

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Elektromagnetické pole přípojnicových systémů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Hynek HAIMRLE**  
Osobní číslo: **E13B0355P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Elektromagnetické pole přípojnicových systémů**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Prostudujte odbornou literaturu a internetové zdroje týkající se provedení přípojnicových systémů.
2. Sestavte matematický model problému a vytvořte algoritmus pro řešení rozložení elektromagnetického pole.
3. Uvažujte různá uspořádání a různé tvary vodičů, respektujte použité materiály.
4. Realizujte numerický model na počítači.
5. Zhodnoťte obdržené výsledky.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

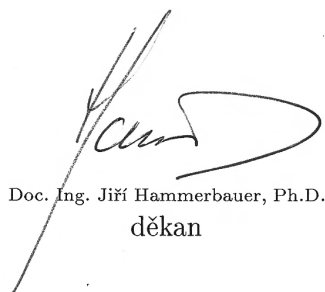
Seznam odborné literatury:

1. Mayer, Daniel: Teorie elektromagnetického pole, Plzeň, ZČU v Plzni, 2001.
2. Mayer, D., Ulrych, B.: Základy numerického řešení elektrických a magnetických polí, Praha, SNTL, 1988.
3. Míka, S., Přikryl, P., Brandner, M.: Speciální numerické metody. Numerické metody řešení okrajových úloh pro diferenciální rovnice, Plzeň, Vydavatelský servis, 2006.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lenka Šroubová, Ph.D.**  
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**

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



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

**Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce zkoumá elektromagnetické pole elektrických přípojníc. V teoretickém úvodu se zabývám problematikou elektromagnetického pole, včetně Maxwellových rovnic. V další části se věnuji přípojnicím a to především možným typům přípojníc běžně používaných v provozu. Dále popisuji numerické řešení pomocí programu Agros2D. Poslední část je věnována simulacím a jejich výsledkům.

**Klíčová slova**

elektromagnetické pole, Maxwellovy rovnice, proudová hustota, Agros2D, přípojnice, Lorentzova síla, činné ztráty

**Abstract**

The following Bachelor thesis investigates the electromagnetic field of electrical busbars. Theoretical introduction deals with the issue of electromagnetic field, including Maxwell's equations. Next part is devoted to busbars, especially kinds used in operation. Further I describe a numerical solution by using the program Agros2D. In the last part you can read about the simulations and their results.

**Key words**

electromagnetic field, Maxwell's equations, current density, Agros2D, bus bar, Lorentz force, operating losses

## **Prohlášení**

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 2.6.2016

Hynek Haimrle

## **Poděkování**

Touto cestou děkuji Ing. Lence Šroubové za její cenné rady, odborné vedení a celkovou trpělivost.

## Obsah

|  |           |
|--|-----------|
| <b>OBSAH</b> .....   | <b>8</b>  |
| <b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....  | <b>9</b>  |
| <b>ÚVOD</b> .....  | <b>11</b> |
| <b>1 ELEKTROMAGNETICKÉ POLE</b> .....  | <b>12</b> |
| 1.1 ÚVOD DO ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE .....   | 12        |
| 1.2 MAXWELLOVY ROVNICE V INTEGRÁLNÍM TVARU.....  | 14        |
| 1.3 MAXWELLOVI ROVNICE V DIFERENCIÁLNÍM TVARU .....  | 15        |
| 1.4 LORENTZOVY SÍLY.....   | 16        |
| 1.5 ROVNICE PRO PROUDOVOU HUSTOTU .....  | 18        |
| 1.6 ČINNÉ ZTRÁTY .....   | 18        |
| <b>2 PŘÍPOJNICE</b> .....  | <b>19</b> |
| 2.1 POUŽITÍ PŘÍPOJNIC.....   | 19        |
| 2.2 TYPY PŘÍPOJNIC PRO VÝPOČTY.....  | 20        |
| <b>3 AGROS2D</b> .....   | <b>26</b> |
| 3.1 AGROS2D OBECNĚ .....   | 26        |
| 3.2 MATEMATICKÝ MODEL .....  | 26        |
| 3.3 NUMERICKÝ MODEL.....   | 27        |
| <b>4 ŘEŠENÁ POLE PŘÍPOJNIC</b> .....   | <b>29</b> |
| 4.1 CU PŘÍPOJNICE, 5x25 MM, VODOROVNÉ USPOŘÁDÁNÍ, PROUD 400 A, RŮZNÉ VZDÁLENOSTI.....  | 29        |
| 4.2 CU PŘÍPOJNICE, 5x25 MM, VZDÁLENOST 40 MM, RŮZNÝ PROUD.....   | 31        |
| 4.3 AL PŘÍPOJNICE, 100x10 MM, USPOŘÁDÁNÍ VODOROVNÉ, PROUD 1580 A, RŮZNÁ VZDÁLENOST .....                                       | 32        |
| 4.4 AL PŘÍPOJNICE, 100x10 MM, USPOŘÁDÁNÍ ŠIKMÉ, PROUD 1580 A, RŮZNÁ VZDÁLENOST .....   | 33        |
| 4.5 AL PŘÍPOJNICE, 100x10 MM, USPOŘÁDÁNÍ TROJÚHELNÍK_A, PROUD 1580 A, RŮZNÁ VZDÁLENOST ...                                     | 34        |
| 4.6 AL PŘÍPOJNICE, 100x10 MM, USPOŘÁDÁNÍ TROJÚHELNÍK_B, PROUD 1580 A, RŮZNÁ VZDÁLENOST ...                                     | 36        |
| 4.7 AL PŘÍPOJNICE, 100x10 MM, PROUD 1580 A, RŮZNÁ USPOŘÁDÁNÍ, RŮZNÁ VZDÁLENOST .....   | 38        |
| 4.8 AL PŘÍPOJNICE, TRUBKOVÉ, VNĚJŠÍ PRŮMĚR 100 MM, TLOUŠŤKA STĚNY 10 MM, PROUD 3140 A,<br>RŮZNÁ USPOŘÁDÁNÍ.....                | 39        |
| 4.9 AL PŘÍPOJNICE, TRUBKOVÉ, VNĚJŠÍ PRŮMĚR 100 MM, TLOUŠŤKA STĚNY 10 MM, PROUD 3140 A,<br>RŮZNÁ FÁZOVÁ ZAPOJENÍ .....          | 41        |
| 4.10 CU PŘÍPOJNICE, PROFIL H, PRŮŘEZ 720 MM <sup>2</sup> , VODOROVNÉ USPOŘÁDÁNÍ, VZDÁLENOST STŘEDŮ 50,<br>PROUD 1600 A.....    | 43        |
| 4.11 CU PŘÍPOJNICE, PROFIL T, PRŮŘEZ 500 MM <sup>2</sup> , VZDÁLENOST STŘEDŮ 50MM, PROUD 1250 A, RŮZNÁ<br>USPOŘÁDÁNÍ.....      | 45        |
| 4.12 CU, AL PŘÍPOJNICE, PROFIL HH, PRŮŘEZ 1140 MM <sup>2</sup> , VZDÁLENOST HRAN 40 MM, PROUD 2500 A,<br>RŮZNÁ USPOŘÁDÁNÍ..... | 46        |
| <b>ZÁVĚR</b> .....   | <b>48</b> |
| <b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....   | <b>49</b> |
| <b>PŘÍLOHY</b> .....   | <b>1</b>  |



## Seznam symbolů a zkratk

| Veličina                         |                 | Jednotka                   |                                |
|----------------------------------|-----------------|----------------------------|--------------------------------|
| Název                            | Značka          | Název                      | Značka                         |
| vektorový magnetický potenciál   | $A$             | weber na metr              | Wb/m                           |
| magnetická indukce               | $B$             | tesla                      | T                              |
| měrná tepelná kapacita           | $c$             | joule na kilogram a kelvin | $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ |
| elektrická indukce               | $D$             | coulomb na čtverečný metr  | $\text{C/m}^2$                 |
| intenzita elektrického pole      | $E$             | volt na metr               | V/m                            |
| síla                             | $F$             | newton                     | N                              |
| elektrická síla                  | $F_e$           | newton                     | N                              |
| magnetická síla                  | $F_m$           | newton                     | N                              |
| intenzita magnetického pole      | $H$             | ampér na metr              | A/m                            |
| elektrický proud                 | $I$             | ampér                      | A                              |
| proudová hustota                 | $J$             | ampér na čtverečný metr    | $\text{A/m}^2$                 |
| proudová hustota vířivých proudů | $J_v$           | ampér na čtverečný metr    | $\text{A/m}^2$                 |
| délka                            | $l$             | metr                       | m                              |
| objemové joulovy ztráty          | $p_J$           | watt na krychlový metr     |                                |
| elektrický náboj                 | $Q$             | coulomb                    | C                              |
| obsah                            | $S$             | metr čtvereční             | $\text{m}^2$                   |
| teplota                          | $T$             | kelvin                     | K                              |
| elektrické napětí mezi body A, B | $U_{AB}$        | volt                       | V                              |
| objem                            | $V$             | metr krychlový             | $\text{m}^3$                   |
| rychlost (náboje)                | $v$             | metr za sekundu            | m/s                            |
| konduktivita                     | $\gamma$        | siemens na metr            | S/m                            |
| permitivita                      | $\varepsilon$   | farad na metr              | F/m                            |
| permitivita vakua                | $\varepsilon_0$ | farad na metr              | F/m                            |
| relativní permitivita            | $\varepsilon_r$ | -                          | -                              |
| tepelná vodivost                 | $\lambda$       | watt na metr a kelvin      | $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  |
| permeabilita                     | $\mu$           | henry na metr              | H/m                            |
| permeabilita vakua               | $\mu_0$         | henry na metr              | H/m                            |

|                         |         |                            |                   |
|-------------------------|---------|----------------------------|-------------------|
| relativní permeabilita  | $\mu_r$ | -                          | -                 |
| měrná hmotnost          | $\rho$  | kilogram na krychlový metr | kg/m <sup>3</sup> |
| magnetický indukční tok | $\Phi$  | weber                      | Wb                |
| elektrický indukční tok | $\Psi$  | coulomb                    | C                 |

## Úvod

Tématem bakalářské práce je sledování elektromagnetického pole elektrických přípojníc a jeho vlivů. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část.

První kapitola je zaměřena na teorii elektromagnetického pole. Po krátkém pohledu do historie elektromagnetického pole následuje rozbor sil v elektromagnetickém poli. Dále jsou zmíněny Maxwellovy rovnice a jejich fyzikální význam. Naposledy se kapitola věnuje Lorentzovým silám, rovnicím pro proudovou hustotu v diferenciálním a integrálním tvaru a činným ztrátám.

Druhá kapitola je rozdělena na dvě části. První část je popisná, je zde vysvětlen důvod používání přípojníc v praxi, jejich výhody a používané materiály. Druhá část poskytuje přehled o používaných typech přípojníc, obsahuje tabulky s rozměry a tvary. Součástí jsou doplňující obrázky přípojníc.

V další kapitole se seznámíme s programem Agros2D, který je vyvíjen v Plzni na Katedře teoretické elektrotechniky FEL ZČU. Program umožňuje simulaci fyzikálních polí, včetně pole elektromagnetického, v různých stavech, mezi které patří i mimo jiné harmonická analýza. V této kapitole je také vysvětlen matematický a numerický model s nastavením geometrie a materiálových konstant, potřebný pro správné vyhodnocení příkladů vytvářených ve výpočetním programu.

V poslední části bakalářské práce jsou řešeny ilustrativní příklady různých tvarů a uspořádání přípojníc. Získaná data jsou prezentována formou grafů. Kapitola je zaměřena především na sledování působení Lorentzových sil v přípojnicích a na vyhodnocování činných ztrát přípojníc.

Součástí práce jsou přílohy, v kterých si můžeme prohlédnout data ke grafům prezentovaných v práci.

# 1 Elektromagnetické pole

## 1.1 Úvod do elektromagnetického pole

Důsledkem působení elektrických a magnetických sil v prostoru je elektromagnetické pole. [1] Elektromagnetické pole je zkoumáno od konce 18. století, přičemž největší podíl je právem přisuzován Michaelovi Faradayovi za objevení elektromagnetické indukce, jevu, který indukuje elektrické napětí v magnetickém nestacionárním poli. [2, 3] Matematického vyjádření Faradayových poznatků se ujal James Clerk Maxwell a definoval je v dnes dobře známých Maxwellových rovnicích, které budou rozebírány dále. [2] Maxwellova teorie má své hranice, které ale neovlivní v negativním důsledku výsledky této práce, a jsou zmíněny pouze pro úplnost. Jedním z omezení je, že teorie platí pouze v nepohybujícím se prostředí a další je nedokonalost Maxwellových rovnic na mikroskopické úrovni, pro kterou teorii uzpůsobil Hendrik Antoon Lorentz v mikroskopické teorii elektromagnetického pole, která byla ještě později nahrazena kvantovou dynamikou. [2]

Elektromagnetické pole rozdělujeme podle časového průběhu na pole s časem neproměnné a na pole s časem proměnné, nebo podle prostorového průběhu na pole trojrozměrné (3D pole), dvojrozměrné (2D pole), jednorozměrné (1D pole) a homogenní. [2]

Elektrický proud  $I$  je důsledkem pohybu elektrického náboje  $Q$ , jehož velikost je dána celočíselným násobkem elementárního náboje  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  [C]. Náboj může být rozložen s objemovou hustotou, plošnou hustotou, lineární hustotou, nebo může být také diskrétní (tzn. soustředěn v bodu). [2]

Primárními veličinami elektromagnetického pole jsou intenzita pole  $\mathbf{E}$  a magnetická indukce  $\mathbf{B}$ . Pokud se pohybujeme v jiném prostředí nežli ve vakuu, jsou tyto veličiny doplněny pro elektrické pole o elektrickou indukci  $\mathbf{D}$  a pro magnetické pole o intenzitu magnetického pole  $\mathbf{H}$  (viz vztahy 1.1 a 1.2). [2]

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (1.1)$$

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \mathbf{B} \quad (1.2)$$

V homogenním a lineárním prostředí můžeme uvažovat o permitivitě a permeabilitě

jako o materiálových konstantách s charakteristikami podle vztahů 1.3 respektive 1.4. [2]

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (1.3)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (1.4)$$

Je-li proud rozložen na ploše, jedná se o hustotu proudu  $\mathbf{J}$ , což je další základní veličina definována vztahem 1.5. Důležitým vztahem je tzv. Ohmův zákon v diferenciálním tvaru definován vztahem 1.6. [2, 4]

$$\mathbf{J} = \rho \mathbf{v} \quad (1.5)$$

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E} \quad (1.6)$$

Dále jsou definovány integrální charakteristiky pro elektrické napětí mezi body  $A$  a  $B$  podél křivky  $l$  (viz vztah 1.7), elektrický indukční tok (viz vztah 1.8), magnetický indukční tok (viz vztah 1.9) a elektrický proud (viz vztah 1.10).

$$U_{AB} = \int_A^B \mathbf{E} \, dl \quad (1.7)$$

$$\Psi = \int_S \mathbf{D} \, dS \quad (1.8)$$

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \, dS \quad (1.9)$$

$$I = \int_S \mathbf{J} \, dS \quad (1.10)$$

Význam jednotlivých veličin je uveden v seznamu symbolů a zkratk.

## 1.2 Maxwellovy rovnice v integrálním tvaru

### První Maxwellova rovnice (zákon celkového proudu)

Vztah 1.11 je matematickým vyjádřením toho, že „cirkulace vektoru  $\mathbf{H}$  po libovolně orientované uzavřené křivce  $c$  je rovna součtu celkového vodivého proudu  $I$  a posuvného (tzv. Maxwellova) proudu  $\frac{d\Psi}{dt}$ , spřažených s křivkou  $c$ .“ [2]

Křivka  $c$  je vzájemně pravotočivě orientována s libovolnou plochou  $S$ . [2]

$$\oint_c \mathbf{H} \, d\mathbf{l} = I + \frac{d\Psi}{dt} \quad (1.11)$$

kde

$$\oint_c \mathbf{H} \, d\mathbf{l} \quad \text{oběhové magnetické napětí ve smyčce } c.$$

Proud  $I$  je součet elektrických proudů, které protínají plochu  $S$ . Jsou-li orientovány souhlasně s normálou plochy  $S$ , uvažujeme proudy jako kladné, v opačném případě jako záporné. [2]

### Druhá Maxwellova rovnice (Faradayův indukční zákon)

Vztah 1.12 je matematickým vyjádřením toho, že „cirkulace vektoru  $\mathbf{E}$  po libovolně orientované uzavřené křivce  $c$  je rovna záporně vzaté derivaci magnetického indukčního toku spřaženého s křivkou  $c$ .“ [2]

Libovolná plocha  $S$  je vzájemně pravotočivě orientována s křivkou  $c$ , která plochu obepíná. [2]

$$\oint_c \mathbf{E} \, d\mathbf{l} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.12)$$

kde

$$\oint_c \mathbf{E} \, d\mathbf{l} \quad \text{oběhové elektrické napětí.}$$

**Třetí Maxwellova rovnice (Gaussova věta)**

Vztah 1.13 je matematickým vyjádřením toho, že „elektrický indukční tok libovolnou vně orientovanou uzavřenou plochou  $S$  je roven celkovému volnému náboji v prostorové oblasti  $V$  ohraničené plochou  $S$ .“ [2]

$$\oint_S \mathbf{D} \, d\mathbf{S} = Q \quad (1.13)$$

Protože je elektrické pole zřídlové, jsou indukční čáry neuzavřené. [2]

**Čtvrtá Maxwellova rovnice (zákon spojitosti magnetického indukčního toku)**

Vztah 1.14 je matematickým vyjádřením toho, že „magnetický indukční tok libovolnou uzavřenou orientovanou plochou  $S$  je roven nule.“ [2]

$$\oint_S \mathbf{B} \, d\mathbf{S} = 0 \quad (1.14)$$

Protože neexistuje volný magnetický náboj, jsou magnetické indukční čáry uzavřené a magnetické pole je nezřídlové. [2]

Význam jednotlivých veličin je uveden v seznamu symbolů a zkratk.

**1.3 Maxwellovi rovnice v diferenciálním tvaru****První Maxwellova rovnice**

Vztah 1.25 je matematickým vyjádřením toho, že „rotace vektoru intenzity magnetického pole  $\mathbf{H}$  je rovna hustotě vodivého proudu  $\mathbf{J}$  a hustotě posuvného (Maxwellova) proudu  $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ .“ [2]

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.15)$$

Magnetické pole je obecně nevírové. [2]

## Druhá Maxwellova rovnice

Vztah 1.16 je matematickým vyjádřením toho, že „rotace vektoru intenzity elektrického pole  $\mathbf{E}$  je rovna záporně vzaté derivaci magnetické indukci  $\mathbf{B}$ .“ [5]

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.16)$$

Elektrické pole je obecně vírové. [2]

## Třetí Maxwellova rovnice

Vztah 1.17 je matematickým vyjádřením toho, že „divergence vektoru elektrické indukce  $\mathbf{D}$  je rovna objemové hustotě volného náboje  $\rho$ .“ [2]

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (1.17)$$

Elektrické pole volných náboje je zřídlové. [2]

## Čtvrtá Maxwellova rovnice

Vztah 1.18 je matematickým vyjádřením toho, že „divergence vektoru magnetické indukce  $\mathbf{B}$  je rovna nule.“ [2]

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (1.18)$$

kde

$\mathbf{B}$  [T]          magnetická indukce

Magnetické pole je nezřídlové. [2]

Význam jednotlivých veličin je uveden v seznamu symbolů a zkratk.



## 1.4 Lorentzovy síly

Elektromagnetické pole lze rozdělit na dvě složky podle působení síly  $\mathbf{F}$  na elektricky nabitě částice. Jedná se o elektrické pole, které působí na náboj silou  $\mathbf{F}_e$  a magnetické pole, které působí na pohybující se náboj silou  $\mathbf{F}_m$ . Součet těchto sil je nazýván Lorentzovými silami a její výpočet udává vztah 1.19.

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_m = Q (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1.19)$$

Vztah 1.20 nám říká, že na náboj  $Q$ , pohybující se částic o rychlosti  $\mathbf{v}$ , působí magnetické pole  $\mathbf{B}$  svou silou. Pokud ale místo náboje  $Q$  zamýšlíme proud, který prochází vodičem, pak je síla magnetického pole, která působí na proudový element vodiče vyjádřena vztahem 1.21. Uvažujeme-li tenký vodič, kterým protéká proud  $I$ , působí na něj síla podle vztahu 1.22. Pokud uvažujeme homogenní pole  $\mathbf{B}$ , pak na tenký vodič působí síla podle vztahu 1.23. [2]

$$\mathbf{F}_m = Q (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1.20)$$

$$\mathbf{F}_m = \int_V (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) dV \quad (1.21)$$

$$\mathbf{F}_m = I \int_S dl \times \mathbf{B} \quad (1.22)$$

$$\mathbf{F}_m = \mathbf{B} I l \sin \alpha \quad (1.23)$$

kde

$\alpha$  úhel mezi vodičem a vektorem  $\mathbf{B}$

Význam jednotlivých veličin je uveden v seznamu symbolů a zkratek.

## 1.5 Rovnice pro proudovou hustotu

### Integrální tvar

Integrální tvar pro proudovou hustotu je vyjádřen vztahem 1.24.

$$\oint_s \mathbf{J} dS = - \frac{dQ}{dt} \quad (1.24)$$

### Diferenciální tvar

diferenciální tvar pro proudovou hustotu je vyjádřen vztahem 1.25.

$$\operatorname{div} \mathbf{J} = - \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1.25)$$

Význam jednotlivých veličin je uveden v seznamu symbolů a zkratk.

## 1.6 Činné ztráty

Model teplotního pole lze popsat Fourier-Kirchhoffovou rovnicí (viz vztah 1.26) [6]

$$\operatorname{div} (\lambda \operatorname{grad} T) = \rho c \frac{dT}{dt} - p_J \quad (1.26)$$

Jouleovy ztráty vznikají na základě tepelných účinků vířivých proudů a lze je vyjádřit vztahem 1.27. [6]

$$p_J = \frac{\|\mathbf{J}_v\|^2}{\gamma} \quad (1.27)$$

Význam jednotlivých veličin je uveden v seznamu symbolů a zkratk.

## 2 Přípojnice

### 2.1 Použití přípojnic

Přípojnice jsou efektivním nahrazením kabelového vedení elektrického proudu. V dnešní době je škála jejich použití velmi široká. Přípojnice jsou konstruovány pro všechny typy elektrického napětí, od nízkého napětí až po velmi vysoké napětí. Také jmenovité proudy přípojnic se pohybují ve velkém rozsahu od 4 A až do 20 kA.

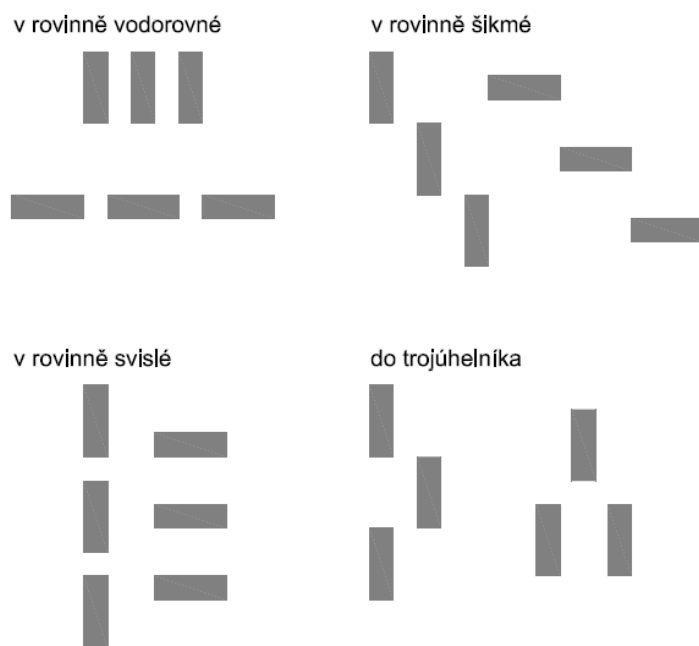
Zásadním je používání například v elektrických rozvodnách nebo transformovnách, v kterých se přivedený výkon rozvádí pomocí přípojnic do jednotlivých odboček a částí rozvodny popřípadě transformovny.

Výhoda přípojnic je úspora místa a celkově snazší kompletace než v případě kabelových rozvodů, vyšší mechanická odolnost, malé tepelné ztráty, snadná rozšiřitelnost, výroba přesně na míru instalovanému systému a také není potřeba kabelových žlabů.

Pro nízká a vysoká napětí jsou nejčastěji využívány vodiče s obdélníkovým průřezem, ale nejsou nezvyklé ani profilové či trubkové vodiče. Pro velmi vysoká napětí se používají pásové, trubkové nebo profilové vodiče.

Používanými materiály pro výrobu přípojnic jsou hliník, měď a jejich slitiny. Základní uspořádání přípojnic se praktikuje v rovině vodorovné, v rovině svislé, v rovině šikmé a v uspořádání do trojúhelníka (*viz obr. 2.1*). [7-13]

Na dalších obrázcích jsou znázorněny typické tvary přípojnic (*viz obr. 2.2-2.9*) a v následujících tabulkách jsou uvedeny nejpoužívanější rozměry měděných a hliníkových přípojnic příslušných tvarů (*viz tab. 2.1-2.4*).



Obr. 2.1 Uspořádání přípojnic<sup>1</sup>

## 2.2 Typy přípojnic pro výpočty

Tab. 2.1 Ploché měděné přípojnice s povrchovou úpravou pocínováním

| Rozměry [mm] | Průřez [mm <sup>2</sup> ] | Délka [m] | Jmenovitý proud [A] |
|--------------|---------------------------|-----------|---------------------|
| 12×5         | 60                        | 2,4       | 200                 |
| 25×5         | 125                       | 2,4       | 400                 |
| 30×10        | 300                       | 2,4       | 630                 |
| 60×10        | 600                       | 2,4       | 1250                |
| 20×10        | 200                       | 3,6       | 520                 |
| 30×10        | 300                       | 3,6       | 630                 |

..

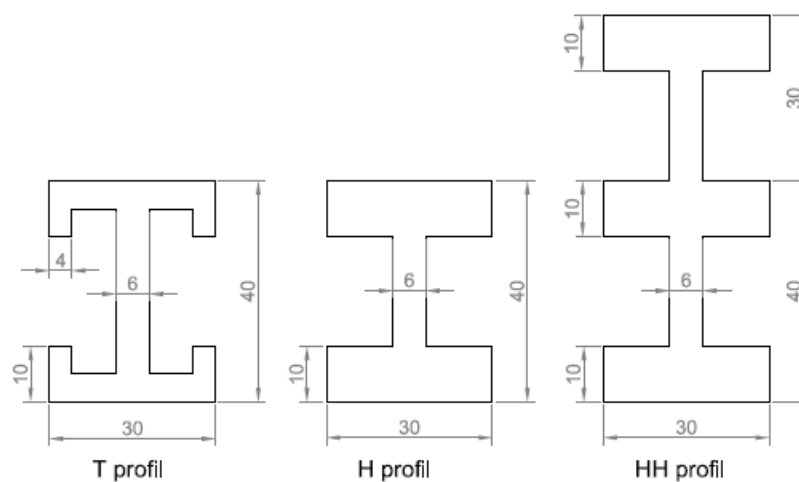
<sup>1</sup> Obr. 2.1 byl překreslen podle zdroje [10]



Obr. 2.2 Plochá měděná přípojnice

Tab. 2.2 Profilové měděné přípojnice

| Průřez [mm <sup>2</sup> ] | Délka [m] | Profil | Jmenovitý proud [A] |
|---------------------------|-----------|--------|---------------------|
| 500                       | 2,4       | T      | 1250                |
| 500                       | 3,6       | T      | 1250                |
| 720                       | 2,4       | H      | 1600                |
| 720                       | 3,6       | H      | 1600                |
| 1140                      | 2,4       | HH     | 2500                |
| 1140                      | 3,6       | HH     | 2500                |



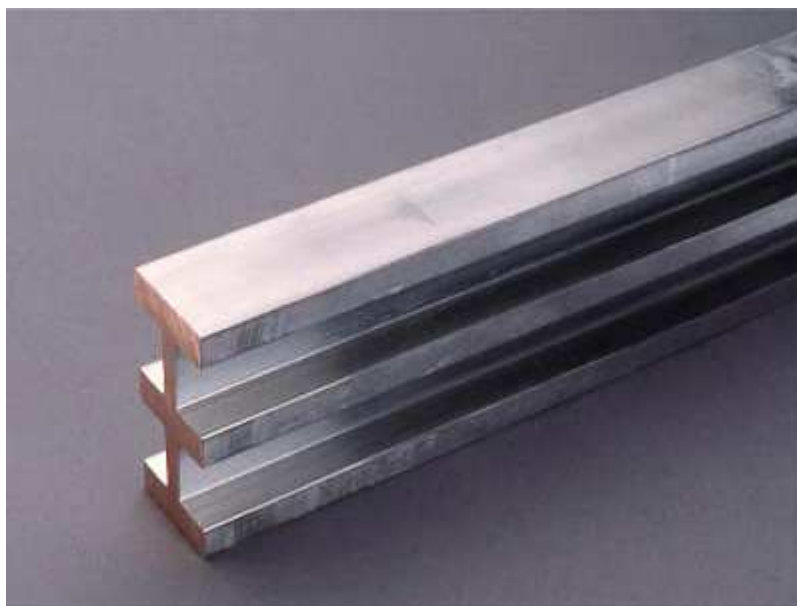
Obr. 2.3 Narys profilových přípojníc



*Obr. 2.4 T profil*



*Obr. 2.5 H profil*

Obr. 2.6 HH profil<sup>2</sup>

Tab. 2.3 Ploché hliníkové přípojnice

| <b>Rozměry [mm]</b> | <b>Průřez [mm<sup>2</sup>]</b> | <b>Délka [m]</b> | <b>Jmenovitý proud [A]</b> |
|---------------------|--------------------------------|------------------|----------------------------|
| 40×5                | 200                            | 6                | 496                        |
| 40×10               | 400                            | 6                | 734                        |
| 50×5                | 250                            | 6                | 600                        |
| 50×10               | 500                            | 6                | 882                        |
| 100×10              | 1000                           | 6                | 1580                       |
| 100×16              | 1600                           | 6                | 2039                       |
| 160×10              | 1600                           | 6                | 2371                       |
| 160×16              | 2560                           | 6                | 3038                       |

<sup>2</sup> Technické parametry v tab. 2.1-2.3 a obr. 2.4-2.6 byly převzaty ze zdroje [14], obr. 2.3 byl překreslen podle zdroje [14]



Obr. 2.7 Ploché hliníkové přípojnice v praxi

Tab. 2.4 Trubkové hliníkové přípojnice

| Vnější průměr<br>[mm] | Tloušťka stěny<br>[mm] | Průřez [mm <sup>2</sup> ] | Délka [m] | Jmenovitý proud [A] |
|-----------------------|------------------------|---------------------------|-----------|---------------------|
| 50                    | 5                      | 707                       | 6         | 1270                |
| 80                    | 10                     | 2199                      | 6         | 2580                |
| 100                   | 10                     | 2827                      | 6         | 3140                |
| 120                   | 10                     | 3456                      | 6         | 3680                |
| 160                   | 10                     | 4712                      | 6         | 4710                |
| 200                   | 10                     | 5969                      | 6         | 5690                |
| 220                   | 10                     | 6597                      | 6         | 6170                |
| 250                   | 10                     | 7540                      | 6         | 6860                |





Obr. 2.8 Trubková hliníková přípojnice



Obr. 2.9 Trubkové hliníkové přípojnice v praxi<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Technické parametry v tab. 2.4, 2.5 a obr. 2.7-2.9 byly převzaty ze zdroje [15]

## 3 Agros2D

### 3.1 Agros2D obecně

Pro vyjádření fyzikálního pole je využívána aplikace Agros2D, která je kódována pomocí jazyka C++. Tento program je zaměřený k multiplatformnímu použití. Řeší parciální diferenciální rovnice na podkladě knihovny Hermes2D, která se opírá o metodu hp-FEM. Jedná se o postup, jenž využívá metodu konečných prvků vyššího řádu přesnosti, jejímž výsledkem je přibližné řešení. Právě jeho přesnost je závislá na rozměru jednotlivých složek, na výběru druhu konečného elementu. Z toho vyplývá, že je silně závislá na stavbě sítě konečných prvků. Tato aplikace je šířena pod licencí GPL a je produkována v Plzni na Katedře teoretické elektrotechniky FEL ZČU. [16]

Simulace fyzikálních polí, které Agros2D umožňuje, je v dnešní době nezpochybnitelnou součástí vývoje elektrických strojů a přístrojů. Takovéto simulace celý výrobní proces zkvalitňují a zlevňují. Agros2D je navržen jako open-source kód, čímž se stává výhodnou alternativou k jinak drahým výpočetním programům. [16]

Aplikaci Agros2 lze rozčlenit na 3 části- preprocesor, procesor a postprocesor. Preprocesor se využívá k určení modelu, volby geometrie a materiálů, procesor je určen k řešení daného problému a postprocesor slouží ke zhodnocení vypočtených údajů. Můžeme analyzovat přechodné děje, ustálený stav a také můžeme využívat analýzu harmonickou. V programu Agros2D je možné vyjádřit problémy v uspořádání kartézském a osově symetrickém. Ukazuje nám teplotní, elektrické proudové, elektrické a magnetické pole. [16]

### 3.2 Matematický model

Při pomalých časových změnách (pole o frekvenci 50 Hz) lze zanedbat posuvný proud (daný druhým členem pravé strany v první Maxwellově rovnici). V tomto případě Maxwellovy rovnice nabývají tvaru podle *vztahů 3.1-3.4*.

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (3.1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (3.3)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (3.4)$$

Je uvažován kartézský souřadnicový systém. V jednotlivých oblastech předpokládáme lineární prostředí, tj.  $\mu = \text{konst.}$ ,  $\gamma = \text{konst.}$  Dále předpokládáme harmonický průběh proudu, což umožňuje přejít na symbolicko-komplexní zobrazení. Při využití vztahů  $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$  a  $\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}$  je rozložení elektromagnetického pole nyní možno popsat parciální diferenciální rovnicí pro fázor magnetického vektorového potenciálu  $\mathbf{A}$  (viz vztah 3.5).

$$\frac{1}{\mu} \operatorname{rot}(\operatorname{rot} \underline{\mathbf{A}}) + j\omega\gamma \underline{\mathbf{A}} = \underline{\mathbf{J}}_{\text{ext}} \quad (3.5)$$

kde

$\underline{\mathbf{J}}_{\text{ext}}$  vnější proudová hustota.

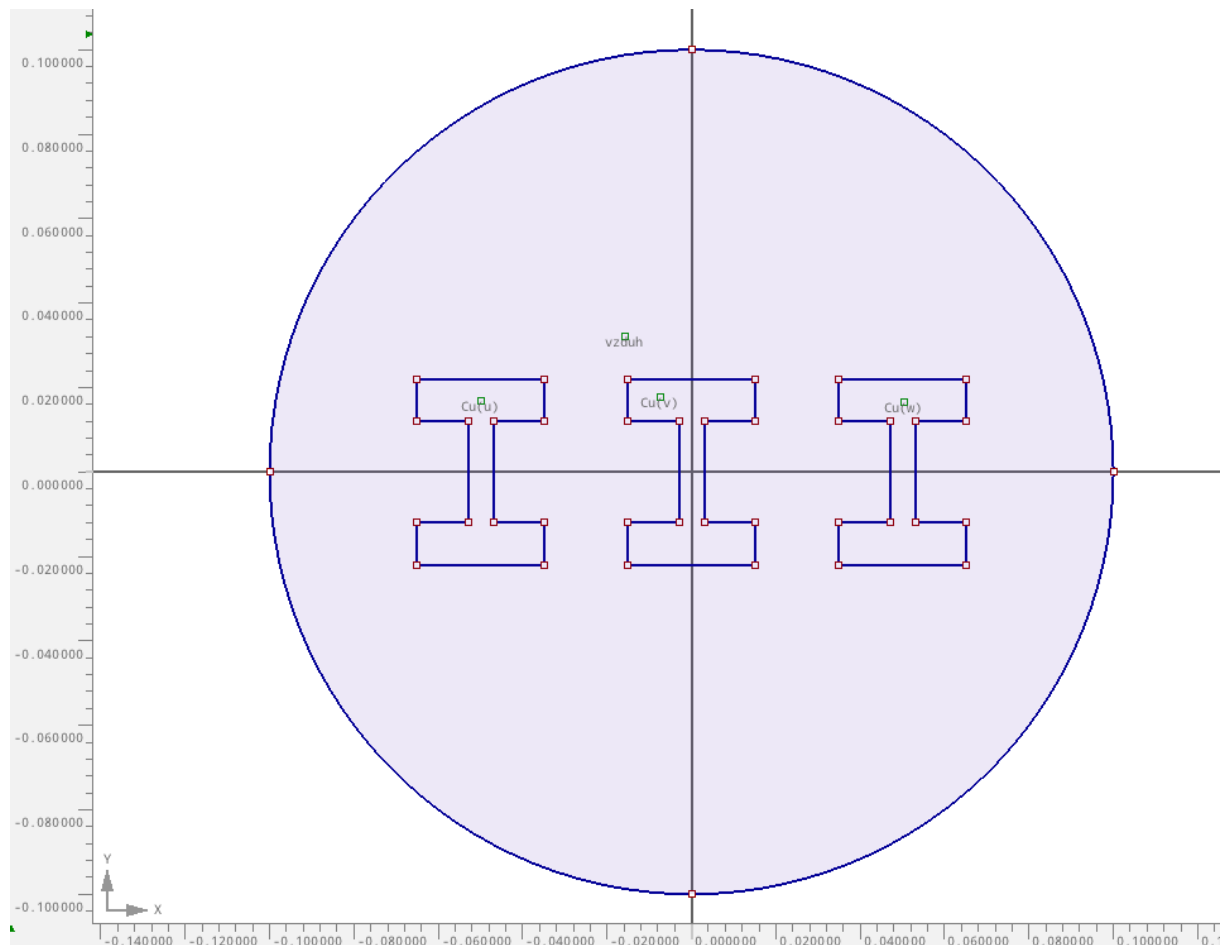
Okrajová úloha je tedy formulována pro magnetický vektorový potenciál. Na hranici této oblasti platí okrajová podmínka  $\underline{A}_z = 0$ .

### 3.3 Numerický model

Na obr. 3.1 je zobrazen model sítě vytvořený v programu Agros2D. V následujících kapitolách jsou zkoumány a vyhodnocovány činné ztráty a Lorentzovy síly u různých typů přípojníc. Proměnnými zde jsou vzájemné vzdálenosti přípojníc, proudy tekoucí přípojnícemi, různá uspořádání přípojníc a materiály, z kterých jsou přípojnice vyrobeny. Pro materiály je zapotřebí znát jejich materiálové konstanty, tedy relativní permeabilitu a konduktivitu (viz tab. 3.1). Výpočty budou probíhat s harmonickým průběhem proudu a tak je zapotřebí vždy počítat s fázovými posuvy proudů zadávanými do výpočetního programu jako reálná a imaginární složka proudu.

Tab. 3.1 Materiálové konstanty mědi a hliníku

|               | $\mu_r$ [-] | $\gamma$ [S/m] |
|---------------|-------------|----------------|
| <b>Cu</b>     | 0,999 990   | 58,108E+06     |
| <b>Al</b>     | 1,000 023   | 37,700E+06     |
| <b>vzduch</b> | 1           | 0              |



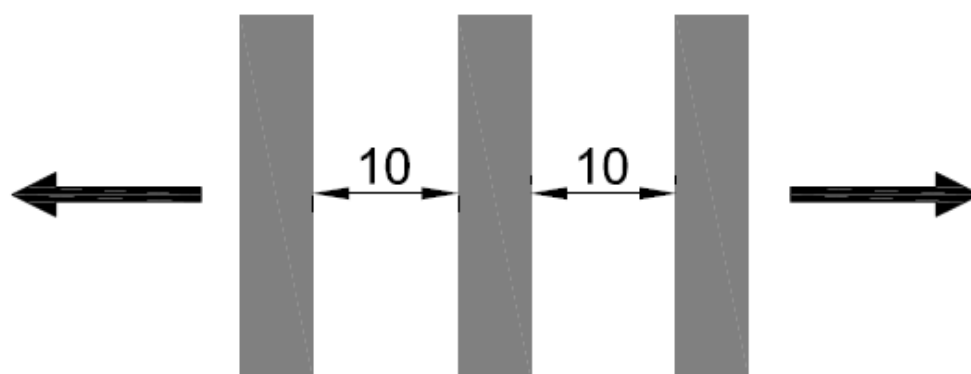
Obr. 3.1 Numerický model vytvořen v programu Agros2D

## 4 Řešená pole přípojnic

V následujících podkapitolách jsou řešeny případy elektromagnetického pole s typickým uspořádáním a tvarem přípojnic. Vyhodnocovány jsou činné ztráty a Lorentzovy síly pro fázi U. Základní jednotkou pro grafy činných ztrát je jeden watt na metr [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$ ], zatímco základní jednotkou pro grafy Lorentzových sil je jeden milinewton. Stejným algoritmem lze řešit pole jakéhokoli tvaru konfigurace přípojnic.

### 4.1 Cu přípojnice, 5x25 mm, vodorovné uspořádání, proud 400 A, různé vzdálenosti

Zde je zkoumán průběh elektromagnetického pole měděných přípojnic o rozměrech 5x25 milimetrů pro dva typy vodorovného uspořádání (pracovně nazvanými jako typ\_a a typ\_b) při absolutní hodnotě proudu 400 A. V uspořádání typu\_a jsou delší hrany přípojnic rovnoběžné, přípojnice jsou nastojato (viz obr. 4.1) a v uspořádání typu\_b jsou kratší hrany přípojnic rovnoběžné, přípojnice jsou naležato (viz obr. 4.2). Postupně byla měněna vzdálenost mezi bližšími hranami vnějších přípojnic k bližším hranám prostřední přípojnice, jak je naznačeno na obr. 4.1 a obr. 4.2. Použitými vzdálenostmi byly 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm a 60 mm.



Obr. 4.1 Zvětšující se vzdálenost mezi hranami přípojnic (uspořádání typ\_a)

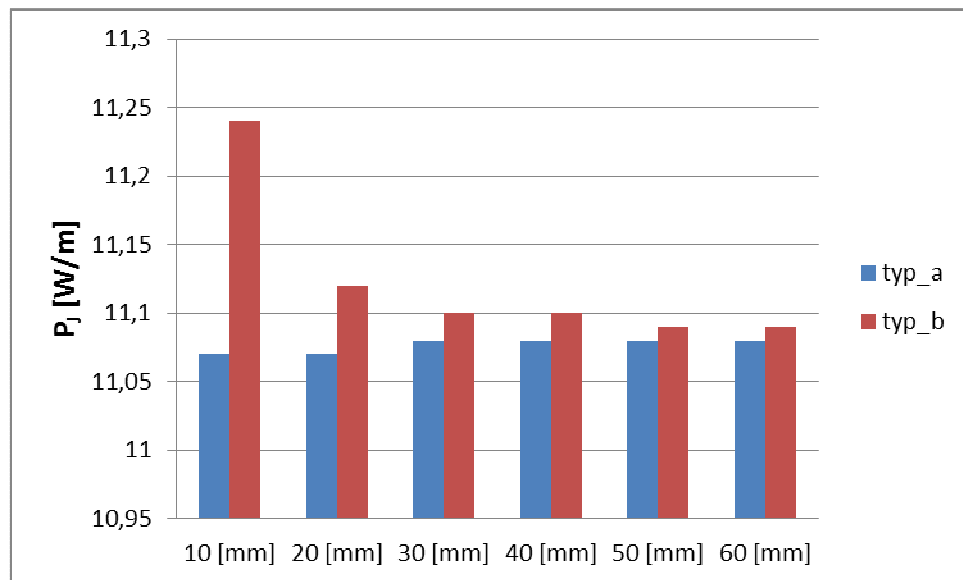


Obr. 4.2 Zvětšující se vzdálenost mezi hranami přípojnic (uspořádání typ\_b)

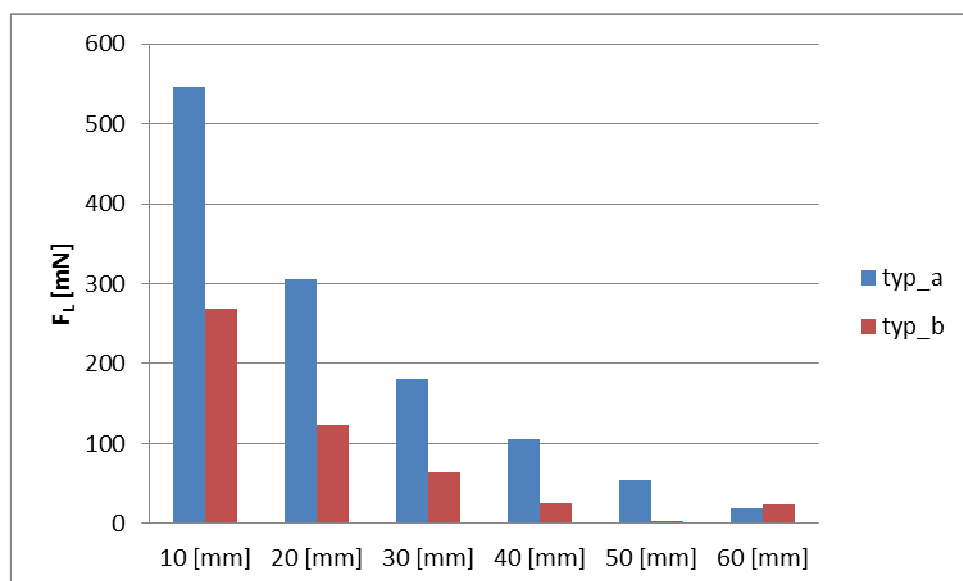
Z grafu 4.1 je patrné, že v případě uspořádání typu\_a jsou činné ztráty menší při každé vzdálenosti hran přípojnic než v uspořádání typu\_b. Mezi činnými ztrátami v uspořádání typu\_a nejsou velké změny, na rozdíl od činných ztrát v uspořádání typu\_b, kde jsou činné ztráty velké na vzdálenosti 10 mm oproti ostatním vzdálenostem. Naopak Lorentzovy síly (viz graf 4.2) jsou v uspořádání typu\_a větší při každé vzdálenosti přípojnic než v uspořádání typu\_b. Lorentzovy síly klesají s rostoucí vzdáleností, výjimkou je uspořádání typu\_b při vzdálenosti hran 50 mm, kde jsou Lorentzovy síly vůbec nejmenší.

Obrázky zobrazující rozložení magnetické indukce a proudové hustoty a jejich hodnoty lze nalézt pro tento a následující příklady v přílohách.

Graf 4.1 Závislost činných ztrát na 1 m délky na vzájemné vzdálenosti a na typu uspořádání přípojnic



Graf 4.2 Závislost Lorentzových sil na vzájemné vzdálenosti a na typu uspořádání přípojnic

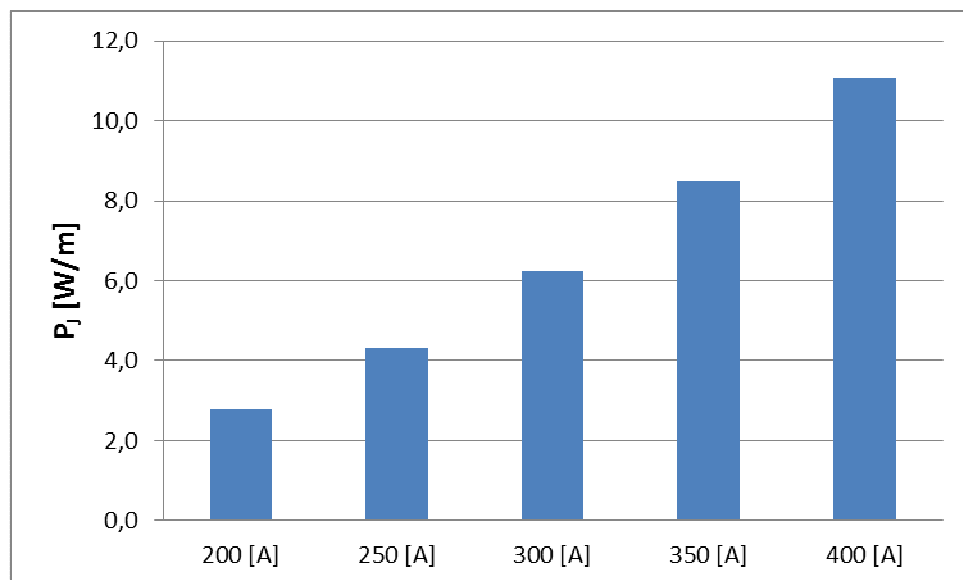


## 4.2 Cu přípojnice, 5x25 mm, vzdálenost 40 mm, různý proud

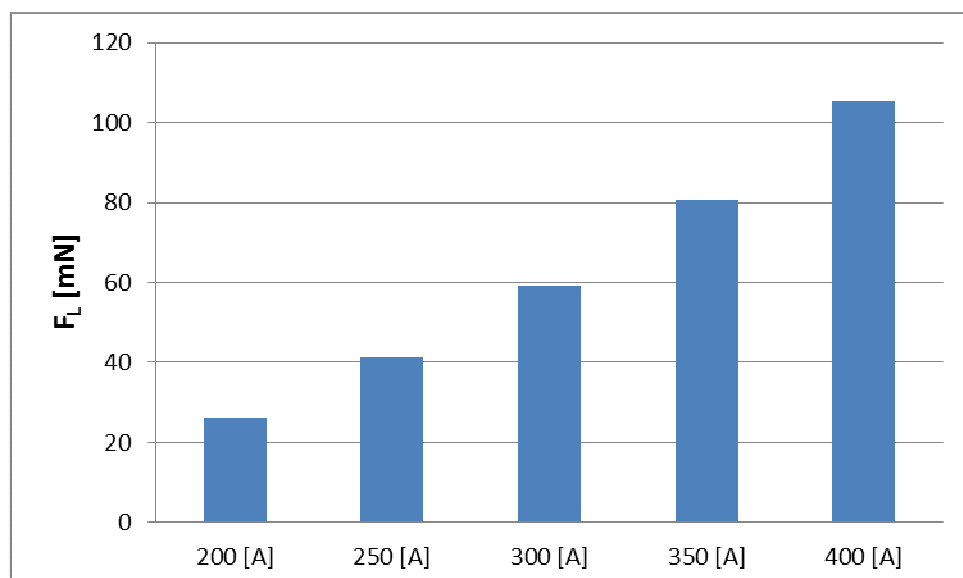
V této kapitole je zkoumán vliv rozdílného proudu na jeden typ přípojnic ve vodorovném uspořádání při stejné vzdálenosti 40 mm bližších hran vnějších přípojnic k bližším hranám prostřední přípojnice. Použité proudy byly 200 A, 250 A, 300 A, 350 A a 400 A.

Z grafu 4.3 je patrné, že činné ztráty se vzrůstajícím proudem také rostou, což odpovídá teoretickým předpokladům. Stejně tak Lorentzovy síly jsou tím větší, čím větší proud protéká danými přípojnicemi, což můžeme pozorovat na grafu 4.4.

Graf 4.3 Závislost činných ztrát na 1 m délky na vzrůstajícím proudu



Graf 4.4 Závislost Lorentzových sil na vzrůstajícím proudu

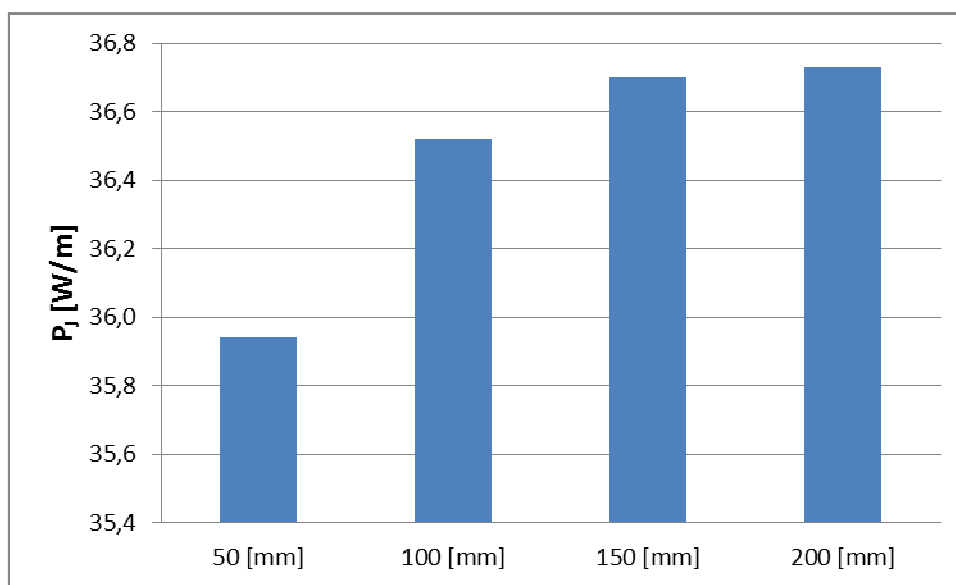


### 4.3 Al přípojnice, 100x10 mm, uspořádání vodorovné, proud 1580 A, různá vzdálenost

Hliníkové přípojnice ve vodorovném uspořádání pod proudem 1580 A jsou od sebe různě vzdáleny. Vzdálenosti bližších hran vnějších přípojníc k bližším hranám prostřední přípojnice jsou postupně 50 mm, 100 mm, 150 mm a 200 mm.

