

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektroenergetiky a ekologie**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Stínění vysokofrekvenčního pole u indukčních ohřevů**

**vedoucí práce: Ing. Oldřich Kroupa  
autor: Bc. Jan Košťál**

**2013**

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

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

Jméno a příjmení: **Jan KOŠTÁL**  
Osobní číslo: **E11N0119P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Název tématu: **Stínění vysokofrekvenčního pole u indukčních ohřevů**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Popište problematiku indukčního ohřevu včetně příslušné teorie. Naznačte problematiku základního a přídavného stínění u indukční kelímkové pece.
2. Uveďte základní průmyslové aplikace indukčního ohřevu a druhy indukčních průmyslových pecí.
3. Srovnajte účinnost stínění indukční kelímkové pece s ohledem na použití nízké a vysoké frekvence u názorně zvolených variant geometrického uspořádání na základě hodnot získaných měření fyzikálního laboratorního modelu.
4. Proveďte počítačovou simulaci pro porovnání s naměřenými hodnotami.
5. Stanovte závěry pro praxi a popište rozdíly při použití nízké a vysoké frekvence u stínících prvků indukčního ohřevu.


Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran  
Forma zpracování diplomové 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 diplomové práce: **Ing. Oldřich Kroupa**  
Katedra elektroenergetiky a ekologie  
Konzultant diplomové práce: **Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.**  
Katedra elektroenergetiky a ekologie  
Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**  
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**

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



  
Doc. Ing. Karol Noháč, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

## **Anotace**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku stínění vysokofrekvenčního pole u indukčních ohřevů. Úvodní kapitola je věnována příslušné teorii, kdy je uvedeno odvození základních rovnic jak pro rovinné, tak zejména pro válcové harmonické elektromagnetické pole. Dále je popsána problematika základního stínění u indukčních kelímkových pecí. V druhé kapitole jsou popsány nejčastější aplikace indukčního ohřevu. Třetí kapitola je věnována popisu druhů indukčních průmyslových pecí. Čtvrtá a pátá kapitole popisuje měření a simulace laboratorního modelu indukční kelímkové pece pro tři kmitočty a dva proudy. V závěrečné kapitole je provedeno zhodnocení výsledků měření, simulací a jsou zde uvedeny důsledky stínění pro provoz.

## **Klíčová slova**

Indukční ohřev, Maxwellovy rovnice, válcové harmonické elektromagnetické vlnění, stínění, stínící plášť, svazky transformátorových plechů, indukční prohřívání, povrchové kalení, indukční tavení, indukční kelímková pec, indukční kanálková pec, napájení indukčních pecí, RillFEM, MKP

## **Abstract**

The Diploma thesis presents the shielding of high-frequency fields in induction heating process. The introductory chapter is devoted to the theory, where fundamental equations for planar and particularly for cylindrical harmonic electromagnetic fields are derived and the basic problem of shielding the induction crucible furnaces is described. In the second chapter are described the most frequently applications of induction heating. Third chapter is devoted to the description of the types of the induction furnaces in the industry. The fourth and fifth chapter describes the measurement and simulation of laboratory model of the induction crucible furnace for three frequencies and two currents. In final chapter are presented the results of the measurement, simulation and also are described the effects of the shielding for operation.

## **Key words**

Induction heating, Maxwell equation, cylindrical harmonic electromagnetic waves, shielding, shielded shell, stack of transformer sheets, induction heating, surface hardening, induction melting, induction crucible furnace, induction channel furnace, power induction furnaces, RillFEM, FEM

## **Prohlášení**

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

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

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

V Plzni dne 7.5.2013

Jan Košťál

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Oldřichu Kroupovi za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat panu prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc. za poskytnuté konzultace, za prostudování diplomové práce a věcné připomínky k ní.

## Obsah

|  |           |
|--|-----------|
| ÚVOD .....   | 10        |
| SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....   | 11        |
| <b>1 PROBLEMATIKA INDUKČNÍHO OHŘEVU .....</b>  | <b>13</b> |
| 1.1 INDUKČNÍ OHŘEV .....   | 13        |
| 1.2 ODVOZENÍ ROVNIC ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE .....   | 14        |
| 1.2.1 <i>Maxwellovy rovnice</i> .....  | 14        |
| 1.2.2 <i>Odvození obecných rovnic elektromagnetického pole [4], [6]</i> .....                                    | 15        |
| 1.3 ROVNICE ROVINNÉHO HARMONICKÉHO ELEKTROMAGNETICKÉHO VLNĚNÍ [4, STR. 32], [6, STR. 144] ....                   | 17        |
| 1.4 VÁLCOVÉ HARMONICKÉ ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ [4, STR. 113], [6, STR. 179] .....                               | 19        |
| 1.4.1 <i>Obecné rovnice válcového harmonického elektromagnetického vlnění [4, str. 115], [6, str. 180]</i> ..... | 19        |
| 1.5 PROBLEMATIKA STÍNĚNÍ U INDUKČNÍCH KELÍMKOVÝCH PECÍ .....   | 21        |
| 1.5.1 <i>Stínění vodivým pláštěm</i> .....   | 21        |
| 1.5.2 <i>Stínění svazky transformátorových plechů [3, 8]</i> .....   | 24        |
| <b>2 PRŮMYSLOVÁ APLIKACE INDUKČNÍHO OHŘEVU .....</b>   | <b>27</b> |
| 2.1 INDUKČNÍ PROHŘÍVÁNÍ .....  | 27        |
| 2.2 INDUKČNÍ POVRCHOVÉ KALENÍ .....  | 28        |
| 2.2.1 <i>Povrchové kalení válců malého průměru</i> .....   | 28        |
| 2.2.2 <i>Povrchové kalení ozubených kol a vaček [3]</i> .....  | 28        |
| 2.2.3 <i>Povrchové kalení válců pro válcovací stolici</i> .....  | 29        |
| 2.3 INDUKČNÍ PÁJENÍ .....  | 29        |
| 2.4 INDUKČNÍ SVAŘOVÁNÍ [6, 3] .....  | 30        |
| 2.5 INDUKČNÍ TAVENÍ .....  | 30        |
| <b>3 INDUKČNÍ PRŮMYSLOVÉ PECE .....</b>  | <b>32</b> |
| 3.1 INDUKČNÍ KANÁLKOVÁ PEC .....   | 32        |
| 3.2 INDUKČNÍ KELÍMKOVÁ PEC .....   | 34        |
| 3.2.1 <i>Účinnost indukčních kelímkových pecí [3]</i> .....  | 36        |
| 3.2.2 <i>Typy indukčních kelímkových pecí</i> .....  | 37        |
| 3.2.3 <i>Elektrické schéma indukční kelímkové pece [3, 17]</i> .....   | 40        |
| 3.3 INDUKČNÍ VAKUOVÁ PEC [16] .....  | 41        |
| 3.4 ZDROJE NAPÁJENÍ INDUKČNÍCH PECÍ .....  | 42        |
| 3.4.1 <i>Napájení zařízení na síťový kmitočet</i> .....  | 42        |
| 3.4.2 <i>Napájení středofrekvenčních zařízení</i> .....  | 43        |
| 3.4.3 <i>Napájení vysokofrekvenčních zařízení</i> .....  | 45        |
| <b>4 MĚŘENÍ NA FYZIKÁLNÍM LABORATORNÍM MODELU .....</b>  | <b>46</b> |
| 4.1 MĚŘENÍ NA LABORATORNÍM MODELU PŘI KMITOČTU 50 HZ .....   | 49        |
| 4.1.1 <i>Velikost proudu 15 A</i> .....  | 49        |
| 4.1.2 <i>Velikost proudu 31 A</i> .....  | 54        |
| 4.2 MĚŘENÍ NA LABORATORNÍM MODELU PŘI KMITOČTU 4 100 HZ .....  | 59        |
| 4.2.1 <i>Velikost proudu 15 A</i> .....  | 59        |
| 4.2.2 <i>Velikost proudu 31 A</i> .....  | 64        |
| 4.3 MĚŘENÍ NA LABORATORNÍM MODELU PŘI KMITOČTU 10 000 HZ .....   | 69        |
| 4.3.1 <i>Velikost proudu 15 A</i> .....  | 69        |
| 4.3.2 <i>Velikost proudu 31 A</i> .....  | 74        |
| 4.4 CHYBY MĚŘENÍ [19] .....  | 79        |
| <b>5 SIMULACE LABORATORNÍHO MODELU .....</b>   | <b>81</b> |



---

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 5.1      | STRUČNÝ POPIS PROGRAMU RILLFEM 2D [7],[18].....   | 81         |
| 5.2      | POSTUP ŘEŠENÍ V PROGRAMU RILLFEM.....   | 83         |
| 5.3      | SIMULACE LABORATORNÍ ÚLOHY - PROUD 15 A.....  | 83         |
| 5.4      | SIMULACE LABORATORNÍ ÚLOHY - PROUD 31 A.....  | 91         |
| <b>6</b> | <b>ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A DŮSLEDKY STÍNĚNÍ PRO PROVOZ.....</b>                               | <b>97</b>  |
|          | <b>ZÁVĚR.....</b>   | <b>100</b> |
|          | <b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>  | <b>103</b> |
|          | <b>PŘÍLOHY.....</b>   | <b>1</b>   |
|          | PŘÍLOHA I BESSELOVY ROVNICE [4, STR. 296] [6, STR. 183].....                                | 2          |
|          | PŘÍLOHA II - NAGAOKOVY SOUČINITELE A [3, STR 171 A 172] .....                               | 3          |
|          | PŘÍLOHA III - LABORATORNÍ ÚLOHA, PŘÍSTROJE .....  | 5          |
|          | PŘÍLOHA IV - NÁKRES INDUKTORU SE SVAZKY TRANSFORMÁTOROVÝCH PLECHŮ.....                      | 7          |
|          | PŘÍLOHA V - INDUKČNÍ KELÍMKOVÁ PEC PRO ODLÉVÁNÍ LITINY V PROVOZU .....                      | 8          |
|          | PŘÍLOHA VI - VLIV SVAZKŮ TRANSFORMÁTOROVÝCH PLECHŮ NA INDUKČNOST INDUKTORU.....             | 12         |
|          | PŘÍLOHA VII - ANALYTICKÝ VÝPOČET INTENZITY MAGNETICKÉHO POLE PRÁZDNÉHO INDUKTORU [13] ..... | 15         |
|          | PŘÍLOHA VIII - SROVNÁNÍ PROCENTUÁLNÍHO ROZDÍLU STÍNĚNÍ, 2D GRAFY PRO KMITOČET 4 100 HZ..... | 16         |

## Úvod

Indukční ohřev je v dnešním průmyslu hojně využívaným elektrotepelným procesem, který umožňuje dostatečně rychlý, snadno regulovatelný způsob ohřevu elektricky vodivých materiálů. Charakteristickým rysem indukčního ohřevu je vývin tepla v samotném materiálu, což ve výsledku přináší rychlejší a efektivnější ohřev daného materiálu. Ale podobně jako jiné způsoby ohřevu, tak i indukční ohřev se vyznačuje specifickou nevýhodou, typickou pro indukční ohřev. Při indukčním ohřevu se vznikající magnetické pole uzavírá vně induktoru a negativně ovlivňuje okolní konstrukci z elektricky vodivých materiálů. Pokud by se neprovedla patřičná opatření, okolní konstrukce by se zahřívaly, což by vyvolalo vznik ztrát a snížení elektrické účinnosti tavicí pece. Pro eliminování tohoto jevu se provádí tzv. stínění, kdy jsou známy dva způsoby stínění. Prvním způsobem je stínění vodivým pláštěm, které využívá dobře vodivý plášť a principu elektromagnetické indukce a Lenzova zákona. Druhým případem, technicky dokonalejším způsobem, je stínění pomocí svazků transformátorových plechů umístěných vně induktoru (jsou využívána magneticky vodivá jádra), kterými se uzavírá magnetický tok vně induktoru. Je proto na místě se touto problematikou zabývat.

Ve své práci se zabývám měřením stínění vysokofrekvenčního pole u indukčních ohřevů a jejím porovnáním se simulací uskutečněné v programu RillFEM 2D. Pro provedení stínění bylo použito 10 svazků transformátorových plechů pravidelně rozmístěných okolo induktoru. Jako zdroj vysokofrekvenčního pole byl použit pulzní generátor, kterým jsem generoval pole o kmitočtu 4 100 Hz a 10 000 Hz pro proudy 15 A a 31 A. Měření jsem dále obohatil o měření pole síťového kmitočtu, aby bylo možné provést porovnání nízkých a vysokých kmitočtů na úrovni stínění.

## Seznam symbolů a zkratk

|   |   |
|---|---|
| <b>A, B</b>                             | Integrační konstanty                          |
| $a$ [m]                                 | Hloubka vniku                                 |
| $\alpha$ [-]                            | Fázová konstanta                              |
| $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, F_{ij}$  | Nagaokovy součinitele                         |
| <b>B</b> [T]                            | Magnetická indukce                            |
| <b>B<sub>r</sub>, B<sub>a</sub></b> [T] | Magnetická indukce v radiálním/axiálním směru |
| $\beta$ [-]                             | Měrný útlum                                   |
| <b>C</b> [F]                            | Kapacita                                      |
| <b>C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub></b>     | Integrační konstanty                          |
| $\gamma$ [S/m]                          | Elektrická vodivost                           |
| $D$ [m]                                 | Průměr roztečné kružnice                      |
| $d$ [m]                                 | Průměr, tloušťka                              |
| div                                     | Divergence                                    |
| <b>E</b> [V/m]                          | Intenzita elektrického pole                   |
| el.                                     | Elektrický                                    |
| elmag.                                  | Elektromagnetické                             |
| $\varepsilon$ [F/m]                     | Permitivita prostředí                         |
| $\varepsilon_r$ [-]                     | Relativní permitivita                         |
| $\varepsilon_0$ [F/m]                   | Permitivita vakua                             |
| $F$ [N]                                 | Elektrodynamická síla                         |
| <b>FEM</b>                              | Finite element method                         |
| $f$ [Hz]                                | Kmitočet                                      |
| $\varphi$ [°]                           | Úhel  |
| <b>G</b> [kg]                           | Hmotnost                                      |
| grad                                    | Gradient                                      |
| <b>H</b> [A/m]                          | Intenzita magnetického pole                   |
| <b>H<sub>r</sub></b> [A/m]              | Odražená vlna intenzity magnetického pole     |
| <b>H<sub>p</sub></b> [A/m]              | Postupná vlna intenzity magnetického pole     |
| $h$ [m]                                 | Výška vzdutí                                  |
| $I_{ef}$ [A]                            | Efektivní proud                               |
| $I$ [A]                                 | Proud   |
| <b>J</b> [A/m <sup>2</sup> ]            | Proudová hustota naindukovaných proudů        |
| $J_1$                                   | Cylindrické funkce prvního řádu prvního druhu |
| $k$ [-]                                 | Konstanta šíření elmag. vlnění                |
| $k$ [-]                                 | Konstanta měřicí/křížové cívky                |
| $L_1, L_2, L_3$ [H]                     | Vlastní indukčnosti                           |
| $l$ [m]                                 | Výška   |
| $M_{12}, M_{23}, M_{31}$ [H]            | Vzájemná indukčnosti                          |
| <b>MKP</b>                              | Metoda konečných prvků                        |

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| MR                          | Maxwellova rovnice                            |
| $\mu$ [H/m]                 | Permeabilita prostředí                        |
| $\mu_r$ [-]                 | Relativní permeabilita                        |
| $\mu_0$ [H/m]               | Permeabilita vakua                            |
| $N_1, N_2, N_3$             | Počet závitů                                  |
| $N_1$                       | Cylindrické funkce prvního řádu druhého druhu |
| $\eta$ [-]                  | Účinnost                                      |
| Obr.                        | Obrázek                                       |
| $P$ [W]                     | Joulovy ztráty, výkon, příkon                 |
| $P_{Fe}$ [kW]               | Ztráty v železe                               |
| $R$ [ $\Omega$ ]            | Odpor materiálu                               |
| $r$ [m]                     | Poloměr                                       |
| resp.                       | Respektive                                    |
| rot                         | Rotace  |
| $\rho$ [C/m <sup>3</sup> ]  | Objemová hustota elektrického náboje          |
| $\rho$ [kg/m <sup>2</sup> ] | Měrná hmotnost                                |
| $\phi$ [Wb]                 | Magnetický tok                                |
| $S$ [m <sup>2</sup> ]       | Průřez  |
| SiO <sub>2</sub>            | Oxid křemičitý                                |
| str.                        | Strana  |
| $\delta_3$ [m]              | Tloušťka pláště                               |
| Tab.                        | Tabulka                                       |
| $U_g$ [V]                   | Napětí generátoru                             |
| VN                          | Vysokonapěťové                                |
| vf                          | Vysokofrekvenční                              |
| $x, y, z$                   | Souřadnice                                    |
| $\omega$ [1/s]              | Úhlová frekvence                              |
| $Z$ [ $\Omega$ ]            | Impedance prostředí                           |
| $z$                         | Počet zubů                                    |
| $\nabla$                    | Laplaceův operátor                            |

### Grafická úprava veličin

|                 |                 |  |
|-----------------|-----------------|--|
| $H$             | obecná veličina | Times New Roman, kurzíva, velikost písma 12        |
| $\vec{H}$       | vektor          | Times New Roman, tučně, kurzíva, velikost písma 12 |
| $\hat{H}$       | fázor skalárů   | Arial, tučně, kurzíva, velikost písma 12           |
| $\vec{\hat{H}}$ | fázor vektorů   | Times New Roman, tučně, velikost písma 12          |

# 1 Problematika indukčního ohřevu

## 1.1 Indukční ohřev

[6, str. 135] [3, str. 9] [4, str. 15][8]

Indukční ohřev patří v současné době mezi nejrozšířenější způsob ohřevu. Jedná se o moderní způsob ohřevu, jenž je dostatečně rychlý, relativně snadno regulovatelný a efektivní. Je aplikován zejména v průmyslovém měřítku, kdy postupem času je v upravené podobě stále častěji používán také v domácnostech pro přípravu pokrmů. V průmyslu je indukční ohřev aplikován pro tavení kovových a nekovových materiálů v indukčních pecích. Dále se s indukčním ohřevem můžeme setkat při výrobě trubek (indukční svařování), při pájení, prohřívání vývalků pro tvářecí účely nebo při povrchovém kalení.

Princip indukčního ohřevu je založen na přeměně energie elektromagnetického vlnění na energii tepelnou uvnitř vsázky, která musí být z elektricky vodivého materiálu. Vloží-li se tato elektricky vodivá vsázka do proměnného elektromagnetického pole, které je vytvořeno induktorem napájeným střídavým proudem o kmitočtu  $k$  dané aplikaci, tak se část elektromagnetického vlnění dopadajícího na stěnu vodivé vsázky odrazí zpět a část vlnění vstoupí stěnou dovnitř vsázky. Toto vlnění vyvolává naindukování vířivých proudů (podle Lenzova zákona opačného smyslu než napájecí proud) uvnitř vsázky, které průchodem materiál zahřívají (vznikají Joulovy ztráty  $P = R \cdot I_{ef}^2$ ). Dochází k útlumu elektromagnetického vlnění ve stěně, jehož energie se přemění na energii tepelnou. Množství naindukovaného tepla ve vsázce je úměrné  $P \sim H^2$ .

Výhodou indukčního ohřevu je skutečnost, že teplo vzniká uvnitř vsázky. Teplo není dopravováno žádným tepelným spádem, ale nýbrž díky přenosu energie elektromagnetickým polem, což v důsledku přináší rychlejší ohřev. Další neméně významnou výhodou indukčního ohřevu je, že se může volbou kmitočtu ovlivnit rozložení tepla vyvíjeného ve vsázce (volba tloušťky vrstvy pro ohřátí). Zde se vychází ze vztahu pro hloubku vniku naindukovaných proudů (86% z celkového tepla ve vsázce vzniká ve vrstvě o hloubce  $a$ ).

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}}, \quad (1 - 1)$$

kde  $\mu$  permeabilita prostředí [H/m]  
 $\gamma$  elektrická vodivost [S/m]  
 $\omega = 2\pi \cdot f$  úhlová frekvence [1/s]

Zdrojem elektromagnetického záření může být každý vodič, kterým protéká střídavý proud. Tento vodič bývá upraven do vhodného tvaru s ohledem na vsázku, která se bude ohřívat. Teorie elektromagnetického pole u indukčního ohřevu je popsána obecnými vlnovými rovnicemi pro šíření elektromagnetického vlnění, vyplývajících z Maxwellových rovnic.

## 1.2 Odvození rovnic elektromagnetického pole

### 1.2.1 Maxwellovy rovnice

Obecné vlnové rovnice šíření pro elektromagnetické vlnění v prostředí, jenž je charakterizováno parametry  $\varepsilon$ ,  $\mu$ ,  $\gamma$ , se odvodí na základě Maxwellových rovnic.

Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru: [6]

$$1. \quad \text{rot} \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1 - 2)$$

$$2. \quad \text{rot} \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1 - 3)$$

$$3. \quad \text{div} \varepsilon \mathbf{E} = \rho \quad (1 - 4)$$

$$4. \quad \text{div} \mu \mathbf{H} = 0, \quad (1 - 5)$$

kde  $\mathbf{H}$  je vektor intenzity magnetického pole [A/m]

$\mathbf{E}$  je vektor intenzity elektrického pole [V/m]

$\gamma$  je elektrická vodivost [S/m]

$\rho$  je objemová hustota elektrického náboje [C/m<sup>3</sup>]

$\varepsilon$  je permitivita prostředí

dána vztahem  $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ ,

kde  $\varepsilon_r$  je relativní permitivita,  $\varepsilon_0$  permitivita vakua ( $\varepsilon_0 \cong \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9}$  F/m)

$\mu$  je permeabilita prostředí

dána vztahem  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ ,

kde  $\mu_r$  je relativní permeabilita,  $\mu_0$  permeabilita vakua ( $\mu_0 \cong 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m)

### 1.2.2 Odvození obecných rovnic elektromagnetického pole [4], [6]

Pro odvození obecné rovnice elektromagnetického vlnění je nutné provést rotaci 1. Maxwellovy rovnice (dále jen MR).

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = \gamma \operatorname{rot} \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial(\operatorname{rot} \mathbf{E})}{\partial t} \quad (1 - 6)$$

Nyní je vhodné využít 2. MR a dosadit do pravé strany rovnice.

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = -\gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (1 - 7)$$

Vyjde-li se ze vztahu pro vektorový počet (1 - 8) a 4. Maxwellovy rovnice (1 - 5),

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{H} - \nabla^2 \mathbf{H} \quad (1 - 8)$$

$$\operatorname{div} \mu \mathbf{H} = 0$$

získá se vztah pro obecnou rovnici elektromagnetického vlnění pro vektor  $\mathbf{H}$  ve tvaru:

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} - \mu_0 \mu_r \gamma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0 \quad (1 - 9)$$

Analogicky se postupuje při odvození obecné rovnice elektromagnetického vlnění pro vektor  $\mathbf{E}$ . Vychází se ze 2. MR (1 - 3), na kterou se opět aplikuje rotace, dále ze 3. MR (1 - 4) a ze vztahu pro vektorový počet:

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

Po úpravě a při úvaze, že volné náboje jsou nulové  $\rho = 0$ , se získá vztah obecné rovnice pro vektor  $\mathbf{E}$  ve tvaru:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \mu_r \gamma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0 \quad (1 - 10)$$

Ve výše uváděných vzorcích se vyskytuje Laplaceův diferenciální operátor  $\nabla^2$  [4]

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

Nejčastěji se dané rovnice uvažují pro dva typy prostředí, elektricky vodivé a elektricky nevodivé [6]

**Elektricky vodivé prostředí:** zde se zanedbává  $\varepsilon_r$  a výše uvedené rovnice přejdou do tvaru

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu_0 \mu_r \gamma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0 \quad (1 - 11)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \mu_r \gamma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0 \quad (1 - 12)$$

**Elektricky nevodivé prostředí:** je charakterizováno  $\gamma=0$ , poté výše uvedené rovnice přejdou do tvaru

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (1 - 13)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1 - 14)$$

U harmonického průběhu vektoru  $\mathbf{E}$  a  $\mathbf{H}$  lze časovou změnu snadno charakterizovat rotujícím fázorem v komplexní rovině. Nejedná se o změnu směru  $\mathbf{E}$  a  $\mathbf{H}$  v prostoru, ale jen pouze o vyjádření časové změny. Lze tedy použít fázory a převést výše zobecněné rovnice do tvaru s fázory. [4, str. 22], [6, str. 143]

$$\mathbf{H} = \mathbf{H} \cdot e^{j\omega t} \quad \mathbf{E} = \mathbf{E} \cdot e^{j\omega t}$$

Pro dosažení do zobecněných rovnic je zapotřebí vypočítat první a druhé derivace fázorů  $\mathbf{E}$  a  $\mathbf{H}$  [4]

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = j\omega \cdot \mathbf{H} \cdot e^{j\omega t} = j\omega \cdot \mathbf{H} \quad \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = j\omega \cdot \mathbf{E} \cdot e^{j\omega t} = j\omega \cdot \mathbf{E}$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = -\omega^2 \cdot \mathbf{H} \cdot e^{j\omega t} = -\omega^2 \cdot \mathbf{H} \quad \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = -\omega^2 \cdot \mathbf{E} \cdot e^{j\omega t} = -\omega^2 \cdot \mathbf{E}$$

Z časových derivací je patrná jejich časová nezávislost, toto je s výhodou využíváno pro snadnější řešení zobecněných vlnových rovnic fázorů  $\mathbf{E}$  a  $\mathbf{H}$ . [6]

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} - \mu_0 \mu_r \gamma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + \omega^2 \mu \varepsilon \mathbf{H} - j\omega \mu \gamma \mathbf{H} = 0$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + (\omega^2 \mu \varepsilon - j\omega \mu \gamma) \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (1 - 15)$$

Analogicky se postupuje u  $\mathbf{E}$

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \mu_r \gamma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} + (\omega^2 \mu \varepsilon - j\omega \mu \gamma) \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (1 - 16)$$

Zavede-li se do rovnic (1 - 15) a (1 - 16) konstanta šíření elektromagnetického vlnění  $\mathbf{k}$ , charakterizující vlastnosti prostředí, kde  $\mathbf{E}$  a  $\mathbf{H}$  se šíří. Při harmonickém průběhu  $\mathbf{E}$  a  $\mathbf{H}$  při  $\omega$  se rovnice upraví do tvaru: [4]

$$\nabla^2 \mathbf{H} + \mathbf{k}^2 \cdot \mathbf{H} = 0, \quad \nabla^2 \mathbf{E} + \mathbf{k}^2 \cdot \mathbf{E} = 0, \quad (1 - 17), (1 - 18)$$



$$\text{kde} \quad \mathbf{k}^2 = (\omega^2 \mu \epsilon - j \omega \mu \gamma)$$

$$\mathbf{k} = \alpha - j\beta,$$

kde  $\alpha$  je fázová konstanta,  $\beta$  je měrný útlum

V tabulce Tab. 1. 1 jsou uvedeny hodnoty  $\mathbf{k}^2$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  pro prostředí elektricky vodivé a elektricky nevodivé. [20]

Tab. 1. 1 Hodnoty konstanty šíření

|                 | $\alpha$           | $\beta$       | $\mathbf{k}^2$                    |
|-----------------|--------------------|---------------|-----------------------------------|
| $\gamma = 0$    | $\frac{\omega}{v}$ | 0             | $\left(\frac{\omega}{v}\right)^2$ |
| $\gamma \neq 0$ | $\frac{1}{a}$      | $\frac{1}{a}$ | $-2 \cdot \frac{j}{a^2}$          |

Obecné rovnice ( 1 - 17 ), ( 1 - 18 ) jsou platné nejen pro prostředí elektricky vodivá a elektricky nevodivá, ale i pro elektromagnetická vlnění rovinná a válcová (více rozpracované v kapitole 1.4).

### 1.3 Rovnice rovinného harmonického elektromagnetického vlnění [4, str. 32], [6, str. 144]

Pro snazší řešení a lepší názornost se bere v úvahu invariantní charakter rovinného elektromagnetického vlnění k souřadnicím  $y$  a  $z$ . To znamená, že derivace  $\mathbf{E}$  a  $\mathbf{H}$  podle  $y$  a  $z$  jsou nulové. Z toho dále vyplývá, že  $\mathbf{E}$  a  $\mathbf{H}$  budou konstantní v každé rovině kolmé na osu  $x$ .

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial z^2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2} = 0$$

Poté Laplaceův operátor pro rovinnou vlnu přejde na tvar:

$$\nabla^2 = \frac{d^2}{dx^2}$$

Vyjde-li se z těchto předpokladů, potom dříve odvozené fázorové rovnice ( 1 - 17 ), ( 1 - 18 ) přejdou do tvaru

$$\frac{d^2\mathbf{H}}{dx^2} + \mathbf{k}^2 \cdot \mathbf{H} = 0, \quad \frac{d^2\mathbf{E}}{dx^2} + \mathbf{k}^2 \cdot \mathbf{E} = 0, \quad (1 - 19), (1 - 20)$$

Řešením této diferenciální rovnice 2. řádu je lineární kombinace dvou exponenciálních funkcí.

$$\mathbf{H} = \mathbf{A} \cdot e^{\lambda_1 x} + \mathbf{B} \cdot e^{\lambda_2 x},$$

kde  $\lambda_{1,2} = \mp j\mathbf{k} = \mp j(\alpha - j\beta)$

Potom výsledný výraz je ve tvaru:

$$\mathbf{H} = \mathbf{A} \cdot e^{-jkx} + \mathbf{B} \cdot e^{jkx} = \mathbf{H}_p + \mathbf{H}_r \quad (1 - 21)$$

Tím jsme získali obecné řešení pro harmonické rovinné vlnění, jak pro prostředí elektricky vodivé, tak i pro prostředí elektricky nevodivé. Ve výrazu se objevuje člen znázorňující postupnou vlnu  $\mathbf{H}_p$  intenzity magnetického pole (tj. první člen na pravé straně) a člen znázorňující odraženou vlnu  $\mathbf{H}_r$  vlnění od rovné stěny (tj. druhý člen na pravé straně). Integrační konstanty  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  se určí na základě mezních podmínek v konkrétním případě. [4, str. 32]

Pro vyjádření fázoru  $\mathbf{E}$  se využívá první Maxwellova rovnice. Dle 1. MR je zapotřebí určit rotaci fázoru  $\mathbf{H}$  z rovnice (1 - 21). Vyjde-li se ze vztahu odvozeného v [4, str. 33]  $\text{rot}\mathbf{H} = -\frac{\partial\mathbf{H}}{\partial x}$  a provedou-li se patřičné úpravy, vyjde vztah pro fázor  $\mathbf{E}$ .

$$\mathbf{E} = \sqrt{\left(\frac{j\omega\mu}{\gamma + j\omega\epsilon}\right)} \cdot [\mathbf{A} \cdot e^{-jkx} - \mathbf{B} \cdot e^{jkx}] = \mathbf{Z} \cdot [\mathbf{A} \cdot e^{-jkx} - \mathbf{B} \cdot e^{jkx}] = \mathbf{E}_p + \mathbf{E}_r \quad (1 - 22)$$

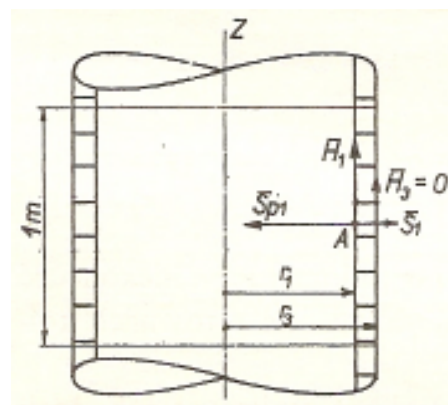
Stejně tak jak tomu bylo u fázoru  $\mathbf{H}$ , lze fázor  $\mathbf{E}$  vyjádřit ve vlně postupné a ve vlně odražené. Výraz  $\mathbf{Z}$  značí impedanci prostředí.

Závěrem je dobré se zmínit, že odvozené výrazy fázorů  $\mathbf{E}$  a  $\mathbf{H}$  (1 - 21), (1 - 22) představují rovinné elektromagnetické vlnění platné pro elektricky vodivá i elektricky nevodivá prostředí. [4, str. 34]

## 1.4 Válcové harmonické elektromagnetické vlnění [4, str. 113], [6, str. 179]

V mnoha případech indukčního ohřevu je využívána vsázka válcového tvaru umístěna souose do induktoru také válcového tvaru. Je proto na místě se s touto problematikou blíže seznámit.

Zdrojem válcového elektromagnetického vlnění se uvažuje válcová plocha o poloměru  $r$ , jenž je nekonečně dlouhá a protéká jí střídavý harmonický proud. Ve skutečnosti nahrazujeme uvažovanou válcovou plochu navinutou cívku se závitů obdélníkového průřezu, jejichž rovina proložená závitěm je kolmá na osu válce a protéká jimi střídavý harmonický proud. U cívky s teoreticky nekonečnou délkou nelze s velkou přesností uvažovat (předpokládat) stejnou okamžitou hustotu proudu v celé její délce. Toho lze docílit pouze u cívky, jejichž délka je  $l > d$  (rozměry



Obr. 1. 1 Vektory  $H$  a zářivé vektory  $S$  v solenoidu<sup>1</sup> [4]

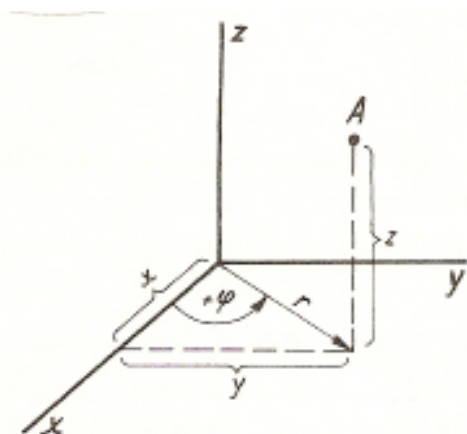
jsou menší než vlnová délka). Tato válcová plocha vyzařuje válcové elmag. vlnění do dutiny cívky (směřující k ose válce). V dalších teoretických úvahách docílíme toho, že pokud délka cívky je nekonečná, potom vybuzený magnetický tok v dutině cívky se uzavírá vně cívky přes prakticky nekonečný prostor ( $r \rightarrow \infty$ ). Z toho lze usoudit, že intenzita magnetického pole  $H$  na vnějším povrchu cívky je nulová.

Umístí-li se vyzařující válec tak, aby osa válce byla totožná s osou  $z$  a za předpokladu délky cívky  $l \gg d$ , zjednoduší se studovaný jev na jev závislý pouze na poloměru  $r$ . To znamená, že vektory  $E$ ,  $H$  budou za těchto předpokladů ve válcových útvarech závislé pouze na poloměru  $r$ . Pro zjištění (určení) těchto vektorů se vhodně aplikují válcové (cylindrické) souřadnice (viz Obr. 1. 2).

### 1.4.1 Obecné rovnice válcového harmonického elektromagnetického vlnění [4, str. 115], [6, str. 180]

Při odvození obecných rovnic válcového elmag. vlnění vycházíme z výše odvozených rovnic (1 - 17), (1- 18). Pro určení fázorů  $H$  (resp.  $E$ ) je zapotřebí vyjádřit Laplaceův operátor ve válcových souřadnicích.

<sup>1</sup> Příčný řez cívku, znázorněn úsek délky 1m pro zobrazení vektoru magnetické intenzity vně a uvnitř cívky a výsledných zářivých vektorů  $S_{p1}$  a  $S_1$ . Okamžitá hodnota hustoty proudu je v celé délce stejná.



Obr. 1. 2 Válcové souřadnice [6]

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial r}$$

Za výše zmíněného předpokladu (jeví závislý pouze na poloměru  $r$ )

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial \varphi^2} = \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial z^2} = 0$$

Bude potom

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial r} \quad (1 - 23)$$

Mezi válcovými a pravoúhlými souřadnicemi je podle Obr. 1. 2 patrný vztah:

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

Po dosazení výrazu (1 - 23) do výrazu (1 - 17) vyjde vztah:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial r} + k^2 \mathbf{H} = 0 \quad (1 - 24)$$

Tím jsme dostali Besselovu diferenciální rovnici pro harmonický průběh, která obecně má

tvár 
$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dy}{dx} + \left(1 - \frac{n^2}{x^2}\right) y = 0$$
, kde  $n$  určuje řád rovnice.

Podělíme-li výraz (1 - 24)  $k^2$  a vyřešíme Besselovu diferenciální rovnici, dostaneme vztah pro fázor  $\mathbf{H}$ :

$$\mathbf{H} = \mathbf{C}_1 J_0(kr) + \mathbf{C}_2 N_0(kr), \quad (1 - 25)$$

kde  $\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2$  jsou integrační konstanty určené na základě mezních podmínek  $J_0(kr), N_0(kr)^2$  jsou cylindrické funkce nultého řádu prvního a druhého (Neumannova) druhu pro argument  $kr$ .

Výraz pro intenzitu  $\mathbf{E}$  získáme z 1.MR a vztahu  $\text{rot} \mathbf{H} = -\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x}$

$$\mathbf{E} = -\frac{1}{\gamma + j\omega\epsilon} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial r} = \frac{k}{\gamma + j\omega\epsilon} [\mathbf{C}_1 J_1(kr) + \mathbf{C}_2 N_1(kr)] \quad (1 - 26)$$

<sup>2</sup> Besselovy funkce viz Příloha I

## 1.5 Problematika stínění u indukčních kelímkových pecí

Prochází-li cívkou střídavý proud, vybudí se magnetické pole, které prochází dutinou cívky. To ve výsledku způsobuje indukování vířivých proudů ve vsázce a následný ohřev. Jelikož se tento magnetický tok uzavírá vně cívky, dochází k nežádoucímu zahřátí konstrukce pece, což vede ke vzniku ztrát a snížení účinnosti. Musí se provést nezbytná opatření k omezení účinků magnetického pole vně cívky. V praxi jsou známy dvě metody, každá pracující na jiném principu: **1) dobře vodivý válcový plášť,**

**2) svazek transformátorových plechů.**

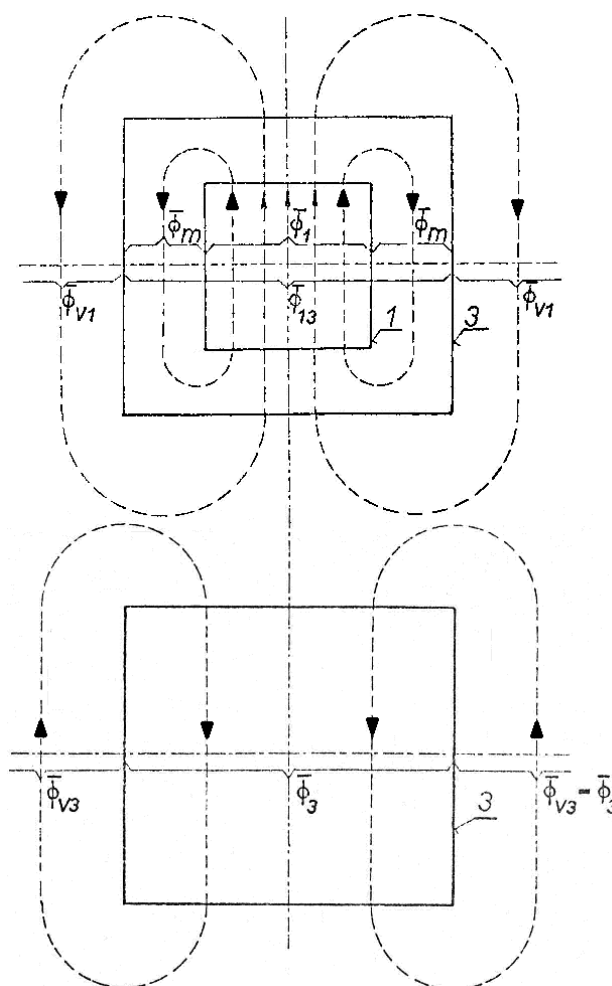
### 1.5.1 Stínění vodivým pláštěm

[3], [8], [6, str. 337]

První metodou stínění elektromagnetického pole vně cívky je stínění pomocí elektricky vodivého stínicího pláště. Tato metoda je založena na principu elektromagnetické indukce a Lenzova zákona, kdy pole procházející dutinou stínicího pláště naindukuje do pláště napětí a proud, který na základě Lenzova zákona vytváří své elektromagnetické pole  $\vec{\phi}_3$  působící proti poli cívky. Tím se dosáhne, že se pole vně cívky odečítají, ale stejně tak se děje uvnitř samotné cívky a dochází ke zhoršení elektrické účinnosti. Oblast za pláštěm je odstíněná. Směr magnetických toků je znázorněn na obrázku Obr. 1. 3.

Pro účinné stínění je stínicí plášť vyráběn z dobře vodivého materiálu (např.

měď, dural). Je tedy nutné, aby stínění *Obr. 1. 3 Stínění vodivým pláštěm, magnetické toky [3]* mělo vždy minimální činný odpor (při zachování největší hodnoty indukčnosti), aby vlivem odporu stínění nedošlo naindukovaným napětím k protlačení proudu stíněním. Nejlepším řešením je použití supravodivých materiálů, kdy dochází k tomu, že veškerý magnetický tok

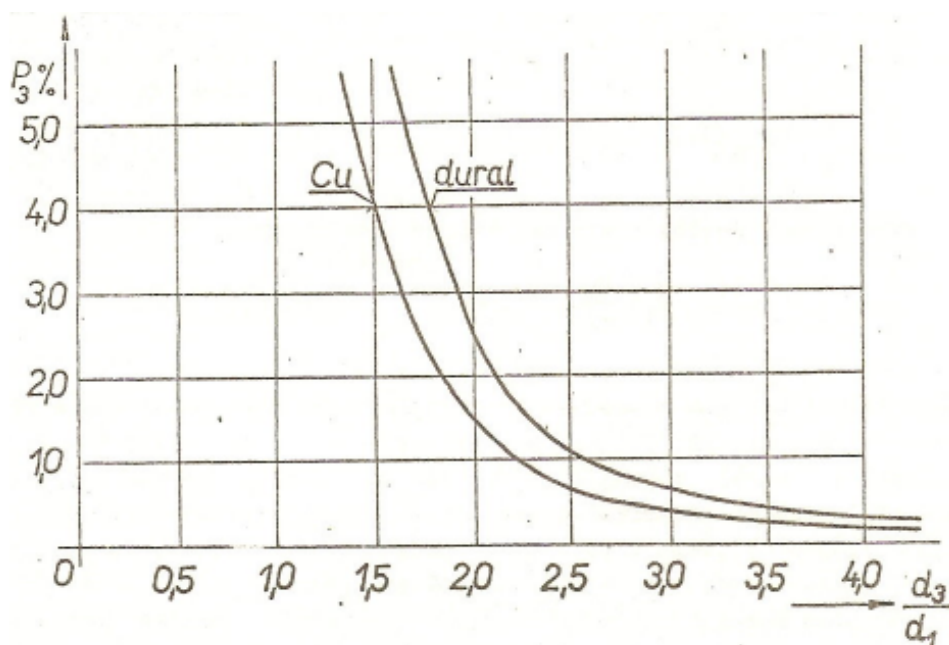


se neprotlačí skrz stínění a odrazí se. Pro zachování minimálních ztrát vznikajících ve stínícím plášti se volí tloušťka stínícího pláště rovna optimální tloušťce  $\delta_3 = \frac{\pi}{2} \cdot a_3$ , kde  $a_3$  představuje hloubku vniku naindukovaných proudů ve stínění. Odvození optimální tloušťky vychází ze vztahů pro určení impedance stěny konečné tloušťky [8], konkrétní odvození v literatuře [4, str. 63]. V praxi se můžeme setkat s větší tloušťkou pláště pro větší mechanickou pevnost.

Ztráty ve stínění se určí ze vztahu:

$$P_3 = R_3 \cdot I_3^2, \quad (1 - 27)$$

kde  $R_3$  odpor povrchové vrstvy tloušťky  $a_3$

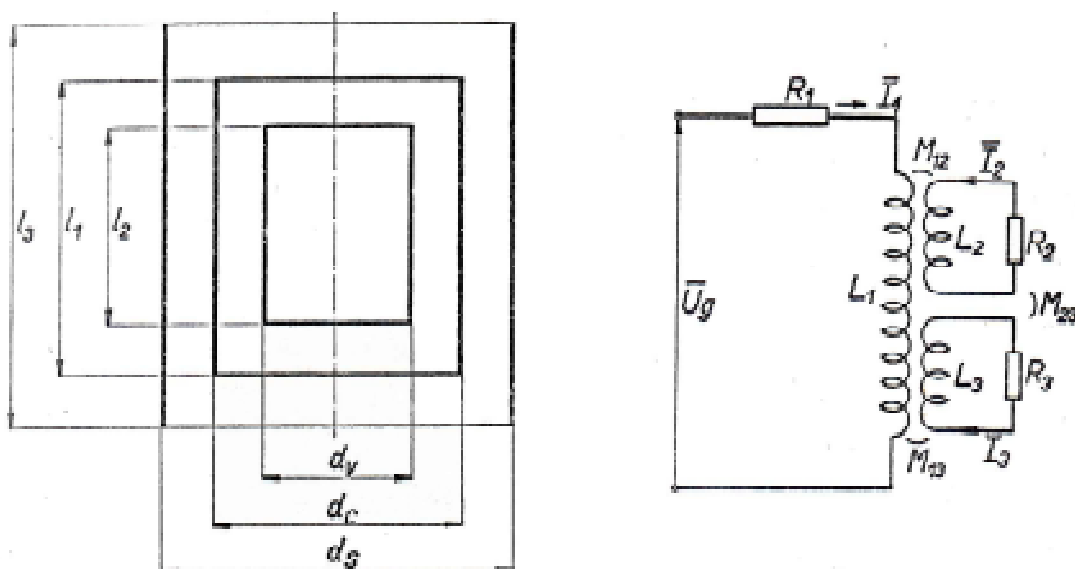


Obr. 1. 4 Závislost měrných ztrát stínění na vzdálenosti pláště od cívky [3]

Na obrázku Obr. 1. 4 lze vidět závislost měrných ztrát stínění na poměru průměru pláště  $d_3$  k průměru cívky  $d_1$ . Nejmenších měrných ztrát bychom dosáhli, kdyby průměr pláště byl mnohem větší než průměr cívky. Ve skutečnosti jsme však omezeni prostorem v provozu (i samotnou realizací tak velkého odstínění), a proto se volí průměr stínícího pláště  $d_3$  jako dvojnásobek průměru cívky  $d_1$ . Výška stínícího pláště se většinou volí  $l_3 = 1,2 \cdot l_1$ , kde  $l_1$  je výška cívky. Při těchto rozměrech stínícího pláště ( $\delta_3$ ,  $d_3$ ,  $l_3$ ) činí ztráty v měděném plášti cca 1,51%, u duralové cca 2,5% z pecního příkonu.

V případě výpočtů můžeme skutečné obvody s prostorovým rozložením proudu popisovat jako tři sousedé vodivé válce s nulovou tloušťkou, jejichž průměry jsou dány vztahy

( 1 - 28 ) až ( 1 - 30 ), za předpokladu, že poloměr cívky, vsázky a stínění je mnohem větší než patřičná hloubka vniku. V případě tavicích pecí je tato podmínka splněna. Výšky jednotlivých náhradních válců se volí stejné jako ve skutečném obvodu. Na obrázku Obr. 1. 5 jsou znázorněny tři sousedé vodivé válce a ekvivalentní elektrické schéma obvodu s vyznačenými parametry: vlastní indukčnost  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ; odpor  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ; vzájemná indukčnost  $M_{12}$ ,  $M_{13}$ ,  $M_{23}$ .



Obr. 1. 5 Náhradní obvod, ekvivalentní elektrický obvod [8]

$$\text{Náhradní průměr cívky} \quad d_c = d_1 + a_1 \quad (1 - 28)$$

$$\text{Náhradní průměr vsázky} \quad d_v = d_2 - a_2 \quad (1 - 29)$$

$$\text{Náhradní průměr pláště} \quad d_s = d_3 + a_3 \quad (1 - 30)$$

Jednotlivé parametry elektrického obvodu se určí ze vztahů :

$$L_1 = \mu_0 \cdot \pi \cdot \left( \frac{d_c}{2} \right)^2 \cdot \frac{N_1^2}{l_1} \cdot \alpha_1 \quad (1-31)$$

$$M_{12} = \mu_0 \cdot \pi \cdot \left( \frac{d_v}{2} \right)^2 \cdot \frac{N_1 \cdot N_2}{l_2} \cdot F_{12} \quad (1-34)$$

$$L_2 = \mu_0 \cdot \pi \cdot \left( \frac{d_v}{2} \right)^2 \cdot \frac{N_2^2}{l_2} \cdot \alpha_2 \quad (1-32)$$

$$M_{13} = \mu_0 \cdot \pi \cdot \left( \frac{d_s}{2} \right)^2 \cdot \frac{N_1 \cdot N_3}{l_3} \cdot F_{13} \quad (1-35)$$

$$L_3 = \mu_0 \cdot \pi \cdot \left( \frac{d_s}{2} \right)^2 \cdot \frac{N_3^2}{l_3} \cdot \alpha_3 \quad (1-33)$$

$$M_{23} = \mu_0 \cdot \pi \cdot \left( \frac{d_s}{2} \right)^2 \cdot \frac{N_2 \cdot N_3}{l_3} \cdot F_{23} \quad (1-36)$$

kde parametry  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $F_{12}$  se určí z tabulky, viz Příloha II

$N_1$  počet závitů cívky

$N_2, N_3$  počet závitů vsázky, pláště ( $N_{2,3} = 1$ )

$l_1, l_2, l_3$  výška cívky, vsázky, pláště

Při výpočtu proudů v jednotlivých částech elektrického obvodu vycházíme ze tří základních rovnic určených na základě 2. Kirchhoffova zákona. ( $\bar{V}$  - fázor veličiny)

$$\bar{U}_g = \bar{Z}_1 \cdot \bar{I}_1 + j\omega M_{12} \cdot \bar{I}_2 + j\omega M_{13} \cdot \bar{I}_3 \quad (1 - 37)$$

$$0 = \bar{Z}_2 \cdot \bar{I}_2 + j\omega M_{23} \cdot \bar{I}_3 + j\omega M_{12} \cdot \bar{I}_1 \quad (1 - 38)$$

$$0 = \bar{Z}_3 \cdot \bar{I}_3 + j\omega M_{13} \cdot \bar{I}_1 + j\omega M_{23} \cdot \bar{I}_2 \quad (1 - 39)$$

Při znalosti geometrických rozměrů lze určit impedanci a vzájemnou indukčnost (viz výše)

$$\bar{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1$$

$$\bar{Z}_2 = R_2 + j\omega L_2$$

$$\bar{Z}_3 = R_3 + j\omega L_3$$

Při znalosti všech dílčích parametrů můžeme vypočítat proudy  $\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3$  řešením soustavy tří rovnic (1 - 37) až (1 - 39). V literatuře [3, str. 35] jsou uvedeny vzorce pro výpočet proudů  $\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3$ , ale pro značnou nepřehlednost a rozsáhlost je zde neuvádím.

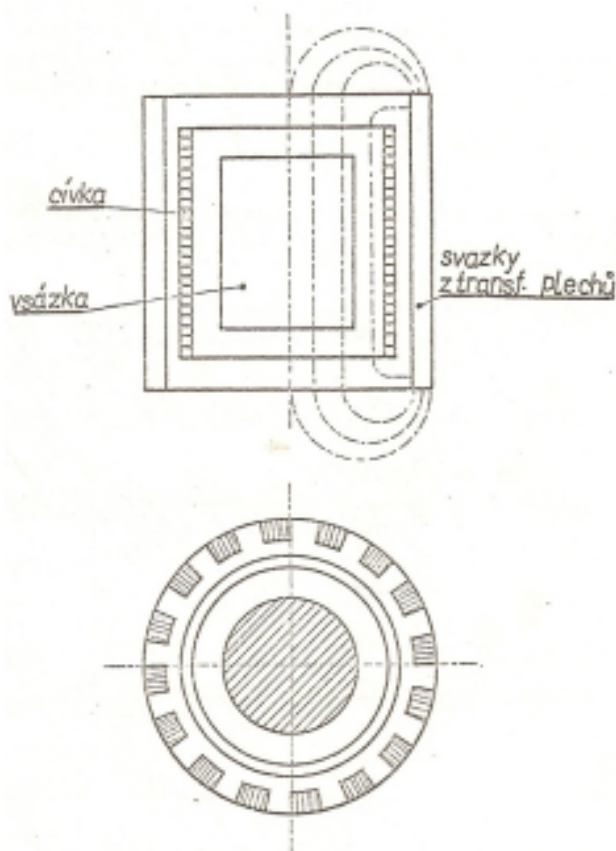
Stínění s elektricky vodivým pláštěm má v porovnání s druhou metodou stínění větší ztráty v cívce, větší prostorové nároky, menší užitečný výkon a ve výsledku má pec se stínícím pláštěm menší elektrickou účinnost (v důsledku snížení intenzity magnetického pole uvnitř pecní cívky). Dále při stínění se stínícím pláštěm se vyžaduje, aby pecní cívka měla vyšší počet závitů a větší kondenzátorovou baterii. Ale na druhou stranu pořizovací cena tohoto stínění je v porovnání se svazky transformátorových plechů nižší, ale i hmotnost je menší. Stínění pomocí vodivého stínící pláště jsou využívána zejména u malých pecí s obsahem do 250 kg oceli.

### 1.5.2 Stínění svazky transformátorových plechů [3, 8]

Na jiném principu stínění je založeno stínění se svazky transformátorových plechů (v některé literatuře též nazýváno jako stínění indukční kelímkové pece se železným jádrem vně cívky). Na vnitřní stranu pecního pláště jsou upevňovány svazky transformátorových plechů. Ty se vyznačují vysokou permeabilitou, tj. vysokou magnetickou vodivostí (aby nedocházelo ke vzniku ztrát v důsledku indukování vířivých proudů).



Magnetický tok, buzený cívkou, má snahu vně cívky z velké části procházet cestou nejmenšího magnetického odporu. Vložením svazků transformátorových plechů o vysoké



Obr. 1. 6 Indukční kelímková pec se svazky z transformátorových plechů [3]

vsázky. Dochází ke zvýšení účinnosti.

Tento princip stínění je v porovnání se stíněním vodivým pláštěm technicky dokonalejší, zvyšuje se účinnost pece (přibližně o 5 procent vyšší než u vodivého pláště), vznikají menší Joulovy ztráty, ale výrobně jsou pece se svazky mnohem dražší, těžší a nastane-li protavení pece, většinou dochází k velkým škodám. V praxi je tento princip stínění provozován u velkých pecí s trvalým provozem.

