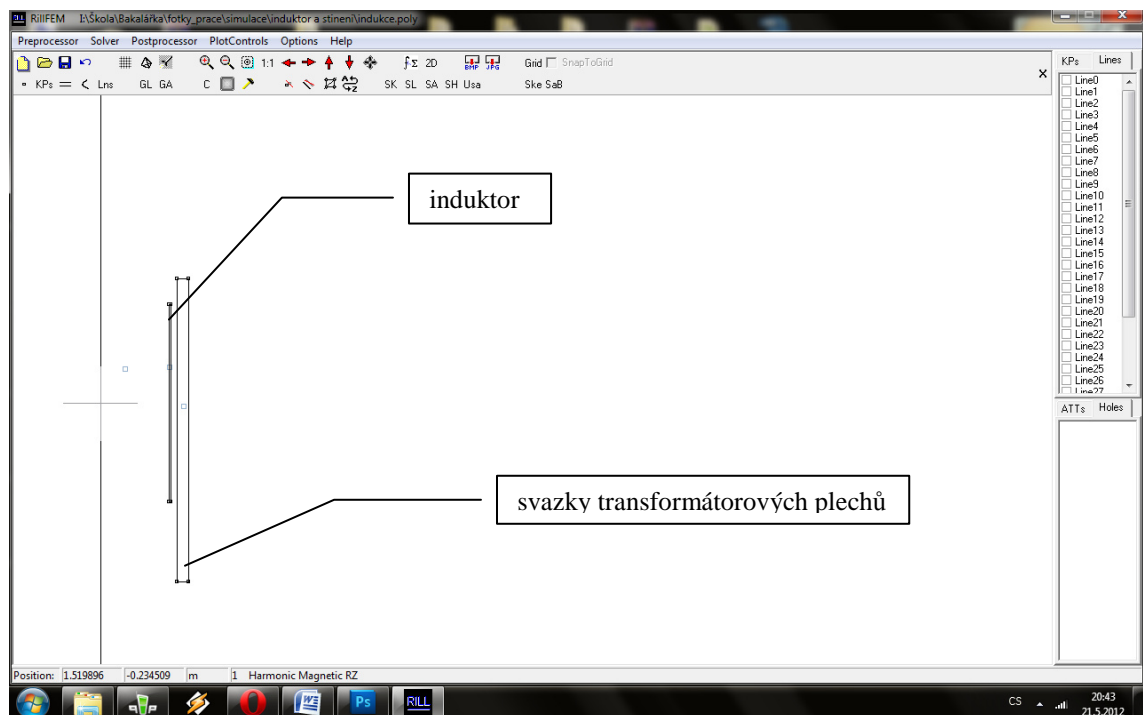


Velikost H - induktor + stínení



5.2. simulace

Pro simulaci byl vybrán program RillFEM, který poskytuje optimální výsledky při zachování dobré uživatelské přívětivosti. Nejprve bylo třeba nakreslit jednotlivé prvky modelu. Úloha je brána jako rotačně symetrická, tudíž stačí nakreslit jen polovinu modelu. Dále bylo potřeba upřesnit vlastnosti materiálů. Konkrétně se jednalo o měď induktoru, železo pro stínící transformátorové plechy a parametry vzduchu.