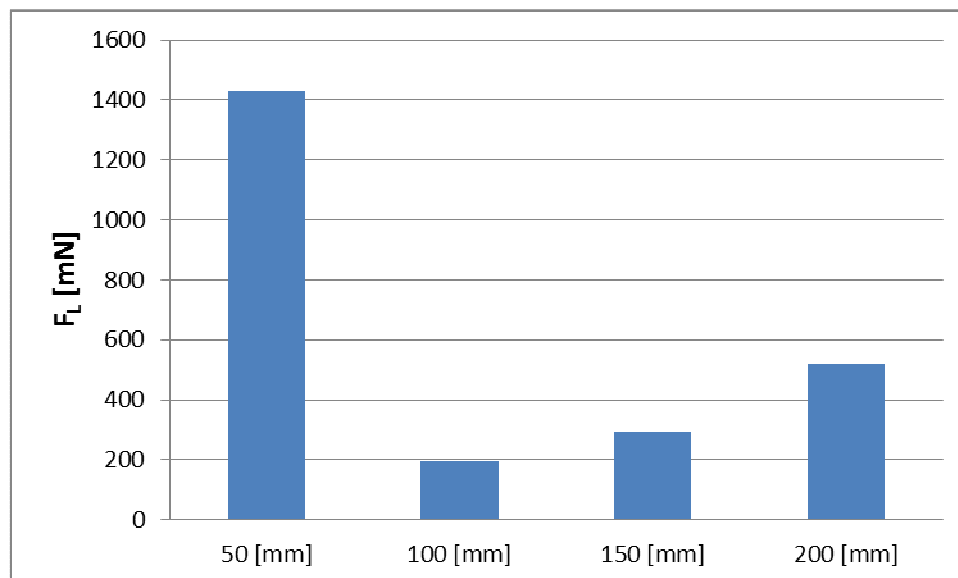
Výsledky činných ztrát a Lorentzových sil jsou prezentovány v *grafu 4.5* respektive *grafu 4.6*. Činné ztráty se vrůstající vzdáleností hran přípojníc stoupají, největší nárůst je zaznamenán mezi vzdálenostmi 50 mm a 100 mm, dále již jsou činné ztráty takřka shodné. Lorentzovy síly jsou největší ve vzdálenosti hran přípojníc 50 mm, dále zaznamenáváme velký pokles při vzdálenosti 100 mm a poté pomalý nárůst při vzdálenostech 150 mm a 200 mm.

Graf 4.5 Závislost činných ztrát na 1 m délky na vzrůstající vzdálenosti





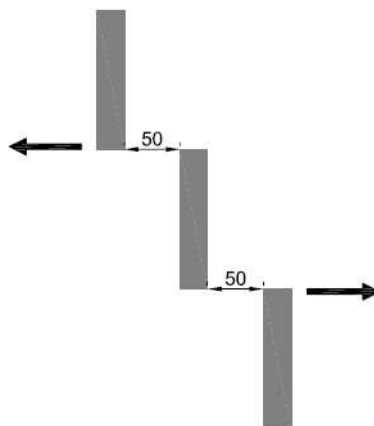
Graf 4.6 Závislost Lorentzových sil na vzrůstající vzdálenosti



#### 4.4 Al přípojnice, 100x10 mm, uspořádání šikmé, proud 1580 A, různá vzdálenost

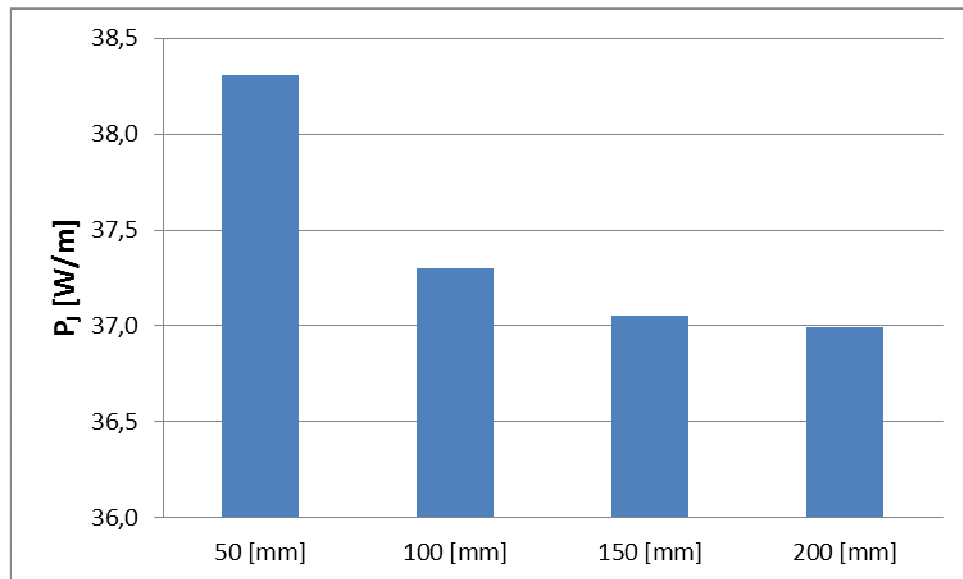
Hliníkové přípojnice v šikmém uspořádání pod proudem 1580 A jsou od sebe různě vzdáleny. Vzdálenosti nejbližších rohů vnějších přípojnic k nejbližším rohům prostřední přípojnice jsou postupně 50 mm, 100 mm, 150 mm a 200 mm (viz obr 4.3).

V grafu 4.7 respektive v grafu 4.8 jsou prezentovány výsledky činných ztrát respektive Lorentzových sil. V tomto případě činné ztráty se vzrůstající vzdáleností klesají. Největší rozdíl je vidět mezi vzdálenostmi 50 mm a 100 mm. Lorentzovy síly také klesají se vzrůstající vzdáleností. Velmi velké Lorentzovy síly (oproti ostatním vzdálenostem) působí při vzdálenosti 50 mm.

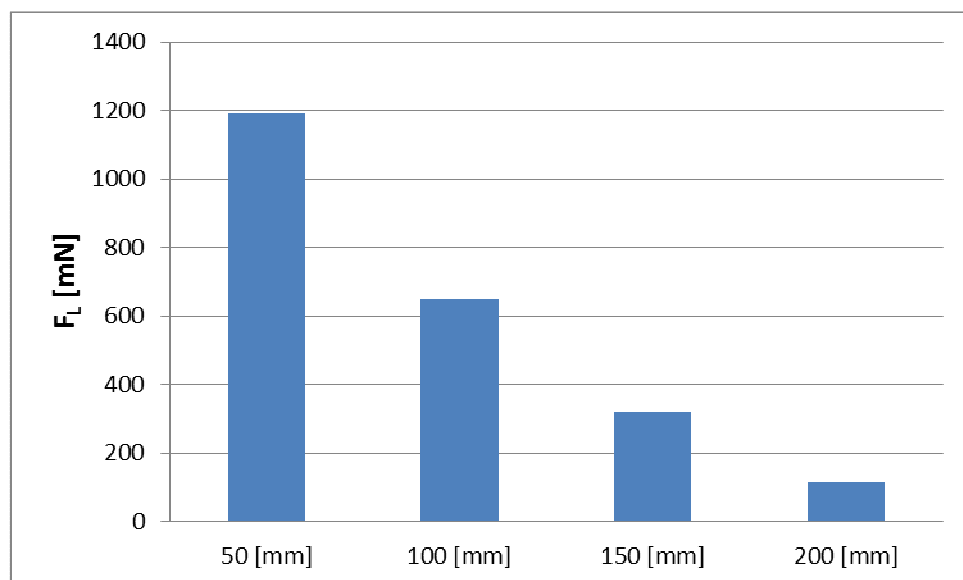


Obr. 4.3 Zvětšující se vzdálenost mezi hranami přípojnic v šikmém uspořádání

Graf 4.7 Závislost činných ztrát na 1 m délky na vzrůstající vzdálenosti



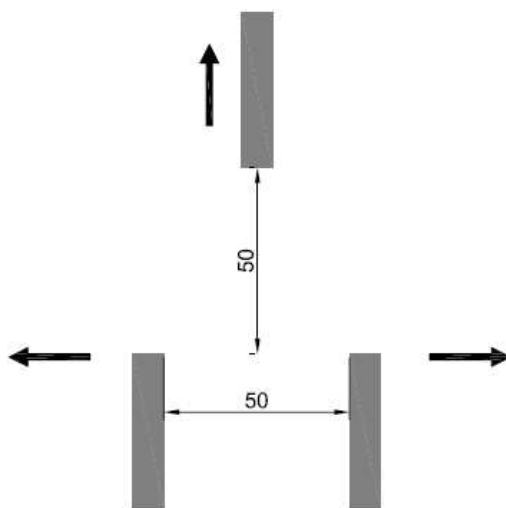
Graf 4.8 Závislost Lorentzových sil na vzrůstající vzdálenosti



#### 4.5 Al přípojnice, 100x10 mm, uspořádání trojúhelník\_a, proud 1580 A, různá vzdálenost

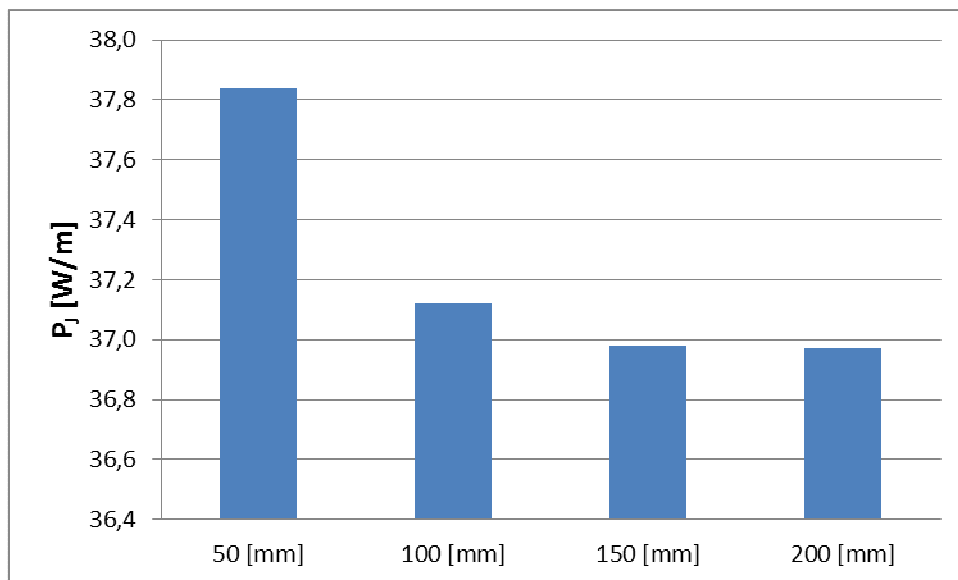
Hliníkové přípojnice v uspořádání do trojúhelníka (pracovně nazvaném jako trojúhelník\_a) pod proudem 1580 A jsou od sebe různě vzdáleny. Vzdálenosti jsou v *grafech 4.9 a 4.10* pojmenovány jako 50 mm, 100 mm, 150 mm a 200 mm, což jsou vzdálenosti bližších hran dvou bočních přípojnic a také vzdálenosti spodní hrany horní přípojnice se spojnicí, kterou pomyslně tvoří horní hrany bočních přípojnic (*viz obr. 4.4*).

Graf 4.9 zobrazuje závislost činných ztrát na vzrůstající vzdálenosti. V tomto případě činné ztráty se vzrůstající vzdáleností klesají, ale poklesy jsou malé, ve vzdálenostech 150 mm a 200 mm jsou činné ztráty totožné. Graf 4.10 zobrazuje závislost Lorentzových sil na vzdálenosti. Ve vzdálenosti 50 mm jsou největší, poté následuje strmý pokles Lorentzových sil s rostoucí vzdáleností.

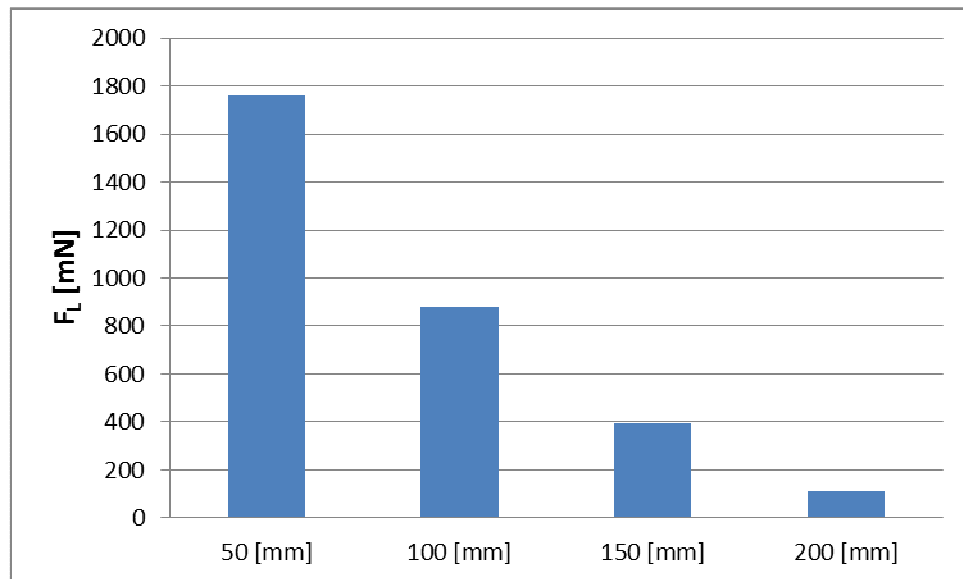


Obr. 4.4 Zvětšující se vzdálenost mezi hranami přípojníc v uspořádání trojúhelník\_a

Graf 4.9 Závislost činných ztrát na 1 m délky na vzrůstající vzdálenosti



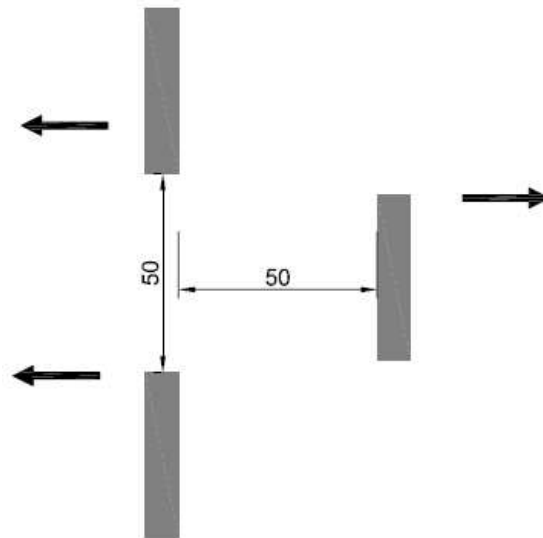
Graf 4.10 Závislost Lorentzových sil na vzrůstající vzdálenosti



#### 4.6 Al přípojnice, 100x10 mm, uspořádání trojúhelník\_b, proud 1580 A, různá vzdálenost

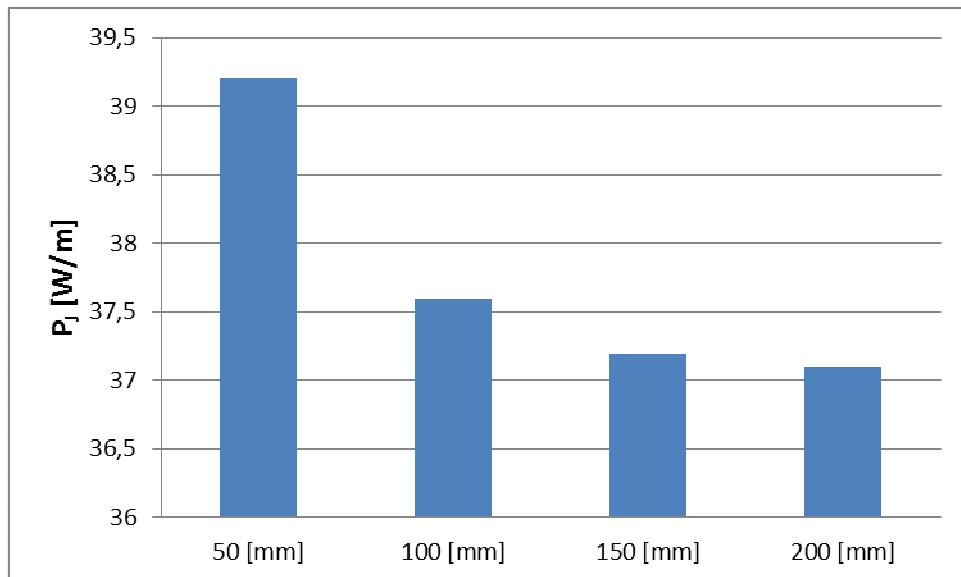
Hliníkové přípojnice v uspořádání do trojúhelníka (pracovně nazvaném jako trojúhelník\_b) pod proudem 1580 A jsou od sebe různě vzdáleny. Vzdálenosti jsou v *grafech 4.11 a 4.12* pojmenovány jako 50 mm, 100 mm, 150 mm a 200 mm, což jsou vzdálenosti bližších hran dvou nad sebou položených přípojnic a také vzdálenosti bližší hrany krajní přípojnice se spojnicí, kterou pomyslně tvoří krajní bližší hrany nad sebou položených přípojnic (*viz obr. 4.5*).

Závislost činných ztrát na vrůstající vzdálenosti je prezentována v *grafu 4.11* a závislost Lorentzových sil je prezentována v *grafu 4.12*. V tomto případě činné ztráty se vzrůstající vzdáleností klesají, největší pokles je mezi vzdálenostmi 50 mm a 100 mm, ale jinak jsou poklesy malé, ve vzdálenostech 150 mm a 200 mm jsou činné ztráty takřka totožné. Lorentzovy síly zaznamenávají prudký pokles s rostoucí vzdáleností.

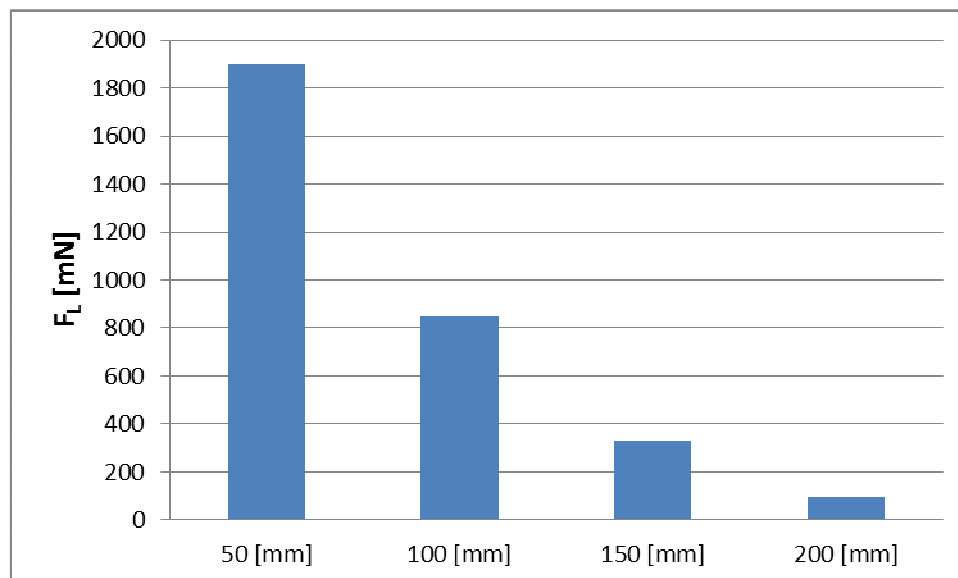


Obr. 4.5 Zvětšující se vzdálenost mezi hranami přípojnic v uspořádání trojúhelník\_b

Graf 4.11 Závislost činných ztrát na 1 m délky na vzrůstající vzdálenosti



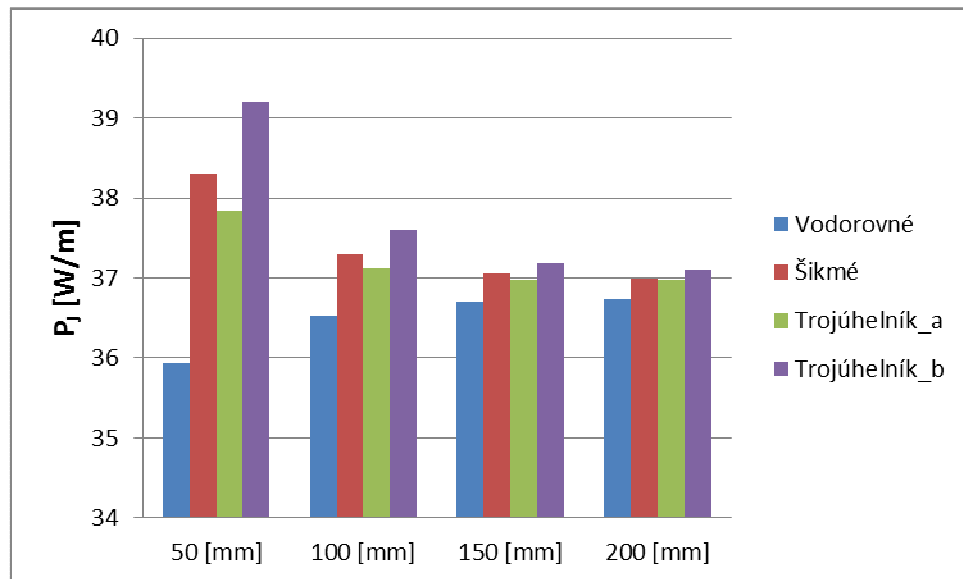
Graf 4.12 Závislost Lorentzových sil na vzrůstající vzdálenosti



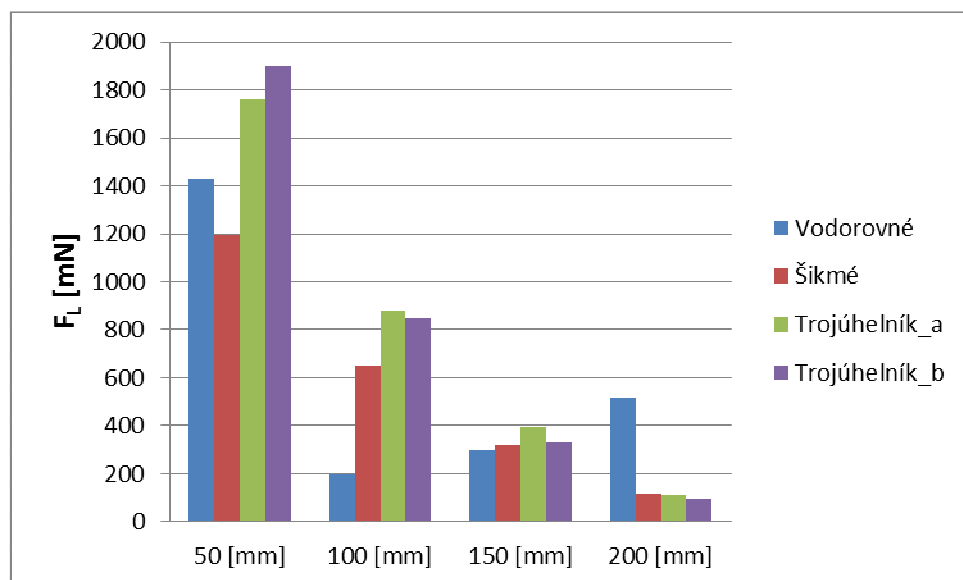
#### 4.7 Al přípojnice, 100x10 mm, proud 1580 A, různá uspořádání, různá vzdálenost

V této kapitole jsou shrnuty výsledky hliníkových přípojníc z předešlých kapitol. Tedy hliníkových přípojníc v uspořádání vodorovném, šikmém, do trojúhelníku\_a a do trojúhelníku\_b a ve vzdálenostech 50 mm, 100 mm, 150 mm a 200 mm. Data jsou zde zahrnuta do grafu 4.13 pro závislost činných ztrát na vzdálenosti a na uspořádání a do grafu 4.14 pro závislost Lorentzových sil na vzdálenosti a na uspořádání. Nejmenší činné ztráty pro všechny vzdálenosti vykazuje vodorovné uspořádání přípojníc, nejhorším se v tomto ohledu jeví uspořádání do trojúhelníku\_b.

Graf 4.13 Závislost činných ztrát na 1 m délky na vzrůstající vzdálenosti a na různém uspořádání



Graf 4.14 Závislost Lorentzových sil na vzrůstající vzdálenosti a na různém uspořádání

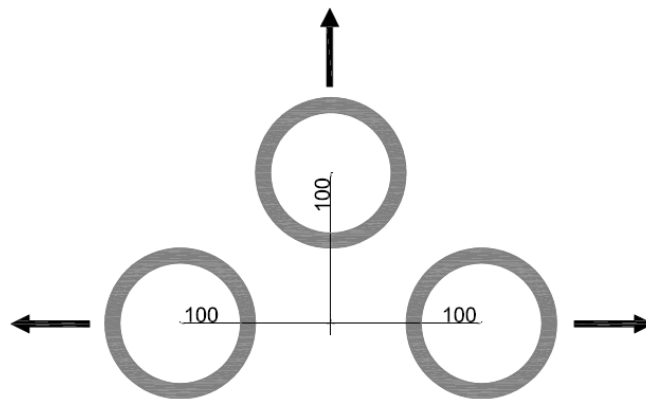


#### 4.8 AI přípojnice, trubkové, vnější průměr 100 mm, tloušťka stěny 10 mm, proud 3140 A, různá uspořádání

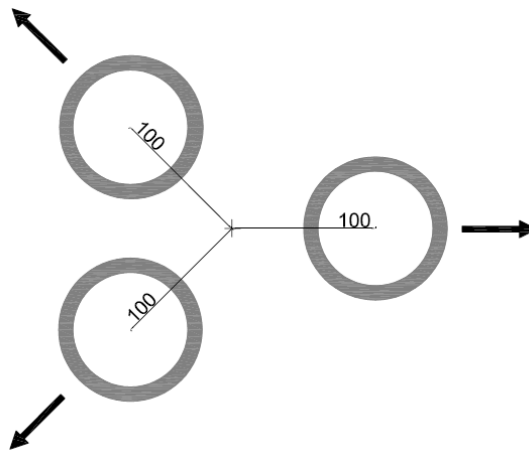
Trubkové hliníkové přípojnice napájeny proudem 3140 A s vnějším průměrem 100 mm a tloušťkou stěny 10 mm jsou zkoumány ve dvou různých trojúhelníkových uspořádáních. Uspořádání jsou pracovně nazvána jako trojúhelník\_a a jako trojúhelník\_b. V uspořádáních trojúhelník\_a se mění vzdálenost od pomyslného středu, který by tvořila spojnice středů dvou krajních přípojníc a kolmice vedená ze středu horní

přípojnice (viz obr. 4.6). Zkoumané vzdálenosti jsou 100 mm, 150 mm a 200 mm. V uspořádání trojúhelník\_b se mění vzdálenost od pomyslného středu tak, aby středy jednotlivých přípojníc byly vždy ve stejné vzdálenosti od středu pomyslného (viz obr. 4.7). Zkoumané vzdálenosti jsou 100 mm, 150 mm a 200 mm.

Z grafu 4.15 můžeme pozorovat, že rozdíly činných ztrát v uspořádání do trojúhelníku\_a a v uspořádání do trojúhelníku\_b jsou velmi nepatrné, ale přesto lepší vlastnosti, které se týkají činných ztrát, má uspořádání do trojúhelníka\_a. Také Lorentzovy síly jsou si velmi podobné v obou uspořádáních.



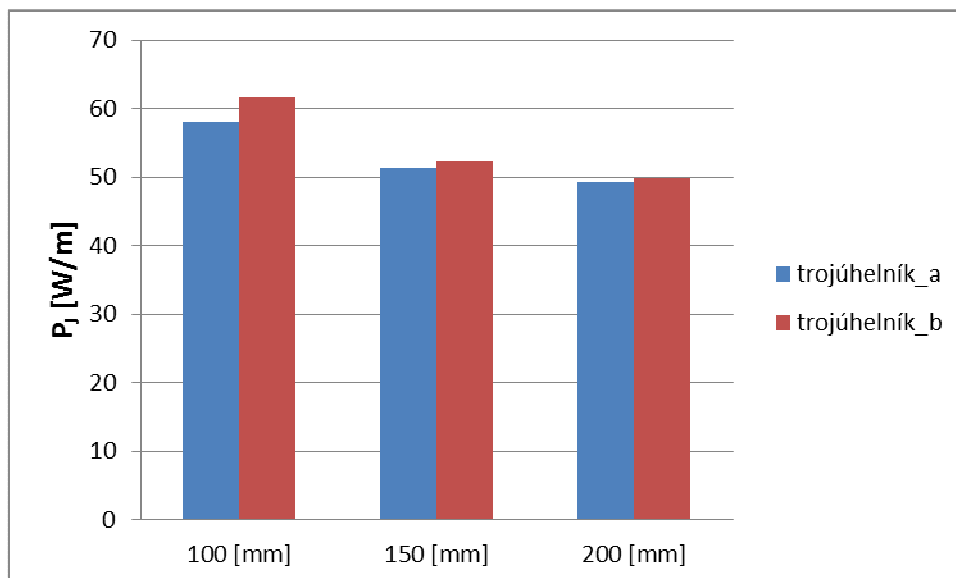
Obr. 4.6 Zvětšující se vzdálenost mezi středy přípojníc v uspořádání trojúhelník\_a



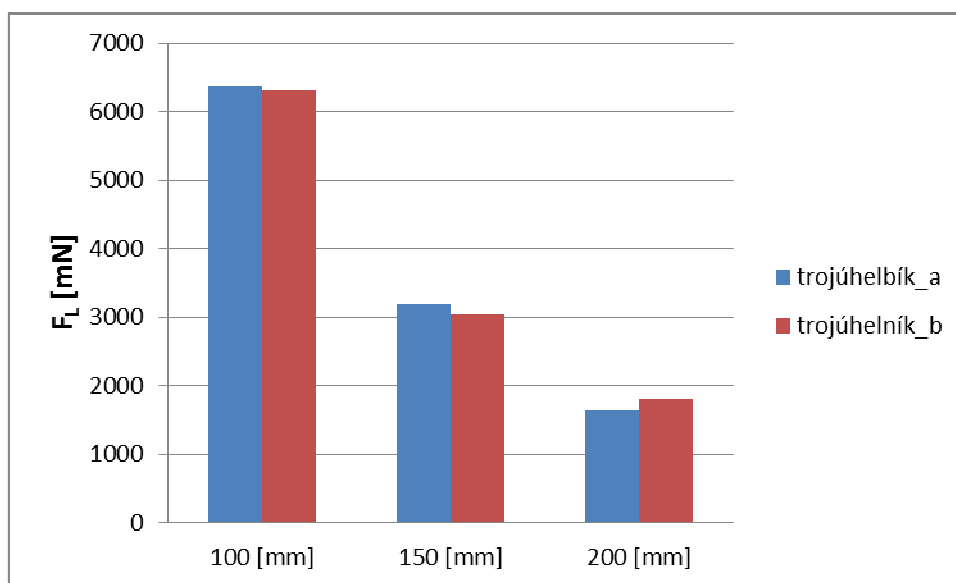
Obr. 4.7 Zvětšující se vzdálenost mezi středy přípojníc v uspořádání trojúhelník\_b



Graf 4.15 Závislost činných ztrát na 1 m délky na vzrůstající vzdálenosti a na různém uspořádání



Graf 4.16 Závislost Lorentzových sil na vzrůstající vzdálenosti a na různém uspořádání



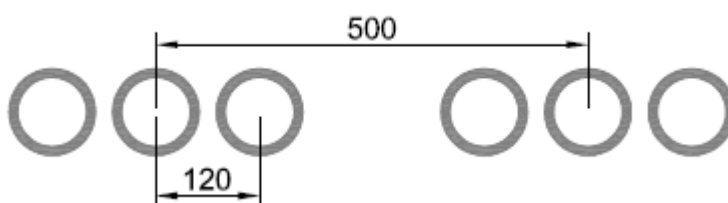
#### 4.9 Al přípojnice, trubkové, vnější průměr 100 mm, tloušťka stěny 10 mm, proud 3140 A, různá fázová zapojení

Tentokrát jsou hliníkové trubkové přípojnice ve dvou skupinách po třech přípojnicích ve vodorovném uspořádání. Středů krajních přípojníc ve skupině jsou od středu prostřední vzdáleny 120 mm. Středů skupin přípojníc jsou od sebe vzdáleny 500 mm (viz obr. 4.8).

První skupina bude mít vždy rozložení fází  $U_1V_1W_1$ , ale ve druhé se bude toto měnit (viz tab. 4.1). Výsledky činných ztrát a Lorentzových sil budou zjišťovány pro

fáze  $U_1$  a  $U_2$ .

Graf 4.17 zobrazuje závislost činných ztrát na různých fázových zapojeních. Podle předpokladu se jeví jako nejvýhodnější fázové zapojení  $U_1V_1W_1 - U_2V_2W_2$ . Nejméně výhodnými zapojeními z hlediska činných ztrát se zdají být zapojení  $U_1V_1W_1 - V_2U_2W_2$  a  $U_1V_1W_1 - W_2U_2V_2$ , čili zapojení s fází  $U_2$  uprostřed. Zajímavostí je potvrzení symetrie při zapojení  $U_1V_1W_1 - W_2V_2U_2$ , kterou dokazují stejné činné ztráty pro fázi  $U_1$  a pro fázi  $U_2$ . Graf 4.18 zobrazuje závislost Lorentzových sil na různých fázových zapojeních. Zde můžeme pozorovat nejmenší Lorentzovy síly při zapojeních  $U_1V_1W_1 - V_2U_2W_2$  a  $U_1V_1W_1 - W_2U_2V_2$ , ale nesmíme zapomínat na výsledky činných ztrát pro tato zapojení. I Lorentzovy síly při zapojení  $U_1V_1W_1 - W_2V_2U_2$  potvrzují symetričnost zapojení.



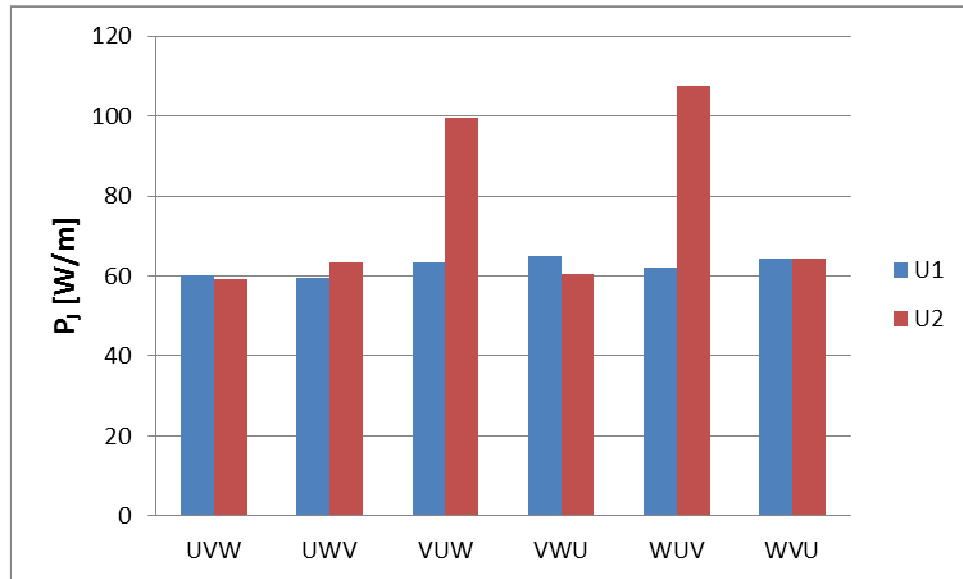
Obr. 4.8 Vzdálenosti středů jednotlivých přípojníc

Tab. 4.1 Kombinace možných zapojení

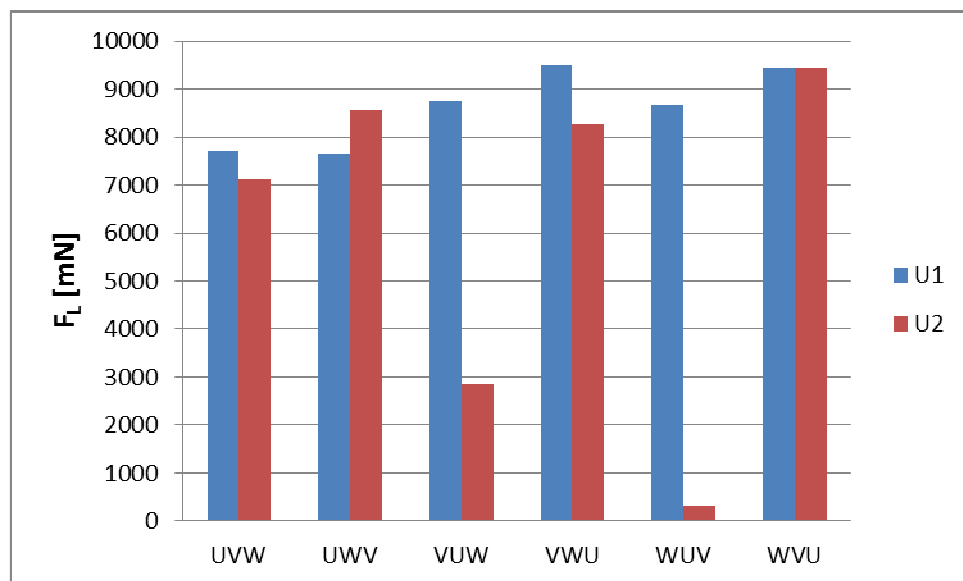
| Skupina 1   | Skupina 2   |
|-------------|-------------|
| $U_1V_1W_1$ | $U_2V_2W_2$ |
| $U_1V_1W_1$ | $U_2W_2V_2$ |
| $U_1V_1W_1$ | $V_2U_2W_2$ |
| $U_1V_1W_1$ | $V_2W_2U_2$ |
| $U_1V_1W_1$ | $W_2U_2V_2$ |
| $U_1V_1W_1$ | $W_2V_2U_2$ |

V popisech následujících grafů na vodorovné ose je skupina fází 2 (viz tab. 4.1).

Graf 4.17 Závislost činných ztrát na 1 m délky na různém fázovém zapojení



Graf 4.18 Závislost Lorentzových sil na různém fázovém zapojení

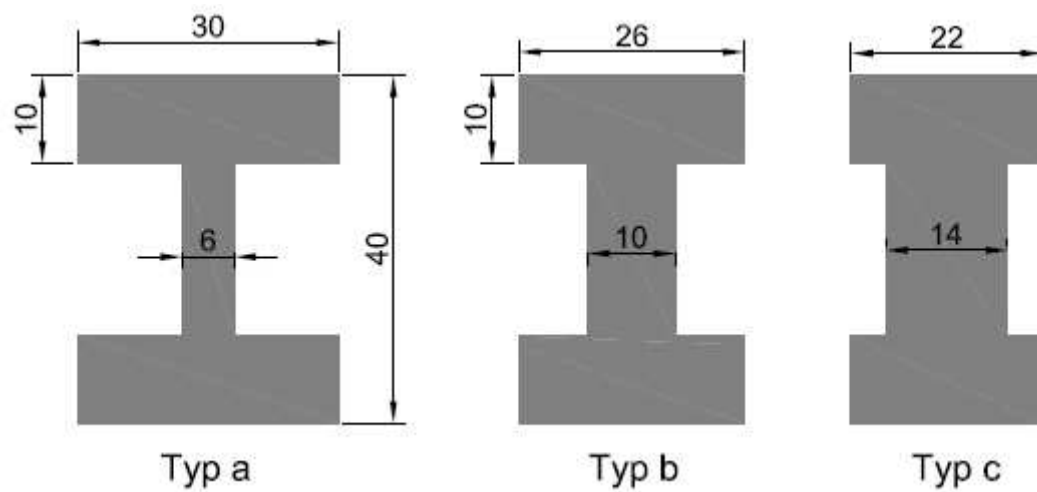


#### 4.10 Cu přípojnice, profil H, průřez 720 mm<sup>2</sup>, vodorovné uspořádání, vzdálenost středů 50, proud 1600 A

Zde jsou tři druhy profilových přípojnic ve tvaru H ve vodorovném uspořádání se stejným průřezem 720 mm<sup>2</sup> ale s jinými rozměry stran (viz obr 4.9). Jsou nazvány jako typ\_a, typ\_b, typ\_c. Vzdálenost středů krajních přípojnic od středu prostřední přípojnice je 50 mm.

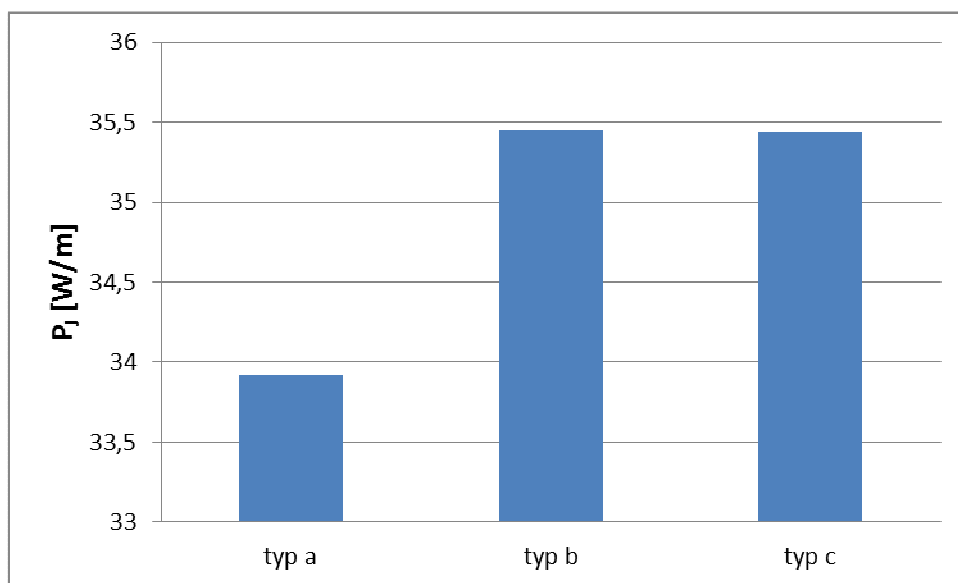
Graf 4.19 zobrazuje závislost činných ztrát na různém provedení přípojnic, které jsou nejmenší při použití přípojnic typu\_a. Graf 4.20 zobrazuje závislost Lorentzových sil na

různém provedení přípojnic, které jsou rovněž nejmenší při použití přípojnic typu\_a.

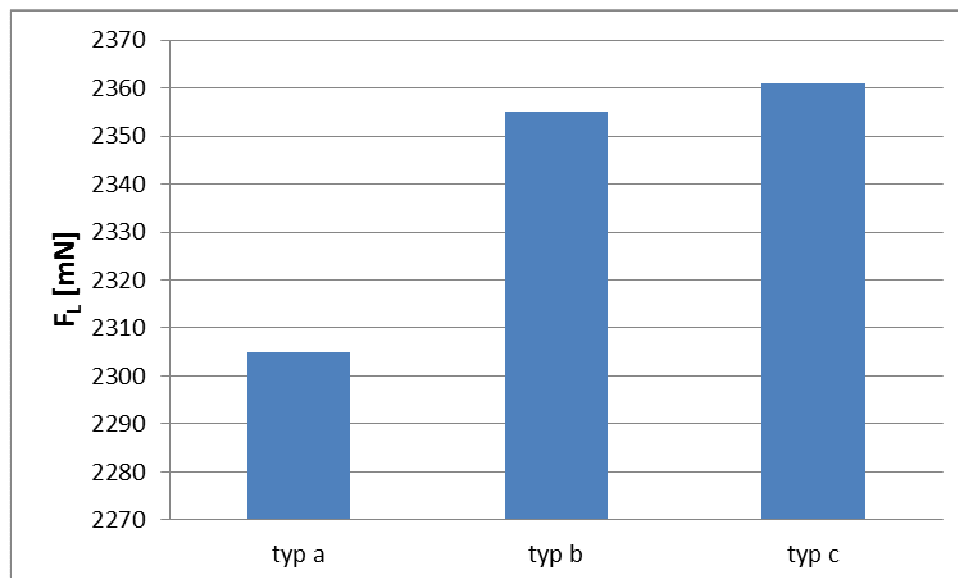


Obr. 4.9 Typy profilových H přípojnic

Graf 4.19 Závislost činných ztrát na 1 m délky na různém typovém provedení přípojnic



Graf 4.20 Závislost Lorentzových sil na různém typovém provedení přípojníc

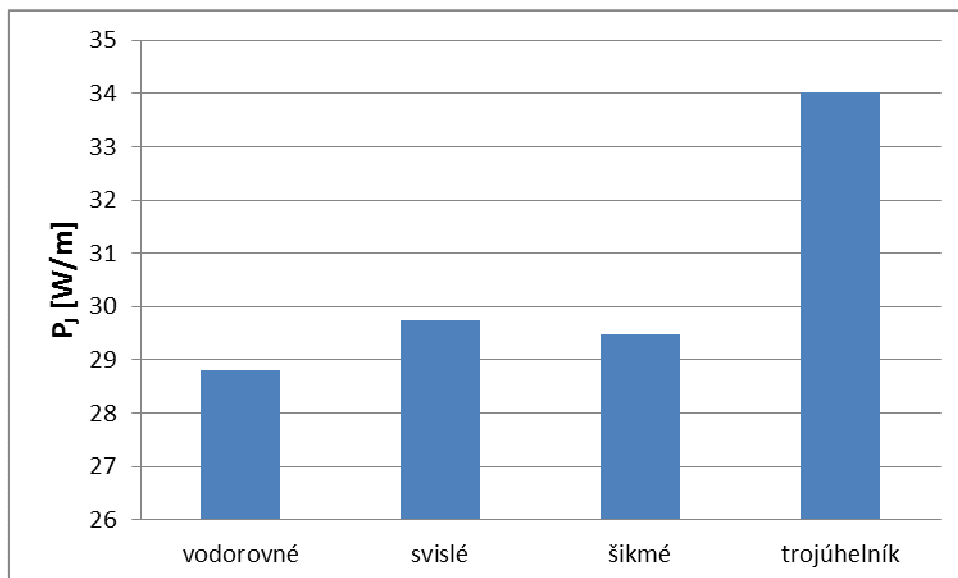


#### 4.11 Cu přípojnice, profil T, průřez 500 mm<sup>2</sup>, vzdálenost středů 50mm, proud 1250 A, různá uspořádání

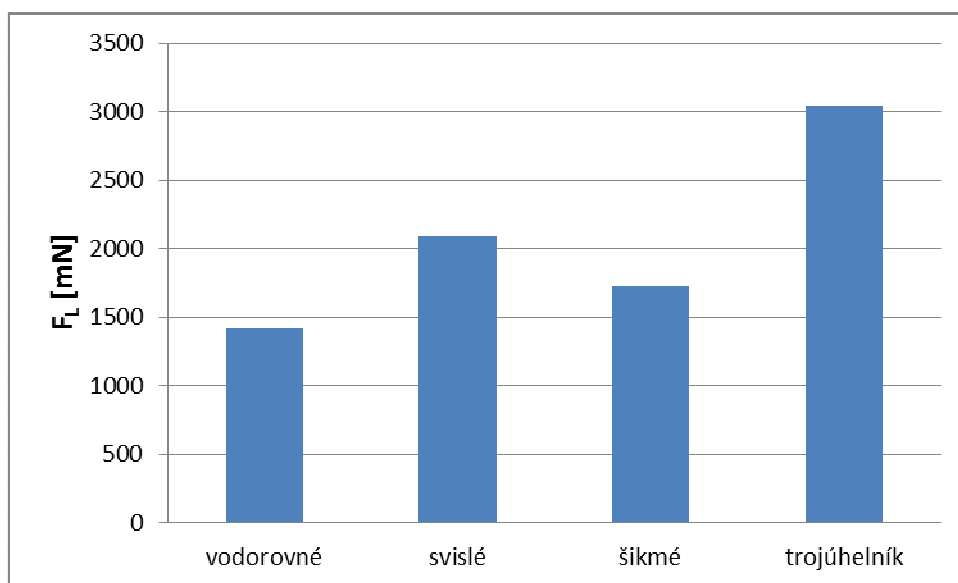
Jeden druh profilových přípojníc ve tvaru T, s průřezem 500 mm<sup>2</sup>, vzdáleností středů 50 mm, absolutní hodnotou proudu 1250 A je zkoumán ve vodorovném, svislém, šikmém a trojúhelníkovém uspořádání.

Graf 4.21 ukazuje závislost činných ztráty na různých uspořádáních přípojníc, přičemž nejmenší činné ztráty vykazuje vodorovné uspořádání přípojníc a největší činné ztráty jsou v trojúhelníkovém uspořádání. Graf 4.22 zobrazuje závislost Lorentzových sil na různých uspořádáních přípojníc. I zde jsou nejmenší Lorentzovy síly ve vodorovném uspořádání a největší Lorentzovy síly v uspořádání do trojúhelníku.

Graf 4.21 Závislost činných ztrát na 1 m délky na různém uspořádání přípojníc



Graf 4.22 Závislost Lorentzových sil na různém uspořádání přípojníc



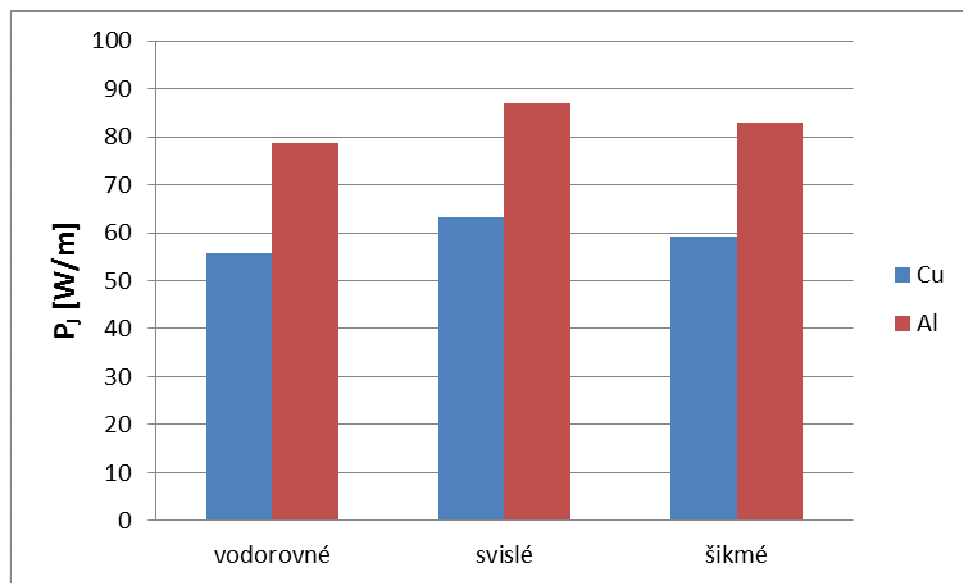
#### 4.12 Cu, Al přípojnice, profil HH, průřez 1140 mm<sup>2</sup>, vzdálenost hran 40 mm, proud 2500 A, různá uspořádání

Profilové přípojnice ve tvaru HH s průřezem 1140 mm<sup>2</sup> a vzdáleností 40 mm bližších hran vnějších přípojníc k bližším hranám prostřední přípojnice jsou v uspořádání vodorovném, svislém a šikmém. Pro každé uspořádání jsou zjištěny výsledky při použití měděných přípojníc a při použití hliníkových přípojníc.

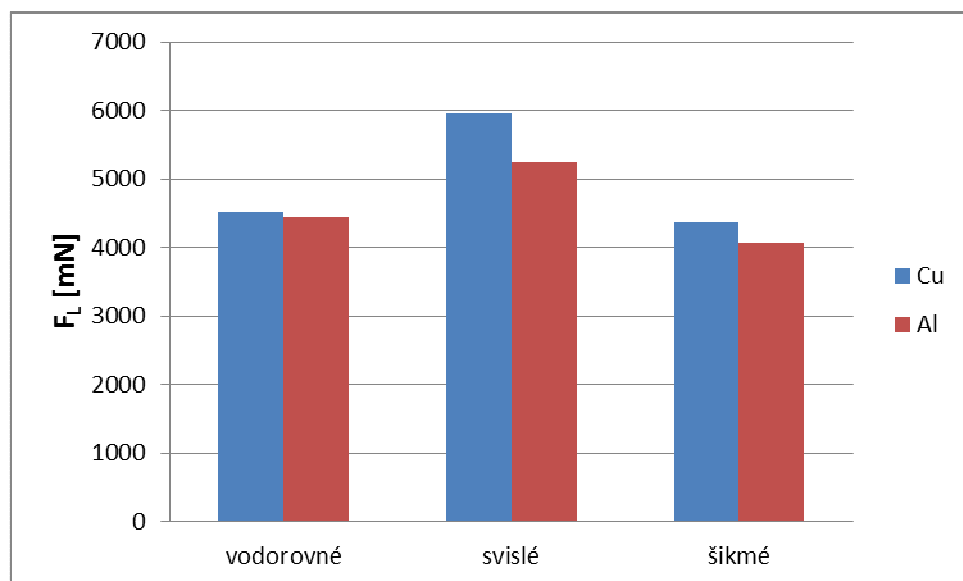
Graf 4.23 zobrazuje závislost činných ztrát na různém uspořádání a různém materiálu přípojnic. Ve všech třech případech jsou výrazně větší činné ztráty při použití hliníkových přípojnic, což poukazuje na skutečnost, že z hlediska činných ztrát je výhodnější používat měděné materiály. Graf 4.24 zobrazuje závislost Lorentzových sil na různém uspořádání a různém materiálu přípojnic. Lorentzovy síly jsou menší v hliníkových přípojnicích pro všechna uspořádání.