Zvýšené hodnoty indukčností se určí dle vzorců (viz Příloha VI):

$$L_1' = \mu_0 \pi r_c^2 \frac{N_1^2}{l_1} \alpha_1' \quad [\text{H, m}] \quad \alpha_1' = \alpha_1 \frac{L_1'}{L_1} \quad (1-40) \quad (1-41)$$

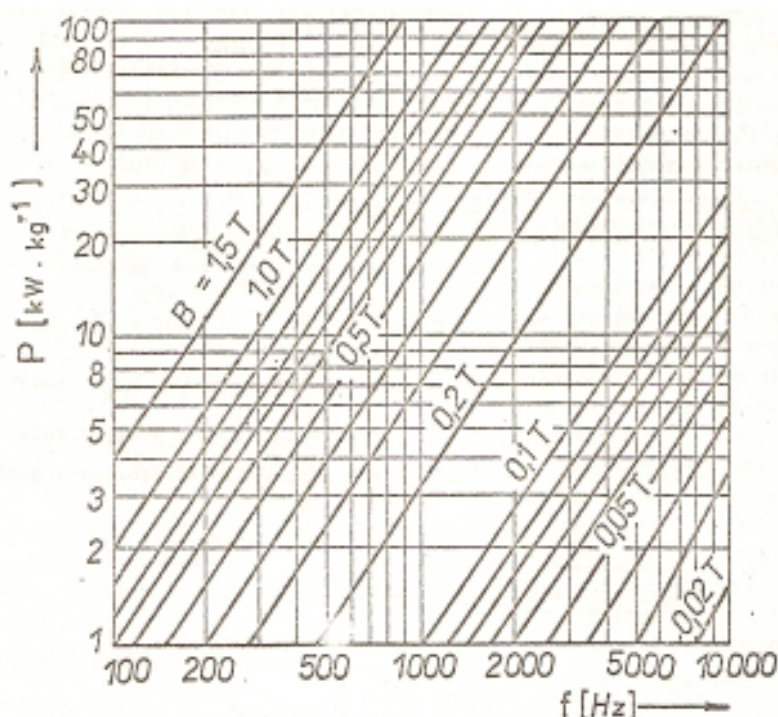
$$L_2' = \mu_0 \pi r_v^2 \frac{N_2^2}{l_2} \alpha_2' \quad [\text{H, m}] \quad \alpha_2' = \alpha_2 \frac{L_2'}{L_2} \quad (1-42) \quad (1-43)$$

$$M_{12}' = \mu_0 \pi r_v^2 \frac{N_1 \cdot N_2}{l_2} F_{12}' \quad [\text{H, m}] \quad F_{12}' = F_{12} \frac{M_{12}'}{M_{12}} \quad (1-44) \quad (1-45)$$

Parametry  $\alpha_1'$ ,  $\alpha_2'$ ,  $F_{12}'$  se orientačně uvádějí:  $\alpha_1' = 1,14 \cdot \alpha_1$ ,  $\alpha_2' = 1,06 \cdot \alpha_2$ ,  $F_{12}' = 1,1 \cdot F_{12}$

Parametry  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $F_{12}$  se určí z tabulky, viz Příloha II

Pro dimenzování magnetického jádra je zapotřebí znát výsledný magnetický tok, který je buzený cívkou a zeslabený vsázkou. Dále je nutné určit magnetickou indukci  $B$  v železném jádře. Při určování vycházíme z pracovního kmitočtu a hodnotu magnetické indukce  $B$  volíme z diagramu Obr. 1. 7, s ohledem na měrné ztráty.



Obr. 1. 7 Závislost měrných ztrát na kmitočtu [3]

Plochu, kterou určíme ze vztahu  $S = \frac{\Phi}{B}$ , rozdělíme na odpovídající počet svazků a ze znalosti celkové hmotnosti  $G$  můžeme z Obr. 1. 7 určit celkové ztráty v železe.

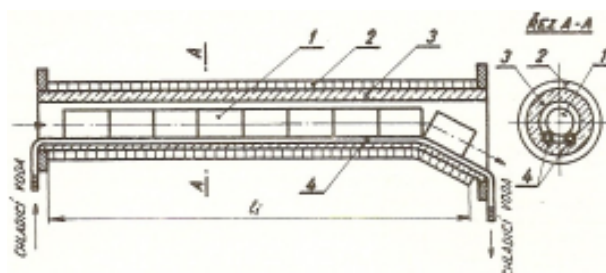
$$P_{Fe} = P \cdot G \text{ [kW]} \quad (1 - 46)$$

## 2 Průmyslová aplikace indukčního ohřevu

Indukční ohřev má dnes v průmyslu široké pole působení. Pro své vlastnosti, kterými jsou mnohem kratší doby potřebné pro vykonání dané činnosti nebo vznik tepla uvnitř materiálu (volba tloušťky, ve které teplo vzniká), je využíván obzvlášť při indukčním tavení kovových a nekovových materiálů, při svařování trubek, indukčním pájení, žíhání, kalení nebo při prohřívání materiálu pro tváření. Jednotlivé aplikace jsou v této kapitole blíže popsány.

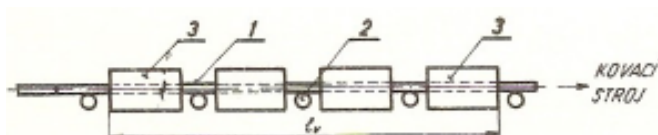
### 2.1 Indukční prohřívání

V procesech tepelného tváření oceli a neželezných kovů se mimořádně osvědčilo indukční prohřívání, které umožňuje rovnoměrné prohřátí materiálu v celém průřezu za krátkou dobu. Této vlastnosti je vhodně využíváno při hromadné výrobě, např. v automobilovém průmyslu. [5, 6, 3]



Obr. 2. 1 Indukční prohřívání vývalku [6]

Na obrázku Obr. 2. 1 je zobrazeno indukční prohřívání vývalků pro tváření. Celý systém je z velké části plně automatizovaný, kdy na vstupu jsou pomocí pneumatického mechanismu vkládány studené vývalky. Postupným pohybem vývalku 1 přes induktor 2 se docílí rovnoměrného ohřevu na kovací teplotu a ohřátý vývalek na výstupu vypadává pro další zpracování. V některých případech má induktor na začátku zhuštěné závitě, aby se docílilo ještě rychlejšího ohřevu [3, str. 107]. [6, 3]



Obr. 2. 2 Indukční prohřívání tyčí [6]

Na obrázku Obr. 2. 2 je zobrazeno indukční prohřívání tyčí 1, které se pomocí vodících kladek 2 pohybují přes řadu ohřívacích cívek 3 a

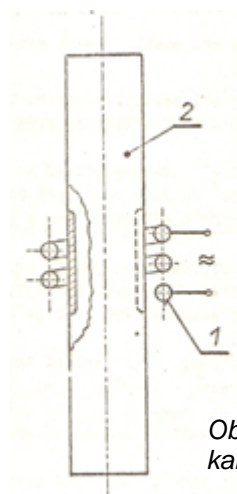
průběžně se ohřívají na kovací teplotu [6].

Indukční prohřívání umožňuje z velké části automatizovanou výrobu s vysokou produkcí polotovarů pro tváření.

## 2.2 Indukční povrchové kalení

Indukční kalení je způsob vytváření tvrdé povrchové vrstvy na oceli. Je založeno na rychlém ohřevu indukovaným proudem vysoké frekvence za použití induktoru. Při průchodu střídavého proudu induktorem se indukuje kolem kaleného předmětu střídavé magnetické pole a vznikají vířivé proudy ve vrstvě prokalení. Tyto proudy zahřejí povrch na kalicí teplotu a kalení je dokončeno prudkým ochlazením předmětu.

### 2.2.1 Povrchové kalení válců malého průměru



Na obrázku Obr. 2. 3 je znázorněno povrchové kalení válců malého průměru. Válec 2 je vložen do cívky 1, jejíž rozměry odpovídají potřebné šířce prokalení. Volbou dostatečně vysokého měrného příkonu a vhodného kmitočtu vzhledem ke tloušťce prokalení se docílí zahřátí tenké povrchové vrstvy na kalicí teplotu během velice krátké doby. Po dosažení kalicí teploty je vrstva prudce ochlazená. [3]

Obr. 2. 3 Povrchové kalení menších válců [3]

### 2.2.2 Povrchové kalení ozubených kol a vaček [3]

Pro povrchové kalení ozubených kol se volí cívka s vnitřním průměrem větším než průměr kola. Při volbě kmitočtu není důležitý absolutní rozměr kola, ale nýbrž modul ozubení  $m$ .

$$f = \frac{6 \cdot 10^5}{2\pi \cdot m^2} \text{ [Hz]} \quad (2 - 1)$$

$m = D / z$ , kde  $D$  je průměr roztečné kružnice [mm] a  $z$  je počet zubů

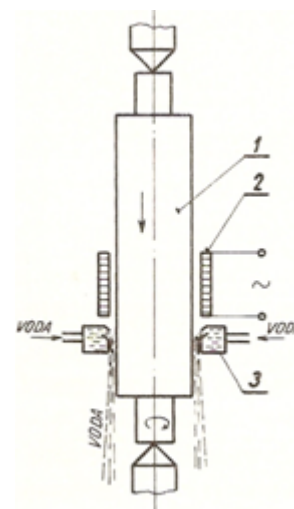
U ozubených kol s velkým modulem ozubení se kalení provádí postupně zub po zubu.

Obdobně tomu tak je u kalení vaček, kde volba kmitočtu se volí podle nejmenšího poloměru  $r$  [cm]

$$f = \frac{3760}{r^2} \text{ [Hz]} \quad (2 - 2)$$

### 2.2.3 Povrchové kalení válců pro válcovací stolici

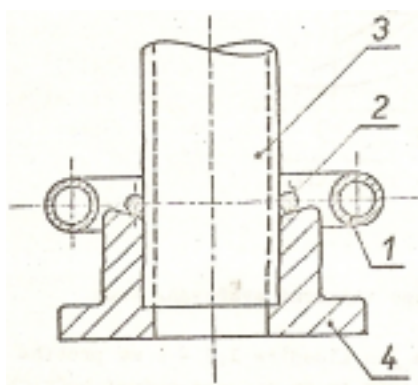
Pro indukční kalení válců velkých rozměrů (průměr i přes 1m) je používáno speciální zařízení, do kterého je válec upevněn ve svislé poloze a pro symetrický ohřev umožňuje otáčení válce. Aby se předešlo tzv. slupkovému jevu, předehřívá se válec na určitou teplotu několikerým protažením induktorem 2. Poté se může přistoupit k samotnému kalení. Válec pomalým spouštěním prochází induktorem a ohřívá se na kalicí teplotu. Ihned za induktorem dochází k prudkému ochlazení vodou ze sprchy 3, čímž se docílí prokalení povrchové vrstvy. V případě velkých a těžkých válců se nepohybuje válcem, ale pohybuje se samotným induktorem. [3]



Obr. 2. 4 Povrchové kalení velkých válců [6]

Během indukčního povrchového kalení nedochází k porušení vnitřní struktury materiálu a vnitřek válce zůstává houževnatý. [3]

### 2.3 Indukční pájení



Obr. 2. 5 Indukční pájení [3]

Pájení je tepelný proces, při kterém jsou spojovány dva a více materiálů pájkou, jejíž teplota tání je nižší než spojovaných materiálů. Pájení lze rozdělit na dva druhy, na pájení naměkko (teplota pájky 150 - 450 °C, potřebný výkon se pohybuje cca 0,5 - 5 kW) a pájení natvrdo (teplota pájky 450 - 1050 °C, potřebný výkon cca 3 - 30 kW). Na obrázku Obr. 2. 5 je zobrazeno indukční pájení trubky 3 a příruby 4. Pájka 2, vhodně vytvarovaná, je umístěna ve spoji obou materiálů. Po zavedení vysokofrekvenčního proudu do cívky 1, obepínající místo spoje, dochází k ohřevu pájky, příruby i trubky. Jelikož teplota tání pájky je nižší než trubky a příruby, pájka se roztaví a vteče do prostoru mezi přírubou a trubkou. Pevný spoj je vytvořen bezprostředně po zatuhnutí. [3, 10]

Výhodou indukčního pájení je malá energetická náročnost, dále nedochází k tepelné deformaci okolo spoje. Uplatnění indukčního pájení je v mnoha odvětvích. Přes potravinářský

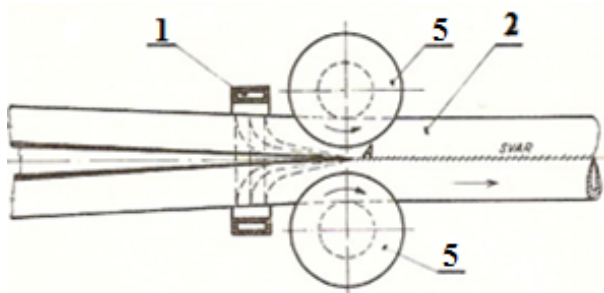
průmysl, kde se provádí pájení cínem vík plechových krabic, až po automobilový průmysl (kompletování karoserií). [3, 9]

## 2.4 Indukční svařování [6, 3]

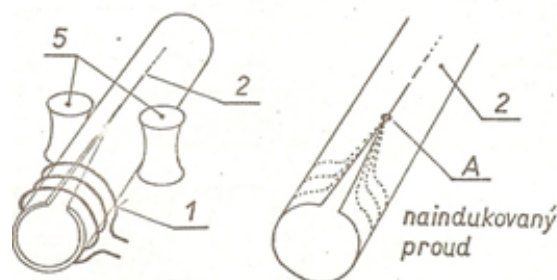
Indukční svařování je využíváno u součástek, které se kontinuálně podélně svařují. Na obrázcích Obr. 2. 6 a Obr. 2. 7 je zobrazen průběh indukčního svařování trubek (typický příklad indukčního svařování).

Princip indukčního svařování trubek: Ocelový pás 2 o tloušťce cca 1,5 - 5 mm je pomocí speciálního mechanismu bočních kladek vytvarován do tvaru trubky (hrany ocelového pásu těsně přiléhají). Takto zdeformovaný pás prochází většinou vícezávitovou cívkou 1, do které je přiveden vysokofrekvenční proud. Do pásu jsou naindukovány proudy (na obrázku Obr. 2. 7 jsou znázorněny čárkovanou čarou) uzavírající se v bodě A, který vzniká přiblížením hran ocelového pásu působením bočních kladek 5. V místě A se vlivem velké hustoty naindukovaných proudů ohřeje spoj na svařovací teplotu (pro ocel 1400 °C) a vzniká pevný svár (pevnější než okolní materiál).

Při svařování trubek se obvykle používají proudy o vysokém kmitočtu 8 - 500 kHz, cívky o příkonu dosahujícího až stovky kilowatt (až 700 kW). Indukční svařování trubek umožňuje výrobu vysoce kvalitních trubek a s přehledem nahrazuje stávající odporové svařování.



Obr. 2. 6 Indukční svařování - horní pohled [6]



Obr. 2. 7 Indukční svařování - naindukované proudy [3]

## 2.5 Indukční tavení

Nejvýznamnějším uplatněním indukčního ohřevu je průmyslové tavení kovových a nekovových materiálů v indukčních pecích, dnes zejména v indukčních pecích kelímkových,

ale i v indukčních pecích vakuových a kanálkových. Těmito typy pecí se více zabývám v kapitole 3.

Stavy vsázky při tavně (konkrétně pro konstrukční ocel) [3]:

- Teplota 20 °C - 760 °C (Curieův bod): V rozmezí těchto teplot je vsázka tuhá, kusová a magnetická, permeabilita je větší než 1, měrný odpor oceli roste.
- Teplota 760 °C - 1400 °C: Teplota přesáhla teplotu magnetické přeměny oceli, relativní permeabilita je rovna 1, měrný odpor roste až na hodnotu  $1,2 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ , vsázka je stále kusová, tuhá, ale už nemagnetická.
- Teplota 1400 °C - 1600 °C: Při teplotě 1400°C dochází k tavení oceli, z tuhé vsázky se stává vsázka tekutou, nemagnetickou. Měrný odpor se zvýšil na  $1,4 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ .

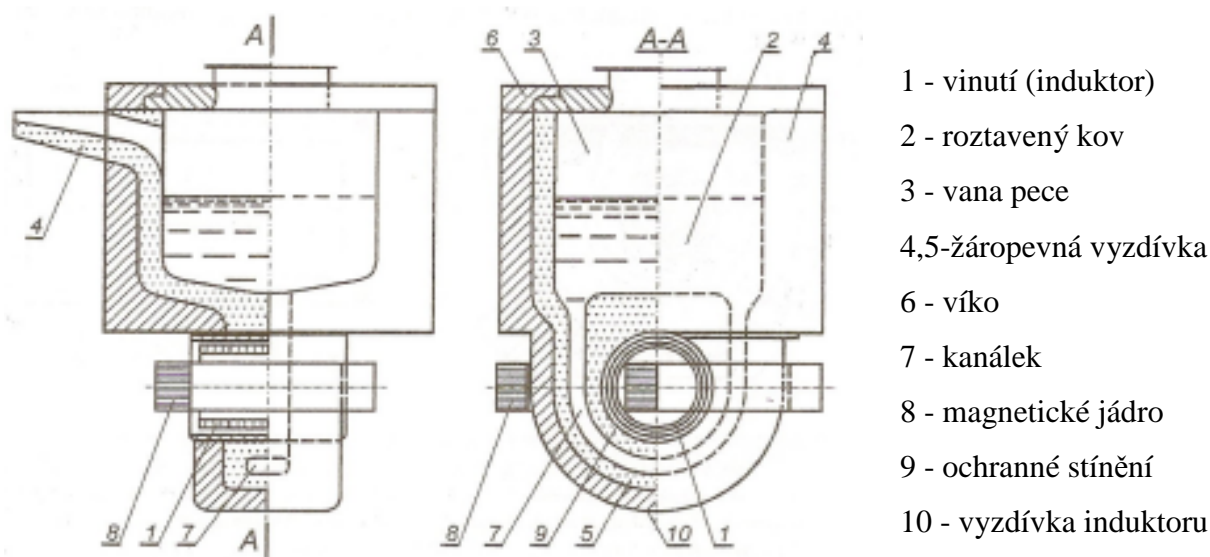
Elektrické indukční pece jsou zpravidla plněny tříděným šrotem (kusy z téhož druhu materiálu, ale různých velikostí a tvarů). Pec musí být schopna s dobrou účinností roztavit danou vsázku, což předpokládá správnou volbu kmitočtu a měrného výkonu. [3]

### 3 Indukční průmyslové pece

#### 3.1 Indukční kanálková pec

[5], [6], [1], [7], [10]

Indukční kanálková pec patří k nejstarším elektrotepelným zařízením. Svoji konstrukcí a činností indukční kanálková pec připomíná transformátor, jehož sekundární vinutí je zapojeno dokrátka. Na Obr. 3. 1 je znázorněn příčný (funkční) řez pece.



Obr. 3. 1 Indukční kanálková pec [5]

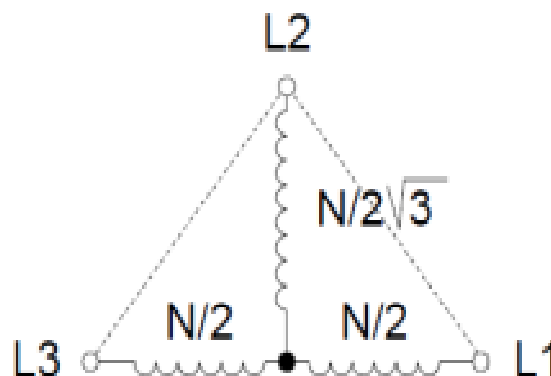
Induktor, umístěný na magnetickém jádru složeného z elektrotechnických plechů, představuje primární vinutí, přičemž roztavený kov nacházející se v kanálku vytváří sekundární vinutí. Pro zahájení činnosti pece je nezbytné vytvořit na sekundární straně závit nakrátko. To se provádí tak, že se z předešlé tavby ve vaně ponechává určité minimální množství roztaveného kovu, nebo je-li prováděna první nová tavba, zaplní se kanálek roztaveným kovem z jiné tavby.

Na konci 19. století byl postaven první typ **kanálkové pece, pece s odkrytým kanálkem**, který se používal pro tavení barevných kovů, zejména mědi, niklu, hliníku a jejich slitin. Vlivem intenzivního víření v peci docházelo k dokonalé homogenitě složení a teploty roztaveného kovu. Pro zlepšení účinnosti bylo napájení prováděno jednofázovým generátorem o kmitočtu 5 - 10 Hz. Jelikož v provozu se vyznačovaly řadou nevýhod, kterými byly značné tepelné ztráty z horkého kovu do okolí nebo nedostačující topný výkon, byly od dvacátých let 20. století postupně nahrazovány indukčními kanálkovými pecemi se zakrytým kanálkem a radiálním vyléváním taveniny z otevřeného kanálku. [1]



**Indukční kanálková pec se zakrytým kanálkem** (Obr. 3. 1) je napájena síťovým kmitočtem. Elektromagnetické pole, vybuzené proudem naindukovaným do kanálku, způsobuje elektrodynamické síly, které vytlačují kov do osy kanálku. Vlivem hydrostatického tlaku ve vaně je po stěnách kanálku tlačěn nový chladnější kov a ze středu kanálku vytéká teplejší kov do vany. Tímto dochází k intenzivnímu víření roztaveného kovu, což ve výsledku vytváří dobrou teplotní a materiálovou homogenitu a vysoce kvalitní kovy.

**Výhodou** indukční kanálkové pece je jejich větší energetická účinnost (blízká účinnosti transformátoru) v porovnání s kelímkovou pecí, dále se vyznačují lepším účínkem, malou ztrátou propalem, snadnou regulací topného výkonu (přepínáním odboček na primárním vinutí pecního transformátoru), napájením síťovým kmitočtem, relativně nízkou cenou a nízkými provozními náklady, výrobou vysoce kvalitních kovů. U velkých kanálkových pecí je možno dosáhnout rovnoměrného zatížení trojfázové sítě tím, že vana těchto velkých pecí je napojena na 2



nebo 3 kanálkové induktory. U případu se *Obr. 3. 2 Scottovo zapojení [6]* dvěma kanálkovými induktory se používá tzv. Scottovo zapojení, kdy jeden induktor má  $N$  závitů a druhý  $N \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$  závitů (viz Obr. 3. 2) [6, str. 230].

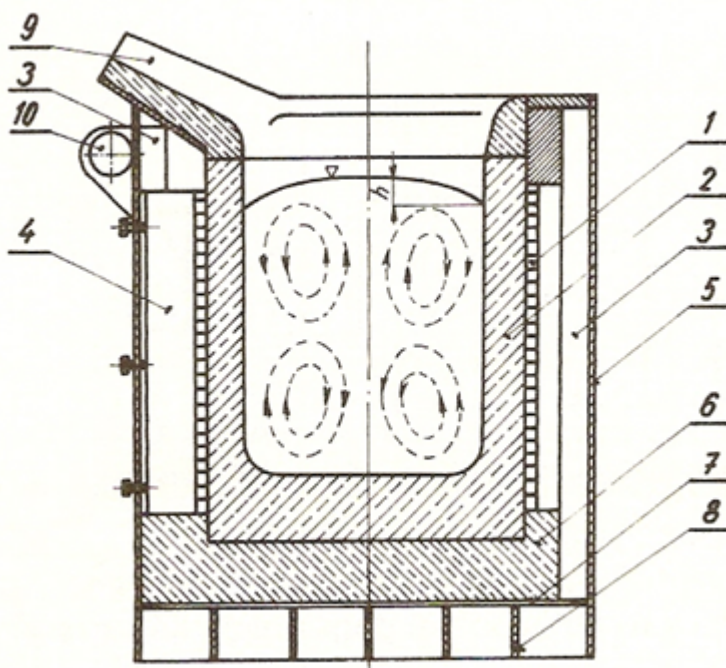
Mezi **nevýhody** kanálkových pecí lze zmínit nutnost minimální hladiny taveniny ve spodní části pece (nístěji) pro zahájení tavby (nutný kontinuální chod, nezbytný uzavřený kanálek tekutým kovem), složitost a náchylnost vyzdívky k poškození (špatná kontrola stavu), nežádoucí vychladnutí taveniny (často je nutné udržovat na provozní teplotě) nebo nutnost provádět tavbu pouze jednoho kovu.

V průmyslu se používají zejména pro tavení barevných neželezných kovů (měď, hliník, zinek, olovo) a jejich slitin, zušlechťování šedé litiny, k výrobě olovnatých mosazí a pro přihřívání již roztavené litiny.

V současné době jsou však nejvíce využívány indukční kelímkové pece, které popisují v následující kapitole.

### 3.2 Indukční kelímková pec

Indukční kelímkové pece jsou v současné době nejvíce využívanými indukčními pecemi používané v metalurgickém, slévárenském a elektrotechnickém průmyslu pro tavení elektricky vodivých materiálů. S výhodou se využívají jejich dobré vlastnosti (silné víření) ve slévárnách pro tavení nejrůznějších druhů ocelí, v hutnictví zejména při výrobě vysoce kvalitní oceli a speciálních litin. Na Obr. 3. 3 je zobrazena základní konstrukce indukční kelímkové pece.



Obr. 3. 3 Indukční kelímková pec s nevodivým kelímkem [6]

straně **pláště 5** je umístěno stínění v tomto případě **svazky transformátorových plechů 3**, které svádějí magnetický tok vně cívky, aby nebyla negativně narušena okolní konstrukce. Dále na Obr. 3. 3 je znázorněn **žáro cementový trámec 4**, **cihlová keramická vyzdívka** na dně pece **6**, **stínící měděný plech 7**, který chrání **mřížové dno pece 8** před magnetickým tokem cívky. Pro samotné odlévání je využívána **hubice pece 9** a pomocí hydraulického pohonu je pec natáčena kolem **osy 10**. [5, 6, 3]

Pecní cívka je napájena ze zdroje střídavým proudem v řádu několika kiloampér při kmitočtu 50 Hz - 10 kHz, přiváděným pomocí měděných ohebných lan. Tento proud, procházející cívkou, vytváří kolem cívky elektromagnetické pole, které ve vsázce indukuje vířivé proudy způsobující ohřev dané vsázky (vytvářejí se Jouleovy ztráty). Teplo, procházející skrz kelímek, včetně vznikajících elektrických ztrát v cívce mají negativní účinek

**Ohřívací cívka 1** patří mezi nejdůležitější části pece, bývá navinuta z měděných trubek nejčastěji obdélníkového průřezu, kdy v dutině trubky proudí chladicí voda. Nejčastěji bývá navinuta jako jednovrstvá. **Nevodivý kelímek 2** (v některých případech vodivý) se nachází v dutině cívky, s ní sousý. Keramický nevodivý kelímek bývá nejčastěji z křemičitého písku ( $\text{SiO}_2$ ). Na vnitřní

na životnost dané cívky. Je proto nezbytné zajistit efektivní chlazení. Velký chladicí výkon zajišťuje turbulentní proudění chladicí vody v dutině cívky. [9, 6, 8]

Dalším problémem, který se musí řešit při provozu indukčních pecí, je uzavírání magnetického pole vně cívky. Ten působí na okolní konstrukci a dochází k nežádoucímu ohřátí. Pro eliminování vlivu magnetického pole vně cívky se provádí stínění pece, které lze provést dvěma způsoby, pomocí dobře vodivého stínícího pláště nebo svazky transformátorových plechů. Tato problematika je více probrána v kapitole 1.5.

Nespornou výhodou indukčních kelímkových pecí je silné víření taveniny. Víření taveniny je způsobeno elektrodynamickými silami, které vznikají jako důsledek vzájemného působení indukovaných proudů ve vsázce a magnetického pole vytvořeného cívkou (induktorem).

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}_2 \cdot \mathbf{B}_1, \quad (3 - 1)$$

kde  $\mathbf{J}_2$  proudová hustota indukovaných proudů ve vsázce

$\mathbf{B}_1$  magnetická indukce magnetického pole cívky

V důsledku silného víření taveniny dochází k velmi žádané téměř dokonalé materiálové i teplotní homogenitě slitiny, které se stěží dosahuje u jiných typů pecí. Víření je patrné na Obr. 3. 3. Krom víření je na Obr. 3. 3. patrný i jiný efekt - vzduť taveniny. Vzduť vzniká vlivem tlaku magnetických sil na vsázku. Dochází k tomu, že u stěny kelímku vzniká podtlak, naopak v ose kelímku přetlak. Vlivem hydrostatických sil vtéká tavenina ke stěnám kelímku a uprostřed kelímku dochází ke vzduť  $h$ . [6, 8, 3]

$$h = K \frac{P_1}{\rho} \sqrt{\frac{\mu_r \gamma}{f}}, \quad (3 - 2)$$

kde  $P_1$  příkon na jednotkovou plochu vsázky (Poyntingův vektor) [W/m<sup>2</sup>]

$\rho$  měrná hmotnost vsázky [kg/m<sup>3</sup>]

$K$  konstanta [-]

$\mu_r$  relativní permeabilita vsázky ( $\mu_r = 1$ ) [-]

$\gamma$  konduktivita vsázky [S/m]

$f$  kmitočet napájecího proudu [Hz]

Z výrazu ( 3 - 2 ) je patrná závislost velikosti vzduť na  $P_1$ ,  $\gamma$ ,  $f$ . Zejména u pecí na síťový kmitočet je nutné omezit maximální příkon přibližně na hodnotu 300 kW na tunu taveniny, aby nedocházelo k nadměrnému vzduť. V některých případech se postupuje i tak, že se zkracuje cívka, aby hladina lázně byla výše než horní okraj cívky. Tím se vytvoří na hladině lázně tzv. tlumící polštář, který zabraňuje obnažování povrchu lázně. U pecí napájených kmitočtem do 1000 Hz se může pracovat s měrným výkonem až 1000 kW na tunu taveniny a dochází ke zkrácení doby tavby. [3, 6, 15]

### 3.2.1 Účinnost indukčních kelímkových pecí [3]

Elektrická účinnost kelímkové indukční pece se určí jako podíl výkonu  $P_u$ , zužitkovaného na ohřev vsázky, a celkového příkonu dodaného zdrojem. Celkový příkon  $P_g$  je v peci spotřebován jednak na ohřev dané vsázky, ale také na krytí ztrát, které vznikají ve vlastní cívce, v kondenzátoru a v přívodní pasovině.

Výsledná elektrická účinnost:

$$\eta_v = \frac{P_u}{P_g} = \frac{P_u}{P_1 + P_u + P_c}, \quad (3 - 3)$$

kde  $P_u$  užitečný výkon pece

$P_1$  vlastní ztráty cívky

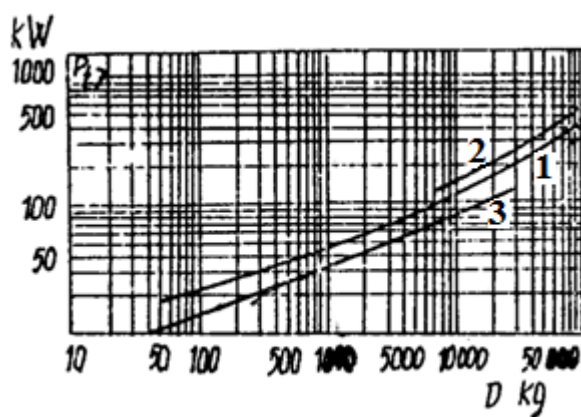
$P_c$  ztráty v kondenzátoru a v přívodní pasovině

Ve vztahu nebyly uvažovány ztráty ve stínícím plášti, jejichž hodnota je malá a bývá řádově menší než 1% z příkonu. Běžně se výsledná elektrická účinnost kelímkových pecí pohybuje v rozmezí 0,7 až 0,75 (s vyšším měrným odporem vsázky se dosahuje vyšší účinnosti).

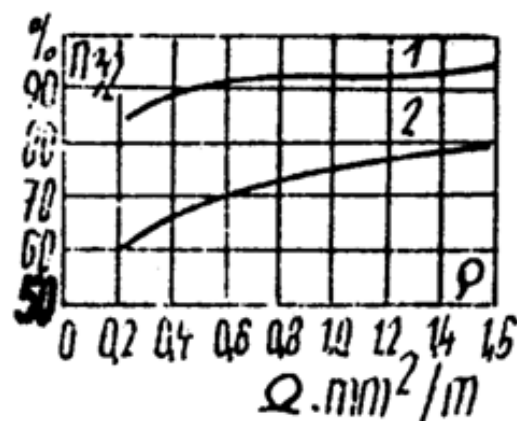
Účinnost induktoru je dána vztahem:

$$\eta_i = \frac{P_u}{P_1 + P_u} \quad (3 - 4)$$

$$\eta_i > \eta_v$$



Obr. 3. 4 Tepelné ztráty indukčních pecí v závislosti na hmotnosti tavby [17]  
 1 - Kanálková pec s jedním kanálkem  
 2 - Kanálková pec se dvěma kanálky  
 3 - Kelímková pec



Obr. 3. 5 Vliv el. odporu taveniny na elektrickou účinnost pece [17]  
 1 - Kanálková pec  
 2 - Kelímková pec

Každý materiál má jiný měrný odpor ovlivňující účinnost pece, jak lze vidět na obrázku Obr. 3. 5. Z úvah uvedených v literatuře [3, str. 76] se dochází k závěru, že materiály s **velkým měrným odporem** se budou nejlépe tavit v **indukčních kelímkových pecích s elektricky nevodivým kelímkem**. Naopak, materiály s **malým měrným odporem** se budou dobře tavit v indukčních **kanálkových pecí** a v indukčních **kelímkových pecí s elektricky vodivým kelímkem**.

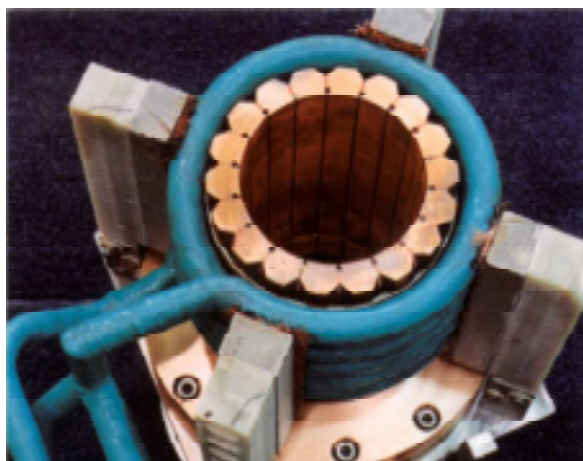
### 3.2.2 Typy indukčních kelímkových pecí

Indukční kelímkovou pec je možné rozdělit podle 3 hledisek:

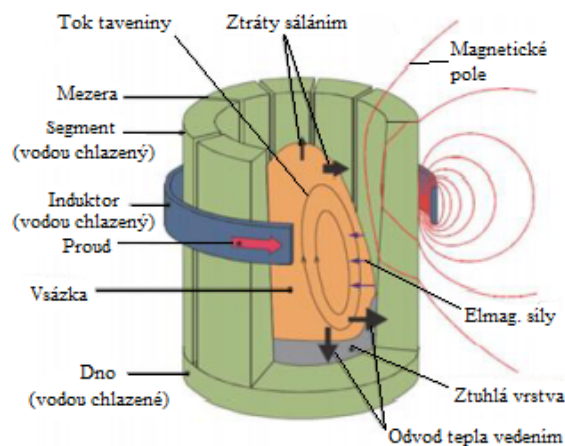
- dle frekvence napájecího proudu:
  - sít'ová frekvence
  - středofrekvenční
  - vysokofrekvenční
- dle druhu kelímku:
  - s elektricky **nevodivým kelímkem** (keramický)
  - s elektricky **vodivým kelímkem** (kovový, grafitový)
- dle druhu konstrukce stínění:
  - se **svazky transformátorových plechů**
  - se **stínícím pláštěm**

### 3.2.2.1 Indukční pec se studeným kelímkem

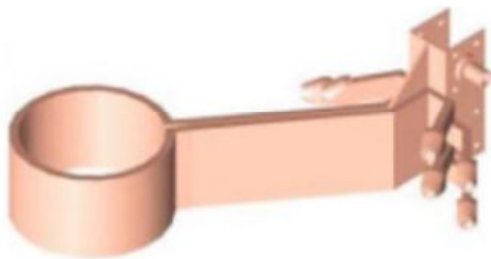
Vysokofrekvenční pece jsou napájeny proudem o kmitočtu vyšším než 2 kHz a jsou používány v laboratorním a průmyslovém provedení pro tavení technických kovů o hmotnosti několika gramů až několika kilogramů. Využívají se také zvláštní druh tavicích indukčních pecí používaných k vysokoteplotnímu tavení metodou studeného kelímku jinak označovanou jako "skull melting technology". V praxi se lze setkat se dvěma způsoby provedení, kdy náhradu keramického kelímku, známého z klasických kelímkových indukčních pecí, tvoří intenzivně vodou chlazené měděné segmenty vzájemně odizolované vzduchovými mezerami, nebo vodou chlazený jednozávitový induktor, který představuje přímo stěnu kelímku. Princip této metody spočívá ve vytvoření tenké ztuhlé vrstvy na povrchu taveniny, vyznačující se nižší teplotou než tavenina a ochraňuje samotný "kelímek". Ztuhlá vrstva je vytvářena v důsledku rozdílu teplot kelímku a vsázky, jejichž teplota přesahuje 3000 °C. Metoda studeného kelímku se využívá zejména pro výrobu oxido-keramických materiálů na bázi titanu a hliníku, dále pro výrobu monokrystalických křemíkových výkonových polovodičů a pro tavení neželezných kovů (jsou získávány velmi chemicky čisté materiály a slitiny). [15, 11, 14]



Obr. 3. 6 Studený kelímek tvořený měděnými segmenty [12]



Obr. 3. 7 Princip indukční kelímkové pece se studeným kelímkem se segmenty [14]



Obr. 3. 8 Studený kelímek v jednozávitovém provedení [14]



Obr. 3. 9 Studený kelímek v jednozávitovém provedení v reálu [14]

### 3.2.2.2 Indukční pece napájené síťovým kmitočtem, udržovací

Zvláštním provedením kelímkových pecí jsou pece napájené síťovým kmitočtem. Vzhledem k tomu, že uvnitř kelímku nastává intenzivní víření, mohou být používány pro výrobu legovaných ocelí. Větší část taveniny je ponechávána v kelímku pro následující tavbu. Proto nejsou vhodné pro tavbu, kde se často mění materiál tavby. Ve slévárnách oceli se dnes téměř nepoužívají. V posledním desetiletí jsou indukční kelímkové pece napájené síťovým kmitočtem používány jako pece udržovací, kdy udržují roztavený kov na požadované teplotě. [3, 17]

### 3.2.2.3 Indukční pec s nevodivým kelímkem

Jedná se o nejpoužívanější typ indukční kelímkové pece. V cívce je umístěn kelímek, který se pění z keramické hmoty. Jak už bylo výše uvedeno, indukční pece s nevodivým kelímkem jsou vhodné pro tavení materiálů s velkým měrným odporem a používají se pro výrobu vysoce kvalitních ocelí. Princip tavení je popsán na začátku kapitoly 3.2.

### 3.2.2.4 Indukční pec s vodivým kelímkem

Tyto pece vykazují velkou elektrickou účinnost při tavení materiálů s malým měrným odporem (jako např. hliník, měď a jejich slitiny). Zavede-li se proud do cívky,

elektromagnetické pole vyzářené z cívky dopadá na stěnu kelímku a energie elektromagnetického pole se přeměňuje na energii tepelnou ve stěně kelímku. Zahřátý kelímek předává teplo vsázce. Mezi cívku a rozžhavený kelímek se vkládají žáruvzdorné vložky (keramické) pro vzájemné odizolování a pro zmenšení tepelných ztrát ze žhavého kelímku do vodou chlazené cívky.

Větší část elektromagnetického vlnění se utlumí v samotném kelímku, jen malá část přechází přímo do vsázky, kterou ohřívá. Míru elektromagnetického vlnění, procházejícího přímo do vsázky, vyjadřuje vzájemný poměr tloušťky kelímku a hloubky vniku. Obecně platí, že elektromagnetické vlnění se přemění v teplo ve stěně o tloušťce přibližně trojnásobku hloubky vniku.

Pro vyšší teploty vsázky se používá grafitový kelímek, pro nižší kovový. Tyto pece jsou používány pro výrobu slitin hliníku, mědi, bronzu, zinku či zlata. [3, 2]

### 3.2.3 Elektrické schéma indukční kelímkové pece [3, 17]

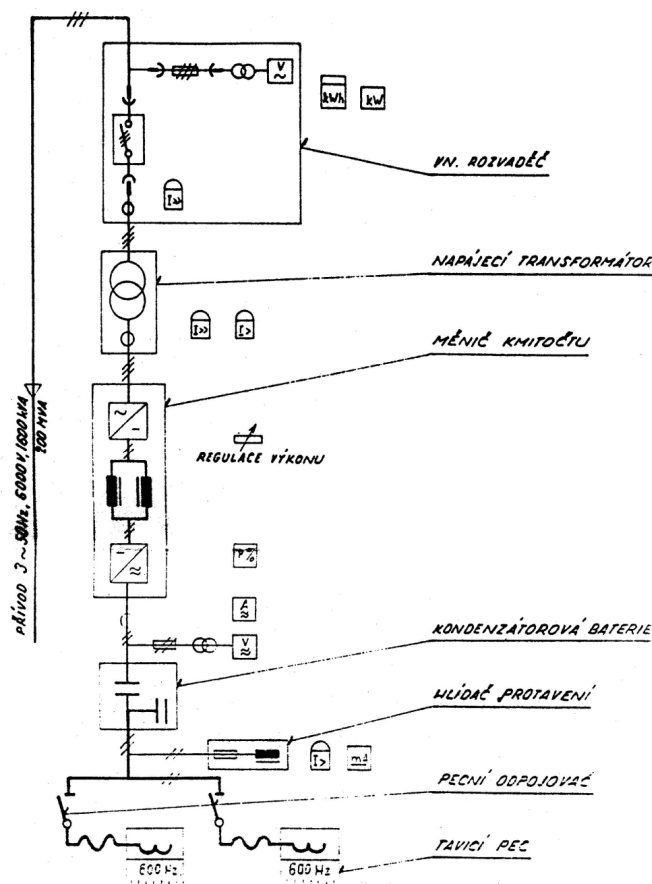
Na Obr. 3. 10 je uvedeno základní elektrické schéma indukční kelímkové pece. Schéma bychom mohli rozdělit do tří hlavních částí: samotná pec (tvořená pecní cívkou a kelímkem), dále na zdroj proudu a kondenzátorovou baterii.

**Napájení pece:** Zdrojem napájení pece je síť vysokého napětí (VN rozvaděč). Za napájecím transformátorem je následně proud usměrněn na diodovém usměrňovači, čímž se získá tzv. tepavý proud, který je na tlumivce vyhlazen. Tento proud je dále na tyristorech přeměněn na střídavý proud o kmitočtu daným zátěží pece. Výsledný proud už stačí jen přivést na cívku, toto se provádí pomocí měděné pasoviny.

**Vlastní pec:** Je tvořena cívkou, vinutou měděnou trubkou obdélníkového profilu, intenzivně chlazenou vodou a kelímkem, nejčastěji elektricky nevodivým. Zařízení zpravidla mají dvě identické pece, kdy v jedné je prováděna vlastní tavba a v druhé se provádí příprava či obnova vyzdívky.

**Kondenzátorová baterie:** V praxi se k cívce paralelně připojuje kondenzátorová baterie, která je rovněž chlazená vodou. Tato kondenzátorová baterie slouží ke kompenzaci účinníku a společně s pecní cívkou tvoří vyladěný obvod.





Obr. 3. 10 Elektrické schéma indukční kelímkové pece [17]

### 3.3 Indukční vakuová pec [16]

Proces tavení ve vakuové indukční peci se v současnosti stává základní technologií pro výrobu vysoce kvalitních materiálů. Dnes se tímto způsobem vyrábějí nerezové slitiny pro jaderný průmysl, dále slitiny niklu pro vysokoteplotní aplikace nebo slitiny mědi velmi vysoké čistoty.

Celý proces je založen na tavení dané vsázky ve vakuu, kdy je kompletní sestava pece uzavřena ve svařované ocelové komoře (chlazené vodou), ve které se vytváří vakuum. Tento proces umožňuje tavit slitiny libovolného chemického složení, kdy může být přesně nastaven proces tak, aby výsledný produkt byl homogenní a čistý (vysoká úroveň vakua zajišťuje nízký obsah uhlíku).

Ve světě se indukčními vakuovými pecemi zabývá skotská firma Consarc, která je již řadu let navrhuje a konstruuje. Od roku 2011 je ve firmě Kovohutě Rokycany, a.s. provozována indukční 2,5t vakuová pec vyrobená právě firmou Consarc.



Obr. 3. 11 Laboratorní vakuová indukční pec



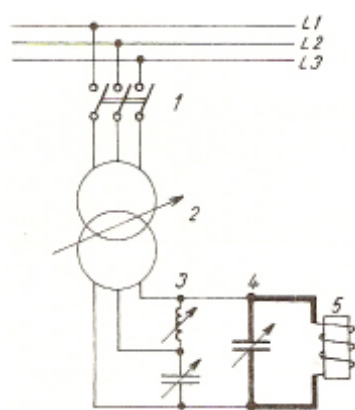
Obr. 3. 12 Indukční vakuová pec pro přesné lití [16]

### 3.4 Zdroje napájení indukčních pecí

Dnes, kdy v průmyslu jsou v provozu indukční pece se širokým rozmezí kmitočtů, je vyžadována volba vhodného napájecího zařízení. Obecně lze rozdělit napájecí zařízení do 3 skupin podle kmitočtu napájení.

- napájení zařízení na síťový kmitočet
- napájení středofrekvenčních zařízení
- napájení vysokofrekvenčních zařízení

#### 3.4.1 Napájení zařízení na síťový kmitočet



Obr. 3. 13 Zapojení indukční pece na síťový kmitočet [6]

Jak uvádím v kapitole 3.2.2.2 některé indukční kelímkové pece, ale i indukční prohřívačky, jsou napájené ze sítě a představují pro 3f síť nesymetrickou zátěž. Často se jedná o zařízení značných výkonů. Pro zajištění symetrického zatížení sítě je zapotřebí indukční zařízení připojit pomocí symetrizačního zařízení (např. Steinmetzovo zapojení). [3]

Na Obr. 3. 13 vidíme zapojení zařízení na 50 Hz. 1 výkonový spínač, 2 regulační transformátor, 3 symetrizační obvod, 4 regulační kondenzátorová baterie kompenzující jalový výkon, 5 indukční pec. [6]

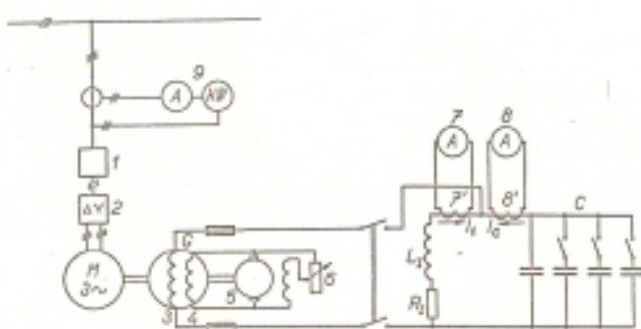
### 3.4.2 Napájení středofrekvenčních zařízení

Z historického hlediska byla středofrekvenční zařízení zprvu napájena rotačními generátory. Pro své prostorové nároky a nástupem novějších technologií byly nahrazovány zpočátku uvažovanými iontovými měniči, ale nakonec jako nejlepší se ukázaly tyristorové měniče, později měniče s výkonovými tranzistory.

#### 3.4.2.1 Rotační měniče

Rotační měniče umožňují vyrábět proudy o kmitočtu 500 Hz až 10 000 Hz. Na statoru měniče jsou umístěna dvě vinutí. Ve větších drážkách je uloženo budící vinutí a je napájeno stejnosměrným napětím. Druhým vinutím je pracovní vinutí, do kterého se indukují proudy s požadovaným vyšším kmitočtem. Rotor má jen zuby a mezery, a obvykle bývá poháněn asynchronním motorem s kotvou nakrátko nebo kotvou kroužkovou. Otáčí-li se rotor, mění se magnetický tok v zubu statoru. Svého maxima dosahuje, je-li zub statoru proti zubu rotoru. Naopak minima dosahuje, je-li proti zubu rotoru drážka statoru. Takto se měnící magnetický tok indukují do pracovního vinutí napětí a proudy vždy takového směru, že působí proti změně magnetického toku. Kmitočet proudů, indukujících se do pracovního vinutí je přímo úměrný úhlové rychlosti rotoru a nepřímo úměrný pólové rozteči drážek pracovního vinutí na statoru. [6, 3]

Pro mnohé nevýhody (hlučnost, klesající účinnost s vyšší frekvencí, účinnost atd.) jsou dnes nahrazovány polovodičovými statickými měniči.



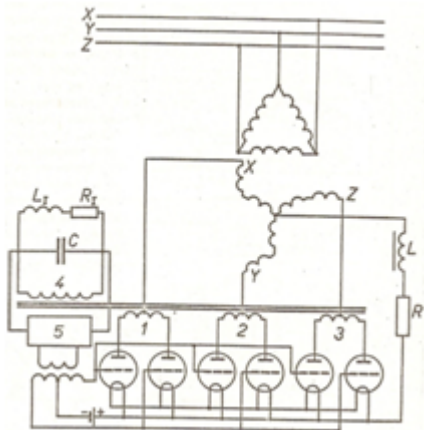
Obr. 3. 14 Zapojení s rotačním měničem [3]

Na obrázku Obr. 3. 14 je zobrazeno zapojení indukční pece s rotačním měničem. Měnič je poháněn asynchronním motorem s kotvou nakrátko. Vinutí 4 představuje budící vinutí, 3 pracovní. Pecní vyladěný obvod je dán  $R_1$ ,  $L_1$  a  $C$ .

#### 3.4.2.2 Iontový měnič

Na obrázku Obr. 3. 15 jsou uvedeny, dnes již nepoužívané, iontové měniče s pecním obvodem. Energie je do iontového měniče přiváděna ze sítě přes transformátor v

zapojení trojúhelník - lomená hvězda, kdy fáze na sekundární straně jsou připojeny na středy cívek. Na každou cívku jsou dále připojeny 2 tyratrony, z nichž vždy jeden tyratron propouští (kladné napětí na mřížce) a druhý je uzavřen. Po změně polaroty na mřížce propouští druhý tyratron a nikoliv první. Toto se opakuje. Vznikající proudové rázy od středu cívky na otevřený tyratron vyvolávají na uzavřeném železném jádru střídavý magnetický tok. Jelikož uzavřené železné jádro je společné i pro pracovní vinutí pecního obvodu, vybudí střídavý magnetický tok naindukované napětí, které napájí pecní obvod složený z pecní cívky a paralelní



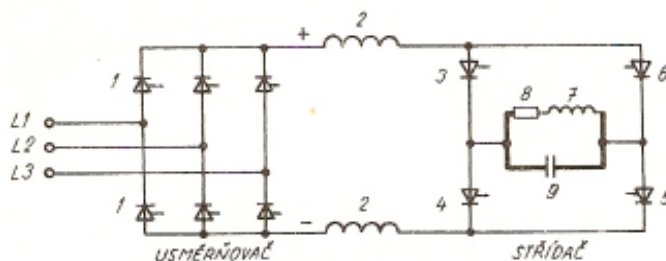
Obr. 3. 15 Zapojení s iontovým měničem [3]

kondenzátorové baterie. Po uplynutí jedné třetiny periody napájecího proudu se stejný děj projevuje na fázi Y, resp. na fázi Z. Výhodou iontových měničů bylo trvalé vyladění pecního obvodu, což bylo umožněno zpětnou vazbou 5, která měnila kmitočet impulsů na tyratrony v závislosti na změny  $L_I$ ,  $R_I$  pecního obvodu. Mezi další výhody bych zmínil menší prostorové nároky, vyšší elektrickou účinnost dosahující až 95 % a bezhlučnost. Avšak v praxi se projevila řada nevýhod, např. opětné zapalování tyratronů, které zhoršovalo spolehlivost provozu měniče a zapříčinily rychlý ústup iontových měničů. [3]

### 3.4.2.3 Tyristorový měnič

Rozvoj polovodičové techniky přinesl řadu výhod oproti rotačním měničům. Nejen, že byla snížena hlučnost a náklady vynaložené na betonové základy, ale zejména byla zvýšena elektrická účinnost až na 95 % a díky zpětné vazbě bylo docíleno trvalého vyladění pecního obvodu na pracovní kmitočet.

Na obrázku Obr. 3. 16 je základní uspořádání tyristorového měniče, kde na vstupu obvodu je trojfázový, tyristory řízený usměrňovač 1, dále meziobvodové tlumivky 2 a na



Obr. 3. 16 Zapojení s tyristorovým měničem [6]

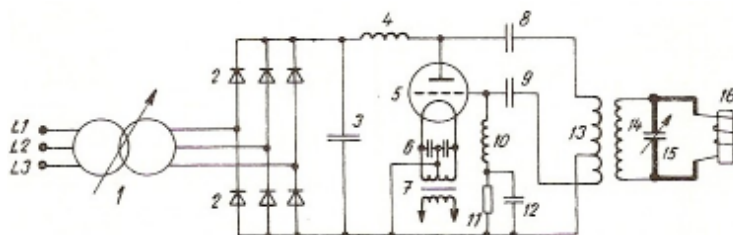
výstupu střídač s tyristory. Meziobvodové tlumivky zde omezují nárůst proudu při zkratu ve střídači, dále zabraňují, aby oscilační napětí vznikající v pecním obvodě (7, 8, 9) nepřešlo do usměrňovače a v neposlední řadě slouží k vyhlazení proudu z usměrňovače. Střídač se sestává

z tyristorů 3 až 6. Střídavým spínáním dvojic tyristorů (jednu dvojici tvoří tyristory 3 a 5, druhou tyristory 4 a 6) se propouští k ohřívací cívce proud obdélníkového průběhu (při otevření tyristorů 3, 5 jedním směrem, při otevření tyristorů 4, 6 směrem druhým) v závislosti na pecním obvodu. [6, 3]

### 3.4.3 Napájení vysokofrekvenčních zařízení

Zapojení vysokofrekvenčního zařízení s elektronovým generátorem je na Obr.

3. 17. Je používáno za účelem napájet zařízení určená vysokofrekvenčnímu indukčnímu ohřevu, např. povrchové kalení,



Obr. 3. 17 Zapojení s elektronovým generátorem [6]

letování, pájení, svařování nebo pro

vysokofrekvenční tavicí pece. Diodový usměrňovač 2 je napájený ze sítě přes regulační transformátor 1. Kondenzátor 3 slouží k vyhlazování napětí a oddělovací tlumivka 4 pro střídavou vysokofrekvenční složku na anodě výkonové triody 5. Vysokofrekvenční složky proudu katody jsou zkratovány kondenzátory 6. Transformátor 7 pro žhavení triody. Střídavé vf složky propouští pouze kondenzátor 8. Oddělovací kondenzátor 9 umožňuje průtok střídavých vf proudů zpětné vazby na mřížku ze vstupu vf transformátoru 13. Tlumivka 10 zabraňuje zkratování mřížkového napětí kondenzátorem 12. Na výstupní vinutí vf transformátoru je paralelně připojen kompenzační kondenzátor 12 pro ohřívací cívku 16. Oscilační obvod tvořený vinutím 13, 14, 16 a kompenzačním kondenzátorem pracují na daném kmitočtu. Odbočkou na vinutí 13 a zavedením na mřížku triody je provedena zpětná vazba generátoru. [6]

## 4 Měření na fyzikálním laboratorním modelu

Cílem měření je dále určit působení stínění v závislosti na volbě kmitočtu, kdy porovnávám stínění vysokofrekvenčního a nízkofrekvenčního pole měřených na laboratorním modelu indukční kelímkové pece. V mém konkrétním případě jsem měření prováděl pro tři hodnoty kmitočtu, tj. pro 50 Hz, 4 100 Hz a 10 000 Hz, měřené pro dvě proudové úrovně 15 A a 31 A.