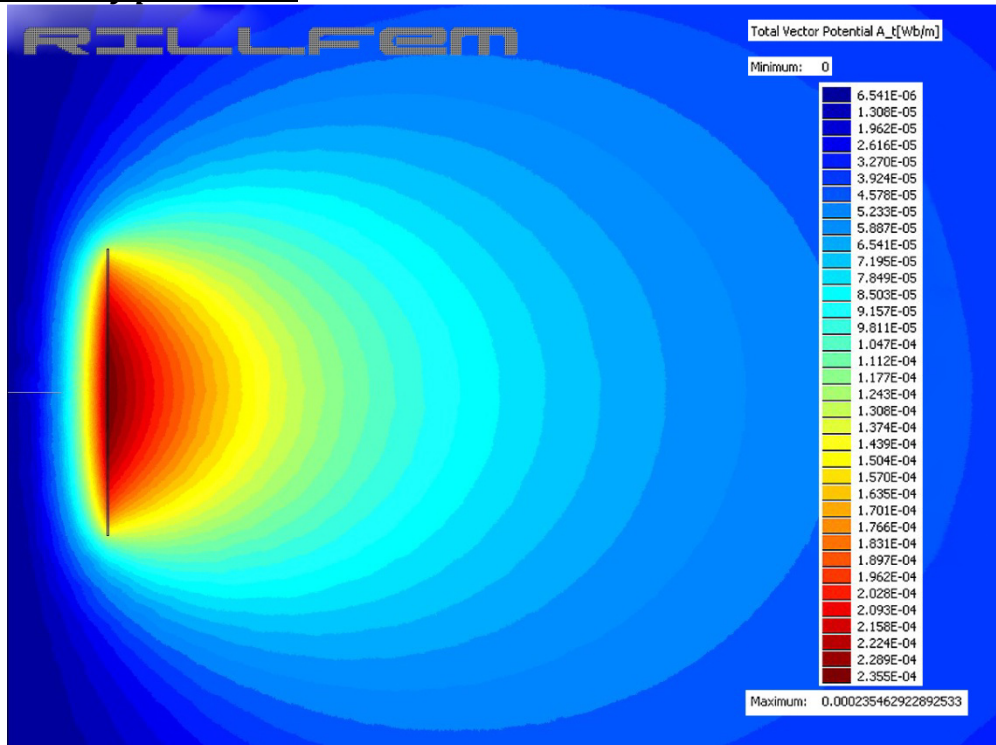
obr .5.2.1 – prostředí programu RillFEM

U každého měření pak sleduji čtyři veličiny, ze kterých vzejde graf, jež je odstupňován barevně podle velikosti hodnoty. Sledované parametry jsou: vektorový potenciál (A), intenzita magnetické indukce (B), intenzita magnetického pole (H) a velikost hustoty proudu (J). Kvůli názornosti jsou induktor a stínění přiblíženy do výřezu, takže se jednotlivá měřítka nemusí shodovat.

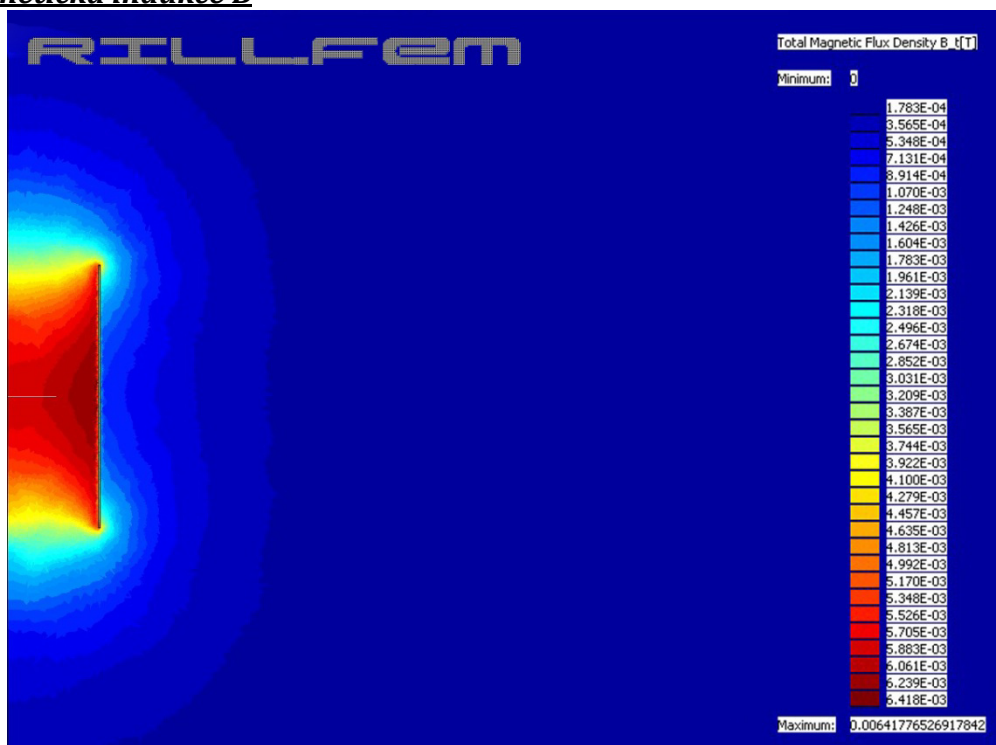
5.2.1 simulace bez stínění

V první simulaci jsem neuvažoval transformátorové plechy pro stínění. Výstupy jsou následující:

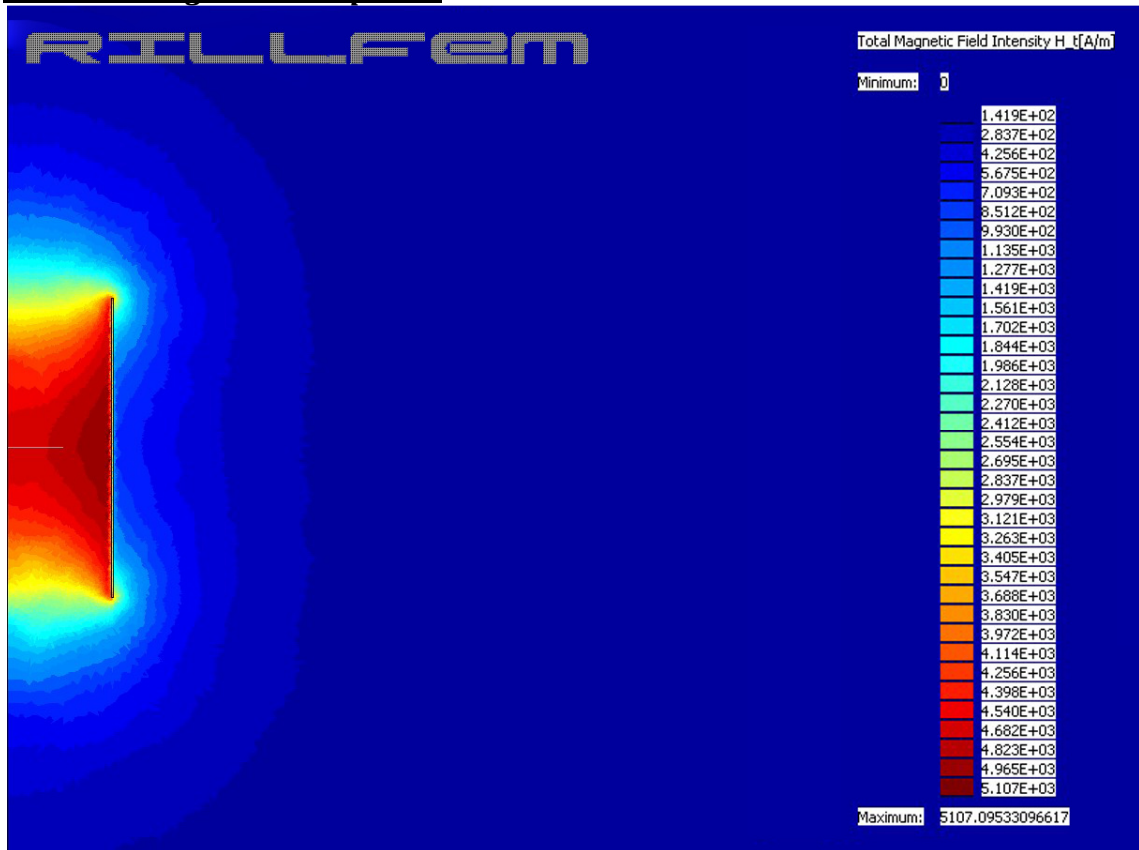
Vektorový potenciál A



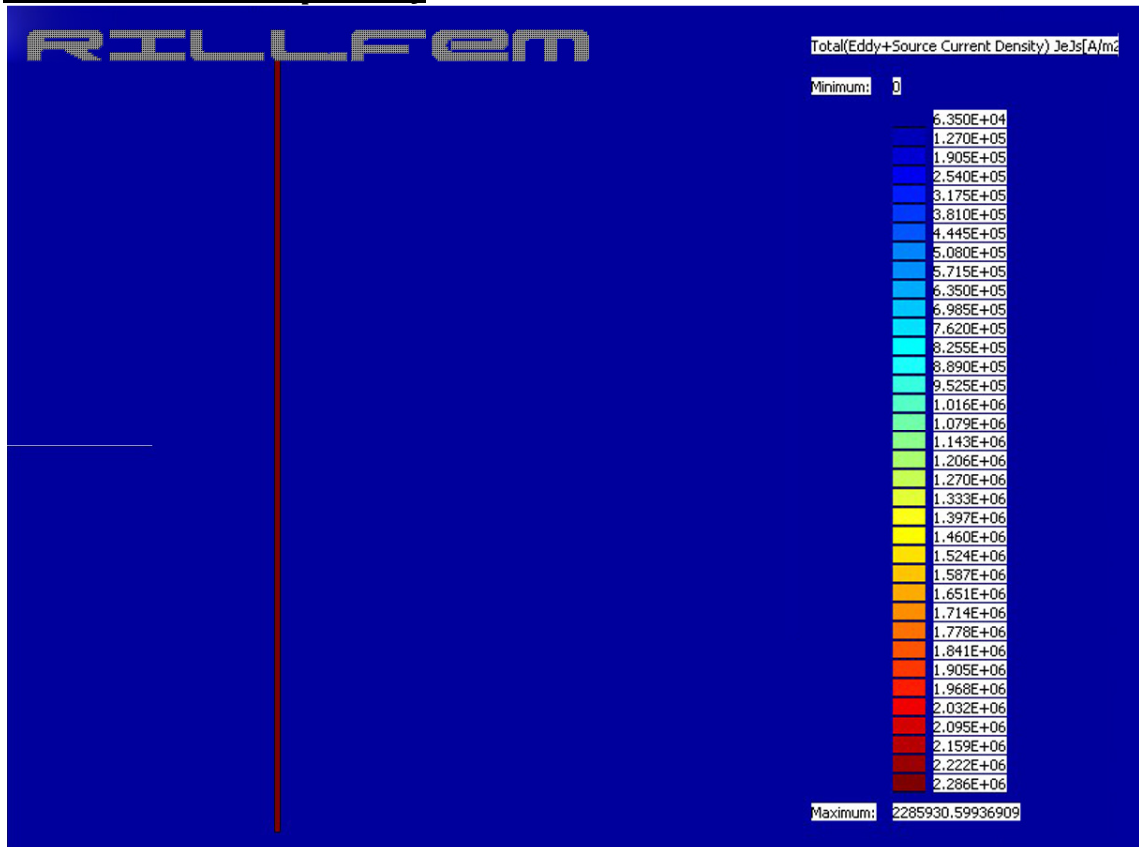
Magnetická indukce B



Intenzita magnetického pole H

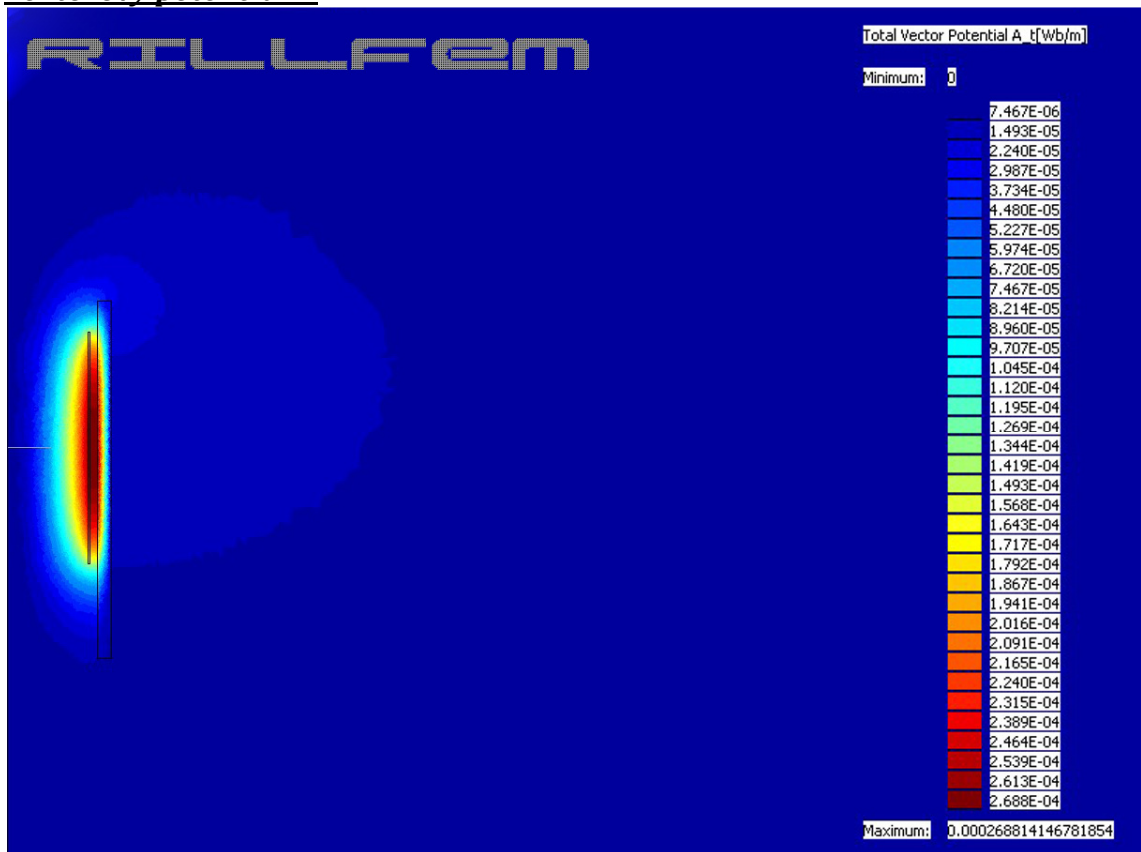