Obrázky zobrazující rozložení magnetické indukce a proudové hustoty a jejich hodnoty lze nalézt pro tento a předcházející příklady v přílohách.

Graf 4.23 Závislost činných ztrát na 1 m délky na různém uspořádání a materiálu přípojnic



Graf 4.24 Závislost Lorentzových sil na různém uspořádání a materiálu přípojnic



## Závěr

Cílem této práce bylo prozkoumat elektromagnetické pole elektrických přípojníc. Stavebním kamenem byla znalost teorie elektromagnetického pole, která byla rozebírána v první kapitole. Dalším bodem bylo seznámení se samotnými přípojnícemi, s jejich základními vlastnostmi a způsobech používání. Dále se čtenář seznámil s výpočetním programem Agros2D, ve kterém bylo elektromagnetické pole modelováno.

Tvarů a uspořádání přípojníc lze namodelovat nepřeberné množství, do práce tedy byly zahrnuty pouze typové příklady běžných tvarů, uspořádání a používaných materiálů. Ze získaných výsledků činných ztrát vyplývá, že se jeví jako výhodnější používání měděných materiálů, ale je třeba také zvážit ekonomické hledisko. Výsledky působení Lorentzových sil na přípojnice naopak ukazují, že se jeví jako efektivnější hliníkové materiály. Při zkoumání vodorovného uspořádání přípojníc vyplynulo, že je vhodné umísťovat přípojnice tak, aby jejich delší hrany byly rovnoběžné, protože v opačném případě byly velké činné ztráty. Naopak Lorentzovy síly byly při umístění přípojníc naležato menší. Při různých uspořádáních stejného typu hliníkových obdélníkových přípojníc se nejlépe jevílo vodorovné uspořádání. Zajímavostí byly větší Lorentzovy síly při jednom typu trojúhelníkové uspořádání. Předpoklady známé z běžné praxe byly potvrzeny při zkoumání různě zpřeházených fázových zapojení, kde se jednoznačně prokázala vhodnost  $U_1V_1W_1 - U_2V_2W_2$  zapojení. K rozdílným činným ztrátám a Lorentzových sil dochází i v případě použití stejného průřezu a stejné vzdálenosti profilových přípojníc změnou poměrů jednotlivých hran. Stejně jako u obdélníkových přípojníc, i při použití profilových přípojníc typu T, se zdálo nejvýhodnějším vodorovné uspořádání. A při použití profilových měděných i hliníkových přípojníc typu HH, vykazovaly měděné materiály opět lepší vlastnosti.



## Seznam literatury a informačních zdrojů

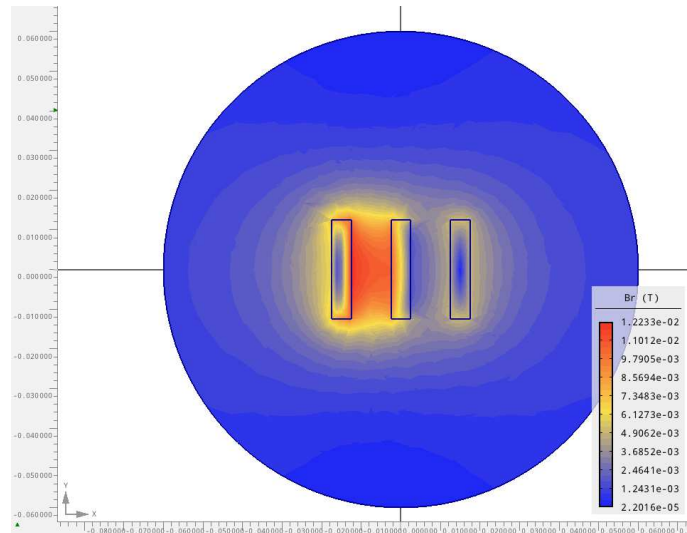
- [1] MAYER, Daniel a Bohuš ULRYCH. *Základy numerického řešení elektrických a magnetických polí*. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988. ISBN 0452888.
- [2] MAYER, Daniel. *Teorie elektromagnetického pole*. 3. vyd.-přepřac. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2001. ISBN 80-708-2826-9.
- [3] Elektromagnetická indukce. *Radek.jandora.web.cz* [online]. Bučovice: Radek Jandora, 2000 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://radek.jandora.web.cz/f16.htm>
- [4] Elektrický proud. *Physics.mff.cuni.cz* [online]. Praha: Univerzita Karlova, 2014 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: [http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz\\_fyziky\\_pro\\_DS/display.php/elmag/3\\_1](http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/elmag/3_1)
- [5] Maxwellovy rovnice. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Maxwellovy\\_rovnice](https://cs.wikipedia.org/wiki/Maxwellovy_rovnice)
- [6] MAYER, Daniel a POLÁK, Josef. *Metody řešení elektrických a magnetických polí*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1983. 456 s.
- [7] DOMEŠ, František. *Analýza vlastností profilových vodičů pro přípojnice rozvodných zařízení*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.
- [8] ING. SCHEJBAL, Martin a Ing. Miroslav TRUNKÁT. Přípojnice: Modernější rozvod elektrické energie nízkého napětí. *Elektro: Odborný časopis pro elektrotechniku*. 2007, **07/2007**(7).
- [9] Přípojnicové systémy, které lze použít prakticky v každé aplikaci. In: <Http://www.eaton.cz/Czech/index.htm> [online]. CZ, 2014 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.eatonelektrotechnika.cz/cz/download/caf7c04e-f0a0-0cd4-99dd-97cc2c10761a>
- [10] ING. SCHEJBAL, Martin. Přípojnicové systémy společnosti Siemens aneb od pantáty vedou šíny. *Elektro: Odborný časopis pro elektrotechniku*. 2008, **11/2008**(11), 28-29.
- [11] Elektrické stanice. *Powerwiki.cz: Energetika* [online]. Praha: HEAT, c1999-2008 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: [https://www.powerwiki.cz/attach/EN2/EN2\\_pr11\\_rozvodny.pdf](https://www.powerwiki.cz/attach/EN2/EN2_pr11_rozvodny.pdf)
- [12] *Leonardo energy: Connecting Energy Technologies, Policies and Markets* [online]. Nizozemsko: Leonardo energy [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.leonardo-energy.org/>

- [13] *McWade Productions* [online]. Cape Town: McWade Productions (Pty) Ltd, c2016 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://mcwadeproductions.co.za/>
- [14] *GHV Trading: Měřicí technika a komponenty po rozvaděče* [online]. Brno: GHV Trading, spol. s r.o., c1991-2016 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.ghvtrading.cz/>
- [15] *EGE: Spolehlivý partner pro energetiku* [online]. České Budějovice: EGE, spol. s r.o., c2013 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.ege.cz/>
- [16] KARBAN, Pavel. Agros2D: Aplikace pro řešení fyzikálních polí. In: *AbcLinuxu.xz: Linux na stříbrném podnose* [online]. Praha: Nitemedia s.r.o., c1999-2015 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.abclinuxu.cz/clanky/agros2d-aplikace-pro-reseni-fyzikalnich-poli>

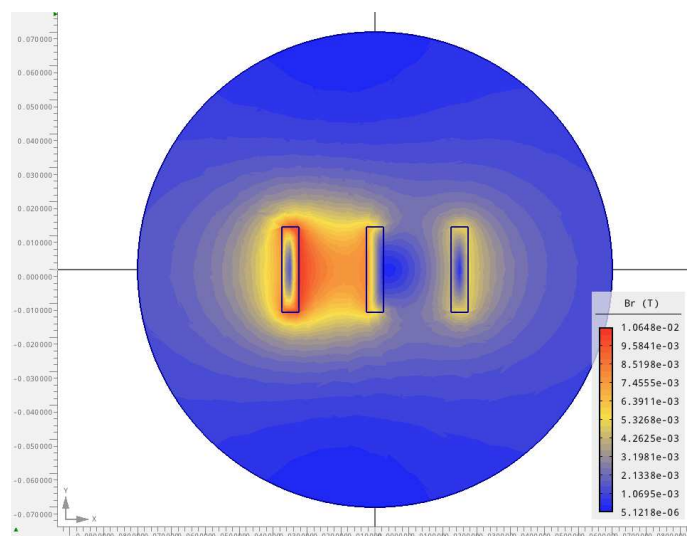
# Přílohy

## Příloha A

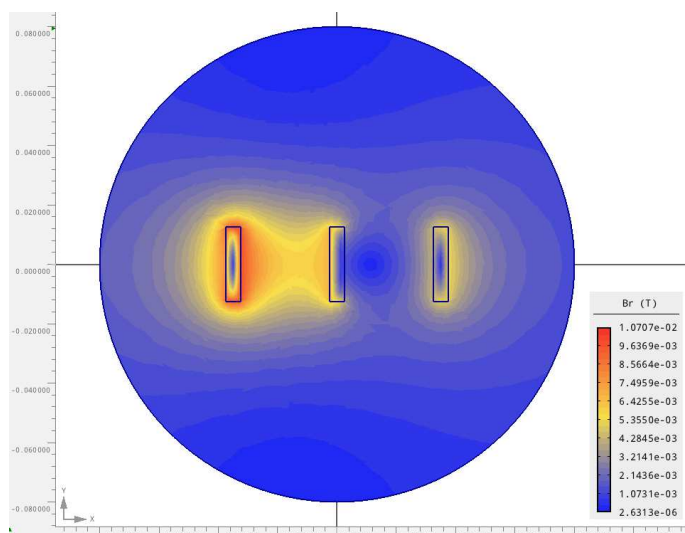
Příloha k přípojnicím z kapitoly 4.1



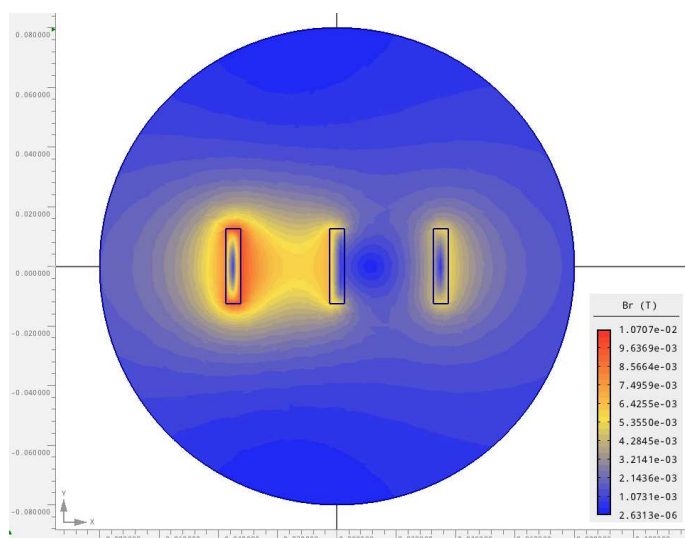
Obr. A1 Rozložení magnetické indukce přípojnic typu\_a (vzdálenost 10 mm)



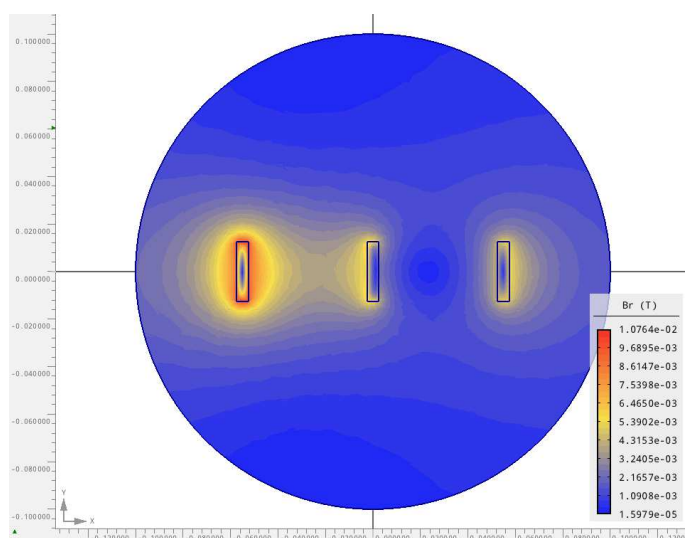
Obr. A2 Rozložení magnetické indukce přípojnic typu\_a (vzdálenost 20 mm)



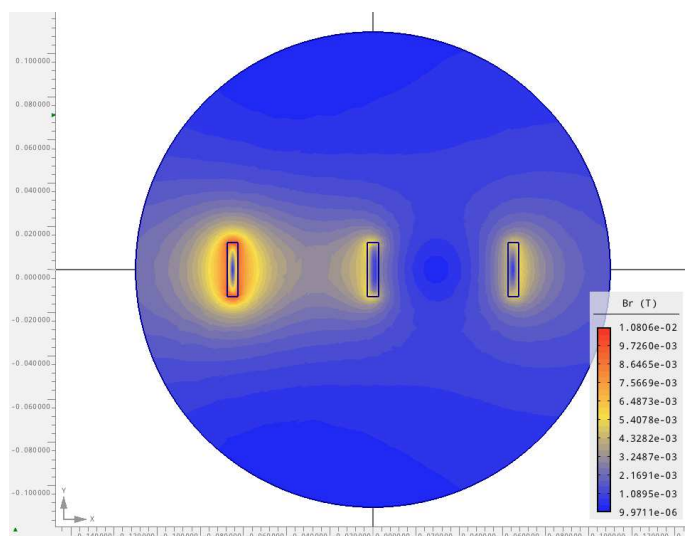
Obr. A3 Rozložení magnetické indukce přípojnic typu\_a (vzdálenost 30 mm)



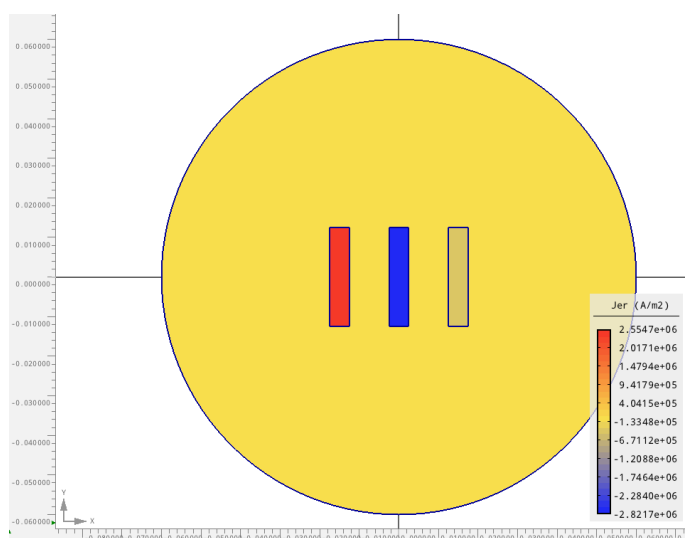
Obr. A4 Rozložení magnetické indukce přípojnic typu\_a (vzdálenost 40 mm)



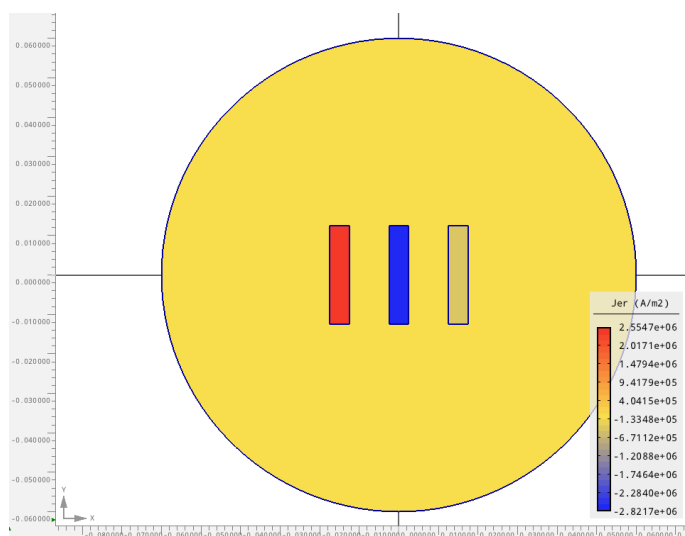
Obr. A5 Rozložení magnetické indukce přípojnic typu\_a (vzdálenost 50 mm)



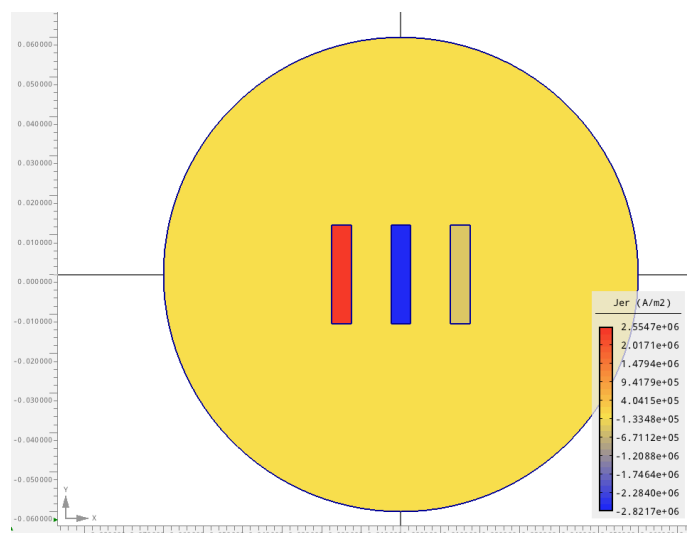
Obr. A6 Rozložení magnetické indukce přípojnic typu\_a (vzdálenost 60 mm)



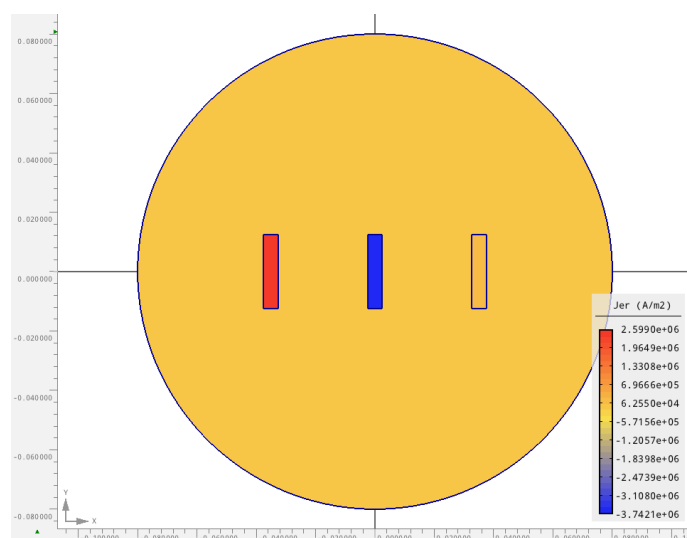
Obr. A7 Rozložení proudové hustoty přípojnic typu\_a (vzdálenost 10 mm)



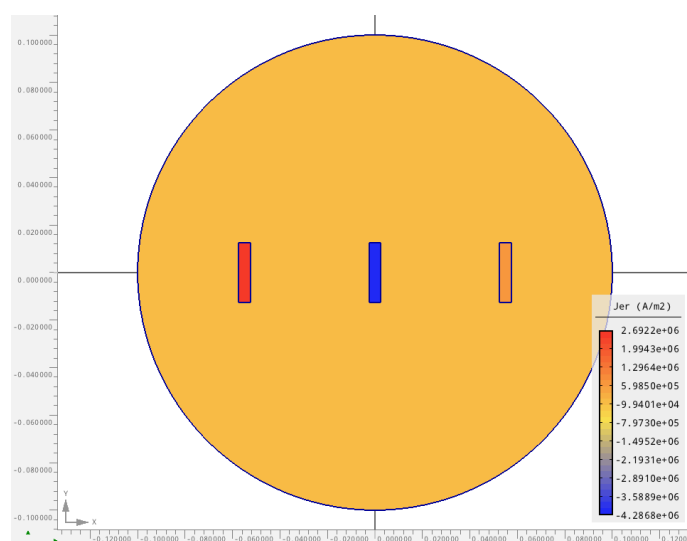
Obr. A8 Rozložení proudové hustoty přípojnic typu\_a (vzdálenost 20 mm)



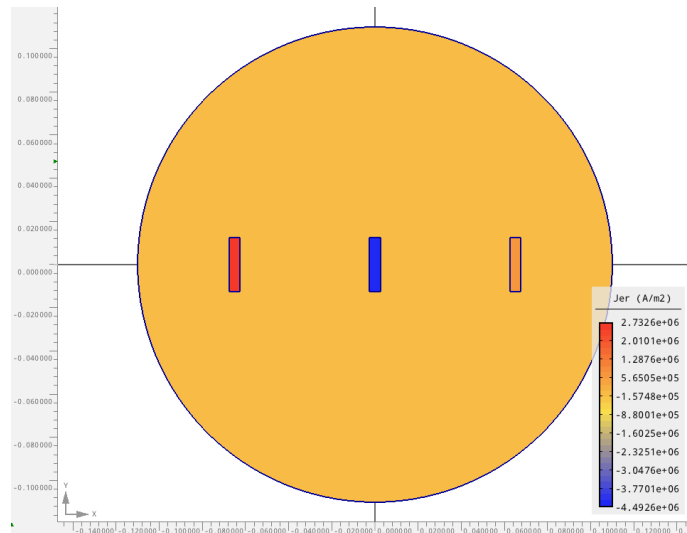
Obr. A9 Rozložení proudové hustoty přípojnic typu\_a (vzdálenost 30 mm)



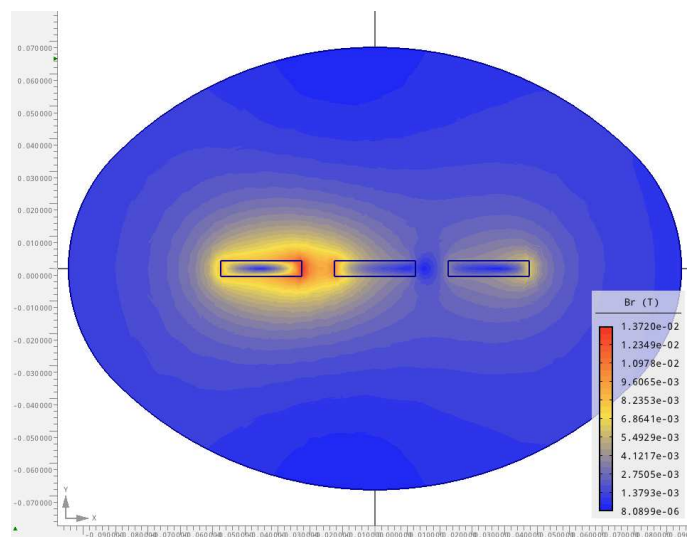
Obr. A10 Rozložení proudové hustoty přípojnic typu\_a (vzdálenost 40 mm)



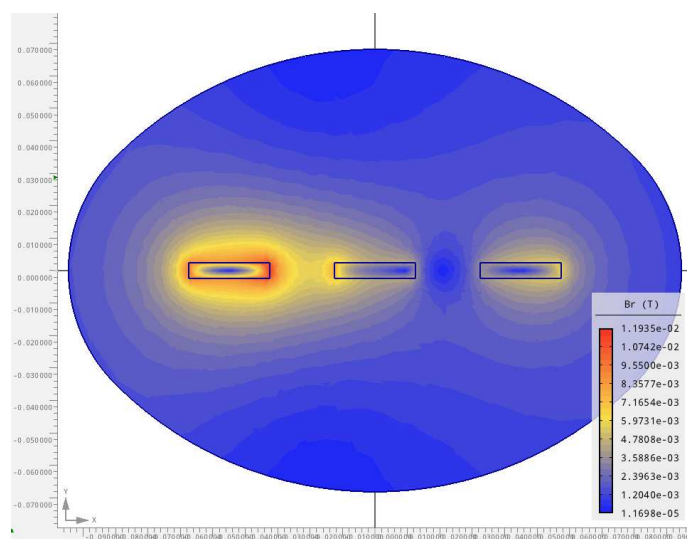
Obr. A11 Rozložení proudové hustoty přípojnic typu\_a (vzdálenost 50 mm)



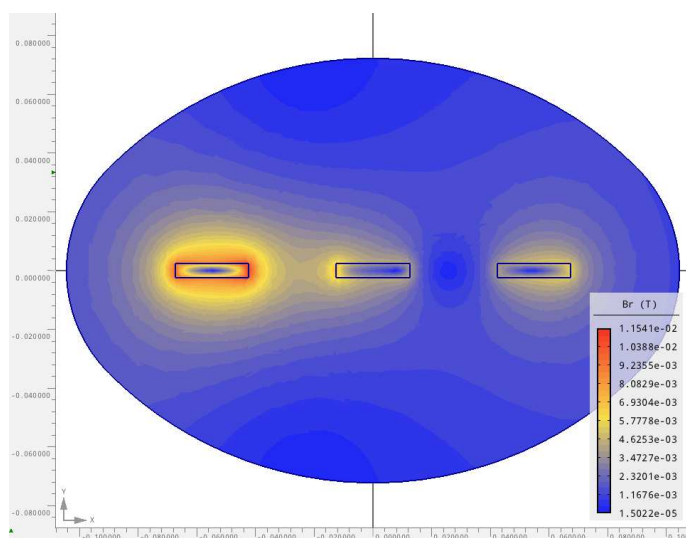
Obr. A12 Rozložení proudové hustoty přípojnic typu\_a (vzdálenost 60 mm)



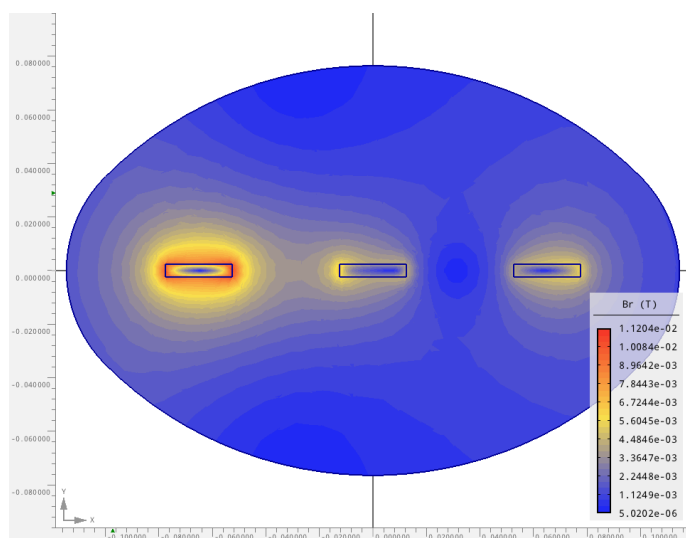
Obr. A13 Rozložení magnetické indukce přípojnic typu\_b (vzdálenost 10 mm)



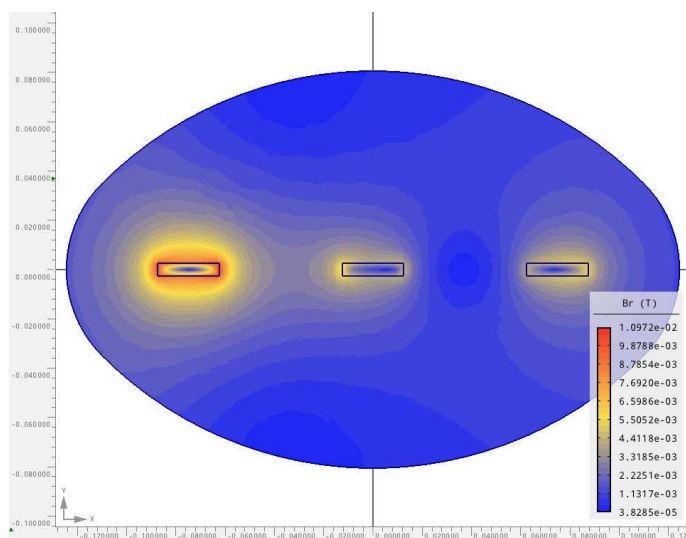
Obr. A14 Rozložení magnetické indukce přípojnic typu\_b (vzdálenost 20 mm)



Obr. A15 Rozložení magnetické indukce přípojnic typu\_b (vzdálenost 30 mm)

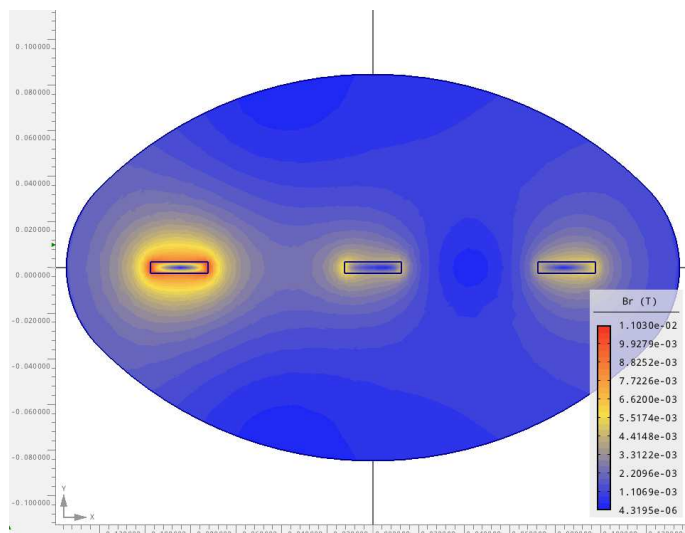


Obr. A16 Rozložení magnetické indukce přípojnic typu\_b (vzdálenost 40 mm)

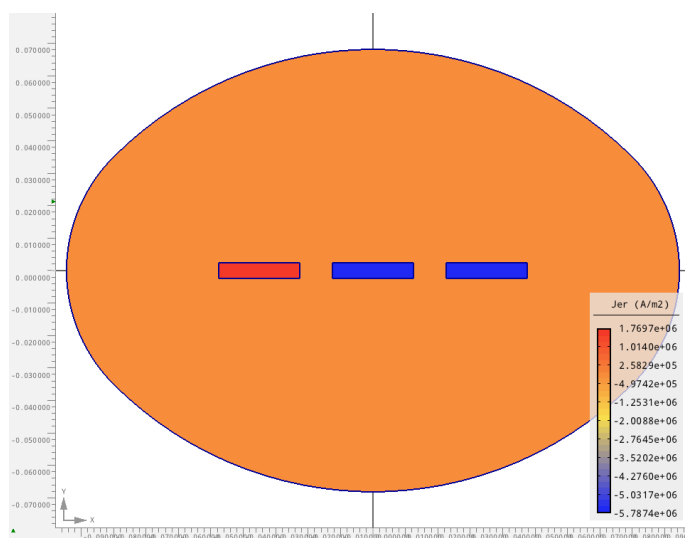


Obr. A17 Rozložení magnetické indukce přípojnic typu\_b (vzdálenost 50 mm)

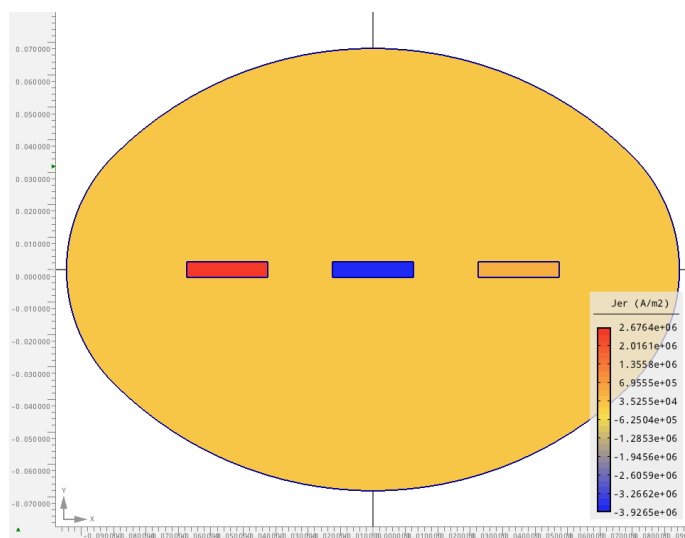




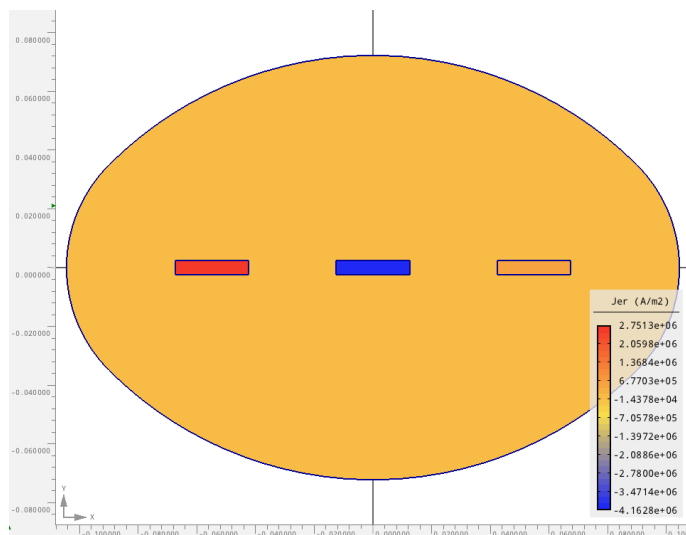
Obr. A18 Rozložení magnetické indukce přípojnic typu\_b (vzdálenost 60 mm)



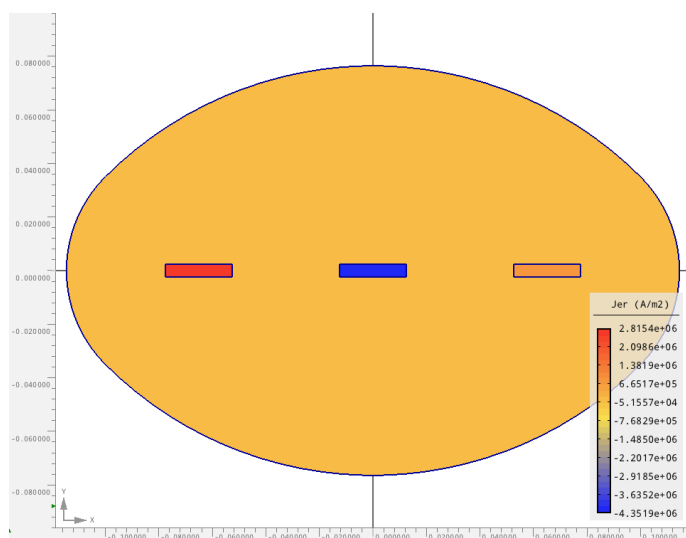
Obr. A19 Rozložení proudové hustoty přípojnic typu\_b (vzdálenost 10 mm)



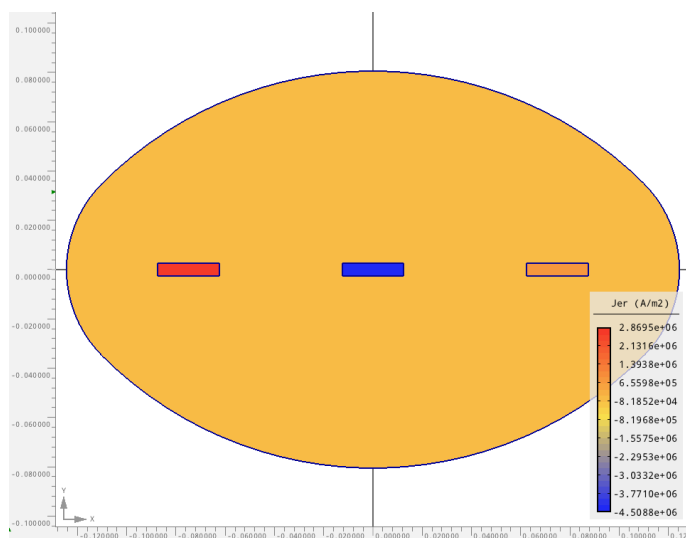
Obr. A20 Rozložení proudové hustoty přípojnic typu\_b (vzdálenost 20 mm)



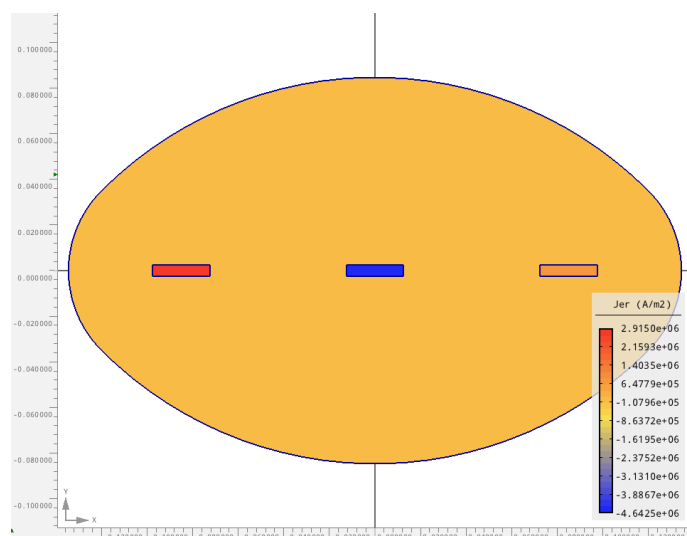
Obr. A21 Rozložení proudové hustoty přípojnic typu\_b (vzdálenost 30 mm)



Obr. A22 Rozložení proudové hustoty přípojnic typu\_b (vzdálenost 40 mm)



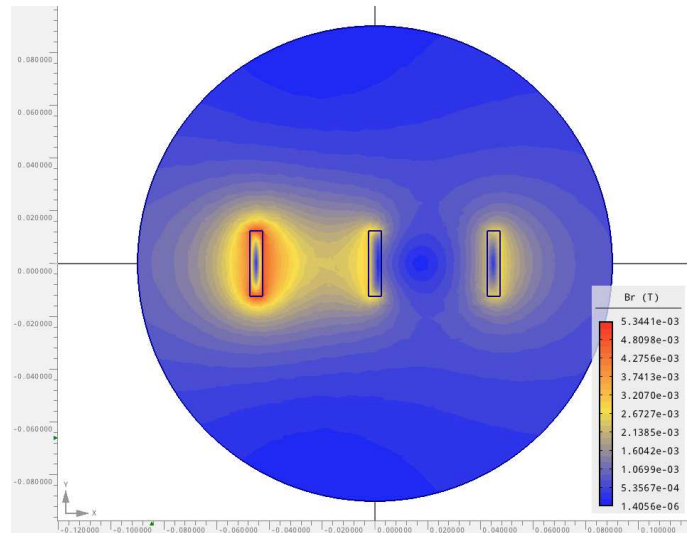
Obr. A23 Rozložení proudové hustoty přípojnic typu\_b (vzdálenost 50 mm)



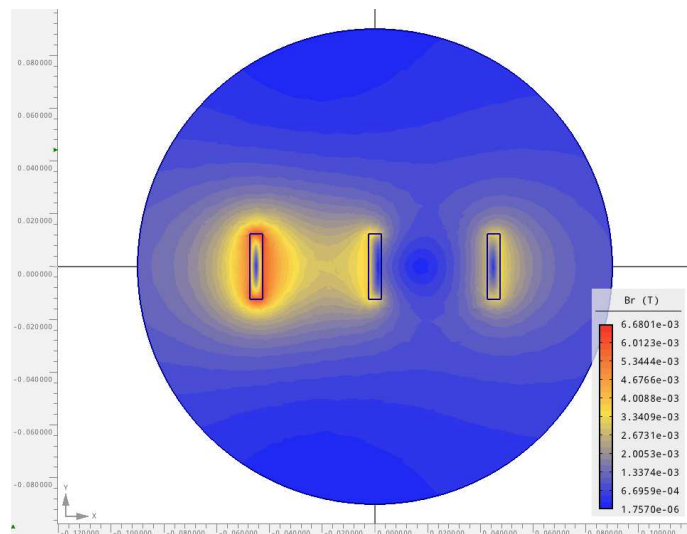
Obr. A24 Rozložení proudové hustoty přípojnic typu\_b (vzdálenost 60 mm)

**Příloha B**

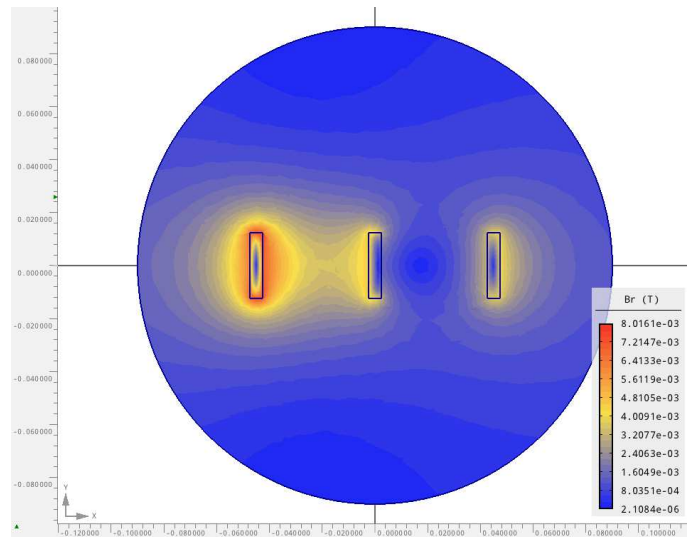
Příloha k přípojnicím z kapitoly 4.2



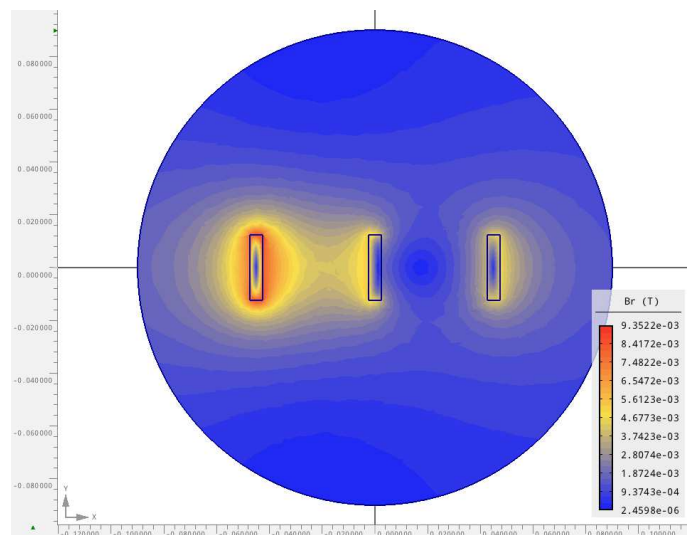
Obr. B1 Rozložení magnetické indukce (proud 200 A)



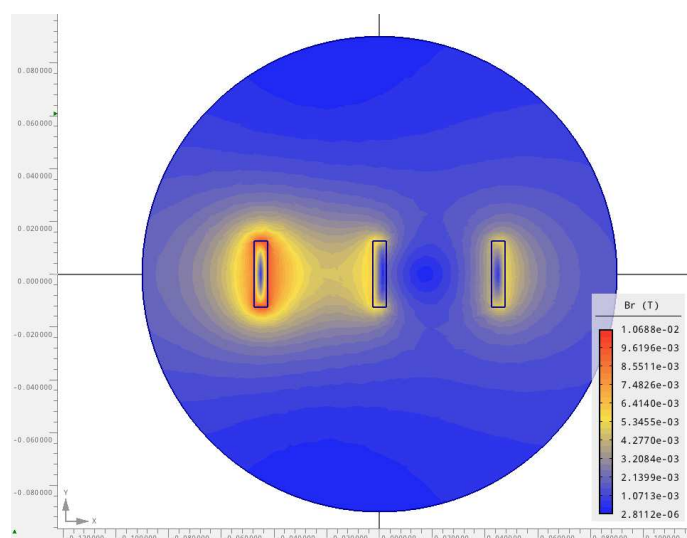
Obr. B2 Rozložení magnetické indukce (proud 250 A)



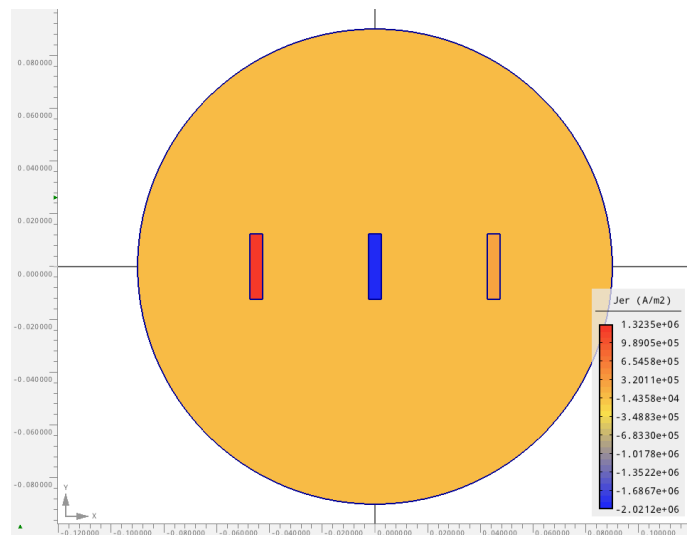
Obr. B3 Rozložení magnetické indukce (proud 300 A)



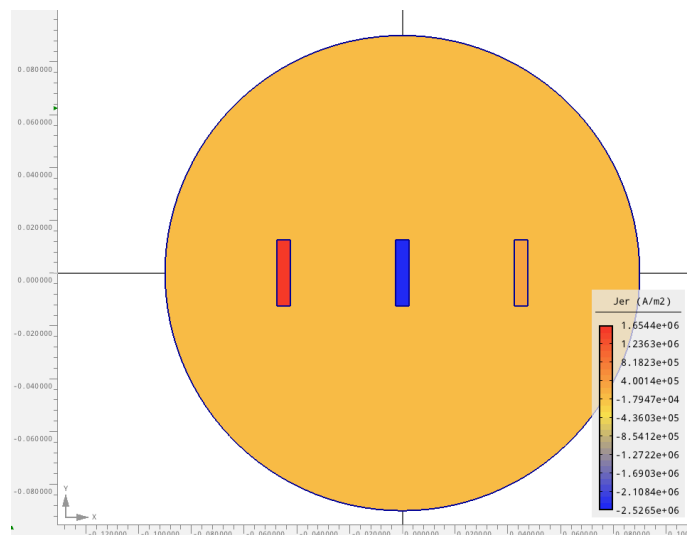
Obr. B4 Rozložení magnetické indukce (proud 350 A)



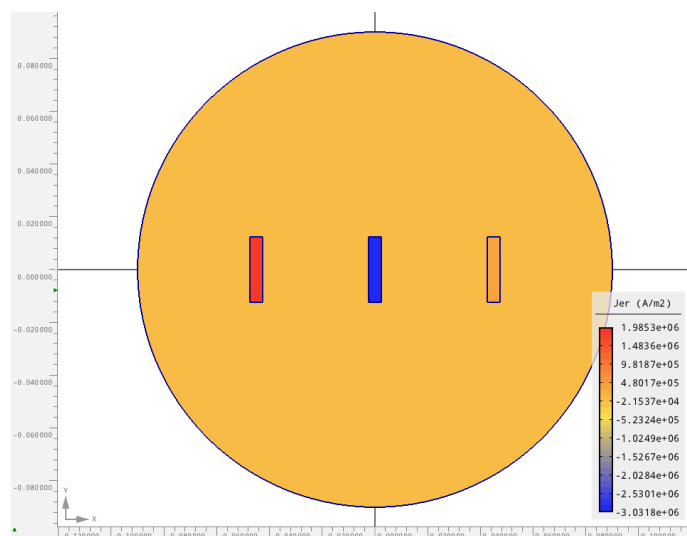
Obr. B5 Rozložení magnetické indukce (proud 400 A)



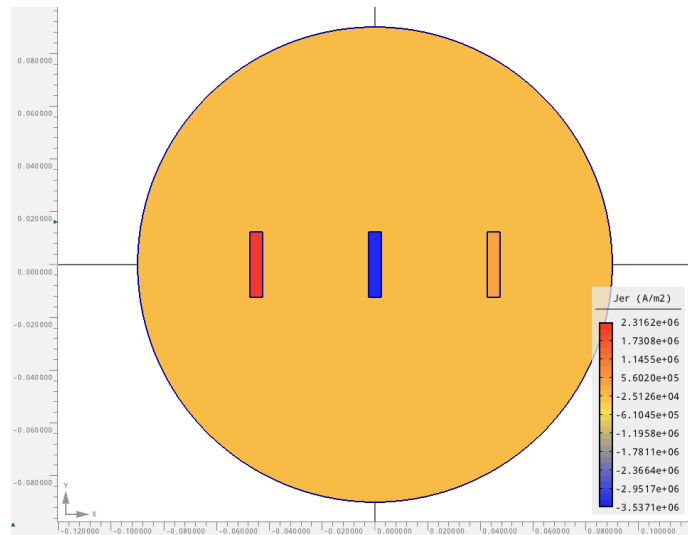
Obr. B6 Rozložení proudové hustoty (proud 200 A)



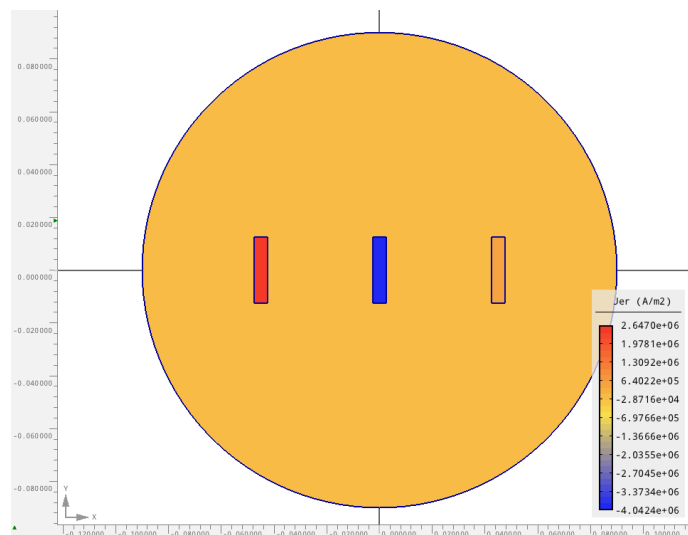
Obr. B7 Rozložení proudové hustoty (proud 250 A)



Obr. B8 Rozložení proudové hustoty (proud 300 A)



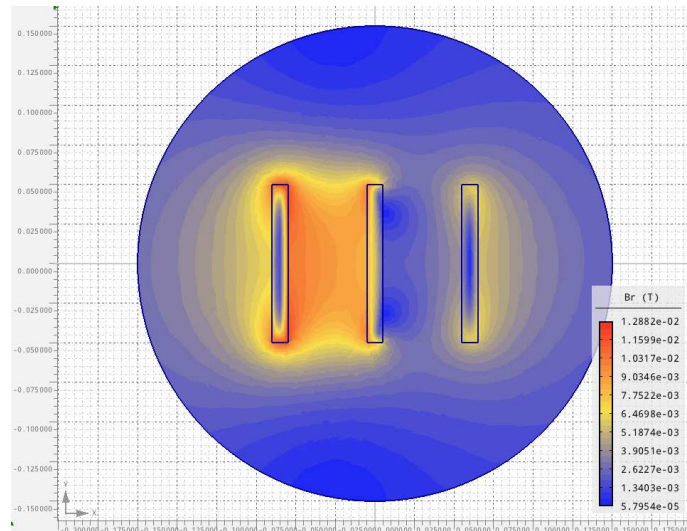
Obr. B9 Rozložení proudové hustoty (proud 350 A)



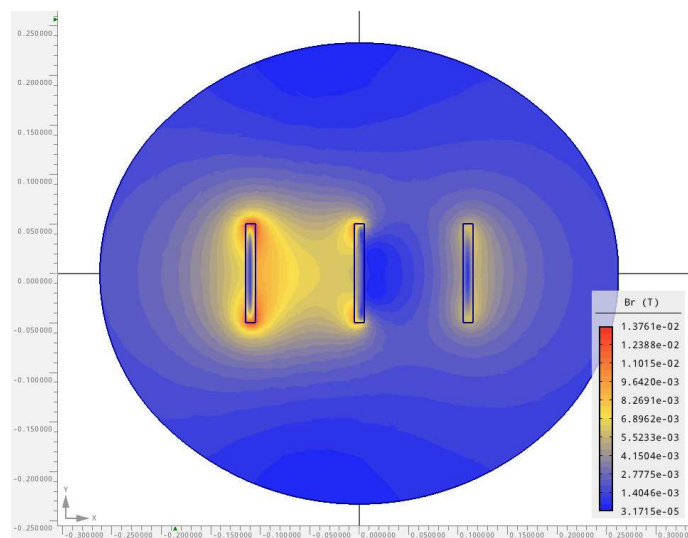
Obr. B10 Rozložení proudové hustoty (proud 400 A)