Měření jsem prováděl v laboratoři EL 113 na laboratorním modelu skládajícího se z induktoru se závity navinutými na válec z izolačního tvrzeného papíru. Základní popis laboratorního modelu uvádím v tabulce Tab. 4. 1 a v přílohách III/IV přikládám fotografie modelu, respektive jeho geometrii.

Tab. 4. 1 Základní popis laboratorního modelu

|                          |        |
|--------------------------|--------|
| Výška induktoru          | 317 mm |
| Vnitřní průměr induktoru | 220 mm |
| Vnější průměr induktoru  | 225 mm |
| Počet závitů             | 42     |

Pro měření vysokofrekvenčního pole jsem použil vysokofrekvenční pulzní zdroj typ FRQET5 o jmenovitém výkonu  $P_n = 0,1 - 10$  kW a rozsahu pracovního kmitočtu  $f = 4 - 25$  kHz (viz foto Příloha III). Celé zapojení měření vysokofrekvenčního pole se kromě zdroje skládalo z induktoru, osciloskopu EZ DS-1080C včetně proudových kleští, multimetru FINEST 703 a měřicí cívky, se kterou se provádělo měření pole kolem induktoru. V průběhu měření pole při pracovním kmitočtu 10 000 Hz se projevila nevhodnost měřicí cívky dle Obr. 9 pro tuto úroveň kmitočtu a byla zvolena křížová cívka dle Obr. 10 (oba viz Příloha III), jejíž impedance je pro takto zvolený kmitočet frekvenčně stabilní.

Tab. 4. 2 Rozměry měřicí cívky

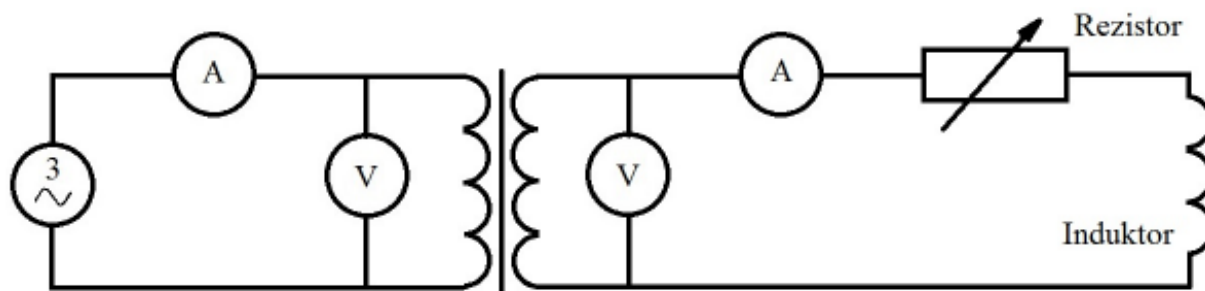
|                |        |
|----------------|--------|
| Vnější průměr  | 20 mm  |
| Vnitřní průměr | 9 mm   |
| Výška          | 17 mm  |
| Počet závitů   | 21 000 |

Tab. 4. 3 Rozměry křížové měřicí cívky

|                |        |
|----------------|--------|
| Vnější průměr  | 38 mm  |
| Vnitřní průměr | 20 mm  |
| Výška          | 9,5 mm |
| Počet závitů   | 310    |

V případě měření nízkofrekvenčního pole bylo schéma zapojení podle Obr. 4. 1, kdy zdrojem napájení byl 3f rozvod 400/230, který byl laboratorním transformátorem snižen na hodnotu 127 V v jedné fázi. Pro docílení proudu 15 A/31 A na sekundární straně

transformátoru byl použit velký proměnný rezistor, který musel být v průběhu měření intenzivně chlazen jak je patrné z Přílohy III, kde je zobrazena celá laboratorní úloha.



Obr. 4. 1 Schéma zapojení

## Postup měření

Po sestavení obvodu jsem postupoval tak, že jsem na induktor nasadil měřicí desku s pravidelně rozmístěnými otvory pro umístění měřicí cívky. V každém bodě desky jsem po správném natočení měřicí cívky odečetl z multimetru FINEST 703, ve kterém byla měřicí cívka zapojena (jak lze vidět na Obr. 9), hodnotu indukovaného napětí v axiálním (a) a radiálním (r) směru. Měřicí cívka pracuje na principu elektromagnetické indukce, kdy napětí naindukované v cívce je úměrné velikosti magnetické intenzity  $H$  pole vytvořeného kolem induktoru. Tímto způsobem jsem proměřil všechny body měřicí desky a získané hodnoty jsem zanesl do tabulky. Stejným způsobem jsem postupoval při měření ostatních konfigurací, kdy jsem měnil proud, kmitočet nebo když jsem k induktoru upevnil stínící svazky transformátorových plechů (kolem induktoru jsem vždy umístil celkem 10 svazků, geometrie je zobrazena v Příloze IV).

Ze získaných hodnot napětí v axiálním  $U_a$  a radiálním  $U_r$  směru jsem ze vztahů (4 - 1), (4 - 2) a Pythagorovy věty (4 - 3) určil hodnotu magnetické indukce v daném bodě. Na základě této hodnoty magnetické indukce  $B$  jsem vypočetl ze známého vztahu (4 - 4) hodnotu magnetické intenzity  $H$ .

$$B_r = k \cdot \frac{U_r}{4,44 \cdot f} \text{ [T]} \quad (4 - 1)$$

$$B_a = k \cdot \frac{U_a}{4,44 \cdot f} \text{ [T]} \quad (4 - 2)$$

$$B^2 = B_a^2 + B_r^2 \text{ [T]} \quad (4 - 3)$$

$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} \text{ [A/m]} \quad (4 - 4)$$

Ve vztazích (4 - 1), (4 - 2) je uvedena konstanta měřicí cívky  $k$ , která se určí ze znalosti rozměrů a počtu závitů cívky.

- poznámka: Obě měřicí cívky byly ocejchovány na katedře KET.

$$k = \frac{1}{N \cdot A} \text{ [m}^{-2}\text{]}, \quad \text{kde} \quad (4 - 5)$$

$N$  počet závitů cívky

$A$  střední účinná plocha závitu [m<sup>2</sup>]

$$A = \frac{\pi}{12} \cdot \frac{d_2^3 - d_1^3}{d_2 - d_1} \quad (4 - 6)^3$$

$d_2$  vnější průměr měřicí cívky

$d_1$  vnitřní průměr měřicí cívky

V následujících kapitolách uvádím naměřené a vypočtené hodnoty pro kmitočty 50 Hz, 4 100 Hz, 10 000 Hz a pro úrovně proudu 15 A a 31 A.

-poznámka k tabulkám: **červeně** označené hodnoty představují maximální hodnotu dané konfigurace

**tučně** označené hodnoty jsou hodnoty použité u vzorového výpočtu nebo výsledné hodnoty vzorového výpočtu pro danou konfiguraci

---

<sup>3</sup> Dle literatury [13]



## 4.1 Měření na laboratorním modelu při kmitočtu 50 Hz

### 4.1.1 Velikost proudu 15 A

Pomocí proměnného rezistoru jsem nastavil proud 15 A napájecího laboratorní induktoru.

#### Induktor bez stínění - naměřené a vypočítané hodnoty

Tab. 4. 4 Naměřené hodnoty naindukovaného napětí kolem induktoru

| [V] | A     | B     | C     | D     | E     | F     | G     | H     | I     | J     | K     | L            | M     | N     |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| 1   | 0,004 | 0,008 | 0,008 | 0,011 | 0,015 | 0,02  | 0,023 | 0,026 | 0,027 | 0,03  | 0,033 | 0,033        | 0,032 | 0,032 |
|     | 0,006 | 0,008 | 0,009 | 0,011 | 0,012 | 0,013 | 0,014 | 0,012 | 0,013 | 0,012 | 0,012 | 0,011        | 0,008 | 0,008 |
| 2   | 0,006 | 0,007 | 0,009 | 0,012 | 0,015 | 0,018 | 0,021 | 0,027 | 0,032 | 0,035 | 0,042 | 0,041        | 0,039 | 0,038 |
|     | 0,008 | 0,01  | 0,012 | 0,013 | 0,015 | 0,016 | 0,017 | 0,017 | 0,015 | 0,012 | 0,014 | 0,012        | 0,009 | 0,01  |
| 3   | 0,006 | 0,007 | 0,01  | 0,013 | 0,017 | 0,021 | 0,03  | 0,036 | 0,041 | 0,047 | 0,052 | 0,054        | 0,053 | 0,047 |
|     | 0,01  | 0,012 | 0,015 | 0,017 | 0,019 | 0,021 | 0,021 | 0,021 | 0,02  | 0,015 | 0,014 | 0,011        | 0,009 | 0,014 |
| 4   | 0,005 | 0,007 | 0,01  | 0,015 | 0,02  | 0,025 | 0,034 | 0,044 | 0,054 | 0,063 | 0,068 | 0,072        | 0,069 | 0,064 |
|     | 0,012 | 0,015 | 0,017 | 0,021 | 0,024 | 0,027 | 0,026 | 0,026 | 0,025 | 0,018 | 0,015 | 0,01         | 0,01  | 0,014 |
| 5   | 0,005 | 0,007 | 0,01  | 0,015 | 0,022 | 0,03  | 0,043 | 0,054 | 0,069 | 0,064 | 0,091 | 0,096        | 0,093 | 0,085 |
|     | 0,015 | 0,019 | 0,022 | 0,027 | 0,031 | 0,036 | 0,037 | 0,037 | 0,034 | 0,027 | 0,014 | 0,01         | 0,01  | 0,022 |
| 6   | 0,004 | 0,006 | 0,009 | 0,015 | 0,023 | 0,033 | 0,049 | 0,071 | 0,089 | 0,11  | 0,126 | 0,132        | 0,127 | 0,114 |
|     | 0,018 | 0,021 | 0,027 | 0,035 | 0,042 | 0,046 | 0,051 | 0,054 | 0,05  | 0,041 | 0,025 | 0,012        | 0,018 | 0,031 |
| 7   | 0,003 | 0,006 | 0,009 | 0,013 | 0,023 | 0,037 | 0,057 | 0,092 | 0,123 | 0,158 | 0,185 | 0,193        | 0,187 | 0,165 |
|     | 0,019 | 0,025 | 0,033 | 0,042 | 0,053 | 0,064 | 0,072 | 0,08  | 0,079 | 0,062 | 0,031 | 0,011        | 0,026 | 0,051 |
| 8   | 0,003 | 0,005 | 0,006 | 0,009 | 0,018 | 0,038 | 0,07  | 0,107 | 0,171 | 0,226 | 0,272 | <b>0,291</b> | 0,277 | 0,233 |
|     | 0,021 | 0,029 | 0,039 | 0,052 | 0,066 | 0,086 | 0,104 | 0,124 | 0,129 | 0,104 | 0,061 | <b>0,011</b> | 0,044 | 0,088 |
| 9   | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,006 | 0,014 | 0,035 | 0,06  | 0,129 | 0,222 | 0,334 | 0,427 | 0,459        | 0,426 | 0,346 |
|     | 0,022 | 0,032 | 0,043 | 0,06  | 0,081 | 0,111 | 0,147 | 0,187 | 0,202 | 0,195 | 0,105 | 0,011        | 0,098 | 0,165 |
| 10  | 0,008 | 0,008 | 0,011 | 0,009 | 0,008 | 0,018 | 0,047 | 0,132 |       | 0,517 | 0,695 | 0,734        | 0,702 | 0,528 |
|     | 0,022 | 0,032 | 0,045 | 0,065 | 0,092 | 0,134 | 0,193 | 0,289 |       | 0,342 | 0,27  | 0,012        | 0,15  | 0,314 |
| 11  | 0,012 | 0,014 | 0,017 | 0,022 | 0,021 | 0,017 | 0,015 | 0,061 |       | 0,925 | 1,174 | <b>1,223</b> | 1,183 | 0,987 |
|     | 0,021 | 0,032 | 0,046 | 0,066 | 0,099 | 0,151 | 0,241 | 0,405 |       | 0,728 | 0,355 | 0,061        | 0,245 | 0,53  |
| 12  | 0,017 | 0,021 | 0,029 | 0,036 | 0,044 | 0,06  | 0,082 | 0,129 |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,017 | 0,028 | 0,041 | 0,058 | 0,091 | 0,149 | 0,243 | 0,424 |       |       |       |              |       |       |
| 13  | 0,022 | 0,028 | 0,04  | 0,053 | 0,072 | 0,102 | 0,16  | 0,264 |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,015 | 0,02  | 0,032 | 0,046 | 0,071 | 0,121 | 0,181 | 0,304 |       |       |       |              |       |       |
| 14  | 0,026 | 0,034 | 0,047 | 0,064 | 0,09  | 0,136 | 0,194 | 0,295 |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,01  | 0,013 | 0,019 | 0,033 | 0,048 | 0,072 | 0,125 | 0,154 |       |       |       |              |       |       |

Na základě těchto hodnot napětí a použití výše uvedených vztahů ( 4 - 1 ) až ( 4 - 5 ) získám rozložení magnetické intenzity kolem laboratorního induktoru. Vypočtené hodnoty uvádím v tabulce Tab. 4. 5

$$\text{Konstanta měřicí cívky} \quad k = \frac{1}{N \cdot A} = \frac{1}{21000 \cdot 1,730 \cdot 10^{-4}} = 0,275 \text{ m}^{-2}$$

$$A = \frac{\pi}{12} \cdot \frac{d_2^3 - d_1^3}{d_2 - d_1} = \frac{\pi}{12} \cdot \frac{0,02^3 - 0,009^3}{0,02 - 0,009} = 1,730 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Příklad výpočtu  $H$  pro bod L8:

$$B_r = k \cdot \frac{U_r}{4,44 \cdot f} = 0,275 \cdot \frac{0,011}{4,44 \cdot 50} = 1,363 \cdot 10^{-5} \text{ T} \quad B_a = k \cdot \frac{U_a}{4,44 \cdot f} = 0,275 \cdot \frac{0,291}{4,44 \cdot 50} = 3,605 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

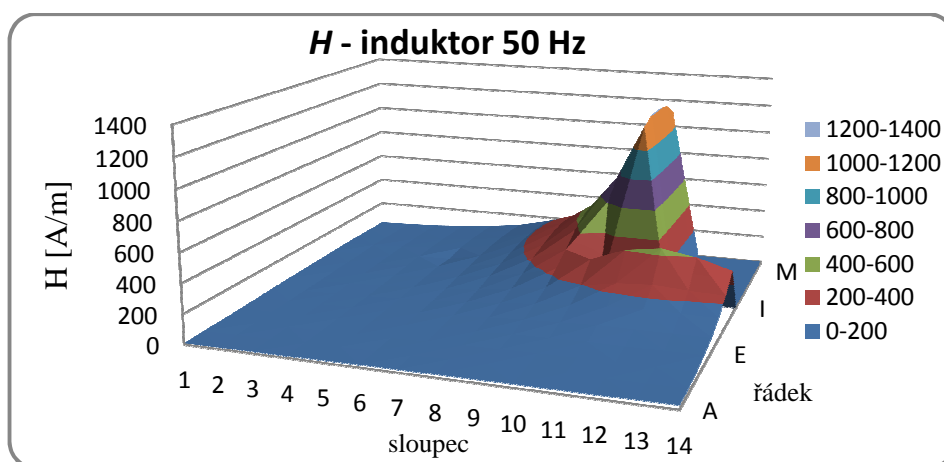
$$B = \sqrt{(1,363 \cdot 10^{-5})^2 + (3,605 \cdot 10^{-4})^2} = 3,609 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} = \frac{3,609 \cdot 10^{-4}}{1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 287,244 \text{ A/m}$$

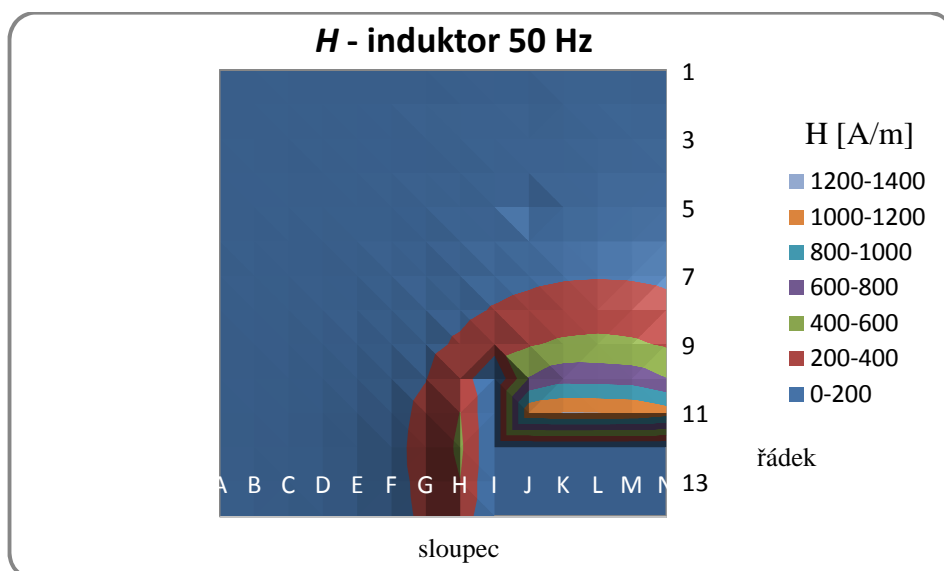
Tab. 4. 5 Magnetická intenzita magnetického pole induktoru

| H [A/m] | A      | B      | C      | D      | E       | F       | G       | H       | I       | J        | K               | L              | M        | N        |
|---------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|-----------------|----------------|----------|----------|
| 1       | 7,113  | 11,160 | 11,878 | 15,345 | 18,948  | 23,529  | 26,559  | 28,246  | 29,559  | 31,871   | 34,636          | 34,312         | 32,536   | 32,536   |
| 2       | 9,864  | 12,040 | 14,796 | 17,451 | 20,924  | 23,755  | 26,651  | 31,472  | 34,860  | 36,496   | 43,669          | 42,139         | 39,480   | 38,759   |
| 3       | 11,503 | 13,703 | 17,782 | 21,110 | 25,148  | 29,294  | 36,121  | 41,110  | 44,997  | 48,664   | 53,119          | 54,359         | 53,027   | 48,373   |
| 4       | 12,823 | 16,328 | 19,455 | 25,456 | 30,816  | 36,296  | 42,219  | 50,412  | 58,696  | 64,629   | 68,687          | 71,702         | 68,772   | 64,622   |
| 5       | 15,596 | 19,973 | 23,837 | 30,466 | 37,496  | 46,224  | 55,955  | 64,569  | 75,875  | 68,517   | 90,817          | 95,206         | 92,263   | 86,606   |
| 6       | 18,188 | 21,543 | 28,073 | 37,561 | 47,233  | 55,842  | 69,762  | 87,988  | 100,694 | 115,795  | 126,708         | 130,740        | 126,523  | 116,532  |
| 7       | 18,974 | 25,360 | 33,740 | 43,367 | 56,989  | 72,919  | 90,581  | 120,258 | 144,195 | 167,419  | 185,026         | 190,682        | 186,229  | 170,351  |
| 8       | 20,924 | 29,027 | 38,922 | 52,055 | 67,479  | 92,741  | 123,657 | 161,554 | 211,285 | 245,395  | 274,962         | <b>287,244</b> | 276,655  | 245,674  |
| 9       | 22,254 | 31,947 | 42,700 | 59,478 | 81,082  | 114,803 | 156,612 | 224,086 | 296,061 | 381,492  | 433,735         | 452,882        | 431,177  | 378,111  |
| 10      | 23,091 | 32,536 | 45,694 | 64,727 | 91,090  | 133,363 | 195,936 | 313,394 | 0,000   | 611,444  | 735,455         | 724,106        | 708,075  | 605,951  |
| 11      | 23,858 | 34,453 | 48,373 | 68,623 | 99,825  | 149,886 | 238,180 | 403,993 | 0,000   | 1161,096 | <b>1209,804</b> | 1207,852       | 1191,659 | 1105,049 |
| 12      | 23,714 | 34,524 | 49,536 | 67,335 | 99,703  | 158,440 | 252,972 | 437,157 | 0,000   | 0,000    | 0,000           | 0,000          | 0,000    | 0,000    |
| 13      | 26,265 | 33,941 | 50,528 | 69,223 | 99,742  | 156,102 | 238,292 | 397,151 | 0,000   | 0,000    | 0,000           | 0,000          | 0,000    | 0,000    |
| 14      | 27,478 | 35,905 | 50,005 | 71,027 | 100,612 | 151,788 | 227,642 | 328,248 | 0,000   | 0,000    | 0,000           | 0,000          | 0,000    | 0,000    |

### Induktor bez stínění - grafické znázornění rozložení H kolem induktoru



Obr. 4. 2 Rozložení intenzity magnetického pole



Obr. 4. 3 Rozložení intenzity magnetického pole

### Induktor se svazky transformátorových plechů - naměřené a vypočítané hodnoty

Tab. 4. 6 Naměřené hodnoty naindukovaného napětí kolem induktoru

| [V] | A     | B     | C     | D     | E     | F     | G     | H     | I     | J     | K     | L            | M     | N     |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| 1   | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,005 | 0,006 | 0,007 | 0,01  | 0,013 | 0,013        | 0,012 | 0,007 |
|     | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,005 | 0,004 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,007        | 0,007 | 0,006 |
| 2   | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,004 | 0,006 | 0,005 | 0,006 | 0,007 | 0,007 | 0,007        | 0,008 | 0,008 |
|     | 0,001 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,004 | 0,004 | 0,006 | 0,004 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,006        | 0,007 | 0,007 |
| 3   | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,006 | 0,006 | 0,007 | 0,009 | 0,01  | 0,01         | 0,011 | 0,009 |
|     | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,007 | 0,006 | 0,007 | 0,008 | 0,008 | 0,009        | 0,009 | 0,009 |
| 4   | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,004 | 0,004 | 0,006 | 0,007 | 0,008 | 0,009 | 0,012 | 0,015 | 0,015        | 0,015 | 0,013 |
|     | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,006 | 0,008 | 0,007 | 0,006 | 0,01  | 0,009 | 0,011        | 0,009 | 0,013 |
| 5   | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,006 | 0,008 | 0,01  | 0,014 | 0,018 | 0,022 | 0,024        | 0,022 | 0,02  |
|     | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,006 | 0,007 | 0,01  | 0,008 | 0,009 | 0,015 | 0,011 | 0,013        | 0,014 | 0,017 |
| 6   | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,006 | 0,009 | 0,011 | 0,021 | 0,029 | 0,038 | 0,042        | 0,037 | 0,028 |
|     | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,006 | 0,009 | 0,012 | 0,011 | 0,015 | 0,021 | 0,017 | 0,01         | 0,021 | 0,024 |
| 7   | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,006 | 0,011 | 0,014 | 0,029 | 0,051 | 0,068 | 0,076        | 0,066 | 0,047 |
|     | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,007 | 0,011 | 0,015 | 0,018 | 0,024 | 0,033 | 0,023 | 0,014        | 0,032 | 0,04  |
| 8   | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,005 | 0,006 | 0,012 | 0,014 | 0,038 | 0,084 | 0,122 | <b>0,138</b> | 0,118 | 0,077 |
|     | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,005 | 0,007 | 0,013 | 0,022 | 0,03  | 0,049 | 0,06  | 0,041 | <b>0,014</b> | 0,051 | 0,076 |
| 9   | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,005 | 0,008 | 0,009 | 0,012 | 0,043 | 0,141 | 0,239 | 0,276        | 0,232 | 0,132 |
|     | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,004 | 0,006 | 0,014 | 0,025 | 0,056 | 0,112 | 0,136 | 0,086 | 0,02         | 0,114 | 0,162 |
| 10  | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,007 | 0,014 | 0,039 |       | 0,285 | 0,497 | 0,548        | 0,486 | 0,255 |
|     | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,009 | 0,021 | 0,051 |       | 0,344 | 0,224 | 0,018        | 0,232 | 0,332 |
| 11  | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,007 | 0,013 |       |       | 0,686 | 1,042 | <b>1,109</b> | 1,048 | 0,73  |
|     | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,006 | 0,009 |       |       | 0,803 | 0,304 | 0,034        | 0,39  | 0,784 |
| 12  | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,005 | 0,007 |       |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,004 | 0,005 |       |       |       |       |              |       |       |
| 13  | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,004 |       |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |       |       |       |       |              |       |       |
| 14  | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,003 |       |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,003 |       |       |       |       |              |       |       |

Na základě těchto hodnot napětí a použití výše uvedených vztahů ( 4 - 1 ) až ( 4 - 5 ) získám rozložení magnetické intenzity kolem laboratorního induktoru. Vypočtené hodnoty uvádím v tabulce Tab. 4. 7

Příklad výpočtu  $H$  pro bod L8:

$$B_r = k \cdot \frac{U_r}{4,44 \cdot f} = 0,275 \cdot \frac{0,014}{4,44 \cdot 50} = 1,734 \cdot 10^{-5} \text{ T} \quad B_a = k \cdot \frac{U_a}{4,44 \cdot f} = 0,275 \cdot \frac{0,138}{4,44 \cdot 50} = 1,709 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

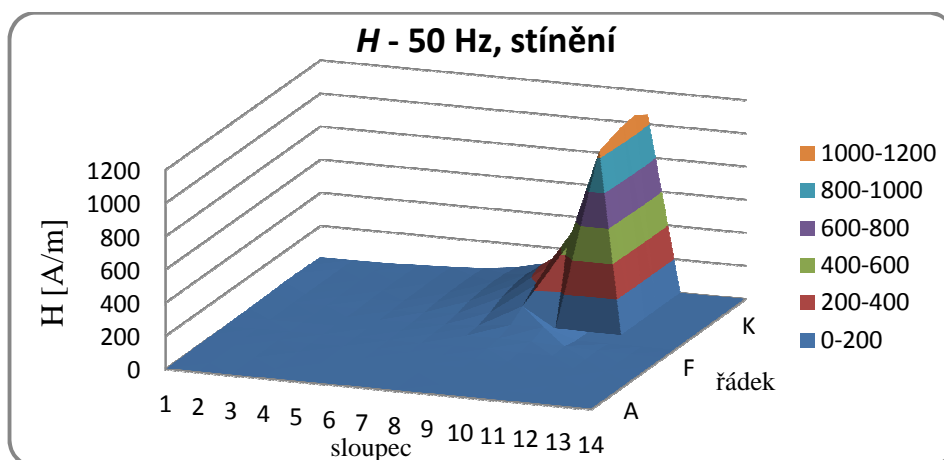
$$B = \sqrt{(1,734 \cdot 10^{-5})^2 + (1,709 \cdot 10^{-4})^2} = 1,719 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} = \frac{1,719 \cdot 10^{-4}}{1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 136,820 \text{ A/m}$$

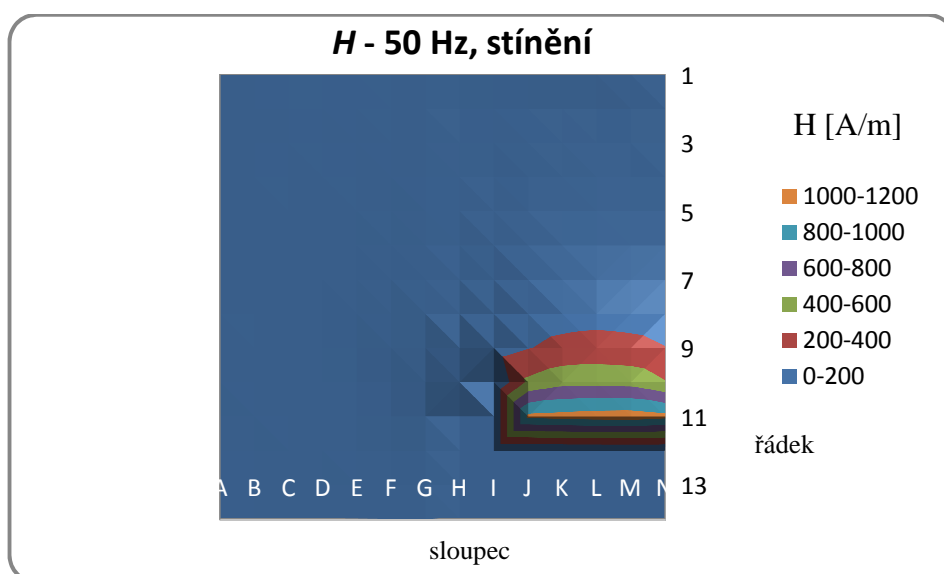
Tab. 4. 7 Magnetická intenzita magnetického pole induktoru

| H [A/m] | A     | B     | C     | D     | E     | F      | G      | H      | I       | J        | K        | L              | M               | N        |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|---------|----------|----------|----------------|-----------------|----------|
| 1       | 1,395 | 2,790 | 3,556 | 3,556 | 4,185 | 4,185  | 6,975  | 7,113  | 9,094   | 11,503   | 14,123   | 14,564         | 13,703          | 9,094    |
| 2       | 1,395 | 3,556 | 4,185 | 4,185 | 4,932 | 5,580  | 8,370  | 6,316  | 8,370   | 9,094    | 9,094    | 9,094          | 10,485          | 10,485   |
| 3       | 2,206 | 3,556 | 4,185 | 4,185 | 5,580 | 6,975  | 9,094  | 8,370  | 9,765   | 11,878   | 12,632   | 13,270         | 14,019          | 12,555   |
| 4       | 2,790 | 4,185 | 4,185 | 5,580 | 6,316 | 8,370  | 10,485 | 10,485 | 10,669  | 15,408   | 17,255   | 18,348         | 17,255          | 18,135   |
| 5       | 2,790 | 4,185 | 4,932 | 6,316 | 7,704 | 9,094  | 12,632 | 12,632 | 16,417  | 23,112   | 24,262   | 26,923         | 25,722          | 25,892   |
| 6       | 2,790 | 3,556 | 4,932 | 6,316 | 7,704 | 10,669 | 14,796 | 15,345 | 25,456  | 35,318   | 41,063   | 42,586         | 41,965          | 36,376   |
| 7       | 2,790 | 3,556 | 4,932 | 6,316 | 8,485 | 12,359 | 18,348 | 22,493 | 37,131  | 59,919   | 70,807   | 76,227         | 72,350          | 60,877   |
| 8       | 2,790 | 2,790 | 4,185 | 5,752 | 8,485 | 14,123 | 24,719 | 32,655 | 61,164  | 101,823  | 126,953  | <b>136,820</b> | 126,800         | 106,717  |
| 9       | 2,790 | 3,556 | 4,185 | 4,932 | 7,704 | 15,905 | 26,209 | 56,492 | 118,338 | 193,234  | 250,544  | 272,957        | 254,977         | 206,124  |
| 10      | 2,790 | 2,790 | 3,556 | 4,932 | 6,316 | 11,247 | 24,895 | 63,329 | 0,000   | 440,642  | 537,726  | 540,832        | 531,205         | 412,929  |
| 11      | 1,395 | 2,790 | 2,790 | 4,185 | 4,932 | 9,094  | 15,596 | 0,000  | 0,000   | 1041,751 | 1070,665 | 1094,418       | <b>1102,994</b> | 1056,659 |
| 12      | 1,395 | 1,395 | 2,790 | 4,185 | 4,185 | 6,316  | 8,485  | 0,000  | 0,000   | 0,000    | 0,000    | 0,000          | 0,000           | 0,000    |
| 13      | 1,395 | 1,395 | 2,206 | 2,790 | 4,185 | 4,185  | 4,932  | 0,000  | 0,000   | 0,000    | 0,000    | 0,000          | 0,000           | 0,000    |
| 14      | 1,395 | 1,395 | 1,395 | 2,206 | 2,790 | 3,556  | 4,185  | 0,000  | 0,000   | 0,000    | 0,000    | 0,000          | 0,000           | 0,000    |

## Induktor se svazky transformátorových plechů - grafické rozložení $H$ kolem induktoru



Obr. 4. 4 Grafické rozložení magnetického pole



Obr. 4. 5 Grafické rozložení magnetického pole

V obrázcích Obr. 4.2 až 4.5 vidíme názorně vliv stínění na velikost intenzity magnetického pole vně induktoru. Stínění se nachází na úrovni sloupce H a vidíme, že pole nalevo od tohoto sloupce je odstíněné. Maximální hodnota  $H$  u nestíněného induktoru činí 1209,804 A/m, u stíněného 1102,994 A/m. Obě tyto hodnoty byly naměřeny v ose induktoru (přesněji v bodech K11/M11). Vně induktoru v bodě D11 byly naměřeny tyto hodnoty  $H$ :

- nestíněný induktor: 68,623 A/m
- stíněný induktor: 4,185 A/m

#### 4.1.2 Velikost proudu 31 A

Pomocí proměnného rezistoru jsem nastavil napájecí proud 31 A modelu indukční kelímkové pece (laboratorní induktor)

#### Induktor bez stínění - naměřené a vypočítané hodnoty

Tab. 4. 8 Naměřené hodnoty naindukovaného napětí kolem induktoru

| [V] | A     | B     | C     | D     | E     | F     | G     | H     | I     | J     | K     | L            | M     | N     |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| 1   | 0,011 | 0,013 | 0,018 | 0,023 | 0,029 | 0,036 | 0,042 | 0,048 | 0,052 | 0,058 | 0,061 | 0,062        | 0,062 | 0,058 |
|     | 0,015 | 0,018 | 0,02  | 0,022 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,018 | 0,018 | 0,013 | 0,009 | 0,008        | 0,008 | 0,012 |
| 2   | 0,011 | 0,015 | 0,019 | 0,024 | 0,032 | 0,04  | 0,047 | 0,058 | 0,066 | 0,072 | 0,077 | 0,079        | 0,079 | 0,073 |
|     | 0,02  | 0,022 | 0,024 | 0,027 | 0,029 | 0,031 | 0,03  | 0,026 | 0,02  | 0,015 | 0,011 | 0,01         | 0,009 | 0,016 |
| 3   | 0,012 | 0,015 | 0,021 | 0,028 | 0,035 | 0,048 | 0,058 | 0,071 | 0,082 | 0,092 | 0,099 | 0,102        | 0,1   | 0,094 |
|     | 0,022 | 0,027 | 0,032 | 0,035 | 0,037 | 0,04  | 0,041 | 0,035 | 0,03  | 0,018 | 0,012 | 0,011        | 0,008 | 0,024 |
| 4   | 0,008 | 0,014 | 0,021 | 0,03  | 0,042 | 0,055 | 0,071 | 0,09  | 0,105 | 0,121 | 0,13  | 0,134        | 0,13  | 0,12  |
|     | 0,027 | 0,034 | 0,039 | 0,043 | 0,048 | 0,053 | 0,054 | 0,051 | 0,042 | 0,032 | 0,016 | 0,011        | 0,014 | 0,031 |
| 5   | 0,009 | 0,013 | 0,02  | 0,03  | 0,045 | 0,062 | 0,086 | 0,111 | 0,134 | 0,158 | 0,173 | 0,179        | 0,175 | 0,159 |
|     | 0,032 | 0,04  | 0,047 | 0,055 | 0,062 | 0,069 | 0,075 | 0,078 | 0,06  | 0,042 | 0,02  | 0,015        | 0,022 | 0,053 |
| 6   | 0,006 | 0,012 | 0,018 | 0,031 | 0,045 | 0,07  | 0,101 | 0,139 | 0,18  | 0,212 | 0,238 | 0,248        | 0,238 | 0,208 |
|     | 0,037 | 0,047 | 0,057 | 0,069 | 0,081 | 0,094 | 0,103 | 0,1   | 0,093 | 0,063 | 0,038 | 0,012        | 0,023 | 0,084 |
| 7   | 0,006 | 0,007 | 0,014 | 0,024 | 0,046 | 0,079 | 0,119 | 0,172 | 0,237 | 0,3   | 0,347 | 0,359        | 0,347 | 0,302 |
|     | 0,041 | 0,053 | 0,068 | 0,084 | 0,104 | 0,124 | 0,142 | 0,159 | 0,146 | 0,107 | 0,06  | 0,014        | 0,058 | 0,122 |
| 8   | 0,005 | 0,004 | 0,006 | 0,018 | 0,04  | 0,082 | 0,129 | 0,213 | 0,32  | 0,428 | 0,507 | <b>0,538</b> | 0,517 | 0,429 |
|     | 0,045 | 0,06  | 0,078 | 0,101 | 0,129 | 0,161 | 0,194 | 0,224 | 0,227 | 0,191 | 0,117 | <b>0,012</b> | 0,106 | 0,199 |
| 9   | 0,009 | 0,006 | 0,004 | 0,008 | 0,025 | 0,061 | 0,129 | 0,161 | 0,415 | 0,636 | 0,791 | 0,849        | 0,802 | 0,642 |
|     | 0,048 | 0,065 | 0,087 | 0,116 | 0,157 | 0,212 | 0,276 | 0,347 | 0,393 | 0,347 | 0,164 | 0,037        | 0,229 | 0,366 |
| 10  | 0,017 | 0,015 | 0,015 | 0,012 | 0,005 | 0,029 | 0,1   | 0,261 |       | 0,987 | 1,256 | 1,36         | 1,276 | 0,962 |
|     | 0,047 | 0,066 | 0,09  | 0,126 | 0,179 | 0,254 | 0,367 | 0,538 |       | 0,611 | 0,448 | 0,025        | 0,35  | 0,677 |
| 11  | 0,026 | 0,031 | 0,033 | 0,036 | 0,033 | 0,018 | 0,012 | 0,123 |       | 1,711 | 2,122 | <b>2,225</b> | 2,135 | 1,772 |
|     | 0,044 | 0,064 | 0,09  | 0,13  | 0,187 | 0,285 | 0,452 | 0,76  |       | 1,227 | 0,589 | 0,021        | 0,605 | 1,033 |
| 12  | 0,035 | 0,044 | 0,054 | 0,072 | 0,085 | 0,098 | 0,139 | 0,243 |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,037 | 0,056 | 0,081 | 0,118 | 0,18  | 0,281 | 0,457 | 0,823 |       |       |       |              |       |       |
| 13  | 0,045 | 0,058 | 0,075 | 0,095 | 0,134 | 0,183 | 0,274 | 0,495 |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,03  | 0,043 | 0,064 | 0,095 | 0,145 | 0,22  | 0,343 | 0,563 |       |       |       |              |       |       |
| 14  | 0,052 | 0,067 | 0,092 | 0,122 | 0,175 | 0,245 | 0,362 | 0,565 |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,017 | 0,028 | 0,044 | 0,063 | 0,09  | 0,14  | 0,216 | 0,302 |       |       |       |              |       |       |

Na základě těchto hodnot napětí a použití výše uvedených vztahů ( 4 - 1 ) až ( 4 - 5 ) získám rozložení magnetické intenzity kolem laboratorního induktoru. Vypočtené hodnoty uvádím v tabulce Tab. 4. 9

Konstanta měřící cívky je stejná jako v případě napájecího proudu 15 A.

$$k = \frac{1}{N \cdot A} = \frac{1}{21000 \cdot 1,730 \cdot 10^{-4}} = 0,275 \text{ m}^{-2}$$

Příklad výpočtu  $H$  pro bod L8:

$$B_r = k \cdot \frac{U_r}{4,44 \cdot f} = 0,275 \cdot \frac{0,012}{4,44 \cdot 50} = 1,487 \cdot 10^{-5} \text{ T} \quad B_a = k \cdot \frac{U_a}{4,44 \cdot f} = 0,275 \cdot \frac{0,538}{4,44 \cdot 50} = 6,669 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

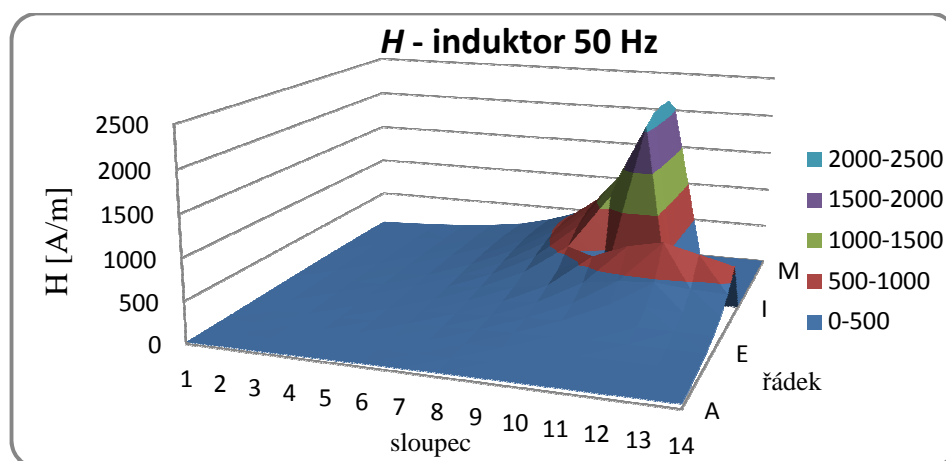
$$B = \sqrt{(1,487 \cdot 10^{-5})^2 + (6,669 \cdot 10^{-4})^2} = 6,670 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} = \frac{6,670 \cdot 10^{-4}}{1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 530,809 \text{ A/m}$$

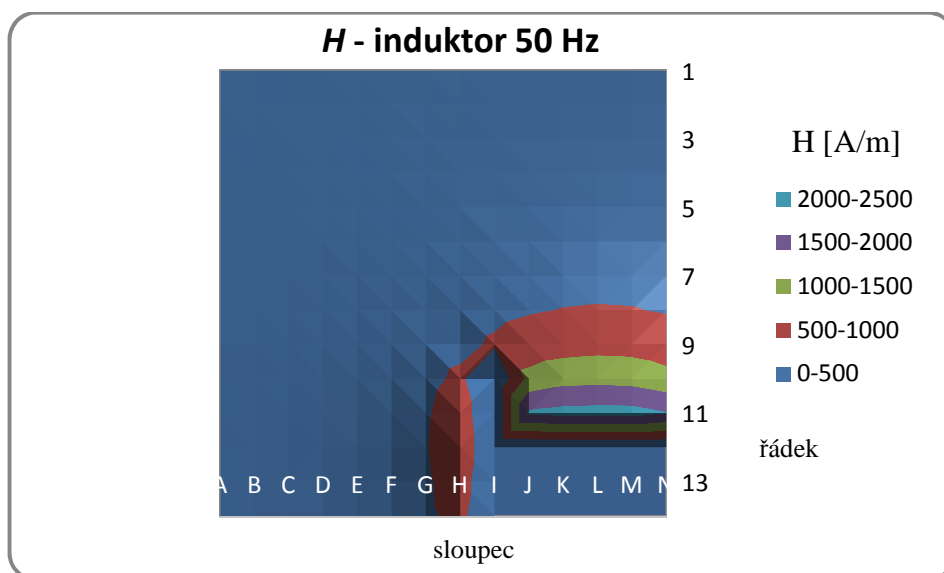
Tab. 4. 9 Magnetická intenzita magnetického pole induktoru

| H [A/m] | A      | B      | C       | D       | E       | F       | G       | H       | I       | J        | K        | L        | M        | N        |
|---------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1       | 18,348 | 21,901 | 26,541  | 31,394  | 36,510  | 42,139  | 47,233  | 50,566  | 54,278  | 58,630   | 60,821   | 61,663   | 61,663   | 58,422   |
| 2       | 22,515 | 26,265 | 30,194  | 35,633  | 42,598  | 49,917  | 54,999  | 62,696  | 68,025  | 72,545   | 76,723   | 78,546   | 78,429   | 73,716   |
| 3       | 24,719 | 30,466 | 37,754  | 44,212  | 50,238  | 61,631  | 70,061  | 78,081  | 86,127  | 92,468   | 98,367   | 101,195  | 98,954   | 95,695   |
| 4       | 27,777 | 36,269 | 43,692  | 51,717  | 62,913  | 75,341  | 87,988  | 102,038 | 111,549 | 123,456  | 129,198  | 132,621  | 128,972  | 122,252  |
| 5       | 32,789 | 41,487 | 50,383  | 61,797  | 75,567  | 91,500  | 112,556 | 133,818 | 144,821 | 161,262  | 171,782  | 177,182  | 173,977  | 165,319  |
| 6       | 36,973 | 47,847 | 58,961  | 74,614  | 91,399  | 115,605 | 142,293 | 168,903 | 199,848 | 218,152  | 237,734  | 244,910  | 235,854  | 221,268  |
| 7       | 40,873 | 52,733 | 68,481  | 86,172  | 112,171 | 145,026 | 182,748 | 231,044 | 274,572 | 314,175  | 347,356  | 354,382  | 347,025  | 321,278  |
| 8       | 44,661 | 59,315 | 77,166  | 101,195 | 133,221 | 178,220 | 229,803 | 304,896 | 386,997 | 462,305  | 513,242  | 530,809  | 520,571  | 466,471  |
| 9       | 48,172 | 64,388 | 85,906  | 114,693 | 156,814 | 217,599 | 300,512 | 377,324 | 563,774 | 714,641  | 796,826  | 838,238  | 822,700  | 728,940  |
| 10      | 49,300 | 66,762 | 89,999  | 124,847 | 176,632 | 252,170 | 375,202 | 589,828 | 0,000   | 1145,013 | 1315,355 | 1341,714 | 1305,121 | 1160,326 |
| 11      | 50,412 | 70,145 | 94,554  | 133,056 | 187,305 | 281,681 | 446,004 | 759,409 | 0,000   | 2076,821 | 2172,251 | 2194,811 | 2188,859 | 2023,195 |
| 12      | 50,238 | 70,249 | 96,025  | 136,350 | 196,351 | 293,548 | 471,169 | 846,444 | 0,000   | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000    |
| 13      | 53,347 | 71,218 | 97,253  | 132,522 | 194,749 | 282,267 | 433,029 | 739,458 | 0,000   | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000    |
| 14      | 53,964 | 71,627 | 100,592 | 135,437 | 194,108 | 278,338 | 415,807 | 631,927 | 0,000   | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000    |

### Induktor bez stínění - grafické znázornění rozložení $H$ kolem induktoru



Obr. 4. 6 Grafické rozložení intenzity magnetického pole



Obr. 4. 7 Grafické rozložení intenzity magnetického pole

### Induktor se svazky transformátorových plechů - naměřené a vypočítané hodnoty

Tab. 4. 10 Naměřené hodnoty naindukovaného napětí kolem induktoru

| [V] | A     | B     | C     | D     | E     | F     | G     | H     | I     | J     | K     | L            | M     | N     |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| 1   | 0,005 | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,004 | 0,004 | 0,006 | 0,01  | 0,011 | 0,012 | 0,012        | 0,012 | 0,012 |
|     | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,003 | 0,005        | 0,004 | 0,004 |
| 2   | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,005 | 0,006 | 0,01  | 0,012 | 0,012 | 0,014        | 0,014 | 0,013 |
|     | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,006 | 0,007 | 0,005 | 0,006 | 0,005        | 0,004 | 0,005 |
| 3   | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,005 | 0,007 | 0,01  | 0,014 | 0,018 | 0,021 | 0,021        | 0,02  | 0,018 |
|     | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,003 | 0,004 | 0,006 | 0,007 | 0,009 | 0,009 | 0,008 | 0,007 | 0,006        | 0,005 | 0,008 |
| 4   | 0,001 | 0     | 0,001 | 0,002 | 0,004 | 0,006 | 0,008 | 0,014 | 0,021 | 0,026 | 0,032 | 0,033        | 0,031 | 0,027 |
|     | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,006 | 0,008 | 0,01  | 0,013 | 0,014 | 0,009 | 0,007 | 0,006        | 0,006 | 0,01  |
| 5   | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,006 | 0,011 | 0,017 | 0,028 | 0,038 | 0,047 | 0,051        | 0,048 | 0,039 |
|     | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,007 | 0,009 | 0,015 | 0,019 | 0,021 | 0,015 | 0,011 | 0,009        | 0,008 | 0,017 |
| 6   | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,006 | 0,012 | 0,023 | 0,039 | 0,059 | 0,078 | 0,081        | 0,076 | 0,059 |
|     | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,01  | 0,014 | 0,021 | 0,03  | 0,036 | 0,03  | 0,024 | 0,009        | 0,012 | 0,03  |
| 7   | 0,003 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,005 | 0,012 | 0,025 | 0,057 | 0,096 | 0,136 | 0,145        | 0,131 | 0,098 |
|     | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,005 | 0,012 | 0,022 | 0,032 | 0,048 | 0,062 | 0,058 | 0,036 | 0,009        | 0,03  | 0,062 |
| 8   | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,004 | 0,005 | 0,009 | 0,021 | 0,069 | 0,156 | 0,242 | <b>0,27</b>  | 0,239 | 0,154 |
|     | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,006 | 0,013 | 0,024 | 0,042 | 0,077 | 0,114 | 0,123 | 0,088 | <b>0,01</b>  | 0,081 | 0,133 |
| 9   | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,006 | 0,007 | 0,011 | 0,015 | 0,012 | 0,061 | 0,266 | 0,459 | 0,54         | 0,465 | 0,275 |
|     | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,011 | 0,023 | 0,045 | 0,105 | 0,217 | 0,283 | 0,191 | 0,012        | 0,167 | 0,283 |
| 10  | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,006 | 0,01  | 0,016 | 0,037 | 0,114 |       | 0,513 | 0,986 | 1,094        | 0,973 | 0,493 |
|     | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,005 | 0,009 | 0,014 | 0,025 | 0,07  |       | 0,731 | 0,516 | 0,018        | 0,396 | 0,683 |
| 11  | 0,002 | 0,003 | 0,005 | 0,006 | 0,01  | 0,016 | 0,031 |       |       | 1,354 | 2,084 | <b>2,211</b> | 2,089 | 1,554 |
|     | 0,001 | 0,003 | 0,003 | 0,004 | 0,007 | 0,006 | 0,009 |       |       | 1,685 | 0,691 | 0,011        | 0,632 | 1,546 |
| 12  | 0,003 | 0,003 | 0,004 | 0,006 | 0,009 | 0,011 | 0,014 |       |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,004 | 0,009 |       |       |       |       |              |       |       |
| 13  | 0,003 | 0,003 | 0,004 | 0,004 | 0,007 | 0,007 | 0,01  |       |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,008 |       |       |       |       |              |       |       |
| 14  | 0,003 | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,006 | 0,006 | 0,008 |       |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,004 | 0,005 | 0,005 | 0,007 |       |       |       |       |              |       |       |



Vypočtené hodnoty intenzity magnetického pole kolem induktoru uvádím v tabulce Tab. 4. 11

Příklad výpočtu  $H$  pro bod L8:

$$B_r = k \cdot \frac{U_r}{4,44 \cdot f} = 0,275 \cdot \frac{0,01}{4,44 \cdot 50} = 1,239 \cdot 10^{-5} \text{ T} \quad B_a = k \cdot \frac{U_a}{4,44 \cdot f} = 0,275 \cdot \frac{0,27}{4,44 \cdot 50} = 3,347 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

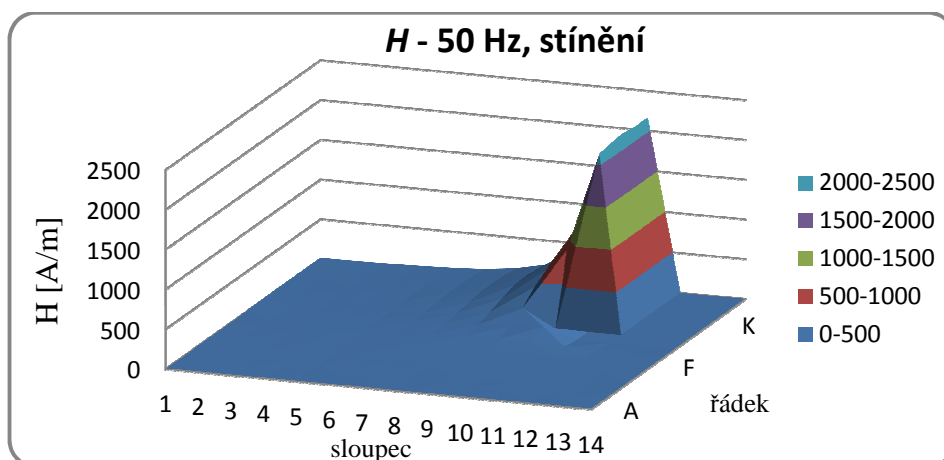
$$B = \sqrt{(1,239 \cdot 10^{-5})^2 + (3,347 \cdot 10^{-4})^2} = 3,349 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} = \frac{3,349 \cdot 10^{-4}}{1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 266,507 \text{ A/m}$$

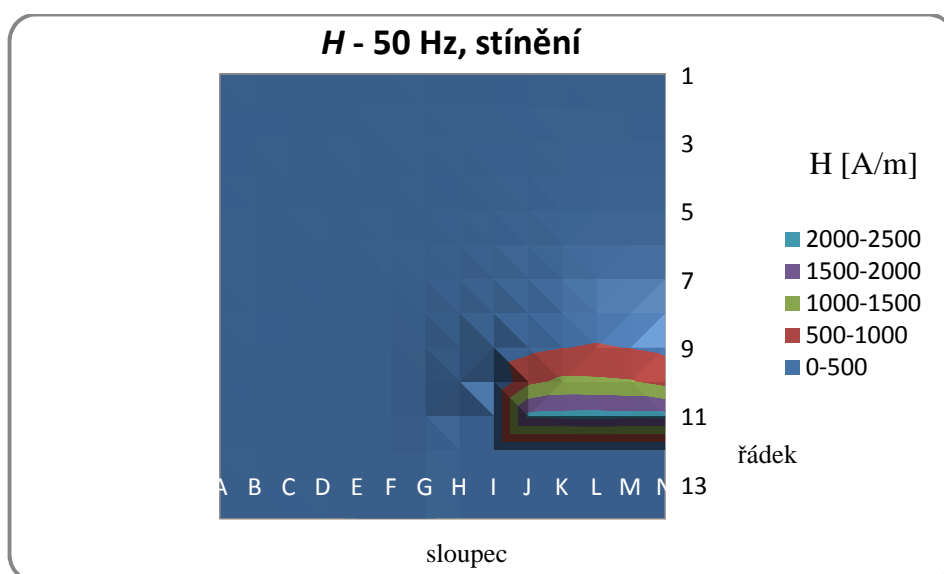
Tab. 4. 11 Magnetická intenzita magnetického pole induktoru

| H [A/m] | A     | B     | C     | D     | E      | F      | G      | H       | I       | J        | K        | L               | M        | N        |
|---------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|----------|----------|-----------------|----------|----------|
| 1       | 5,312 | 2,206 | 2,206 | 3,556 | 4,185  | 4,932  | 4,932  | 7,704   | 11,028  | 11,919   | 12,201   | 12,823          | 12,477   | 12,477   |
| 2       | 1,395 | 1,395 | 1,395 | 2,790 | 4,185  | 4,932  | 6,975  | 8,370   | 12,040  | 12,823   | 13,234   | 14,664          | 14,362   | 13,739   |
| 3       | 1,395 | 1,395 | 1,395 | 3,556 | 4,932  | 7,704  | 9,765  | 13,270  | 16,417  | 19,430   | 21,835   | 21,543          | 20,335   | 19,430   |
| 4       | 1,395 | 0,986 | 2,206 | 3,556 | 7,113  | 9,864  | 12,632 | 18,845  | 24,895  | 27,139   | 32,311   | 33,084          | 31,146   | 28,400   |
| 5       | 1,395 | 1,395 | 2,790 | 3,556 | 7,512  | 10,669 | 18,348 | 25,148  | 34,524  | 40,297   | 47,613   | 51,083          | 48,000   | 41,965   |
| 6       | 2,206 | 2,206 | 3,556 | 4,932 | 10,624 | 15,024 | 23,858 | 37,288  | 52,353  | 65,288   | 80,498   | 80,389          | 75,894   | 65,288   |
| 7       | 3,119 | 2,790 | 4,185 | 5,752 | 12,201 | 22,254 | 33,711 | 53,384  | 83,074  | 110,634  | 138,769  | 143,302         | 132,562  | 114,387  |
| 8       | 2,206 | 2,790 | 4,185 | 7,113 | 13,416 | 24,182 | 42,369 | 78,726  | 131,442 | 195,954  | 253,998  | <b>266,507</b>  | 248,918  | 200,712  |
| 9       | 2,790 | 4,185 | 5,580 | 7,704 | 12,861 | 25,148 | 46,788 | 104,245 | 222,342 | 383,101  | 490,387  | 532,781         | 487,354  | 389,235  |
| 10      | 2,790 | 3,556 | 4,932 | 7,704 | 13,270 | 20,971 | 44,046 | 131,955 | 0,000   | 880,889  | 1097,709 | 1079,255        | 1036,198 | 830,875  |
| 11      | 2,206 | 4,185 | 5,752 | 7,113 | 12,040 | 16,855 | 31,841 | 0,000   | 0,000   | 2132,182 | 2165,686 | <b>2180,931</b> | 2152,801 | 2162,200 |
| 12      | 3,556 | 3,556 | 4,932 | 7,113 | 10,155 | 11,545 | 16,417 | 0,000   | 0,000   | 0,000    | 0,000    | 0,000           | 0,000    | 0,000    |
| 13      | 3,556 | 4,185 | 4,932 | 4,932 | 7,953  | 8,485  | 12,632 | 0,000   | 0,000   | 0,000    | 0,000    | 0,000           | 0,000    | 0,000    |
| 14      | 3,556 | 4,185 | 5,580 | 6,316 | 7,704  | 7,704  | 10,485 | 0,000   | 0,000   | 0,000    | 0,000    | 0,000           | 0,000    | 0,000    |

## Induktor se svazky transformátorových plechů - grafické rozložení $H$ kolem induktoru



Obr. 4. 8 Grafické rozložení intenzity magnetického pole



Obr. 4. 9 Grafické rozložení intenzity magnetického pole

V obrázcích Obr. 4.6 až 4.9 vidíme názorně vliv stínění na velikost intenzity magnetického pole vně induktoru. Stínění se nachází na úrovni sloupce H a vidíme, že pole nalevo od tohoto sloupce je odstíněné. Maximální hodnota  $H$  u nestíněného induktoru činí 2194,811 A/m, u stíněného 2180,931 A/m. Obě tyto hodnoty byly naměřeny v ose induktoru (přesněji v bodech L11/L11). Vně induktoru v bodě D11 byly naměřeny tyto hodnoty  $H$ :

- nestíněný induktor: 133,056 A/m
- stíněný induktor: 7,113 A/m

## 4.2 Měření na laboratorním modelu při kmitočtu 4 100 Hz

### 4.2.1 Velikost proudu 15 A

Na napájecím zdroji jsem nastavil velikost proudu na hodnotu 15 A.