Hutota elektrického proudu I

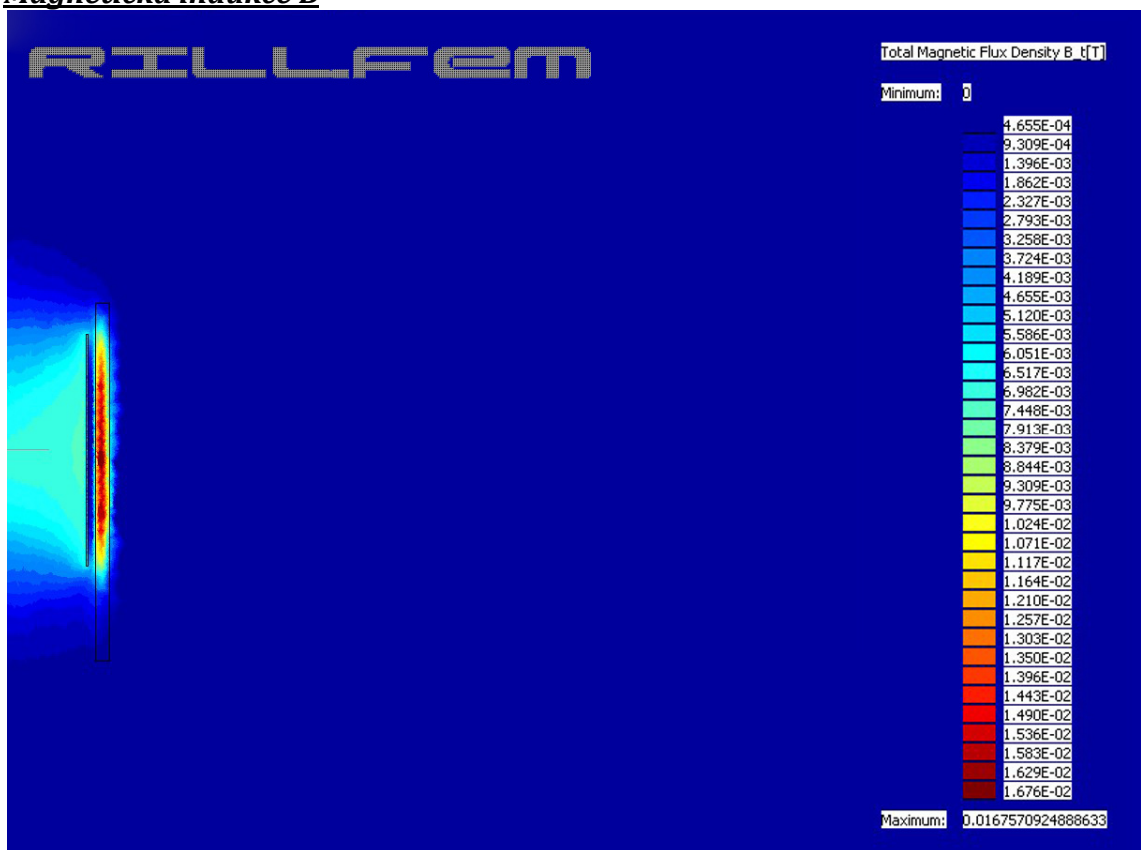


5.2.2 simulace se stíněním

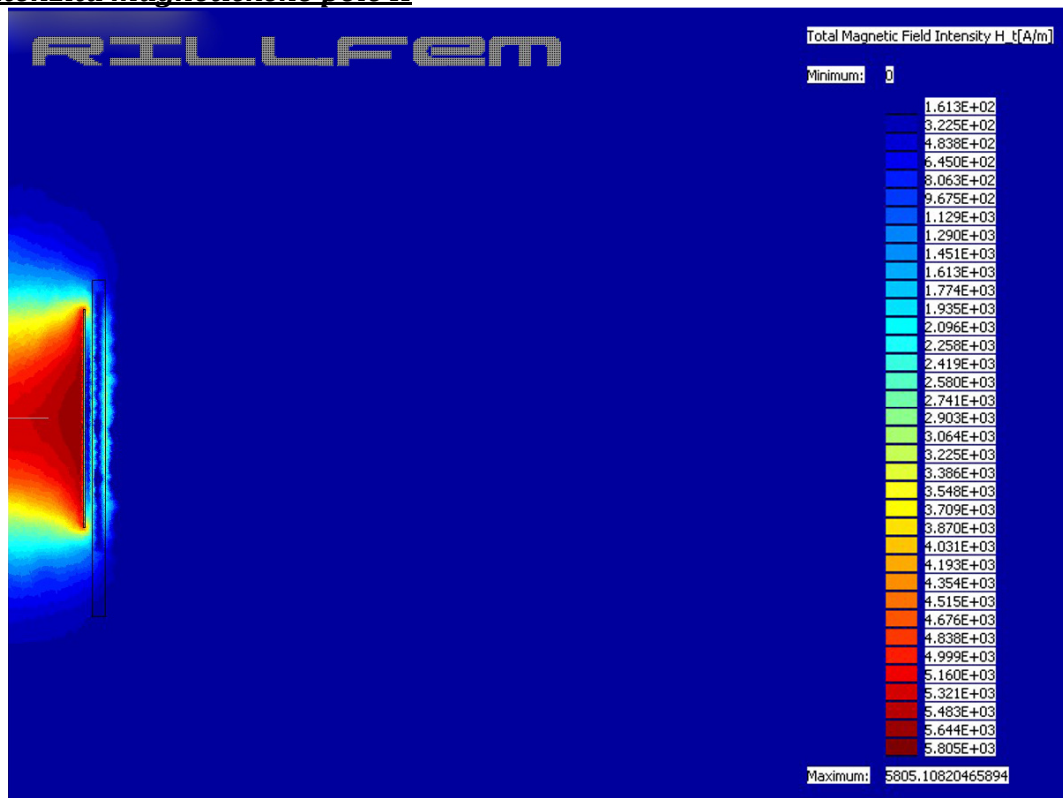
Vektorový potenciál A



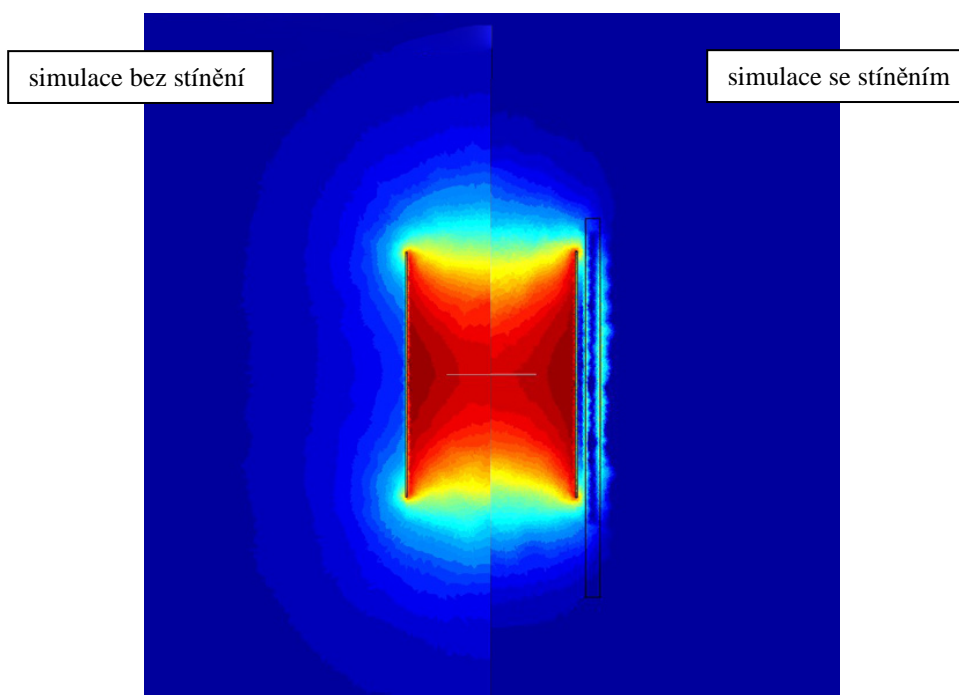
Magnetická indukce B



Intenzita magnetického pole H



Na základě grafických výstupů můžeme vidět, jak svazky transformátorových plechů odstiňují induktor od okolí. Pro názorné porovnání uvedu ještě jeden obrázek srovnávající vliv relativní permeability svazků na velikost a rozptyl intenzity magnetického pole H , ve kterém k sobě přiložím obě poloviny verzí (bez a se stíněním).