**Příloha C**

Příloha k přípojnicím z kapitoly 4.3

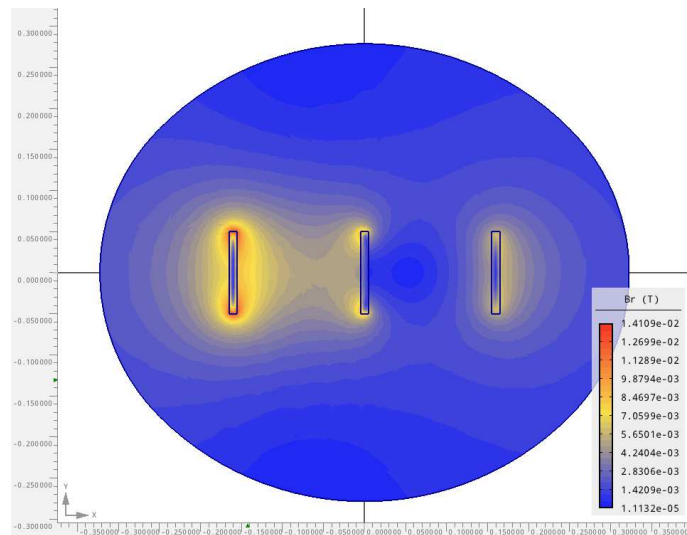


Obr. C1 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 50 mm)

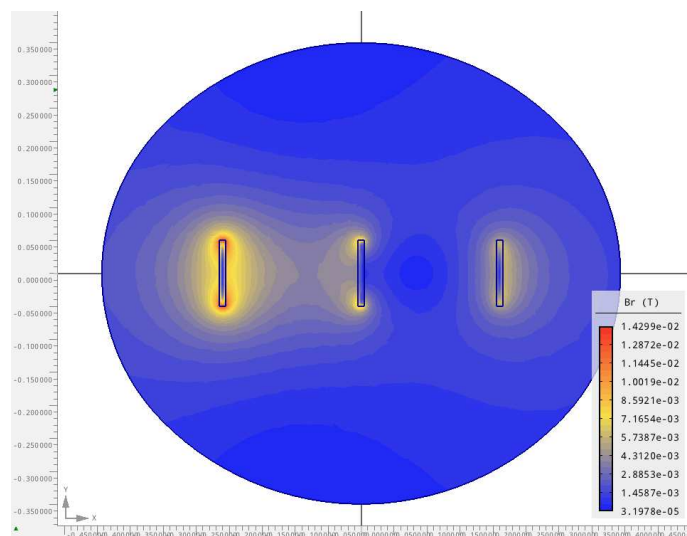


Obr. C2 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 100 mm)

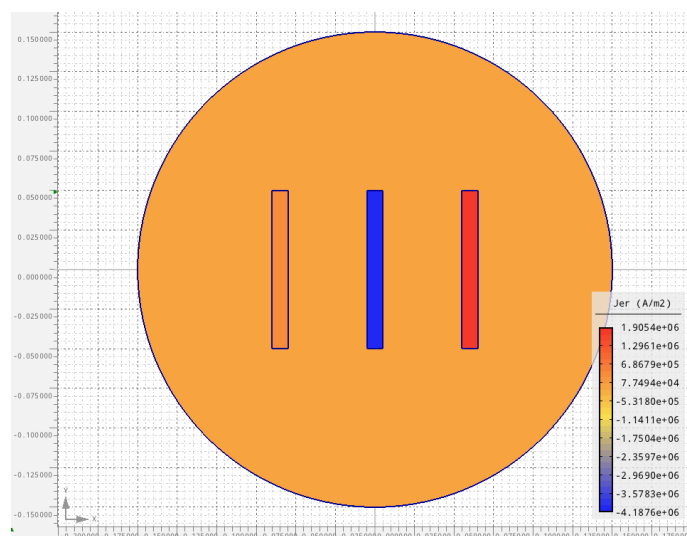




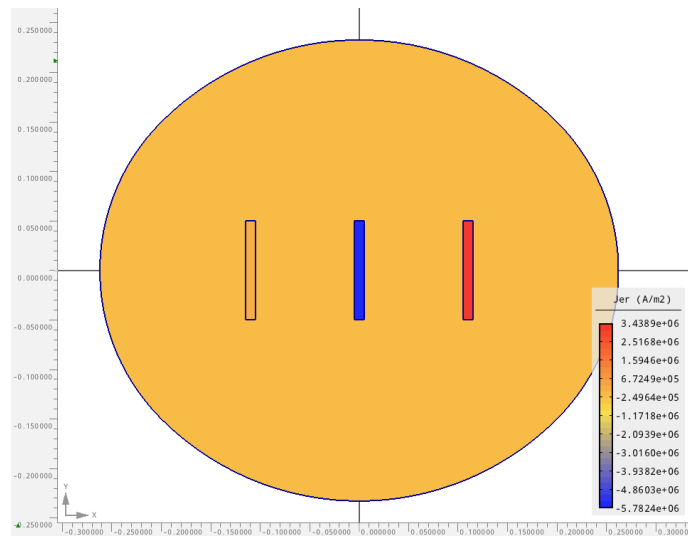
Obr. C3 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 150 mm)



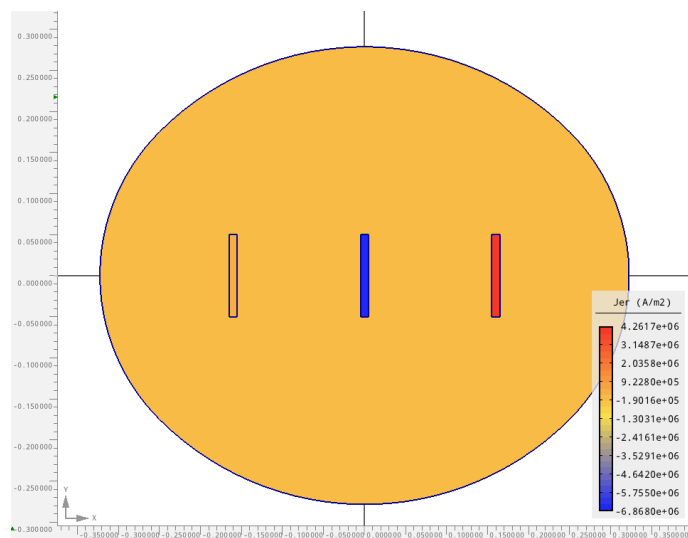
Obr. C4 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 200 mm)



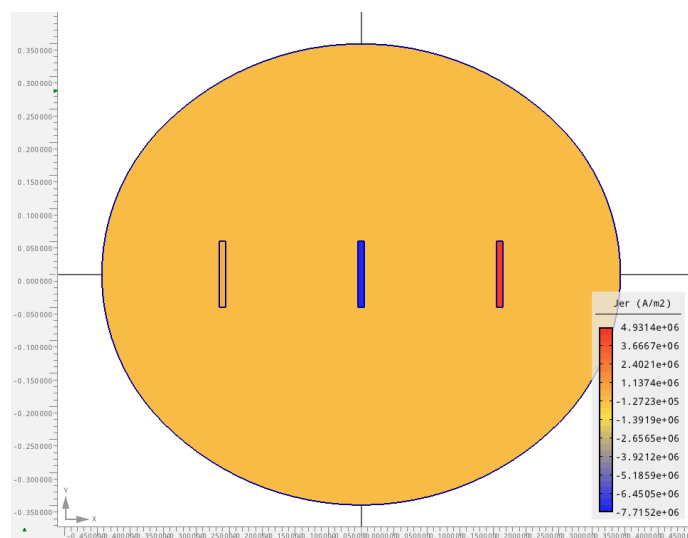
Obr. C5 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 50 mm)



Obr. C6 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 100 mm)



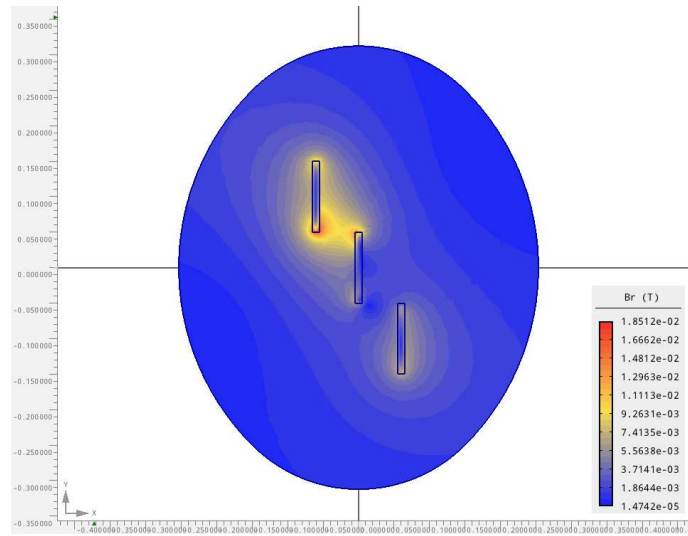
Obr. C7 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 150 mm)



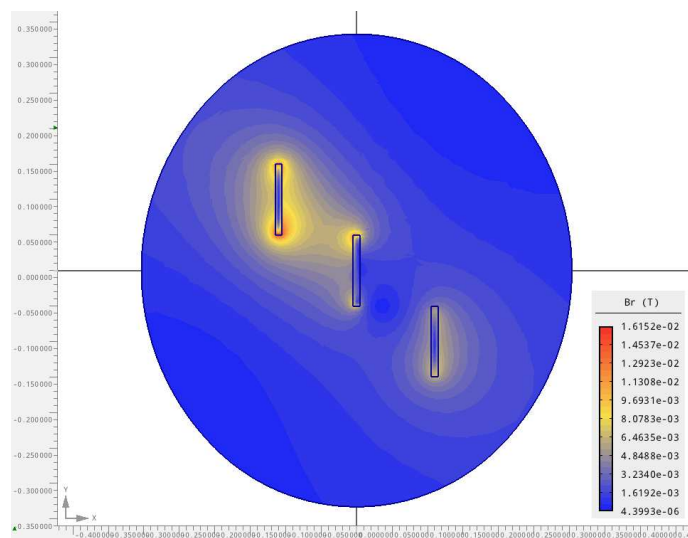
Obr. C8 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 200 mm)

**Příloha D**

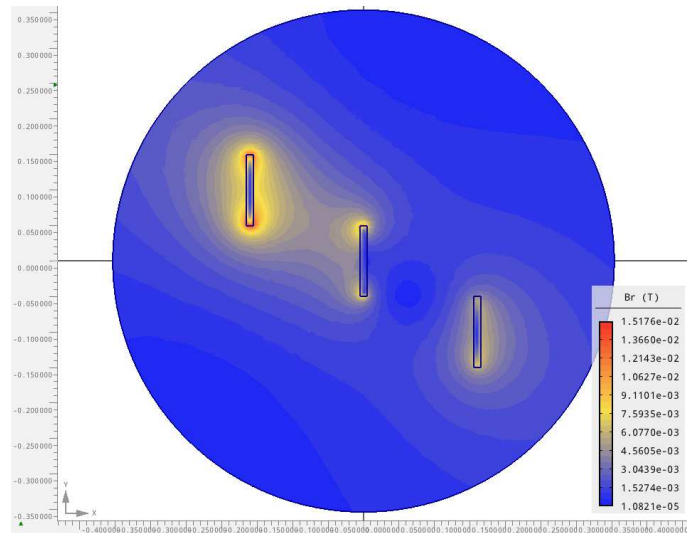
Příloha k přípojnicím z kapitoly 4.4



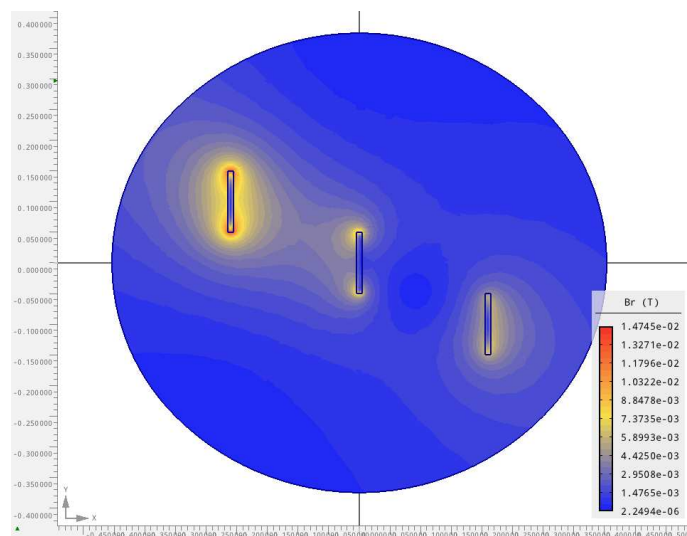
Obr. D1 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 50 mm)



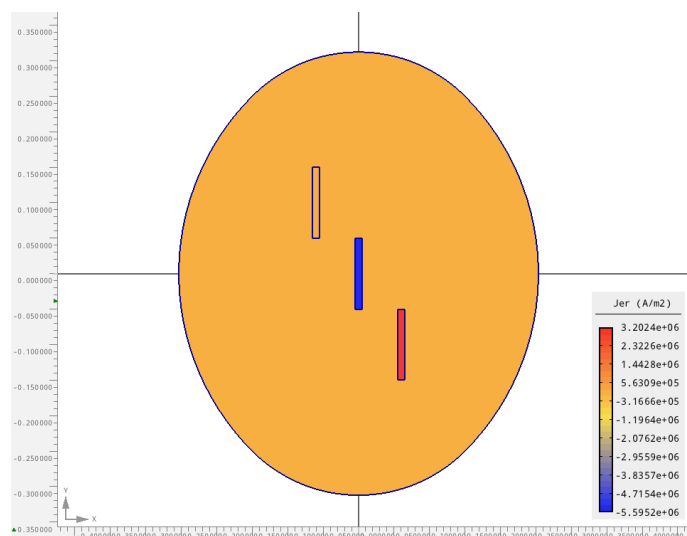
Obr. D2 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 100 mm)



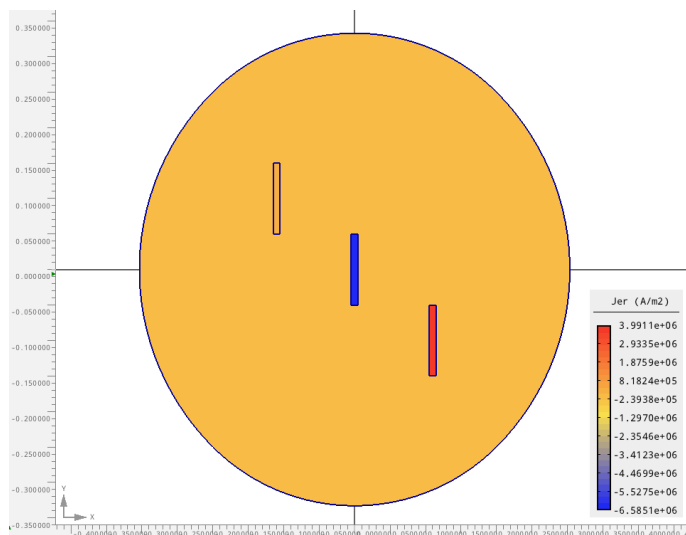
Obr. D3 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 150 mm)



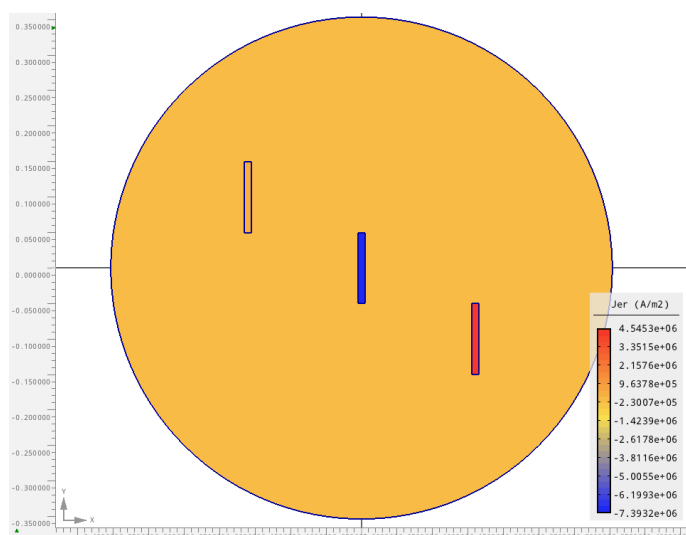
Obr. D4 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 200 mm)



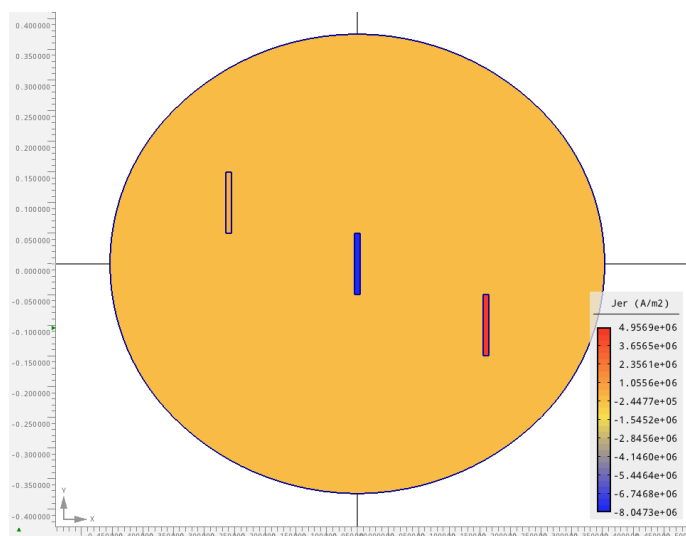
Obr. D5 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 50 mm)



Obr. D6 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 100 mm)



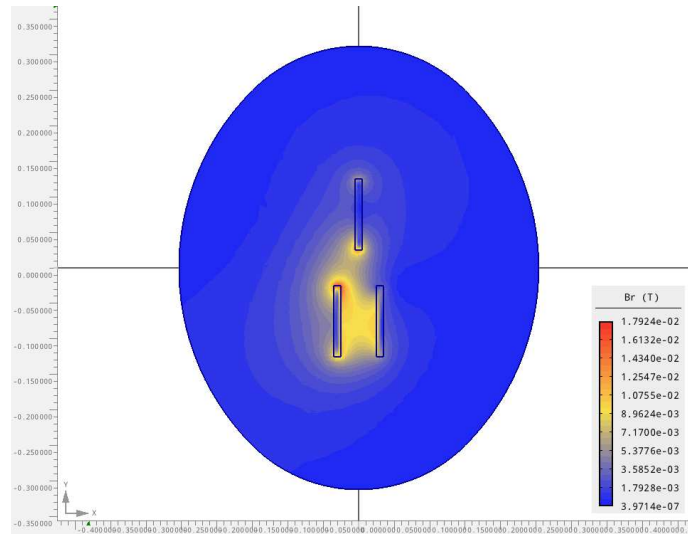
Obr. D7 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 150 mm)



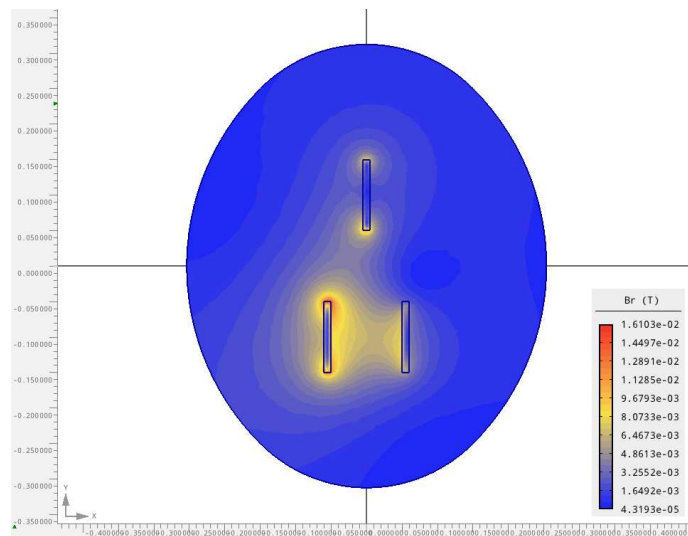
Obr. D8 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 200 mm)

**Příloha E**

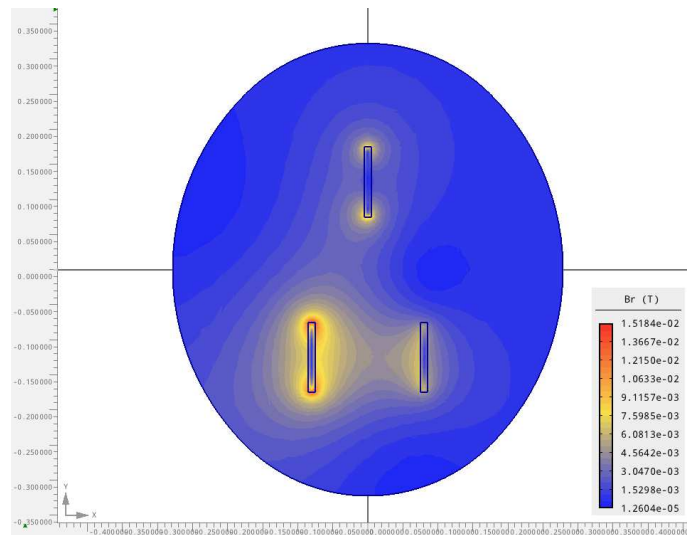
Příloha k přípojnicím z kapitoly 4.5



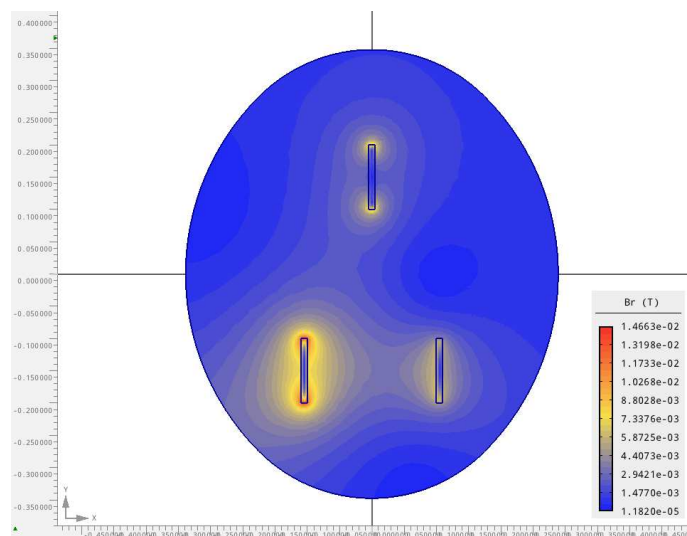
Obr. E1 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 50 mm)



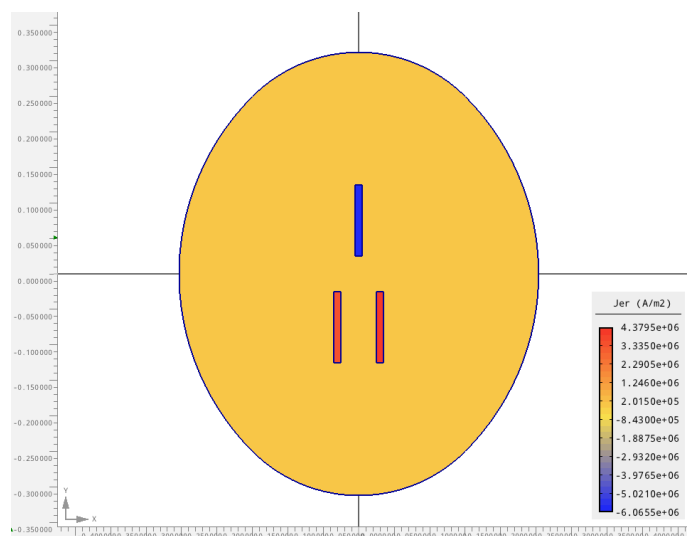
Obr. E2 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 100 mm)



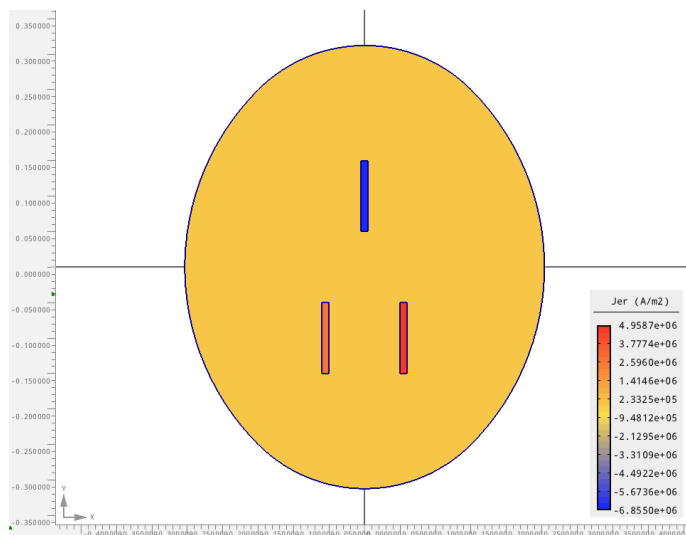
Obr. E3 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 150 mm)



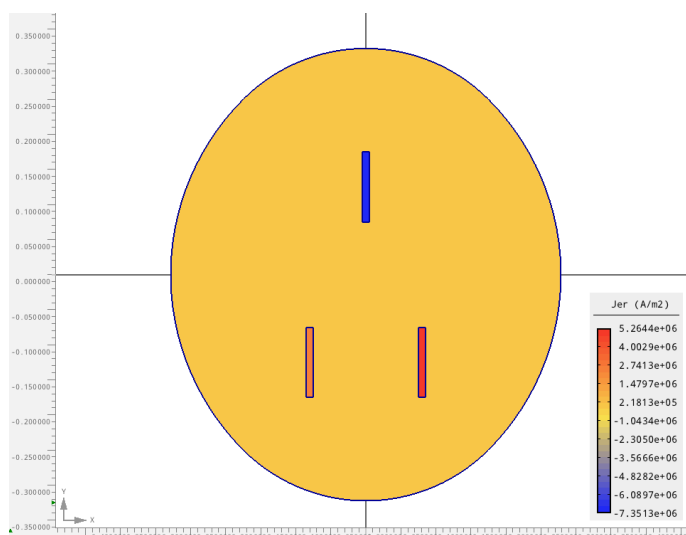
Obr. E4 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 200 mm)



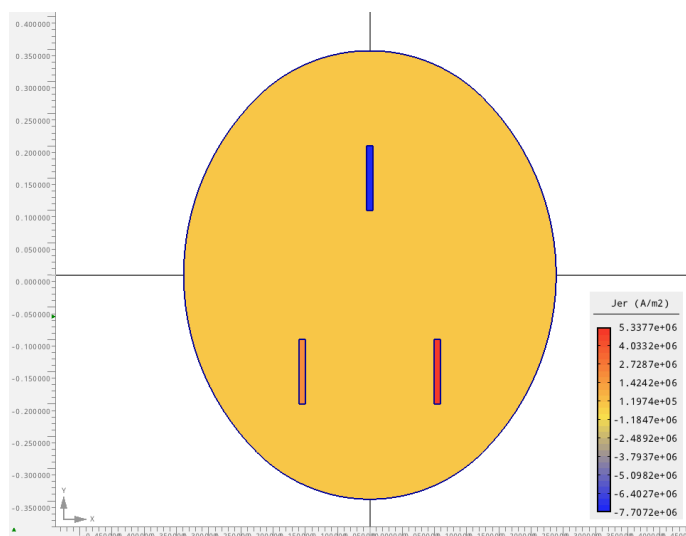
Obr. E5 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 50 mm)



Obr. E6 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 100 mm)



Obr. E7 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 150 mm)

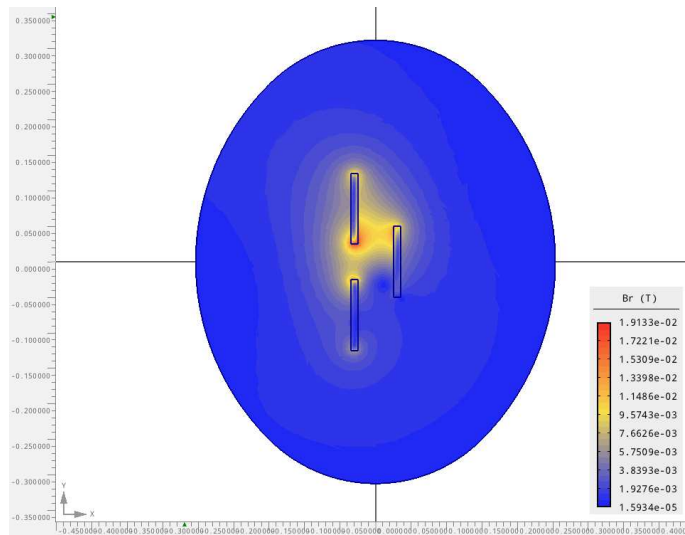


Obr. E8 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 200 mm)

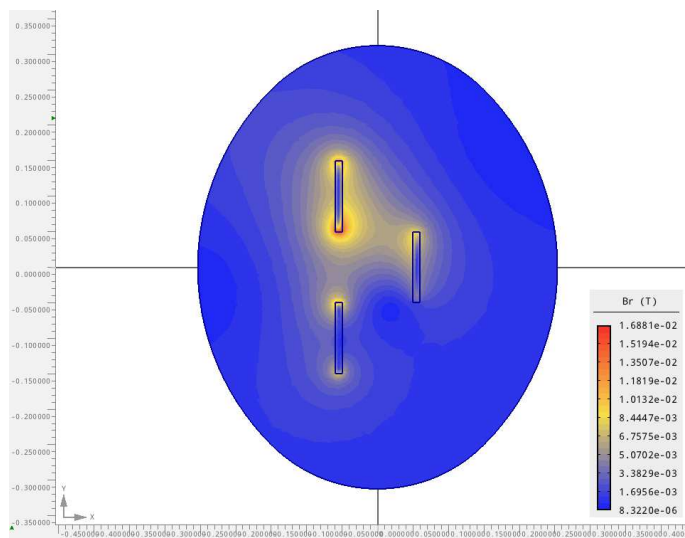


**Příloha F**

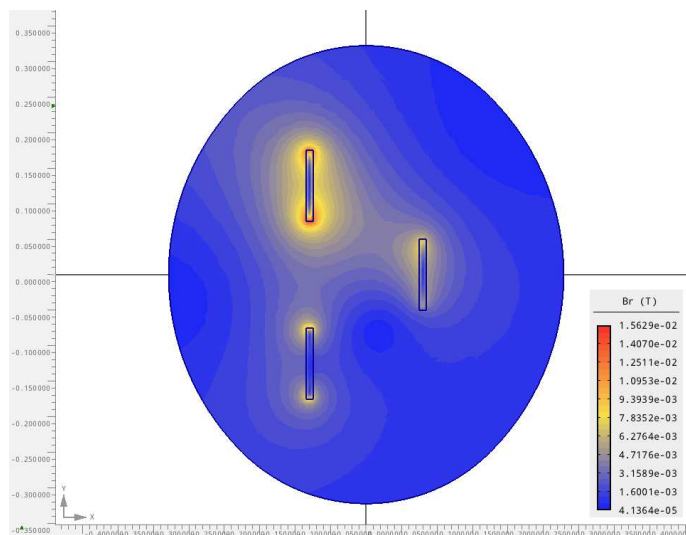
Příloha k přípojnícím z kapitoly 4.6



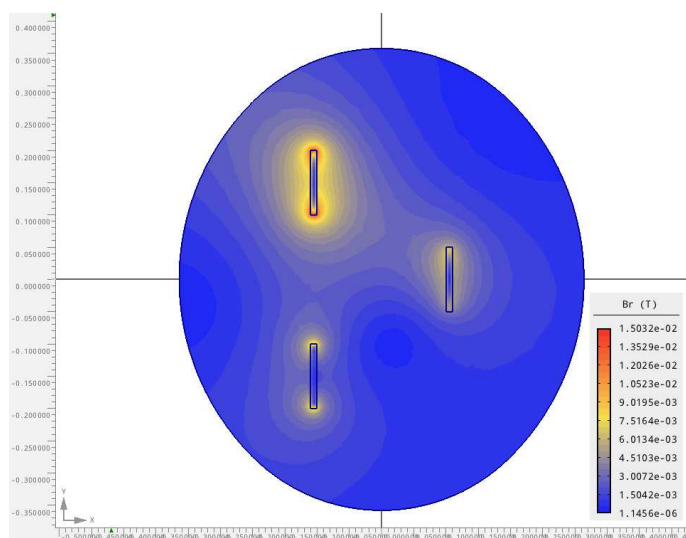
Obr. F1 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 50 mm)



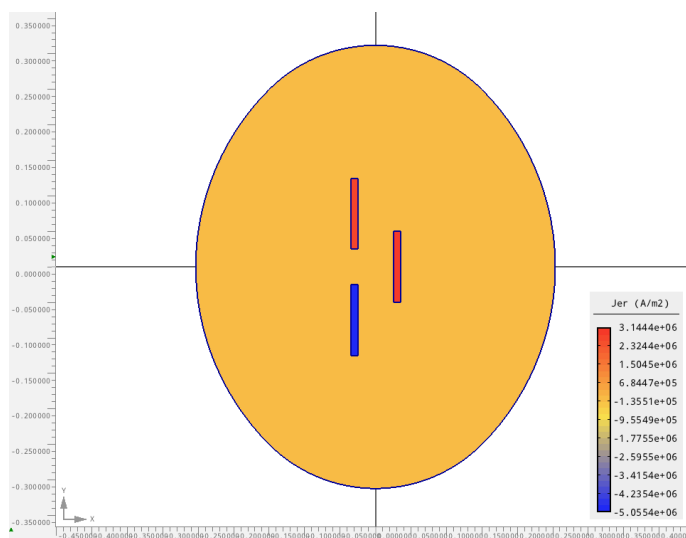
Obr. F2 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 100 mm)



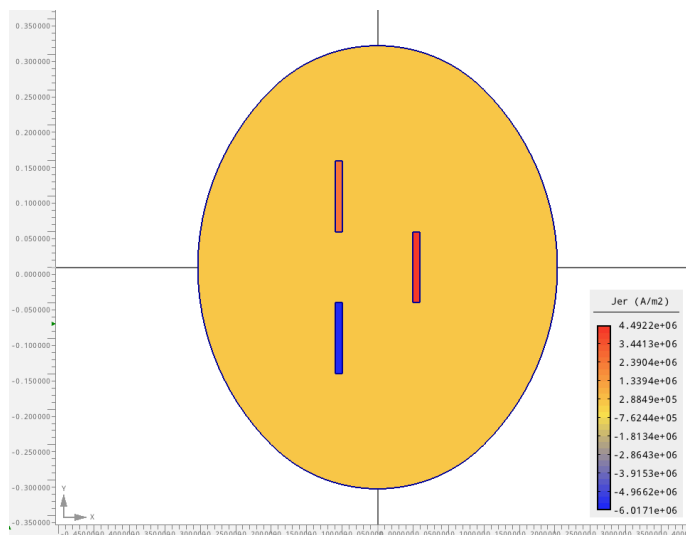
Obr. F3 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 150 mm)



Obr. F4 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 200 mm)



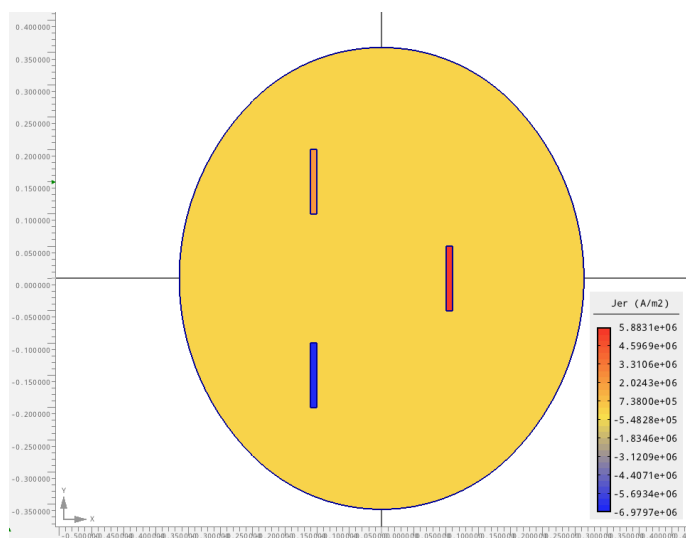
Obr. F5 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 50 mm)



Obr. E6 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 100 mm)



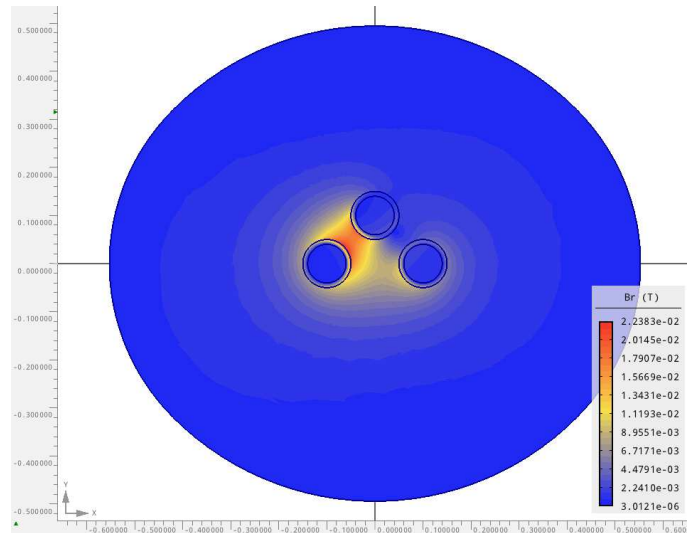
Obr. E7 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 150 mm)



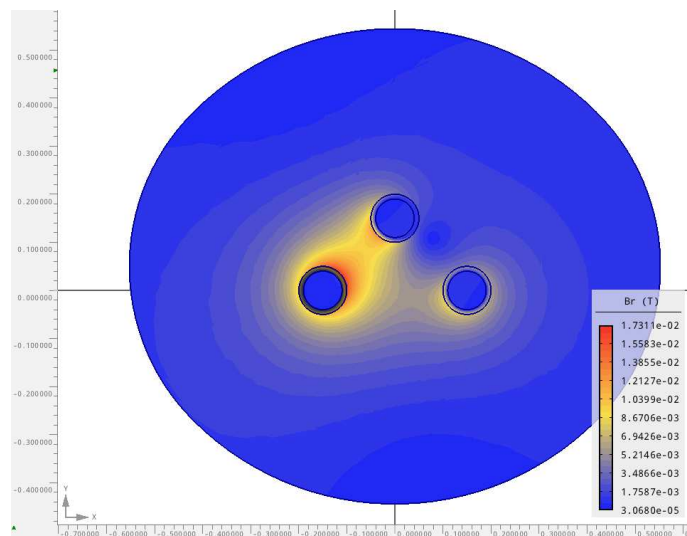
Obr. F8 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 200 mm)

**Příloha G**

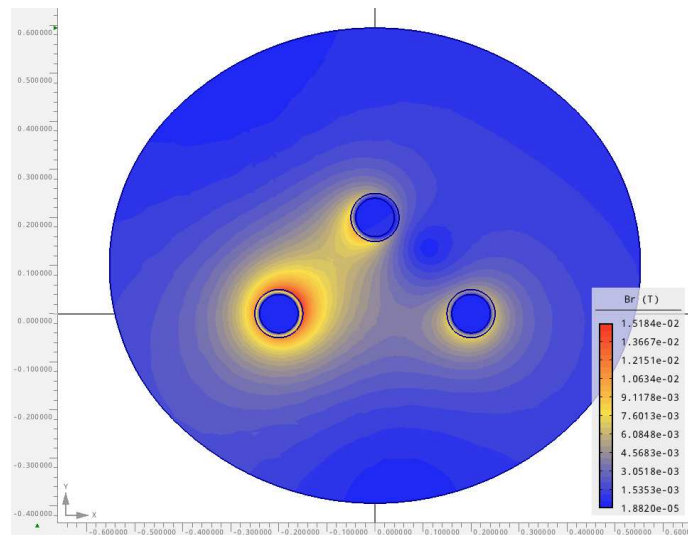
Příloha k přípojnicím z kapitoly 4.8



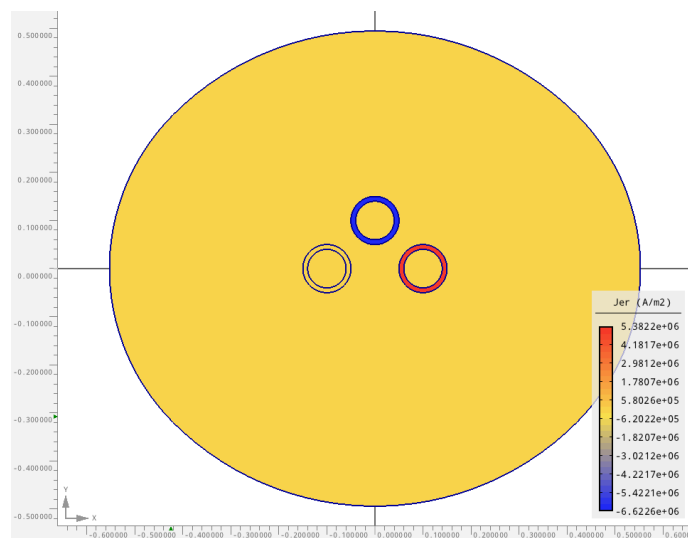
Obr. G1 Rozložení magnetické indukce (trojúhelník\_a)



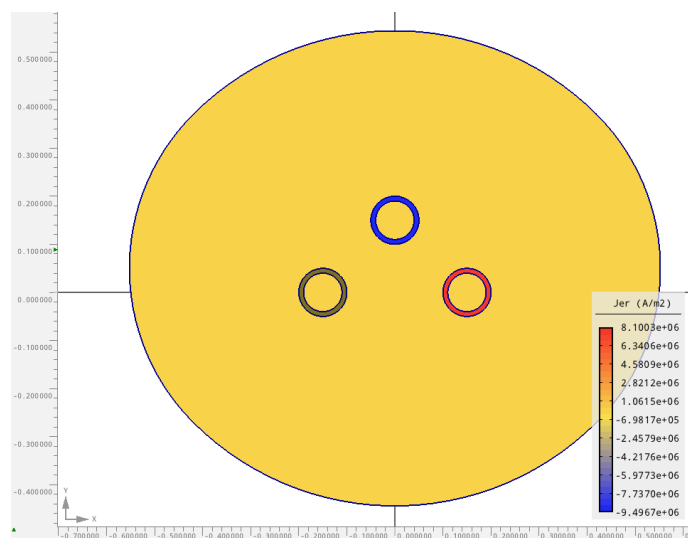
Obr. G2 Rozložení magnetické indukce (trojúhelník\_a)



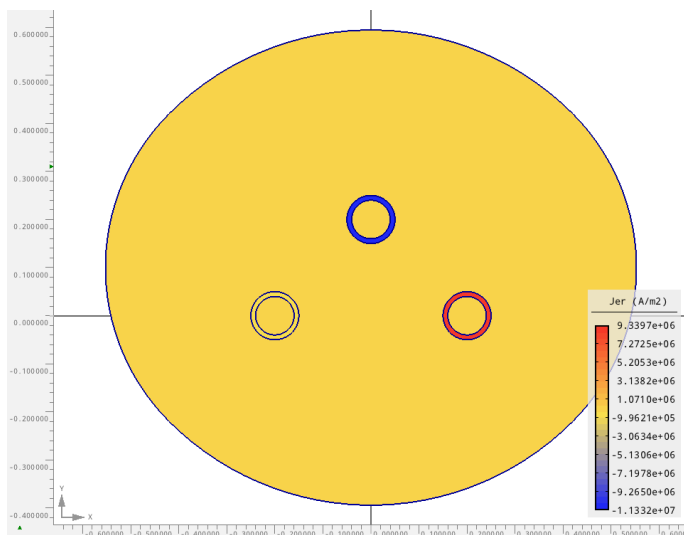
Obr. G3 Rozložení magnetické indukce (trojúhelník\_a)



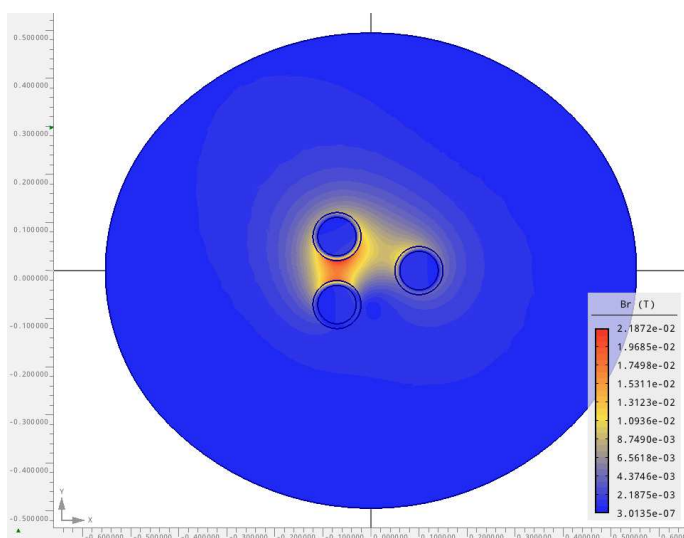
Obr. G4 Rozložení proudové hustoty (trojúhelník\_a)



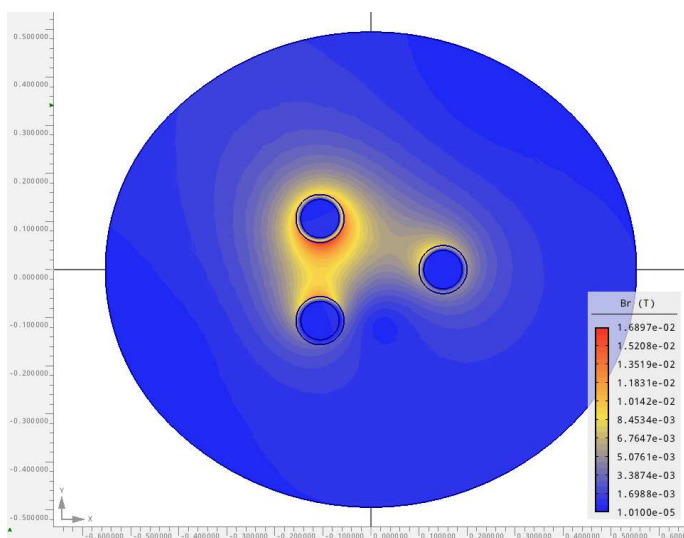
Obr. G5 Rozložení proudové hustoty (trojúhelník\_a)



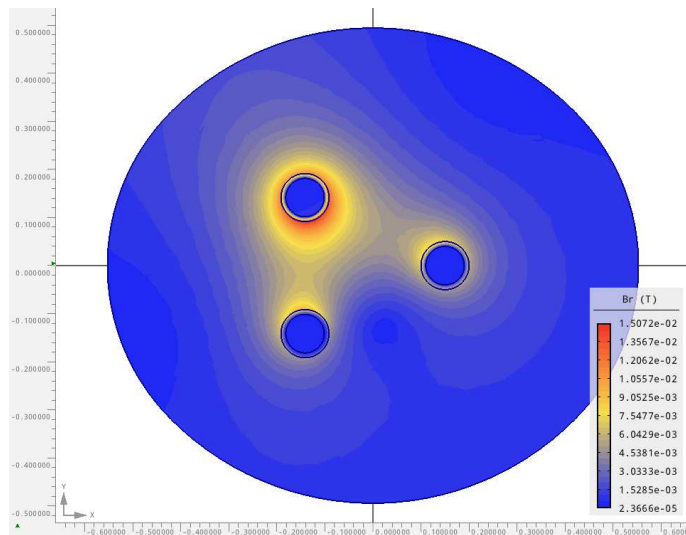
Obr. G6 Rozložení proudové hustoty (trojúhelník\_a)



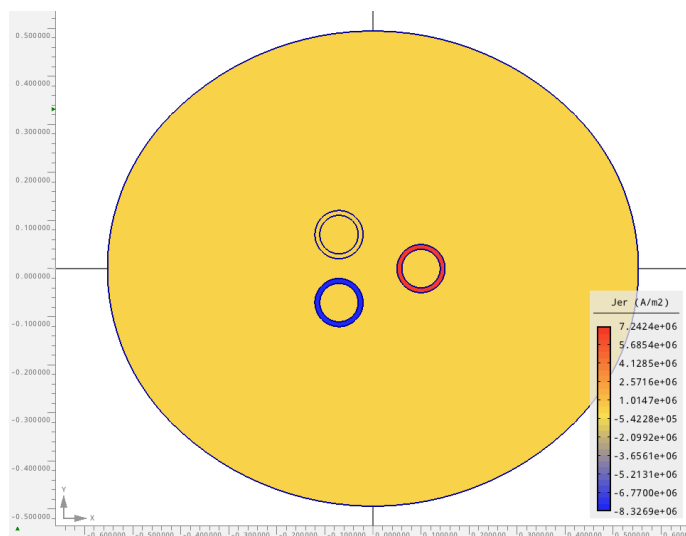
Obr. G7 Rozložení magnetické indukce (trojúhelník\_b)



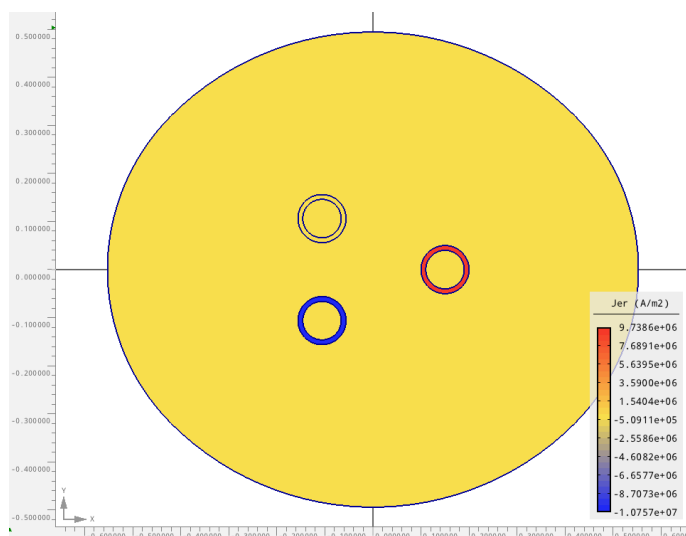
Obr. G8 Rozložení magnetické indukce (trojúhelník\_b)



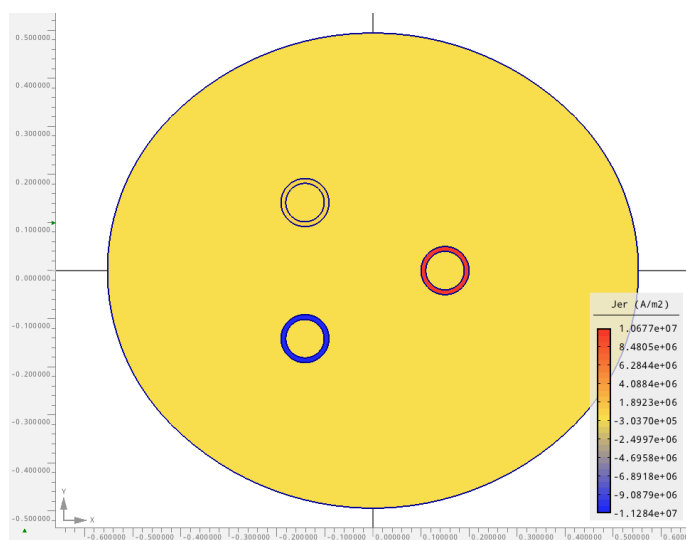
Obr. G9 Rozložení magnetické indukce (trojúhelník\_b)



Obr. G10 Rozložení proudové hustoty (trojúhelník\_b)



Obr. G11 Rozložení proudové hustoty (trojúhelník\_b)

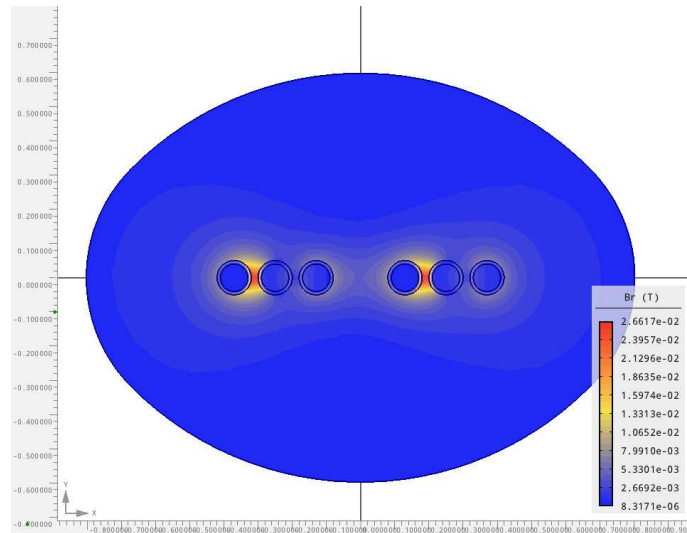


Obr. G12 Rozložení proudové hustoty (trojúhelník\_b)