#### Induktor bez stínění - naměřené a vypočítané hodnoty

Tab. 4. 12 Naměřené hodnoty naindukovaného napětí kolem induktoru

| [V] | A     | B     | C     | D     | E     | F     | G     | H     | I     | J     | K     | L           | M            | N     |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|--------------|-------|
| 1   | 1,830 | 2,115 | 2,809 | 3,431 | 4,11  | 4,91  | 5,57  | 6,63  | 7,10  | 7,82  | 8,12  | 8,21        | 8,09         | 7,81  |
|     | 2,681 | 2,948 | 3,338 | 3,557 | 3,652 | 3,476 | 3,486 | 2,995 | 2,488 | 1,964 | 1,119 | 0,253       | 0,629        | 1,557 |
| 2   | 1,901 | 2,241 | 2,952 | 3,656 | 4,52  | 5,53  | 6,55  | 7,73  | 8,76  | 9,49  | 10,14 | 10,38       | 10,20        | 9,66  |
|     | 3,163 | 3,671 | 4,02  | 4,04  | 4,40  | 4,71  | 4,28  | 4,09  | 3,171 | 2,553 | 1,552 | 0,769       | 0,728        | 2,113 |
| 3   | 1,485 | 2,257 | 3,002 | 3,96  | 5,05  | 6,38  | 7,81  | 9,27  | 10,88 | 12,04 | 12,91 | 13,19       | 12,84        | 12,15 |
|     | 3,710 | 4,19  | 4,68  | 5,19  | 5,23  | 5,62  | 5,81  | 5,67  | 5,24  | 3,574 | 2,405 | 1,007       | 0,771        | 3,058 |
| 4   | 1,300 | 2,103 | 2,953 | 4,18  | 5,60  | 7,43  | 9,09  | 11,63 | 13,55 | 15,31 | 16,59 | 17,17       | 16,8         | 15,69 |
|     | 4,330 | 5     | 5,62  | 6,41  | 6,83  | 7,46  | 7,28  | 7,32  | 6,47  | 4,81  | 3,529 | 0,275       | 1,748        | 4,34  |
| 5   | 1,022 | 1,865 | 2,872 | 3,976 | 5,75  | 8,36  | 11,22 | 14,02 | 17,04 | 19,63 | 21,78 | 22,73       | 22,19        | 20,64 |
|     | 4,94  | 5,77  | 6,68  | 7,59  | 8,71  | 9,35  | 10,34 | 10,44 | 9,05  | 6,42  | 2,941 | 0,695       | 1,781        | 5,78  |
| 6   | 0,575 | 1,367 | 2,455 | 3,94  | 6,42  | 9,22  | 12,83 | 17,54 | 22,31 | 26,22 | 30,73 | 31,29       | 29,99        | 27,12 |
|     | 5,5   | 6,66  | 7,88  | 9,52  | 11,17 | 12,46 | 13,49 | 13,63 | 13,47 | 9,58  | 4,83  | 1,90        | 4,75         | 8,46  |
| 7   | 0,210 | 0,781 | 2     | 3,499 | 5,98  | 9,81  | 14,90 | 22,26 | 29,36 | 37,06 | 42,7  | 44,1        | 41,8         | 38,12 |
|     | 6,01  | 7,52  | 9,20  | 11,43 | 14,06 | 17,02 | 19,56 | 20,76 | 20,86 | 16,53 | 9,88  | 1,90        | 6,29         | 13,33 |
| 8   | 0,186 | 0,162 | 0,968 | 1,674 | 5,29  | 9,66  | 16,16 | 27,55 | 38,7  | 52,0  | 62,9  | <b>66,8</b> | 62,9         | 53,1  |
|     | 6,47  | 8,18  | 10,39 | 13,53 | 16,79 | 21,39 | 26,31 | 31,09 | 31,06 | 29,33 | 13,51 | <b>3,99</b> | 12,5         | 24,91 |
| 9   | 1,760 | 1,456 | 0,753 | 0,724 | 3,498 | 7,68  | 15,45 | 31,94 | 51,2  | 75,9  | 97,8  | 105,0       | 98,4         | 77,5  |
|     | 6,61  | 8,80  | 11,5  | 15,18 | 20,15 | 26,76 | 36,24 | 44,2  | 48,4  | 46,2  | 31,35 | 1,663       | 18,66        | 40,0  |
| 10  | 2,386 | 3,005 | 2,708 | 2,171 | 1,059 | 2,292 | 9,64  | 29,98 |       | 118,6 | 156,5 | 169,1       | 159,9        | 123,0 |
|     | 6,58  | 8,89  | 11,79 | 16,22 | 22,65 | 32,12 | 45,0  | 67,1  |       | 89,2  | 60,5  | 15,35       | 39,5         | 73,4  |
| 11  | 3,747 | 4,50  | 5,01  | 6,05  | 6,04  | 4,23  | 0,664 | 14,89 |       | 223,8 | 266,3 | 278,6       | <b>279,9</b> | 229,7 |
|     | 6,28  | 8,39  | 11,62 | 15,99 | 23,41 | 34,89 | 54,1  | 92,3  |       | 156,9 | 86,4  | 46,0        | 25,09        | 122,7 |
| 12  | 4,98  | 6,16  | 8,04  | 9,77  | 11,66 | 14,84 | 22,27 | 36,09 |       |       |       |             |              |       |
|     | 5,22  | 7,35  | 9,83  | 14,35 | 21,79 | 33,62 | 53,5  | 93,3  |       |       |       |             |              |       |
| 13  | 6,24  | 7,86  | 10,05 | 12,64 | 16,71 | 25,16 | 35,96 | 62,8  |       |       |       |             |              |       |
|     | 4,12  | 4,99  | 8,12  | 11,15 | 16,40 | 26,36 | 39,5  | 58,6  |       |       |       |             |              |       |
| 14  | 7,21  | 9,22  | 12,39 | 16,14 | 21,27 | 31,74 | 44,4  | 66,5  |       |       |       |             |              |       |
|     | 2,101 | 3,342 | 5,21  | 7,26  | 10,14 | 17,93 | 23,40 | 36,32 |       |       |       |             |              |       |

Na základě těchto hodnot napětí a použití výše uvedených vztahů ( 4 - 1 ) až ( 4 - 5 ) získám rozložení magnetické intenzity kolem laboratorního induktoru. Vypočtené hodnoty uvádím v tabulce Tab. 4. 13

Konstanta měřicí cívky  $k = \frac{1}{N \cdot A} = \frac{1}{21000 \cdot 1,730 \cdot 10^{-4}} = 0,275 \text{ m}^{-2}$

$$A = \frac{\pi}{12} \cdot \frac{d_2^3 - d_1^3}{d_2 - d_1} = \frac{\pi}{12} \cdot \frac{0,02^3 - 0,009^3}{0,02 - 0,009} = 1,730 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Příklad výpočtu  $H$  pro bod L8:

$$B_r = k \cdot \frac{U_r}{4,44 \cdot f} = 0,275 \cdot \frac{3,99}{4,44 \cdot 4100} = 6,031 \cdot 10^{-5} \text{ T} \quad B_a = k \cdot \frac{U_a}{4,44 \cdot f} = 0,275 \cdot \frac{66,8}{4,44 \cdot 4100} = 1,009 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

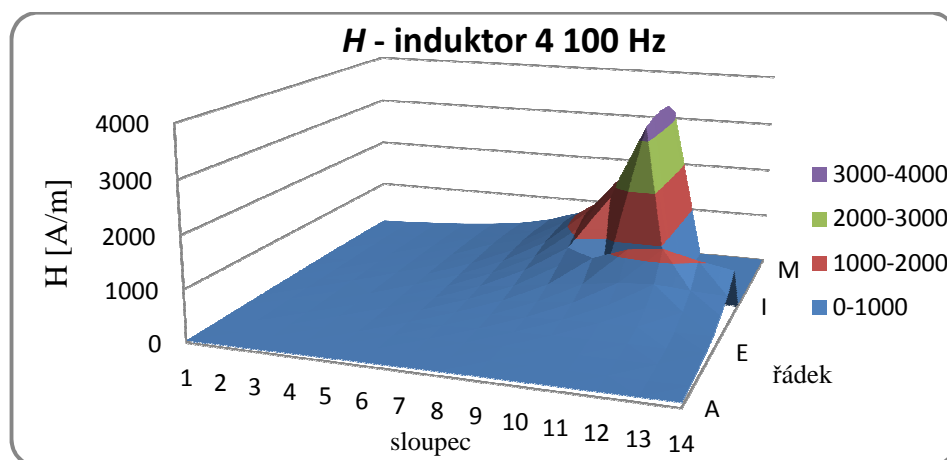
$$B = \sqrt{(6,031 \cdot 10^{-5})^2 + (1,009 \cdot 10^{-3})^2} = 1,012 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} = \frac{1,012 \cdot 10^{-3}}{1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 804,977 \text{ A/m}$$

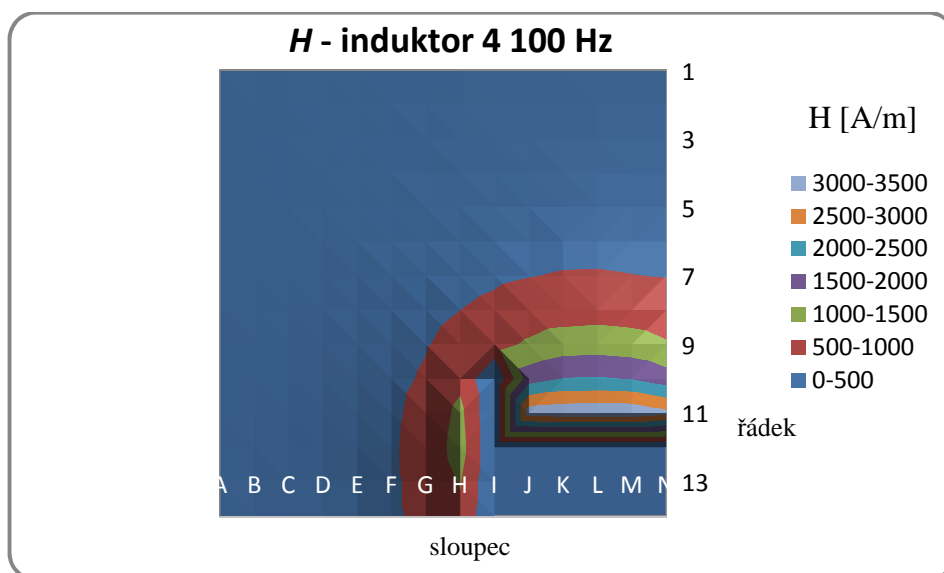
Tab. 4. 13 Magnetická intenzita magnetického pole induktoru

| H [A/m] | A      | B       | C       | D       | E       | F       | G       | H        | I       | J        | K        | L               | M        | N        |
|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|----------|----------|-----------------|----------|----------|
| 1       | 39,047 | 43,644  | 52,479  | 59,449  | 66,137  | 72,366  | 79,042  | 87,513   | 90,499  | 96,989   | 98,600   | 98,806          | 97,609   | 95,796   |
| 2       | 44,391 | 51,737  | 59,995  | 65,543  | 75,879  | 87,379  | 94,120  | 105,199  | 112,067 | 118,215  | 123,396  | 125,204         | 123,009  | 118,949  |
| 3       | 48,070 | 57,249  | 66,883  | 78,529  | 87,454  | 102,275 | 117,092 | 130,715  | 145,265 | 151,077  | 157,968  | 159,126         | 154,732  | 150,712  |
| 4       | 54,383 | 65,249  | 76,368  | 92,053  | 106,244 | 126,653 | 140,090 | 165,303  | 180,623 | 193,041  | 204,028  | 206,567         | 203,180  | 195,824  |
| 5       | 60,682 | 72,944  | 87,467  | 103,070 | 125,545 | 150,874 | 183,539 | 210,270  | 232,092 | 248,439  | 264,372  | 273,550         | 267,785  | 257,833  |
| 6       | 66,521 | 81,784  | 99,283  | 123,937 | 154,978 | 186,455 | 223,945 | 267,206  | 313,491 | 335,797  | 374,193  | 377,085         | 365,250  | 341,734  |
| 7       | 72,339 | 90,946  | 113,253 | 143,791 | 183,791 | 236,309 | 295,780 | 366,145  | 433,240 | 488,134  | 527,214  | 530,976         | 508,478  | 485,777  |
| 8       | 77,861 | 98,418  | 125,524 | 163,995 | 211,756 | 282,325 | 371,418 | 499,692  | 596,918 | 718,155  | 773,888  | <b>804,977</b>  | 771,428  | 705,538  |
| 9       | 82,283 | 107,295 | 138,631 | 182,810 | 246,012 | 334,894 | 473,899 | 655,979  | 847,520 | 1068,850 | 1235,413 | 1263,216        | 1204,761 | 1049,106 |
| 10      | 84,195 | 112,883 | 145,516 | 196,852 | 272,757 | 387,358 | 553,592 | 884,055  | 0,000   | 1785,123 | 2018,331 | 2042,488        | 1981,276 | 1723,004 |
| 11      | 87,968 | 114,525 | 152,217 | 205,653 | 290,824 | 422,769 | 650,825 | 1124,643 | 0,000   | 3287,805 | 3367,738 | <b>3396,688</b> | 3380,451 | 3132,596 |
| 12      | 86,784 | 115,359 | 152,761 | 208,828 | 297,282 | 442,065 | 697,088 | 1203,356 | 0,000   | 0,000    | 0,000    | 0,000           | 0,000    | 0,000    |
| 13      | 89,947 | 111,993 | 155,421 | 202,751 | 281,642 | 438,341 | 642,559 | 1033,231 | 0,000   | 0,000    | 0,000    | 0,000           | 0,000    | 0,000    |
| 14      | 90,337 | 117,970 | 161,682 | 212,887 | 283,447 | 438,513 | 603,728 | 911,470  | 0,000   | 0,000    | 0,000    | 0,000           | 0,000    | 0,000    |

### Induktor bez stínění - grafické znázornění rozložení $H$ kolem induktoru



Obr. 4. 10 Rozložení intenzity magnetického pole



Obr. 4. 11 Rozložení intenzity magnetického pole

### Induktor se svazky transformátorových plechů - naměřené a vypočítané hodnoty

Tab. 4. 14 Naměřené hodnoty naindukovaného napětí kolem induktoru

| [V] | A     | B     | C     | D     | E     | F     | G     | H     | I     | J     | K     | L            | M     | N     |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| 1   | 0,221 | 0,266 | 0,405 | 0,541 | 0,665 | 0,859 | 1,123 | 1,342 | 1,586 | 1,790 | 1,918 | 1,971        | 1,956 | 1,844 |
|     | 0,535 | 0,603 | 0,667 | 0,734 | 0,807 | 0,861 | 0,917 | 0,909 | 0,677 | 0,639 | 0,431 | 0,317        | 0,151 | 0,291 |
| 2   | 0,181 | 0,243 | 0,371 | 0,508 | 0,719 | 0,988 | 1,273 | 1,636 | 1,986 | 2,232 | 2,485 | 2,598        | 2,570 | 2,399 |
|     | 0,594 | 0,692 | 0,792 | 0,910 | 0,997 | 1,107 | 1,164 | 1,206 | 1,121 | 0,777 | 0,547 | 0,269        | 0,181 | 0,474 |
| 3   | 0,141 | 0,224 | 0,330 | 0,517 | 0,777 | 1,094 | 1,407 | 1,952 | 2,536 | 3,0   | 3,365 | 3,504        | 3,440 | 3,182 |
|     | 0,674 | 0,797 | 0,938 | 1,103 | 1,244 | 1,516 | 1,585 | 1,643 | 1,569 | 1,195 | 0,891 | 0,368        | 0,280 | 0,598 |
| 4   | 0,095 | 0,161 | 0,242 | 0,473 | 0,753 | 1,147 | 1,761 | 2,515 | 3,212 | 4,02  | 4,62  | 4,89         | 4,78  | 4,26  |
|     | 0,744 | 0,9   | 1,118 | 1,330 | 1,573 | 1,866 | 2,092 | 2,252 | 2,296 | 1,681 | 1,2   | 0,421        | 0,667 | 1,315 |
| 5   | 0,077 | 0,080 | 0,147 | 0,331 | 0,664 | 1,154 | 1,956 | 2,941 | 4,21  | 5,53  | 6,65  | 7,15         | 6,90  | 6,04  |
|     | 0,813 | 1,009 | 1,236 | 1,560 | 1,910 | 2,371 | 2,896 | 3,154 | 3,371 | 2,861 | 2,04  | 0,589        | 0,736 | 2,067 |
| 6   | 0,72  | 0,126 | 0,135 | 0,216 | 0,504 | 0,970 | 1,750 | 3,461 | 5,63  | 8,21  | 10,47 | 11,06        | 10,34 | 8,67  |
|     | 0,858 | 1,087 | 1,378 | 1,789 | 2,327 | 3,042 | 3,84  | 4,62  | 5,32  | 4,74  | 3,73  | 1,049        | 1,420 | 3,458 |
| 7   | 0,261 | 0,258 | 0,308 | 0,264 | 0,255 | 0,627 | 1,751 | 4,06  | 7,65  | 12,72 | 17,41 | 19,04        | 17,44 | 13,63 |
|     | 0,868 | 1,106 | 1,477 | 1,955 | 2,695 | 3,736 | 5,23  | 7,16  | 8,91  | 8,77  | 7,12  | 1,588        | 2,826 | 6,06  |
| 8   | 0,381 | 0,405 | 0,494 | 0,578 | 2,565 | 0,489 | 0,805 | 4,02  | 9,88  | 20,05 | 30,45 | <b>34,28</b> | 30,71 | 22,49 |
|     | 0,836 | 1,121 | 1,448 | 2,043 | 2,871 | 4,17  | 6,65  | 10,62 | 15,59 | 17,38 | 13,73 | <b>3,266</b> | 6,12  | 12,51 |
| 9   | 0,565 | 0,763 | 0,877 | 1,012 | 1,266 | 1,566 | 1,789 | 1,140 | 9,58  | 32,75 | 56,5  | 65,5         | 55,7  | 35,51 |
|     | 0,802 | 1,023 | 1,364 | 1,902 | 2,801 | 4,28  | 7,21  | 14,23 | 27,72 | 36,1  | 28,23 | 4,58         | 15,05 | 29,87 |
| 10  | 0,676 | 0,786 | 1,061 | 1,317 | 1,759 | 2,638 | 4,80  | 11,01 |       | 62,3  | 114,4 | 131,0        | 119,1 | 67,2  |
|     | 0,666 | 0,906 | 1,165 | 1,668 | 2,305 | 3,341 | 5,43  | 10,68 |       | 87,4  | 60,1  | 8,02         | 33,47 | 73,0  |
| 11  | 0,791 | 1,007 | 1,221 | 1,626 | 2,151 | 2,920 | 4,31  |       |       | 178,1 | 238,6 | <b>260,3</b> | 248,9 | 173,8 |
|     | 0,562 | 0,712 | 0,972 | 1,264 | 1,902 | 2,398 | 3,206 |       |       | 196,8 | 87,8  | 46,1         | 59,3  | 169,1 |
| 12  | 0,851 | 1,054 | 1,375 | 1,712 | 2,294 | 2,848 | 3,640 |       |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,371 | 0,477 | 0,658 | 0,861 | 1,289 | 1,760 | 2,830 |       |       |       |       |              |       |       |
| 13  | 0,917 | 1,141 | 1,432 | 1,815 | 2,365 | 3,022 | 3,907 |       |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,211 | 0,289 | 0,415 | 0,612 | 0,897 | 1,185 | 1,783 |       |       |       |       |              |       |       |
| 14  | 0,953 | 1,172 | 1,452 | 1,865 | 2,388 | 3,059 | 3,920 |       |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,180 | 0,228 | 0,335 | 0,404 | 0,588 | 0,841 | 1,165 |       |       |       |       |              |       |       |

Na základě těchto hodnot napětí a použití výše uvedených vztahů ( 4 - 1 ) až ( 4 - 5 ) získám rozložení magnetické intenzity kolem laboratorního induktoru. Vypočtené hodnoty uvádím v tabulce Tab. 4. 15

Příklad výpočtu  $H$  pro bod L8:

$$B_r = k \cdot \frac{U_r}{4,44 \cdot f} = 0,275 \cdot \frac{3,266}{4,44 \cdot 4100} = 4,937 \cdot 10^{-5} \text{ T} \quad B_a = k \cdot \frac{U_a}{4,44 \cdot f} = 0,275 \cdot \frac{34,28}{4,44 \cdot 4100} = 5,182 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

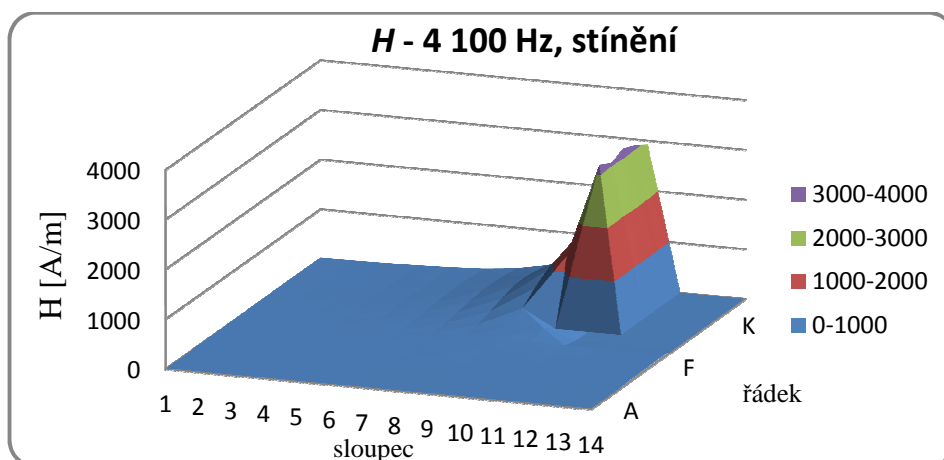
$$B = \sqrt{(4,937 \cdot 10^{-5})^2 + (5,182 \cdot 10^{-4})^2} = 5,205 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} = \frac{5,205 \cdot 10^{-4}}{1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 414,226 \text{ A/m}$$

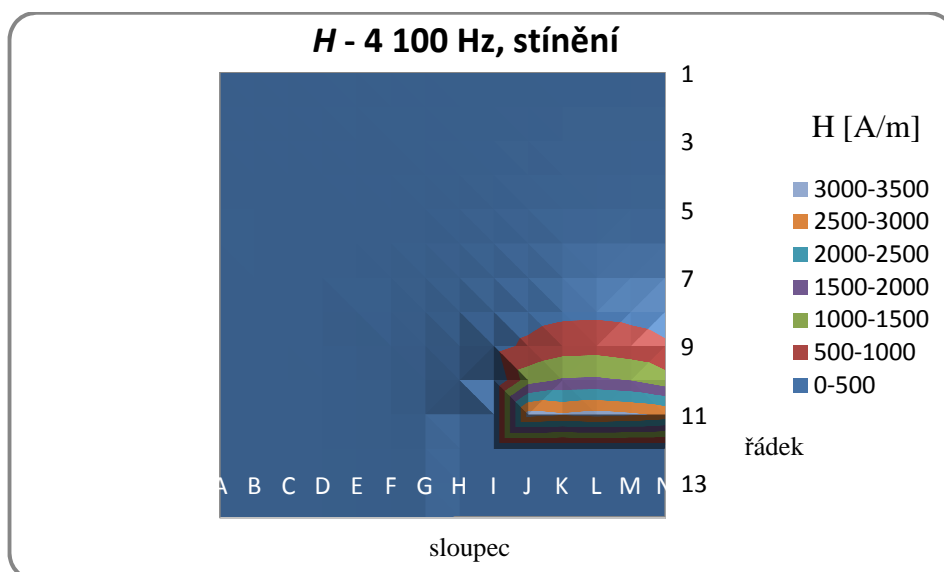
Tab. 4. 15 Magnetická intenzita magnetického pole induktoru

| H [A/m] | A      | B      | C      | D      | E      | F      | G      | H       | I       | J               | K        | L              | M        | N        |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|-----------------|----------|----------------|----------|----------|
| 1       | 6,963  | 7,928  | 9,387  | 10,969 | 12,579 | 14,630 | 17,440 | 19,498  | 20,744  | 22,863          | 23,647   | 24,014         | 23,599   | 22,456   |
| 2       | 7,470  | 8,822  | 10,521 | 12,537 | 14,786 | 17,849 | 20,750 | 24,449  | 27,433  | 28,429          | 30,608   | 31,419         | 30,991   | 29,416   |
| 3       | 8,283  | 9,959  | 11,961 | 14,653 | 17,643 | 22,489 | 25,495 | 30,691  | 35,872  | 38,845          | 41,873   | 42,382         | 41,517   | 38,947   |
| 4       | 9,022  | 10,998 | 13,760 | 16,980 | 20,978 | 26,348 | 32,894 | 40,609  | 47,494  | 52,415          | 57,419   | 59,040         | 58,056   | 53,630   |
| 5       | 9,823  | 12,175 | 14,973 | 19,183 | 24,324 | 31,720 | 42,038 | 51,875  | 64,877  | 74,896          | 83,673   | 86,300         | 83,472   | 76,793   |
| 6       | 13,473 | 13,163 | 16,655 | 21,676 | 28,641 | 38,408 | 50,762 | 69,439  | 93,177  | 114,037         | 133,699  | 133,639        | 125,549  | 112,282  |
| 7       | 10,903 | 13,661 | 18,149 | 23,730 | 32,563 | 45,569 | 66,345 | 99,012  | 141,264 | 185,853         | 226,263  | 229,830        | 212,524  | 179,432  |
| 8       | 11,051 | 14,338 | 18,404 | 25,540 | 46,311 | 50,505 | 80,578 | 136,595 | 222,022 | 319,184         | 401,801  | <b>414,226</b> | 376,678  | 309,572  |
| 9       | 11,801 | 15,352 | 19,507 | 25,916 | 36,975 | 54,823 | 89,360 | 171,723 | 352,799 | 586,322         | 759,759  | 789,831        | 694,049  | 558,179  |
| 10      | 11,415 | 14,428 | 18,955 | 25,565 | 34,878 | 51,207 | 87,180 | 184,514 | 0,000   | 1291,104        | 1554,476 | 1578,765       | 1488,166 | 1193,544 |
| 11      | 11,672 | 14,835 | 18,773 | 24,774 | 34,539 | 45,452 | 64,616 | 0,000   | 0,000   | <b>3192,817</b> | 3058,303 | 3179,907       | 3077,850 | 2916,938 |
| 12      | 11,167 | 13,917 | 18,336 | 23,052 | 31,653 | 40,273 | 55,463 | 0,000   | 0,000   | 0,000           | 0,000    | 0,000          | 0,000    | 0,000    |
| 13      | 11,319 | 14,159 | 17,934 | 23,041 | 30,426 | 39,047 | 51,660 | 0,000   | 0,000   | 0,000           | 0,000    | 0,000          | 0,000    | 0,000    |
| 14      | 11,666 | 14,362 | 17,925 | 22,955 | 29,584 | 38,162 | 49,193 | 0,000   | 0,000   | 0,000           | 0,000    | 0,000          | 0,000    | 0,000    |

## Induktor se svazky transformátorových plechů - grafické rozložení $H$ kolem induktoru



Obr. 4. 12 Grafické rozložení magnetického pole



Obr. 4. 13 Grafické rozložení magnetického pole

V obrázcích Obr. 4.10 až 4.13 vidíme názorně vliv stínění na velikost intenzity magnetického pole vně induktoru. Stínění se nachází na úrovni sloupce H a vidíme, že pole nalevo od tohoto sloupce je odstíněné. Maximální hodnota  $H$  u nestíněného induktoru činí 3396,688 A/m, u stíněného 3192,817 A/m. Obě tyto hodnoty byly naměřeny v ose induktoru (přesněji v bodech L11/J11). Vně induktoru v bodě D11 byly naměřeny tyto hodnoty  $H$ :

- nestíněný induktor: 205,653 A/m
- stíněný induktor: 24,774 A/m

## 4.2.2 Velikost proudu 31 A

Na napájecím zdroji jsem nastavil napájecí proud 31 A modelu indukční kelímkové pece (laboratorní induktor)

### Induktor bez stínění - naměřené a vypočítané hodnoty

Tab. 4. 16 Naměřené hodnoty naindukovaného napětí kolem induktoru

| [V] | A     | B     | C     | D     | E     | F     | G     | H     | I     | J     | K     | L            | M     | N     |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| 1   | 0,108 | 0,145 | 0,205 | 0,226 | 0,281 | 0,288 | 0,381 | 0,392 | 0,426 | 0,517 | 0,465 | 0,483        | 0,475 | 0,486 |
|     | 0,212 | 0,215 | 0,237 | 0,241 | 0,252 | 0,252 | 0,213 | 0,387 | 0,239 | 0,282 | 0,138 | 0,104        | 0,116 | 0,17  |
| 2   | 0,114 | 0,145 | 0,201 | 0,236 | 0,305 | 0,366 | 0,422 | 0,471 | 0,518 | 0,597 | 0,592 | 0,602        | 0,651 | 0,592 |
|     | 0,244 | 0,162 | 0,282 | 0,282 | 0,318 | 0,305 | 0,275 | 0,422 | 0,494 | 0,333 | 0,154 | 0,132        | 0,104 | 0,214 |
| 3   | 0,125 | 0,151 | 0,205 | 0,244 | 0,362 | 0,411 | 0,497 | 0,556 | 0,622 | 0,722 | 0,773 | 0,761        | 0,798 | 0,731 |
|     | 0,246 | 0,311 | 0,328 | 0,352 | 0,422 | 0,408 | 0,384 | 0,457 | 0,337 | 0,347 | 0,153 | 0,123        | 0,119 | 0,236 |
| 4   | 0,083 | 0,143 | 0,217 | 0,282 | 0,376 | 0,486 | 0,569 | 0,694 | 0,807 | 0,892 | 1,046 | 1,037        | 1,024 | 0,907 |
|     | 0,285 | 0,357 | 0,393 | 0,426 | 0,502 | 0,502 | 0,492 | 0,515 | 0,441 | 0,722 | 0,208 | 0,142        | 0,152 | 0,332 |
| 5   | 0,078 | 0,138 | 0,225 | 0,269 | 0,379 | 0,513 | 0,685 | 0,869 | 1,062 | 1,222 | 1,376 | 1,389        | 1,386 | 1,202 |
|     | 0,311 | 0,401 | 0,459 | 0,502 | 0,589 | 0,637 | 0,688 | 0,705 | 0,717 | 0,547 | 0,306 | 0,171        | 1,254 | 0,429 |
| 6   | 0,049 | 0,105 | 0,231 | 0,283 | 0,371 | 0,585 | 0,809 | 1,092 | 1,366 | 1,545 | 1,829 | 1,922        | 1,912 | 1,646 |
|     | 0,355 | 0,456 | 0,551 | 0,618 | 0,744 | 0,864 | 0,912 | 0,912 | 0,828 | 0,743 | 0,388 | 0,202        | 0,354 | 0,607 |
| 7   | 0,04  | 0,046 | 0,194 | 0,206 | 0,399 | 0,624 | 0,942 | 1,371 | 1,804 | 2,125 | 2,664 | 2,804        | 2,626 | 2,335 |
|     | 0,402 | 0,511 | 0,625 | 0,749 | 0,929 | 1,052 | 1,251 | 1,269 | 1,212 | 1,052 | 0,702 | 0,199        | 0,502 | 0,709 |
| 8   | 0,051 | 0,049 | 0,177 | 0,122 | 0,359 | 0,576 | 1,022 | 1,556 | 2,357 | 3,071 | 3,892 | <b>4,19</b>  | 3,934 | 3,292 |
|     | 0,424 | 0,574 | 0,705 | 0,874 | 1,112 | 1,397 | 1,699 | 1,911 | 1,893 | 1,691 | 0,854 | <b>0,191</b> | 0,755 | 1,43  |
| 9   | 0,106 | 0,062 | 0,183 | 0,042 | 0,176 | 0,478 | 0,942 | 1,714 | 3,097 | 4,46  | 6,01  | 6,85         | 6,01  | 5,19  |
|     | 0,441 | 0,609 | 0,77  | 0,97  | 1,313 | 1,717 | 2,246 | 2,814 | 2,924 | 2,851 | 1,822 | 0,176        | 1,14  | 2,692 |
| 10  | 0,195 | 0,172 | 0,259 | 0,151 | 0,109 | 0,187 | 0,692 | 1,514 |       | 7,2   | 9,37  | 10,77        | 9,72  | 7,7   |
|     | 0,438 | 0,621 | 0,81  | 1,026 | 1,448 | 2,062 | 2,866 | 4,04  |       | 5,89  | 2,913 | 0,403        | 1,822 | 4,84  |
| 11  | 0,285 | 0,301 | 0,373 | 0,387 | 0,402 | 0,357 | 0,222 | 0,211 |       | 14,27 | 15,47 | <b>17,47</b> | 15,88 | 14,39 |
|     | 0,41  | 0,561 | 0,804 | 1,072 | 1,512 | 2,288 | 3,507 | 5,74  |       | 9,03  | 5,14  | 0,214        | 3,236 | 8,15  |
| 12  | 0,335 | 0,42  | 0,532 | 0,616 | 0,809 | 1,03  | 1,696 | 2,577 |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,347 | 0,491 | 0,729 | 0,989 | 1,431 | 2,181 | 3,437 | 6,19  |       |       |       |              |       |       |
| 13  | 0,424 | 0,544 | 0,652 | 0,847 | 1,131 | 1,529 | 2,551 | 3,75  |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,28  | 0,381 | 0,626 | 0,776 | 1,221 | 1,809 | 2,691 | 4,07  |       |       |       |              |       |       |
| 14  | 0,483 | 0,601 | 0,74  | 1,027 | 1,371 | 1,954 | 2,915 | 3,96  |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,181 | 0,247 | 0,475 | 0,526 | 0,765 | 1,051 | 1,546 | 2,565 |       |       |       |              |       |       |

Na základě těchto hodnot napětí a použití výše uvedených vztahů ( 4 - 1 ) až ( 4 - 5 ) získám rozložení magnetické intenzity kolem laboratorního induktoru. Vypočtené hodnoty uvádím v tabulce Tab. 4. 17

Konstanta křížové cívky je stejná jako v případě napájecího proudu 15 A.

$$k = \frac{1}{N \cdot A} = \frac{1}{310 \cdot 6,817 \cdot 10^{-4}} = 4,732 \text{ m}^{-2}$$



Příklad výpočtu  $H$  pro bod L8:

$$B_r = k \cdot \frac{U_r}{4,44 \cdot f} = 4,732 \cdot \frac{0,191}{4,44 \cdot 4100} = 4,965 \cdot 10^{-5} \text{ T} \quad B_a = k \cdot \frac{U_a}{4,44 \cdot f} = 4,732 \cdot \frac{4,19}{4,44 \cdot 4100} = 1,089 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

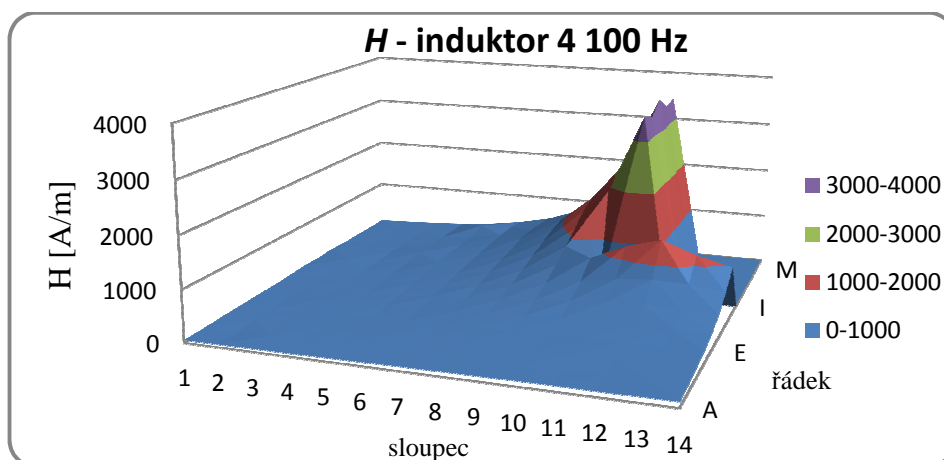
$$B = \sqrt{(4,965 \cdot 10^{-5})^2 + (1,089 \cdot 10^{-3})^2} = 1,090 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} = \frac{1,090 \cdot 10^{-3}}{1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 867,594 \text{ A/m}$$

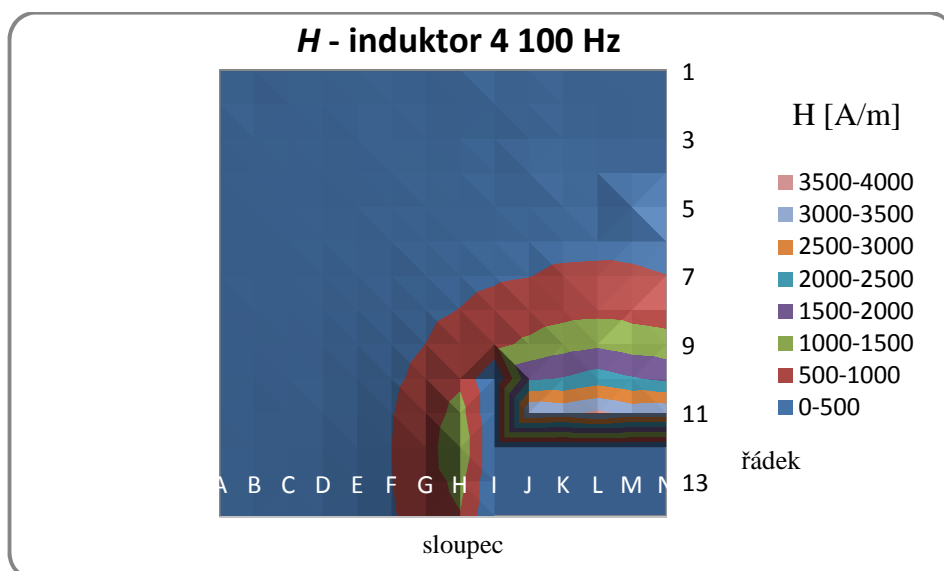
Tab. 4. 17 Magnetická intenzita magnetického pole induktoru

| H [A/m] | A       | B       | C       | D       | E       | F       | G       | H        | I       | J        | K        | L               | M        | N        |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|----------|----------|-----------------|----------|----------|
| 1       | 49,214  | 53,641  | 64,818  | 68,340  | 78,074  | 79,158  | 90,289  | 113,942  | 101,038 | 121,815  | 100,331  | 102,198         | 101,140  | 106,501  |
| 2       | 55,708  | 44,972  | 71,632  | 76,063  | 91,142  | 98,548  | 104,189 | 130,810  | 148,061 | 141,400  | 126,530  | 127,481         | 136,366  | 130,209  |
| 3       | 57,077  | 71,512  | 80,008  | 88,593  | 115,006 | 119,791 | 129,914 | 148,871  | 146,330 | 165,697  | 162,996  | 159,454         | 166,890  | 158,891  |
| 4       | 61,401  | 79,549  | 92,860  | 105,675 | 129,735 | 144,528 | 155,594 | 178,761  | 190,225 | 237,376  | 220,600  | 216,503         | 214,133  | 199,785  |
| 5       | 66,322  | 87,721  | 105,737 | 117,806 | 144,877 | 169,178 | 200,821 | 231,466  | 265,051 | 276,937  | 291,576  | 289,481         | 386,619  | 263,993  |
| 6       | 74,127  | 96,791  | 123,584 | 140,598 | 171,968 | 215,829 | 252,171 | 294,293  | 330,410 | 354,615  | 386,745  | 399,752         | 402,215  | 362,886  |
| 7       | 83,564  | 106,127 | 135,365 | 160,682 | 209,136 | 253,005 | 323,925 | 386,425  | 449,550 | 490,467  | 569,855  | 581,462         | 553,020  | 504,765  |
| 8       | 88,336  | 119,163 | 150,354 | 182,538 | 241,705 | 312,566 | 410,117 | 509,748  | 625,315 | 725,166  | 824,206  | <b>867,594</b>  | 828,592  | 742,414  |
| 9       | 93,818  | 126,622 | 163,710 | 200,831 | 274,021 | 368,665 | 503,788 | 681,545  | 881,018 | 1094,925 | 1299,030 | 1417,379        | 1265,325 | 1209,364 |
| 10      | 99,173  | 133,289 | 175,904 | 214,512 | 300,364 | 428,272 | 609,863 | 892,420  | 0,000   | 1924,158 | 2029,671 | 2229,316        | 2045,583 | 1881,247 |
| 11      | 103,284 | 131,690 | 183,332 | 235,748 | 323,620 | 478,995 | 726,869 | 1188,111 | 0,000   | 3493,066 | 3371,948 | <b>3613,911</b> | 3352,258 | 3420,790 |
| 12      | 99,767  | 133,650 | 186,676 | 241,010 | 340,028 | 498,915 | 792,782 | 1386,918 | 0,000   | 0,000    | 0,000    | 0,000           | 0,000    | 0,000    |
| 13      | 105,102 | 137,379 | 186,964 | 237,613 | 344,264 | 489,943 | 766,989 | 1144,741 | 0,000   | 0,000    | 0,000    | 0,000           | 0,000    | 0,000    |
| 14      | 106,692 | 134,405 | 181,888 | 238,675 | 324,750 | 458,938 | 682,516 | 975,939  | 0,000   | 0,000    | 0,000    | 0,000           | 0,000    | 0,000    |

### Induktor bez stínění - grafické znázornění rozložení $H$ kolem induktoru



Obr. 4. 14 Grafické rozložení intenzity magnetického pole



Obr. 4. 15 Grafické rozložení intenzity magnetického pole

### Induktor se svazky transformátorových plechů - naměřené a vypočítané hodnoty

Tab. 4. 18 Naměřené hodnoty naindukovaného napětí kolem induktoru

| [V] | A     | B     | C     | D     | E     | F     | G     | H     | I     | J     | K     | L            | M     | N     |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| 1   | 0,023 | 0,018 | 0,032 | 0,098 | 0,079 | 0,142 | 0,067 | 0,114 | 0,134 | 0,128 | 0,156 | 0,371        | 0,55  | 0,099 |
|     | 0,026 | 0,026 | 0,03  | 0,107 | 0,094 | 0,114 | 0,052 | 0,052 | 0,047 | 0,081 | 0,069 | 0,281        | 0,401 | 0,047 |
| 2   | 0,022 | 0,022 | 0,029 | 0,112 | 0,116 | 0,137 | 0,088 | 0,118 | 0,146 | 0,183 | 0,185 | 0,367        | 0,484 | 0,142 |
|     | 0,029 | 0,035 | 0,044 | 0,126 | 0,124 | 0,139 | 0,062 | 0,088 | 0,082 | 0,104 | 0,084 | 0,297        | 0,421 | 0,081 |
| 3   | 0,024 | 0,016 | 0,023 | 0,138 | 0,128 | 0,168 | 0,117 | 0,159 | 0,177 | 0,228 | 0,238 | 0,422        | 0,502 | 0,212 |
|     | 0,042 | 0,037 | 0,049 | 0,139 | 0,134 | 0,165 | 0,096 | 0,112 | 0,102 | 0,102 | 0,087 | 0,311        | 0,416 | 0,104 |
| 4   | 0,041 | 0,027 | 0,031 | 0,139 | 0,136 | 0,183 | 0,115 | 0,194 | 0,228 | 0,276 | 0,305 | 0,498        | 0,538 | 0,299 |
|     | 0,051 | 0,048 | 0,058 | 0,154 | 0,148 | 0,172 | 0,126 | 0,159 | 0,141 | 0,131 | 0,095 | 0,255        | 0,403 | 0,232 |
| 5   | 0,048 | 0,033 | 0,044 | 0,139 | 0,127 | 0,184 | 0,133 | 0,227 | 0,293 | 0,377 | 0,445 | 0,556        | 0,577 | 0,387 |
|     | 0,057 | 0,059 | 0,077 | 0,159 | 0,172 | 0,205 | 0,187 | 0,184 | 0,211 | 0,197 | 0,176 | 0,306        | 0,346 | 0,202 |
| 6   | 0,051 | 0,036 | 0,046 | 0,131 | 0,119 | 0,177 | 0,149 | 0,244 | 0,377 | 0,538 | 0,666 | 0,729        | 0,722 | 0,535 |
|     | 0,061 | 0,069 | 0,092 | 0,181 | 0,199 | 0,242 | 0,245 | 0,299 | 0,329 | 0,306 | 0,275 | 0,452        | 0,467 | 0,288 |
| 7   | 0,054 | 0,038 | 0,048 | 0,13  | 0,109 | 0,174 | 0,129 | 0,244 | 0,482 | 0,774 | 1,04  | 1,11         | 1,022 | 0,795 |
|     | 0,059 | 0,077 | 0,108 | 0,188 | 0,225 | 0,291 | 0,338 | 0,435 | 0,541 | 0,527 | 0,379 | 0,402        | 0,517 | 0,485 |
| 8   | 0,062 | 0,044 | 0,021 | 0,129 | 0,107 | 0,164 | 0,117 | 0,221 | 0,524 | 1,08  | 1,729 | <b>2,115</b> | 1,857 | 1,171 |
|     | 0,073 | 0,082 | 0,105 | 0,2   | 0,247 | 0,329 | 0,428 | 0,654 | 0,919 | 1,029 | 0,777 | <b>0,431</b> | 0,679 | 0,955 |
| 9   | 0,061 | 0,051 | 0,038 | 0,129 | 0,114 | 0,141 | 0,154 | 0,224 | 0,446 | 1,731 | 3,219 | 3,827        | 3,436 | 2,109 |
|     | 0,069 | 0,084 | 0,108 | 0,208 | 0,251 | 0,341 | 0,483 | 0,862 | 1,672 | 2,033 | 1,547 | 0,287        | 1,342 | 2,164 |
| 10  | 0,064 | 0,056 | 0,052 | 0,144 | 0,143 | 0,144 | 0,264 | 0,853 |       | 4,15  | 6,79  | 7,74         | 6,67  | 4,62  |
|     | 0,068 | 0,077 | 0,102 | 0,196 | 0,248 | 0,318 | 0,427 | 0,587 |       | 4,65  | 2,958 | 0,452        | 2,649 | 4,71  |
| 11  | 0,048 | 0,059 | 0,066 | 0,15  | 0,171 | 0,174 | 0,243 |       |       | 10,62 | 13,6  | <b>15,57</b> | 14,47 | 11,5  |
|     | 0,034 | 0,069 | 0,093 | 0,178 | 0,22  | 0,308 | 0,371 |       |       | 10,12 | 7,29  | 0,717        | 4,66  | 10,81 |
| 12  | 0,052 | 0,064 | 0,077 | 0,154 | 0,192 | 0,242 | 0,251 |       |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,03  | 0,055 | 0,078 | 0,141 | 0,204 | 0,284 | 0,35  |       |       |       |       |              |       |       |
| 13  | 0,062 | 0,067 | 0,095 | 0,172 | 0,211 | 0,281 | 0,305 |       |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,017 | 0,044 | 0,071 | 0,122 | 0,172 | 0,237 | 0,297 |       |       |       |       |              |       |       |
| 14  | 0,065 | 0,072 | 0,105 | 0,171 | 0,218 | 0,295 | 0,346 |       |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,022 | 0,031 | 0,051 | 0,084 | 0,12  | 0,155 | 0,195 |       |       |       |       |              |       |       |

Vypočtené hodnoty intenzity magnetického pole kolem induktoru uvádím v tabulce Tab. 4. 19

Příklad výpočtu  $H$  pro bod L8:

$$B_r = k \cdot \frac{U_r}{4,44 \cdot f} = 4,732 \cdot \frac{0,431}{4,44 \cdot 4100} = 1,120 \cdot 10^{-4} \text{ T} \quad B_a = k \cdot \frac{U_a}{4,44 \cdot f} = 4,732 \cdot \frac{2,115}{4,44 \cdot 4100} = 5,498 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

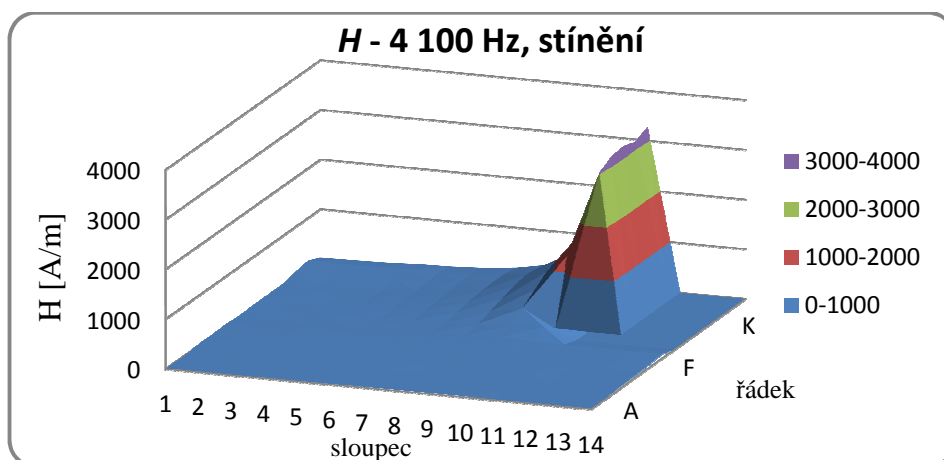
$$B = \sqrt{(1,120 \cdot 10^{-4})^2 + (5,498 \cdot 10^{-4})^2} = 5,611 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} = \frac{5,611 \cdot 10^{-4}}{1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 446,476 \text{ A/m}$$

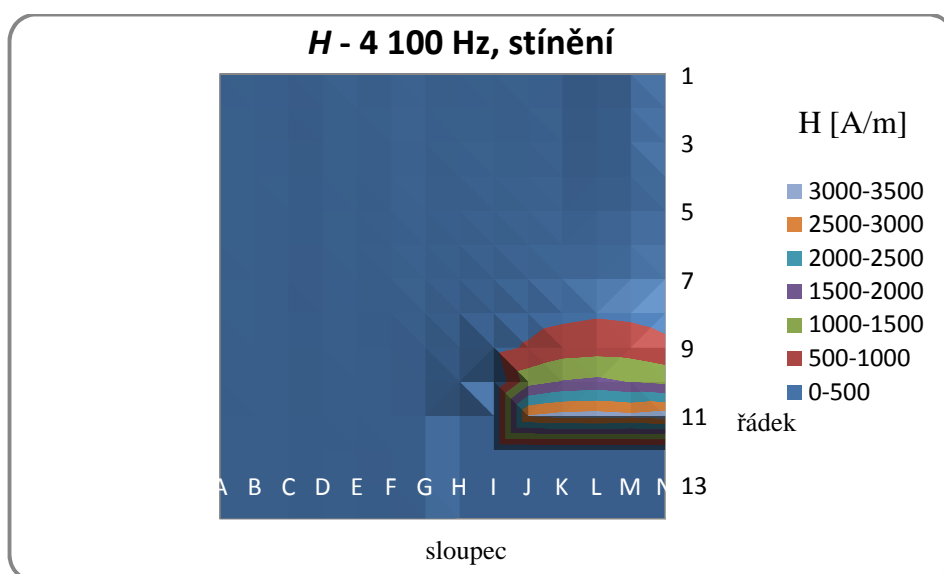
Tab. 4. 19 Magnetická intenzita magnetického pole induktoru

| H [A/m] | A      | B      | C      | D      | E      | F      | G       | H       | I       | J        | K        | L              | M        | N               |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|----------|----------|----------------|----------|-----------------|
| 1       | 7,180  | 6,541  | 9,073  | 30,013 | 25,399 | 37,667 | 17,543  | 25,918  | 29,373  | 31,333   | 35,284   | 96,268         | 140,794  | 22,669          |
| 2       | 7,529  | 8,551  | 10,900 | 34,871 | 35,123 | 40,370 | 22,267  | 30,448  | 34,637  | 43,539   | 42,027   | 97,657         | 132,689  | 33,815          |
| 3       | 10,006 | 8,338  | 11,197 | 40,515 | 38,331 | 48,708 | 31,305  | 40,229  | 42,256  | 51,666   | 52,416   | 108,434        | 134,858  | 48,844          |
| 4       | 13,536 | 11,392 | 13,603 | 42,911 | 41,576 | 51,949 | 35,286  | 51,884  | 55,451  | 63,194   | 66,078   | 115,730        | 139,043  | 78,282          |
| 5       | 15,414 | 13,983 | 18,344 | 43,685 | 44,225 | 56,979 | 47,466  | 60,443  | 74,686  | 87,987   | 98,985   | 131,275        | 139,165  | 90,299          |
| 6       | 16,447 | 16,098 | 21,276 | 46,217 | 47,961 | 62,018 | 59,314  | 79,828  | 103,501 | 128,026  | 149,043  | 177,425        | 177,862  | 125,680         |
| 7       | 16,544 | 17,761 | 24,447 | 47,279 | 51,715 | 70,133 | 74,834  | 103,168 | 149,877 | 193,688  | 228,962  | 244,195        | 236,909  | 192,630         |
| 8       | 19,811 | 19,249 | 22,149 | 49,229 | 55,679 | 76,039 | 91,779  | 142,794 | 218,823 | 308,561  | 392,095  | <b>446,476</b> | 408,989  | 312,558         |
| 9       | 19,050 | 20,327 | 23,682 | 50,627 | 57,023 | 76,327 | 104,863 | 184,225 | 357,943 | 552,306  | 738,746  | 793,831        | 763,017  | 625,037         |
| 10      | 19,316 | 19,694 | 23,682 | 50,308 | 59,215 | 72,208 | 103,842 | 214,183 | 0,000   | 1289,198 | 1531,989 | 1603,734       | 1484,504 | 1364,705        |
| 11      | 12,167 | 18,779 | 23,589 | 48,149 | 57,636 | 73,173 | 91,737  | 0,000   | 0,000   | 3034,394 | 3191,798 | 3224,041       | 3144,479 | <b>3264,707</b> |
| 12      | 12,418 | 17,455 | 22,671 | 43,190 | 57,947 | 77,180 | 89,089  | 0,000   | 0,000   | 0,000    | 0,000    | 0,000          | 0,000    | 0,000           |
| 13      | 13,298 | 16,580 | 24,532 | 43,619 | 56,309 | 76,038 | 88,059  | 0,000   | 0,000   | 0,000    | 0,000    | 0,000          | 0,000    | 0,000           |
| 14      | 14,194 | 16,215 | 24,145 | 39,408 | 51,473 | 68,930 | 82,153  | 0,000   | 0,000   | 0,000    | 0,000    | 0,000          | 0,000    | 0,000           |

## Induktor se svazky transformátorových plechů - grafické rozložení $H$ kolem induktoru



Obr. 4. 16 Grafické rozložení intenzity magnetického pole



Obr. 4. 17 Grafické rozložení intenzity magnetického pole

V obrázcích Obr. 4.14 až 4.17 vidíme názorně vliv stínění na velikost intenzity magnetického pole vně induktoru. Stínění se nachází na úrovni sloupce H a vidíme, že pole nalevo od tohoto sloupce je odstíněné. Maximální hodnota  $H$  u nestíněného induktoru činí 3613,911 A/m, u stíněného 3264,707 A/m. Obě tyto hodnoty byly naměřeny v ose induktoru (přesněji v bodech L11/N11). Vně induktoru v bodě D11 byly naměřeny tyto hodnoty  $H$ :

- nestíněný induktor: 235,748 A/m
- stíněný induktor: 48,149 A/m

### 4.3 Měření na laboratorním modelu při kmitočtu 10 000 Hz

#### 4.3.1 Velikost proudu 15 A

Na napájecím zdroji jsem nastavil velikost proudu na hodnotu 15 A.