5.3. Porovnání výsledků měření a simulace

Nyní lze obě metody měření porovnat. Protože měření na modelu nemohlo být z technických důvodů realizováno ve všech bodech (příliš málo místa v induktoru pro měřící cívečku), porovnávací řadou pro zhodnocení správnosti obou metod se stala řada číslo 9. Hodnoty jsou uvedeny pro jednotlivé body a následně jsou obě měření vynesena do vzájemného grafu.

Bez stínění

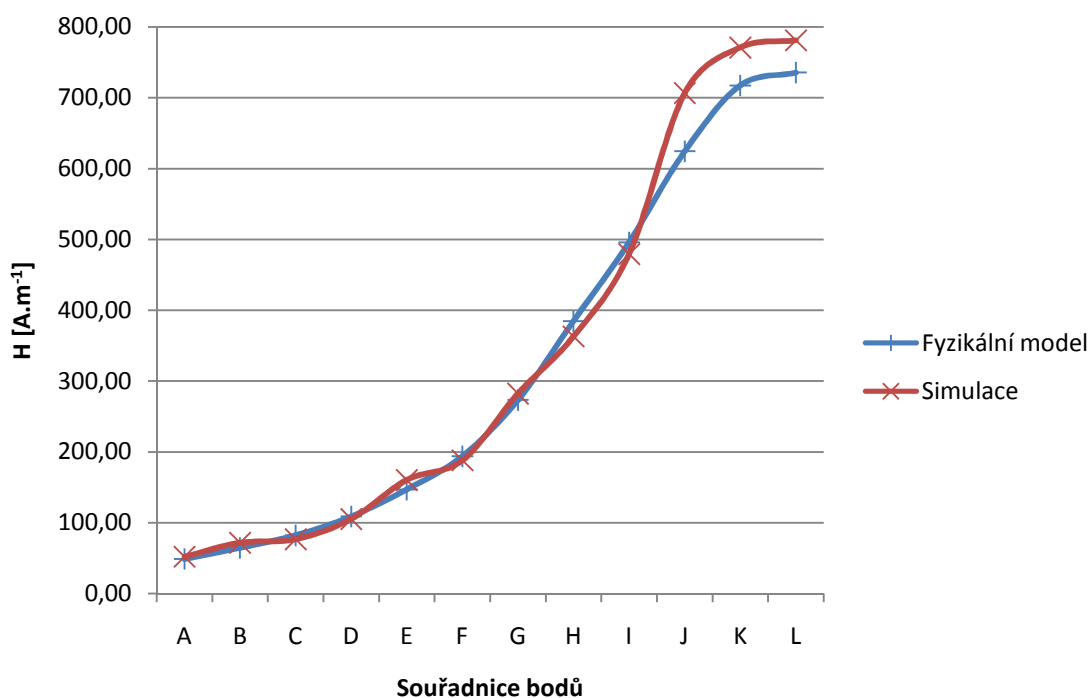
Naměřeno na fyzikálním modelu

$H [A.m^{-1}]$	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Řada 9	49,1	64,6	82,3	108,8	147,0	194,0	273,5	384,5	495,9	624,3	717,2	735,5

Naměřeno simulací

$H [A.m^{-1}]$	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Řada 9	52,3	71,8	76,9	105,4	160,4	188,3	282,6	363,1	479,4	706,8	770,7	781,0

Porovnání - bez stínění (řada 9)