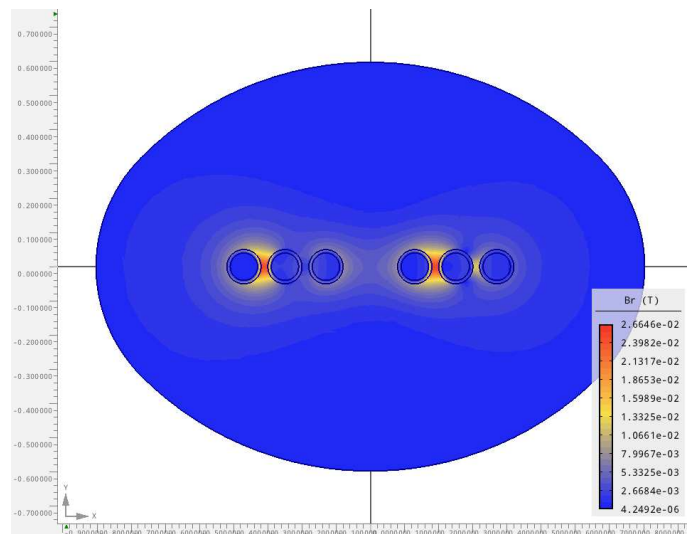


**Příloha H**

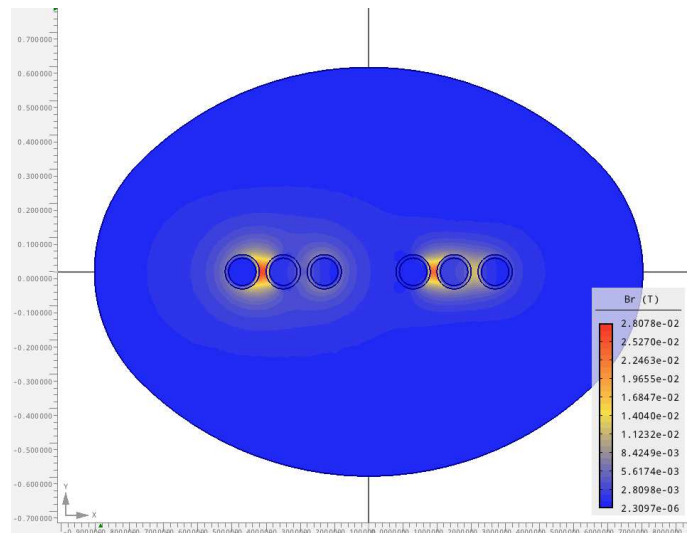
Příloha k přípojnicím z kapitoly 4.9



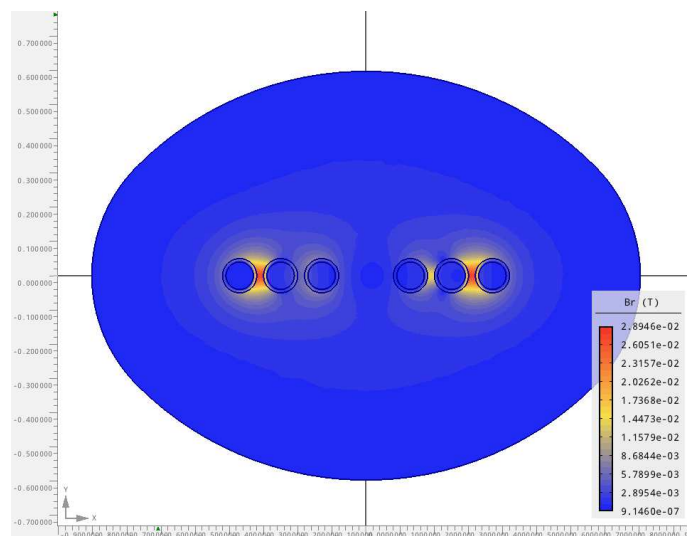
Obr. H1 Rozložení magnetické indukce (zapojení UVW - UVW)



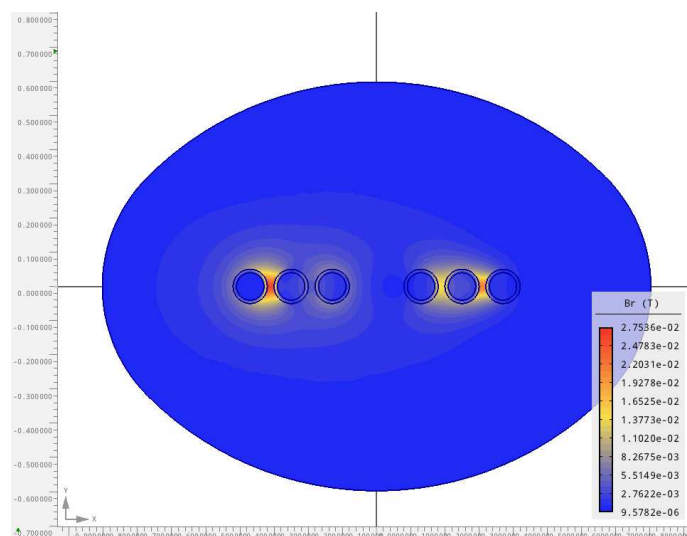
Obr. H2 Rozložení magnetické indukce (zapojení UVW - UWV)



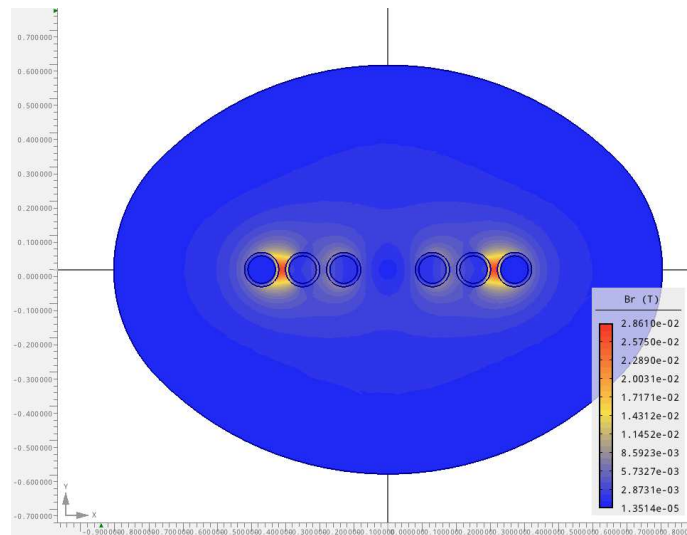
Obr. H3 Rozložení magnetické indukce (zapojení UVW - VUW)



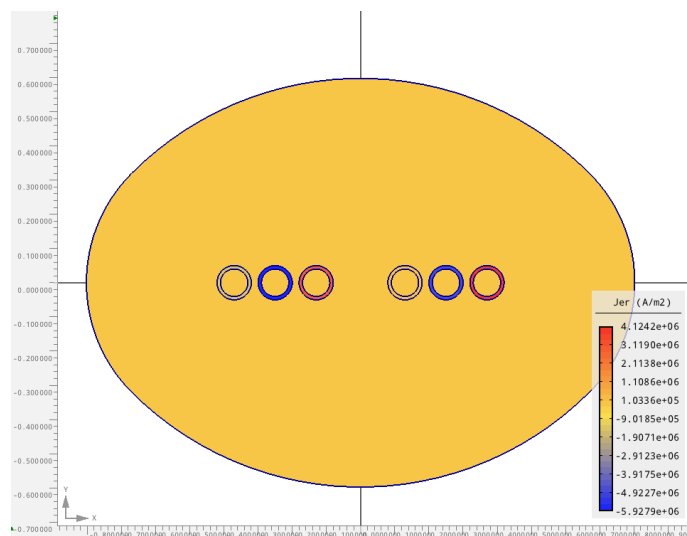
Obr. H4 Rozložení magnetické indukce (zapojení UVW - VWU)



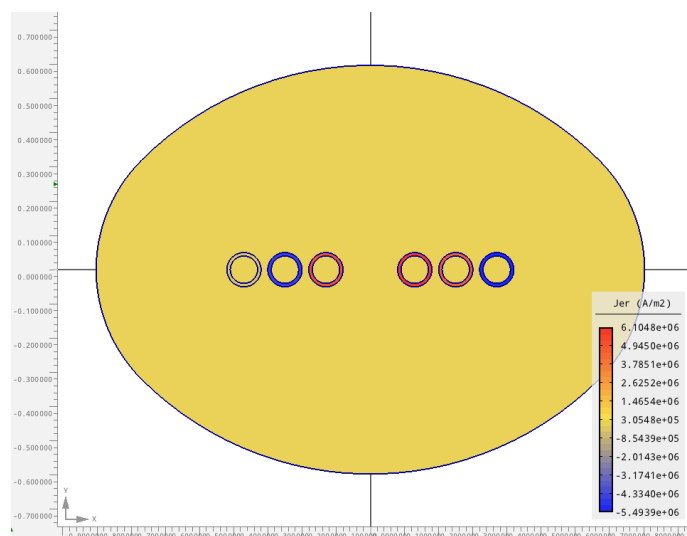
Obr. H5 Rozložení magnetické indukce (zapojení UVW - WUV)



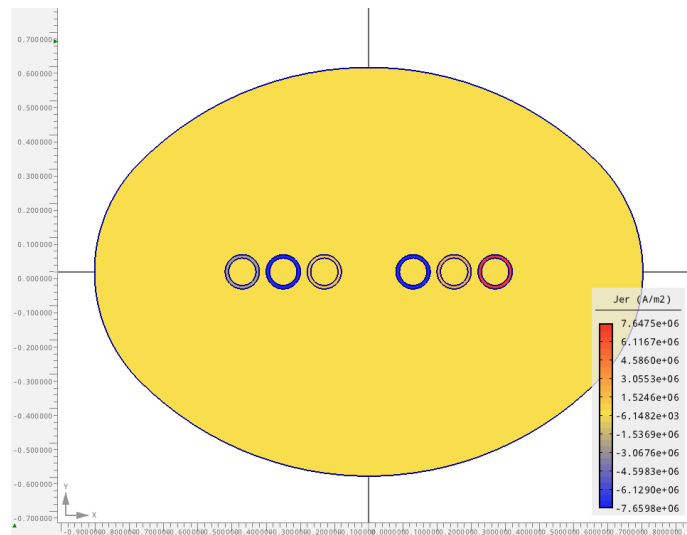
Obr. H6 Rozložení magnetické indukce (zapojení UVW - VWU)



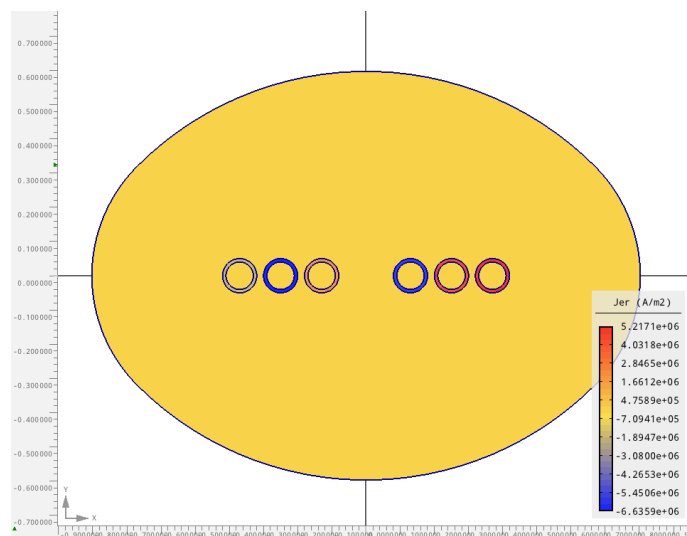
Obr. H7 Rozložení proudové hustoty (zapojení UVW - UVW)



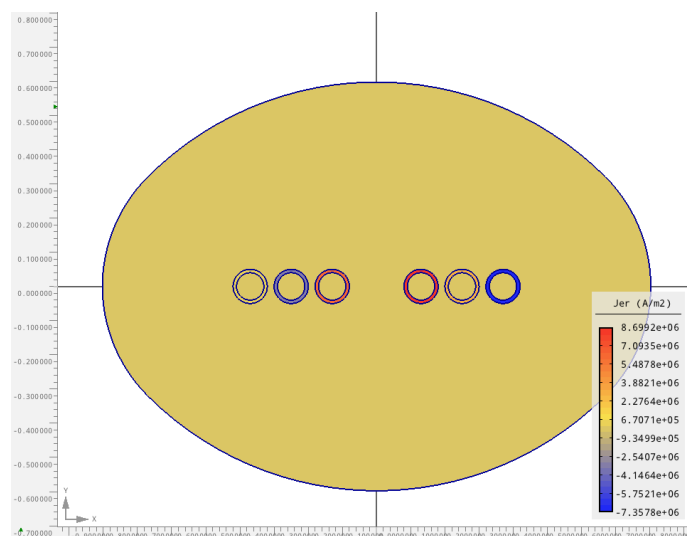
Obr. H8 Rozložení proudové hustoty (zapojení UVW - UWV)



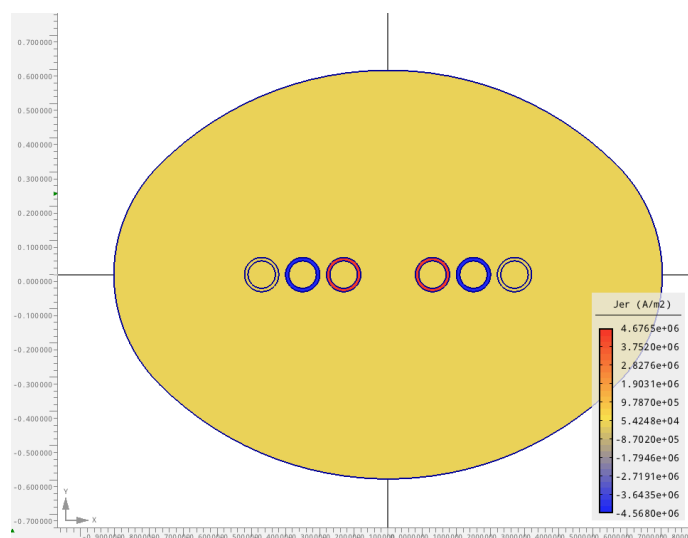
Obr. H9 Rozložení proudové hustoty (zapojení UVW - VUW)



Obr. H10 Rozložení proudové hustoty (zapojení UVW - VWU)



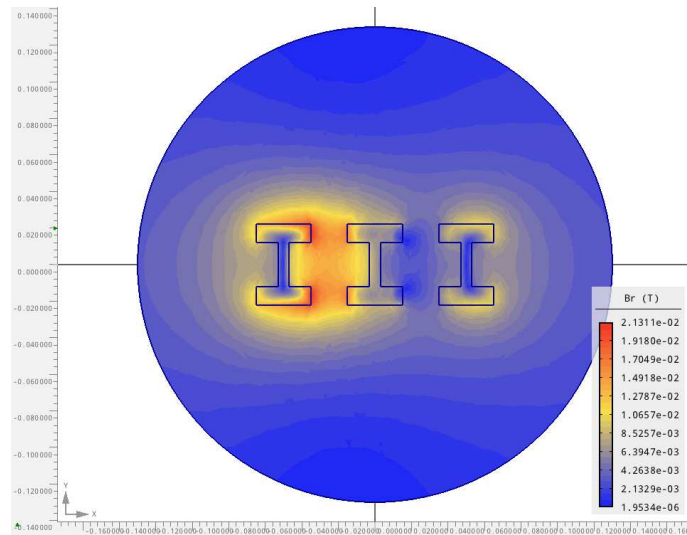
Obr. H11 Rozložení proudové hustoty (zapojení UVW - WUV)



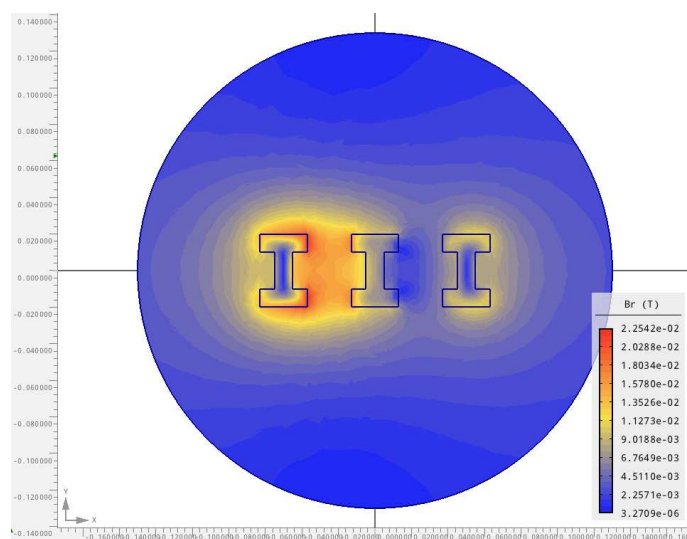
Obr. H12 Rozložení proudové hustoty (zapojení UVW - WVU)

**Příloha I**

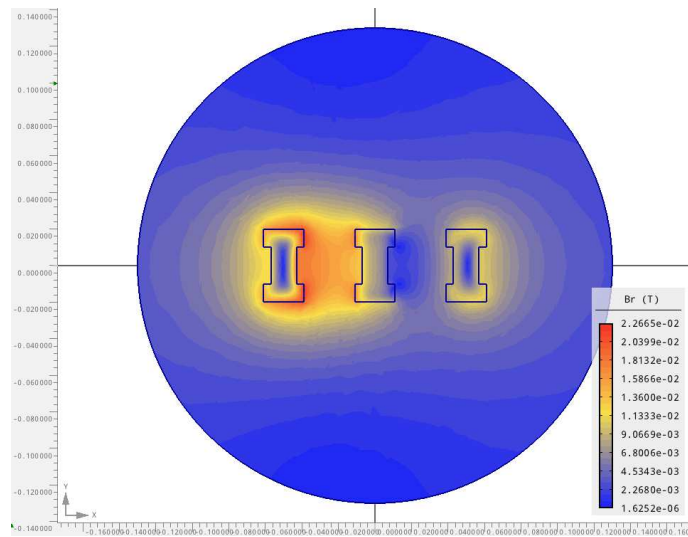
Příloha k přípojnícím z kapitoly 4.10



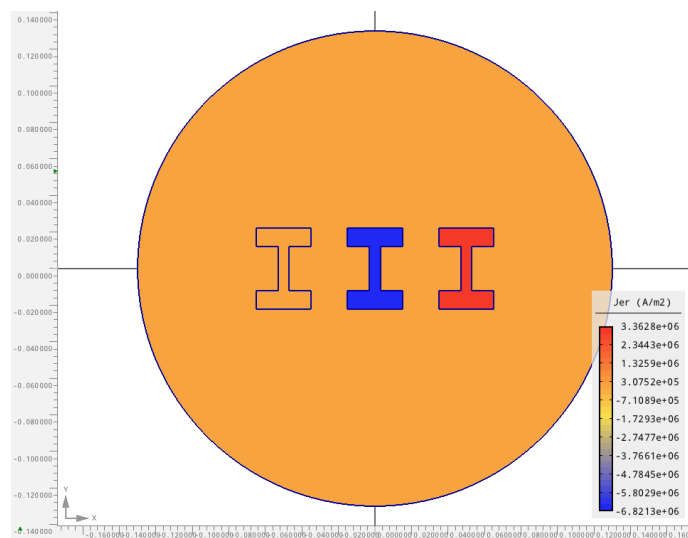
Obr. I1 Rozložení magnetické indukce (typ a)



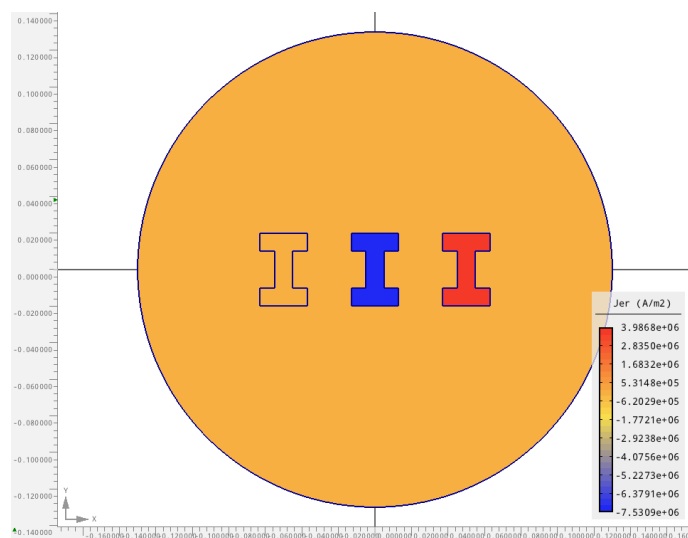
Obr. I2 Rozložení magnetické indukce (typ b)



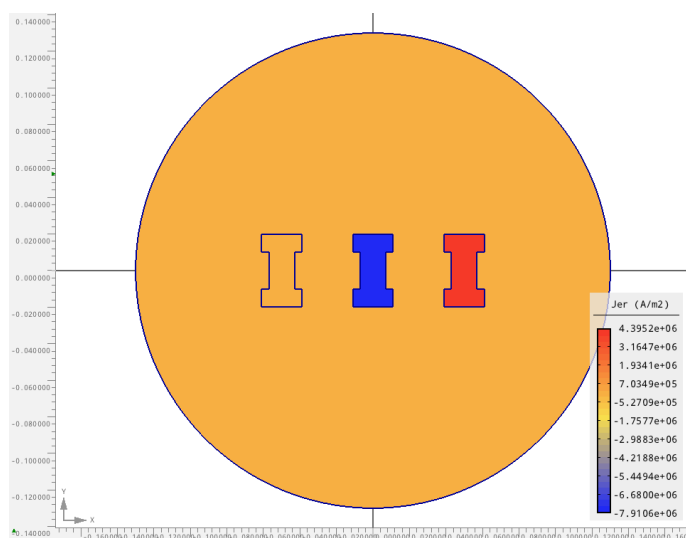
Obr. 13 Rozložení magnetické indukce (typ c)



Obr. 14 Rozložení proudové hustoty (typ a)



Obr. 15 Rozložení proudové hustoty (typ b)

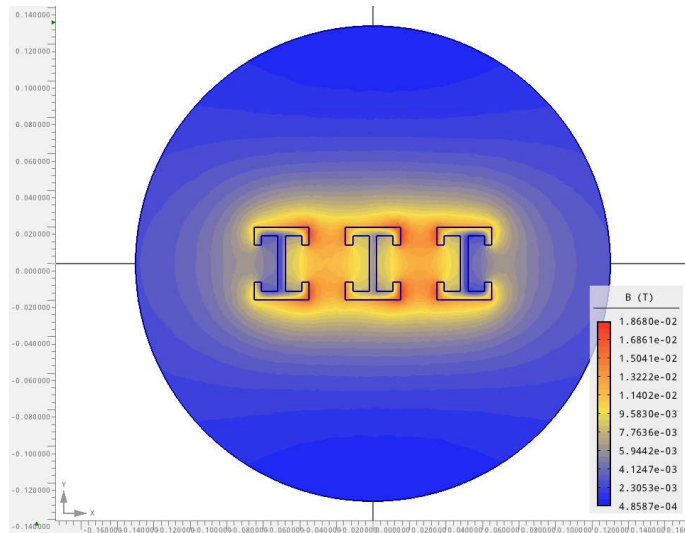


Obr. 16 Rozložení proudové hustoty (typ c)

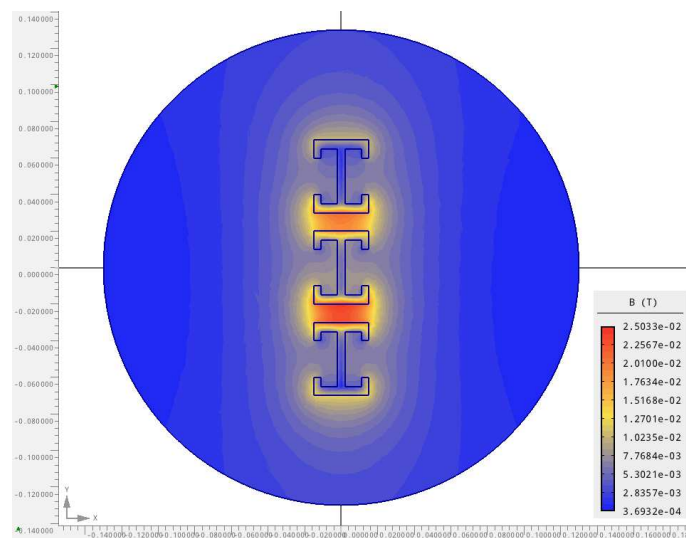


**Příloha J**

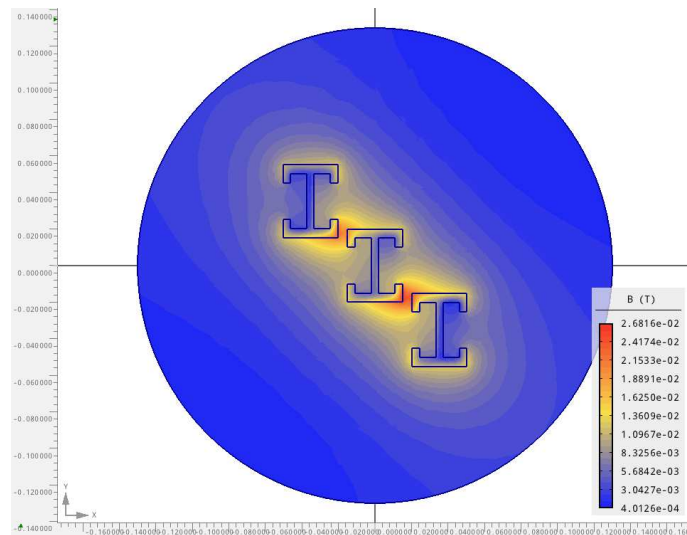
Příloha k přípojnícím z kapitoly 4.11



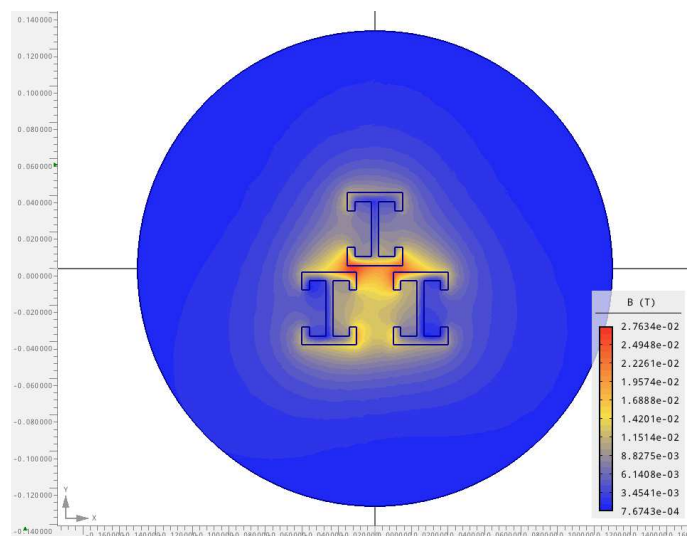
Obr. J1 Rozložení magnetické indukce (vodorovně)



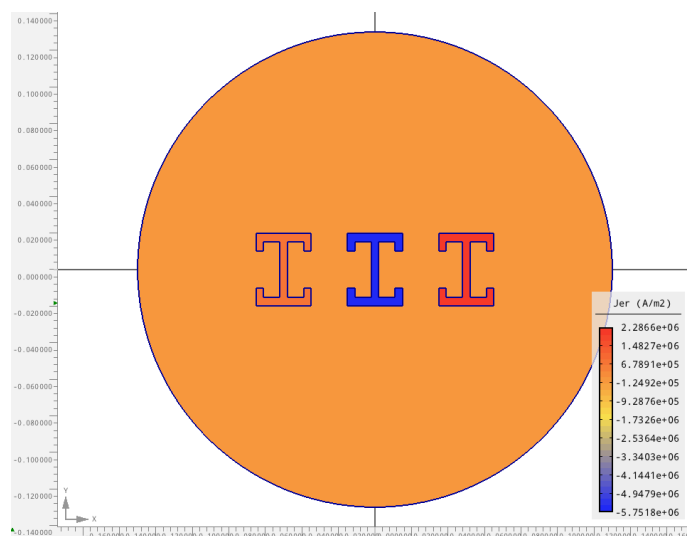
Obr. J2 Rozložení magnetické indukce (svislé)



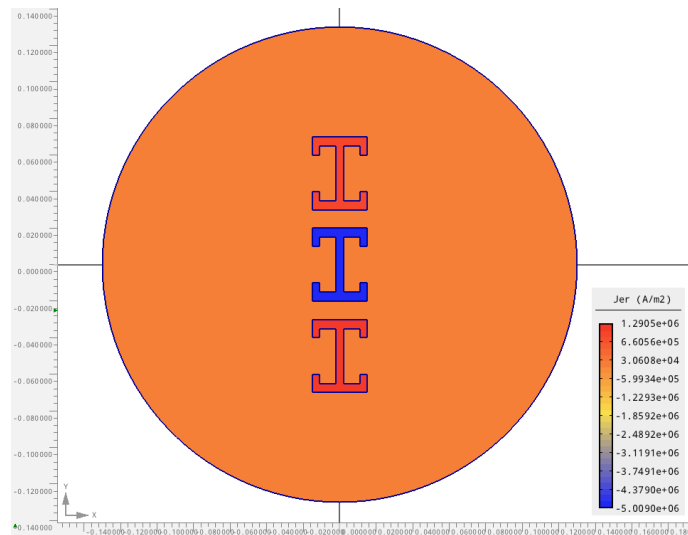
Obr. J3 Rozložení magnetické indukce (šikmé)



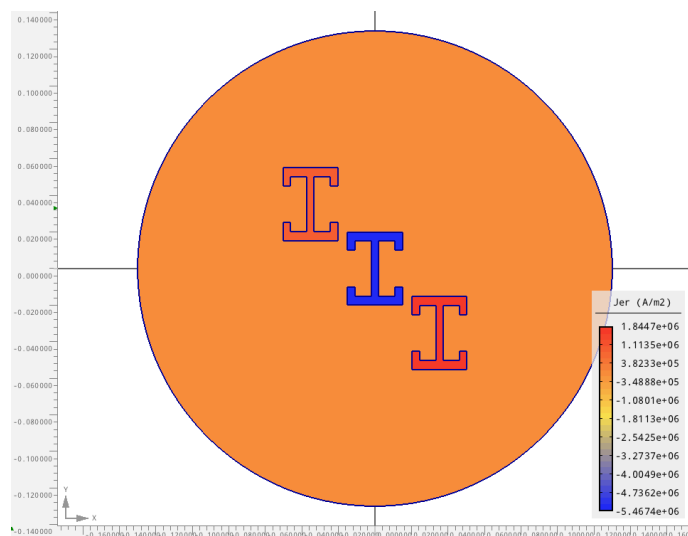
Obr. J4 Rozložení magnetické indukce (trojúhelník)



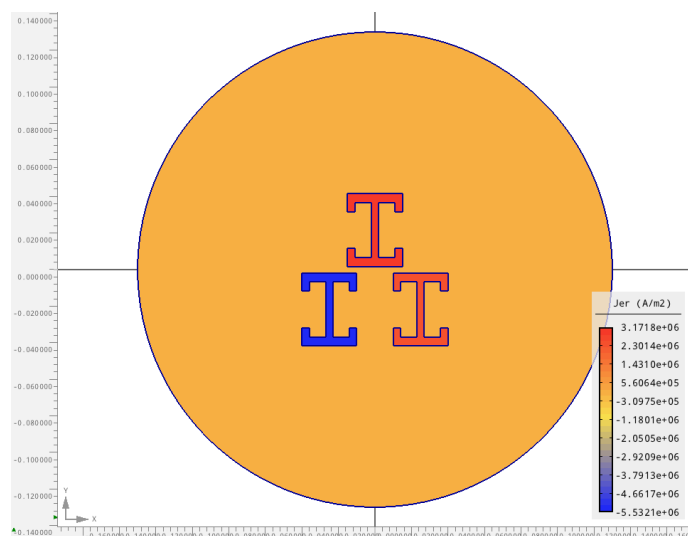
Obr. J5 Rozložení proudové hustoty (vodorovné)



Obr. J6 Rozložení proudové hustoty (svislé)



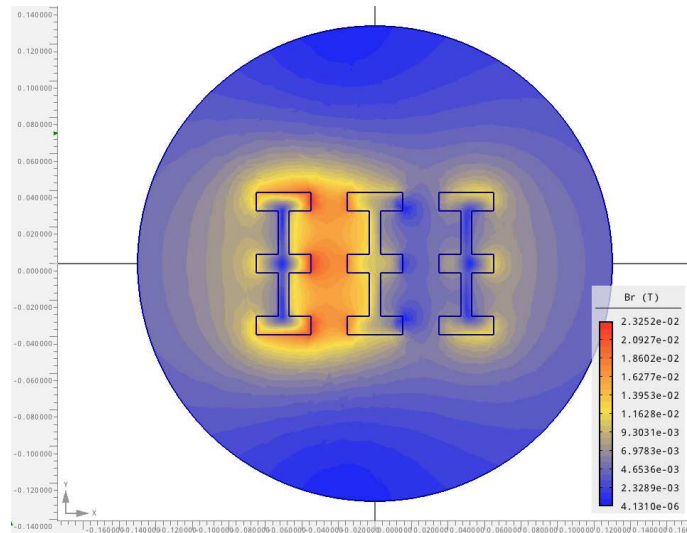
Obr. J7 Rozložení proudové hustoty (šikmé)



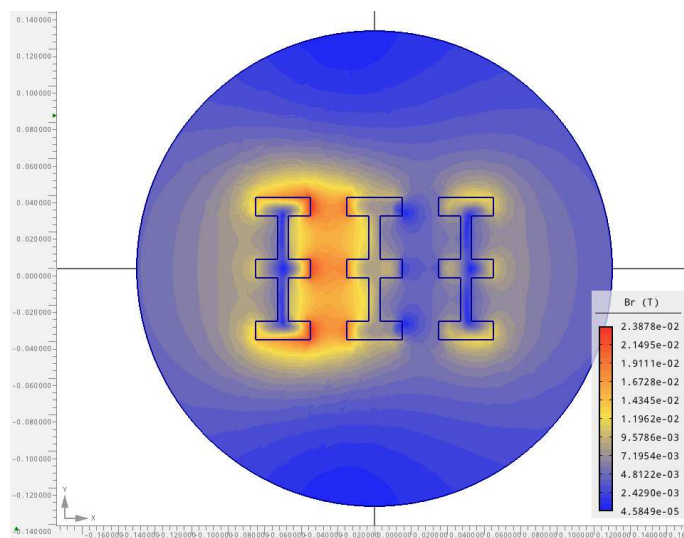
Obr. J8 Rozložení proudové hustoty (trojúhelník)

**Příloha K**

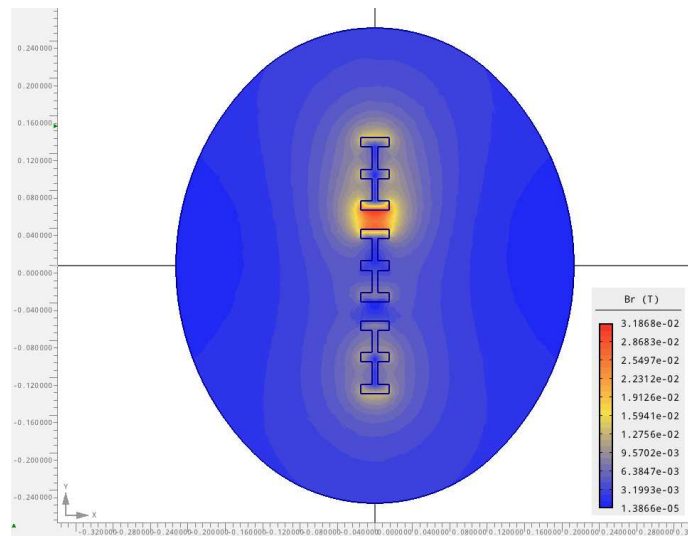
Příloha k přípojnicím z kapitoly 4.12



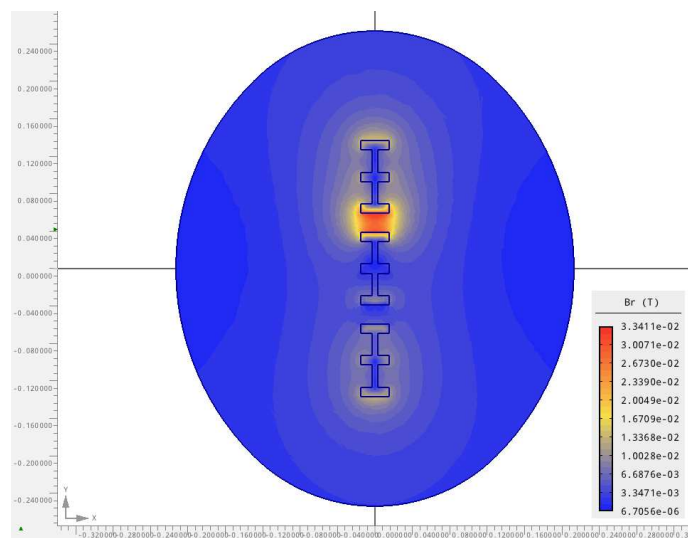
Obr. K1 Rozložení magnetické indukce (Al vodorovné)



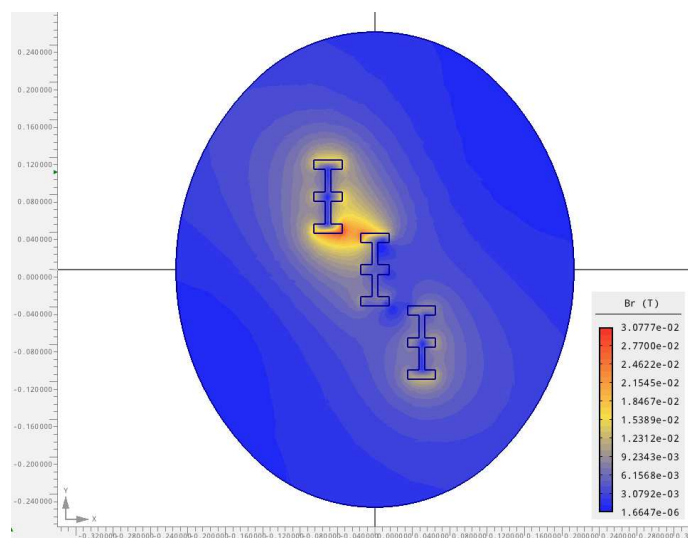
Obr. K2 Rozložení magnetické indukce (Cu vodorovné)



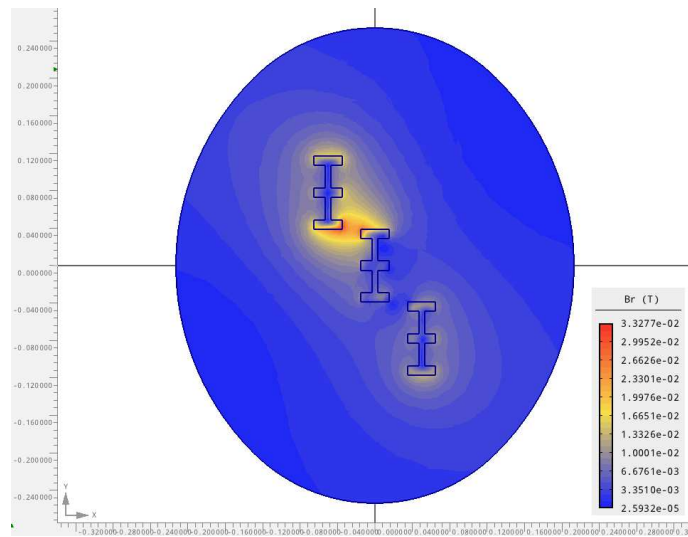
Obr. K3 Rozložení magnetické indukce (Al svislé)



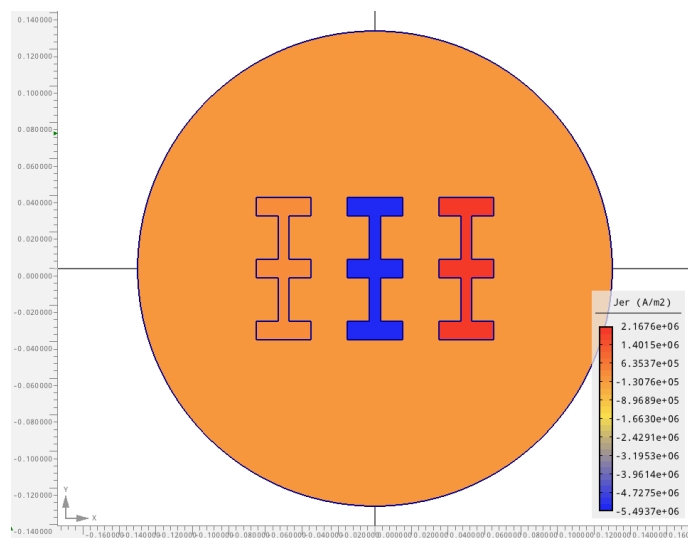
Obr. K4 Rozložení magnetické indukce (Cu svislé)



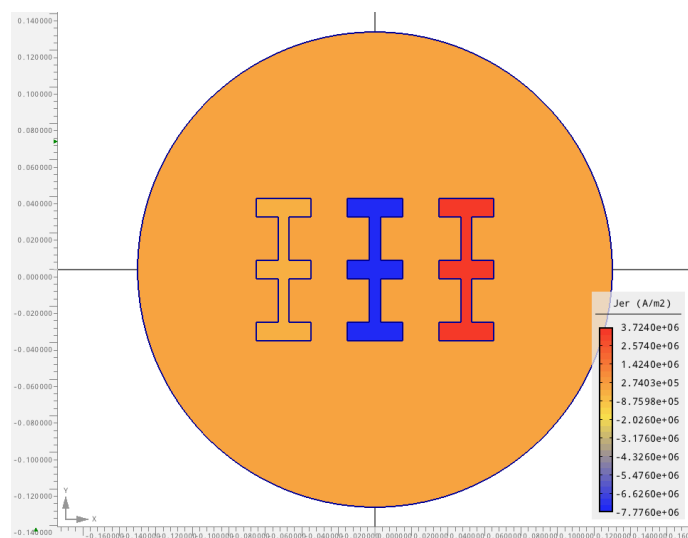
Obr. K5 Rozložení magnetické indukce (Al šikmé)



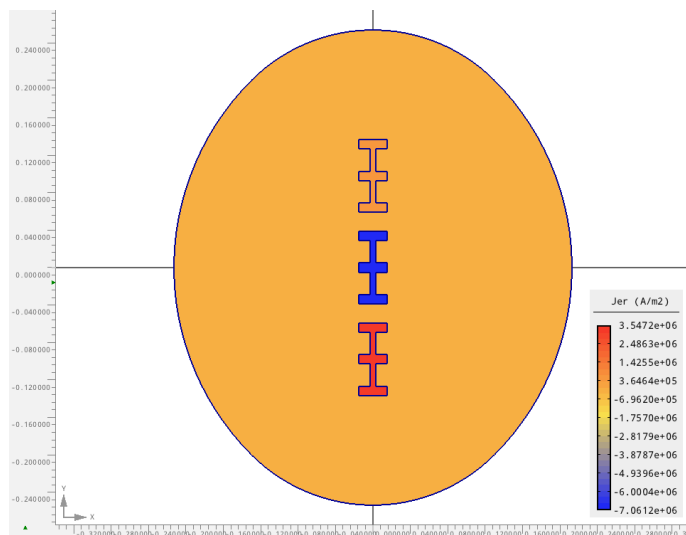
Obr. K6 Rozložení magnetické indukce (Cu šikmé)



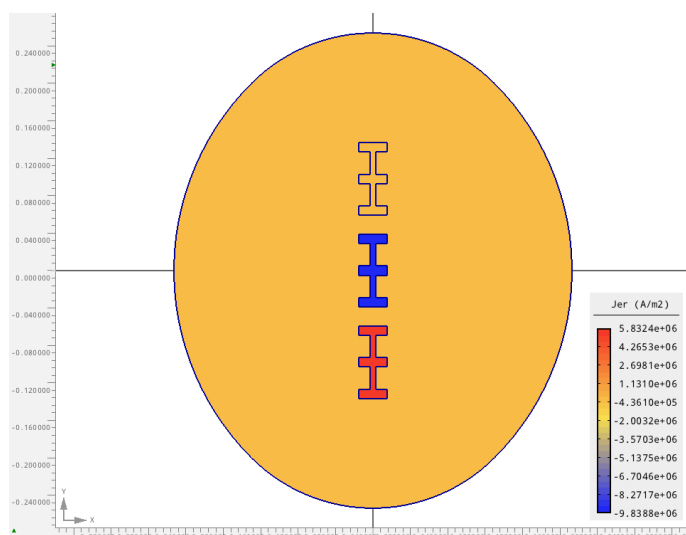
Obr. K7 Rozložení proudové hustoty (Al vodorovné)



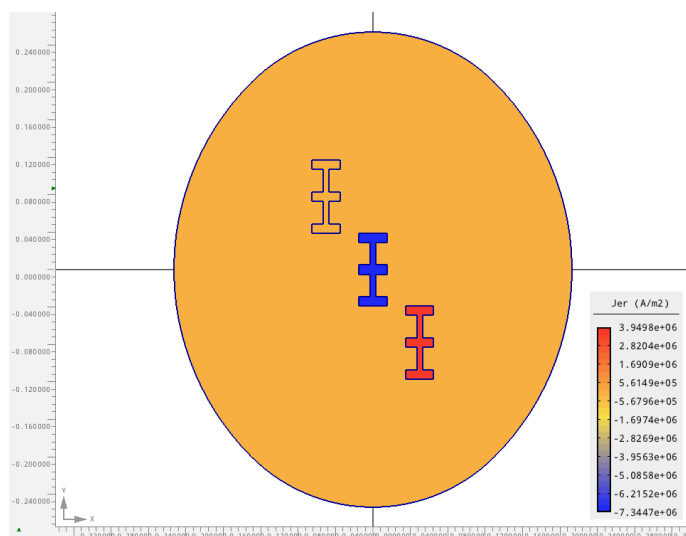
Obr. K8 Rozložení proudové hustoty (Cu vodorovné)



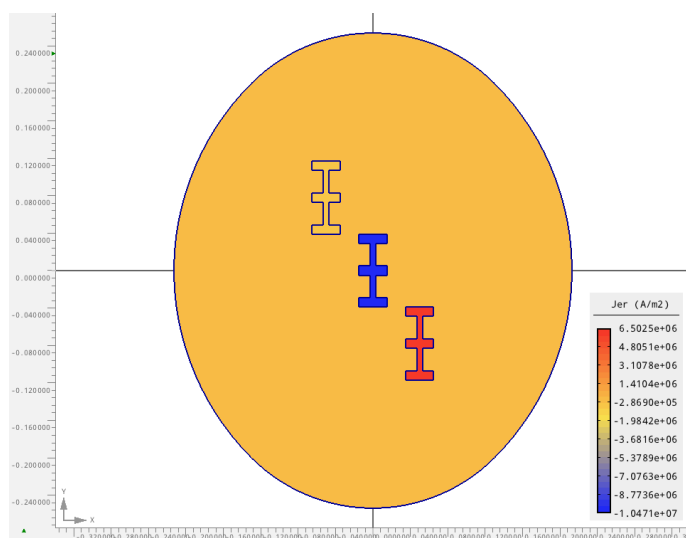
Obr. K9 Rozložení proudové hustoty (Al svislé)



Obr. K10 Rozložení proudové hustoty (Cu svislé)



Obr. K11 Rozložení proudové hustoty (Al šikmé)



Obr. K12 Rozložení proudové hustoty (Cu šikmé)



**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Elektromagnetické pole přípojnicových systémů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Hynek HAIMRLE**  
Osobní číslo: **E13B0355P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Elektromagnetické pole přípojnicových systémů**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Prostudujte odbornou literaturu a internetové zdroje týkající se provedení přípojnicových systémů.
2. Sestavte matematický model problému a vytvořte algoritmus pro řešení rozložení elektromagnetického pole.
3. Uvažujte různá uspořádání a různé tvary vodičů, respektujte použité materiály.
4. Realizujte numerický model na počítači.
5. Zhodnoťte obdržené výsledky.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Mayer, Daniel: Teorie elektromagnetického pole, Plzeň, ZČU v Plzni, 2001.
2. Mayer, D., Ulrych, B.: Základy numerického řešení elektrických a magnetických polí, Praha, SNTL, 1988.
3. Míka, S., Přikryl, P., Brandner, M.: Speciální numerické metody. Numerické metody řešení okrajových úloh pro diferenciální rovnice, Plzeň, Vydavatelský servis, 2006.

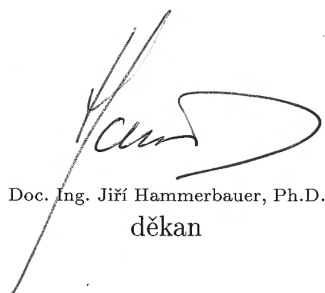
Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Lenka Šroubová, Ph.D.**

Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2014

Termín odevzdání bakalářské práce: 2. června 2016

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



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

**Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce zkoumá elektromagnetické pole elektrických přípojníc. V teoretickém úvodu se zabývám problematikou elektromagnetického pole, včetně Maxwellových rovnic. V další části se věnuji přípojnicím a to především možným typům přípojníc běžně používaných v provozu. Dále popisuji numerické řešení pomocí programu Agros2D. Poslední část je věnována simulacím a jejich výsledkům.

**Klíčová slova**

elektromagnetické pole, Maxwellovy rovnice, proudová hustota, Agros2D, přípojnice, Lorentzova síla, činné ztráty

**Abstract**

The following Bachelor thesis investigates the electromagnetic field of electrical busbars. Theoretical introduction deals with the issue of electromagnetic field, including Maxwell's equations. Next part is devoted to busbars, especially kinds used in operation. Further I describe a numerical solution by using the program Agros2D. In the last part you can read about the simulations and their results.

**Key words**

electromagnetic field, Maxwell's equations, current density, Agros2D, bus bar, Lorentz force, operating losses

## **Prohlášení**

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 2.6.2016

Hynek Haimrle

## **Poděkování**

Touto cestou děkuji Ing. Lence Šroubové za její cenné rady, odborné vedení a celkovou trpělivost.