#### Induktor bez stínění - naměřené a vypočítané hodnoty

Tab. 4. 20 Naměřené hodnoty naindukovaného napětí kolem induktoru

| [V] | A     | B     | C     | D     | E     | F     | G     | H     | I     | J     | K     | L            | M            | N     |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|--------------|-------|
| 1   | 0,041 | 0,457 | 0,242 | 0,081 | 0,102 | 0,145 | 0,197 | 0,256 | 0,328 | 0,349 | 0,369 | 0,386        | 0,542        | 0,51  |
|     | 0,384 | 0,318 | 0,239 | 0,524 | 0,517 | 0,525 | 0,529 | 0,529 | 0,486 | 0,42  | 0,412 | 0,337        | 0,229        | 0,081 |
| 2   | 0,045 | 0,385 | 0,329 | 0,09  | 0,144 | 0,206 | 0,276 | 0,338 | 0,585 | 0,488 | 0,499 | 0,523        | 0,689        | 0,674 |
|     | 0,124 | 0,305 | 0,442 | 0,562 | 0,598 | 0,622 | 0,296 | 0,586 | 0,494 | 0,471 | 0,465 | 0,387        | 0,238        | 0,133 |
| 3   | 0,044 | 0,344 | 0,336 | 0,096 | 0,174 | 0,276 | 0,366 | 0,459 | 0,616 | 0,662 | 0,697 | 0,697        | 0,867        | 0,82  |
|     | 0,169 | 0,338 | 0,481 | 0,631 | 0,671 | 0,687 | 0,686 | 0,667 | 0,622 | 0,546 | 0,494 | 0,402        | 0,242        | 0,194 |
| 4   | 0,051 | 0,339 | 0,302 | 0,108 | 0,216 | 0,357 | 0,469 | 0,637 | 0,796 | 0,965 | 1,015 | 1,031        | 1,121        | 1,102 |
|     | 0,224 | 0,374 | 0,559 | 0,711 | 0,78  | 0,792 | 0,842 | 0,818 | 0,729 | 0,627 | 0,552 | 0,414        | 0,304        | 0,311 |
| 5   | 0,063 | 0,338 | 0,272 | 0,117 | 0,246 | 0,441 | 0,598 | 0,828 | 1,097 | 1,381 | 1,429 | 1,514        | 1,551        | 1,461 |
|     | 0,271 | 0,449 | 0,629 | 0,833 | 0,907 | 0,976 | 1,015 | 1,018 | 0,972 | 0,806 | 0,594 | 0,394        | 0,308        | 0,508 |
| 6   | 0,091 | 0,122 | 0,248 | 0,106 | 0,299 | 0,483 | 0,692 | 1,031 | 1,517 | 1,851 | 2,097 | 2,142        | 2,124        | 1,925 |
|     | 0,319 | 0,522 | 0,715 | 0,961 | 1,069 | 1,194 | 1,299 | 1,34  | 1,312 | 1,011 | 0,802 | 0,452        | 0,381        | 0,671 |
| 7   | 0,147 | 0,081 | 0,196 | 0,065 | 0,256 | 0,513 | 0,878 | 1,324 | 1,911 | 2,663 | 3,116 | 3,301        | 3,224        | 2,785 |
|     | 0,365 | 0,579 | 0,812 | 1,099 | 1,278 | 1,482 | 1,728 | 1,793 | 1,869 | 1,356 | 1,056 | 0,424        | 0,519        | 1,061 |
| 8   | 0,213 | 0,103 | 0,129 | 0,091 | 0,167 | 0,461 | 0,961 | 1,705 | 2,75  | 3,72  | 4,41  | <b>4,77</b>  | 5,16         | 3,748 |
|     | 0,402 | 0,616 | 0,906 | 1,257 | 1,556 | 1,827 | 2,239 | 2,485 | 2,685 | 2,195 | 1,316 | <b>0,436</b> | 0,887        | 1,867 |
| 9   | 0,276 | 0,106 | 0,117 | 0,229 | 0,114 | 0,271 | 0,959 | 1,944 | 3,69  | 5,56  | 6,84  | 8,02         | 7,94         | 6,28  |
|     | 0,672 | 0,625 | 0,981 | 1,398 | 1,791 | 2,292 | 3,043 | 3,577 | 4,47  | 3,732 | 2,037 | 0,323        | 1,646        | 3,108 |
| 10  | 0,369 | 0,236 | 0,213 | 0,477 | 0,328 | 0,203 | 0,428 | 1,958 |       | 8,51  | 11,24 | 12,51        | 12,51        | 9,96  |
|     | 0,708 | 0,641 | 1,064 | 1,462 | 2,024 | 2,696 | 3,834 | 5,54  |       | 7,32  | 3,237 | 0,297        | 2,552        | 5,46  |
| 11  | 0,505 | 0,361 | 0,406 | 0,777 | 0,761 | 0,907 | 0,603 | 0,299 |       | 16,81 | 19,06 | 19,64        | <b>20,72</b> | 16,37 |
|     | 0,693 | 0,617 | 1,072 | 1,476 | 2,074 | 2,856 | 5,31  | 7,94  |       | 12,36 | 7,81  | 2,129        | 3,331        | 10,46 |
| 12  | 0,594 | 0,456 | 0,608 | 1,037 | 1,205 | 1,653 | 2,137 | 3,384 |       |       |       |              |              |       |
|     | 0,629 | 0,784 | 0,945 | 1,336 | 1,971 | 2,805 | 5,22  | 8,09  |       |       |       |              |              |       |
| 13  | 0,677 | 0,589 | 0,784 | 1,271 | 1,588 | 2,216 | 3,185 | 5,51  |       |       |       |              |              |       |
|     | 0,544 | 0,626 | 0,77  | 1,125 | 1,687 | 2,351 | 3,567 | 5,57  |       |       |       |              |              |       |
| 14  | 0,737 | 0,675 | 0,915 | 1,465 | 1,881 | 2,599 | 4,05  | 5,92  |       |       |       |              |              |       |
|     | 0,356 | 0,455 | 0,526 | 0,769 | 1,182 | 1,541 | 2,266 | 3,289 |       |       |       |              |              |       |

Na základě těchto hodnot napětí a použití výše uvedených vztahů ( 4 - 1 ) až ( 4 - 5 ) získám rozložení magnetické intenzity kolem laboratorního induktoru. Vypočtené hodnoty uvádím v tabulce Tab. 4. 21

$$\text{Konstanta křížové měřicí cívky} \quad k = \frac{1}{N \cdot A} = \frac{1}{310 \cdot 6,817 \cdot 10^{-4}} = 4,732 \text{ m}^{-2}$$

$$A = \frac{\pi}{12} \cdot \frac{d_2^3 - d_1^3}{d_2 - d_1} = \frac{\pi}{12} \cdot \frac{0,038^3 - 0,02^3}{0,038 - 0,02} = 6,817 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Příklad výpočtu  $H$  pro bod L8:

$$B_r = k \cdot \frac{U_r}{4,44 \cdot f} = 4,732 \cdot \frac{0,436}{4,44 \cdot 10000} = 4,647 \cdot 10^{-5} \text{ T} \quad B_a = k \cdot \frac{U_a}{4,44 \cdot f} = 4,732 \cdot \frac{4,77}{4,44 \cdot 4100} = 5,084 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

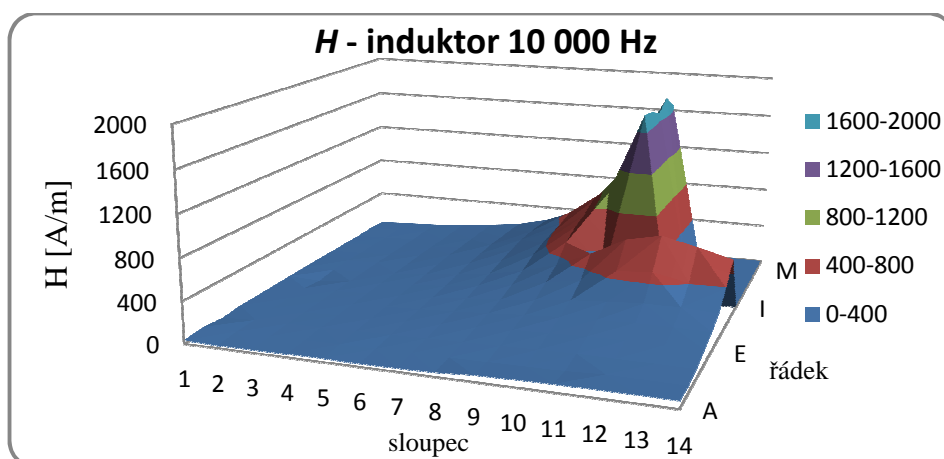
$$B = \sqrt{(4,647 \cdot 10^{-5})^2 + (5,084 \cdot 10^{-4})^2} = 5,105 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} = \frac{5,105 \cdot 10^{-4}}{1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 406,22 \text{ A/m}$$

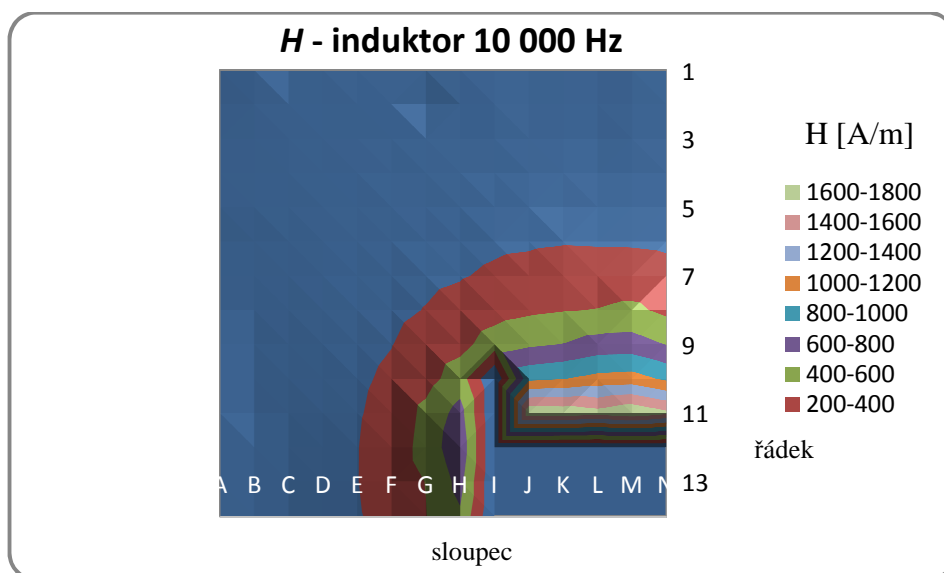
Tab. 4. 21 Magnetická intenzita magnetického pole induktoru

| H [A/m] | A      | B      | C      | D       | E       | F       | G       | H       | I       | J        | K        | L              | M               | N        |
|---------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------------|-----------------|----------|
| 1       | 32,751 | 47,217 | 28,845 | 44,967  | 44,691  | 46,191  | 47,873  | 49,841  | 49,725  | 46,312   | 46,906   | 43,456         | 49,900          | 43,794   |
| 2       | 11,187 | 41,655 | 46,729 | 48,269  | 52,165  | 55,568  | 34,323  | 57,372  | 64,935  | 57,519   | 57,845   | 55,177         | 61,820          | 58,263   |
| 3       | 14,810 | 40,900 | 49,760 | 54,130  | 58,788  | 62,789  | 65,941  | 68,667  | 74,241  | 72,775   | 72,452   | 68,238         | 76,339          | 71,462   |
| 4       | 19,483 | 42,809 | 53,884 | 60,990  | 68,640  | 73,676  | 81,738  | 87,926  | 91,540  | 97,597   | 97,986   | 94,223         | 98,503          | 97,109   |
| 5       | 23,596 | 47,662 | 58,118 | 71,338  | 79,700  | 90,830  | 99,909  | 111,286 | 124,300 | 135,608  | 131,243  | 132,676        | 134,105         | 131,181  |
| 6       | 28,133 | 45,463 | 64,182 | 81,995  | 94,139  | 109,232 | 124,822 | 143,387 | 170,095 | 178,869  | 190,405  | 185,659        | 183,007         | 172,889  |
| 7       | 33,371 | 49,582 | 70,842 | 93,367  | 110,537 | 133,002 | 164,380 | 189,025 | 226,694 | 253,436  | 279,024  | 282,251        | 276,941         | 252,749  |
| 8       | 38,583 | 52,967 | 77,611 | 106,882 | 132,719 | 159,800 | 206,636 | 255,583 | 325,950 | 366,311  | 390,300  | <b>406,220</b> | 444,027         | 355,113  |
| 9       | 61,610 | 53,762 | 83,786 | 120,141 | 152,198 | 195,734 | 270,583 | 345,263 | 491,571 | 567,905  | 605,263  | 680,710        | 687,691         | 594,248  |
| 10      | 67,710 | 57,929 | 92,026 | 130,421 | 173,890 | 229,289 | 327,173 | 498,316 | 0,000   | 951,975  | 991,982  | 1061,245       | 1082,796        | 963,281  |
| 11      | 72,721 | 60,625 | 97,216 | 141,461 | 187,358 | 254,132 | 453,224 | 673,851 | 0,000   | 1769,510 | 1746,876 | 1675,383       | <b>1779,780</b> | 1647,518 |
| 12      | 73,371 | 76,918 | 95,298 | 143,430 | 195,920 | 276,120 | 478,358 | 743,700 | 0,000   | 0,000    | 0,000    | 0,000          | 0,000           | 0,000    |
| 13      | 73,654 | 72,895 | 93,194 | 143,950 | 196,486 | 273,994 | 405,553 | 664,457 | 0,000   | 0,000    | 0,000    | 0,000          | 0,000           | 0,000    |
| 14      | 69,413 | 69,036 | 89,507 | 140,320 | 188,405 | 256,247 | 393,578 | 574,343 | 0,000   | 0,000    | 0,000    | 0,000          | 0,000           | 0,000    |

### Induktor bez stínění - grafické znázornění rozložení $H$ kolem induktoru



Obr. 4. 18 Rozložení intenzity magnetického pole



Obr. 4. 19 Rozložení intenzity magnetického pole

### Induktor se svazky transformátorových plechů - naměřené a vypočítané hodnoty

Tab. 4. 22 Naměřené hodnoty naindukované napětí kolem induktoru

| [V] | A     | B     | C     | D     | E     | F     | G     | H     | I     | J     | K     | L            | M     | N     |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| 1   | 0,177 | 0,229 | 0,222 | 0,215 | 0,202 | 0,201 | 0,119 | 0,111 | 0,342 | 0,298 | 0,262 | 0,159        | 0,196 | 0,145 |
|     | 0,209 | 0,228 | 0,174 | 0,228 | 0,177 | 0,205 | 0,075 | 0,054 | 0,219 | 0,152 | 0,142 | 0,036        | 0,166 | 0,055 |
| 2   | 0,252 | 0,217 | 0,204 | 0,214 | 0,2   | 0,189 | 0,118 | 0,141 | 0,418 | 0,372 | 0,317 | 0,209        | 0,206 | 0,194 |
|     | 0,21  | 0,194 | 0,17  | 0,216 | 0,201 | 0,214 | 0,085 | 0,068 | 0,285 | 0,236 | 0,16  | 0,054        | 0,237 | 0,064 |
| 3   | 0,234 | 0,203 | 0,192 | 0,199 | 0,179 | 0,202 | 0,135 | 0,181 | 0,483 | 0,405 | 0,381 | 0,29         | 0,367 | 0,263 |
|     | 0,198 | 0,187 | 0,181 | 0,179 | 0,227 | 0,163 | 0,11  | 0,106 | 0,357 | 0,302 | 0,179 | 0,027        | 0,315 | 0,108 |
| 4   | 0,218 | 0,221 | 0,194 | 0,191 | 0,195 | 0,102 | 0,165 | 0,221 | 0,547 | 0,459 | 0,544 | 0,391        | 0,373 | 0,347 |
|     | 0,199 | 0,187 | 0,228 | 0,227 | 0,233 | 0,205 | 0,165 | 0,151 | 0,402 | 0,387 | 0,351 | 0,052        | 0,142 | 0,164 |
| 5   | 0,229 | 0,208 | 0,172 | 0,085 | 0,095 | 0,176 | 0,19  | 0,286 | 0,575 | 0,597 | 0,662 | 0,572        | 0,591 | 0,472 |
|     | 0,186 | 0,189 | 0,246 | 0,241 | 0,244 | 0,281 | 0,247 | 0,246 | 0,455 | 0,455 | 0,432 | 0,072        | 0,229 | 0,235 |
| 6   | 0,229 | 0,213 | 0,148 | 0,081 | 0,075 | 0,111 | 0,204 | 0,339 | 0,646 | 0,73  | 0,882 | 0,864        | 0,876 | 0,667 |
|     | 0,2   | 0,202 | 0,26  | 0,259 | 0,276 | 0,331 | 0,318 | 0,377 | 0,532 | 0,526 | 0,537 | 0,108        | 0,294 | 0,381 |
| 7   | 0,197 | 0,216 | 0,194 | 0,069 | 0,053 | 0,088 | 0,192 | 0,356 | 0,746 | 0,998 | 1,294 | 1,445        | 1,305 | 0,936 |
|     | 0,196 | 0,206 | 0,266 | 0,296 | 0,312 | 0,381 | 0,45  | 0,565 | 0,831 | 0,794 | 0,664 | 0,437        | 0,384 | 0,616 |
| 8   | 0,226 | 0,205 | 0,184 | 0,081 | 0,051 | 0,06  | 0,142 | 0,464 | 0,812 | 1,348 | 2,081 | <b>2,517</b> | 2,367 | 1,457 |
|     | 0,204 | 0,209 | 0,272 | 0,311 | 0,339 | 0,416 | 0,545 | 0,886 | 1,203 | 1,355 | 0,917 | <b>0,465</b> | 0,617 | 1,236 |
| 9   | 0,226 | 0,208 | 0,196 | 0,208 | 0,062 | 0,126 | 0,22  | 0,572 | 0,611 | 2,121 | 4,26  | 5,21         | 4,47  | 2,455 |
|     | 0,208 | 0,199 | 0,282 | 0,318 | 0,361 | 0,455 | 0,616 | 1,131 | 2,074 | 2,498 | 1,919 | 0,481        | 1,59  | 2,609 |
| 10  | 0,229 | 0,214 | 0,206 | 0,224 | 0,189 | 0,205 | 0,356 | 0,806 |       | 4,37  | 8,25  | 10,37        | 9,49  | 5,98  |
|     | 0,211 | 0,198 | 0,288 | 0,321 | 0,366 | 0,449 | 0,594 | 0,978 |       | 6,22  | 3,352 | 0,523        | 2,707 | 6,13  |
| 11  | 0,236 | 0,202 | 0,218 | 0,225 | 0,228 | 0,25  | 0,311 |       |       | 13,59 | 15,31 | <b>19,15</b> | 18,16 | 13,29 |
|     | 0,203 | 0,206 | 0,303 | 0,309 | 0,372 | 0,426 | 0,549 |       |       | 14,64 | 7,04  | 1,548        | 5,14  | 12,04 |
| 12  | 0,224 | 0,18  | 0,233 | 0,244 | 0,298 | 0,313 | 0,354 |       |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,206 | 0,216 | 0,214 | 0,315 | 0,291 | 0,384 | 0,526 |       |       |       |       |              |       |       |
| 13  | 0,242 | 0,224 | 0,224 | 0,281 | 0,296 | 0,36  | 0,431 |       |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,246 | 0,233 | 0,165 | 0,209 | 0,232 | 0,304 | 0,399 |       |       |       |       |              |       |       |
| 14  | 0,285 | 0,243 | 0,254 | 0,276 | 0,355 | 0,4   | 0,45  |       |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,233 | 0,231 | 0,144 | 0,143 | 0,284 | 0,202 | 0,222 |       |       |       |       |              |       |       |

Na základě těchto hodnot napětí a použití výše uvedených vztahů ( 4 - 1 ) až ( 4 - 5 ) získám rozložení magnetické intenzity kolem laboratorního induktoru. Vypočtené hodnoty uvádím v tabulce Tab. 4. 23

Příklad výpočtu  $H$  pro bod L8:

$$B_r = k \cdot \frac{U_r}{4,44 \cdot f} = 4,732 \cdot \frac{0,465}{4,44 \cdot 10000} = 4,956 \cdot 10^{-5} \text{ T} \quad B_a = k \cdot \frac{U_a}{4,44 \cdot f} = 4,732 \cdot \frac{2,517}{4,44 \cdot 10000} = 2,682 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

$$B = \sqrt{(4,956 \cdot 10^{-5})^2 + (2,682 \cdot 10^{-4})^2} = 2,728 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

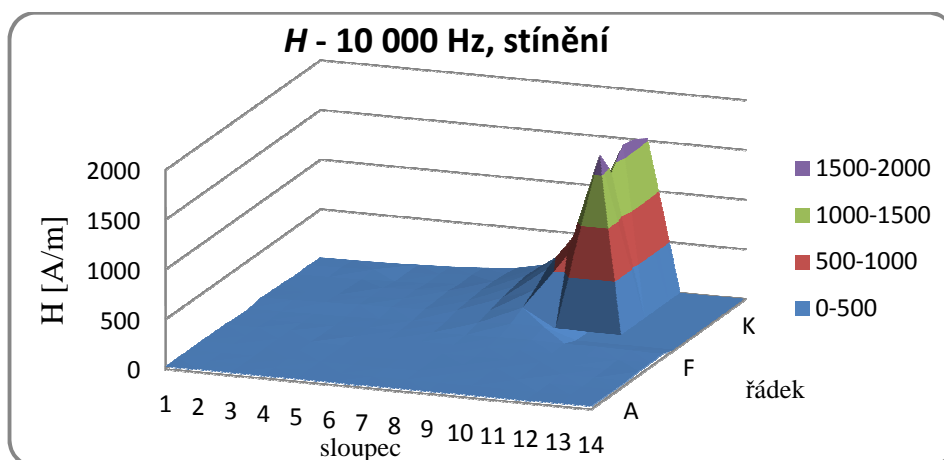
$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} = \frac{2,728 \cdot 10^{-4}}{1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 217,073 \text{ A/m}$$

Tab. 4. 23 Magnetická intenzita magnetického pole induktoru

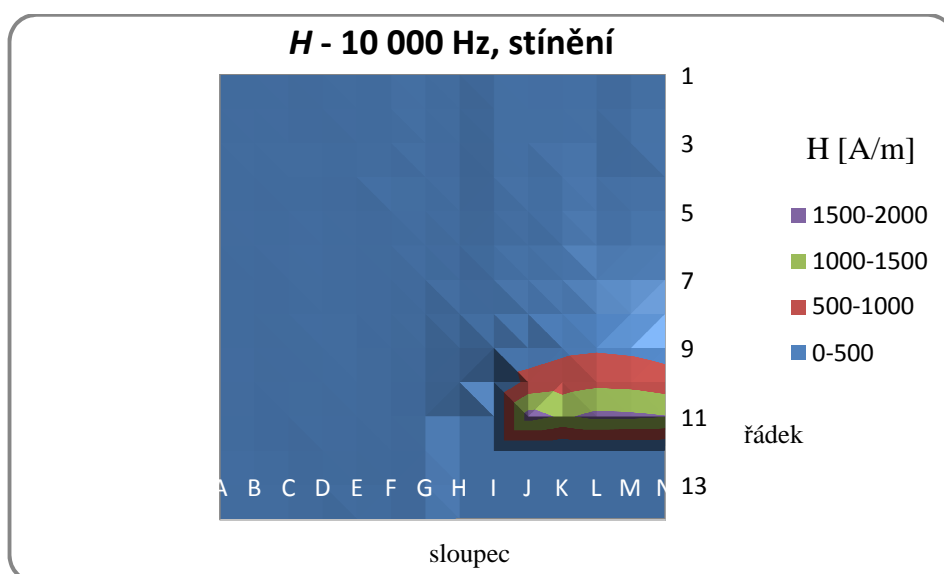
| H [A/m] | A      | B      | C      | D      | E      | F      | G      | H       | I       | J               | K        | L              | M        | N        |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|-----------------|----------|----------------|----------|----------|
| 1       | 23,227 | 27,406 | 23,921 | 26,577 | 22,777 | 24,348 | 11,929 | 10,469  | 34,441  | 28,370          | 25,273   | 13,826         | 21,783   | 13,152   |
| 2       | 27,820 | 24,685 | 22,521 | 25,787 | 24,047 | 24,214 | 12,333 | 13,276  | 42,905  | 37,362          | 30,114   | 18,307         | 26,631   | 17,325   |
| 3       | 25,996 | 23,407 | 22,378 | 22,700 | 24,517 | 22,013 | 14,768 | 17,789  | 50,937  | 42,845          | 35,700   | 24,701         | 41,017   | 24,112   |
| 4       | 25,033 | 24,552 | 25,389 | 25,159 | 25,767 | 19,419 | 19,789 | 22,700  | 57,570  | 50,916          | 54,905   | 33,452         | 33,848   | 32,550   |
| 5       | 25,020 | 23,835 | 25,456 | 21,673 | 22,206 | 28,120 | 26,428 | 31,993  | 62,185  | 63,659          | 67,039   | 48,893         | 53,753   | 44,716   |
| 6       | 25,785 | 24,896 | 25,372 | 23,014 | 24,256 | 29,608 | 32,041 | 42,998  | 70,973  | 76,307          | 87,574   | 73,844         | 78,364   | 65,145   |
| 7       | 23,568 | 25,314 | 27,921 | 25,776 | 26,839 | 33,162 | 41,492 | 56,635  | 94,707  | 108,157         | 123,346  | 128,029        | 115,366  | 95,028   |
| 8       | 25,820 | 24,828 | 27,850 | 27,255 | 29,073 | 35,645 | 47,763 | 84,820  | 123,090 | 162,095         | 192,860  | <b>217,073</b> | 207,448  | 162,037  |
| 9       | 26,049 | 24,413 | 29,125 | 32,226 | 31,064 | 40,040 | 55,473 | 107,487 | 183,365 | 277,914         | 396,245  | 443,728        | 402,359  | 303,819  |
| 10      | 26,408 | 24,726 | 30,030 | 33,196 | 34,934 | 41,860 | 58,730 | 107,479 | 0,000   | 644,681         | 755,211  | 880,575        | 836,929  | 726,270  |
| 11      | 26,400 | 24,468 | 31,656 | 32,417 | 37,003 | 41,890 | 53,511 | 0,000   | 0,000   | <b>1694,072</b> | 1429,100 | 1629,367       | 1600,612 | 1520,842 |
| 12      | 25,809 | 23,845 | 26,830 | 33,792 | 35,324 | 42,014 | 53,771 | 0,000   | 0,000   | 0,000           | 0,000    | 0,000          | 0,000    | 0,000    |
| 13      | 29,265 | 27,411 | 23,594 | 29,700 | 31,895 | 39,960 | 49,811 | 0,000   | 0,000   | 0,000           | 0,000    | 0,000          | 0,000    | 0,000    |
| 14      | 31,220 | 28,434 | 24,762 | 26,362 | 38,555 | 38,003 | 42,555 | 0,000   | 0,000   | 0,000           | 0,000    | 0,000          | 0,000    | 0,000    |



## Induktor se svazky transformátorových plechů - grafické rozložení $H$ kolem induktoru



Obr. 4. 20 Grafické rozložení magnetického pole



Obr. 4. 21 Grafické rozložení magnetického pole

V obrázcích Obr. 4.18 až 4.21 vidíme názorně vliv stínění na velikost intenzity magnetického pole vně induktoru. Stínění se nachází na úrovni sloupce H a vidíme, že pole nalevo od tohoto sloupce je odstíněné. Maximální hodnota  $H$  u nestíněného induktoru činí 1779,780 A/m, u stíněného 1694,072 A/m. Obě tyto hodnoty byly naměřeny v ose induktoru (přesněji v bodech M11/J11). Vně induktoru v bodě D11 byly naměřeny tyto hodnoty  $H$ :

- nestíněný induktor: 141,461 A/m
- stíněný induktor: 32,417 A/m

### 4.3.2 Velikost proudu 31 A

Na napájecím zdroji jsem nastavil napájecí proud 31 A modelu indukční kelímkové pece (laboratorní induktor)

#### Induktor bez stínění - naměřené a vypočítané hodnoty

Tab. 4. 24 Naměřené hodnoty naindukovaného napětí kolem induktoru

| [V] | A     | B     | C     | D     | E     | F     | G     | H     | I     | J     | K     | L            | M     | N     |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| 1   | 0,315 | 0,208 | 0,223 | 0,32  | 0,386 | 0,432 | 0,44  | 0,685 | 0,928 | 1,017 | 0,606 | 0,633        | 0,642 | 0,775 |
|     | 0,458 | 0,335 | 0,376 | 0,361 | 0,414 | 0,465 | 0,536 | 0,298 | 0,46  | 0,139 | 0,271 | 0,173        | 0,062 | 0,142 |
| 2   | 0,305 | 0,21  | 0,281 | 0,352 | 0,432 | 0,507 | 0,512 | 0,793 | 1,097 | 1,056 | 0,902 | 0,916        | 0,991 | 0,927 |
|     | 0,484 | 0,384 | 0,442 | 0,436 | 0,53  | 0,541 | 0,628 | 0,449 | 0,527 | 0,148 | 0,259 | 0,149        | 0,094 | 0,214 |
| 3   | 0,289 | 0,203 | 0,324 | 0,381 | 0,496 | 0,601 | 0,657 | 0,869 | 1,314 | 1,242 | 1,165 | 1,197        | 1,263 | 1,183 |
|     | 0,523 | 0,452 | 0,523 | 0,554 | 0,595 | 0,682 | 0,459 | 0,559 | 0,559 | 0,279 | 0,417 | 0,291        | 0,129 | 0,286 |
| 4   | 0,284 | 0,188 | 0,292 | 0,388 | 0,554 | 0,675 | 0,626 | 1,064 | 1,414 | 1,342 | 1,526 | 1,625        | 1,64  | 1,467 |
|     | 0,588 | 0,55  | 0,622 | 0,695 | 0,755 | 0,861 | 0,926 | 0,762 | 0,756 | 0,645 | 0,551 | 0,323        | 0,201 | 0,421 |
| 5   | 0,182 | 0,163 | 0,296 | 0,453 | 0,618 | 0,785 | 0,935 | 1,294 | 1,824 | 1,839 | 2,088 | 2,13         | 2,212 | 1,992 |
|     | 0,599 | 0,614 | 0,738 | 0,828 | 0,901 | 1,026 | 1,257 | 1,042 | 0,718 | 0,848 | 0,638 | 0,361        | 0,251 | 0,725 |
| 6   | 0,121 | 0,141 | 0,244 | 0,408 | 0,614 | 0,817 | 1,155 | 1,594 | 2,499 | 2,632 | 2,946 | 3,102        | 2,996 | 2,581 |
|     | 0,656 | 0,698 | 0,846 | 1,012 | 1,133 | 1,278 | 1,494 | 1,348 | 1,532 | 1,218 | 0,814 | 0,396        | 0,463 | 1,019 |
| 7   | 0,121 | 0,105 | 0,216 | 0,386 | 0,594 | 0,902 | 1,887 | 1,941 | 2,899 | 3,528 | 4,46  | 4,79         | 4,58  | 3,698 |
|     | 0,68  | 0,789 | 0,967 | 1,209 | 1,421 | 1,632 | 1,961 | 1,959 | 1,806 | 1,756 | 1,15  | 0,396        | 0,731 | 1,483 |
| 8   | 0,055 | 0,041 | 0,161 | 0,226 | 0,529 | 0,878 | 1,464 | 2,476 | 3,767 | 5,46  | 6,41  | <b>7,01</b>  | 6,69  | 5,28  |
|     | 0,689 | 0,848 | 1,102 | 1,321 | 1,692 | 2,106 | 2,655 | 2,872 | 2,928 | 2,515 | 1,342 | <b>0,288</b> | 1,267 | 2,638 |
| 9   | 0,144 | 0,149 | 0,089 | 0,031 | 0,362 | 0,622 | 1,666 | 2,707 | 5,61  | 8,07  | 9,66  | 10,59        | 10,26 | 7,87  |
|     | 0,717 | 0,867 | 1,134 | 1,461 | 1,977 | 2,654 | 3,502 | 5,52  | 6,03  | 4,23  | 2,845 | 0,357        | 2,124 | 4,95  |
| 10  | 0,286 | 0,297 | 0,33  | 0,208 | 0,251 | 0,235 | 0,919 | 2,137 |       | 12,04 | 14,84 | 17,33        | 15,97 | 12,52 |
|     | 0,702 | 0,905 | 1,216 | 1,616 | 2,284 | 3,278 | 4,86  | 7,87  |       | 7,84  | 4,56  | 1,073        | 3,051 | 7,63  |
| 11  | 0,386 | 0,493 | 0,558 | 0,615 | 0,719 | 0,676 | 0,372 | 1,072 |       | 19,09 | 26,2  | <b>26,84</b> | 25,42 | 22,28 |
|     | 0,656 | 0,865 | 1,19  | 1,648 | 2,356 | 3,581 | 5,94  | 10,65 |       | 15,88 | 8,47  | 0,452        | 5,16  | 13,95 |
| 12  | 0,511 | 0,662 | 0,799 | 1,006 | 1,297 | 1,544 | 2,252 | 3,912 |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,586 | 0,604 | 1,042 | 1,547 | 2,181 | 3,479 | 6,01  | 10,82 |       |       |       |              |       |       |
| 13  | 0,651 | 0,829 | 1,019 | 1,33  | 1,795 | 2,382 | 3,751 | 6,98  |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,486 | 0,812 | 0,844 | 1,261 | 1,937 | 2,697 | 4,88  | 8,16  |       |       |       |              |       |       |
| 14  | 0,735 | 0,933 | 1,199 | 1,553 | 2,11  | 3,074 | 4,59  | 7,69  |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,332 | 0,372 | 0,577 | 0,706 | 1,239 | 1,557 | 2,751 | 4,95  |       |       |       |              |       |       |

Na základě těchto hodnot napětí a použití výše uvedených vztahů (4 - 1) až (4 - 5) získám rozložení magnetické intenzity kolem laboratorního induktoru. Vypočtené hodnoty uvádím v tabulce Tab. 4. 25

Konstanta křížové měřicí cívky je stejná jako v případě napájecího proudu 15 A.

$$k = \frac{1}{N \cdot A} = \frac{1}{310 \cdot 6,817 \cdot 10^{-4}} = 4,732 \text{ m}^{-2}$$

Příklad výpočtu  $H$  pro bod L8:

$$B_r = k \cdot \frac{U_r}{4,44 \cdot f} = 4,732 \cdot \frac{0,288}{4,44 \cdot 10000} = 3,069 \cdot 10^{-5} \text{ T} \quad B_a = k \cdot \frac{U_a}{4,44 \cdot f} = 4,732 \cdot \frac{7,01}{4,44 \cdot 10000} = 7,471 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

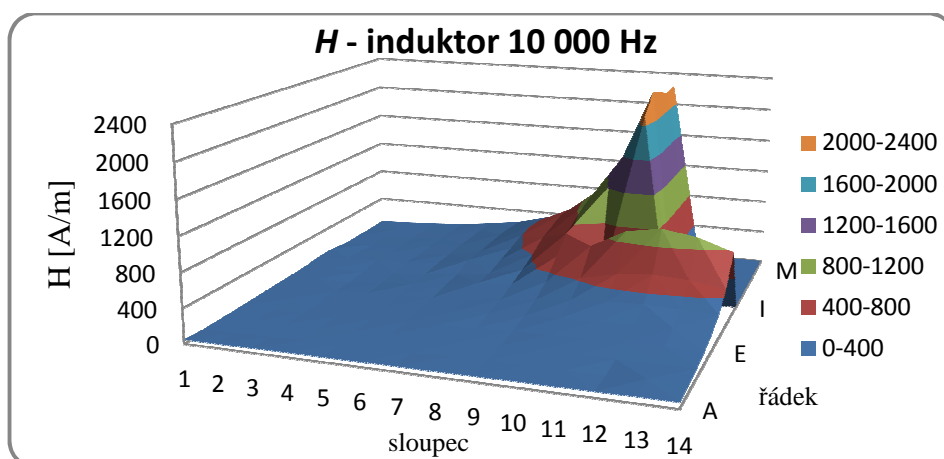
$$B = \sqrt{(3,069 \cdot 10^{-5})^2 + (7,471 \cdot 10^{-4})^2} = 7,477 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} = \frac{7,477 \cdot 10^{-4}}{1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 595,004 \text{ A/m}$$

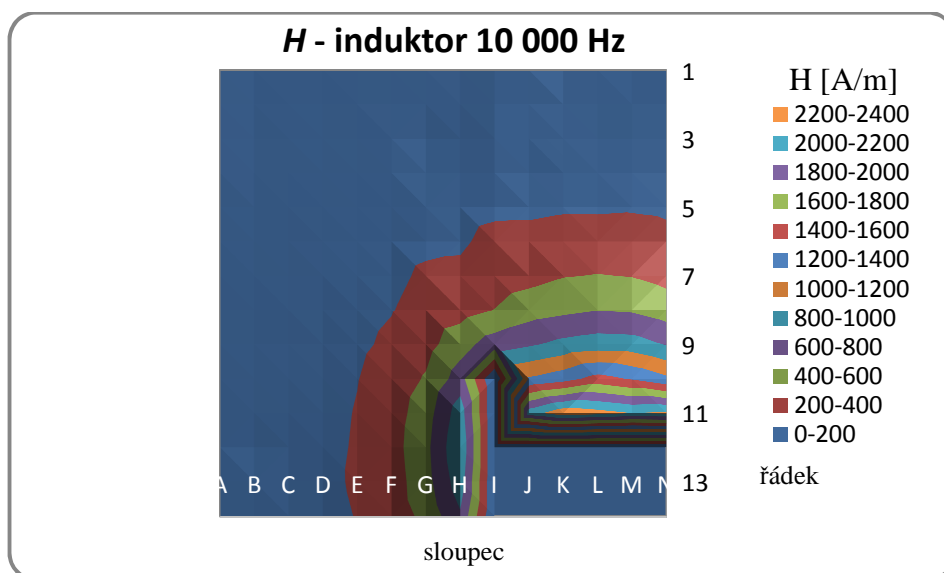
Tab. 4. 25 Magnetická intenzita magnetického pole induktoru

| H [A/m] | A      | B      | C       | D       | E       | F       | G       | H       | I       | J        | K               | L              | M        | N        |
|---------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|-----------------|----------------|----------|----------|
| 1       | 47,142 | 33,441 | 37,074  | 40,912  | 48,004  | 53,828  | 58,811  | 63,353  | 87,840  | 87,051   | 56,298          | 55,652         | 54,700   | 66,820   |
| 2       | 48,517 | 37,118 | 44,419  | 47,523  | 57,988  | 62,880  | 68,717  | 77,285  | 103,213 | 90,432   | 79,588          | 78,705         | 84,422   | 80,685   |
| 3       | 50,676 | 42,022 | 52,176  | 57,022  | 65,694  | 77,092  | 67,970  | 87,629  | 121,102 | 107,956  | 104,940         | 104,472        | 107,670  | 103,218  |
| 4       | 55,379 | 49,294 | 58,274  | 67,505  | 79,418  | 92,784  | 94,793  | 110,989 | 135,982 | 126,275  | 137,595         | 140,509        | 140,126  | 129,435  |
| 5       | 53,093 | 53,876 | 67,435  | 80,043  | 92,659  | 109,560 | 132,861 | 140,898 | 166,243 | 171,744  | 185,161         | 183,217        | 188,799  | 179,778  |
| 6       | 56,572 | 60,392 | 74,672  | 92,538  | 109,290 | 128,639 | 160,151 | 177,042 | 248,590 | 245,957  | 259,206         | 265,209        | 257,100  | 235,331  |
| 7       | 58,575 | 67,503 | 84,030  | 107,632 | 130,617 | 158,139 | 230,800 | 233,878 | 289,664 | 334,215  | 390,614         | 407,615        | 393,336  | 337,898  |
| 8       | 58,618 | 72,001 | 94,450  | 113,659 | 150,345 | 193,505 | 257,127 | 321,588 | 404,627 | 509,813  | 555,404         | <b>595,004</b> | 577,450  | 500,563  |
| 9       | 62,021 | 74,606 | 96,468  | 123,932 | 170,453 | 231,179 | 328,892 | 521,401 | 698,484 | 772,719  | 854,035         | 898,625        | 888,578  | 788,482  |
| 10      | 64,286 | 80,778 | 106,856 | 138,180 | 194,867 | 278,713 | 419,470 | 691,606 | 0,000   | 1218,483 | 1316,624        | 1472,534       | 1378,876 | 1243,432 |
| 11      | 64,551 | 84,437 | 111,465 | 149,178 | 208,905 | 309,061 | 504,745 | 907,767 | 0,000   | 2105,904 | <b>2335,190</b> | 2276,564       | 2199,781 | 2229,334 |
| 12      | 65,939 | 75,999 | 111,359 | 156,498 | 215,201 | 322,798 | 544,302 | 975,755 | 0,000   | 0,000    | 0,000           | 0,000          | 0,000    | 0,000    |
| 13      | 68,898 | 98,413 | 112,213 | 155,433 | 223,963 | 305,164 | 521,995 | 910,672 | 0,000   | 0,000    | 0,000           | 0,000          | 0,000    | 0,000    |
| 14      | 68,398 | 85,183 | 112,846 | 144,677 | 207,515 | 292,233 | 453,830 | 775,603 | 0,000   | 0,000    | 0,000           | 0,000          | 0,000    | 0,000    |

### Induktor bez stínění - grafické znázornění rozložení $H$ kolem induktoru



Obr. 4. 22 Grafické rozložení intenzity magnetického pole



Obr. 4. 23 Grafické rozložení intenzity magnetického pole

### Induktor se svazky transformátorových plechů - naměřené a vypočítané hodnoty

Tab. 4. 26 Naměřené hodnoty naindukovaného napětí kolem induktoru

| [V] | A     | B     | C     | D     | E     | F     | G     | H     | I     | J     | K     | L            | M     | N     |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| 1   | 0,062 | 0,079 | 0,112 | 0,161 | 0,104 | 0,212 | 0,25  | 0,155 | 0,216 | 0,161 | 0,182 | 0,187        | 0,216 | 0,345 |
|     | 0,071 | 0,081 | 0,105 | 0,133 | 0,11  | 0,187 | 0,205 | 0,115 | 0,109 | 0,055 | 0,024 | 0,031        | 0,089 | 0,212 |
| 2   | 0,064 | 0,081 | 0,127 | 0,172 | 0,117 | 0,208 | 0,269 | 0,136 | 0,244 | 0,231 | 0,255 | 0,256        | 0,298 | 0,459 |
|     | 0,075 | 0,086 | 0,131 | 0,223 | 0,133 | 0,196 | 0,222 | 0,151 | 0,143 | 0,069 | 0,067 | 0,052        | 0,154 | 0,221 |
| 3   | 0,052 | 0,087 | 0,142 | 0,223 | 0,142 | 0,232 | 0,274 | 0,277 | 0,295 | 0,292 | 0,334 | 0,357        | 0,342 | 0,402 |
|     | 0,081 | 0,104 | 0,154 | 0,251 | 0,157 | 0,218 | 0,248 | 0,196 | 0,175 | 0,108 | 0,069 | 0,068        | 0,447 | 0,182 |
| 4   | 0,066 | 0,086 | 0,156 | 0,111 | 0,148 | 0,247 | 0,278 | 0,308 | 0,369 | 0,405 | 0,468 | 0,48         | 0,488 | 0,506 |
|     | 0,084 | 0,114 | 0,166 | 0,163 | 0,198 | 0,233 | 0,275 | 0,256 | 0,248 | 0,171 | 0,121 | 0,049        | 0,178 | 0,354 |
| 5   | 0,064 | 0,078 | 0,145 | 0,093 | 0,144 | 0,182 | 0,284 | 0,365 | 0,477 | 0,583 | 0,657 | 0,707        | 0,746 | 0,583 |
|     | 0,088 | 0,128 | 0,187 | 0,185 | 0,245 | 0,259 | 0,329 | 0,375 | 0,348 | 0,273 | 0,171 | 0,123        | 0,341 | 0,367 |
| 6   | 0,062 | 0,082 | 0,144 | 0,073 | 0,129 | 0,161 | 0,264 | 0,426 | 0,603 | 0,804 | 0,992 | 1,071        | 1,035 | 0,828 |
|     | 0,095 | 0,13  | 0,201 | 0,208 | 0,282 | 0,366 | 0,409 | 0,502 | 0,539 | 0,461 | 0,323 | 0,103        | 0,35  | 0,532 |
| 7   | 0,057 | 0,079 | 0,139 | 0,066 | 0,076 | 0,139 | 0,244 | 0,404 | 0,764 | 1,175 | 1,608 | 1,721        | 1,617 | 1,257 |
|     | 0,096 | 0,13  | 0,211 | 0,235 | 0,326 | 0,432 | 0,546 | 0,701 | 0,808 | 0,818 | 0,529 | 0,116        | 0,569 | 0,804 |
| 8   | 0,071 | 0,094 | 0,142 | 0,055 | 0,084 | 0,106 | 0,233 | 0,336 | 1,075 | 1,822 | 2,588 | <b>3,166</b> | 2,945 | 1,886 |
|     | 0,094 | 0,136 | 0,217 | 0,259 | 0,351 | 0,504 | 0,686 | 1,052 | 1,435 | 1,452 | 1,035 | <b>0,177</b> | 1,044 | 1,565 |
| 9   | 0,077 | 0,099 | 0,151 | 0,103 | 0,128 | 0,177 | 0,269 | 0,421 | 0,692 | 2,691 | 5,17  | 6,25         | 5,97  | 3,126 |
|     | 0,091 | 0,134 | 0,206 | 0,262 | 0,365 | 0,523 | 0,78  | 1,452 | 2,485 | 3,187 | 2,077 | 0,228        | 2,415 | 3,257 |
| 10  | 0,083 | 0,102 | 0,184 | 0,125 | 0,188 | 0,235 | 0,399 | 1,077 |       | 4,74  | 10,08 | 12,28        | 11,76 | 7,35  |
|     | 0,082 | 0,121 | 0,194 | 0,258 | 0,356 | 0,501 | 0,714 | 1,151 |       | 7,02  | 4,26  | 0,221        | 3,94  | 7,89  |
| 11  | 0,084 | 0,125 | 0,207 | 0,131 | 0,227 | 0,286 | 0,406 |       |       | 15,92 | 20,09 | <b>22,58</b> | 22,08 | 18,15 |
|     | 0,072 | 0,106 | 0,198 | 0,233 | 0,316 | 0,451 | 0,639 |       |       | 16,95 | 9,01  | 2,105        | 7,54  | 14,68 |
| 12  | 0,089 | 0,128 | 0,206 | 0,188 | 0,276 | 0,361 | 0,459 |       |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,052 | 0,079 | 0,159 | 0,185 | 0,273 | 0,381 | 0,616 |       |       |       |       |              |       |       |
| 13  | 0,099 | 0,141 | 0,217 | 0,234 | 0,298 | 0,407 | 0,541 |       |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,053 | 0,054 | 0,127 | 0,129 | 0,196 | 0,282 | 0,489 |       |       |       |       |              |       |       |
| 14  | 0,106 | 0,144 | 0,231 | 0,245 | 0,324 | 0,424 | 0,572 |       |       |       |       |              |       |       |
|     | 0,042 | 0,063 | 0,108 | 0,069 | 0,121 | 0,195 | 0,294 |       |       |       |       |              |       |       |

Vypočtené hodnoty intenzity magnetického pole kolem induktoru uvádím v tabulce Tab. 4. 27

Příklad výpočtu  $H$  pro bod L8:

$$B_r = k \cdot \frac{U_r}{4,44 \cdot f} = 4,732 \cdot \frac{0,177}{4,44 \cdot 10000} = 1,886 \cdot 10^{-5} \text{ T} \quad B_a = k \cdot \frac{U_a}{4,44 \cdot f} = 4,732 \cdot \frac{3,166}{4,44 \cdot 10000} = 3,374 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

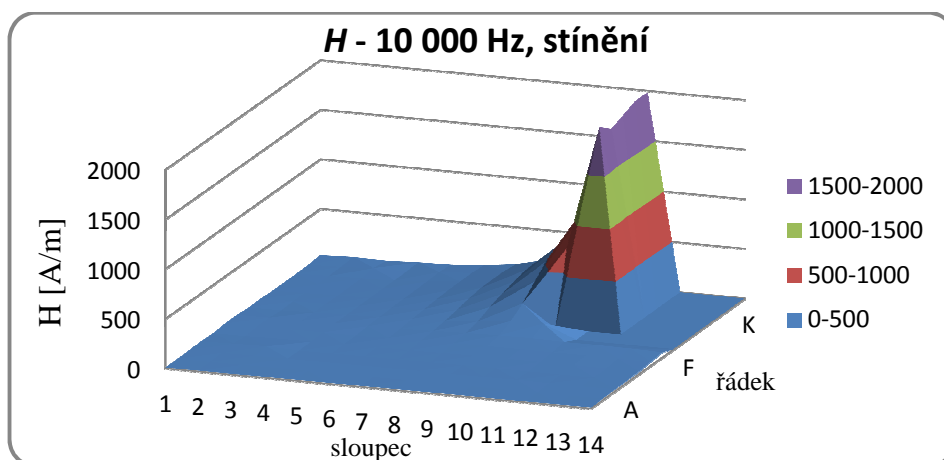
$$B = \sqrt{(1,886 \cdot 10^{-5})^2 + (3,374 \cdot 10^{-4})^2} = 3,379 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} = \frac{3,379 \cdot 10^{-4}}{1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 268,921 \text{ A/m}$$

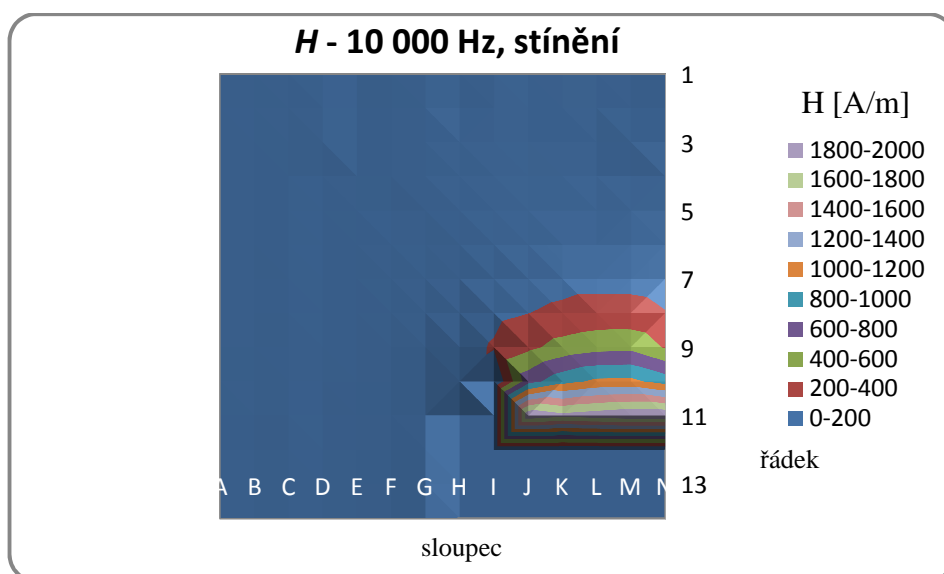
Tab. 4. 27 Magnetická intenzita magnetického pole induktoru

| H [A/m] | A      | B      | C      | D      | E      | F      | G      | H       | I       | J        | K        | L              | M        | N               |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|----------|----------|----------------|----------|-----------------|
| 1       | 7,994  | 9,596  | 13,020 | 17,710 | 12,838 | 23,974 | 27,419 | 16,368  | 20,519  | 14,429   | 15,569   | 16,075         | 19,813   | 34,341          |
| 2       | 8,362  | 10,019 | 15,474 | 23,884 | 15,023 | 24,238 | 29,579 | 17,234  | 23,985  | 20,446   | 22,360   | 22,154         | 28,448   | 43,204          |
| 3       | 8,163  | 11,499 | 17,765 | 28,474 | 17,953 | 26,999 | 31,342 | 28,778  | 29,089  | 26,403   | 28,924   | 30,821         | 47,732   | 37,424          |
| 4       | 9,060  | 12,111 | 19,319 | 16,725 | 20,965 | 28,797 | 33,163 | 33,966  | 37,705  | 37,283   | 40,995   | 40,919         | 44,053   | 52,372          |
| 5       | 9,228  | 12,712 | 20,068 | 17,560 | 24,101 | 26,846 | 36,859 | 44,381  | 50,075  | 54,595   | 57,575   | 60,860         | 69,563   | 58,424          |
| 6       | 9,621  | 13,035 | 20,969 | 18,695 | 26,299 | 33,910 | 41,285 | 55,837  | 68,591  | 78,599   | 88,477   | 91,248         | 92,659   | 83,466          |
| 7       | 9,469  | 12,901 | 21,428 | 20,701 | 28,389 | 38,487 | 50,718 | 68,617  | 94,307  | 121,419  | 143,561  | 146,285        | 145,377  | 126,545         |
| 8       | 9,990  | 14,021 | 21,993 | 22,455 | 30,608 | 43,678 | 61,442 | 93,658  | 152,060 | 197,586  | 236,384  | <b>268,921</b> | 264,988  | 207,844         |
| 9       | 10,110 | 14,129 | 21,661 | 23,875 | 32,803 | 46,826 | 69,973 | 128,213 | 218,766 | 353,746  | 472,516  | 530,401        | 546,159  | 382,857         |
| 10      | 9,895  | 13,421 | 22,676 | 24,313 | 34,143 | 46,931 | 69,366 | 133,683 | 0,000   | 718,358  | 928,070  | 1041,609       | 1051,826 | 914,489         |
| 11      | 9,383  | 13,899 | 24,293 | 22,669 | 32,997 | 45,291 | 64,206 | 0,000   | 0,000   | 1972,122 | 1867,290 | 1923,264       | 1978,728 | <b>1979,722</b> |
| 12      | 8,742  | 12,756 | 22,069 | 22,369 | 32,923 | 44,513 | 65,150 | 0,000   | 0,000   | 0,000    | 0,000    | 0,000          | 0,000    | 0,000           |
| 13      | 9,523  | 12,805 | 21,323 | 22,661 | 30,249 | 41,993 | 61,846 | 0,000   | 0,000   | 0,000    | 0,000    | 0,000          | 0,000    | 0,000           |
| 14      | 9,670  | 13,330 | 21,626 | 21,586 | 29,331 | 39,579 | 54,543 | 0,000   | 0,000   | 0,000    | 0,000    | 0,000          | 0,000    | 0,000           |

## Induktor se svazky transformátorových plechů - grafické rozložení $H$ kolem induktoru



Obr. 4. 24 Grafické rozložení intenzity magnetického pole



Obr. 4. 25 Grafické rozložení intenzity magnetického pole

V obrázcích Obr. 4.22 až 4.25 vidíme názorně vliv stínění na velikost intenzity magnetického pole vně induktoru. Stínění se nachází na úrovni sloupce H a vidíme, že pole nalevo od tohoto sloupce je odstíněné. Maximální hodnota  $H$  u nestíněného induktoru činí 2335,190 A/m, u stíněného 1979,722 A/m. Obě tyto hodnoty byly naměřeny v ose induktoru (přesněji v bodech K11N11). Vně induktoru v bodě D11 byly naměřeny tyto hodnoty  $H$ :

- nestíněný induktor: 149,178 A/m
- stíněný induktor: 22,669 A/m

## 4.4 Chyby měření [19]

Žádným měřením není možné změřit správnou (skutečnou) hodnotu měřené veličiny, při každém měření dochází k chybám. Je proto dobré mít na mysli, že výsledky měření jsou přibližné hodnoty ke skutečným hodnotám a také je tak interpretovat. Chyba měření, tj. odchylka měřené hodnoty veličiny od správné hodnoty, nám charakterizuje přesnost měření a je vyjádřena absolutní nebo relativní chybou.