Se stíněním

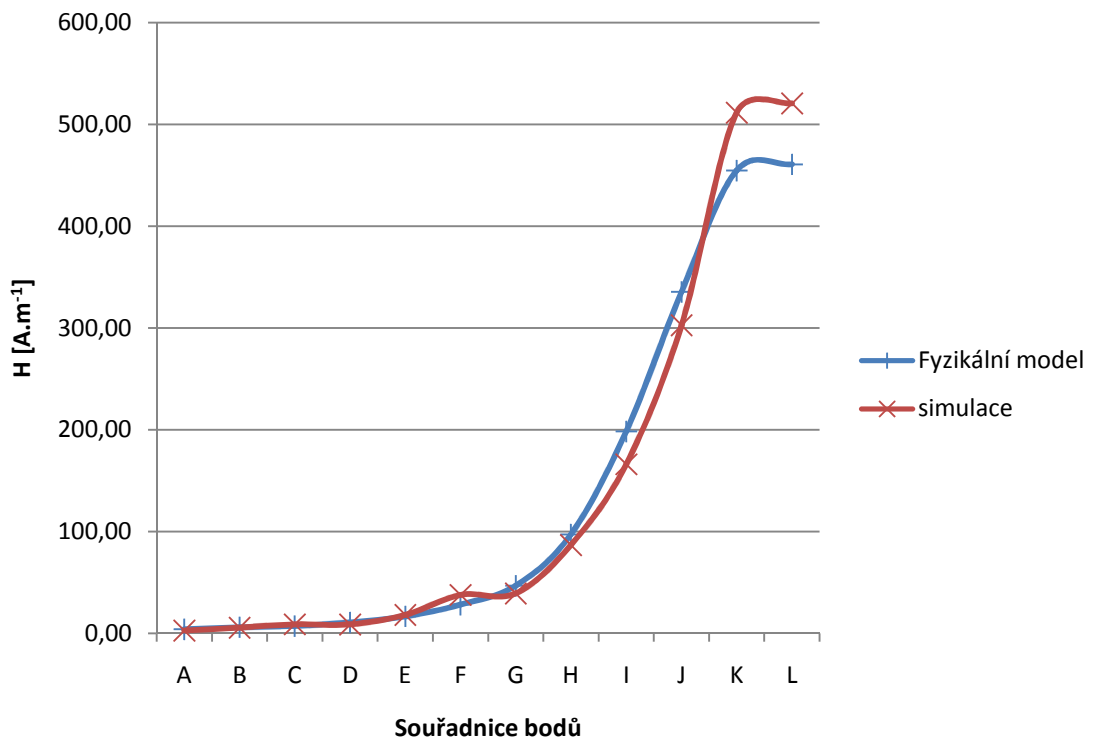
Naměřeno na fyzikálním modelu

$H [A.m^{-1}]$	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Řada 9	3,9	5,9	7,2	10,7	16,7	28,1	46,7	97,1	198,2	335,4	454,5	460,6

Naměřeno simulací

$H [A.m^{-1}]$	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Řada 9	2,8	5,6	8,9	8,7	18,1	37,8	39,3	86,7	166,1	302,6	511,4	520,5

Porovnání - se stíněním (řada 9)



Ze srovnávacích grafů lze vypožorovat, že shodnost výsledků naměřených na fyzikálním modelu je vůči simulaci velice vysoká. Největší odchylka je v obou případech nejvyšší v oblasti maximálních hodnot H . Tuto nepřesnost přisuzují neideálním vlastnostem měřicí cívky.

6. Závěr

Měření vlivu relativní permeability potažmo stínění ze svazků transformátorovými plechy proběhlo bez závažnějších obtíží. Teorie o vlivu stínění induktoru se potvrdila, svazky o vysoké hodnotě relativní permeability (dobré magnetické vodivosti) do sebe naindukují proudy a účinně tak odstíní intenzitu magnetického pole vně induktoru. Tento fakt jsem ověřil měřeními na fyzikálním modelu, kde výsledky jasně ukazují na funkčnost vlivu stínění. Ještě lépe jde jev pozorovat na grafech ze simulace, při níž jsem použil parametry cívky reálného modelu, aby byly výsledky relevantní a schopné porovnání.

Závěrem tedy mohu říci, že i když je pořizovací cena transformátorových svazků poměrně vysoká, je jejich vliv na indukční ohřev (díky parametrům a vysoké hodnotě μ_r) pozitivní. Jejich výhoda je v odstínění elektromagnetického pole, díky kterému by se indukovaly proudy do konstrukčních částí pece a došlo by tak k jejich zahřívání. Celkově je pak ohřev i efektivnější vlivem lepší účinnosti odstíněné pece.

7. Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] RADA, Josef. *Elektrotepelná technika*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985, 344 s. ISBN 04-525-85.
- [2] Magnetické vlastnosti látek. REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2008 [cit. 2012-03-12]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/295-magneticke-vlastnosti-latek>
- [3] LANGER, Emil a Jiří KOŽENÝ. *Elektrotepelná zařízení indukční: Základy, teorie, výpočty a konstrukce*. Plzeň: VŠSE, 1982. 185 s. ISBN 55-095-82.
- [4] HRADÍLEK, Zdeněk. *Elektrotepelná technika: simulace - počítačové programy*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2001, 192 s. ISBN 80-707-8874-7.
- [5] HRADÍLEK, Zdeněk. *Elektrotepelná zařízení*. 1. vyd. Praha: IN-EL, 1997, 174 s. ISBN 80-902-3332-5.