## Obsah

|  |           |
|--|-----------|
| <b>OBSAH</b> .....   | <b>8</b>  |
| <b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....  | <b>9</b>  |
| <b>ÚVOD</b> .....  | <b>11</b> |
| <b>1 ELEKTROMAGNETICKÉ POLE</b> .....  | <b>12</b> |
| 1.1 ÚVOD DO ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE .....   | 12        |
| 1.2 MAXWELLOVY ROVNICE V INTEGRÁLNÍM TVARU.....  | 14        |
| 1.3 MAXWELLOVI ROVNICE V DIFERENCIÁLNÍM TVARU .....  | 15        |
| 1.4 LORENTZOVY SÍLY.....   | 16        |
| 1.5 ROVNICE PRO PROUDOVOU HUSTOTU .....  | 18        |
| 1.6 ČINNÉ ZTRÁTY .....   | 18        |
| <b>2 PŘÍPOJNICE</b> .....  | <b>19</b> |
| 2.1 POUŽITÍ PŘÍPOJNIC.....   | 19        |
| 2.2 TYPY PŘÍPOJNIC PRO VÝPOČTY.....  | 20        |
| <b>3 AGROS2D</b> .....   | <b>26</b> |
| 3.1 AGROS2D OBECNĚ .....   | 26        |
| 3.2 MATEMATICKÝ MODEL .....  | 26        |
| 3.3 NUMERICKÝ MODEL.....   | 27        |
| <b>4 ŘEŠENÁ POLE PŘÍPOJNIC</b> .....   | <b>29</b> |
| 4.1 CU PŘÍPOJNICE, 5x25 MM, VODOROVNÉ USPOŘÁDÁNÍ, PROUD 400 A, RŮZNÉ VZDÁLENOSTI.....  | 29        |
| 4.2 CU PŘÍPOJNICE, 5x25 MM, VZDÁLENOST 40 MM, RŮZNÝ PROUD.....   | 31        |
| 4.3 AL PŘÍPOJNICE, 100x10 MM, USPOŘÁDÁNÍ VODOROVNÉ, PROUD 1580 A, RŮZNÁ VZDÁLENOST .....                                       | 32        |
| 4.4 AL PŘÍPOJNICE, 100x10 MM, USPOŘÁDÁNÍ ŠIKMÉ, PROUD 1580 A, RŮZNÁ VZDÁLENOST .....   | 33        |
| 4.5 AL PŘÍPOJNICE, 100x10 MM, USPOŘÁDÁNÍ TROJÚHELNÍK_A, PROUD 1580 A, RŮZNÁ VZDÁLENOST ...                                     | 34        |
| 4.6 AL PŘÍPOJNICE, 100x10 MM, USPOŘÁDÁNÍ TROJÚHELNÍK_B, PROUD 1580 A, RŮZNÁ VZDÁLENOST ...                                     | 36        |
| 4.7 AL PŘÍPOJNICE, 100x10 MM, PROUD 1580 A, RŮZNÁ USPOŘÁDÁNÍ, RŮZNÁ VZDÁLENOST .....   | 38        |
| 4.8 AL PŘÍPOJNICE, TRUBKOVÉ, VNĚJŠÍ PRŮMĚR 100 MM, TLOUŠŤKA STĚNY 10 MM, PROUD 3140 A,<br>RŮZNÁ USPOŘÁDÁNÍ.....                | 39        |
| 4.9 AL PŘÍPOJNICE, TRUBKOVÉ, VNĚJŠÍ PRŮMĚR 100 MM, TLOUŠŤKA STĚNY 10 MM, PROUD 3140 A,<br>RŮZNÁ FÁZOVÁ ZAPOJENÍ .....          | 41        |
| 4.10 CU PŘÍPOJNICE, PROFIL H, PRŮŘEZ 720 MM <sup>2</sup> , VODOROVNÉ USPOŘÁDÁNÍ, VZDÁLENOST STŘEDŮ 50,<br>PROUD 1600 A.....    | 43        |
| 4.11 CU PŘÍPOJNICE, PROFIL T, PRŮŘEZ 500 MM <sup>2</sup> , VZDÁLENOST STŘEDŮ 50MM, PROUD 1250 A, RŮZNÁ<br>USPOŘÁDÁNÍ.....      | 45        |
| 4.12 CU, AL PŘÍPOJNICE, PROFIL HH, PRŮŘEZ 1140 MM <sup>2</sup> , VZDÁLENOST HRAN 40 MM, PROUD 2500 A,<br>RŮZNÁ USPOŘÁDÁNÍ..... | 46        |
| <b>ZÁVĚR</b> .....   | <b>48</b> |
| <b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....   | <b>49</b> |
| <b>PŘÍLOHY</b> .....   | <b>1</b>  |



## Seznam symbolů a zkratk

| Veličina                         |                 | Jednotka                   |                                |
|----------------------------------|-----------------|----------------------------|--------------------------------|
| Název                            | Značka          | Název                      | Značka                         |
| vektorový magnetický potenciál   | $A$             | weber na metr              | Wb/m                           |
| magnetická indukce               | $B$             | tesla                      | T                              |
| měrná tepelná kapacita           | $c$             | joule na kilogram a kelvin | $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ |
| elektrická indukce               | $D$             | coulomb na čtverečný metr  | $\text{C/m}^2$                 |
| intenzita elektrického pole      | $E$             | volt na metr               | V/m                            |
| síla                             | $F$             | newton                     | N                              |
| elektrická síla                  | $F_e$           | newton                     | N                              |
| magnetická síla                  | $F_m$           | newton                     | N                              |
| intenzita magnetického pole      | $H$             | ampér na metr              | A/m                            |
| elektrický proud                 | $I$             | ampér                      | A                              |
| proudová hustota                 | $J$             | ampér na čtverečný metr    | $\text{A/m}^2$                 |
| proudová hustota vířivých proudů | $J_v$           | ampér na čtverečný metr    | $\text{A/m}^2$                 |
| délka                            | $l$             | metr                       | m                              |
| objemové joulovy ztráty          | $p_J$           | watt na krychlový metr     |                                |
| elektrický náboj                 | $Q$             | coulomb                    | C                              |
| obsah                            | $S$             | metr čtvereční             | $\text{m}^2$                   |
| teplota                          | $T$             | kelvin                     | K                              |
| elektrické napětí mezi body A, B | $U_{AB}$        | volt                       | V                              |
| objem                            | $V$             | metr krychlový             | $\text{m}^3$                   |
| rychlost (náboje)                | $v$             | metr za sekundu            | m/s                            |
| konduktivita                     | $\gamma$        | siemens na metr            | S/m                            |
| permitivita                      | $\varepsilon$   | farad na metr              | F/m                            |
| permitivita vakua                | $\varepsilon_0$ | farad na metr              | F/m                            |
| relativní permitivita            | $\varepsilon_r$ | -                          | -                              |
| tepelná vodivost                 | $\lambda$       | watt na metr a kelvin      | $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  |
| permeabilita                     | $\mu$           | henry na metr              | H/m                            |
| permeabilita vakua               | $\mu_0$         | henry na metr              | H/m                            |

|                         |         |                            |                   |
|-------------------------|---------|----------------------------|-------------------|
| relativní permeabilita  | $\mu_r$ | -                          | -                 |
| měrná hmotnost          | $\rho$  | kilogram na krychlový metr | kg/m <sup>3</sup> |
| magnetický indukční tok | $\Phi$  | weber                      | Wb                |
| elektrický indukční tok | $\Psi$  | coulomb                    | C                 |

## Úvod

Tématem bakalářské práce je sledování elektromagnetického pole elektrických přípojníc a jeho vlivů. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část.

První kapitola je zaměřena na teorii elektromagnetického pole. Po krátkém pohledu do historie elektromagnetického pole následuje rozbor sil v elektromagnetickém poli. Dále jsou zmíněny Maxwellovy rovnice a jejich fyzikální význam. Naposledy se kapitola věnuje Lorentzovým silám, rovnicím pro proudovou hustotu v diferenciálním a integrálním tvaru a činným ztrátám.

Druhá kapitola je rozdělena na dvě části. První část je popisná, je zde vysvětlen důvod používání přípojníc v praxi, jejich výhody a používané materiály. Druhá část poskytuje přehled o používaných typech přípojníc, obsahuje tabulky s rozměry a tvary. Součástí jsou doplňující obrázky přípojníc.

V další kapitole se seznámíme s programem Agros2D, který je vyvíjen v Plzni na Katedře teoretické elektrotechniky FEL ZČU. Program umožňuje simulaci fyzikálních polí, včetně pole elektromagnetického, v různých stavech, mezi které patří i mimo jiné harmonická analýza. V této kapitole je také vysvětlen matematický a numerický model s nastavením geometrie a materiálových konstant, potřebný pro správné vyhodnocení příkladů vytvářených ve výpočetním programu.

V poslední části bakalářské práce jsou řešeny ilustrativní příklady různých tvarů a uspořádání přípojníc. Získaná data jsou prezentována formou grafů. Kapitola je zaměřena především na sledování působení Lorentzových sil v přípojnicích a na vyhodnocování činných ztrát přípojníc.

Součástí práce jsou přílohy, v kterých si můžeme prohlédnout data ke grafům prezentovaných v práci.

# 1 Elektromagnetické pole

## 1.1 Úvod do elektromagnetického pole

Důsledkem působení elektrických a magnetických sil v prostoru je elektromagnetické pole. [1] Elektromagnetické pole je zkoumáno od konce 18. století, přičemž největší podíl je právem přisuzován Michaelovi Faradayovi za objevení elektromagnetické indukce, jevu, který indukuje elektrické napětí v magnetickém nestacionárním poli. [2, 3] Matematického vyjádření Faradayových poznatků se ujal James Clerk Maxwell a definoval je v dnes dobře známých Maxwellových rovnicích, které budou rozebírány dále. [2] Maxwellova teorie má své hranice, které ale neovlivní v negativním důsledku výsledky této práce, a jsou zmíněny pouze pro úplnost. Jedním z omezení je, že teorie platí pouze v nepohybujícím se prostředí a další je nedokonalost Maxwellových rovnic na mikroskopické úrovni, pro kterou teorii uzpůsobil Hendrik Antoon Lorentz v mikroskopické teorii elektromagnetického pole, která byla ještě později nahrazena kvantovou dynamikou. [2]

Elektromagnetické pole rozdělujeme podle časového průběhu na pole s časem neproměnné a na pole s časem proměnné, nebo podle prostorového průběhu na pole trojrozměrné (3D pole), dvojrozměrné (2D pole), jednorozměrné (1D pole) a homogenní. [2]

Elektrický proud  $I$  je důsledkem pohybu elektrického náboje  $Q$ , jehož velikost je dána celočíselným násobkem elementárního náboje  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  [C]. Náboj může být rozložen s objemovou hustotou, plošnou hustotou, lineární hustotou, nebo může být také diskrétní (tzn. soustředěn v bodu). [2]

Primárními veličinami elektromagnetického pole jsou intenzita pole  $\mathbf{E}$  a magnetická indukce  $\mathbf{B}$ . Pokud se pohybujeme v jiném prostředí nežli ve vakuu, jsou tyto veličiny doplněny pro elektrické pole o elektrickou indukci  $\mathbf{D}$  a pro magnetické pole o intenzitu magnetického pole  $\mathbf{H}$  (viz vztahy 1.1 a 1.2). [2]

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (1.1)$$

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \mathbf{B} \quad (1.2)$$

V homogenním a lineárním prostředí můžeme uvažovat o permitivitě a permeabilitě

jako o materiálových konstantách s charakteristikami podle vztahů 1.3 respektive 1.4. [2]

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (1.3)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (1.4)$$

Je-li proud rozložen na ploše, jedná se o hustotu proudu  $\mathbf{J}$ , což je další základní veličina definována vztahem 1.5. Důležitým vztahem je tzv. Ohmův zákon v diferenciálním tvaru definován vztahem 1.6. [2, 4]

$$\mathbf{J} = \rho \mathbf{v} \quad (1.5)$$

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E} \quad (1.6)$$

Dále jsou definovány integrální charakteristiky pro elektrické napětí mezi body  $A$  a  $B$  podél křivky  $l$  (viz vztah 1.7), elektrický indukční tok (viz vztah 1.8), magnetický indukční tok (viz vztah 1.9) a elektrický proud (viz vztah 1.10).

$$U_{AB} = \int_A^B \mathbf{E} \, dl \quad (1.7)$$

$$\Psi = \int_S \mathbf{D} \, dS \quad (1.8)$$

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \, dS \quad (1.9)$$

$$I = \int_S \mathbf{J} \, dS \quad (1.10)$$

Význam jednotlivých veličin je uveden v seznamu symbolů a zkratk.

## 1.2 Maxwellovy rovnice v integrálním tvaru

### První Maxwellova rovnice (zákon celkového proudu)

Vztah 1.11 je matematickým vyjádřením toho, že „cirkulace vektoru  $\mathbf{H}$  po libovolně orientované uzavřené křivce  $c$  je rovna součtu celkového vodivého proudu  $I$  a posuvného (tzv. Maxwellova) proudu  $\frac{d\Psi}{dt}$ , spřažených s křivkou  $c$ .“ [2]

Křivka  $c$  je vzájemně pravotočivě orientována s libovolnou plochou  $S$ . [2]

$$\oint_c \mathbf{H} \, d\mathbf{l} = I + \frac{d\Psi}{dt} \quad (1.11)$$

kde

$$\oint_c \mathbf{H} \, d\mathbf{l} \quad \text{oběhové magnetické napětí ve smyčce } c.$$

Proud  $I$  je součet elektrických proudů, které protínají plochu  $S$ . Jsou-li orientovány souhlasně s normálou plochy  $S$ , uvažujeme proudy jako kladné, v opačném případě jako záporné. [2]

### Druhá Maxwellova rovnice (Faradayův indukční zákon)

Vztah 1.12 je matematickým vyjádřením toho, že „cirkulace vektoru  $\mathbf{E}$  po libovolně orientované uzavřené křivce  $c$  je rovna záporně vzaté derivaci magnetického indukčního toku spřaženého s křivkou  $c$ .“ [2]

Libovolná plocha  $S$  je vzájemně pravotočivě orientována s křivkou  $c$ , která plochu obepíná. [2]

$$\oint_c \mathbf{E} \, d\mathbf{l} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.12)$$

kde

$$\oint_c \mathbf{E} \, d\mathbf{l} \quad \text{oběhové elektrické napětí.}$$

**Třetí Maxwellova rovnice (Gaussova věta)**

Vztah 1.13 je matematickým vyjádřením toho, že „elektrický indukční tok libovolnou vně orientovanou uzavřenou plochou  $S$  je roven celkovému volnému náboji v prostorové oblasti  $V$  ohraničené plochou  $S$ .“ [2]

$$\oint_S \mathbf{D} \, d\mathbf{S} = Q \quad (1.13)$$

Protože je elektrické pole zřídlové, jsou indukční čáry neuzavřené. [2]

**Čtvrtá Maxwellova rovnice (zákon spojitosti magnetického indukčního toku)**

Vztah 1.14 je matematickým vyjádřením toho, že „magnetický indukční tok libovolnou uzavřenou orientovanou plochou  $S$  je roven nule.“ [2]

$$\oint_S \mathbf{B} \, d\mathbf{S} = 0 \quad (1.14)$$

Protože neexistuje volný magnetický náboj, jsou magnetické indukční čáry uzavřené a magnetické pole je nezřídlové. [2]

Význam jednotlivých veličin je uveden v seznamu symbolů a zkratk.

**1.3 Maxwellovi rovnice v diferenciálním tvaru****První Maxwellova rovnice**

Vztah 1.25 je matematickým vyjádřením toho, že „rotace vektoru intenzity magnetického pole  $\mathbf{H}$  je rovna hustotě vodivého proudu  $\mathbf{J}$  a hustotě posuvného (Maxwellova) proudu  $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ .“ [2]

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.15)$$

Magnetické pole je obecně nevírové. [2]

## Druhá Maxwellova rovnice

Vztah 1.16 je matematickým vyjádřením toho, že „rotace vektoru intenzity elektrického pole  $\mathbf{E}$  je rovna záporně vzaté derivaci magnetické indukci  $\mathbf{B}$ .“ [5]

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.16)$$

Elektrické pole je obecně vírové. [2]

## Třetí Maxwellova rovnice

Vztah 1.17 je matematickým vyjádřením toho, že „divergence vektoru elektrické indukce  $\mathbf{D}$  je rovna objemové hustotě volného náboje  $\rho$ .“ [2]

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (1.17)$$

Elektrické pole volných náboje je zřídlové. [2]

## Čtvrtá Maxwellova rovnice

Vztah 1.18 je matematickým vyjádřením toho, že „divergence vektoru magnetické indukce  $\mathbf{B}$  je rovna nule.“ [2]

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (1.18)$$

kde

$\mathbf{B}$  [T]          magnetická indukce

Magnetické pole je nezřídlové. [2]

Význam jednotlivých veličin je uveden v seznamu symbolů a zkratk.



## 1.4 Lorentzovy síly

Elektromagnetické pole lze rozdělit na dvě složky podle působení síly  $F$  na elektricky nabitě částice. Jedná se o elektrické pole, které působí na náboj silou  $F_e$  a magnetické pole, které působí na pohybující se náboj silou  $F_m$ . Součet těchto sil je nazýván Lorentzovými silami a její výpočet udává vztah 1.19.

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_m = Q (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1.19)$$

Vztah 1.20 nám říká, že na náboj  $Q$ , pohybující se částic o rychlosti  $\mathbf{v}$ , působí magnetické pole  $\mathbf{B}$  svou silou. Pokud ale místo náboje  $Q$  zamýšlíme proud, který prochází vodičem, pak je síla magnetického pole, která působí na proudový element vodiče vyjádřena vztahem 1.21. Uvažujeme-li tenký vodič, kterým protéká proud  $I$ , působí na něj síla podle vztahu 1.22. Pokud uvažujeme homogenní pole  $\mathbf{B}$ , pak na tenký vodič působí síla podle vztahu 1.23. [2]

$$\mathbf{F}_m = Q (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1.20)$$

$$\mathbf{F}_m = \int_V (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) dV \quad (1.21)$$

$$\mathbf{F}_m = I \int_S d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (1.22)$$

$$\mathbf{F}_m = \mathbf{B} I l \sin \alpha \quad (1.23)$$

kde

$\alpha$  úhel mezi vodičem a vektorem  $\mathbf{B}$

Význam jednotlivých veličin je uveden v seznamu symbolů a zkratek.

## 1.5 Rovnice pro proudovou hustotu

### Integrální tvar

Integrální tvar pro proudovou hustotu je vyjádřen vztahem 1.24.

$$\oint_s \mathbf{J} dS = - \frac{dQ}{dt} \quad (1.24)$$

### Diferenciální tvar

diferenciální tvar pro proudovou hustotu je vyjádřen vztahem 1.25.

$$\operatorname{div} \mathbf{J} = - \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1.25)$$

Význam jednotlivých veličin je uveden v seznamu symbolů a zkratk.

## 1.6 Činné ztráty

Model teplotního pole lze popsat Fourier-Kirchhoffovou rovnicí (viz vztah 1.26) [6]

$$\operatorname{div} (\lambda \operatorname{grad} T) = \rho c \frac{dT}{dt} - p_J \quad (1.26)$$

Jouleovy ztráty vznikají na základě tepelných účinků vířivých proudů a lze je vyjádřit vztahem 1.27. [6]

$$p_J = \frac{\|\mathbf{J}_v\|^2}{\gamma} \quad (1.27)$$

Význam jednotlivých veličin je uveden v seznamu symbolů a zkratk.

## 2 Přípojnice

### 2.1 Použití přípojnic

Přípojnice jsou efektivním nahrazením kabelového vedení elektrického proudu. V dnešní době je škála jejich použití velmi široká. Přípojnice jsou konstruovány pro všechny typy elektrického napětí, od nízkého napětí až po velmi vysoké napětí. Také jmenovité proudy přípojnic se pohybují ve velkém rozsahu od 4 A až do 20 kA.

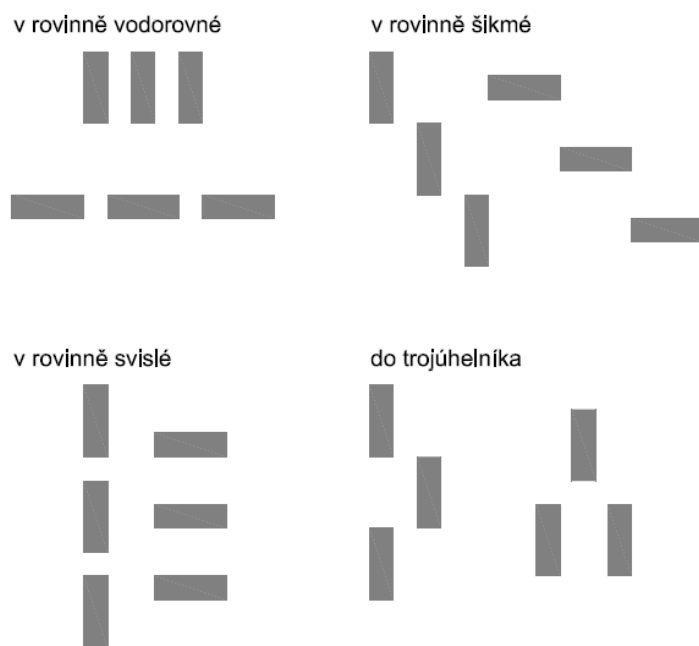
Zásadním je používání například v elektrických rozvodnách nebo transformovnách, v kterých se přivedený výkon rozvádí pomocí přípojnic do jednotlivých odboček a částí rozvodny popřípadě transformovny.

Výhoda přípojnic je úspora místa a celkově snazší kompletace než v případě kabelových rozvodů, vyšší mechanická odolnost, malé tepelné ztráty, snadná rozšiřitelnost, výroba přesně na míru instalovanému systému a také není potřeba kabelových žlabů.

Pro nízká a vysoká napětí jsou nejčastěji využívány vodiče s obdélníkovým průřezem, ale nejsou nezvyklé ani profilové či trubkové vodiče. Pro velmi vysoká napětí se používají pásové, trubkové nebo profilové vodiče.

Používanými materiály pro výrobu přípojnic jsou hliník, měď a jejich slitiny. Základní uspořádání přípojnic se praktikuje v rovině vodorovné, v rovině svislé, v rovině šikmé a v uspořádání do trojúhelníka (*viz obr. 2.1*). [7-13]

Na dalších obrázcích jsou znázorněny typické tvary přípojnic (*viz obr. 2.2-2.9*) a v následujících tabulkách jsou uvedeny nejpoužívanější rozměry měděných a hliníkových přípojnic příslušných tvarů (*viz tab. 2.1-2.4*).



Obr. 2.1 Uspořádání přípojnic<sup>1</sup>

## 2.2 Typy přípojnic pro výpočty

Tab. 2.1 Ploché měděné přípojnice s povrchovou úpravou pocínováním

| Rozměry [mm] | Průřez [mm <sup>2</sup> ] | Délka [m] | Jmenovitý proud [A] |
|--------------|---------------------------|-----------|---------------------|
| 12×5         | 60                        | 2,4       | 200                 |
| 25×5         | 125                       | 2,4       | 400                 |
| 30×10        | 300                       | 2,4       | 630                 |
| 60×10        | 600                       | 2,4       | 1250                |
| 20×10        | 200                       | 3,6       | 520                 |
| 30×10        | 300                       | 3,6       | 630                 |

..

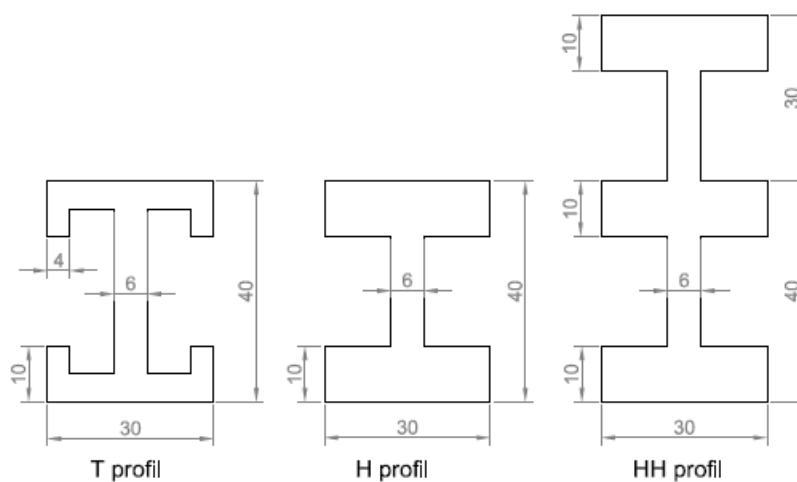
<sup>1</sup> Obr. 2.1 byl překreslen podle zdroje [10]



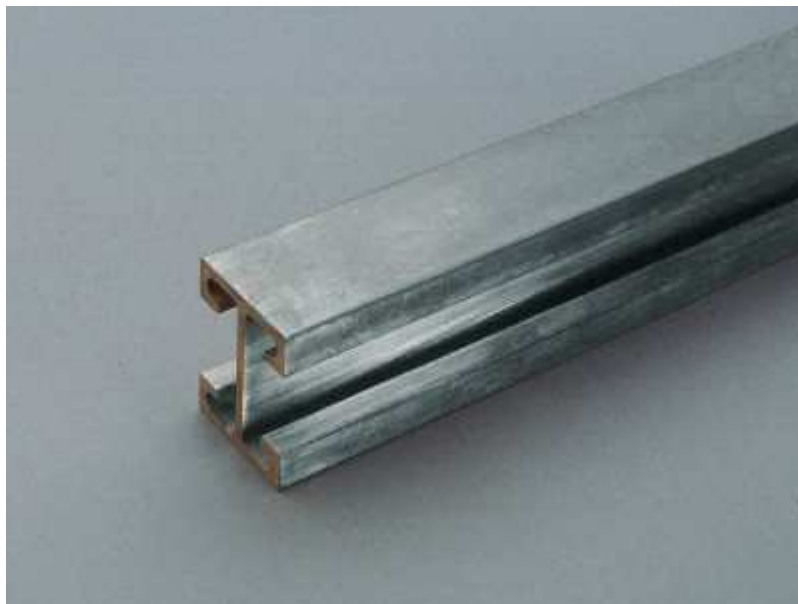
Obr. 2.2 Plochá měděná přípojnice

Tab. 2.2 Profilové měděné přípojnice

| Průřez [mm <sup>2</sup> ] | Délka [m] | Profil | Jmenovitý proud [A] |
|---------------------------|-----------|--------|---------------------|
| 500                       | 2,4       | T      | 1250                |
| 500                       | 3,6       | T      | 1250                |
| 720                       | 2,4       | H      | 1600                |
| 720                       | 3,6       | H      | 1600                |
| 1140                      | 2,4       | HH     | 2500                |
| 1140                      | 3,6       | HH     | 2500                |



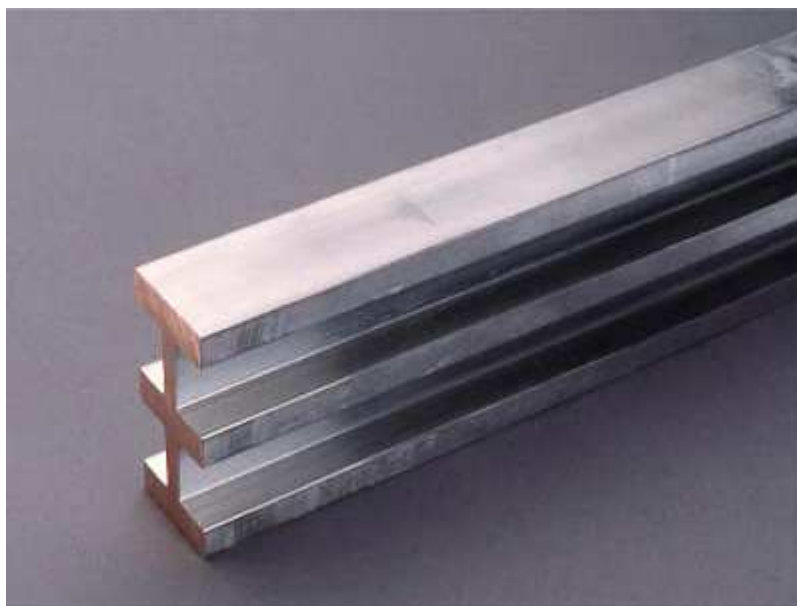
Obr. 2.3 Názvy profilových přípojníc



*Obr. 2.4 T profil*



*Obr. 2.5 H profil*

Obr. 2.6 HH profil<sup>2</sup>

Tab. 2.3 Ploché hliníkové přípojnice

| <b>Rozměry [mm]</b> | <b>Průřez [mm<sup>2</sup>]</b> | <b>Délka [m]</b> | <b>Jmenovitý proud [A]</b> |
|---------------------|--------------------------------|------------------|----------------------------|
| 40×5                | 200                            | 6                | 496                        |
| 40×10               | 400                            | 6                | 734                        |
| 50×5                | 250                            | 6                | 600                        |
| 50×10               | 500                            | 6                | 882                        |
| 100×10              | 1000                           | 6                | 1580                       |
| 100×16              | 1600                           | 6                | 2039                       |
| 160×10              | 1600                           | 6                | 2371                       |
| 160×16              | 2560                           | 6                | 3038                       |

<sup>2</sup> Technické parametry v tab. 2.1-2.3 a obr. 2.4-2.6 byly převzaty ze zdroje [14], obr. 2.3 byl překreslen podle zdroje [14]



Obr. 2.7 Ploché hliníkové přípojnice v praxi

Tab. 2.4 Trubkové hliníkové přípojnice

| Vnější průměr<br>[mm] | Tloušťka stěny<br>[mm] | Průřez [mm <sup>2</sup> ] | Délka [m] | Jmenovitý proud [A] |
|-----------------------|------------------------|---------------------------|-----------|---------------------|
| 50                    | 5                      | 707                       | 6         | 1270                |
| 80                    | 10                     | 2199                      | 6         | 2580                |
| 100                   | 10                     | 2827                      | 6         | 3140                |
| 120                   | 10                     | 3456                      | 6         | 3680                |
| 160                   | 10                     | 4712                      | 6         | 4710                |
| 200                   | 10                     | 5969                      | 6         | 5690                |
| 220                   | 10                     | 6597                      | 6         | 6170                |
| 250                   | 10                     | 7540                      | 6         | 6860                |





Obr. 2.8 Trubková hliníková přípojnice



Obr. 2.9 Trubkové hliníkové přípojnice v praxi<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Technické parametry v tab. 2.4, 2.5 a obr. 2.7-2.9 byly převzaty ze zdroje [15]

## 3 Agros2D

### 3.1 Agros2D obecně

Pro vyjádření fyzikálního pole je využívána aplikace Agros2D, která je kódována pomocí jazyka C++. Tento program je zaměřený k multiplatformnímu použití. Řeší parciální diferenciální rovnice na podkladě knihovny Hermes2D, která se opírá o metodu hp-FEM. Jedná se o postup, jenž využívá metodu konečných prvků vyššího řádu přesnosti, jejímž výsledkem je přibližné řešení. Právě jeho přesnost je závislá na rozměru jednotlivých složek, na výběru druhu konečného elementu. Z toho vyplývá, že je silně závislá na stavbě sítě konečných prvků. Tato aplikace je šířena pod licencí GPL a je produkována v Plzni na Katedře teoretické elektrotechniky FEL ZČU. [16]

Simulace fyzikálních polí, které Agros2D umožňuje, je v dnešní době nezpochybnitelnou součástí vývoje elektrických strojů a přístrojů. Takovéto simulace celý výrobní proces zkvalitňují a zlevňují. Agros2D je navržen jako open-source kód, čímž se stává výhodnou alternativou k jinak drahým výpočetním programům. [16]

Aplikaci Agros2 lze rozčlenit na 3 části- preprocesor, procesor a postprocesor. Preprocesor se využívá k určení modelu, volby geometrie a materiálů, procesor je určen k řešení daného problému a postprocesor slouží ke zhodnocení vypočtených údajů. Můžeme analyzovat přechodné děje, ustálený stav a také můžeme využívat analýzu harmonickou. V programu Agros2D je možné vyjádřit problémy v uspořádání kartézském a osově symetrickém. Ukazuje nám teplotní, elektrické proudové, elektrické a magnetické pole. [16]

### 3.2 Matematický model

Při pomalých časových změnách (pole o frekvenci 50 Hz) lze zanedbat posuvný proud (daný druhým členem pravé strany v první Maxwellově rovnici). V tomto případě Maxwellovy rovnice nabývají tvaru podle *vztahů 3.1-3.4*.

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (3.1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (3.3)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (3.4)$$

Je uvažován kartézský souřadnicový systém. V jednotlivých oblastech předpokládáme lineární prostředí, tj.  $\mu = \text{konst.}$ ,  $\gamma = \text{konst.}$  Dále předpokládáme harmonický průběh proudu, což umožňuje přejít na symbolicko-komplexní zobrazení. Při využití vztahů  $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$  a  $\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}$  je rozložení elektromagnetického pole nyní možno popsat parciální diferenciální rovnicí pro fázor magnetického vektorového potenciálu  $\mathbf{A}$  (viz vztah 3.5).

$$\frac{1}{\mu} \operatorname{rot}(\operatorname{rot} \underline{\mathbf{A}}) + j\omega\gamma \underline{\mathbf{A}} = \underline{\mathbf{J}}_{\text{ext}} \quad (3.5)$$

kde

$\underline{\mathbf{J}}_{\text{ext}}$  vnější proudová hustota.

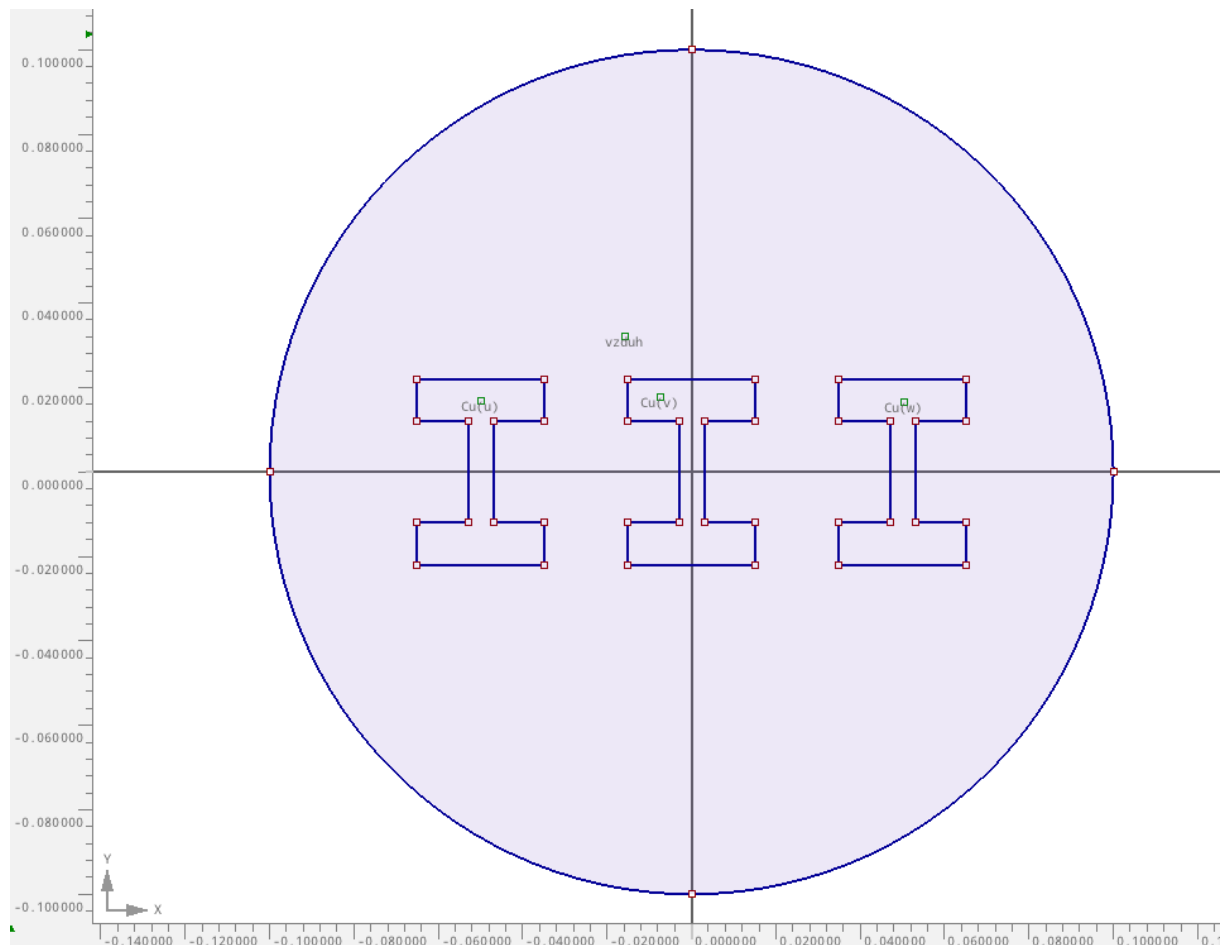
Okrajová úloha je tedy formulována pro magnetický vektorový potenciál. Na hranici této oblasti platí okrajová podmínka  $\underline{A}_z = 0$ .

### 3.3 Numerický model

Na obr. 3.1 je zobrazen model sítě vytvořený v programu Agros2D. V následujících kapitolách jsou zkoumány a vyhodnocovány činné ztráty a Lorentzovy síly u různých typů přípojníc. Proměnnými zde jsou vzájemné vzdálenosti přípojníc, proudy tekoucí přípojnícemi, různá uspořádání přípojníc a materiály, z kterých jsou přípojnice vyrobeny. Pro materiály je zapotřebí znát jejich materiálové konstanty, tedy relativní permeabilitu a konduktivitu (viz tab. 3.1). Výpočty budou probíhat s harmonickým průběhem proudu a tak je zapotřebí vždy počítat s fázovými posuvy proudů zadávanými do výpočetního programu jako reálná a imaginární složka proudu.

Tab. 3.1 Materiálové konstanty mědi a hliníku

|               | $\mu_r$ [-] | $\gamma$ [S/m] |
|---------------|-------------|----------------|
| <b>Cu</b>     | 0,999 990   | 58,108E+06     |
| <b>Al</b>     | 1,000 023   | 37,700E+06     |
| <b>vzduch</b> | 1           | 0              |



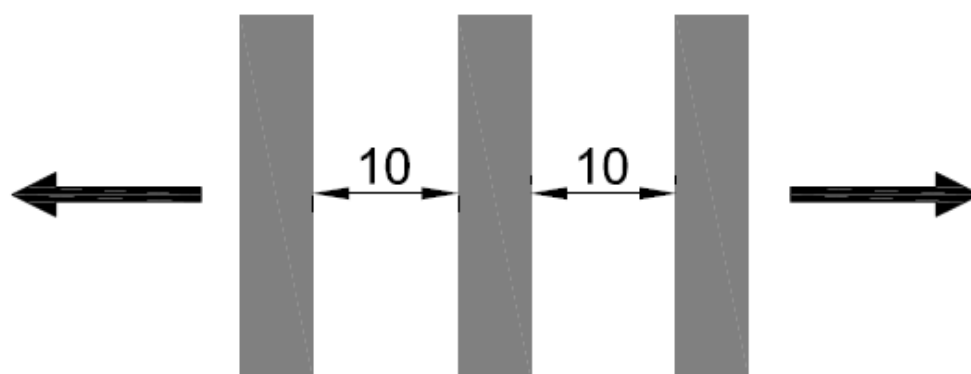
Obr. 3.1 Numerický model vytvořen v programu Agros2D

## 4 Řešená pole přípojnic

V následujících podkapitolách jsou řešeny případy elektromagnetického pole s typickým uspořádáním a tvarem přípojnic. Vyhodnocovány jsou činné ztráty a Lorentzovy síly pro fázi U. Základní jednotkou pro grafy činných ztrát je jeden watt na metr [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$ ], zatímco základní jednotkou pro grafy Lorentzových sil je jeden milinewton. Stejným algoritmem lze řešit pole jakéhokoli tvaru konfigurace přípojnic.

### 4.1 Cu přípojnice, 5x25 mm, vodorovné uspořádání, proud 400 A, různé vzdálenosti

Zde je zkoumán průběh elektromagnetického pole měděných přípojnic o rozměrech 5x25 milimetrů pro dva typy vodorovného uspořádání (pracovně nazvanými jako typ\_a a typ\_b) při absolutní hodnotě proudu 400 A. V uspořádání typu\_a jsou delší hrany přípojnic rovnoběžné, přípojnice jsou nastojato (viz obr. 4.1) a v uspořádání typu\_b jsou kratší hrany přípojnic rovnoběžné, přípojnice jsou naležato (viz obr. 4.2). Postupně byla měněna vzdálenost mezi bližšími hranami vnějších přípojnic k bližším hranám prostřední přípojnice, jak je naznačeno na obr. 4.1 a obr. 4.2. Použitými vzdálenostmi byly 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm a 60 mm.



Obr. 4.1 Zvětšující se vzdálenost mezi hranami přípojnic (uspořádání typ\_a)

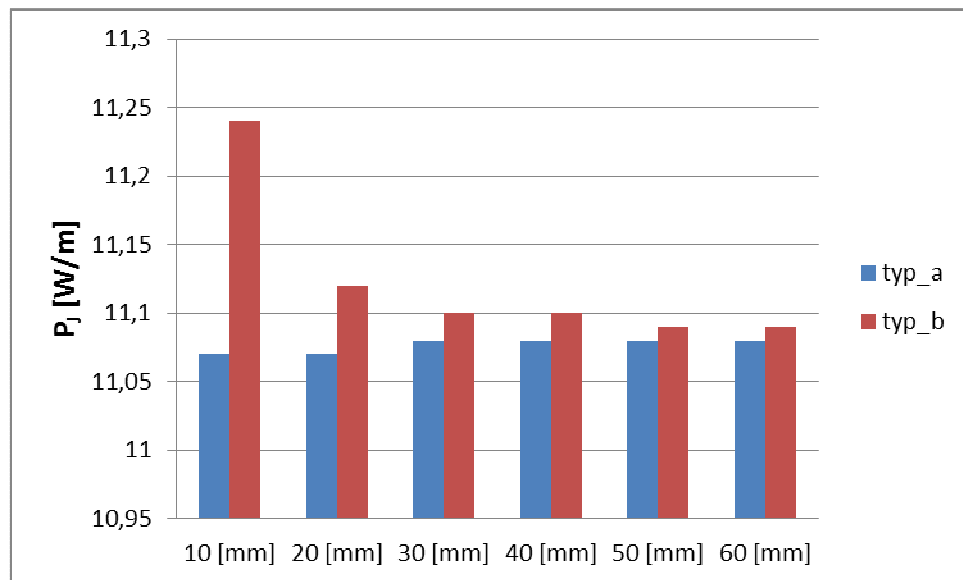


Obr. 4.2 Zvětšující se vzdálenost mezi hranami přípojnic (uspořádání typ\_b)

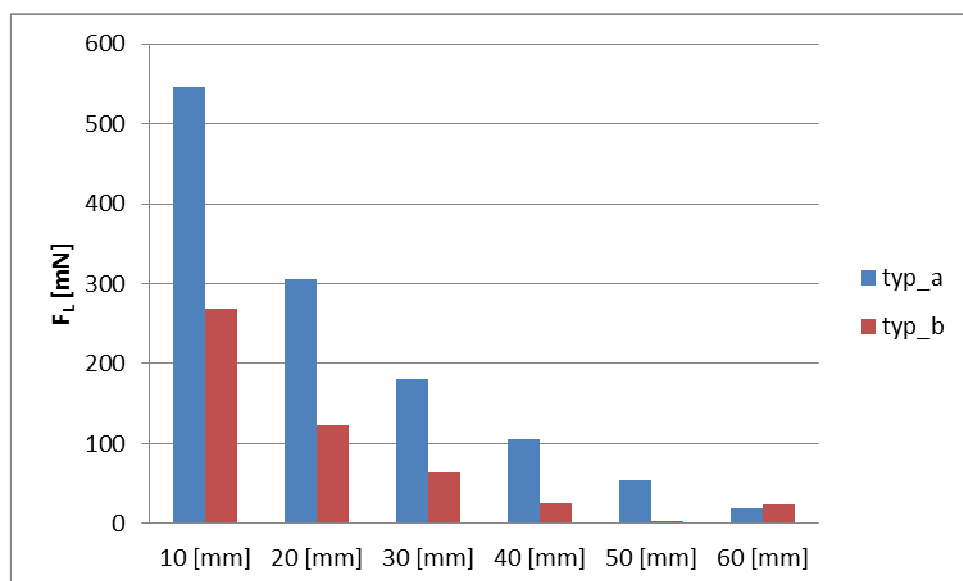
Z grafu 4.1 je patrné, že v případě uspořádání typu\_a jsou činné ztráty menší při každé vzdálenosti hran přípojnic než v uspořádání typu\_b. Mezi činnými ztrátami v uspořádání typu\_a nejsou velké změny, na rozdíl od činných ztrát v uspořádání typu\_b, kde jsou činné ztráty velké na vzdálenosti 10 mm oproti ostatním vzdálenostem. Naopak Lorentzovy síly (viz graf 4.2) jsou v uspořádání typu\_a větší při každé vzdálenosti přípojnic než v uspořádání typu\_b. Lorentzovy síly klesají s rostoucí vzdáleností, výjimkou je uspořádání typu\_b při vzdálenosti hran 50 mm, kde jsou Lorentzovy síly vůbec nejmenší.

Obrázky zobrazující rozložení magnetické indukce a proudové hustoty a jejich hodnoty lze nalézt pro tento a následující příklady v přílohách.

Graf 4.1 Závislost činných ztrát na 1 m délky na vzájemné vzdálenosti a na typu uspořádání přípojnic



Graf 4.2 Závislost Lorentzových sil na vzájemné vzdálenosti a na typu uspořádání přípojnic

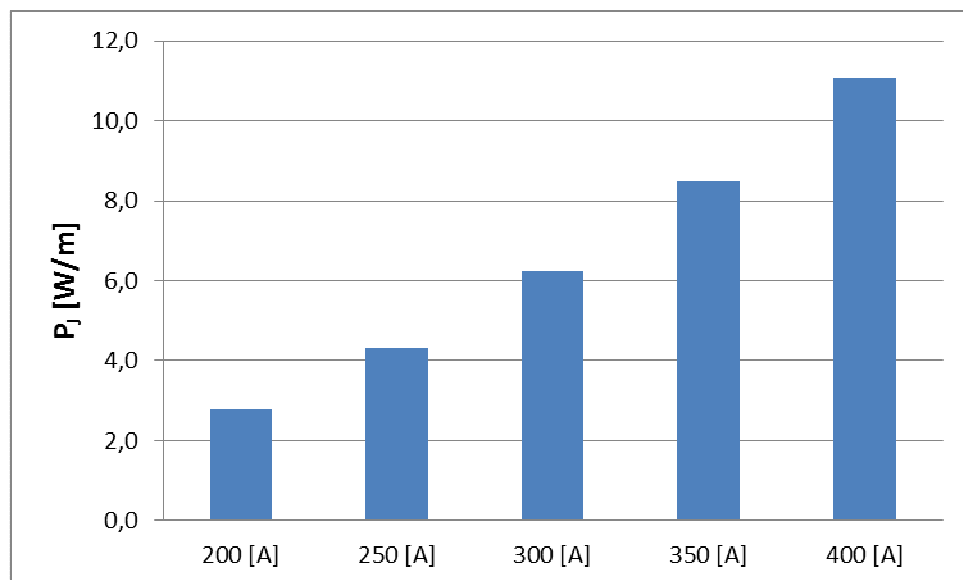


## 4.2 Cu přípojnice, 5x25 mm, vzdálenost 40 mm, různý proud

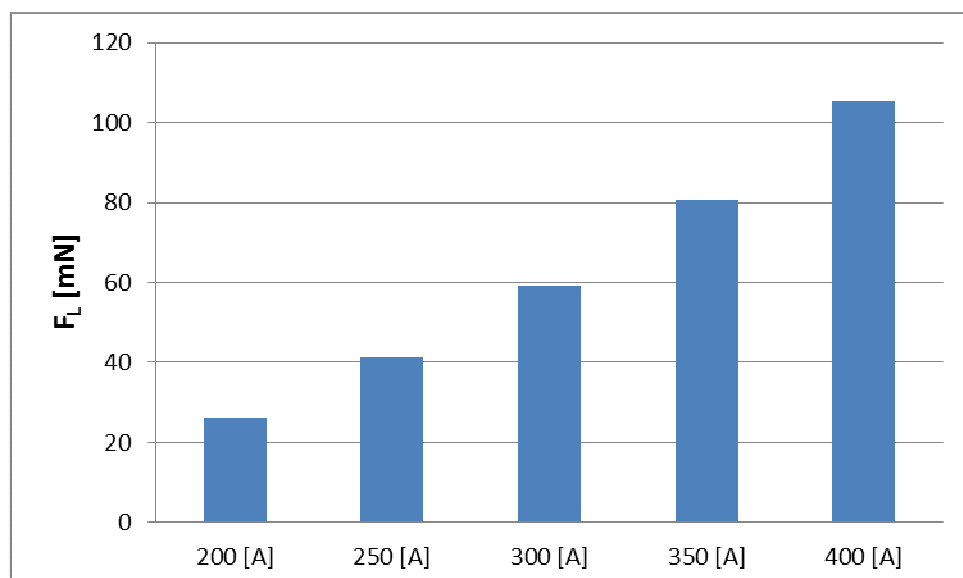
V této kapitole je zkoumán vliv rozdílného proudu na jeden typ přípojnic ve vodorovném uspořádání při stejné vzdálenosti 40 mm bližších hran vnějších přípojnic k bližším hranám prostřední přípojnice. Použité proudy byly 200 A, 250 A, 300 A, 350 A a 400 A.

Z grafu 4.3 je patrné, že činné ztráty se vzrůstajícím proudem také rostou, což odpovídá teoretickým předpokladům. Stejně tak Lorentzovy síly jsou tím větší, čím větší proud protéká danými přípojnicemi, což můžeme pozorovat na grafu 4.4.

Graf 4.3 Závislost činných ztrát na 1 m délky na vzrůstajícím proudu



Graf 4.4 Závislost Lorentzových sil na vzrůstajícím proudu

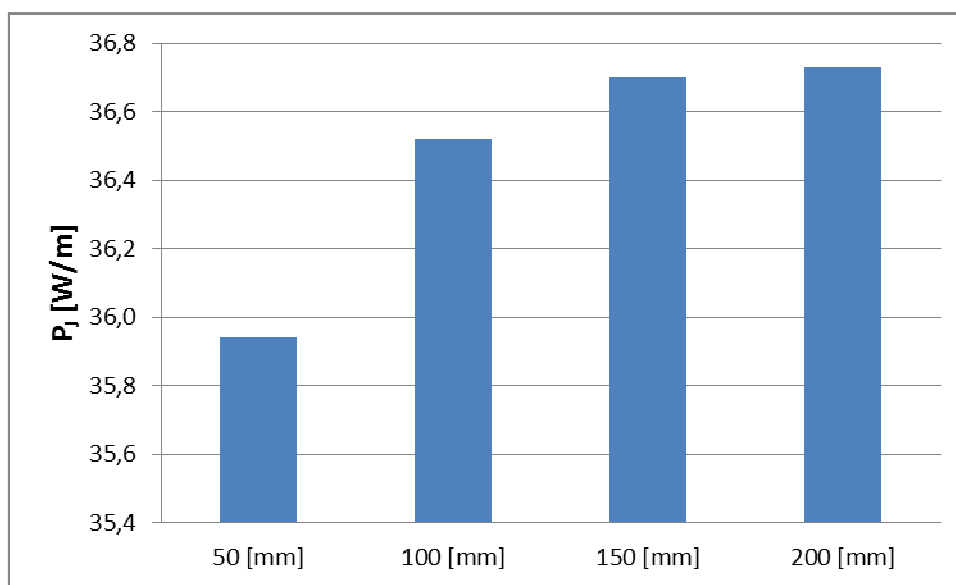


### 4.3 Al přípojnice, 100x10 mm, uspořádání vodorovné, proud 1580 A, různá vzdálenost

Hliníkové přípojnice ve vodorovném uspořádání pod proudem 1580 A jsou od sebe různě vzdáleny. Vzdálenosti bližších hran vnějších přípojníc k bližším hranám prostřední přípojnice jsou postupně 50 mm, 100 mm, 150 mm a 200 mm.

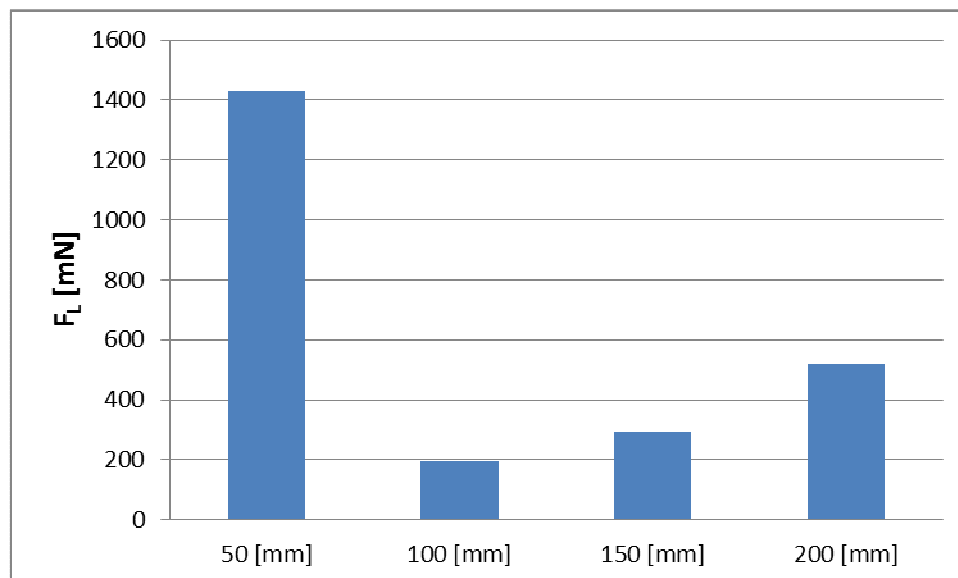
Výsledky činných ztrát a Lorentzových sil jsou prezentovány v *grafu 4.5* respektive *grafu 4.6*. Činné ztráty se vrůstající vzdáleností hran přípojníc stoupají, největší nárůst je zaznamenán mezi vzdálenostmi 50 mm a 100 mm, dále již jsou činné ztráty takřka shodné. Lorentzovy síly jsou největší ve vzdálenosti hran přípojníc 50 mm, dále zaznamenáváme velký pokles při vzdálenosti 100 mm a poté pomalý nárůst při vzdálenostech 150 mm a 200 mm.

Graf 4.5 Závislost činných ztrát na 1 m délky na vzrůstající vzdálenosti





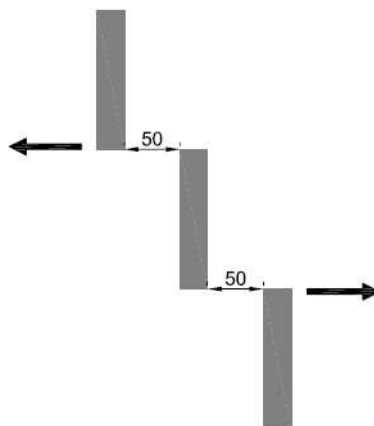
Graf 4.6 Závislost Lorentzových sil na vzrůstající vzdálenosti



#### 4.4 Al přípojnice, 100x10 mm, uspořádání šikmé, proud 1580 A, různá vzdálenost

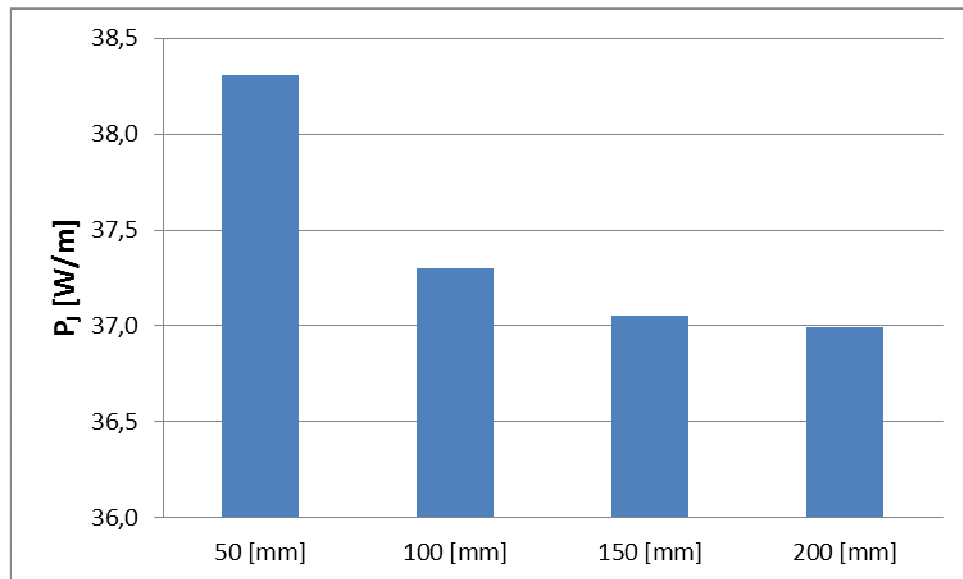
Hliníkové přípojnice v šikmém uspořádání pod proudem 1580 A jsou od sebe různě vzdáleny. Vzdálenosti nejbližších rohů vnějších přípojnic k nejbližším rohům prostřední přípojnice jsou postupně 50 mm, 100 mm, 150 mm a 200 mm (viz obr 4.3).