Příčiny vzniku chyb měření je několik:

- **Chyby použité metody:** jde o systematickou chybu, vznikající vzájemným působením měřicího přístroje a měřeného obvodu (provedení zapojení). Jsou většinou korigovatelné.
- **Chyby měřicích přístrojů:** jsou dány vlastnostmi použitého přístroje (nedokonalost přístroje) a vlivu okolí na daný přístroj (vliv elmag. pole)
- **Chyby způsobené rušivými vlivy**
- **Chyby čtení údajů pozorovatelem**

Výsledky měření jsou získávány buď přímo, tj. čtením z měřicího přístroje, nebo nepřímo z matematických vzorců, do kterých jsou zadávány naměřené hodnoty veličiny zjištěné přímým měřením a jsou již zatíženy chybou.

### Chyby přímých měření

Výsledky měření jsou získávány čtením údaje z měřicího přístroje a největší možná absolutní chyba je dána absolutní chybou údaje měřicího přístroje a absolutní chybou metody.

$$\text{absolutní chyba: } \Delta_{PM} = \Delta_u + \Delta_m$$

$$\text{relativní chyba: } \delta_{PM} = \frac{\Delta_{PM}}{N} \cdot 100 [\%]$$

- poznámka: absolutní chyba  $\Delta = N - S$ , kde  $N$  - naměřená hodnota,  $S$  - skutečná hodnota

$$\text{relativní chyba } \delta = \frac{\Delta}{N} \cdot 100 [\%]$$

### Chyby nepřímých měření

Výsledek měření je získán matematickou funkcí nezávisle proměnných, jejíž hodnoty jsou určeny měřením. Tyto hodnoty jsou zatíženy určitou chybou. Je-li měřená veličina  $Y$  dána funkcí  $Y = f(X_1, \dots, X_n)$ , lze určit absolutní chybu "totálním diferenciálem".

$$|\Delta_Y| = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\delta f}{\delta X_i} \cdot \Delta_{X_i} \right|$$

Pro základní matematické operace se nemusí pracovat s totálním diferenciálem.

$$\begin{aligned} \text{Výsledná chyba se určí na základě těchto pravidel: } Y = X_1 \pm X_2 &\rightarrow |\Delta_Y| = |\Delta_{X_1}| + |\Delta_{X_2}|; \\ Y = X_1 \cdot X_2 &\rightarrow |\delta_Y| = |\delta_{X_1}| + |\delta_{X_2}|; & Y = X_1 / X_2 &\rightarrow |\delta_Y| = |\delta_{X_1}| + |\delta_{X_2}| \end{aligned}$$

### Chyby údajů analogových a číslicových přístrojů

U analogových a číslicových přístrojů se určují tzv. základní chyby (dány vlastnostmi měřicího přístroje a nedokonalostí výroby) a přídavné chyby v případě použití přístroje v podmínkách nestanovených výrobcem (jiná teplota, tlak, vliv elmag. pole).

- **analogové přístroje:** Základní chyby jsou zahrnuty v třídě přesnosti (TP). Třída přesnosti udává mezní dovolenou relativní chybu přístroje, pokud je používán dle pokynů výrobce. Není-li tak používán, vznikají přídavné chyby  $\delta_z$ :  $\delta_u = \delta_p + \delta_z$ .

$$\text{Při zachování vztažných podmínek platí: } |\Delta_u| \leq \frac{\text{TP}}{100} \cdot M \quad |\delta_u| \leq \left| \frac{M}{X} \cdot \text{TP} \right| \%,$$

kde  $X$  je naměřená hodnota,  $M$  je největší hodnota měřicího rozsahu

- **číslicové přístroje:** Základní chyba se obvykle vyjadřuje dvěma způsoby:
  - Chyba v procentech měřené hodnoty  $\delta_1$  a chyba v procentech rozsahu  $\delta_2$ :

$$|\Delta_u| = \left| \frac{\delta_1}{100} \cdot U_x \right| + \left| \frac{\delta_2}{100} \cdot U_r \right| \quad U_x \text{ naměřený údaj, } U_r \text{ hodnota měřicího rozsahu}$$

- Chyba v procentech měřené hodnoty  $\delta_1$  a počet kvantizačních kroků:

$$\Delta_u = \pm \left( \frac{\delta_1}{100} \cdot U_x + \Delta_3 \cdot k \right) \quad \Delta_3 \text{ absolutní chyba udaná v počtu posledního}$$

místa číslicového zobrazovače, tj. počet kvantovacích kroků

Jsem si vědom, že naměřené hodnoty v kapitolách 4.1 až 4.3 jsou zatíženy chybou.

Chyby jsou způsobeny několika faktory.

- 1) Čtení hodnot z multimetru:
- 2) Umístění měřicí cívky: Je velmi obtížné správně nasměrovat měřicí cívku do axiálního a radiálního směru ve všech bodech měření (a vždy stejně).
- 3) Chyba měřicího přístroje: byl použit multimeter FINEST 703, měřicí cívky, elektromechanický voltmetr, ampérmetr
- 4) Chyba měřicího obvodu: Chyba způsobena měřicí cívkou, kontakty přívodu induktoru (přechodový odpor), vliv okolí



## 5 Simulace laboratorního modelu

Pro praxi jsou simulační programy velice vítaným pomocníkem při řešení různorodých fyzikálních problémů a poskytují poměrně rychle a přehledně informace o fyzikálních dějích ve zkoumaném problému. V případě správného nastavení dané simulace přináší poměrně přesné výsledky v porovnání s analytickým výpočtem, pro který by určité složitější geometrie byly až příliš složité, či neřešitelné. Pro praxi přinášejí alternativní možnost pro získání představy, někdy mnohem rychlejší, o řešeném problému. Jistým problémem pro rozšíření simulačních programů (v praxi se nejvíce vyskytujících programů ANSYS, Quickfield, FEMM, COMSOL, RillFEM) je vysoká pořizovací cena a poměrně vysoké nároky na výpočetní techniku. I přes tato negativa jsou velmi výhodné nejen pro úsporu času, ale prakticky i z finančního pohledu, kdy umožní zlevnit vývoj zařízení, snížit náklady nebo ověřit jeho správnou funkci před uvedením na trh.

Ve většině výše uvedených programů se pro řešení fyzikálních problémů souvisejících s teorií polí využívá metoda konečných prvků (zkratka MKP, angl. FEM). K velkým přednostem této metody patří zejména: řešení úloh obecných geometrických tvarů, obecného zatížení a uložení, dále snadné řešení materiálově nehomogenních problémů. Principem této metody je diskretizace řešeného spojitého modelu do konečného počtu prvků (trojúhelníková, čtyřúhelníková diskretizace), kdy jednotlivé parametry jsou určovány v jednotlivých uzlech. Díky diskretizaci se místo integrálních a diferenciálních rovnic řeší algebraické rovnice. Hustota a topologie prvků sítě má značný vliv na přesnost výsledků a nároky kladené na výpočetní techniku. Pro jednoznačnost MKP je zapotřebí určit okrajové podmínky ([7, str. 45]).

Ve své práci jsem pro simulaci laboratorní úlohy zvolil program RillFEM 2D, který mi byl poskytnut na katedře KEE.

### 5.1 Stručný popis programu RillFEM 2D [7],[18]

Program RillFEM 2D je multifyzikálním programem pro numerické simulace (řešení) fyzikálních problémů založených na metodě konečných prvků. Byl vyvinut zejména pro řešení elektromagnetických polí, ale dále byl doplněn o řešení dalších polí - teplotní (ohřev vsázky), deformační (mechanická namáhání). Jeho nespornou výhodou je řešení nejen

jednoduchých polí, ale řešení i vzájemně sdružených polí, kdy se vzájemně řeší problém jak elektromagnetického pole, tak i pole teplotního. Toto je s výhodou využíváno zejména při řešení problematiky indukčních ohřevů. Další neméně důležitou výhodou programu je poměrně intuitivní ovládání, což je pro většinu techniků přínosné pro získání rychlého přehledu bez hlubších teoretických znalostí ani MKP výpočtů.

Program RillFEM se skládá ze 3 částí:

- **Preprocessor:** S touto částí se setkáme jako první při tvorbě nového projektu (řešeného fyzikálního problému). V preprocesoru provádíme počáteční nadefinování řešeného problému, kdy máme volbu až ze 40 možných problémů (např. elektrostatické pole, elektromagnetické pole, teplotní, deformační či různé sdružené úlohy). Další součástí preprocesoru je zadávání geometrie problému, kdy vkládáním bodů dle geometrie a jejich spojováním docílíme nadefinování geometrie daného problému (mimo jiné je umožněn import a export .dxf souborů). Současně s vytvářením hran geometrie je nezbytné zadat podmínky na rozhraní, okrajové a počáteční podmínky. Dále v preprocesoru je prováděno zadávání materiálových hodnot a určení materiálu pro danou oblast problému (RillFEM disponuje databází normalizovaných materiálů). V neposlední řadě se v preprocesoru provádí definice oblasti a provedení diskretizace problému.
- **Solver:** Provádí vlastní numerické řešení v uzlech diskretizační oblasti daného problému nadefinovaného v preprocesoru.
- **Postprocesor:** V postprocesoru je prováděno zobrazení výsledků. Umožňuje vytvářet plné barevné vyobrazení výsledků, tvorbu isolinií nejen celého problému, ale i dílčích částí problému (např. pouze samotného induktoru apod.). Dále umožňuje vytvářet 2D grafy, zobrazit výsledky časově tranzientních výpočtů a dopočítávání dalších veličin (ztráty, energie elektrického a magnetického pole). Všechny získané výsledky lze exportovat do různých grafických formátů (.bmp, .jpg, .tif) pro další editaci či tisk nebo vytvářet datové soubory pro zpracování v jiných programech.

## 5.2 Postup řešení v programu RillFEM

- Vytvoření projektu 1 Harmonic RZ, zvolen daný kmitočet
- Nadefinování bodů, sestavení hran a definování oblasti včetně zadání podmínek na rozhraní a okrajových podmínek
- Nadefinování materiálu, nastavení materiálu pro dané oblasti včetně nastavení vhodné hodnoty mesh
- Provedení kontroly geometrie, provedeno meshování
- Spuštění solveru
- Před každým vyobrazením výsledků prováděno refinement = zjemnění
- Vyobrazení výsledků pomocí postprocesoru

## 5.3 Simulace laboratorní úlohy - proud 15 A

V simulaci jsem postupoval přesně podle výše uvedeného postupu a v této podkapitole uvedu k některým bodům doplňující informace.

### Základní geometrie - samotný induktor

Tab. 5. 1 Geometrie samotného induktoru

|       | 1      | 2       | 3      | 4       | 5 | 6  | 7 |
|-------|--------|---------|--------|---------|---|----|---|
| r [m] | 0,11   | 0,11    | 0,113  | 0,113   | 0 | 0  | 3 |
| z [m] | 0,1585 | -0,1585 | 0,1585 | -0,1585 | 3 | -3 | 0 |

### Základní geometrie - induktor a svazky transformátorových plechů

Tab. 5. 2 Geometrie induktoru a svazků transformátorových plechů

|       | 1      | 2       | 3      | 4       | 5      | 6       | 7      | 8       | 9 | 10 |
|-------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|---|----|
| r [m] | 0,11   | 0,11    | 0,113  | 0,113   | 0,1225 | 0,1225  | 0,1399 | 0,1399  | 0 | 0  |
| z [m] | 0,1585 | -0,1585 | 0,1585 | -0,1585 | 0,2005 | -0,2875 | 0,2005 | -0,2875 | 3 | -3 |

Rozměry svazků transformátorových plechů:

výška svazků 488 mm

šířka svazků 41 mm

hloubka svazků 35 mm

Pecní induktor jsem nahradil ekvivalentní vrstvou o stejné výšce a tloušťce jako reálný induktor. Pro případ svazků transformátorových plechů jsem provedl totéž s tím rozdílem, že jsem svazky nahradil stínícím válcem o stejné výšce, ale o jiné tloušťce.

Tloušťku tohoto válce jsem určil z celkového objemu svazků transformátorových plechů. Určení jsem provedl takto:

$$\begin{aligned}V_{válec} &= V_{svazky} \\ \pi \cdot v \cdot (r_2^2 - r_1^2) &= 10 \cdot 35 \cdot 41 \cdot 488 \\ \pi \cdot 488 \cdot (r_2^2 - 122,5^2) &= 7002800 \\ r_2 &= 139,907\end{aligned}$$

tloušťka náhradního válce je tedy  $x = r_2 - r_1 = 139,907 - 122,5 = 17,407 \text{ mm}$

Podle tabulek Tab. 5. 1 a Tab. 5. 2 jsem vkládal body geometrie. Vkládání bodů se provádí přes nabídku Preprocesoru, volbou Geometry Builder - Keypoint, kdy můžeme postupně zadat všechny body. Samozřejmě vkládání bodů lze provést též přes pravé tlačítko myši Add KP by click.

Propojení vytvořených bodů se provádí opět přes nabídku Preprocesoru, kdy volbou Geometry Builder - Straight Line se zobrazí nabídka pro zadávání hran geometrie. Po počátečním určení bodů, jenž budou propojeny, se nastaví okrajové podmínky pro danou hranu. V případě hran induktoru a svazků transformátorových plechů jsem nastavil v kolonce Harmonic Magnetic nulové okrajové podmínky. Jinak tomu je v případě osy symetrie a na hranici oblasti (tvořenou půlkružnicí), kde platí tzv. Dirichletova okrajová podmínka  $A = 0$  (Vectory Potencial). Půlkružnice na hranici oblasti je zadávána obdobně jako hrana volbou Geometry Builder - Circle Line, kde se nastaví okrajové body půlkružnice, úhel výseče a počet bodů, ze kterých se půlkružnice bude skládat (já jsem volil 20 bodů).

*- poznámka: Stejně jako u vkládání bodů, lze též při sestavení hran a půlkružnice pracovat s pravým tlačítkem myši, kdy volbou Add Straight Line by click & click (resp. Add Circle Line by click & click) a kliknutím na okrajové body se zobrazí stejná nabídka, jak je výše popsáno.*

Po sestavení geometrie je zapotřebí nadefinovat materiál daných oblastí. Nadefinování se provádí v Preprocesoru volbou Model Builder - Material Modeler, kdy se zobrazí dialogové okno, do kterého lze zadat hodnoty materiálových veličin oblasti a nebo využít databázi normalizovaných materiálů. Máme-li dialogové okno vyplněné, je nutné námi nadefinovaný materiál uložit do lokální knihovny. Samotné vkládání materiálu do oblasti se provádí opět přes Preprocesoru - Model Builder, volbou Attribute a kliknutím do dané oblasti. Zobrazí se dialogové okno, kde se musí uvést, jaký druh materiálu vkládáme (k dispozici je

nabídka materiálů z lokální knihovny), dále zvolit úroveň meshování a v případě, že materiálem protéká proud, zadat zde velikost proudu.

Úroveň mesh se volí maximálně třetina hloubky vniku s přihlédnutím na verzi programu.

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot 4100 \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}} = 0,003515 \text{ m}$$

$$\text{z čehož vyplývá parametr } mesh = \frac{a}{3} = \frac{0,003515}{3} = 0,001172 \text{ m}$$

- **Pro induktor** jsem zvolil Cu\_20grdC z globální knihovny a provedl úpravy. Tento materiál jsem uložil do lokální knihovny

- mesh: 0.002

- celkový proud:  $V = I \cdot N \cdot \sqrt{2} = 15 \cdot 42 \cdot \sqrt{2} = 895.9545 \text{ A}$

- **Pro stínění** jsem zvolil Steel 1.2343; 150°C s relativní permeabilitou 25 000 a vodivostí 0 S/m

- mesh: 0.002

- **Pro okolí** jsem zvolil vzduch a opět uložil do lokální knihovny

- mesh: 0.01

Nyní je daný řešený problém nadefinován a mohl jsem přistoupit k numerickému výpočtu. Před spuštěním Solver jsem provedl kontrolu spojení všech hran a meshování oblasti.

Volba **check out of geometry** , **adaptiv mesh** , **show mesh** , **solve** 

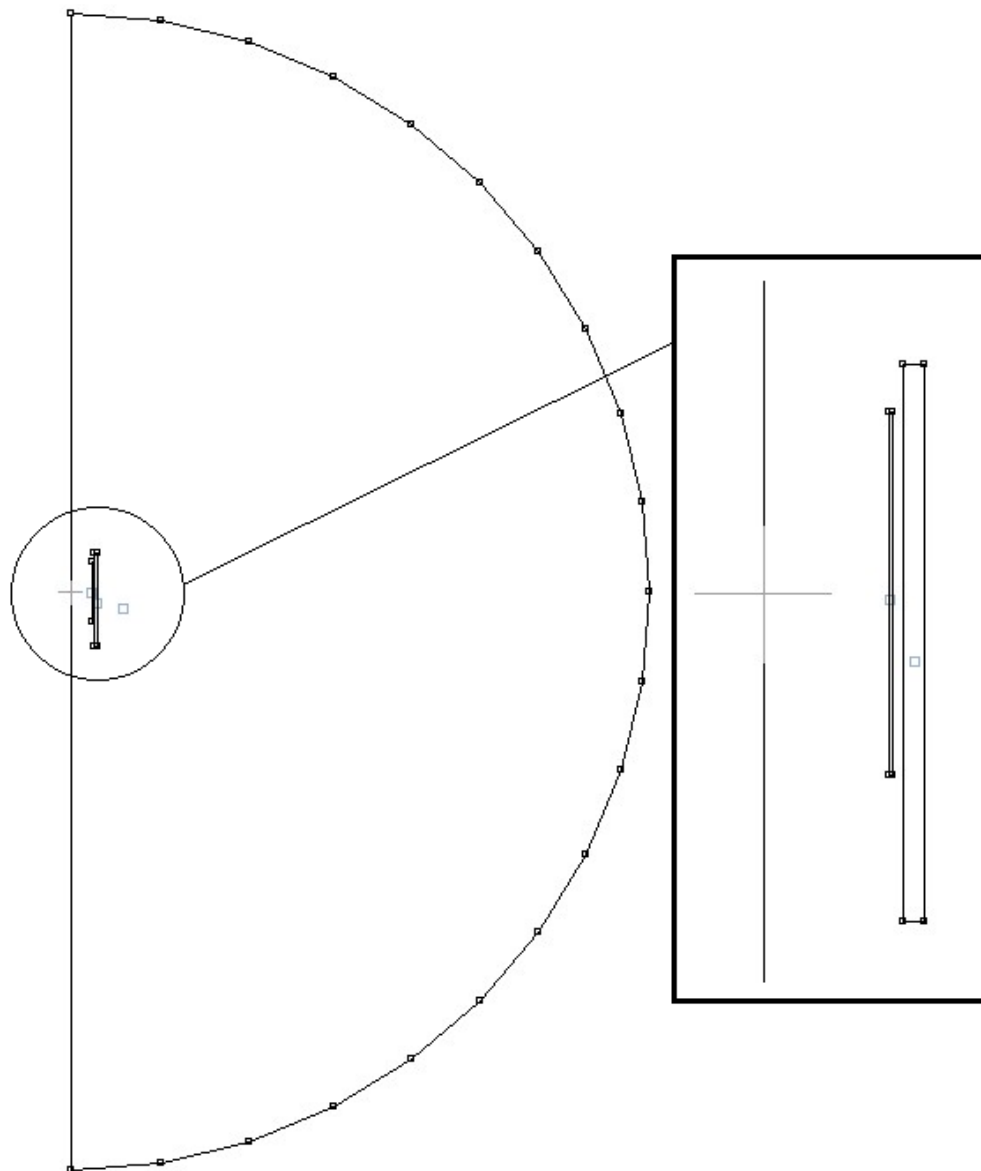
## Vykreslení výsledků

Před každým vykreslením jsem nastavil zjemnění (refinement): POSTPROCESSOR → REFINEMENT → 3 a OK → volba veličiny v adresáři EMRz se soubory .resl01 .

Pro vykreslení rozložení veličin **H**, **B**, **A** jsem postupoval tak, že jsem zvolil v postprocesoru **nodal results**. Zobrazí se dialogové okno, kde jsem si navolil, zda chci hladinové (**areas**) nebo vrstevnicové zobrazení (**lines**). Po kliknutí na **all areas** se zobrazí adresář EMRz, ve kterém jsou uloženy výsledky veličin **H**, **B**, **A** a jiné. Po volbě veličiny se zobrazí daná veličina v barevné škále. V postprocesoru je dále možné vykreslit 2D graf veličiny volbou **2D graph by Path** (volba veličiny je stejná jako při **nodal results**).

Pomocí záložky **PlotControls** jsem provedl export vykreslených výsledků do formátu .jpg.

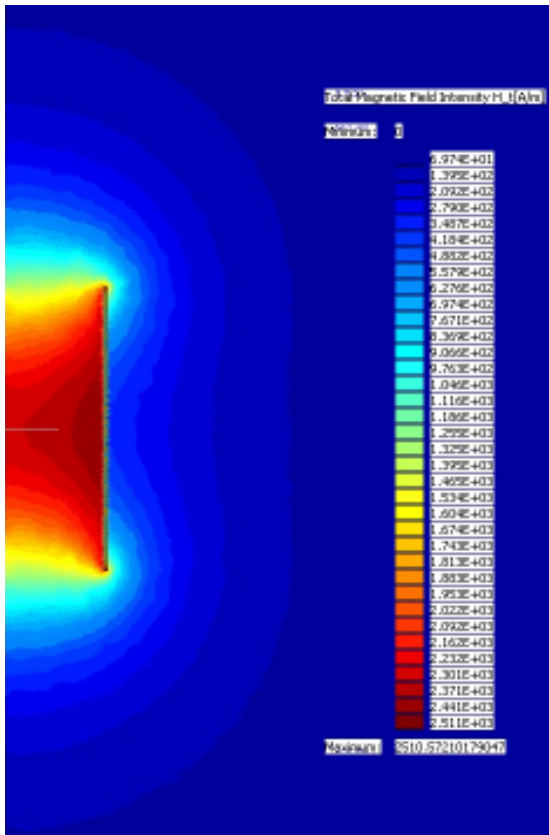
Pro jednoduché konstrukce indukčních kelímkových pecí lze řešit problém jako osově symetrický. Na Obr. 5. 1 je viděn řešený problém v programu RillFEM 2D pro případ se svazky transformátorových plechů.



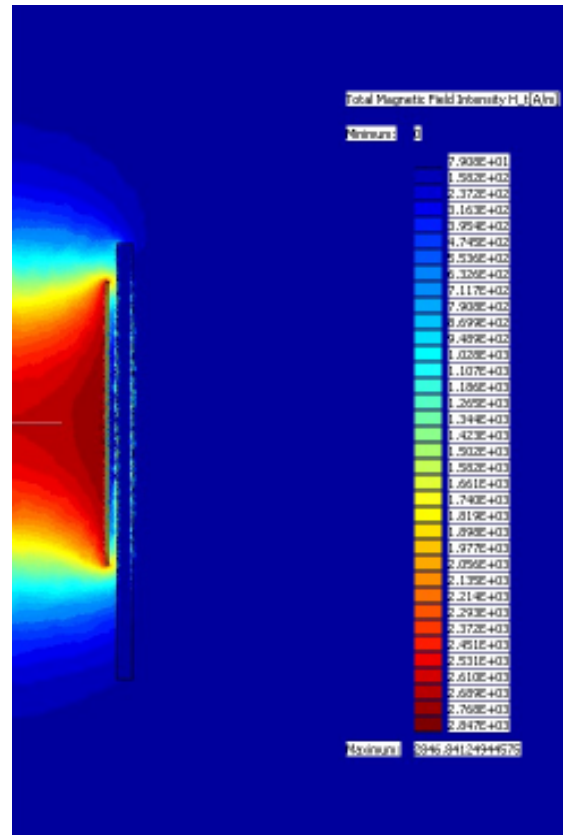
Obr. 5. 1 Celková geometrie včetně detailu na induktor a náhradní válec respektující svazky transformátorových plechů

Negativem simulace v RillFEMu 2D je frekvenční nezávislost, kdy ekvivalentní vrstvu za pecní induktor nelze jinak udělat než jako jeden celek (nelze vyjádřit závit) a nelze tudíž nastavit vodivost mědi (projevil by se do značné míry vliv skin efektu). V následujících průbězích z RillFEMu alespoň prokážu vliv stínění svazků transformátorových plechů na magnetické pole kolem induktoru.

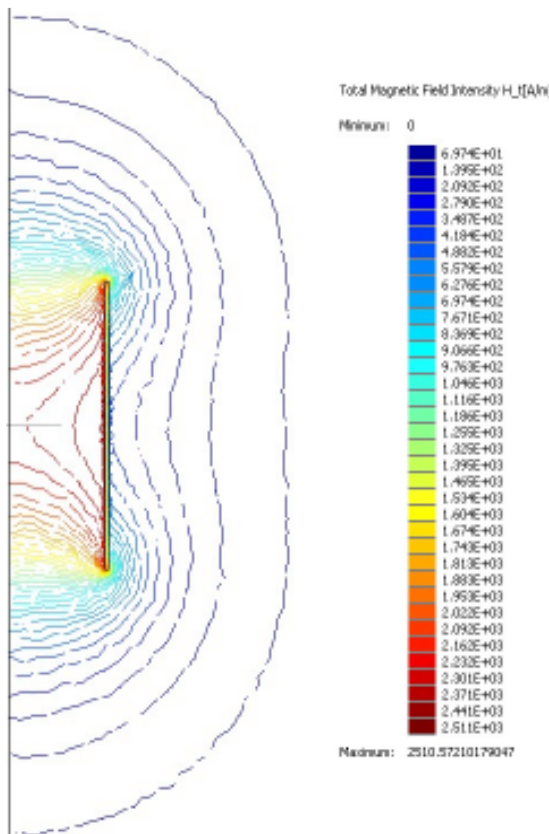
Srovnání průběhu  $H$  bez stínění a se svazky transformátorových plechů



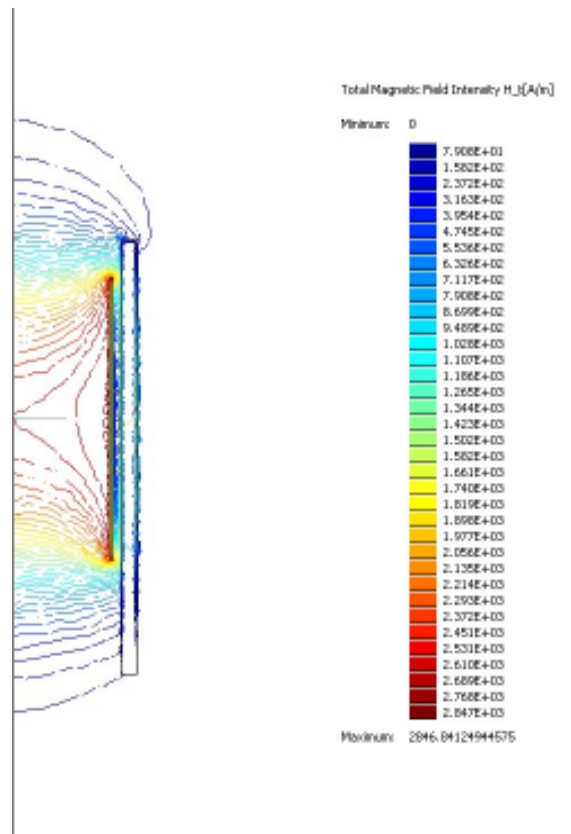
Obr. 5. 2 Intenzita magnet. pole  $H$ , bez stínění



Obr. 5. 3 Intenzita magnet. pole  $H$ , se stíněním

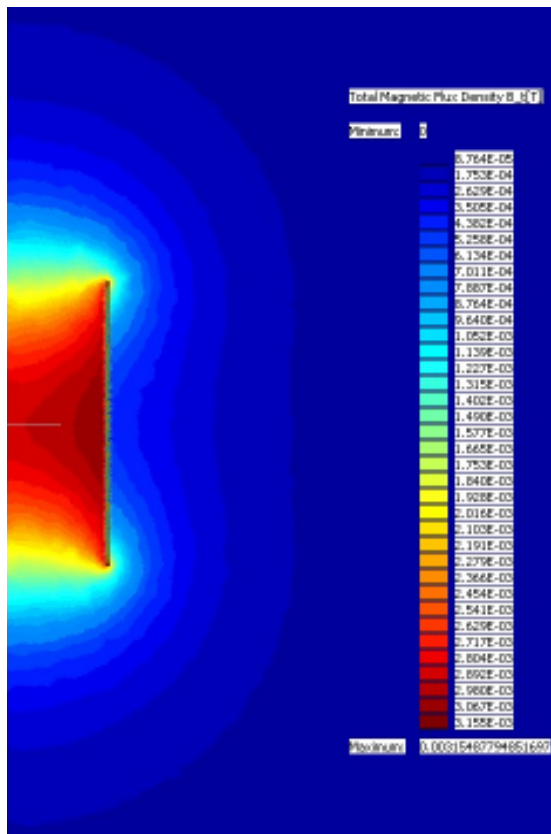


Obr. 5. 4 Intenzita magnet. pole  $H$ , bez stínění - isolinie

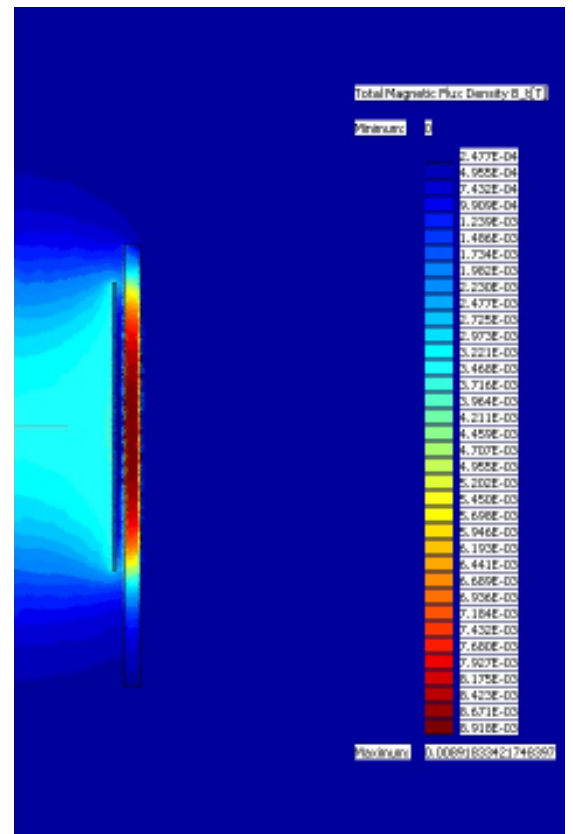


Obr. 5. 5 Intenzita magnet. pole  $H$ , se stíněním - isolinie

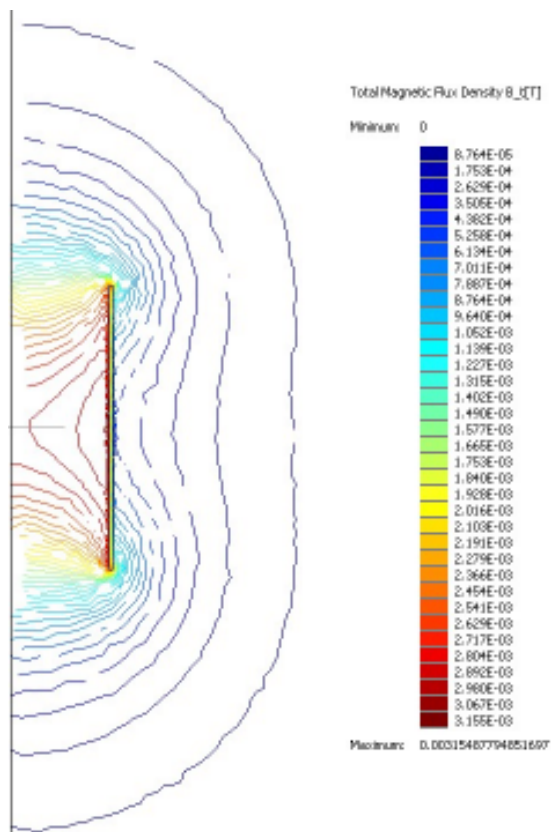
Srovnání průběhu  $B$  bez stínění a se svazky transformátorových plechů



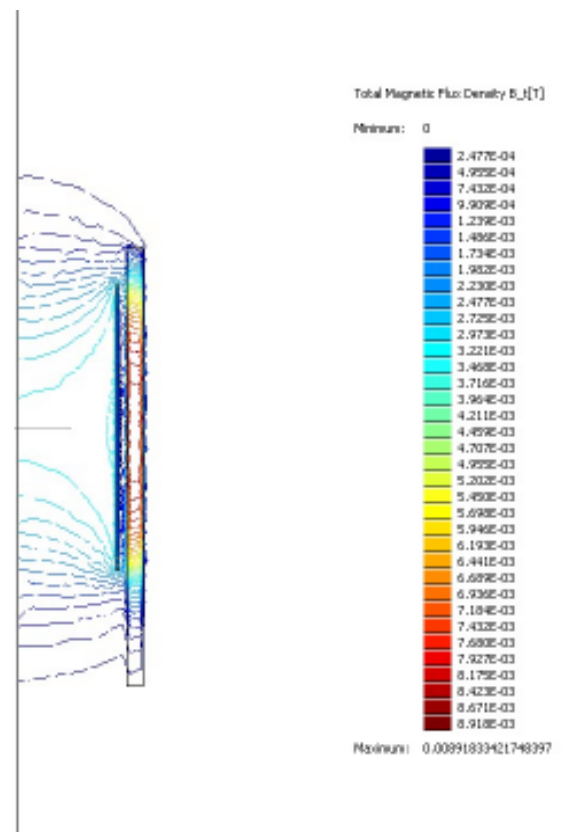
Obr. 5. 6 Magnetická indukce  $B$ , bez stínění



Obr. 5. 7 Magnetická indukce  $B$ , se stíněním

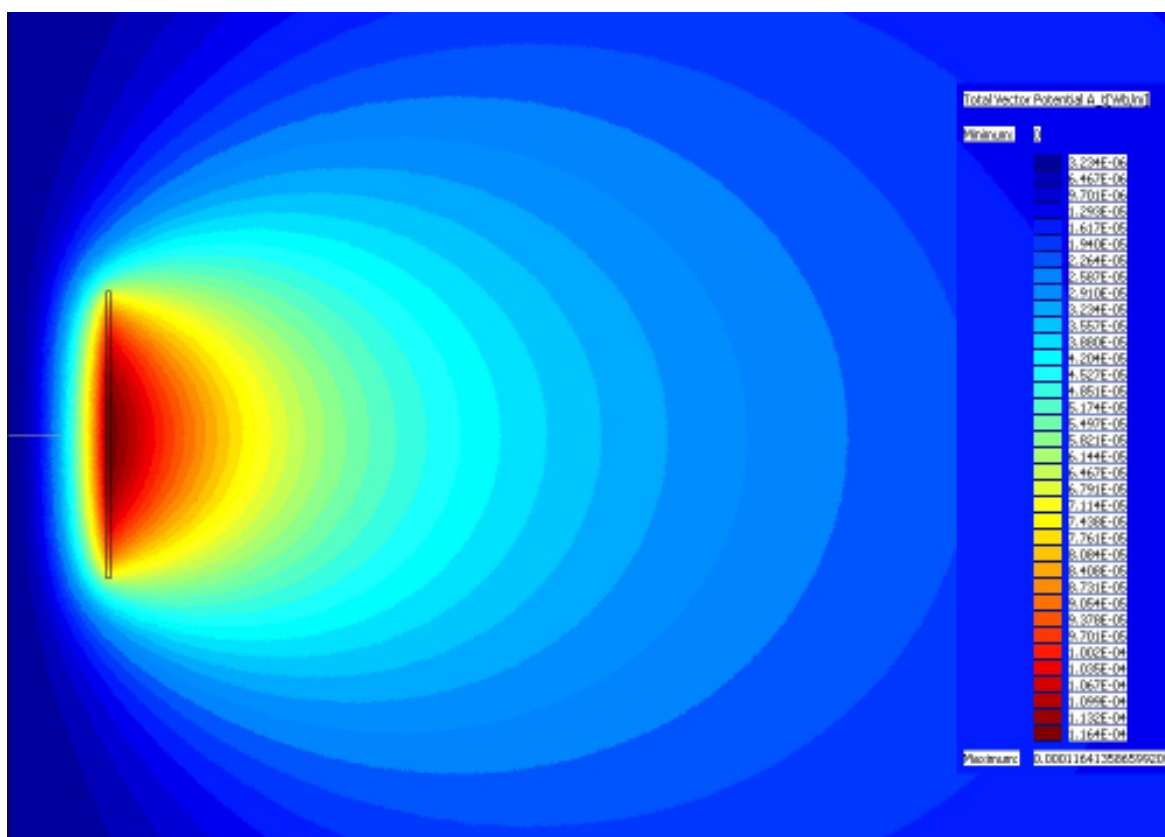
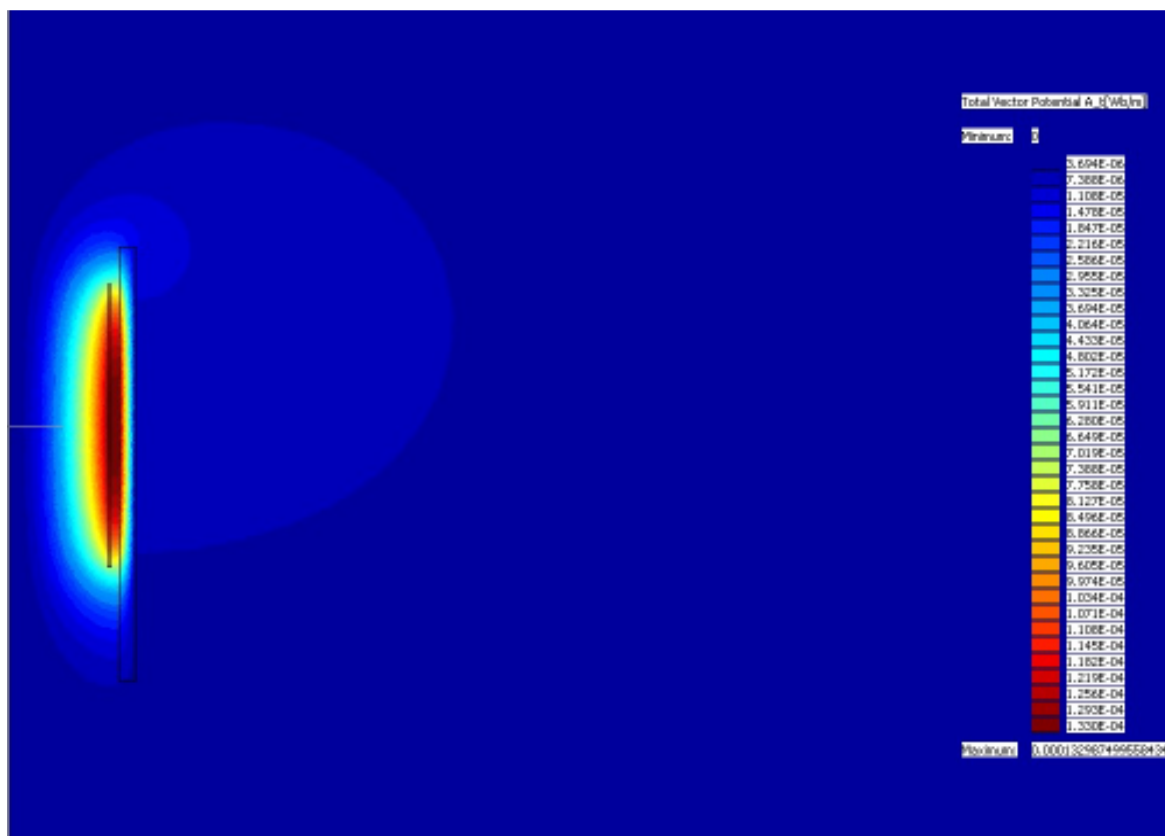


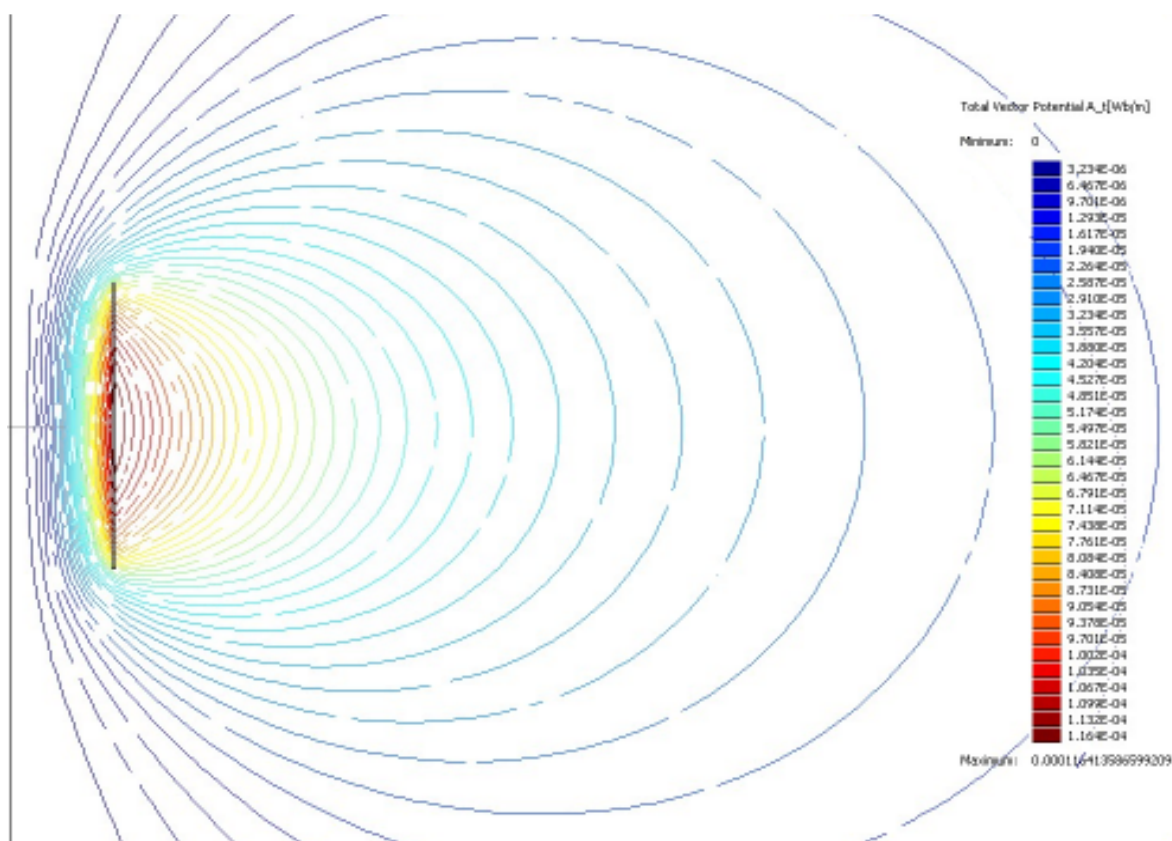
Obr. 5. 8 Magnetická indukce  $B$ , bez stínění - isolinie



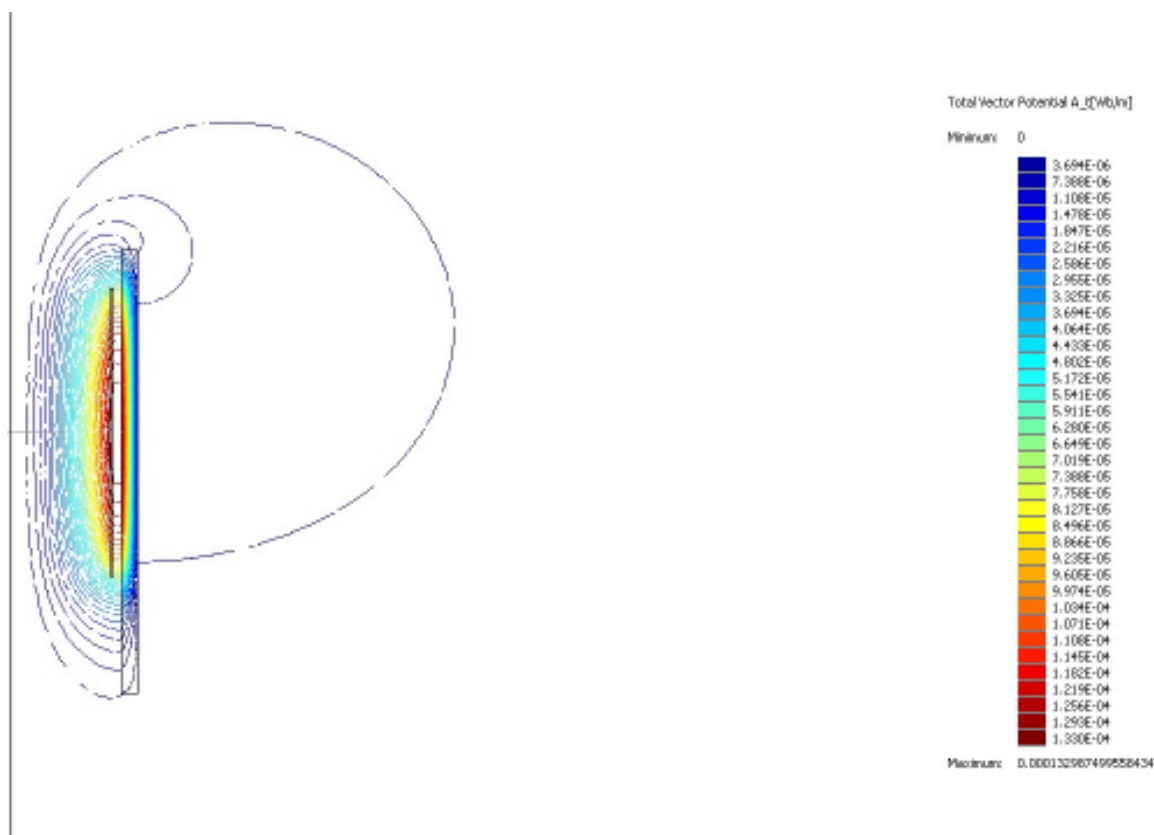
Obr. 5. 9 Magnetická indukce  $B$ , se stíněním - isolinie



Srovnání průběhu  $A$  bez stínění a se svazky transformátorových plechůObr. 5. 10 Magnetický vektorový potenciál  $A$ , bez stíněníObr. 5. 11 Magnetický vektorový potenciál  $A$ , se stíněním



Obr. 5. 12 Magnetický vektorový potenciál  $A$ , bez stínění - isolinie



Obr. 5. 13 Magnetický vektorový potenciál  $A$ , se stíněním - isolinie

## 5.4 Simulace laboratorní úlohy - proud 31 A

Postup simulace pro velikost proudu 31 A je naprosto stejný jako pro proud 15 A. Jen se změní celkový proud v nastavení induktoru (viz níže). Ve zkratce uvedu základní informace.

### Základní geometrie - samotný induktor

Tab. 5.3 Geometrie samotného induktoru

|       | 1      | 2       | 3      | 4       | 5 | 6  | 7 |
|-------|--------|---------|--------|---------|---|----|---|
| r [m] | 0,11   | 0,11    | 0,113  | 0,113   | 0 | 0  | 3 |
| z [m] | 0,1585 | -0,1585 | 0,1585 | -0,1585 | 3 | -3 | 0 |

### Základní geometrie - induktor a svazky transformátorových plechů

Tab. 5.4 Geometrie induktoru a svazků transformátorových plechů

|       | 1      | 2       | 3      | 4       | 5      | 6       | 7      | 8       | 9 | 10 |
|-------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|---|----|
| r [m] | 0,11   | 0,11    | 0,113  | 0,113   | 0,1225 | 0,1225  | 0,1399 | 0,1399  | 0 | 0  |
| z [m] | 0,1585 | -0,1585 | 0,1585 | -0,1585 | 0,2005 | -0,2875 | 0,2005 | -0,2875 | 3 | -3 |

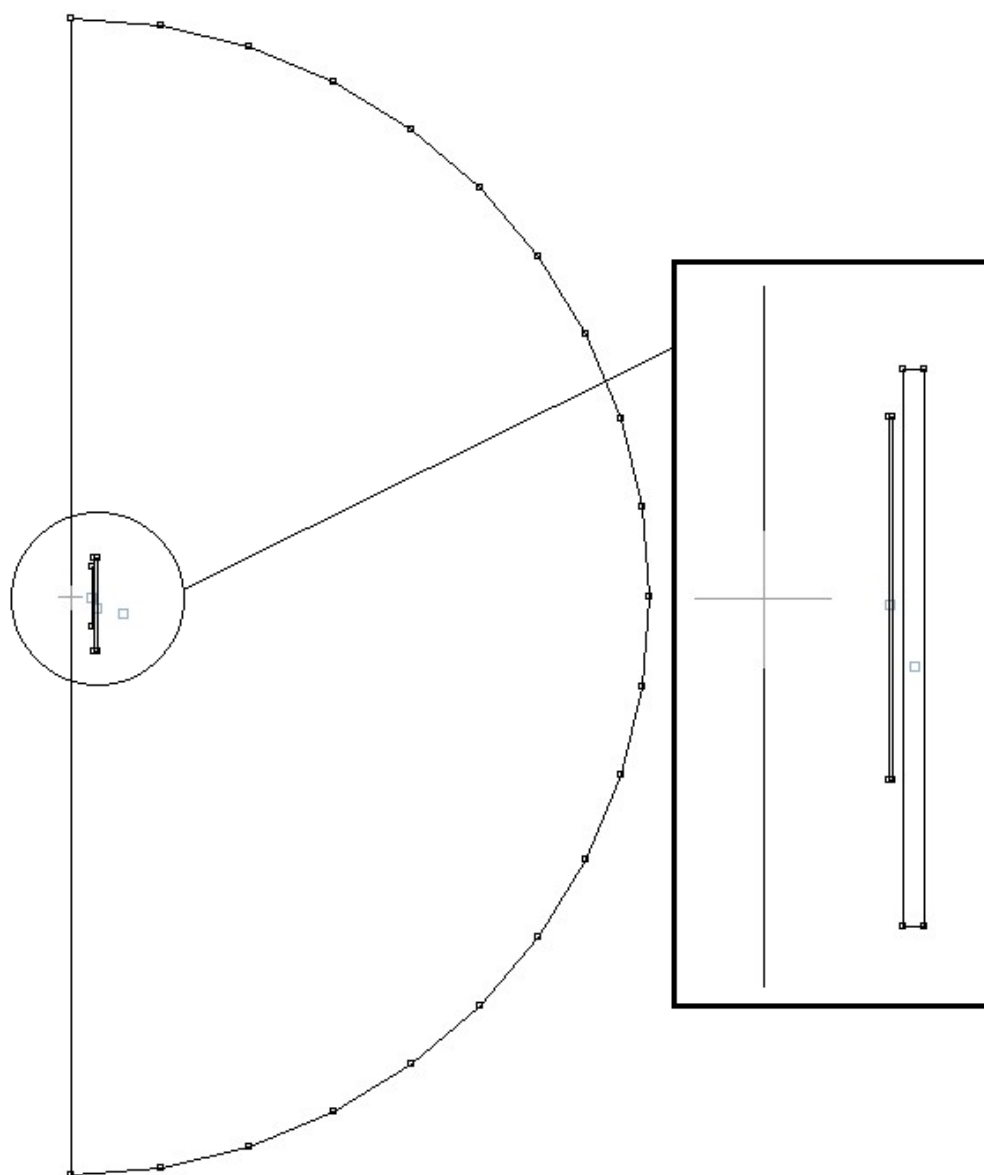
Úroveň mesh se volí maximálně třetina hloubky vniku s přihlédnutím na verzi programu.