V grafu 4.7 respektive v grafu 4.8 jsou prezentovány výsledky činných ztrát respektive Lorentzových sil. V tomto případě činné ztráty se vzrůstající vzdáleností klesají. Největší rozdíl je vidět mezi vzdálenostmi 50 mm a 100 mm. Lorentzovy síly také klesají se vzrůstající vzdáleností. Velmi velké Lorentzovy síly (oproti ostatním vzdálenostem) působí při vzdálenosti 50 mm.

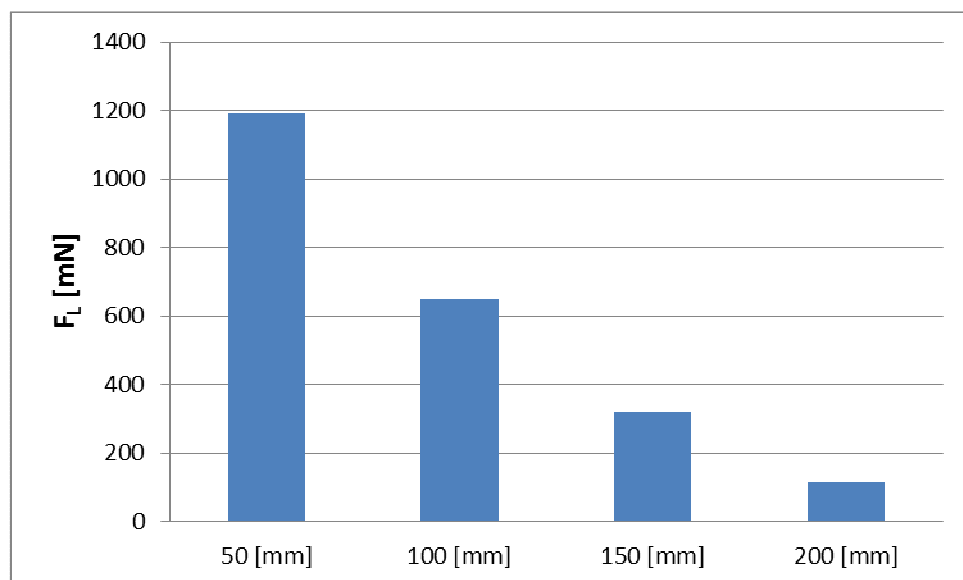


Obr. 4.3 Zvětšující se vzdálenost mezi hranami přípojnic v šikmém uspořádání

Graf 4.7 Závislost činných ztrát na 1 m délky na vzrůstající vzdálenosti



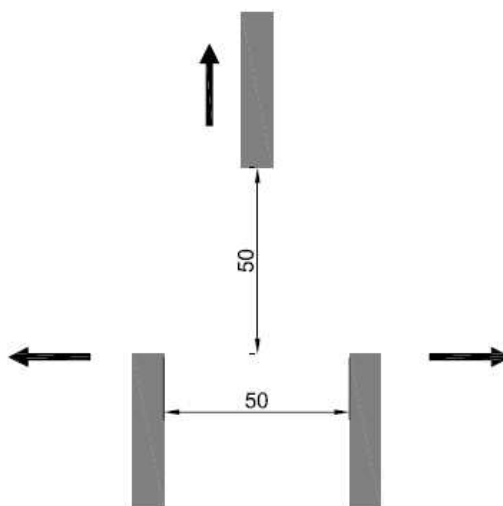
Graf 4.8 Závislost Lorentzových sil na vzrůstající vzdálenosti



#### 4.5 Al přípojnice, 100x10 mm, uspořádání trojúhelník\_a, proud 1580 A, různá vzdálenost

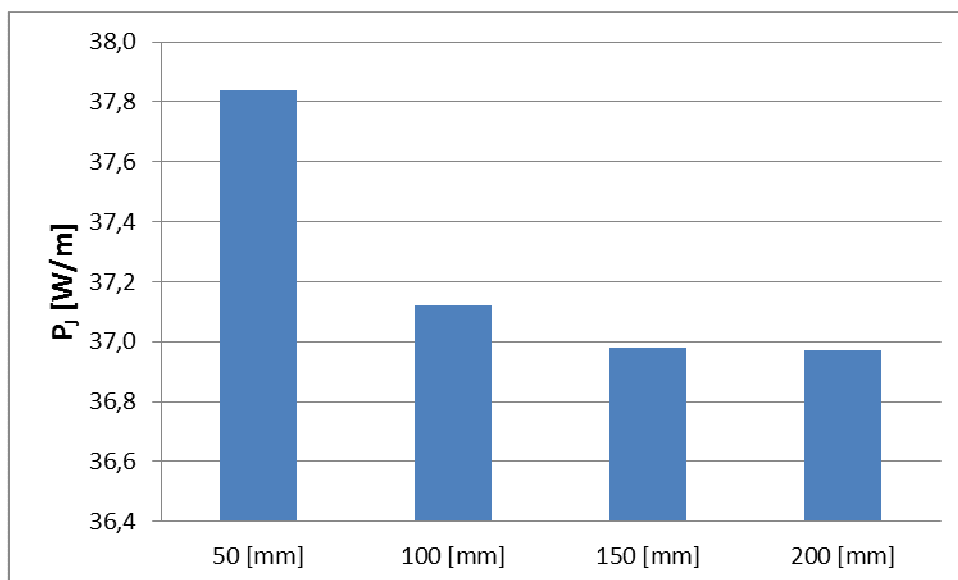
Hliníkové přípojnice v uspořádání do trojúhelníka (pracovně nazvaném jako trojúhelník\_a) pod proudem 1580 A jsou od sebe různě vzdáleny. Vzdálenosti jsou v *grafech 4.9 a 4.10* pojmenovány jako 50 mm, 100 mm, 150 mm a 200 mm, což jsou vzdálenosti bližších hran dvou bočních přípojnic a také vzdálenosti spodní hrany horní přípojnice se spojnicí, kterou pomyslně tvoří horní hrany bočních přípojnic (*viz obr. 4.4*).

Graf 4.9 zobrazuje závislost činných ztrát na vzrůstající vzdálenosti. V tomto případě činné ztráty se vzrůstající vzdáleností klesají, ale poklesy jsou malé, ve vzdálenostech 150 mm a 200 mm jsou činné ztráty totožné. Graf 4.10 zobrazuje závislost Lorentzových sil na vzdálenosti. Ve vzdálenosti 50 mm jsou největší, poté následuje strmý pokles Lorentzových sil s rostoucí vzdáleností.

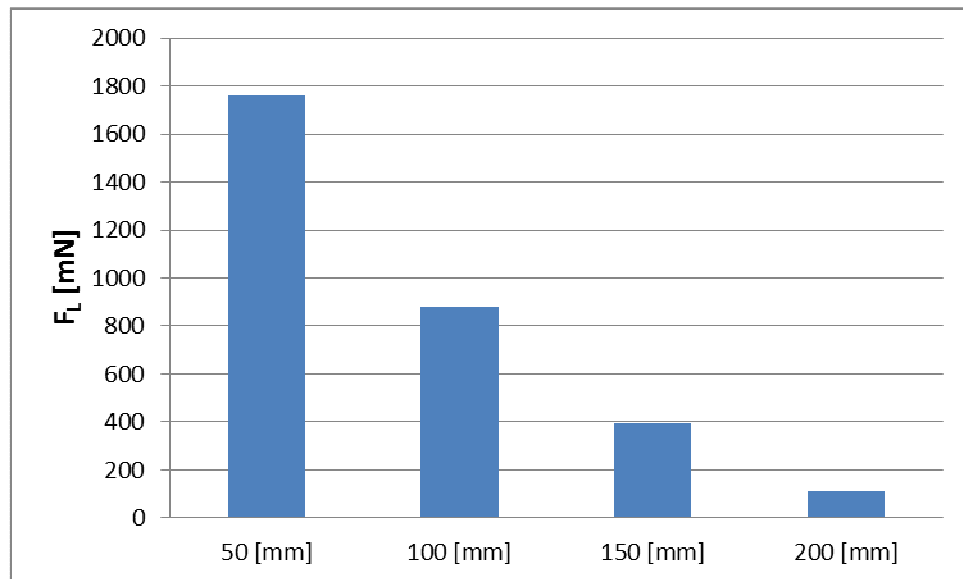


Obr. 4.4 Zvětšující se vzdálenost mezi hranami přípojnic v uspořádání trojúhelník\_a

Graf 4.9 Závislost činných ztrát na 1 m délky na vzrůstající vzdálenosti



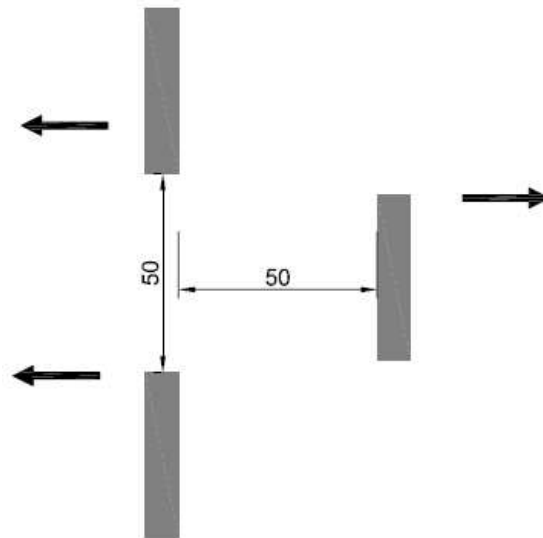
Graf 4.10 Závislost Lorentzových sil na vzrůstající vzdálenosti



#### 4.6 Al přípojnice, 100x10 mm, uspořádání trojúhelník\_b, proud 1580 A, různá vzdálenost

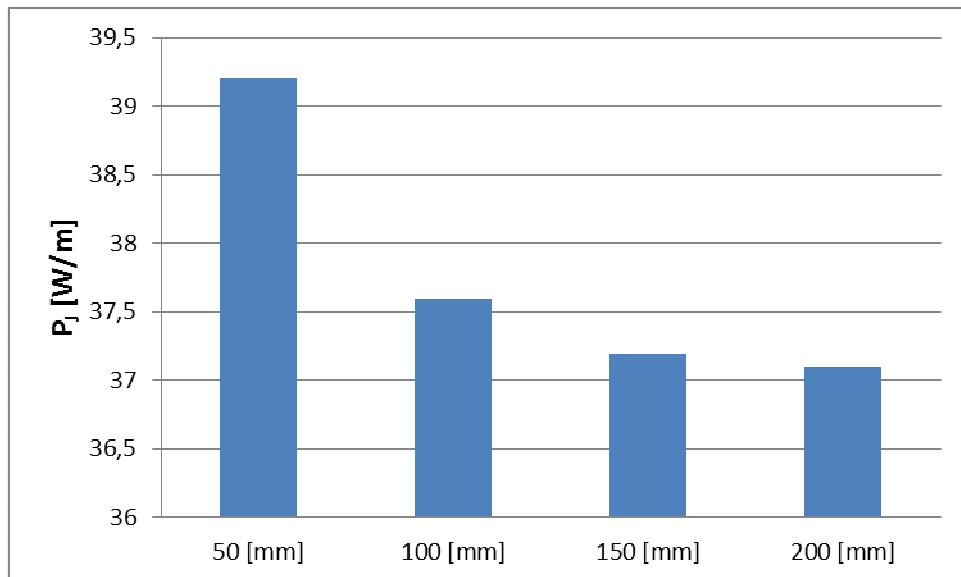
Hliníkové přípojnice v uspořádání do trojúhelníka (pracovně nazvaném jako trojúhelník\_b) pod proudem 1580 A jsou od sebe různě vzdáleny. Vzdálenosti jsou v *grafech 4.11 a 4.12* pojmenovány jako 50 mm, 100 mm, 150 mm a 200 mm, což jsou vzdálenosti bližších hran dvou nad sebou položených přípojnic a také vzdálenosti bližší hrany krajní přípojnice se spojnicí, kterou pomyslně tvoří krajní bližší hrany nad sebou položených přípojnic (*viz obr. 4.5*).

Závislost činných ztrát na vrůstající vzdálenosti je prezentována v *grafu 4.11* a závislost Lorentzových sil je prezentována v *grafu 4.12*. V tomto případě činné ztráty se vzrůstající vzdáleností klesají, největší pokles je mezi vzdálenostmi 50 mm a 100 mm, ale jinak jsou poklesy malé, ve vzdálenostech 150 mm a 200 mm jsou činné ztráty takřka totožné. Lorentzovy síly zaznamenávají prudký pokles s rostoucí vzdáleností.

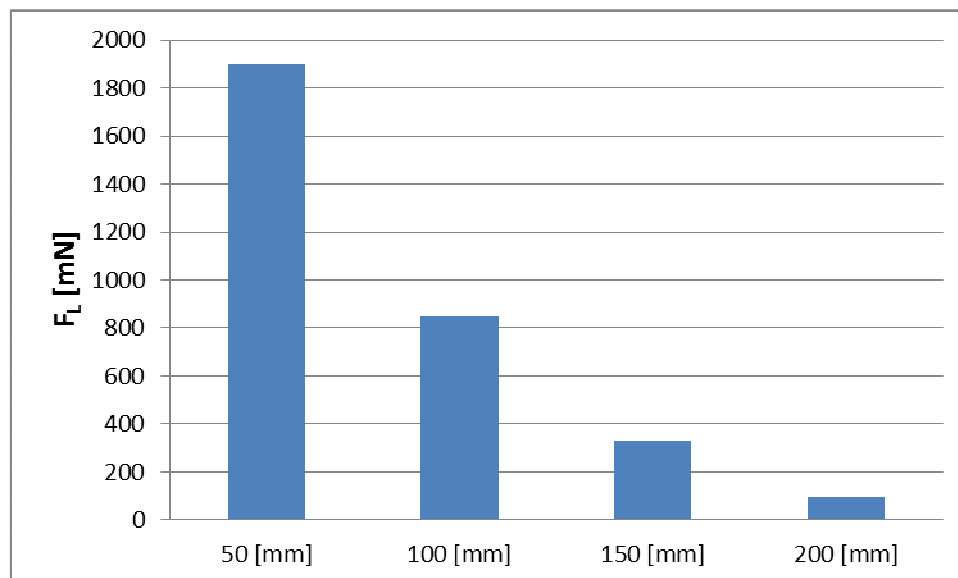


Obr. 4.5 Zvětšující se vzdálenost mezi hranami přípojnic v uspořádání trojúhelník\_b

Graf 4.11 Závislost činných ztrát na 1 m délky na vzrůstající vzdálenosti



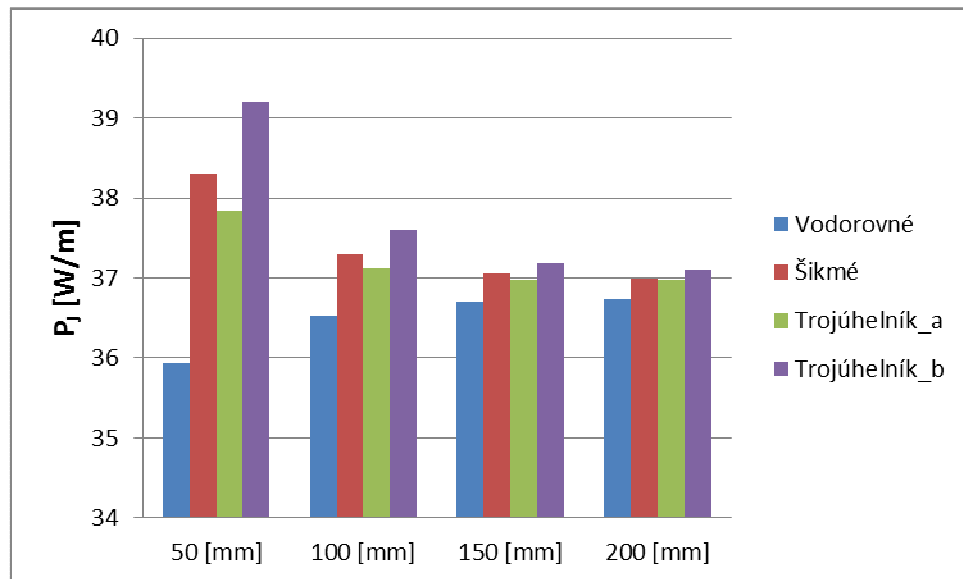
Graf 4.12 Závislost Lorentzových sil na vzrůstající vzdálenosti



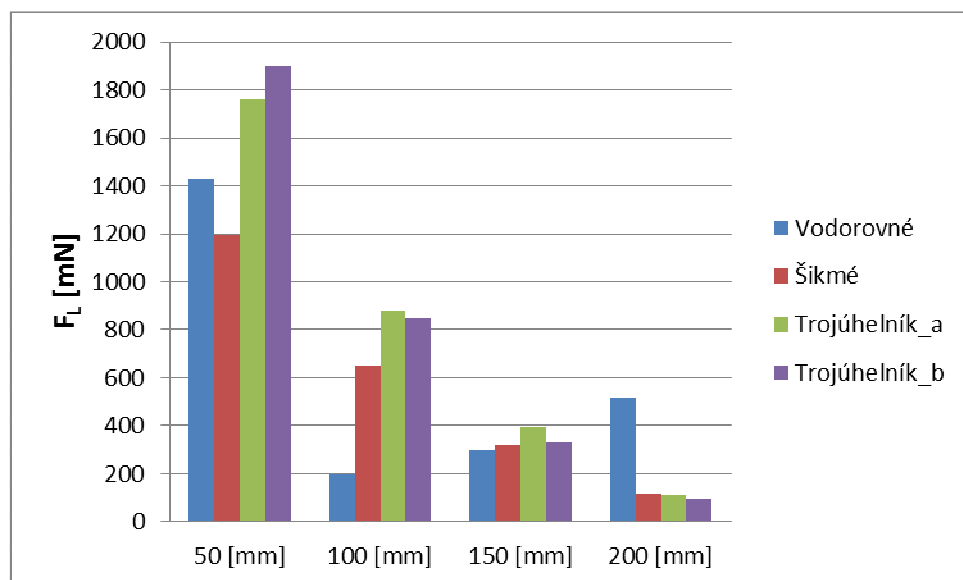
#### 4.7 Al přípojnice, 100x10 mm, proud 1580 A, různá uspořádání, různá vzdálenost

V této kapitole jsou shrnuty výsledky hliníkových přípojníc z předešlých kapitol. Tedy hliníkových přípojníc v uspořádání vodorovném, šikmém, do trojúhelníku\_a a do trojúhelníku\_b a ve vzdálenostech 50 mm, 100 mm, 150 mm a 200 mm. Data jsou zde zahrnuta do grafu 4.13 pro závislost činných ztrát na vzdálenosti a na uspořádání a do grafu 4.14 pro závislost Lorentzových sil na vzdálenosti a na uspořádání. Nejmenší činné ztráty pro všechny vzdálenosti vykazuje vodorovné uspořádání přípojníc, nejhorším se v tomto ohledu jeví uspořádání do trojúhelníku\_b.

Graf 4.13 Závislost činných ztrát na 1 m délky na vzrůstající vzdálenosti a na různém uspořádání



Graf 4.14 Závislost Lorentzových sil na vzrůstající vzdálenosti a na různém uspořádání

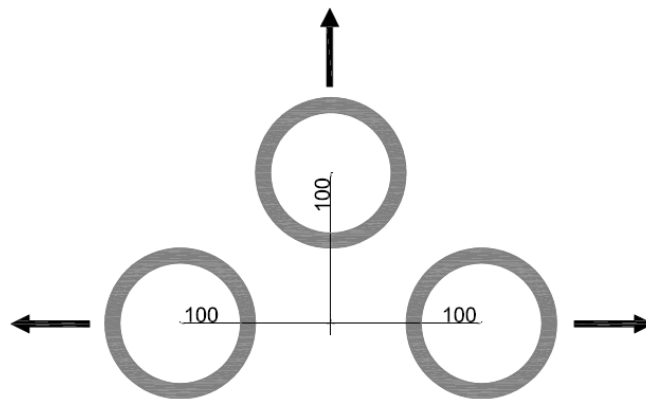


#### 4.8 AI přípojnice, trubkové, vnější průměr 100 mm, tloušťka stěny 10 mm, proud 3140 A, různá uspořádání

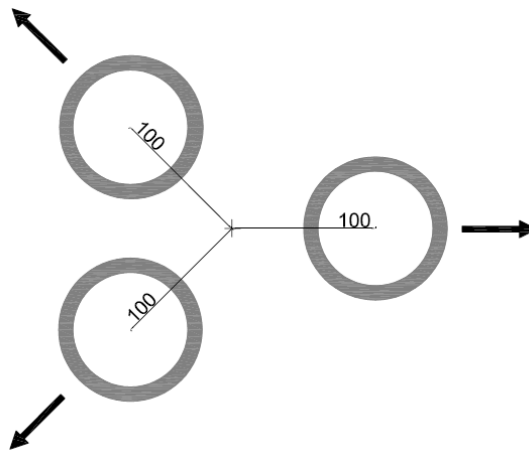
Trubkové hliníkové přípojnice napájeny proudem 3140 A s vnějším průměrem 100 mm a tloušťkou stěny 10 mm jsou zkoumány ve dvou různých trojúhelníkových uspořádáních. Uspořádání jsou pracovně nazvána jako trojúhelník\_a a jako trojúhelník\_b. V uspořádáních trojúhelník\_a se mění vzdálenost od pomyslného středu, který by tvořila spojnice středů dvou krajních přípojníc a kolmice vedená ze středu horní

přípojnice (viz obr. 4.6). Zkoumané vzdálenosti jsou 100 mm, 150 mm a 200 mm. V uspořádání trojúhelník\_b se mění vzdálenost od pomyslného středu tak, aby středy jednotlivých přípojníc byly vždy ve stejné vzdálenosti od středu pomyslného (viz obr. 4.7). Zkoumané vzdálenosti jsou 100 mm, 150 mm a 200 mm.

Z grafu 4.15 můžeme pozorovat, že rozdíly činných ztrát v uspořádání do trojúhelníku\_a a v uspořádání do trojúhelníku\_b jsou velmi nepatrné, ale přesto lepší vlastnosti, které se týkají činných ztrát, má uspořádání do trojúhelníka\_a. Také Lorentzovy síly jsou si velmi podobné v obou uspořádáních.



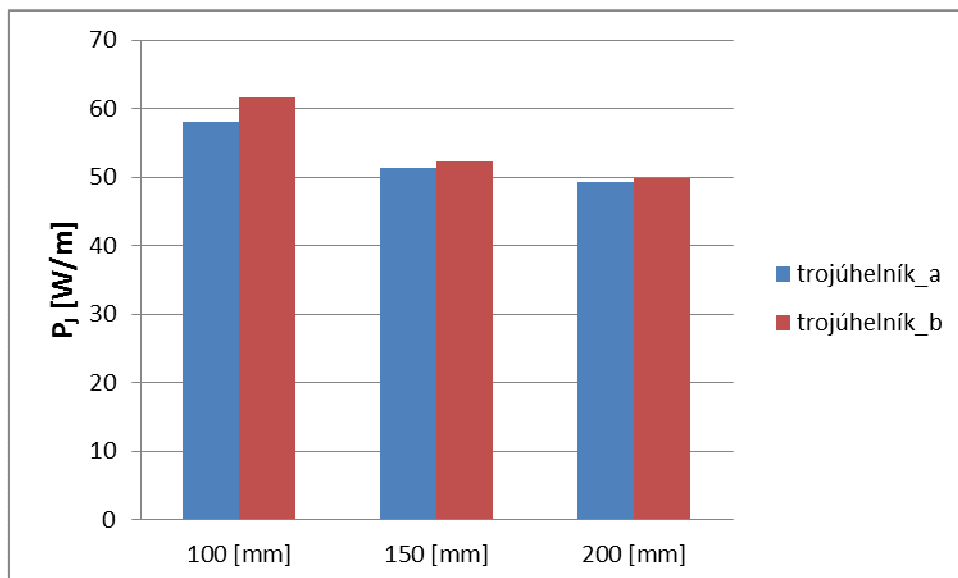
Obr. 4.6 Zvětšující se vzdálenost mezi středy přípojníc v uspořádání trojúhelník\_a



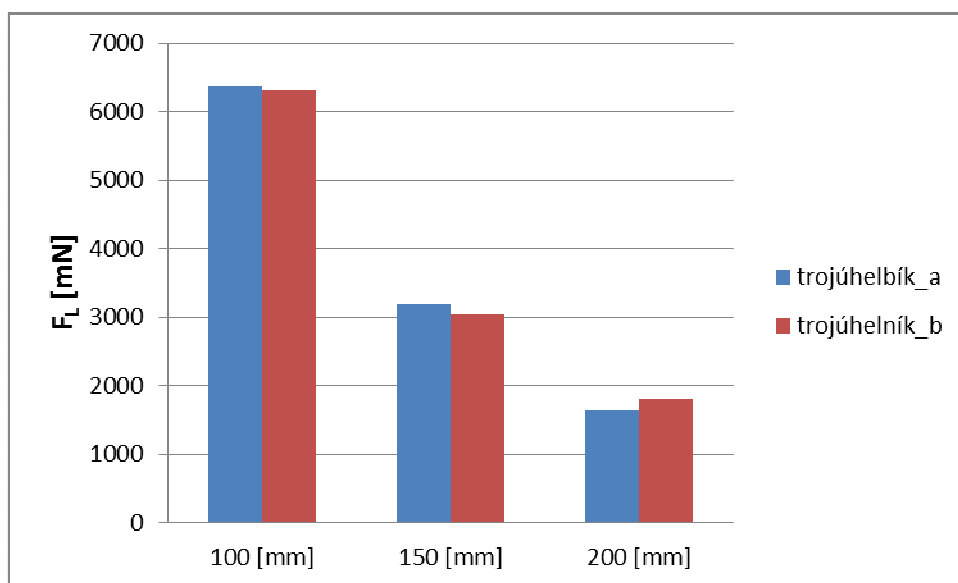
Obr. 4.7 Zvětšující se vzdálenost mezi středy přípojníc v uspořádání trojúhelník\_b



Graf 4.15 Závislost činných ztrát na 1 m délky na vzrůstající vzdálenosti a na různém uspořádání



Graf 4.16 Závislost Lorentzových sil na vzrůstající vzdálenosti a na různém uspořádání



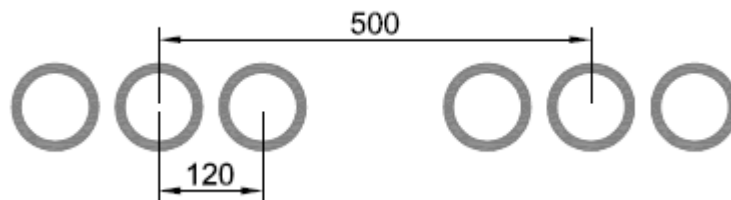
#### 4.9 Al přípojnice, trubkové, vnější průměr 100 mm, tloušťka stěny 10 mm, proud 3140 A, různá fázová zapojení

Tentokrát jsou hliníkové trubkové přípojnice ve dvou skupinách po třech přípojnicích ve vodorovném uspořádání. Středů krajních přípojníc ve skupině jsou od středu prostřední vzdáleny 120 mm. Středů skupin přípojníc jsou od sebe vzdáleny 500 mm (viz obr. 4.8).

První skupina bude mít vždy rozložení fází  $U_1V_1W_1$ , ale ve druhé se bude toto měnit (viz tab. 4.1). Výsledky činných ztrát a Lorentzových sil budou zjišťovány pro

fáze  $U_1$  a  $U_2$ .

Graf 4.17 zobrazuje závislost činných ztrát na různých fázových zapojeních. Podle předpokladu se jeví jako nejvýhodnější fázové zapojení  $U_1V_1W_1 - U_2V_2W_2$ . Nejméně výhodnými zapojeními z hlediska činných ztrát se zdají být zapojení  $U_1V_1W_1 - V_2U_2W_2$  a  $U_1V_1W_1 - W_2U_2V_2$ , čili zapojení s fází  $U_2$  uprostřed. Zajímavostí je potvrzení symetrie při zapojení  $U_1V_1W_1 - W_2V_2U_2$ , kterou dokazují stejné činné ztráty pro fázi  $U_1$  a pro fázi  $U_2$ . Graf 4.18 zobrazuje závislost Lorentzových sil na různých fázových zapojeních. Zde můžeme pozorovat nejmenší Lorentzovy síly při zapojeních  $U_1V_1W_1 - V_2U_2W_2$  a  $U_1V_1W_1 - W_2U_2V_2$ , ale nesmíme zapomínat na výsledky činných ztrát pro tato zapojení. I Lorentzovy síly při zapojení  $U_1V_1W_1 - W_2V_2U_2$  potvrzují symetričnost zapojení.



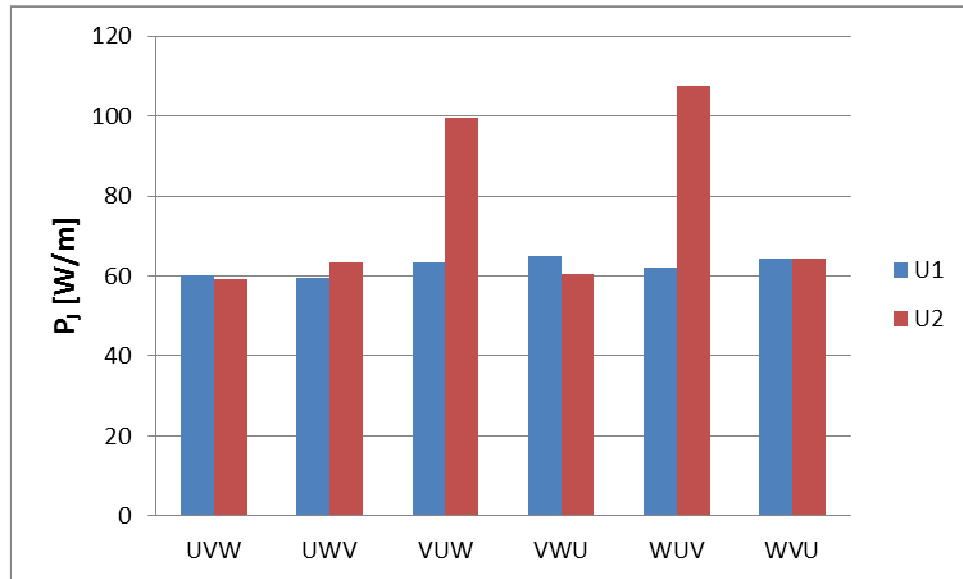
Obr. 4.8 Vzdálenosti středů jednotlivých přípojníc

Tab. 4.1 Kombinace možných zapojení

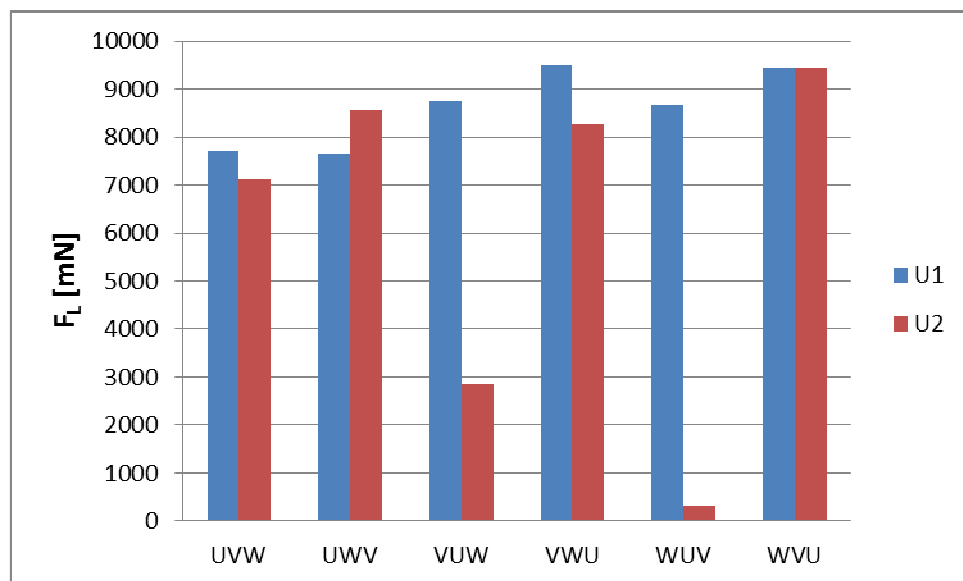
| Skupina 1   | Skupina 2   |
|-------------|-------------|
| $U_1V_1W_1$ | $U_2V_2W_2$ |
| $U_1V_1W_1$ | $U_2W_2V_2$ |
| $U_1V_1W_1$ | $V_2U_2W_2$ |
| $U_1V_1W_1$ | $V_2W_2U_2$ |
| $U_1V_1W_1$ | $W_2U_2V_2$ |
| $U_1V_1W_1$ | $W_2V_2U_2$ |

V popisech následujících grafů na vodorovné ose je skupina fází 2 (viz tab. 4.1).

Graf 4.17 Závislost činných ztrát na 1 m délky na různém fázovém zapojení



Graf 4.18 Závislost Lorentzových sil na různém fázovém zapojení

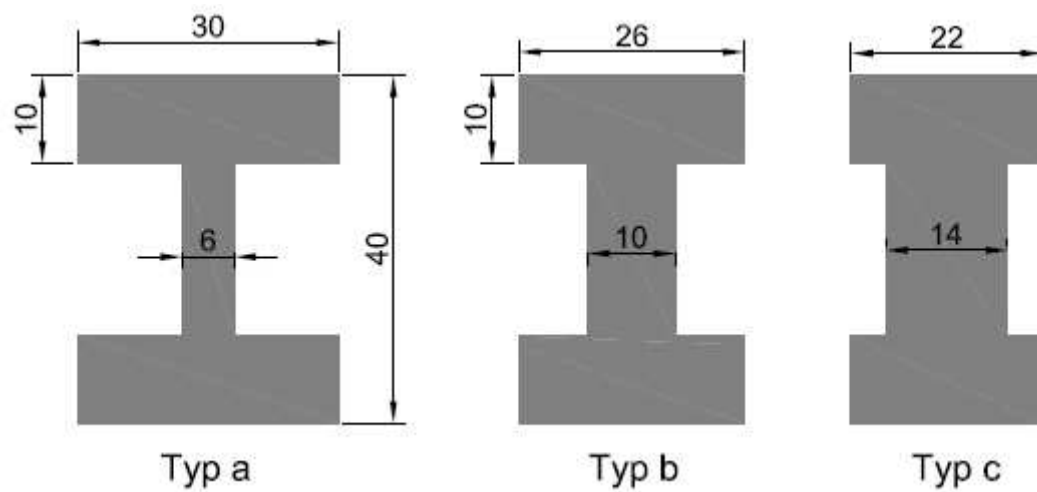


#### 4.10 Cu přípojnice, profil H, průřez 720 mm<sup>2</sup>, vodorovné uspořádání, vzdálenost středů 50, proud 1600 A

Zde jsou tři druhy profilových přípojníc ve tvaru H ve vodorovném uspořádání se stejným průřezem 720 mm<sup>2</sup> ale s jinými rozměry stran (viz obr 4.9). Jsou nazvány jako typ\_a, typ\_b, typ\_c. Vzdálenost středů krajních přípojníc od středu prostřední přípojnice je 50 mm.

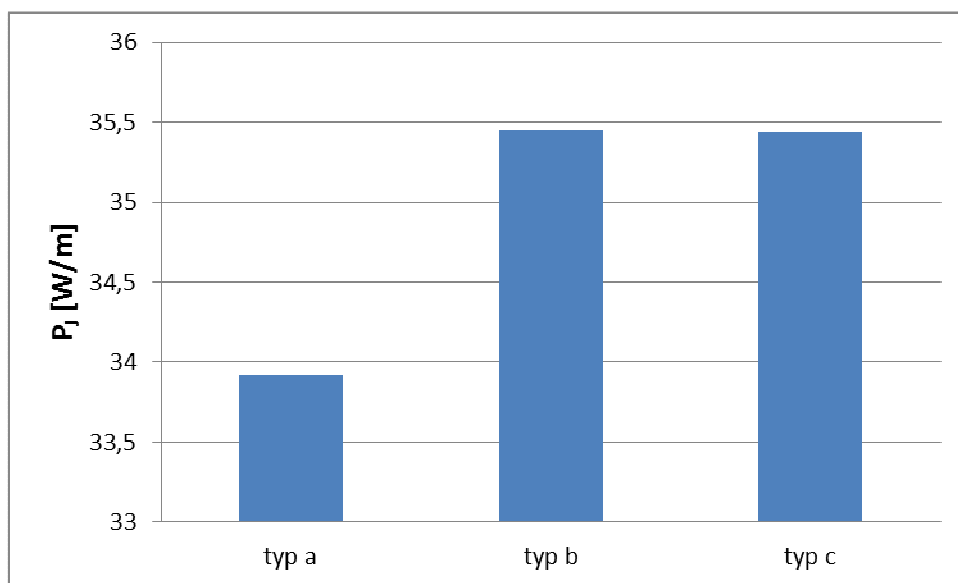
Graf 4.19 zobrazuje závislost činných ztrát na různém provedení přípojníc, které jsou nejmenší při použití přípojníc typu\_a. Graf 4.20 zobrazuje závislost Lorentzových sil na

různém provedení přípojnic, které jsou rovněž nejmenší při použití přípojnic typu\_a.

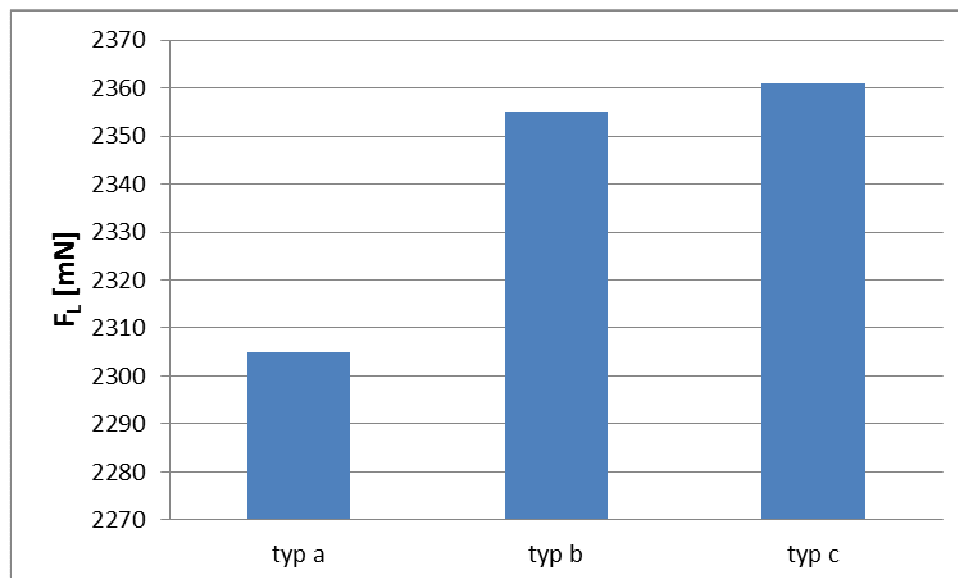


Obr. 4.9 Typy profilových H přípojnic

Graf 4.19 Závislost činných ztrát na 1 m délky na různém typovém provedení přípojnic



Graf 4.20 Závislost Lorentzových sil na různém typovém provedení přípojníc

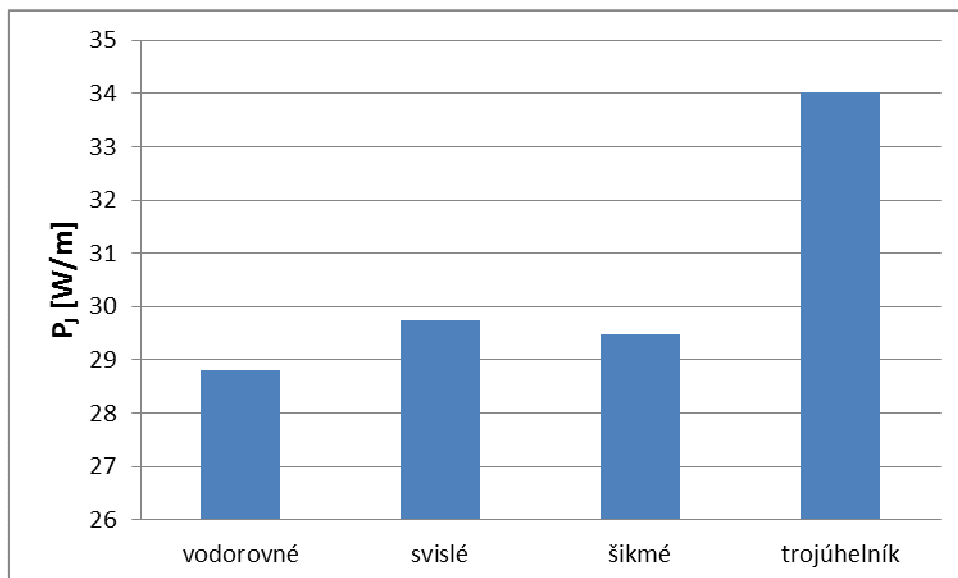


#### 4.11 Cu přípojnice, profil T, průřez 500 mm<sup>2</sup>, vzdálenost středů 50mm, proud 1250 A, různá uspořádání

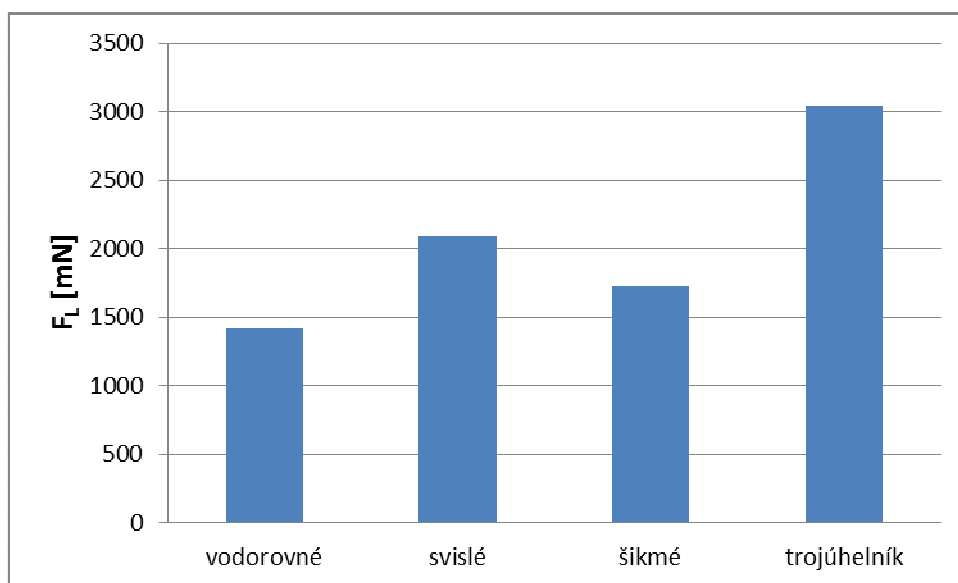
Jeden druh profilových přípojníc ve tvaru T, s průřezem 500 mm<sup>2</sup>, vzdáleností středů 50 mm, absolutní hodnotou proudu 1250 A je zkoumán ve vodorovném, svislém, šikmém a trojúhelníkovém uspořádání.

Graf 4.21 ukazuje závislost činných ztráty na různých uspořádáních přípojníc, přičemž nejmenší činné ztráty vykazuje vodorovné uspořádání přípojníc a největší činné ztráty jsou v trojúhelníkovém uspořádání. Graf 4.22 zobrazuje závislost Lorentzových sil na různých uspořádáních přípojníc. I zde jsou nejmenší Lorentzovy síly ve vodorovném uspořádání a největší Lorentzovy síly v uspořádání do trojúhelníku.

Graf 4.21 Závislost činných ztrát na 1 m délky na různém uspořádání přípojníc



Graf 4.22 Závislost Lorentzových sil na různém uspořádání přípojníc



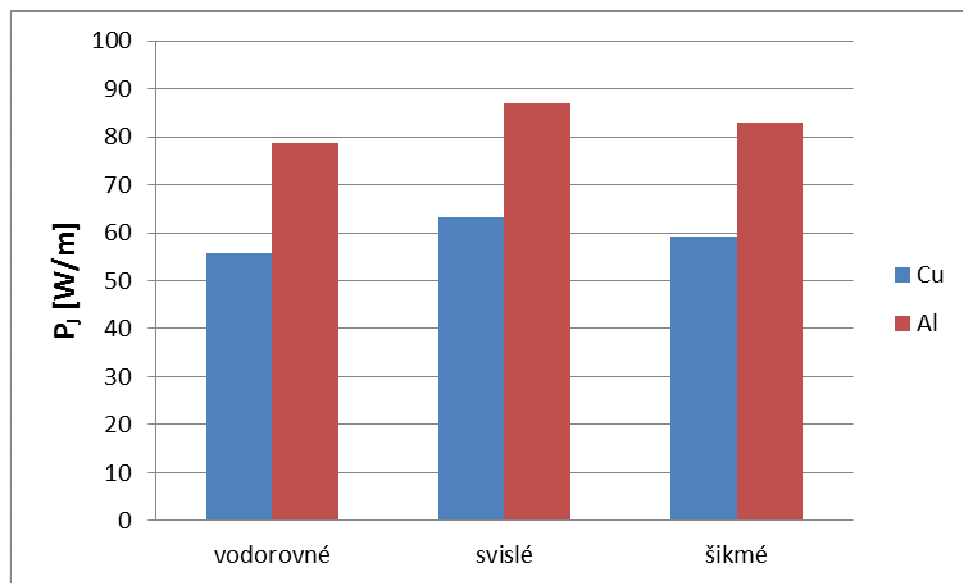
#### 4.12 Cu, Al přípojnice, profil HH, průřez 1140 mm<sup>2</sup>, vzdálenost hran 40 mm, proud 2500 A, různá uspořádání

Profilové přípojnice ve tvaru HH s průřezem 1140 mm<sup>2</sup> a vzdáleností 40 mm bližších hran vnějších přípojníc k bližším hranám prostřední přípojnice jsou v uspořádání vodorovném, svislém a šikmém. Pro každé uspořádání jsou zjištěny výsledky při použití měděných přípojníc a při použití hliníkových přípojníc.

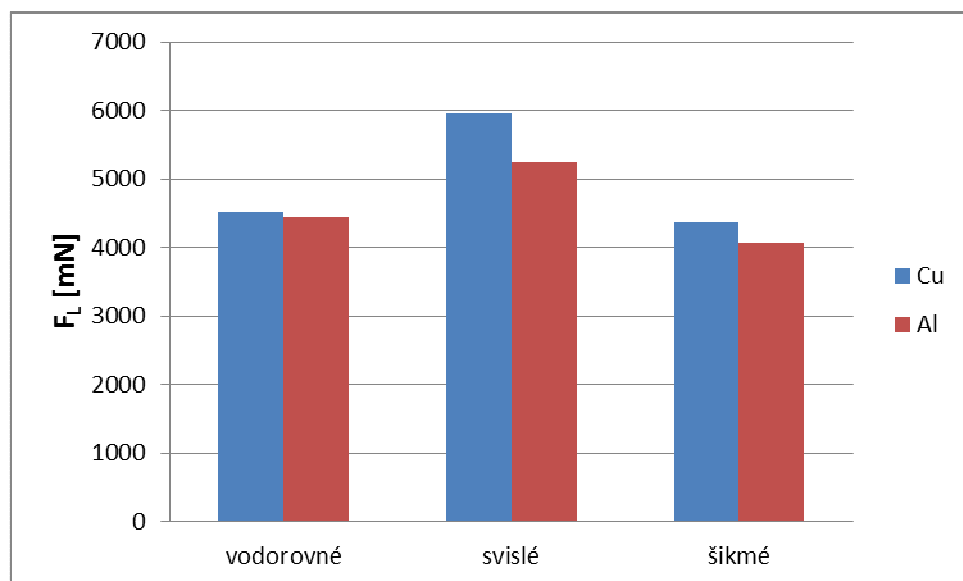
Graf 4.23 zobrazuje závislost činných ztrát na různém uspořádání a různém materiálu přípojnic. Ve všech třech případech jsou výrazně větší činné ztráty při použití hliníkových přípojnic, což poukazuje na skutečnost, že z hlediska činných ztrát je výhodnější používat měděné materiály. Graf 4.24 zobrazuje závislost Lorentzových sil na různém uspořádání a různém materiálu přípojnic. Lorentzovy síly jsou menší v hliníkových přípojnicích pro všechna uspořádání.

Obrázky zobrazující rozložení magnetické indukce a proudové hustoty a jejich hodnoty lze nalézt pro tento a předcházející příklady v přílohách.

Graf 4.23 Závislost činných ztrát na 1 m délky na různém uspořádání a materiálu přípojnic



Graf 4.24 Závislost Lorentzových sil na různém uspořádání a materiálu přípojnic



## Závěr

Cílem této práce bylo prozkoumat elektromagnetické pole elektrických přípojníc. Stavebním kamenem byla znalost teorie elektromagnetického pole, která byla rozebírána v první kapitole. Dalším bodem bylo seznámení se samotnými přípojnícemi, s jejich základními vlastnostmi a způsobech používání. Dále se čtenář seznámil s výpočetním programem Agros2D, ve kterém bylo elektromagnetické pole modelováno.

Tvarů a uspořádání přípojníc lze namodelovat nepřeberné množství, do práce tedy byly zahrnuty pouze typové příklady běžných tvarů, uspořádání a používaných materiálů. Ze získaných výsledků činných ztrát vyplývá, že se jeví jako výhodnější používání měděných materiálů, ale je třeba také zvážit ekonomické hledisko. Výsledky působení Lorentzových sil na přípojnice naopak ukazují, že se jeví jako efektivnější hliníkové materiály. Při zkoumání vodorovného uspořádání přípojníc vyplynulo, že je vhodné umísťovat přípojnice tak, aby jejich delší hrany byly rovnoběžné, protože v opačném případě byly velké činné ztráty. Naopak Lorentzovy síly byly při umístění přípojníc naležato menší. Při různých uspořádáních stejného typu hliníkových obdélníkových přípojníc se nejlépe jevílo vodorovné uspořádání. Zajímavostí byly větší Lorentzovy síly při jednom typu trojúhelníkové uspořádání. Předpoklady známé z běžné praxe byly potvrzeny při zkoumání různě zpřeházených fázových zapojení, kde se jednoznačně prokázala vhodnost  $U_1V_1W_1 - U_2V_2W_2$  zapojení. K rozdílným činným ztrátám a Lorentzových sil dochází i v případě použití stejného průřezu a stejné vzdálenosti profilových přípojníc změnou poměrů jednotlivých hran. Stejně jako u obdélníkových přípojníc, i při použití profilových přípojníc typu T, se zdálo nejvýhodnějším vodorovné uspořádání. A při použití profilových měděných i hliníkových přípojníc typu HH, vykazovaly měděné materiály opět lepší vlastnosti.