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot 4100 \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}} = 0,003515 \text{ m}$$

$$\text{z čehož vyplývá parametr } mesh = \frac{a}{3} = \frac{0,003515}{3} = 0,001172 \text{ m}$$

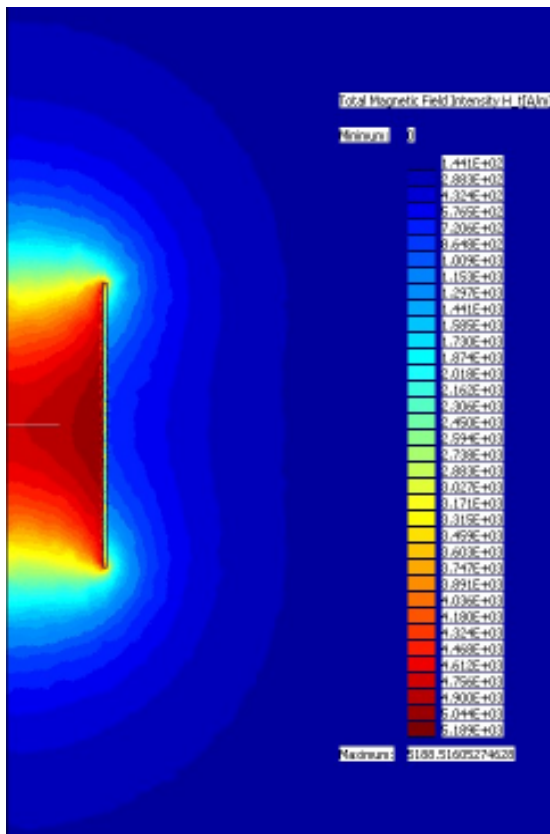
- **Pro induktor** jsem zvolil Cu\_20grdC z globální knihovny a provedl úpravy. Tento materiál jsem uložil do lokální knihovny
  - mesh: 0.002
  - celkový proud:  $V = I \cdot N \cdot \sqrt{2} = 31 \cdot 42 \cdot \sqrt{2} = 1841.3061 \text{ A}$
- **Pro stínění** jsem zvolil Steel 1.2343; 150°C s relativní permeabilitou 25 000 a vodivostí 0 S/m
  - mesh: 0.002
- **Pro okolí** jsem zvolil vzduch a opět uložil do lokální knihovny
  - mesh: 0.01

Na Obr. 5. 14 je viděn řešený problém v programu RillFEM 2D pro případ se svazky transformátorových plechů.

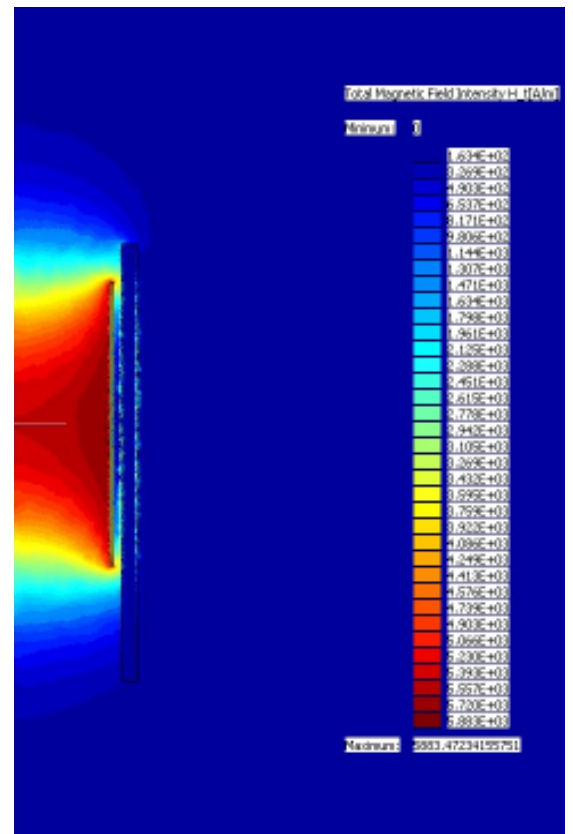


Obr. 5. 14 Celková geometrie včetně detailu na induktor a náhradní válec respektující svazky transformátorových plechů

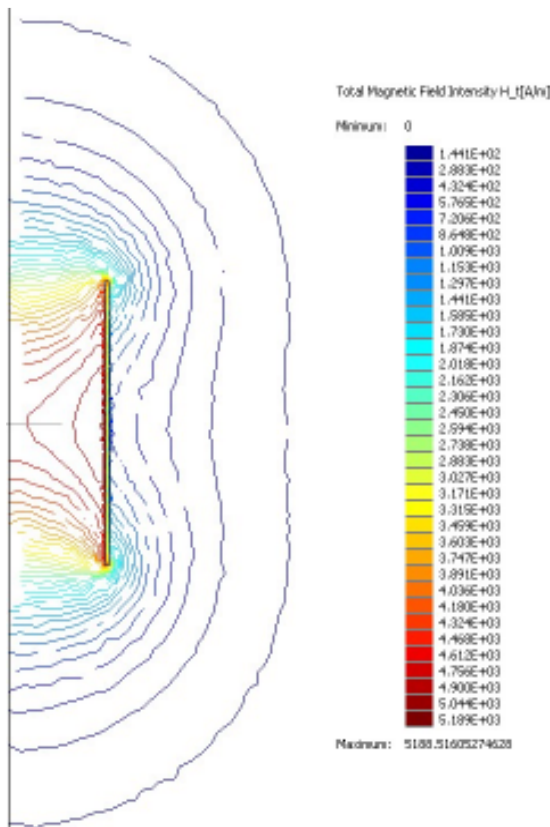
Srovnání průběhu  $H$  bez stínění a se svazky transformátorových plechů



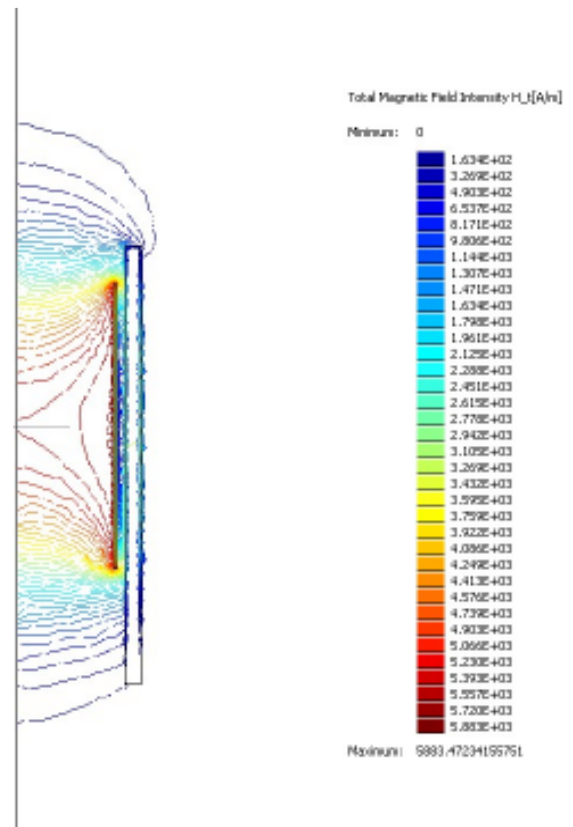
Obr. 5.15 Intenzita magnet. pole  $H$ , bez stínění



Obr.5.16 Intenzita magnet. pole  $H$ , se stíněním

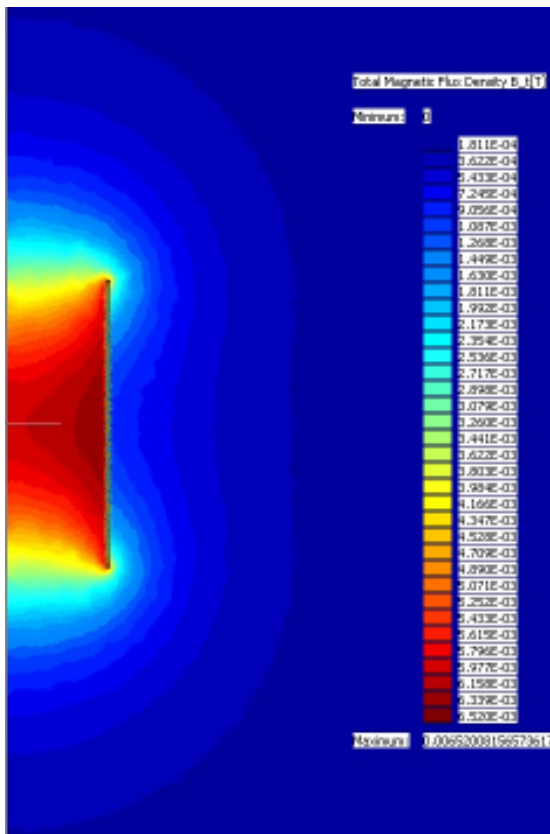


Obr. 5.17 Intenzita magnet. pole  $H$ , bez stínění - isolinie

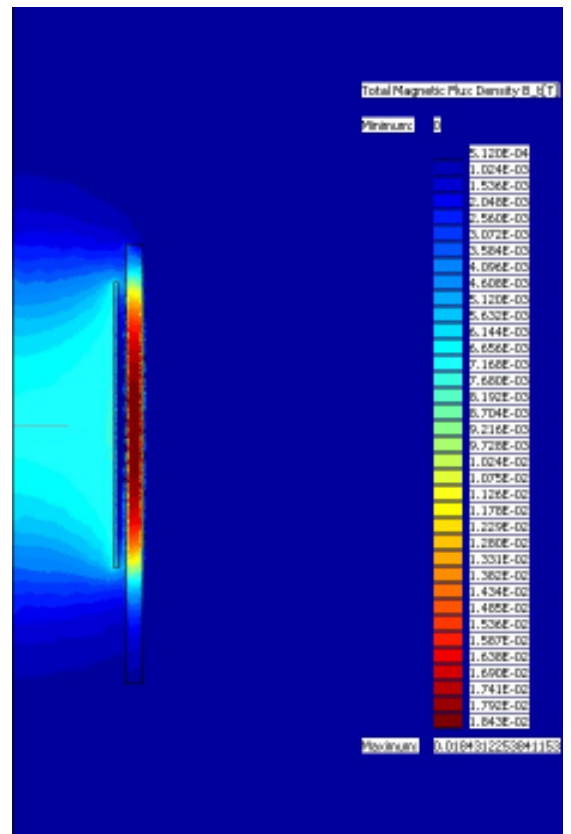


Obr.5.18 Intenzita magnet. pole  $H$ , se stíněním - isolinie

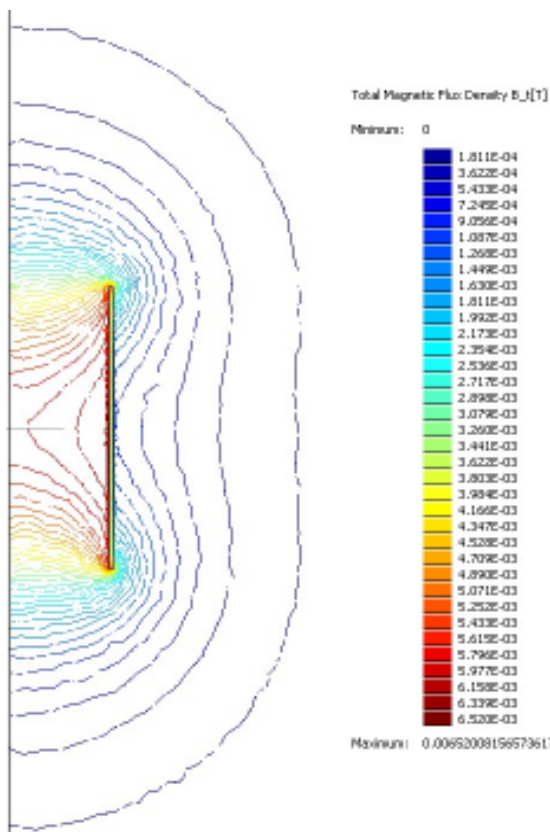
Srovnání průběhu  $B$  bez stínění a se svazky transformátorových plechů



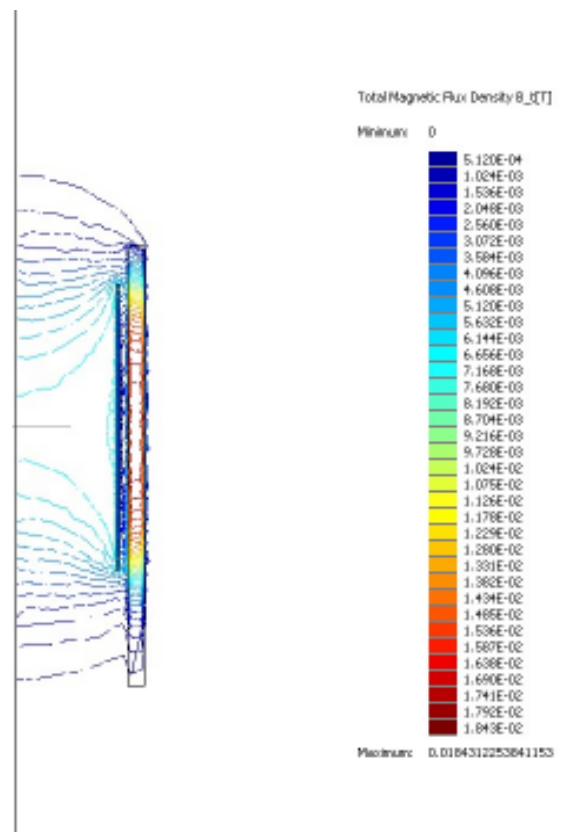
Obr. 5. 19 Magnetická indukce  $B$ , bez stínění



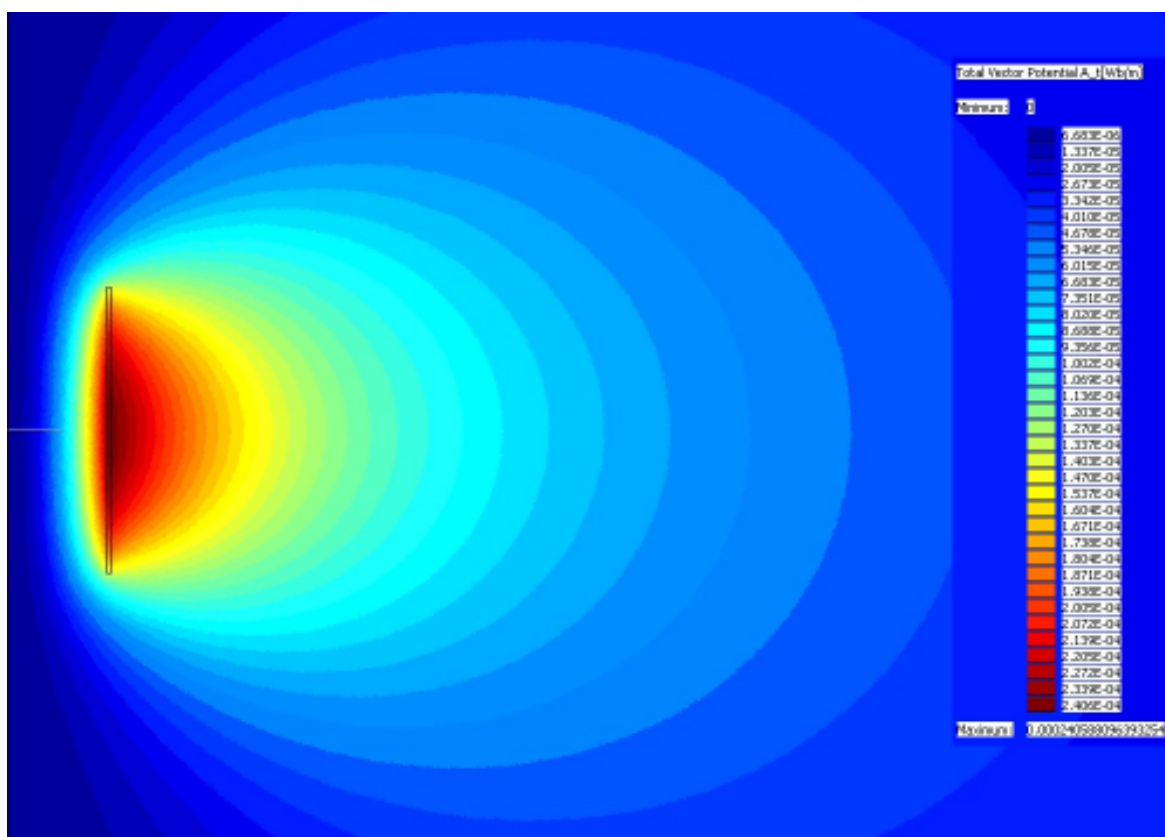
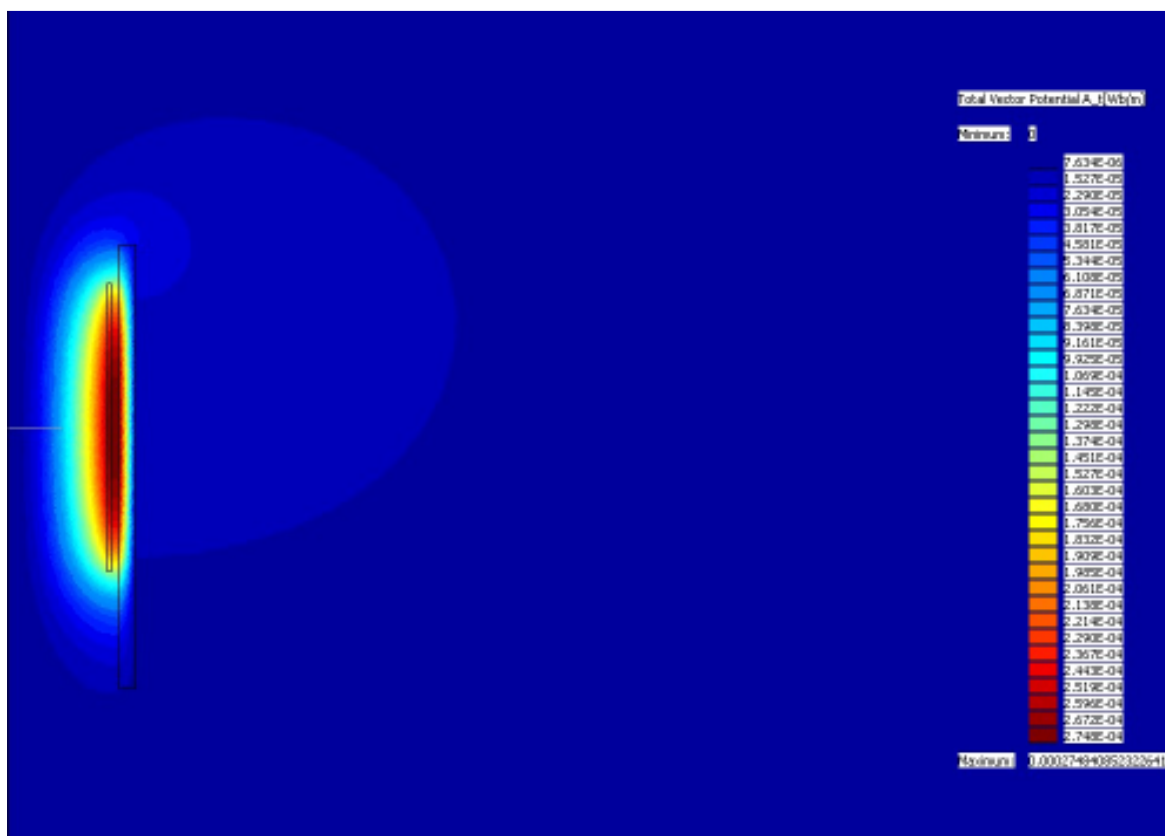
Obr. 5. 20 Magnetická indukce  $B$ , se stíněním

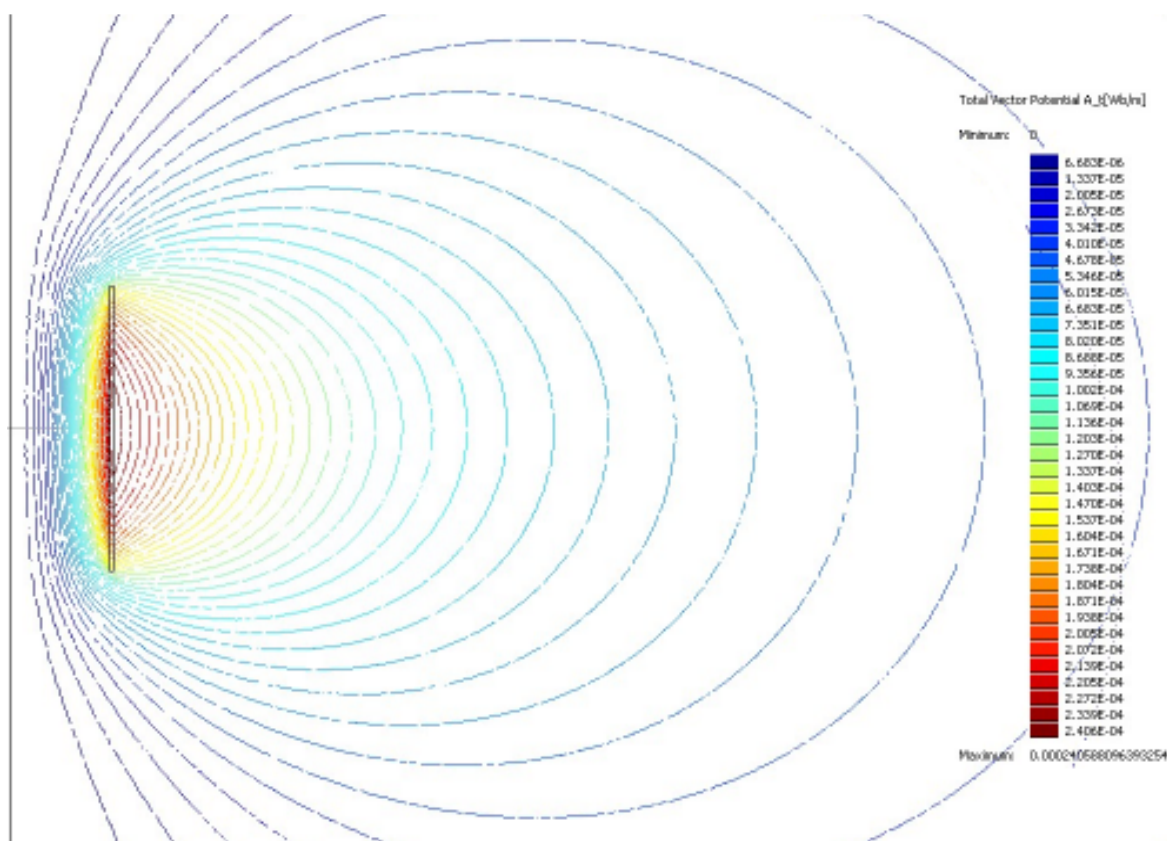


Obr. 5. 21 Magnetická indukce  $B$ , bez stínění - isolinie

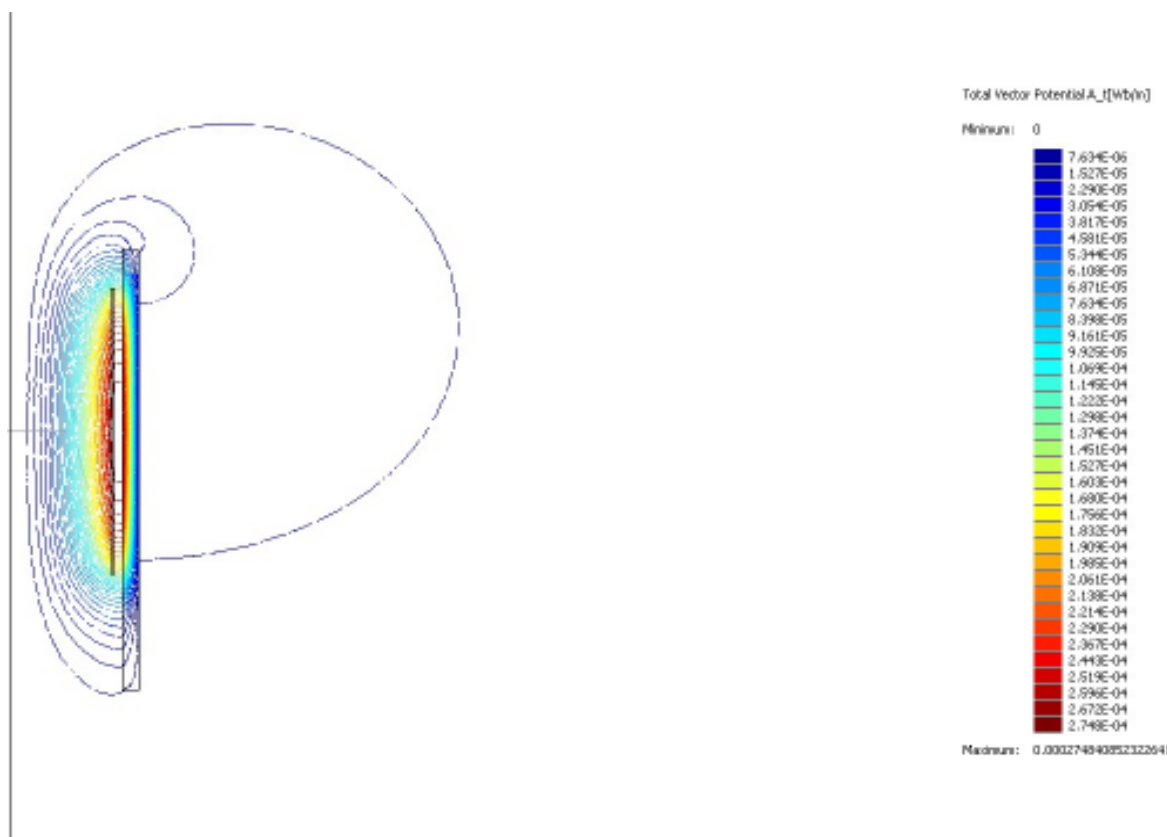


Obr. 5. 22 Magnetická indukce  $B$ , se stíněním - isolinie

Srovnání průběhu  $A$  bez stínění a se svazky transformátorových plechůObr. 5. 23 Magnetický vektorový potenciál  $A$ , bez stíněníObr. 5. 24 Magnetický vektorový potenciál  $A$ , se stíněním



Obr. 5. 25 Magnetický vektorový potenciál  $A$ , bez stínění - isolinie



Obr. 5. 26 Magnetický vektorový potenciál  $A$ , se stíněním - isolinie



## 6 Zhodnocení výsledků a důsledky stínění pro provoz

Jelikož nemohu korektně zhodnotit a porovnat výsledky měření s hodnotami ze simulace, ani pomocí indukční sondy, která se porouchala v průběhu měření, rozhodl jsem se pro zhodnocení výsledků ve formě procentuálního vyjádření účinnosti stínění svazků dle vzorce  $\frac{(H_{BezS} - H_{SeS})}{H_{BezS}} \cdot 100$ . V níže uvedených tabulkách je vyjádřen vliv stínění. Čím je hodnota v procentech větší, tím je vlivem stínění intenzita magnetického pole v daném bodě menší.

Tab. 6. 1 Procentuální srovnání stínění při kmitočtu 50 Hz

| H [%] | A     | B     | C     | D     | E     | F     | G     | H     | I     | J     | K     | L     | M     | N     |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1     | 71,05 | 89,93 | 91,69 | 88,67 | 88,54 | 88,30 | 89,56 | 84,76 | 79,68 | 79,67 | 79,94 | 79,20 | 79,77 | 78,64 |
| 2     | 93,80 | 94,69 | 95,38 | 92,17 | 90,18 | 90,12 | 87,32 | 86,65 | 82,30 | 82,32 | 82,75 | 81,33 | 81,69 | 81,36 |
| 3     | 94,36 | 95,42 | 96,31 | 91,96 | 90,18 | 87,50 | 86,06 | 83,00 | 80,94 | 78,99 | 77,80 | 78,71 | 79,45 | 79,70 |
| 4     | 94,98 | 97,28 | 94,95 | 93,12 | 88,69 | 86,91 | 85,64 | 81,53 | 77,68 | 78,02 | 74,99 | 75,05 | 75,85 | 76,77 |
| 5     | 95,75 | 96,64 | 94,46 | 94,24 | 90,06 | 88,34 | 83,70 | 81,21 | 76,16 | 75,01 | 72,28 | 71,17 | 72,41 | 74,62 |
| 6     | 94,03 | 95,39 | 93,97 | 93,39 | 88,38 | 87,00 | 83,23 | 77,92 | 73,80 | 70,07 | 66,14 | 67,18 | 67,82 | 70,49 |
| 7     | 92,37 | 94,71 | 93,89 | 93,33 | 89,12 | 84,66 | 81,55 | 76,89 | 69,74 | 64,79 | 60,05 | 59,56 | 61,80 | 64,40 |
| 8     | 95,06 | 95,30 | 94,58 | 92,97 | 89,93 | 86,43 | 81,56 | 74,18 | 66,04 | 57,61 | 50,51 | 49,79 | 52,18 | 56,97 |
| 9     | 94,21 | 93,50 | 93,50 | 93,28 | 91,80 | 88,44 | 84,43 | 72,37 | 60,56 | 46,39 | 38,46 | 36,44 | 40,76 | 46,60 |
| 10    | 94,34 | 94,67 | 94,52 | 93,83 | 92,49 | 91,68 | 88,26 | 77,63 |       | 23,07 | 16,55 | 19,56 | 20,61 | 28,39 |
| 11    | 95,62 | 94,03 | 93,92 | 94,65 | 93,57 | 94,02 | 92,86 |       |       | -2,67 | 0,30  | 0,63  | 1,65  | -6,87 |
| 12    | 92,92 | 94,94 | 94,86 | 94,78 | 94,83 | 96,07 | 96,52 |       |       |       |       |       |       |       |
| 13    | 93,33 | 94,12 | 94,93 | 96,28 | 95,92 | 96,99 | 97,08 |       |       |       |       |       |       |       |
| 14    | 93,41 | 94,16 | 94,45 | 95,34 | 96,03 | 97,23 | 97,48 |       |       |       |       |       |       |       |

Tab. 6. 2 Procentuální srovnání stínění při kmitočtu 4100 Hz

| H [%] | A     | B     | C     | D     | E     | F     | G     | H     | I     | J     | K     | L     | M      | N     |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 1     | 85,41 | 87,81 | 86,00 | 56,08 | 67,47 | 52,42 | 80,57 | 77,25 | 70,93 | 74,28 | 64,83 | 5,80  | -39,21 | 78,72 |
| 2     | 86,48 | 80,99 | 84,78 | 54,16 | 61,46 | 59,04 | 78,63 | 76,72 | 76,61 | 69,21 | 66,78 | 23,39 | 2,70   | 74,03 |
| 3     | 82,47 | 88,34 | 86,01 | 54,27 | 66,67 | 59,34 | 75,90 | 72,98 | 71,12 | 68,82 | 67,84 | 32,00 | 19,19  | 69,26 |
| 4     | 77,96 | 85,68 | 85,35 | 59,39 | 67,95 | 64,06 | 77,32 | 70,98 | 70,85 | 73,38 | 70,05 | 46,55 | 35,07  | 60,82 |
| 5     | 76,76 | 84,06 | 82,65 | 62,92 | 69,47 | 66,32 | 76,36 | 73,89 | 71,82 | 68,23 | 66,05 | 54,65 | 64,00  | 65,79 |
| 6     | 77,81 | 83,37 | 82,78 | 67,13 | 72,11 | 71,27 | 76,48 | 72,87 | 68,68 | 63,90 | 61,46 | 55,62 | 55,78  | 65,37 |
| 7     | 80,20 | 83,26 | 81,94 | 70,58 | 75,27 | 72,28 | 76,90 | 73,30 | 66,66 | 60,51 | 59,82 | 58,00 | 57,16  | 61,84 |
| 8     | 77,57 | 83,85 | 85,27 | 73,03 | 76,96 | 75,67 | 77,62 | 71,99 | 65,01 | 57,45 | 52,43 | 48,54 | 50,64  | 57,90 |
| 9     | 79,69 | 83,95 | 85,53 | 74,79 | 79,19 | 79,30 | 79,19 | 72,97 | 59,37 | 49,56 | 43,13 | 43,99 | 39,70  | 48,32 |
| 10    | 80,52 | 85,22 | 86,54 | 76,55 | 80,29 | 83,14 | 82,97 | 76,00 |       | 33,00 | 24,52 | 28,06 | 27,43  | 27,46 |
| 11    | 88,22 | 85,74 | 87,13 | 79,58 | 82,19 | 84,72 | 87,38 |       |       | 13,13 | 5,34  | 10,79 | 6,20   | 4,56  |
| 12    | 87,55 | 86,94 | 87,86 | 82,08 | 82,96 | 84,53 | 88,76 |       |       |       |       |       |        |       |
| 13    | 87,35 | 87,93 | 86,88 | 81,64 | 83,64 | 84,48 | 88,52 |       |       |       |       |       |        |       |
| 14    | 86,70 | 87,94 | 86,73 | 83,49 | 84,15 | 84,98 | 87,96 |       |       |       |       |       |        |       |

Tab. 6. 3 Procentuální srovnání stínění při kmitočtu 10000 Hz

| H [%] | A     | B     | C     | D     | E     | F     | G     | H     | I     | J     | K     | L     | M     | N     |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1     | 83,04 | 71,31 | 64,88 | 56,71 | 73,26 | 55,46 | 53,38 | 74,16 | 76,64 | 83,42 | 72,35 | 71,11 | 63,78 | 48,61 |
| 2     | 82,77 | 73,01 | 65,16 | 49,74 | 74,09 | 61,45 | 56,96 | 77,70 | 76,76 | 77,39 | 71,91 | 71,85 | 66,30 | 46,45 |
| 3     | 83,89 | 72,64 | 65,95 | 50,06 | 72,67 | 64,98 | 53,89 | 67,16 | 75,98 | 75,54 | 72,44 | 70,50 | 55,67 | 63,74 |
| 4     | 83,64 | 75,43 | 66,85 | 75,22 | 73,60 | 68,96 | 65,02 | 69,40 | 72,27 | 70,47 | 70,21 | 70,88 | 68,56 | 59,54 |
| 5     | 82,62 | 76,40 | 70,24 | 78,06 | 73,99 | 75,50 | 72,26 | 68,50 | 69,88 | 68,21 | 68,91 | 66,78 | 63,15 | 67,50 |
| 6     | 82,99 | 78,42 | 71,92 | 79,80 | 75,94 | 73,64 | 74,22 | 68,46 | 72,41 | 68,04 | 65,87 | 65,59 | 63,96 | 64,53 |
| 7     | 83,84 | 80,89 | 74,50 | 80,77 | 78,27 | 75,66 | 78,02 | 70,66 | 67,44 | 63,67 | 63,25 | 64,11 | 63,04 | 62,55 |
| 8     | 82,96 | 80,53 | 76,71 | 80,24 | 79,64 | 77,43 | 76,10 | 70,88 | 62,42 | 61,24 | 57,44 | 54,80 | 54,11 | 58,48 |
| 9     | 83,70 | 81,06 | 77,55 | 80,74 | 80,76 | 79,74 | 78,72 | 75,41 | 68,68 | 54,22 | 44,67 | 40,98 | 38,54 | 51,44 |
| 10    | 84,61 | 83,38 | 78,78 | 82,40 | 82,48 | 83,16 | 83,46 | 80,67 |       | 41,04 | 29,51 | 29,26 | 23,72 | 26,45 |
| 11    | 85,46 | 83,54 | 78,21 | 84,80 | 84,20 | 85,35 | 87,28 |       |       | 6,35  | 20,04 | 15,52 | 10,05 | 11,20 |
| 12    | 86,74 | 83,22 | 80,18 | 85,71 | 84,70 | 86,21 | 88,03 |       |       |       |       |       |       |       |
| 13    | 86,18 | 86,99 | 81,00 | 85,42 | 86,49 | 86,24 | 88,15 |       |       |       |       |       |       |       |
| 14    | 85,86 | 84,35 | 80,84 | 85,08 | 85,87 | 86,46 | 87,98 |       |       |       |       |       |       |       |

Největší účinnost stínění dle naměřených hodnot jsem dosáhl při kmitočtu 50 Hz (hodnoty v tabulkách odpovídají hodnotám při proudu 31 A, při proudu 15 A jsem dospěl k obdobným výsledkům, proto je zde neuvádím). Průměrná hodnota procentuálního rozdílu činí pro 50 Hz 79,46 %; pro 4100 Hz 67,68 % a pro 10000 Hz 69,83 %. Úroveň stínění při použití vyššího kmitočtu je nižší, rozdíl ve stínění při kmitočtech 4 100 Hz a 10 000 Hz není až tak velký. V příloze VIII jsou přiložena srovnání procentuálních rozdílů stínění použitých kmitočtů ve vybraných sloupcích a řádcích. Zde musím poukázat na možné nepřesné hodnoty, které mohou být způsobené jednak samotným odečítáním na měřicí desce, kdy velmi záleží na umístění a nasměrování měřicí cívky (toto platí zejména v malé vzdálenosti od induktoru). Ale také jak se ukázalo, tím, že přívodní kabel ke křížové měřicí cívce byl nešťastně zvolen pro tyto účely (krátká nezkroucená dvojlinka), která vnáší nepřesnost do měření.

Přesto lze z naměřených hodnot posoudit chování stínění svazky transformátorových plechů vně induktoru, kdy úroveň stínění se na kraji měřicí desky pohybuje kolem 90 %. Dále z výše uvedených tabulek si lze všimnout klesající tendence procentuálního rozdílu  $H$  v ose induktoru (sloupec L, M). To je důsledek působení svazků transformátorových plechů. Jak uvádím v teoretické části, svazky způsobují zvýšení magnetického toku buzeného induktorem, čím se zvýší vlastní indukčnost induktoru a intenzita magnetického pole. V Tab. 6. 4<sup>4</sup> uvádím hodnoty naměřené uvnitř induktoru k prokázání tohoto jevu.

<sup>4</sup> měření bylo prováděno v rámci měření části diplomové práce Bc. Michala Tajera, hodnoty byly použity pouze pro toto zhodnocení

Tab. 6. 4 Srovnání  $H$  uvnitř induktoru

| f [Hz]    | Sloupec L |          |          |                |  | Sloupec M |          |          |                |
|-----------|-----------|----------|----------|----------------|--|-----------|----------|----------|----------------|
|           | řádek     | induktor | stínění  | srovnání       |  | řádek     | induktor | stínění  | srovnání       |
| 4 100 Hz  | 13        | 5293,065 | 5521,214 | <b>-4,31</b>   |  | 13        | 5534,397 | 5692,519 | <b>-2,857</b>  |
|           | 14        | 5608,68  | 6350,835 | <b>-13,232</b> |  | 14        | 6023,146 | 6192,947 | <b>-2,819</b>  |
| 10 000 Hz | 13        | 3089,219 | 3720,127 | <b>-20,423</b> |  | 13        | 3211,302 | 4010,867 | <b>-24,898</b> |
|           | 14        | 3282,088 | 4298,182 | <b>-30,959</b> |  | 14        | 3200,933 | 4303,808 | <b>-34,455</b> |

Zde je již výrazný rozdíl. S vyšším kmitočtem dosahují vyššího procentuálního rozdílu  $H$  uvnitř induktoru.

Zvýšení magnetického toku vede zejména ke zvýšení účinnosti pece a tedy k efektivitě tavby, což je z energetického hlediska velmi vítavé. Z energetického hlediska se musí při indukčním tavení brát v úvahu, že indukční pece jsou nejčastěji jednofázové a vnáší do sítě nesymetrickou zátěž. Proto je nutné připojovat indukční pece přes symetrizační člen (viz Příloha V, Obr. 21). Z ekologického hlediska nejsou indukční pece v porovnání s ostatními typy pecí zvlášť nebezpečné. Vliv stínění na ekonomiku je také zjevný, kdy vyšší účinnost zlepšuje ekonomiku tavby. Z druhého pohledu stínění přináší nemalé pořizovací náklady (v Tab. 6. 5 uvádím ceny paketů, které mi byly poskytnuty firmou Elektroteplo Kolín, s.r.o.).

Tab. 6. 5 Příklad ceny paketů pro 6t indukční pec SF

| Rozměry      | Výška [mm]   | Šířka [mm]                 | Hloubka [mm]                   |
|--------------|--------------|----------------------------|--------------------------------|
| Větší pakety | 2 060        | 140                        | 100                            |
| Menší pakety | 1 530        | 140                        | 100                            |
| Ekonomika    | Počet paketů | Cena paketu [Kč] (bez DPH) | Celkové náklady [Kč] (bez DPH) |
| Větší pakety | 16           | 96 000                     | <b>1 536 000</b>               |
| Menší pakety | 4            | 87 000                     | <b>348 000</b>                 |

(poznámka: v případě NF pece jsou ceny cca o 15 % menší; ceny jsou z roku 2011, možný nárůst ceny o 12 %)

## Závěr

Cílem této diplomové práce bylo provést měření vysokofrekvenčního pole kolem samotného induktoru a induktoru se svazky transformátorových plechů pro analyzování vlivu daného stínění. Pro konfrontaci výsledků jsem provedl simulaci v programu RillFEM 2D pro stejný model a v příloze jsem dále provedl analytický výpočet prázdného induktoru a měření na malém laboratorním modelu se svazky pro ověření vlivu svazků na hodnotu vlastní indukčnosti induktoru. Kromě měření vysokofrekvenčního pole jsem práci doplnil měřením pole síťového kmitočtu pro srovnání účinnosti stínění při použití nízkého a vysokého kmitočtu.

V úvodních kapitole uvádím odvození základních vztahů veličin  $E$  a  $H$  jak pro rovinné, tak zejména pro válcové harmonické elektromagnetické pole, kterým lze popsat elektromagnetické pole kolem laboratorního modelu induktoru. Ve dvou následujících kapitolách uvádím nejčastější průmyslové aplikace indukčního ohřevu a popis typů indukčních průmyslových pecí, kde se nejvíce věnuji popisu indukční kelímkové peci.

Na základě měření docházím k závěru, že největší účinnost stínění nastala při použití nízkého kmitočtu (v mém případě kmitočtu 50 Hz). V případě vyšších kmitočtů nejsou rozdíly tak výrazné (úroveň stínění je při 4 100 Hz mírně vyšší než při 10 000 Hz). Z naměřených hodnot jsou pozoruhodné vyšší maximální hodnoty  $H$  při kmitočtu 4 100 Hz. Toto zvýšení resp. závislost intenzity magnetického pole na kmitočtu u naměřených hodnot jsem nedokázal věrohodně zdůvodnit. Možným důvodem "určité" nelinearity je použití dvou rozdílných zdrojů, kdy při měření 50 Hz byl použit sinusový zdroj proudu a při měření vyšších kmitočtů byl použit pulzní zdroj obdélníkových pulzů. U kontrolního měření vyšších kmitočtů byly hodnoty podobné jako u předchozího měření. Porovná-li pouze kmitočty 4 100 Hz a 10 000 Hz, dochází k poklesu intenzity  $H$  se srůstajícím kmitočtem. Podle mého názoru toto souvisí se změnou impedance induktoru, kdy srůstajícím kmitočtem roste tato impedance a tím klesá proud. Klesne-li proud, sníží se též intenzita magnetického pole.

Je též nezbytné se zde zmínit, že se nelze vyvarovat chyb v průběhu měření. Již samotné umístění a nasměrování měřicí cívky má značný vliv na hodnotu a to platí zejména v blízkosti induktoru, kdy sebemenší chybné natočení může způsobit naindukování několik mV, někdy jednotky V. Další nepřesnost výsledků vznikla při měření kmitočtu 10 000 Hz, kdy použitá měřicí křížová cívka byla opatřena nevhodným kabelem, který byl jednak krátký, ale zejména nebyl kroucený a byly viditelné změny naindukovaného napětí při přiblížení

multimetru (resp. kabelu) k induktoru (multimeter byl otestován v laboratoři EMC při katedře KEE, funkční kritérium A).

Výsledky z měření jsem chtěl konfrontovat s hodnotami ze simulace a měřením s indukční sondou. Ani jedno ze zamýšlených porovnání není zcela možné. Indukční sonda přestala fungovat v průběhu měření. V případě simulace je důvod zřejmý, frekvenční nezávislost, kdy ekvivalentní vrstvu za pecní induktor nelze jinak udělat než jako jeden celek (nelze vyjádřit závit) a nelze tudíž nastavit vodivost mědi (projevil by se do značné míry vliv skin efektu). V příloze V uvádím analytický výpočet, ve kterém jsem došel k těmto výsledkům:

|  |              |
|--|--------------|
| - vyjdu-li z vlastní indukčnosti induktoru | 1512,406 A/m |
| - vyjdu-li z intenzity magnetického pole   | 1987,382 A/m |

*Dosahovaná maxima  $H$  [A/m] při měření*

|                 | Proud 15 A  |             | Proud 31 A  |             |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                 | Bez stínění | Se stíněním | Bez stínění | Se stíněním |
| <b>50 Hz</b>    | 1209,804    | 1102,994    | 2194,811    | 2180,931    |
| <b>4100 Hz</b>  | 3396,688    | 3192,817    | 3613,911    | 3264,707    |
| <b>10000 Hz</b> | 1779,780    | 1694,072    | 2335,190    | 1979,722    |

*Procentuální srovnání stínění při proudu 15 A - řada 14*

| sloupec         | A     | B     | C     | D     | E     | F     | G     |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>50 Hz</b>    | 94,92 | 96,11 | 97,21 | 96,89 | 97,23 | 97,66 | 98,16 |
| <b>4100 Hz</b>  | 87,09 | 87,83 | 88,91 | 89,22 | 89,56 | 91,29 | 91,85 |
| <b>10000 Hz</b> | 55,02 | 58,81 | 72,34 | 81,21 | 79,54 | 85,17 | 89,19 |

*Procentuální srovnání stínění při proudu 31 A - řada 14*

| sloupec         | A     | B     | C     | D     | E     | F     | G     |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>50 Hz</b>    | 93,41 | 94,16 | 94,45 | 95,34 | 96,03 | 97,23 | 97,48 |
| <b>4100 Hz</b>  | 86,69 | 87,94 | 86,73 | 83,49 | 84,15 | 84,98 | 87,96 |
| <b>10000 Hz</b> | 85,86 | 84,35 | 80,84 | 85,08 | 85,87 | 86,46 | 87,98 |

*(poznámka: čím vyšší hodnota, tím vyšší vliv stínění)*

Tato diplomová práce se věnovala stínění magnetického pole prázdného induktoru pomocí svazků transformátorových plechů. Možným rozšířením této práce bych viděl v porovnání tohoto typu stínění se stíněním vodivým pláštěm, včetně zahrnutí vlivu vsázky u obou uvedených způsobů. Dále si myslím, že by bylo velmi přínosné získat pro takováto měření zdroj harmonického proudu, schopný generovat stabilní vysokofrekvenční proud, místo současného pulzního generátoru proudu. Přínos bych viděl zejména ve snažší verifikaci

výsledků, které by se daly vhodně kontrolovat s měřením pole síťového kmitočtu, tedy harmonického, ale též se simulací v níž se uvažuje harmonický zdroj proudu. V případě kontroly výsledků by bylo dobré provést měření indukční sondou, které jsem chtěl provést, ale z výše uvedených důvodu nebylo uskutečněno.

Na závěr bych chtěl říci, že je velmi důležité se věnovat problematice stínění z důvodu zachování dobré elektrické účinnosti indukčních zařízení.

## Použitá literatura

- [1] Baxant, P., Drápela, J., Lázničková, I.: *Elektrotepelná technika*, učební text, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT Brno  
[http://www.umel.feec.vutbr.cz/VIT/images/pdf/studijni\\_materialy/ing/Elektrotepelná\\_technika\\_S.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/VIT/images/pdf/studijni_materialy/ing/Elektrotepelná_technika_S.pdf) (23.2.2013)
- [2] Black, M., Cook, R., Loveless, D., Rudnev, V.: *Handbook of induction heating*, Marcel Dekker, New York 2003
- [3] Langer, E., Kožený, J.: *Elektrotepelná zařízení indukční - Základy teorie, výpočty a konstrukce*, VŠSE Plzeň, Plzeň 1982
- [4] Langer, E.: *Teorie indukčního a dielektrického tepla*, Academia, Praha 1979
- [5] Hradílek, Z.: *Elektrotepelná technika- Simulace-počítačové programy*, VŠB Technická univerzita Ostrava, Ostrava 2001
- [6] Rada, J., kolektiv: *Elektrotepelná technika*, SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha 1985
- [7] KYNCL, Jan. *Návrh výkonové řady kanálkových pecí: The design of channel furnaces scale*. V Praze: České vysoké učení technické, 2003, 26 s. ISBN 80-01-02783-x.
- [8] Pavlíček, K.: *Stínění indukční kelímkové pece*, bakalářská práce, Plzeň 2011
- [9] Potůček, M.: *Průmyslové využití indukčního ohřevů*, bakalářská práce, Plzeň 2011
- [10] Milka, J.: *Energetické problémy indukčních elektrotepelných zařízení*, bakalářská práce, VUT Brno 2011
- [11] Singer, M.: *Skull-Melting jako metoda tavení materiálů*, bakalářská práce, Plzeň 2012
- [12] Vaško, M.: *Odlévání turbínových kol ze slitin TiAl.*, bakalářská práce, VUT Brno 2008
- [13] Kroupa, O.: *Návrh a konstrukce zařízení pro měření parametrů elektromagnetického pole*, diplomová práce, Plzeň 2007
- [14] Zajacová, N.: *Vysokoteplotní tavení materiálů ve studeném kelímku*, diplomová práce, Plzeň 2012
- [15] [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=25267](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25267) (6.10.2012)
- [16] [http://www.aceso.cz/inductotherm-group/vakuove-indukcni-taveni-\(vim\).html](http://www.aceso.cz/inductotherm-group/vakuove-indukcni-taveni-(vim).html) (18.1.2013)
- [17] [www.zam.fme.vutbr.cz/~senberger/doc/prednaska\\_8.doc](http://www.zam.fme.vutbr.cz/~senberger/doc/prednaska_8.doc) (6.10.2012)
- [18] [www.rillfem.com](http://www.rillfem.com) (26.3.2013)
- [19] Čtvrtník, V., Tůmová, O.: *Chyby měření a měřících převodníků*, dílčí výzkumná zpráva pro "Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice", Plzeň 2006
- [20] Přednášky z předmětu ZETP, Plzeň akademický rok 2010/2011

## **Přílohy**

Příloha I - Besselovy rovnice

Příloha II - Nagaokovy součinitele

Příloha III - Laboratorní úloha, přístroje

Příloha IV - Nákres induktoru se svazky transformátorových plechů

Příloha V - Indukční kelímková pec pro odlévání litiny v provozu

Příloha VI - Vliv svazků transformátorových plechů na indukčnost induktoru

Příloha VII - Analytický výpočet intenzity magnetického pole prázdného induktoru

Příloha VIII - Srovnání procentuálního rozdílu stínění, 2D graf pro 4100 Hz



**Příloha I Besselovy rovnice [4, str. 296] [6, str. 183]**

Besselova diferenciální rovnice

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dy}{dx} + \left(1 - \frac{n^2}{x^2}\right) y = 0, \quad \text{kde } n \text{ určuje řád rovnice.} \quad (\text{I-1})$$

Řešením je lineární kombinace dvou cylindrických funkcí

$$y = C_1 J_n(x) + C_2 N_n(x), \quad (\text{I-2})$$

kde  $C_1, C_2$  jsou integrační konstanty určené na základě mezních podmínek  
 $J_n(x), N_n(x)$  jsou cylindrické funkce  $n$ -tého řádu prvního a druhého  
 (Neumannova) druhu pro argument  $x$ .

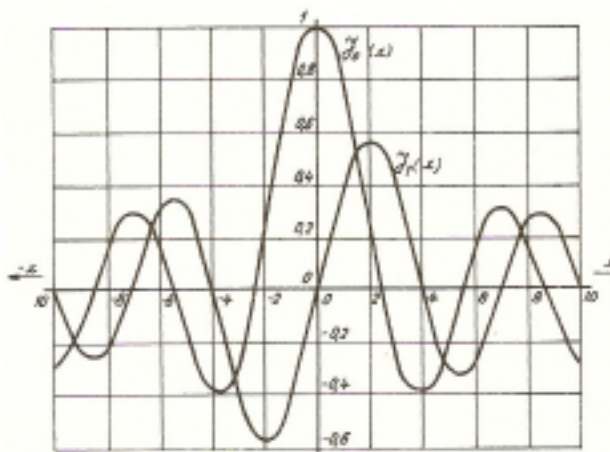
Cylindrické funkce nultého řádu lze zapsat v řadě:

$$J_0(x) = 1 - \frac{x^2}{2^2} + \frac{x^4}{(2 \cdot 4)^2} - \frac{x^6}{(2 \cdot 4 \cdot 6)^2} + \dots \quad (\text{I-3})$$

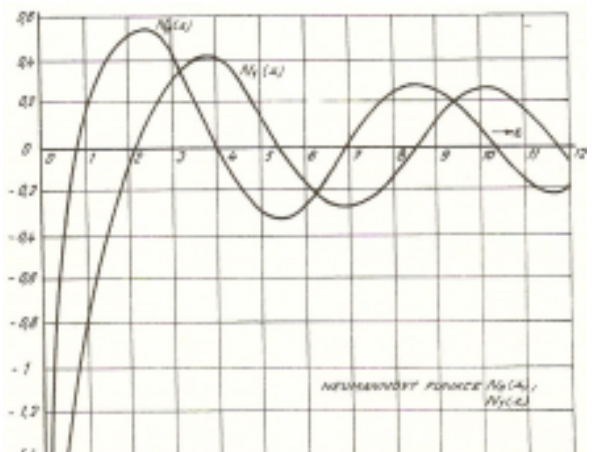
$$N_0(x) = \frac{2}{\pi} \left( \gamma + \ln \frac{x}{2} \right) J_0(x) - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(n!)^2} \left( \frac{x}{2} \right)^{2n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \quad (\text{I-4})$$

$$J_1(x) = -\frac{d[J_0(x)]}{dx} \quad N_1(x) = -\frac{d[N_0(x)]}{dx} \quad (\text{I-5})(\text{I-6})$$

$\gamma$  ... Eulerova konstanta  $\gamma = 0,57721566$



Obr. 1 Besselovy funkce nultého a prvního řádu [6]



Obr. 2 Neumannovy funkce nultého a prvního řádu [6]

Příloha II - Nagaokovy součinitele  $\alpha$  [3, str 171 a 172]

Nagaokovy součinitele pro odvození vlastní indukčnosti

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

Nagaokovy součinitele  $F$  pro odvození vzájemné indukčnosti

| $\frac{d_c}{l_1}$ | $\frac{d_v}{l_2}$ | $l_1/l_2$ |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-------------------|-------------------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                   |                   | 0,8       | 0,9     | 1,0     | 1,1     | 1,2     | 1,4     | 1,6     | 1,8     | 2,0     |
| 0,1               | 0,08              | 1,22007   | 1,09103 | 0,98551 | 0,89803 | 0,82451 | 0,70810 | 0,62027 | 0,55172 | 0,49677 |
|                   | 0,10              | 1,22022   | 1,09112 | 0,98557 | 0,89807 | 0,82454 | 0,70812 | 0,62028 | 0,55172 | 0,49677 |
|                   | 0,12              | 1,22041   | 1,09123 | 0,98564 | 0,89811 | 0,82457 | 0,70813 | 0,62028 | 0,55173 | 0,49677 |
| 0,2               | 0,16              | 1,14452   | 1,03935 | 0,94757 | 0,86862 | 0,80074 | 0,69110 | 0,60707 | 0,54091 | 0,48759 |
|                   | 0,18              | 1,14553   | 1,03994 | 0,94793 | 0,86886 | 0,80090 | 0,69119 | 0,60712 | 0,54094 | 0,48761 |
|                   | 0,20              | 1,14666   | 1,04060 | 0,94834 | 0,86913 | 0,80108 | 0,69128 | 0,60717 | 0,54098 | 0,48763 |
|                   | 0,22              | 1,14790   | 1,04132 | 0,94879 | 0,86942 | 0,80128 | 0,69138 | 0,60723 | 0,54101 | 0,48766 |
|                   | 0,24              | 1,14926   | 1,04211 | 0,94928 | 0,86974 | 0,80150 | 0,69150 | 0,60730 | 0,54105 | 0,48769 |
| 0,3               | 0,26              | 1,05756   | 0,97680 | 0,89964 | 0,83013 | 0,76872 | 0,66720 | 0,58797 | 0,52496 | 0,47387 |
|                   | 0,28              | 1,06040   | 0,97846 | 0,90068 | 0,83081 | 0,76918 | 0,66744 | 0,58811 | 0,52505 | 0,47393 |
|                   | 0,30              | 1,06343   | 0,98023 | 0,90179 | 0,83154 | 0,76969 | 0,66770 | 0,58826 | 0,52515 | 0,47399 |
|                   | 0,32              | 1,06665   | 0,98212 | 0,90296 | 0,83232 | 0,77022 | 0,66798 | 0,58843 | 0,52525 | 0,47406 |
|                   | 0,34              | 1,07006   | 0,98411 | 0,90421 | 0,83314 | 0,77078 | 0,66828 | 0,58860 | 0,52536 | 0,47413 |
| 0,4               | 0,32              | 0,97837   | 0,91585 | 0,85042 | 0,78896 | 0,73335 | 0,63959 | 0,56527 | 0,50565 | 0,45702 |
|                   | 0,36              | 0,98763   | 0,92131 | 0,85386 | 0,79124 | 0,73493 | 0,64043 | 0,56577 | 0,50596 | 0,45723 |
|                   | 0,40              | 0,99786   | 0,92735 | 0,85766 | 0,79377 | 0,73668 | 0,64136 | 0,56632 | 0,50631 | 0,45747 |
|                   | 0,44              | 1,00901   | 0,93394 | 0,86182 | 0,79653 | 0,73860 | 0,64238 | 0,56692 | 0,50670 | 0,45773 |
|                   | 0,48              | 1,02105   | 0,94105 | 0,86631 | 0,79952 | 0,74067 | 0,64349 | 0,56758 | 0,50712 | 0,45801 |

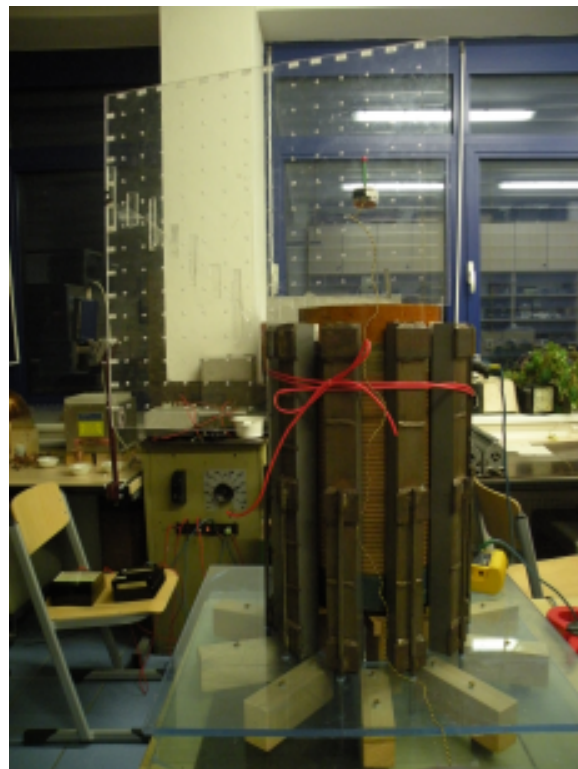
|     |      |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0,5 | 0,40 | 0,92510 | 0,86862 | 0,80854 | 0,75158 | 0,69971 | 0,61167 | 0,54146 | 0,48489 | 0,43863 |
|     | 0,45 | 0,94053 | 0,87763 | 0,81442 | 0,75552 | 0,70247 | 0,61317 | 0,54236 | 0,48548 | 0,43902 |
|     | 0,50 | 0,95747 | 0,88797 | 0,82088 | 0,75987 | 0,70552 | 0,61482 | 0,54335 | 0,48612 | 0,43946 |
|     | 0,55 | 0,97581 | 0,89896 | 0,82791 | 0,76460 | 0,70884 | 0,61663 | 0,54444 | 0,48683 | 0,43995 |
|     | 0,60 | 0,99546 | 0,91075 | 0,83546 | 0,76969 | 0,71242 | 0,61859 | 0,54562 | 0,48759 | 0,44047 |
| 0,6 | 0,45 | 0,88143 | 0,82671 | 0,76961 | 0,71574 | 0,66674 | 0,58352 | 0,51702 | 0,46334 | 0,41936 |
|     | 0,50 | 0,89782 | 0,83667 | 0,77605 | 0,72013 | 0,70552 | 0,58524 | 0,51808 | 0,46404 | 0,41984 |
|     | 0,55 | 0,91561 | 0,84748 | 0,78306 | 0,72492 | 0,70884 | 0,58714 | 0,51924 | 0,46480 | 0,42037 |
|     | 0,60 | 0,93469 | 0,85911 | 0,79061 | 0,73007 | 0,71242 | 0,58919 | 0,52049 | 0,46562 | 0,42095 |
|     | 0,65 | 0,95497 | 0,87149 | 0,79866 | 0,73558 | 0,71624 | 0,59138 | 0,52018 | 0,46651 | 0,42156 |
|     | 0,70 | 0,97631 | 0,88455 | 0,80718 | 0,74142 | 0,72029 | 0,59382 | 0,52328 | 0,46747 | 0,42223 |
| 0,7 | 0,55 | 0,86387 | 0,80125 | 0,74159 | 0,68743 | 0,63913 | 0,55825 | 0,49422 | 0,44273 | 0,40064 |
|     | 0,60 | 0,88091 | 0,81183 | 0,74857 | 0,69228 | 0,64263 | 0,56025 | 0,49546 | 0,44357 | 0,40122 |
|     | 0,65 | 0,89907 | 0,82313 | 0,75605 | 0,69747 | 0,64638 | 0,56239 | 0,49681 | 0,44446 | 0,40185 |
|     | 0,70 | 0,91825 | 0,83509 | 0,76398 | 0,70299 | 0,65038 | 0,56469 | 0,49824 | 0,44543 | 0,40253 |
|     | 0,75 | 0,93835 | 0,84766 | 0,77234 | 0,70862 | 0,65460 | 0,56712 | 0,49977 | 0,44645 | 0,40325 |
|     | 0,80 | 0,95926 | 0,86078 | 0,78108 | 0,71494 | 0,65905 | 0,56968 | 0,50139 | 0,44754 | 0,40402 |
| 0,8 | 0,65 | 0,84910 | 0,77889 | 0,71641 | 0,66158 | 0,61360 | 0,53445 | 0,47245 | 0,42288 | 0,38247 |
|     | 0,70 | 0,86542 | 0,78930 | 0,72345 | 0,66657 | 0,61726 | 0,53660 | 0,47383 | 0,42381 | 0,38313 |
|     | 0,75 | 0,88261 | 0,80030 | 0,73090 | 0,67185 | 0,62115 | 0,53889 | 0,47529 | 0,42480 | 0,38384 |
|     | 0,80 | 0,90059 | 0,81183 | 0,73874 | 0,67742 | 0,62525 | 0,54131 | 0,47684 | 0,42586 | 0,38459 |
|     | 0,85 | 0,91927 | 0,82385 | 0,74693 | 0,68326 | 0,62956 | 0,54386 | 0,47847 | 0,42697 | 0,38538 |
|     | 0,90 | 0,93857 | 0,83632 | 0,75545 | 0,68934 | 0,63406 | 0,54653 | 0,48019 | 0,42815 | 0,38622 |
| 0,9 | 0,70 | 0,81812 | 0,74756 | 0,68600 | 0,63257 | 0,58611 | 0,50990 | 0,45045 | 0,40302 | 0,36441 |
|     | 0,75 | 0,83237 | 0,75690 | 0,69247 | 0,63724 | 0,58959 | 0,51199 | 0,45181 | 0,40395 | 0,36508 |
|     | 0,80 | 0,84735 | 0,76675 | 0,69930 | 0,64217 | 0,59328 | 0,51422 | 0,45325 | 0,40495 | 0,36579 |
|     | 0,85 | 0,86302 | 0,77709 | 0,70648 | 0,64738 | 0,59717 | 0,51657 | 0,45479 | 0,40600 | 0,36655 |
|     | 0,90 | 0,87934 | 0,78787 | 0,71400 | 0,65283 | 0,60126 | 0,51904 | 0,45640 | 0,40712 | 0,36735 |
|     | 0,95 | 0,89623 | 0,79908 | 0,72183 | 0,65952 | 0,60554 | 0,52163 | 0,45809 | 0,40829 | 0,36819 |
|     | 1,00 | 0,91365 | 0,81068 | 0,72995 | 0,66444 | 0,60999 | 0,52434 | 0,45987 | 0,40951 | 0,36908 |
|     | 1,05 | 0,93153 | 0,82264 | 0,73836 | 0,67058 | 0,61461 | 0,52718 | 0,46172 | 0,41079 | 0,37000 |
| 1,0 | 0,80 | 0,79991 | 0,72584 | 0,66305 | 0,60947 | 0,56342 | 0,48868 | 0,43090 | 0,38506 | 0,34787 |
|     | 0,85 | 0,81289 | 0,73462 | 0,66927 | 0,61405 | 0,56689 | 0,49081 | 0,43231 | 0,38603 | 0,34857 |
|     | 0,90 | 0,82649 | 0,74384 | 0,67581 | 0,61887 | 0,57054 | 0,49306 | 0,43380 | 0,38707 | 0,34932 |
|     | 0,95 | 0,84070 | 0,75349 | 0,68267 | 0,62393 | 0,57439 | 0,49544 | 0,43536 | 0,38816 | 0,35011 |
|     | 1,00 | 0,85548 | 0,76355 | 0,68984 | 0,62922 | 0,57841 | 0,49792 | 0,43701 | 0,38930 | 0,35094 |
|     | 1,05 | 0,87080 | 0,77401 | 0,69731 | 0,63475 | 0,58261 | 0,50052 | 0,43873 | 0,39050 | 0,35181 |
|     | 1,10 | 0,88663 | 0,78484 | 0,70506 | 0,64049 | 0,58699 | 0,50324 | 0,44053 | 0,39176 | 0,35272 |
|     | 1,15 | 0,90293 | 0,79604 | 0,71309 | 0,64645 | 0,59153 | 0,50606 | 0,44241 | 0,39307 | 0,35367 |

## Příloha III - Laboratorní úloha, přístroje

### 1) Měření 50 Hz - nízký kmitočet



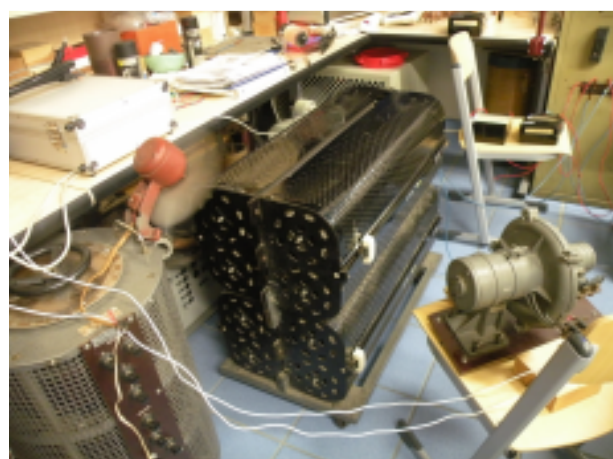
Obr. 3 Napájecí transformátor



Obr. 4 Induktor se svazky a měřicí deskou



Obr. 5 Celkový pohled na úlohu



Obr. 6 Rezistor, chlazení

## 2) Měření 4100 Hz - vyšší kmitočet



Obr. 7 Induktor a deska

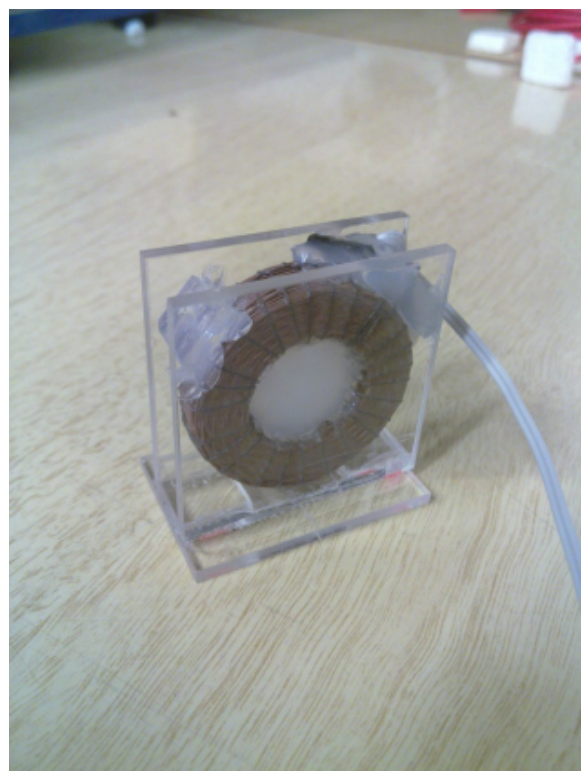


Obr. 8 Zdroj vysokofrekvenčních pulzů

## 3) Měřicí cívka

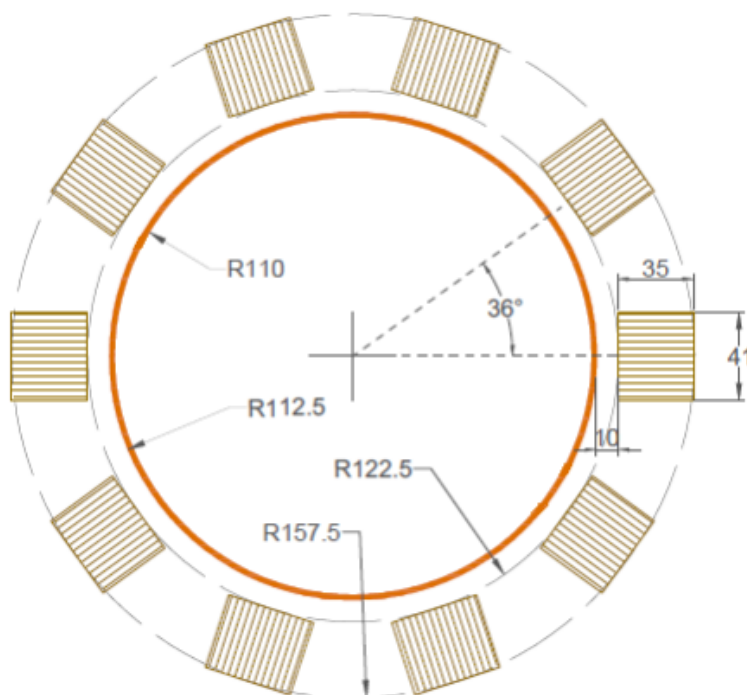


Obr. 9 Měřicí cívka a měřicí přístroj FINEST 703 TRUE RMS multimeter

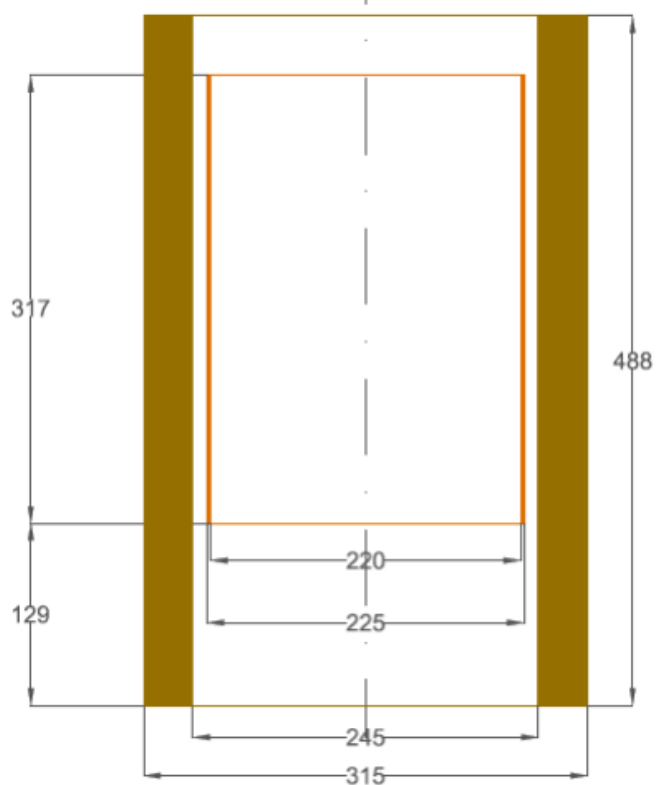


Obr. 10 Křížová měřicí cívka

## Příloha IV - Nákres induktoru se svazky transformátorových plechů



Obr. 11 Horní pohled



Obr. 12 Kolmý průřez

[rozměry v mm]

Nákres vytvořen ve studentské verzi programu AutoCAD 2011

**Příloha V - Indukční kelímková pec pro odlévání litiny v provozu**



Obr. 13 Kontrola taveniny, odstruskování



Obr. 14 Celkový pohled na pec



Obr. 15 Odlévání taveniny



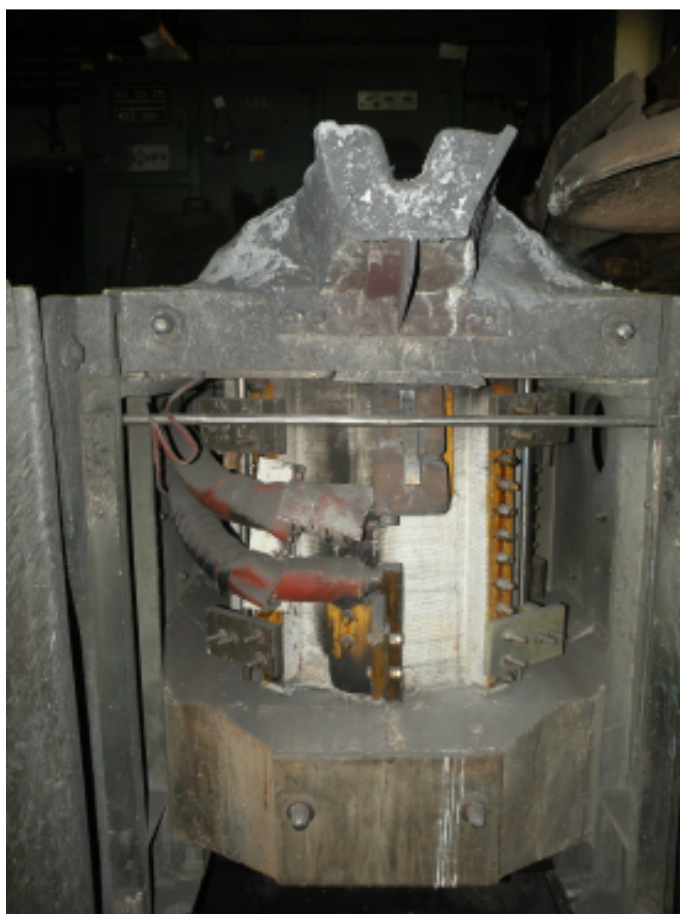
Obr. 16 Pohled do kelímku po tavení



Obr. 17 Horní pohled, hubice a víko pece



Obr. 18 Spodní pohled, uzemnění pece



Obr. 19 Čelní pohled, pecní cívka

Příklad tavby v 0,5t indukční kelímkové peci určené pro tavení ocelolitiny a šedé litiny.

|                            |                                     |
|----------------------------|-------------------------------------|
| Jmenovitý výkon:           | 350 kW                              |
| Tavený materiál:           | Ocelolitina, šedá litina            |
| Spotřeba el. proudu:       | 595 kWh/t oceli<br>576 kWh/t litina |
| Vstupní / výstupní napětí: | 3 x 380V střídavý proud / 1000V     |

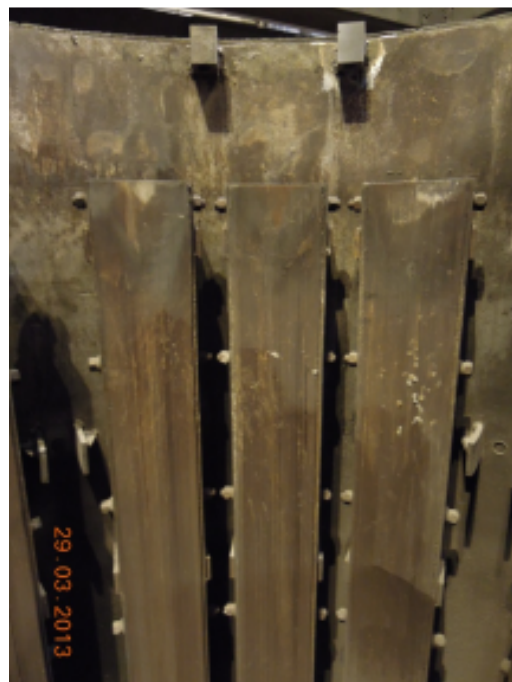


Příklad tavby v 4t indukční kelímkové peci 50Hz určené pro tavení ocelolitiny a šedé litiny.

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Jmenovitý výkon:           | max. 1800 kVA, omezeno na 1200 kVA                |
| Spotřeba el. proudu:       | změřeno 1214 kWh na 2100 kg šedé litiny           |
| Vstupní / výstupní napětí: | 22 000V / 992 V                                   |
| Kompenzace:                | 2x 2210 + 442 kVAr                                |
| Magnetická jádra:          | 18 jader, rozměry: V x Š x H = 150 x 17 x 10 [cm] |



Obr. 20 Čelní pohled



Obr. 22 Magnetická jádra na obvodu pece



Obr. 21 Symetrizační tlumivka



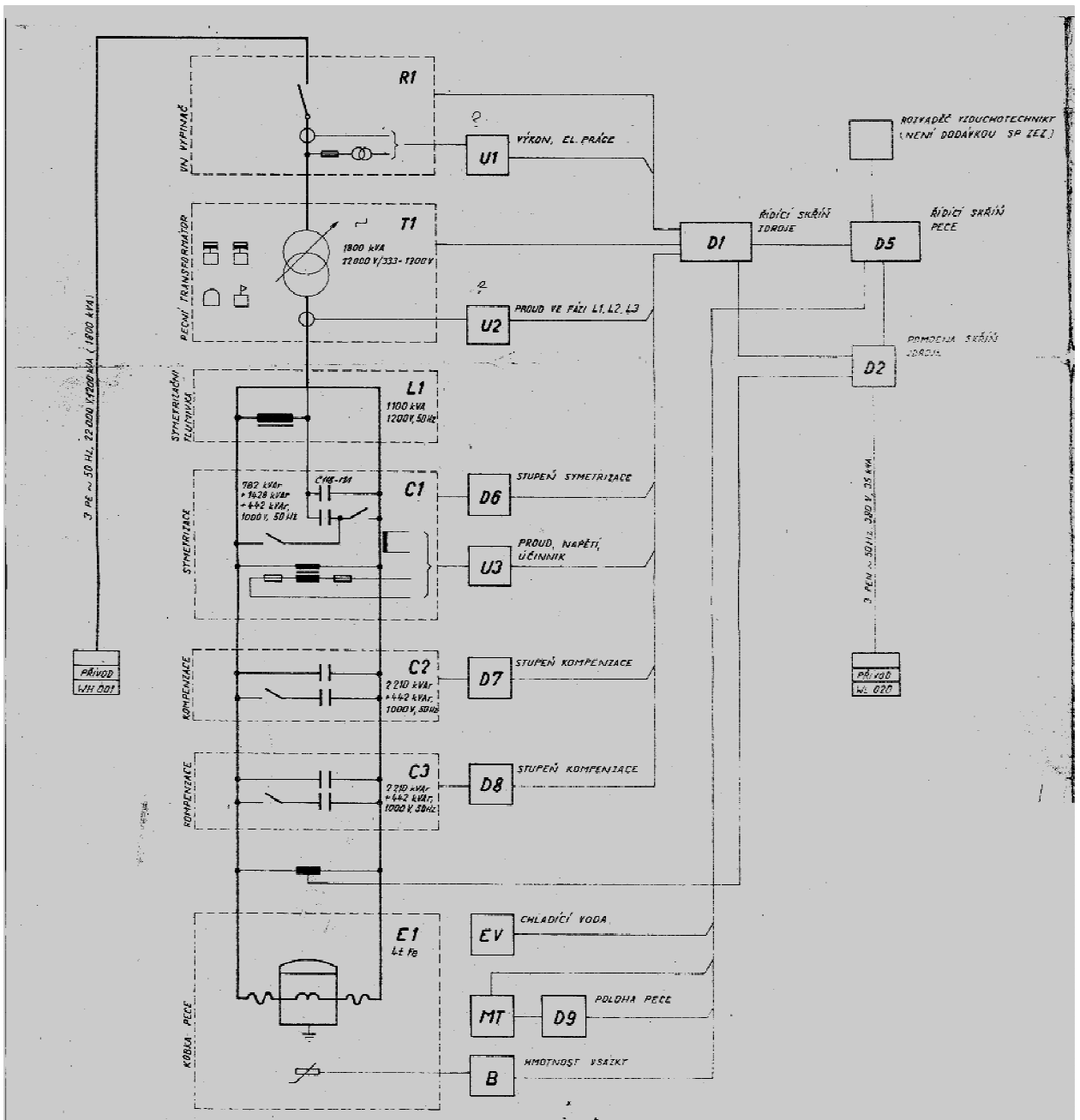
Obr. 23 Přívod induktoru



Obr. 24 Celkový pohled na ind. kelímkové pece



Obr. 25 Horní pohled, upevnění magnet. jader



Obr. 26 Obvodové schéma 4t indukční kelímkové pece 50Hz

Významnou firmou zabývající indukčními pecemi je německá firma OTTO JUNKER GmbH

## Příloha VI - Vliv svazků transformátorových plechů na indukčnost induktoru

Vliv svazků transformátorových plechů na hodnotu indukčnosti induktoru lze názorně změřit v laboratorní úloze měřené v předmětu Základy elektrotepelných procesů, který jsem absolvoval ve třetím ročníku bakalářského studia. V této laboratorní úloze dokážu zvyšující tendenci indukčnosti přidáváním svazků transformátorových plechů, což ve svém důsledku přináší zvýšení buzeného magnetického toku a zvýšení účinnosti pecní cívky.

Měření jsem prováděl pro dvě různé cívky. Zde uvádím základní parametry:

Tab. 1 Cívka C7

| C7                   |         |
|----------------------|---------|
| $d_1$ [m]            | 0,1082  |
| $d_{\text{vod}}$ [m] | 0,0014  |
| $h$ [m]              | 0,158   |
| $N$                  | 59      |
|                      |         |
| $d/l$                | 0,68481 |
| $\alpha_{c7}$        | 0,76498 |

Tab. 2 Cívka C5

| C5                   |          |
|----------------------|----------|
| $d_1$ [m]            | 0,075    |
| $d_{\text{vod}}$ [m] | 0,0014   |
| $h$ [m]              | 0,151    |
| $N$                  | 55       |
|                      |          |
| $d/l$                | 0,496689 |
| $\alpha_{c5}$        | 0,81814  |

Zpočátku uvedu hodnotu indukčnosti cívek C7 a C5 určenou pomocí vztahu

$$L = \frac{N \cdot \phi}{I} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \frac{N^2}{l} \cdot \alpha \quad (\text{VI} - 1)$$

- **Cívka C7:**

$$L_{C7} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_1}{2}\right)^2 \cdot \frac{N_1^2}{l_1} \cdot \alpha_{C7} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,1082}{2}\right)^2 \cdot \frac{59^2}{0,158} \cdot 0,765 = 194,74 \mu H$$

- **Cívka C5:**

$$L_{C5} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_2}{2}\right)^2 \cdot \frac{N_2^2}{l_2} \cdot \alpha_{C5} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,075}{2}\right)^2 \cdot \frac{55^2}{0,151} \cdot 0,818 = 90,99 \mu H$$

Nagaokovy součinitele  $\alpha = f(d/l)$  určeny z tabulek v Příloze II

K měření indukčností cívek C7 a C5 jsem používal LCR meter typ ESCORT ELC 3131D.

Přesnost přístroje je při rozsahu: 10mH - 100H  $\Delta$  +- (1%Rdg+1digit)

1mH a 1kH  $\Delta$  +- (2%Rdg+1digit)

U každé z uvedených cívek jsem postupoval od měření samotné cívky, ke které jsem posléze přidal plášť, až po postupné přidávání svazků transformátorových plechů vždy po dvojicích navzájem proti sobě. Naměřené hodnoty (včetně činitelů jakosti) viz Tab. 4, Tab. 5

Tab. 3 Indukčnost samotných cívek C7, C5

|                 | Naměřeno |       |
|-----------------|----------|-------|
|                 | L [μH]   | Q [-] |
| <b>cívka C7</b> | 203,3    | 2,95  |
| <b>cívka C5</b> | 94       | 2,09  |

Tab. 4 Změna indukčnosti cívky C7

| C7 + plášť   |        |       |
|--------------|--------|-------|
| Počet paketů | L [μH] | Q [-] |
| 0            | 172,8  | 2,04  |
| 2            | 182,5  | 2,51  |
| 4            | 202,2  | 2,74  |
| 6            | 205,5  | 2,84  |
| 8            | 207,4  | 2,88  |
| 10           | 208,3  | 2,91  |
| 12           | 209,4  | 2,93  |
| 14           | 210,7  | 2,97  |
| 16           | 211,4  | 2,98  |

Tab. 5 Změna indukčnosti cívky C5

| C5 + plášť   |        |       |
|--------------|--------|-------|
| Počet paketů | L [μH] | Q [-] |
| 0            | 88,2   | 1,83  |
| 2            | 88,8   | 1,86  |
| 4            | 89,8   | 1,89  |
| 6            | 90,7   | 1,93  |
| 8            | 91,6   | 1,95  |
| 10           | 92,2   | 1,98  |
| 12           | 92,8   | 2,00  |
| 14           | 93,1   | 2,01  |
| 16           | 95,3   | 2,08  |

Zvýšené hodnoty indukčností se určí dle vzorců:

$$L_{C7}' = \mu_0 \pi \left( \frac{d_1}{2} \right)^2 \frac{N_1^2}{l_1} \alpha_{C7}' \quad [\text{H, m}] \quad \alpha_{C7}' = \alpha_{C7} \frac{L_{C7m}'}{L_{C7}}$$

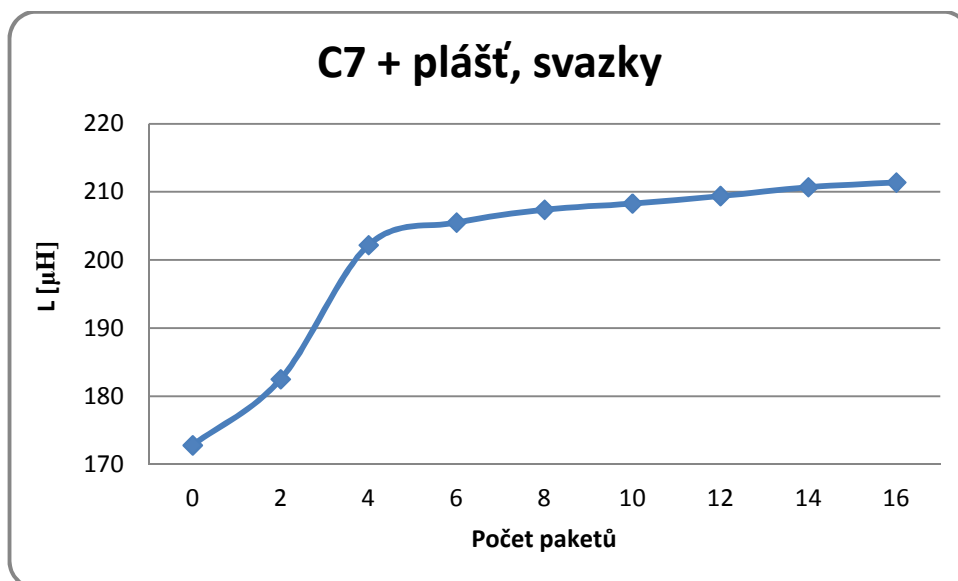
$$L_{C7}' = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot \left( \frac{0,1082}{2} \right)^2 \cdot \frac{59^2}{0,158} \cdot 0,795 = 202,5 \mu\text{H}$$

$$\alpha_{C7}' = 0,765 \cdot \frac{211,4}{203,3} = 0,795$$

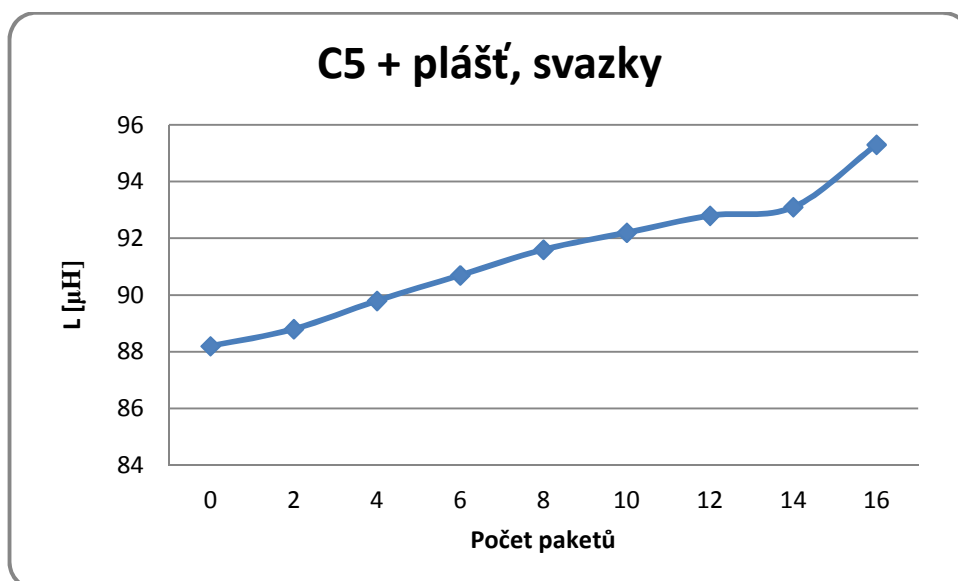
$$L_{C5}' = \mu_0 \pi \left( \frac{d_2}{2} \right)^2 \frac{N_2^2}{l_2} \alpha_{C5}' \quad [\text{H, m}] \quad \alpha_{C5}' = \alpha_{C5} \frac{L_{C5m}'}{L_{C5}}$$

$$L_{C5}' = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot \left( \frac{0,075}{2} \right)^2 \cdot \frac{55^2}{0,151} \cdot 0,829 = 92,19 \mu\text{H}$$

$$\alpha_{C5}' = 0,818 \cdot \frac{95,3}{94} = 0,829$$



Obr. 27 Grafické znázornění L v závislosti na počtu paketů



Obr. 28 Grafické znázornění L v závislosti na počtu paketů

Z měření je patrné, že při použití stínění svazky transformátorových plechů vzroste vlastní indukčnost (o 22 % resp. 8%). Je to dáno snížením magnetického odporu a tím zvýšením magnetického toku, na kterém je právě přímo úměrná indukčnost cívky. Z grafů je patrná tendence růstu indukčnosti při přidávání svazků. Hodnoty naměřené a vypočítané se přibližně shodují (až na indukčnost cívky C7, kde je větší odchylka).

Laboratorní úloha byla měřena společně s Bc. Michal Tajer

## Příloha VII - Analytický výpočet intenzity magnetického pole prázdného induktoru [13]

Pro kontrolu naměřených respektive nasimulovaných hodnot a pro získání představy o velikosti intenzity magnetického pole uvnitř induktoru lze provést analytický výpočet. Ve výpočtu vyjdu z hodnoty vlastní indukčnosti laboratorního modelu induktoru (viz Tab. 4. 1).

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \frac{N^2}{l} \cdot \alpha = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,22}{2}\right)^2 \cdot \frac{42^2}{0,317} \cdot 0,761 = 202,288 \mu H$$

Znám-li hodnotu vlastní indukčnosti induktoru, mohu určit maximální hodnotu magnetického toku.

$$\psi_{\max} = N \cdot \phi_{\max} = L \cdot I \cdot \sqrt{2} \quad (\text{VII - 1})$$

Potom  $\phi_{\max}$

$$\phi_{\max} = \frac{L}{N} \cdot I \cdot \sqrt{2} = \frac{202,288 \cdot 10^{-6}}{42} \cdot 15 \cdot \sqrt{2} = 102,171 \cdot 10^{-6} \text{ Wb} \quad (\text{VII - 2})$$

Poté výslednou hodnotu  $H_{\max}$  získám úpravou vzorce  $\phi_{\max} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H_{\max} \cdot S$  do tvaru:

$$H_{\max} = \frac{\phi_{\max}}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \pi \cdot r^2} \quad (\text{VII - 3})$$

$$H_{\max} = \frac{102,171 \cdot 10^{-6}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,11^2} = 2138,861 \text{ A/m}$$

Efektivní hodnota intenzity magnetického pole prázdného induktoru vychází na základě analytického výpočtu takto  $H_{\text{ef}} = \frac{H_{\max}}{\sqrt{2}} = 1512,403 \text{ A/m}$

Druhým způsobem analytického výpočtu je přes intenzitu magnetického pole. Platí-li, že rozměry induktoru jsou nesrovnatelně malé vzhledem k vlnové délce (v mém případě

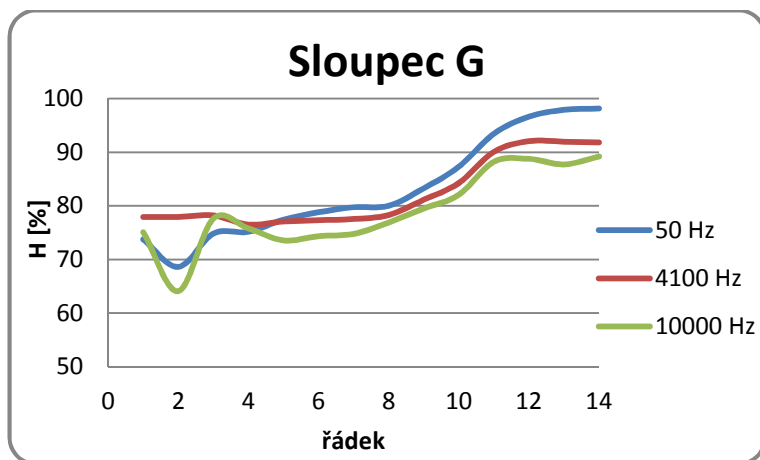
$$\text{toto pravidlo je splněno: } \lambda_{50} = \frac{v}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{50} = 6000 \text{ km} \quad (\text{VII - 4})$$

(resp.  $\lambda_{4100} = 73,17 \text{ km}$ ,  $\lambda_{10000} = 30 \text{ km}$ )  $\rightarrow r \ll \lambda$  potom lze určit  $\mathbf{H} = H_1 = N_1 \cdot I$  (magnetické pole je uvnitř induktoru homogenní).

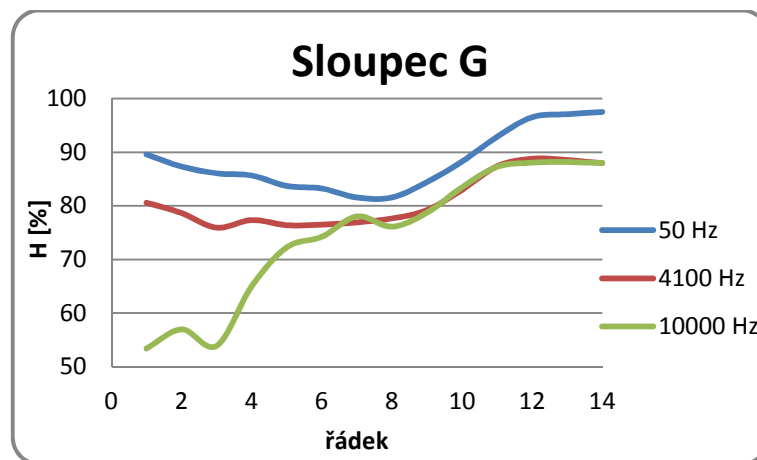
$$N_1 = \frac{N}{l} = \frac{42}{0,317} = 132,49 \quad \mathbf{H} = H_1 = N_1 \cdot I = 132,49 \cdot 15 = 1987,382 \text{ A/m}$$

přepočítání závitů na počet závitů osové délky

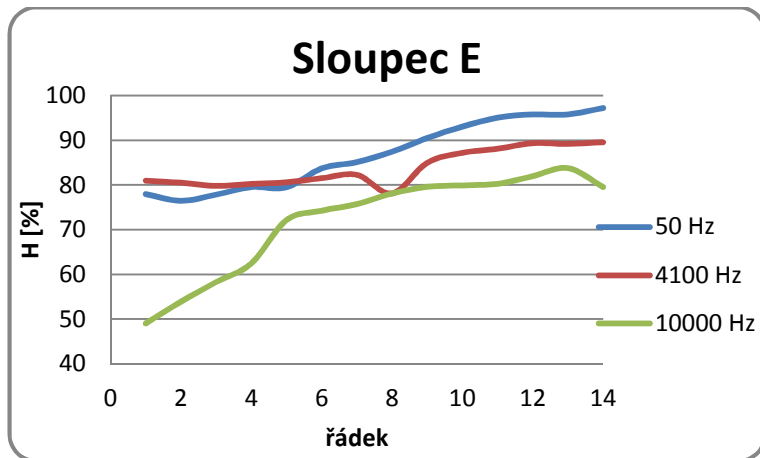
Příloha VIII - Srovnání procentuálního rozdílu stínění, 2D grafy pro kmitočty 4 100 Hz



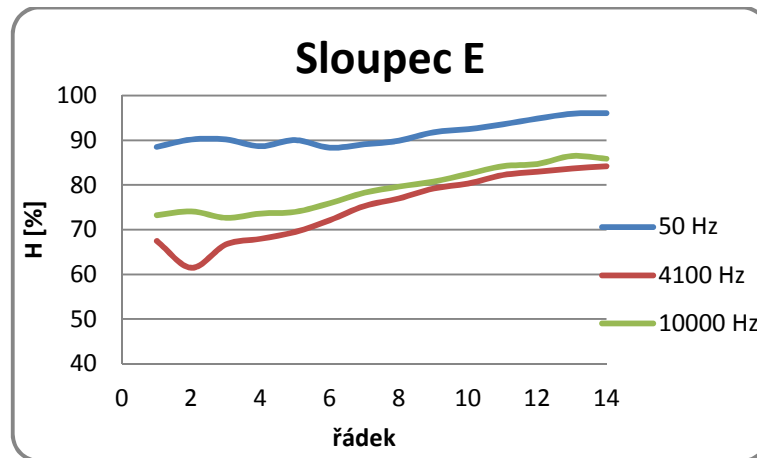
Obr. 29 Srovnání pro sloupec G - 15 A



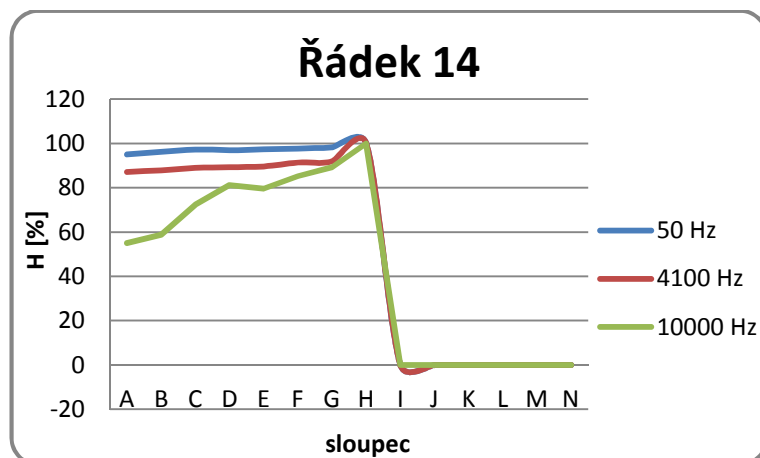
Obr. 31 Srovnání pro sloupec - 31 A



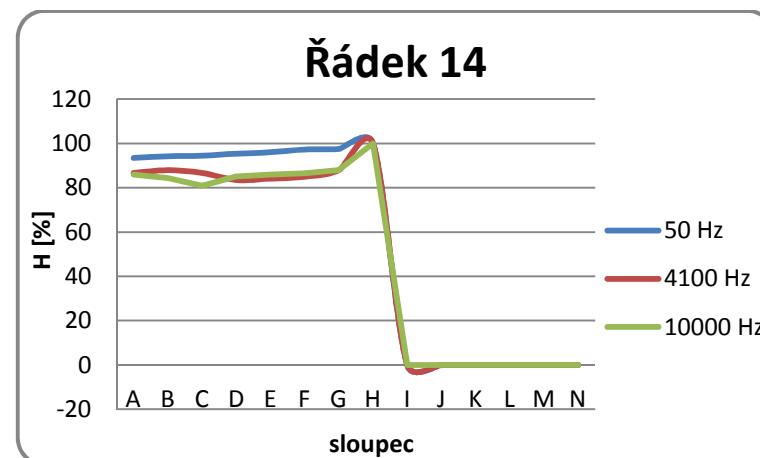
Obr. 30 Srovnání pro sloupec E - 15 A



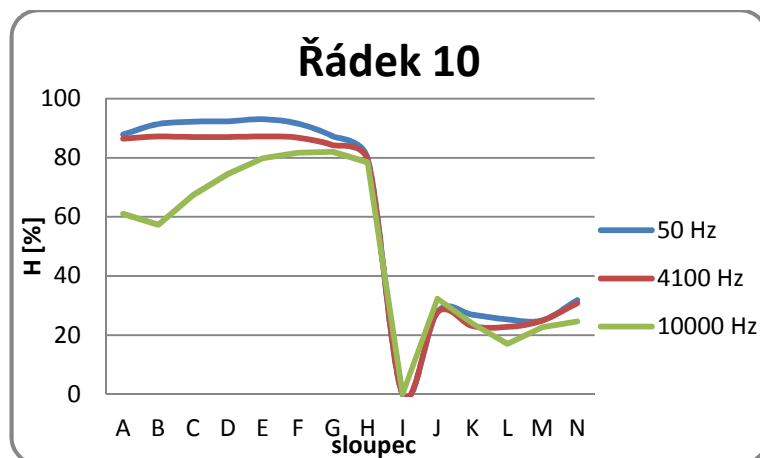
Obr. 32 Srovnání pro sloupec E - 31 A



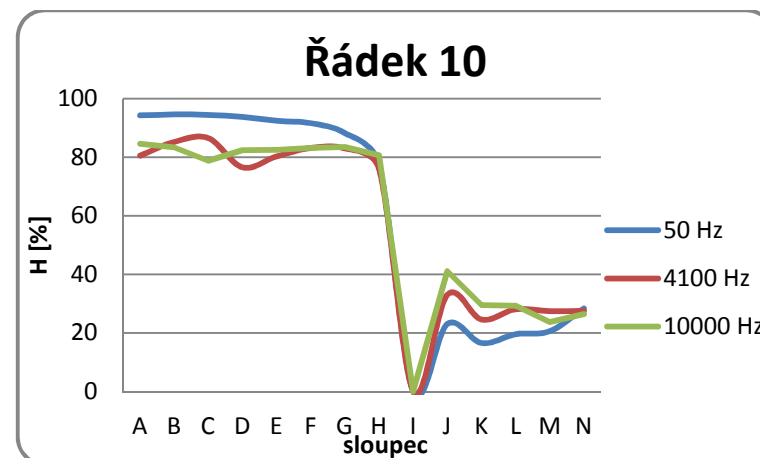
Obr. 33 Srovnání pro řádek - 15 A



Obr. 35 Srovnání pro řádek - 31 A

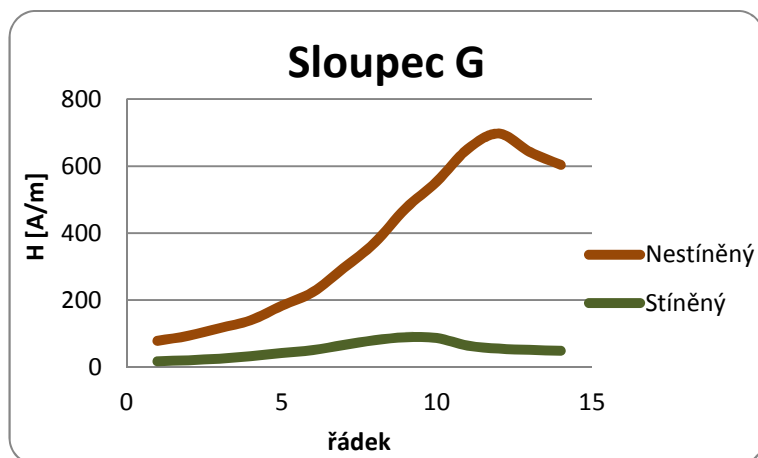


Obr. 34 Srovnání pro řádek - 15 A

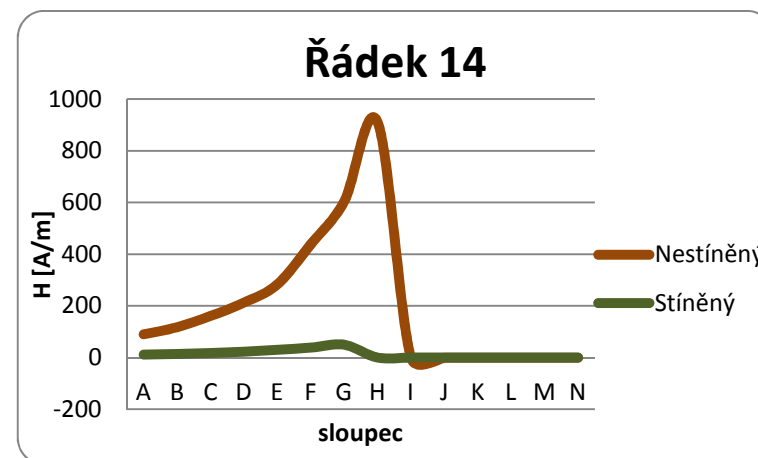


Obr. 36 Srovnání pro řádek - 31 A

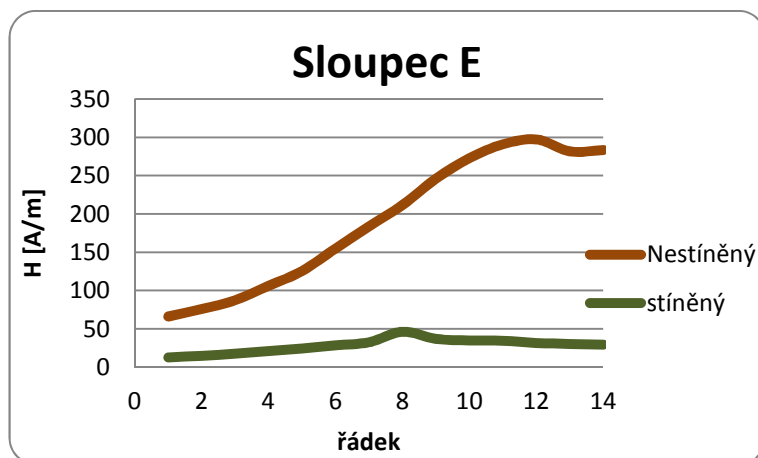




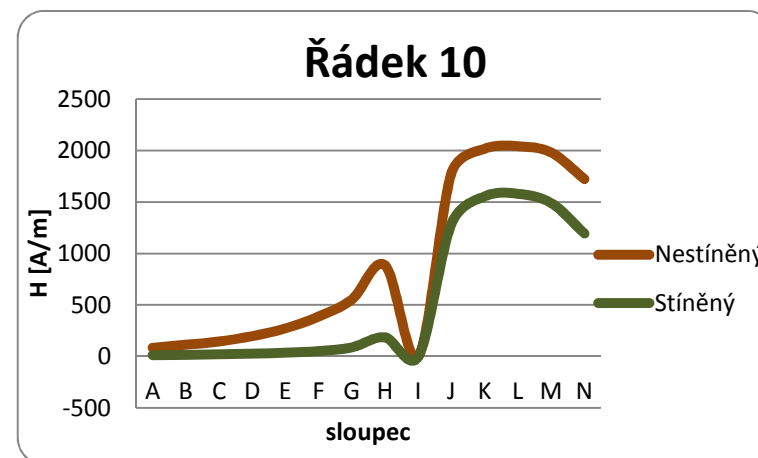
Obr. 37 2D graf sloupce G - 15 A, 4100 Hz



Obr. 39 2D graf řádku 14 - 15 A, 4100 Hz



Obr. 38 2D graf sloupce E - 15 A, 4100 Hz



Obr. 40 2D graf řádku 10 - 15 A, 4100 Hz

V 2D grafech je přehledně zobrazeno působení stínění vně induktoru. Největší odstínění je vně induktoru, v ose induktoru menší.