## Seznam literatury a informačních zdrojů

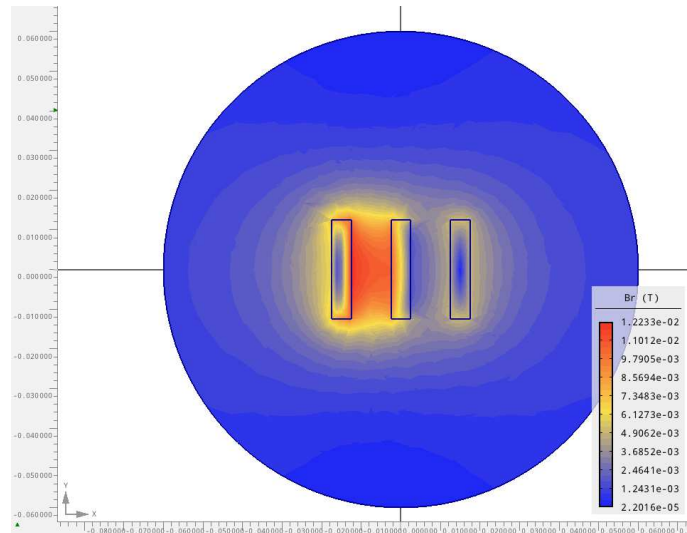
- [1] MAYER, Daniel a Bohuš ULRYCH. *Základy numerického řešení elektrických a magnetických polí*. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988. ISBN 0452888.
- [2] MAYER, Daniel. *Teorie elektromagnetického pole*. 3. vyd.-přepřac. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2001. ISBN 80-708-2826-9.
- [3] Elektromagnetická indukce. *Radek.jandora.web.cz* [online]. Bučovice: Radek Jandora, 2000 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://radek.jandora.web.cz/f16.htm>
- [4] Elektrický proud. *Physics.mff.cuni.cz* [online]. Praha: Univerzita Karlova, 2014 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: [http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz\\_fyziky\\_pro\\_DS/display.php/elmag/3\\_1](http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/elmag/3_1)
- [5] Maxwellovy rovnice. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Maxwellovy\\_rovnice](https://cs.wikipedia.org/wiki/Maxwellovy_rovnice)
- [6] MAYER, Daniel a POLÁK, Josef. *Metody řešení elektrických a magnetických polí*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1983. 456 s.
- [7] DOMEŠ, František. *Analýza vlastností profilových vodičů pro přípojnice rozvodných zařízení*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.
- [8] ING. SCHEJBAL, Martin a Ing. Miroslav TRUNKÁT. Přípojnice: Modernější rozvod elektrické energie nízkého napětí. *Elektro: Odborný časopis pro elektrotechniku*. 2007, **07/2007**(7).
- [9] Přípojnicové systémy, které lze použít prakticky v každé aplikaci. In: <Http://www.eaton.cz/Czech/index.htm> [online]. CZ, 2014 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.eatonelektrotechnika.cz/cz/download/caf7c04e-f0a0-0cd4-99dd-97cc2c10761a>
- [10] ING. SCHEJBAL, Martin. Přípojnicové systémy společnosti Siemens aneb od pantáty vedou šíny. *Elektro: Odborný časopis pro elektrotechniku*. 2008, **11/2008**(11), 28-29.
- [11] Elektrické stanice. *Powerwiki.cz: Energetika* [online]. Praha: HEAT, c1999-2008 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: [https://www.powerwiki.cz/attach/EN2/EN2\\_pr11\\_rozvodny.pdf](https://www.powerwiki.cz/attach/EN2/EN2_pr11_rozvodny.pdf)
- [12] *Leonardo energy: Connecting Energy Technologies, Policies and Markets* [online]. Nizozemsko: Leonardo energy [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.leonardo-energy.org/>

- [13] *McWade Productions* [online]. Cape Town: McWade Productions (Pty) Ltd, c2016 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://mcwadeproductions.co.za/>
- [14] *GHV Trading: Měřicí technika a komponenty po rozvaděče* [online]. Brno: GHV Trading, spol. s r.o., c1991-2016 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.ghvtrading.cz/>
- [15] *EGE: Spolehlivý partner pro energetiku* [online]. České Budějovice: EGE, spol. s r.o., c2013 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.ege.cz/>
- [16] KARBAN, Pavel. Agros2D: Aplikace pro řešení fyzikálních polí. In: *AbcLinuxu.xz: Linux na stříbrném podnose* [online]. Praha: Nitemedia s.r.o., c1999-2015 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.abclinuxu.cz/clanky/agros2d-aplikace-pro-reseni-fyzikalnich-poli>

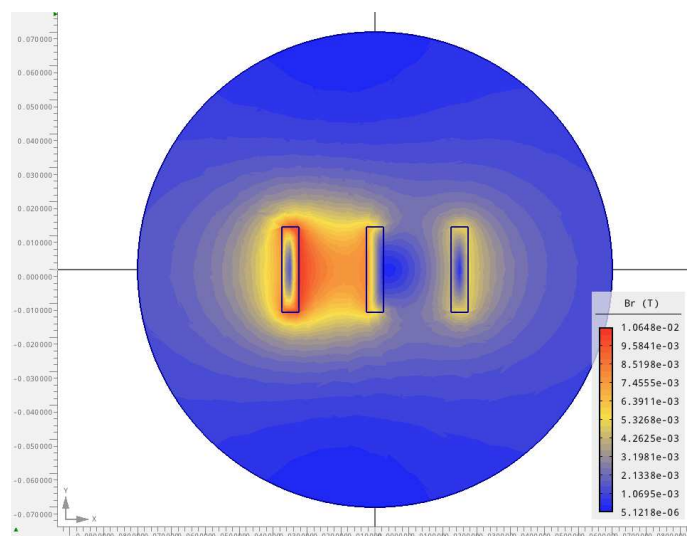
## Přílohy

### Příloha A

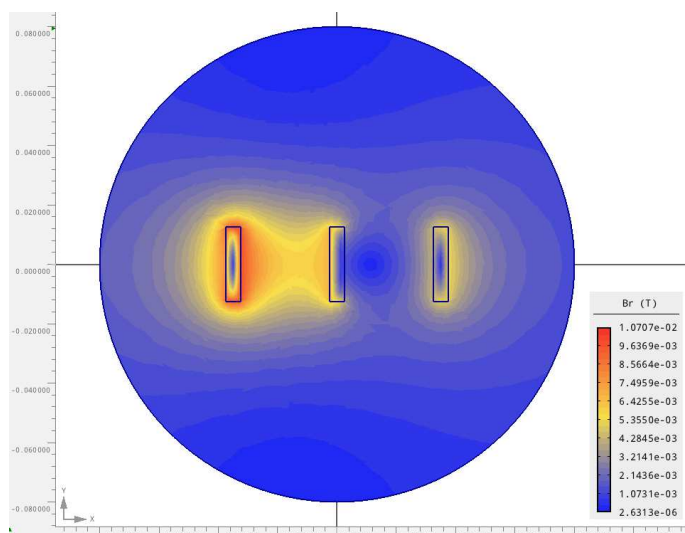
Příloha k přípojnicím z kapitoly 4.1



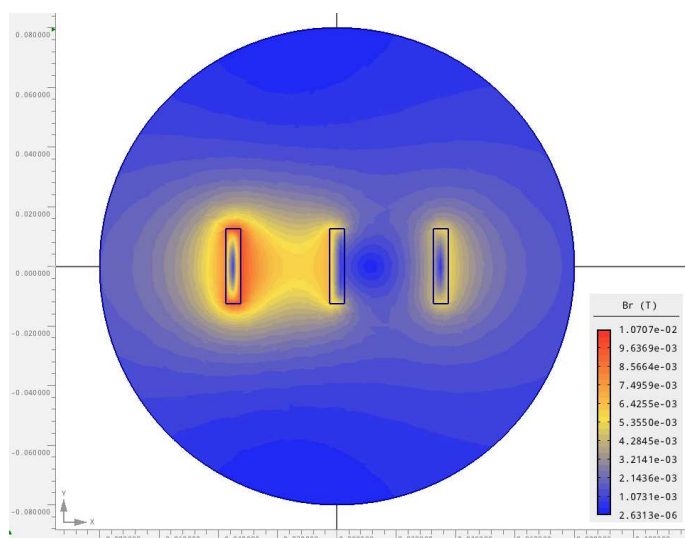
Obr. A1 Rozložení magnetické indukce přípojnic typu\_a (vzdálenost 10 mm)



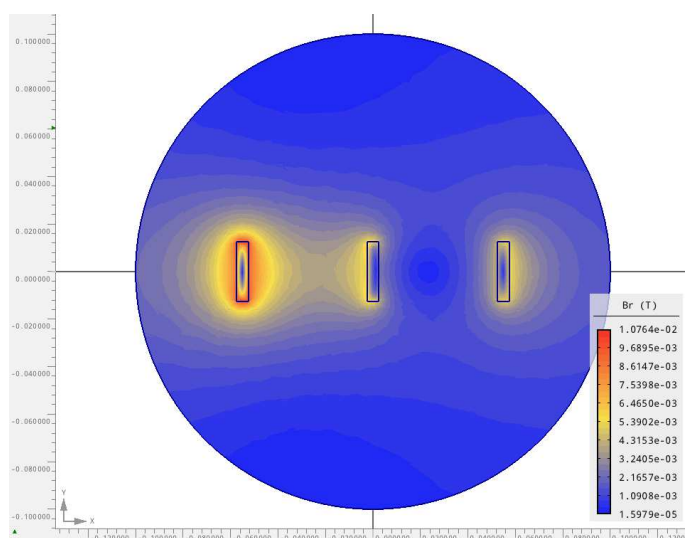
Obr. A2 Rozložení magnetické indukce přípojnic typu\_a (vzdálenost 20 mm)



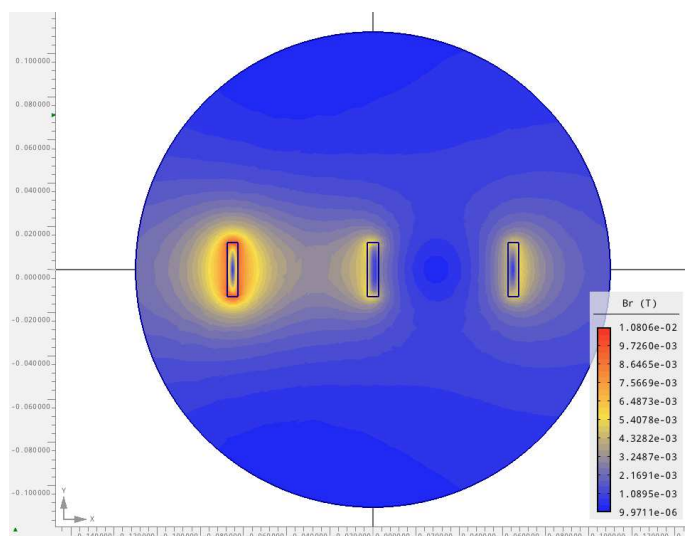
Obr. A3 Rozložení magnetické indukce přípojnic typu\_a (vzdálenost 30 mm)



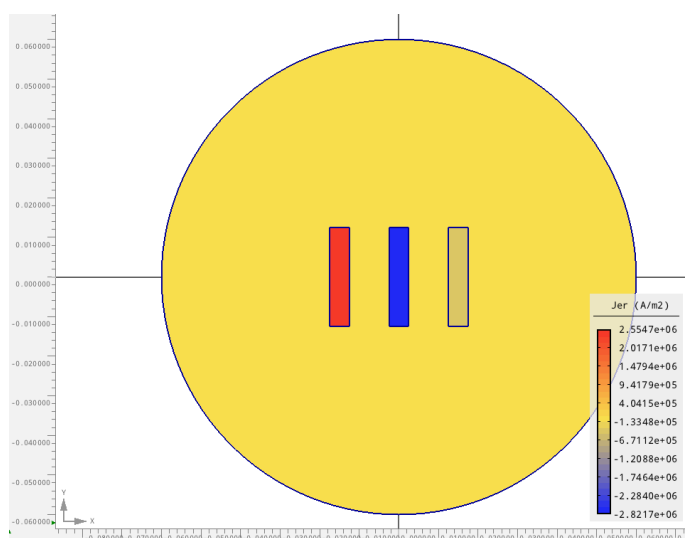
Obr. A4 Rozložení magnetické indukce přípojnic typu\_a (vzdálenost 40 mm)



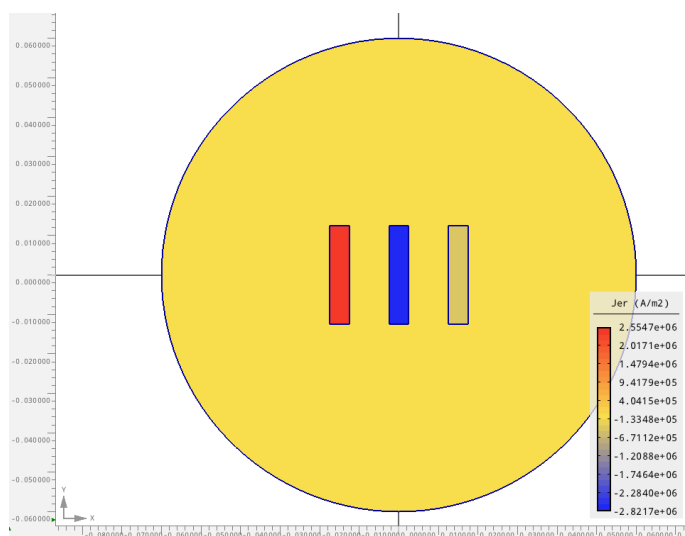
Obr. A5 Rozložení magnetické indukce přípojnic typu\_a (vzdálenost 50 mm)



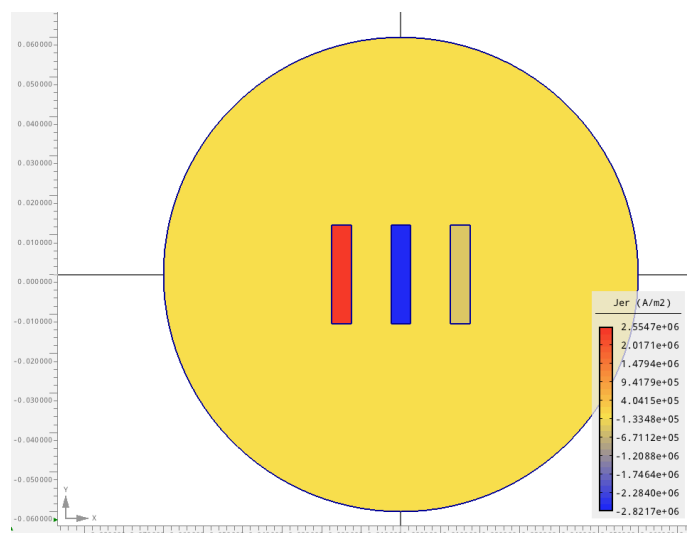
Obr. A6 Rozložení magnetické indukce přípojnic typu\_a (vzdálenost 60 mm)



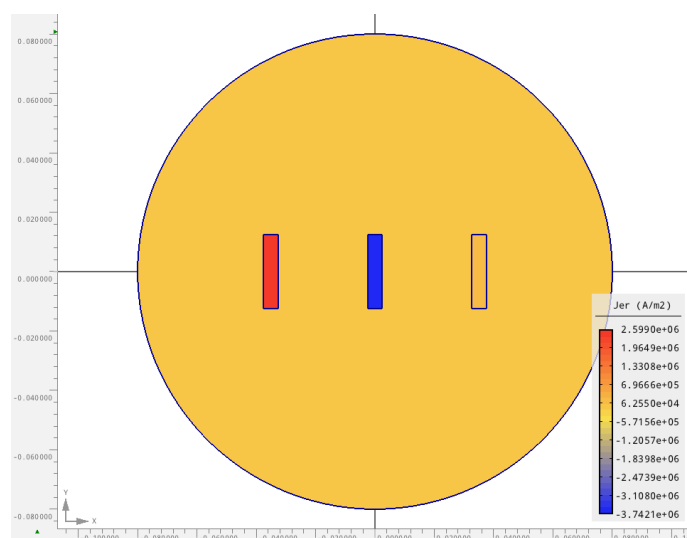
Obr. A7 Rozložení proudové hustoty přípojnic typu\_a (vzdálenost 10 mm)



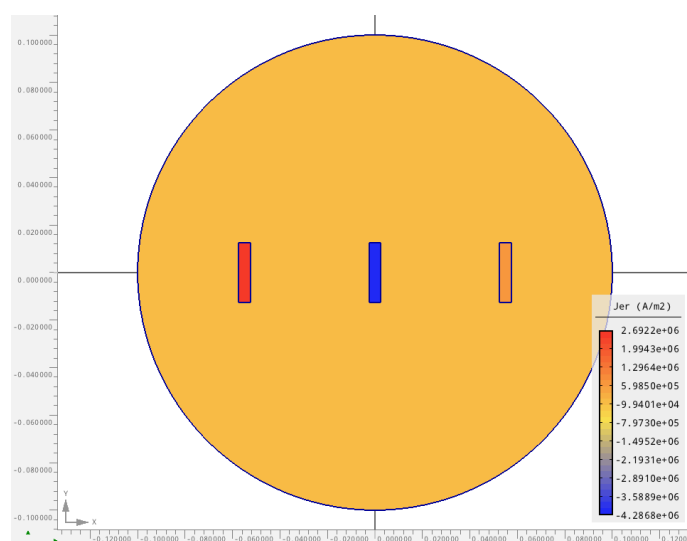
Obr. A8 Rozložení proudové hustoty přípojnic typu\_a (vzdálenost 20 mm)



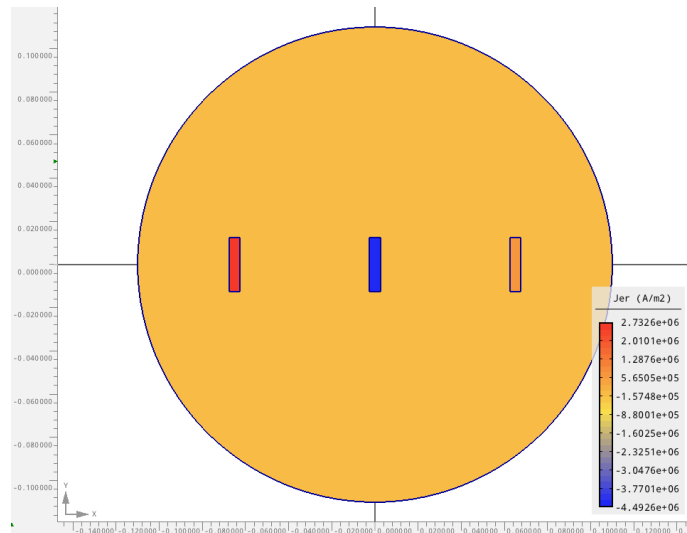
Obr. A9 Rozložení proudové hustoty přípojnic typu\_a (vzdálenost 30 mm)



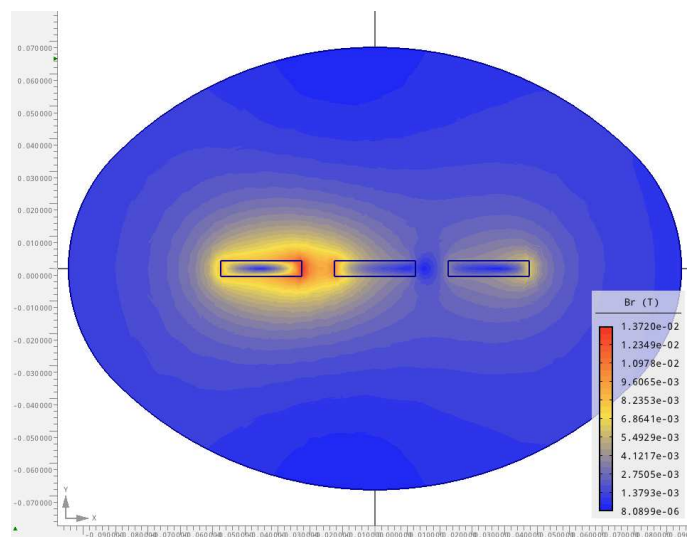
Obr. A10 Rozložení proudové hustoty přípojnic typu\_a (vzdálenost 40 mm)



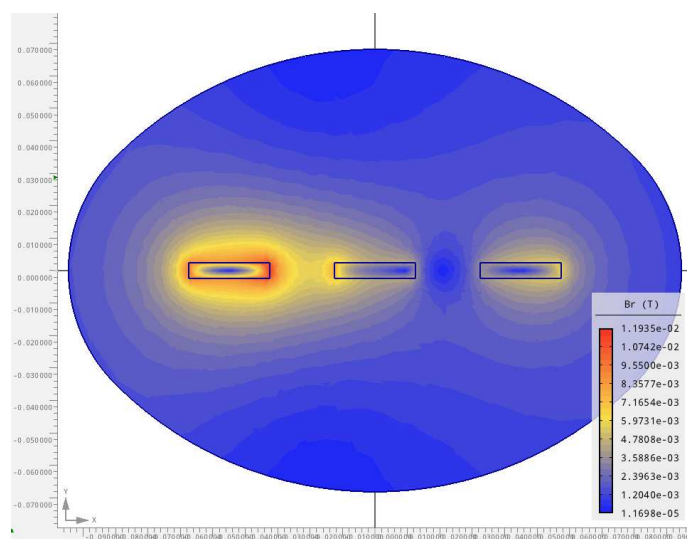
Obr. A11 Rozložení proudové hustoty přípojnic typu\_a (vzdálenost 50 mm)



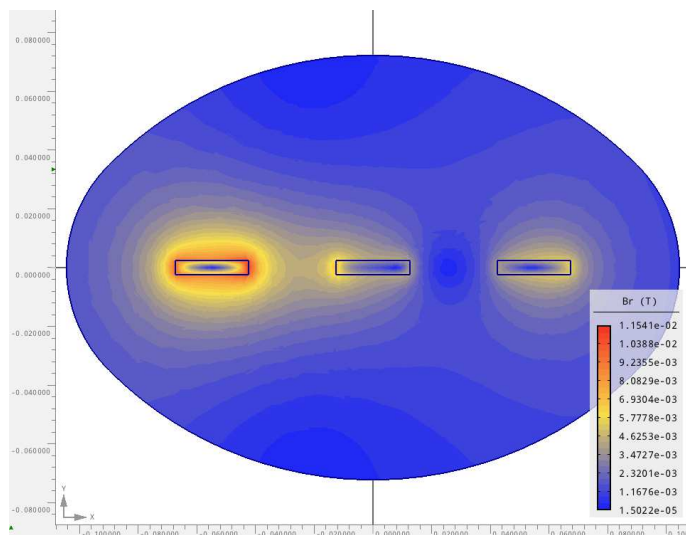
Obr. A12 Rozložení proudové hustoty přípojnic typu\_a (vzdálenost 60 mm)



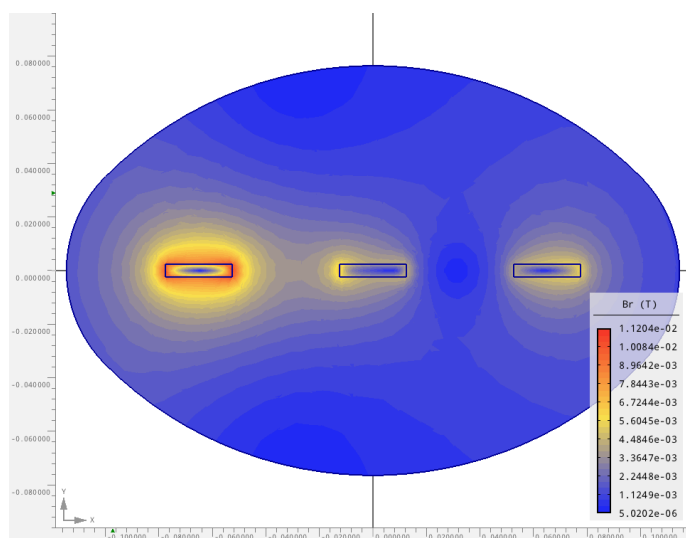
Obr. A13 Rozložení magnetické indukce přípojnic typu\_b (vzdálenost 10 mm)



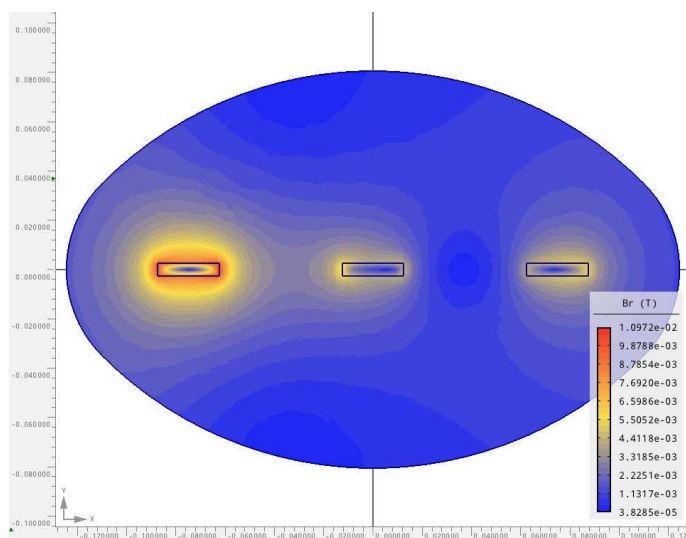
Obr. A14 Rozložení magnetické indukce přípojnic typu\_b (vzdálenost 20 mm)



Obr. A15 Rozložení magnetické indukce přípojnic typu\_b (vzdálenost 30 mm)

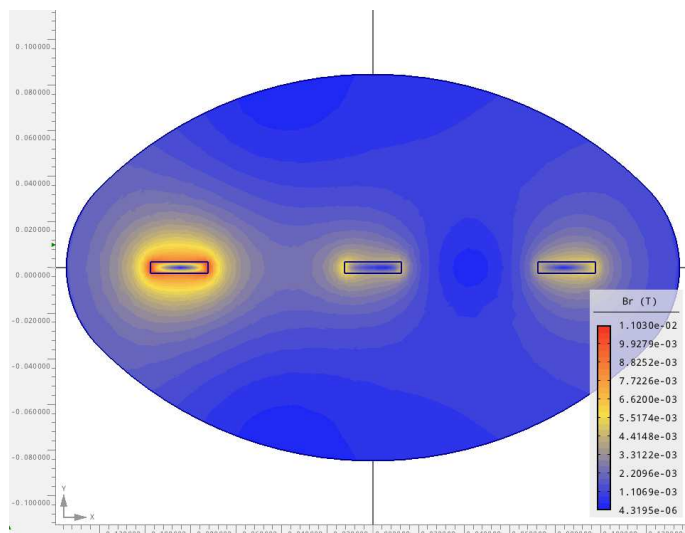


Obr. A16 Rozložení magnetické indukce přípojnic typu\_b (vzdálenost 40 mm)

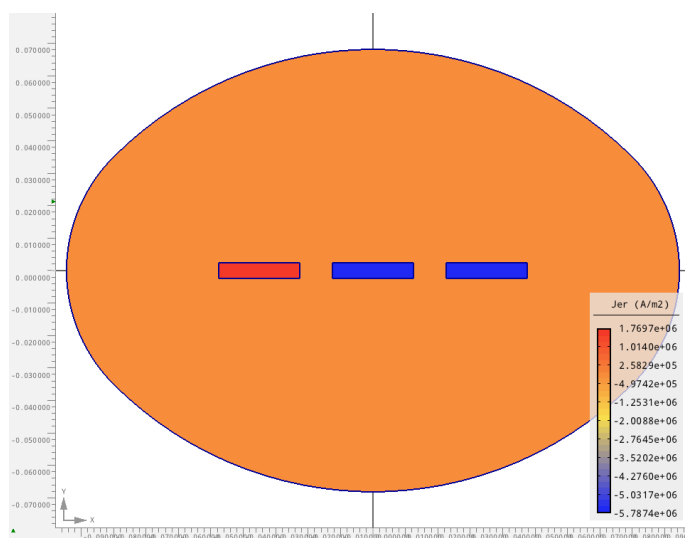


Obr. A17 Rozložení magnetické indukce přípojnic typu\_b (vzdálenost 50 mm)

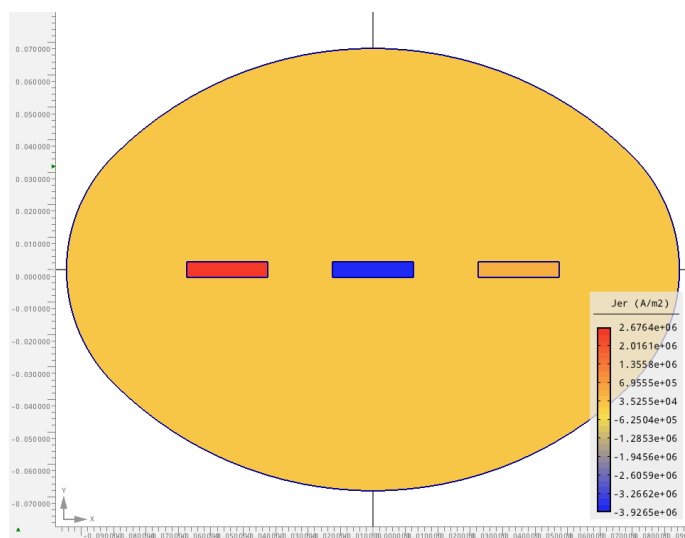




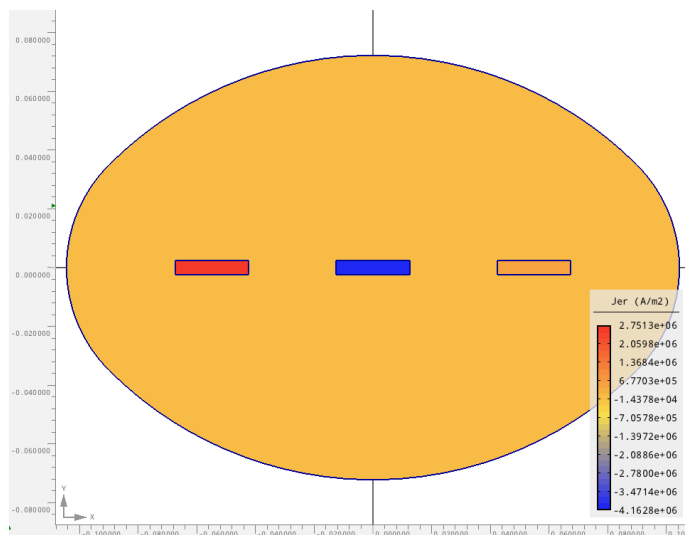
Obr. A18 Rozložení magnetické indukce přípojnic typu\_b (vzdálenost 60 mm)



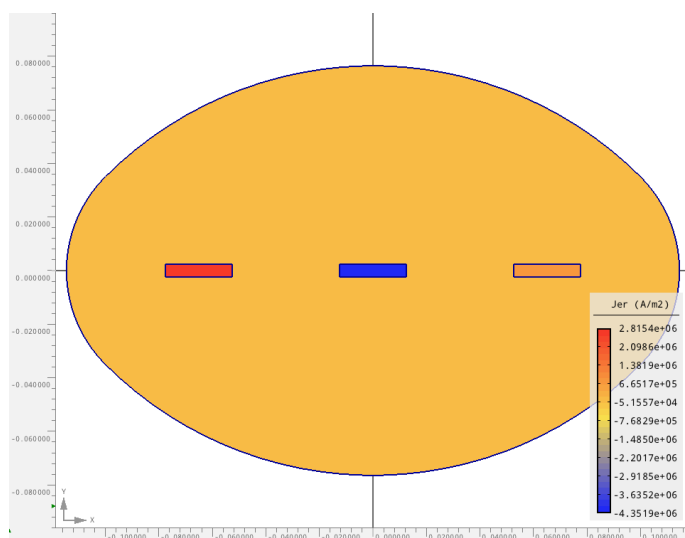
Obr. A19 Rozložení proudové hustoty přípojnic typu\_b (vzdálenost 10 mm)



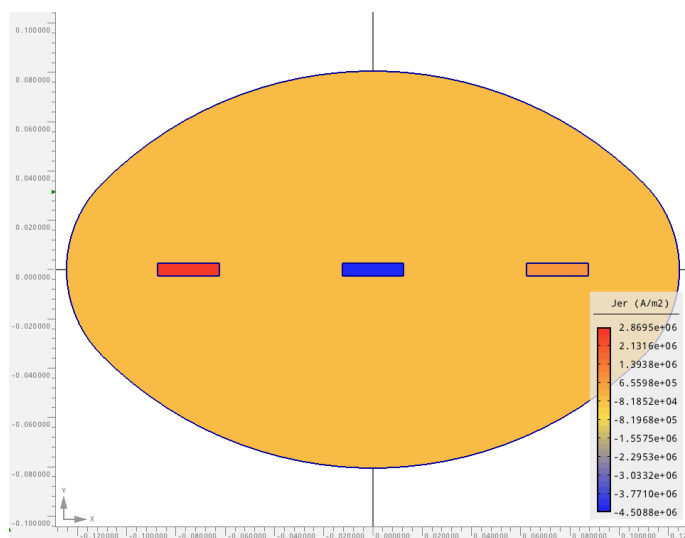
Obr. A20 Rozložení proudové hustoty přípojnic typu\_b (vzdálenost 20 mm)



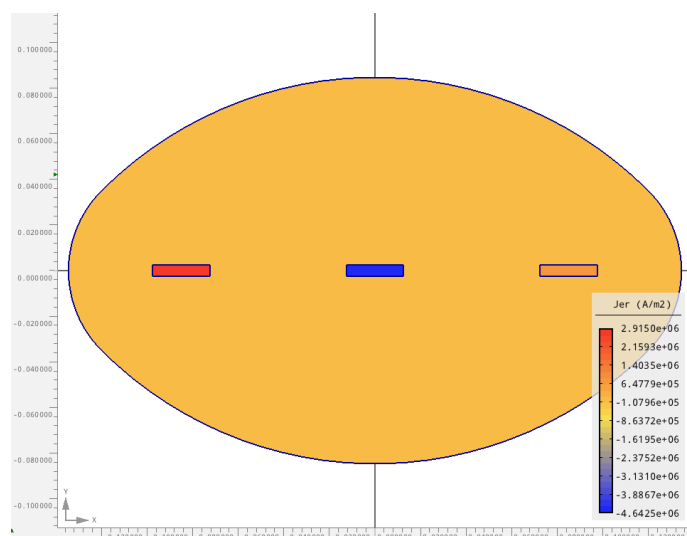
Obr. A21 Rozložení proudové hustoty přípojnic typu\_b (vzdálenost 30 mm)



Obr. A22 Rozložení proudové hustoty přípojnic typu\_b (vzdálenost 40 mm)



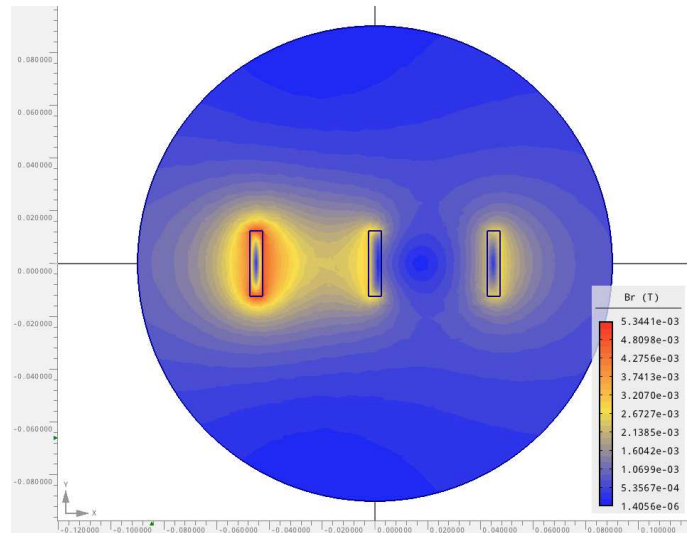
Obr. A23 Rozložení proudové hustoty přípojnic typu\_b (vzdálenost 50 mm)



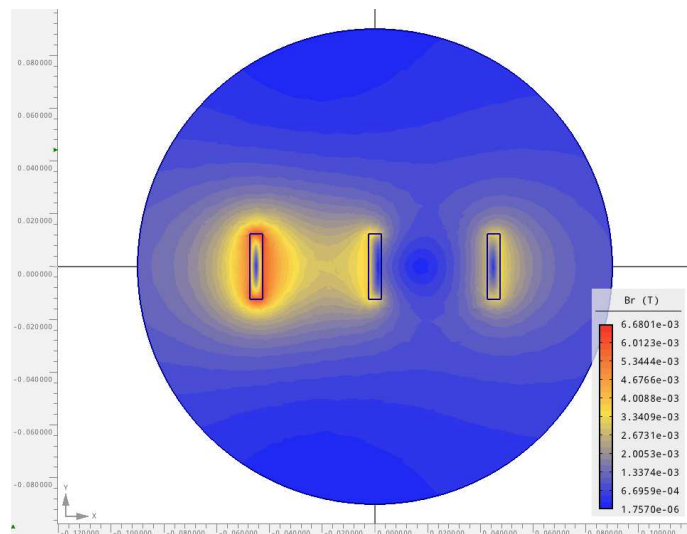
Obr. A24 Rozložení proudové hustoty přípojnic typu\_b (vzdálenost 60 mm)

**Příloha B**

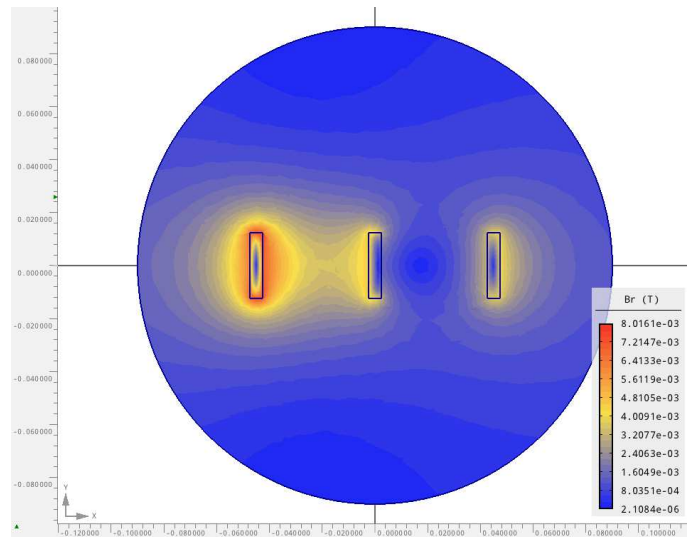
Příloha k přípojnicím z kapitoly 4.2



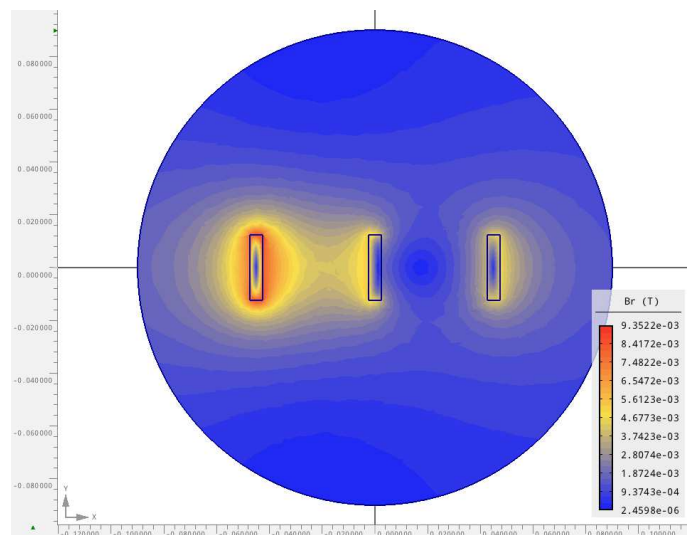
Obr. B1 Rozložení magnetické indukce (proud 200 A)



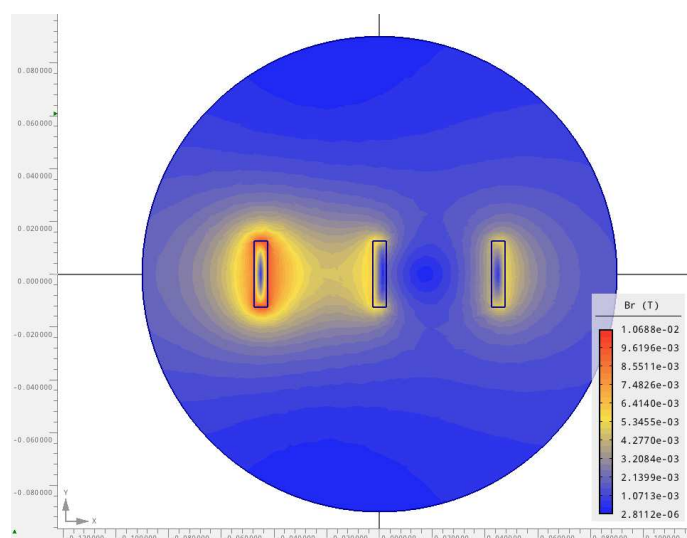
Obr. B2 Rozložení magnetické indukce (proud 250 A)



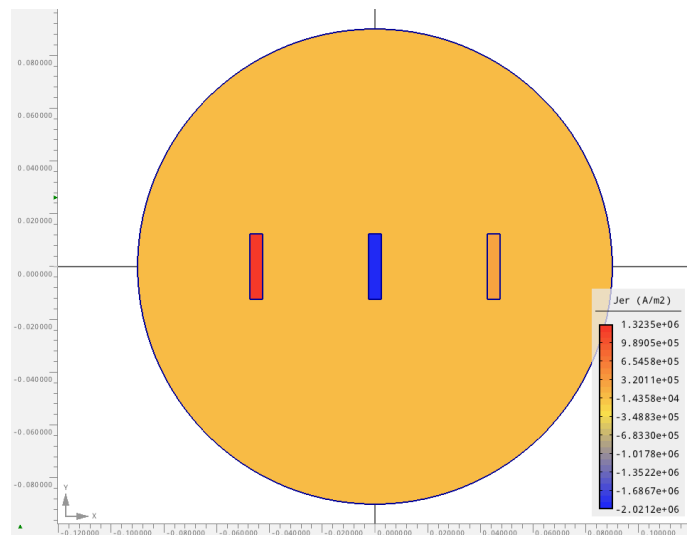
Obr. B3 Rozložení magnetické indukce (proud 300 A)



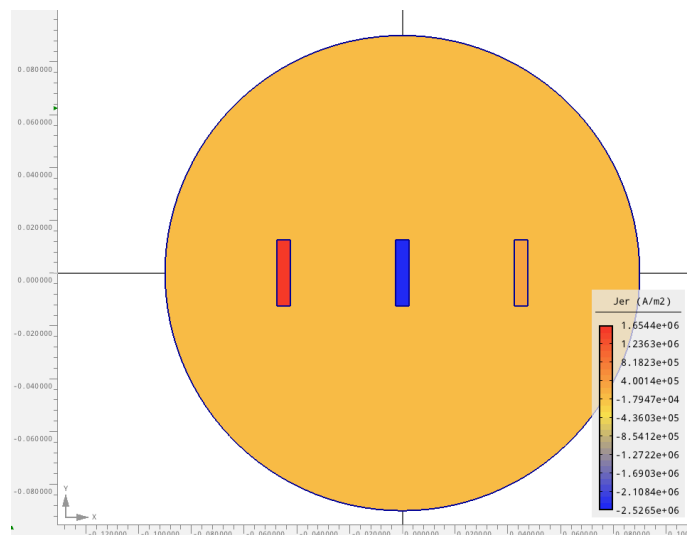
Obr. B4 Rozložení magnetické indukce (proud 350 A)



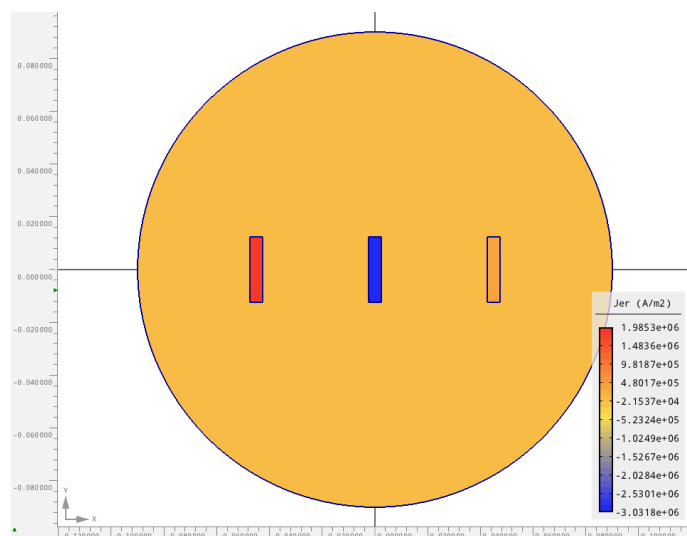
Obr. B5 Rozložení magnetické indukce (proud 400 A)



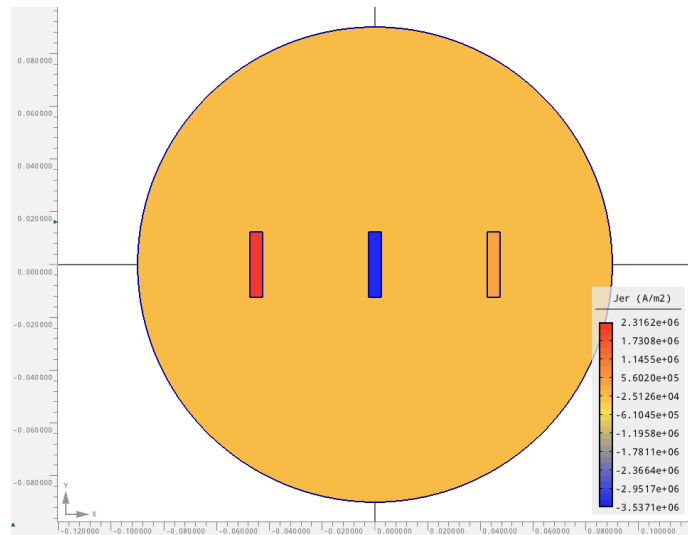
Obr. B6 Rozložení proudové hustoty (proud 200 A)



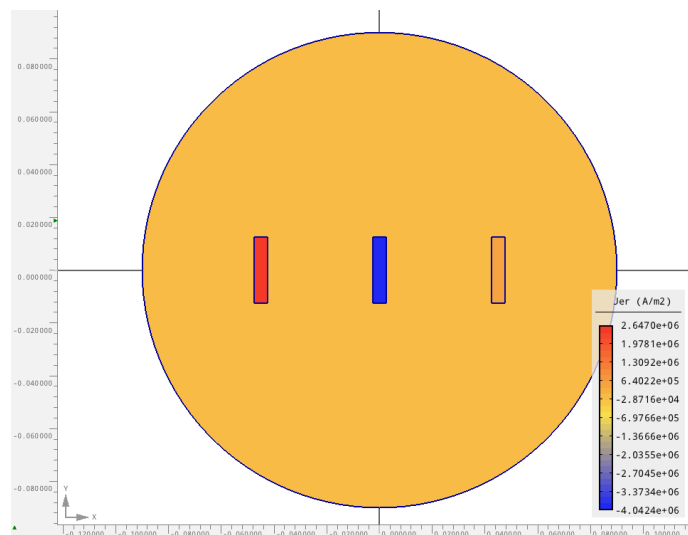
Obr. B7 Rozložení proudové hustoty (proud 250 A)



Obr. B8 Rozložení proudové hustoty (proud 300 A)



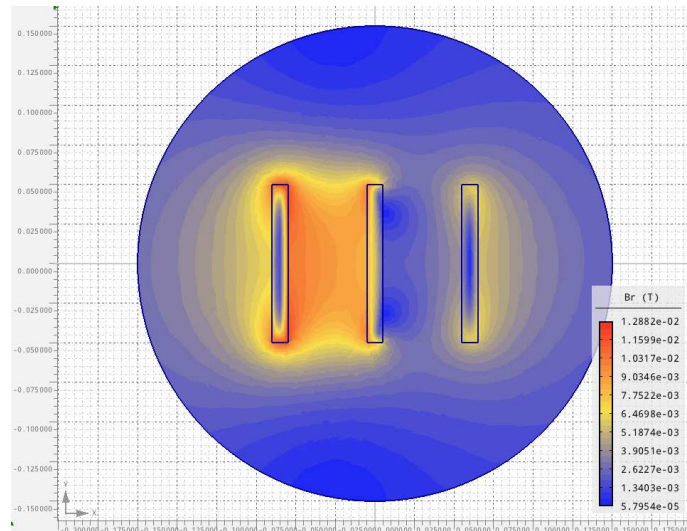
Obr. B9 Rozložení proudové hustoty (proud 350 A)



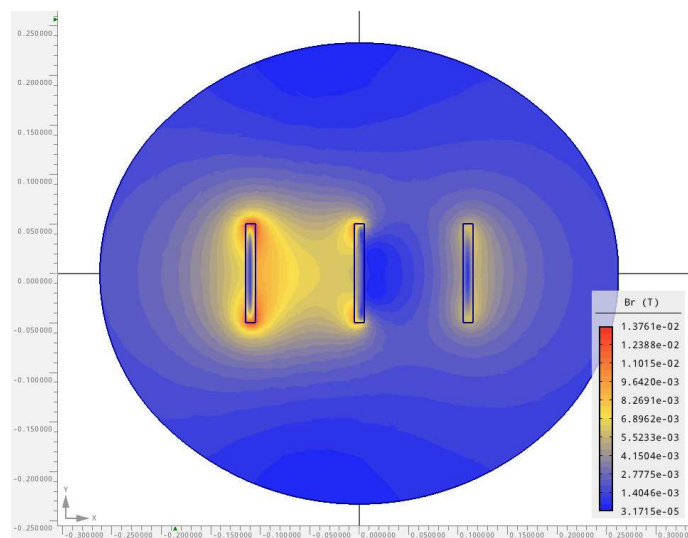
Obr. B10 Rozložení proudové hustoty (proud 400 A)

**Příloha C**

Příloha k přípojnicím z kapitoly 4.3

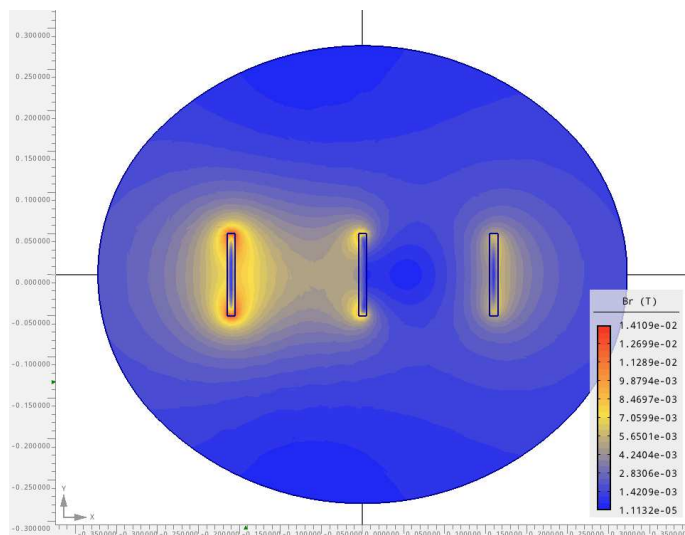


Obr. C1 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 50 mm)

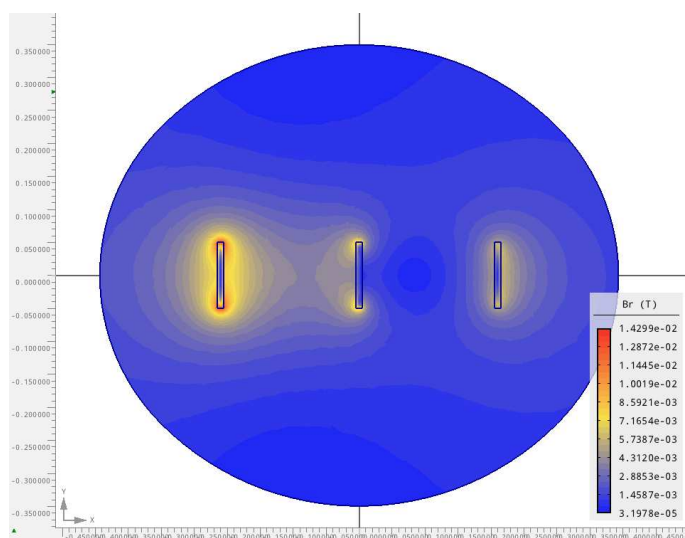


Obr. C2 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 100 mm)

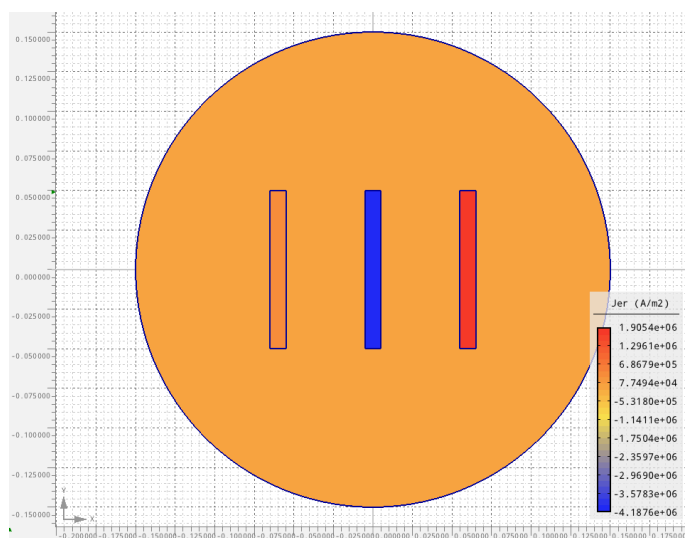




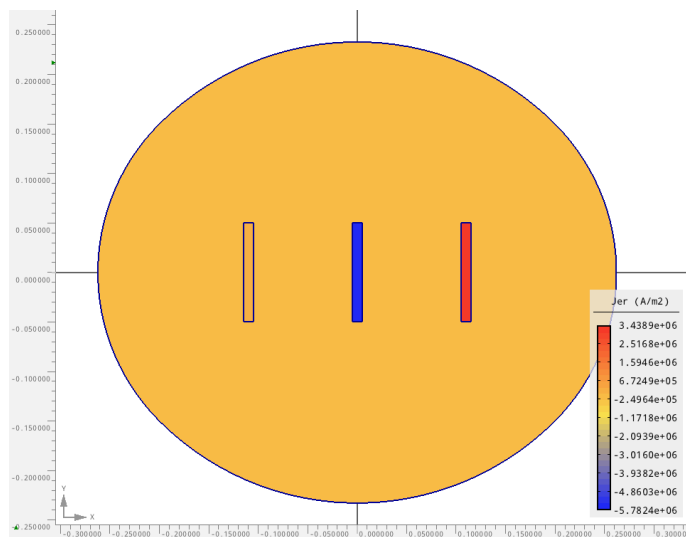
Obr. C3 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 150 mm)



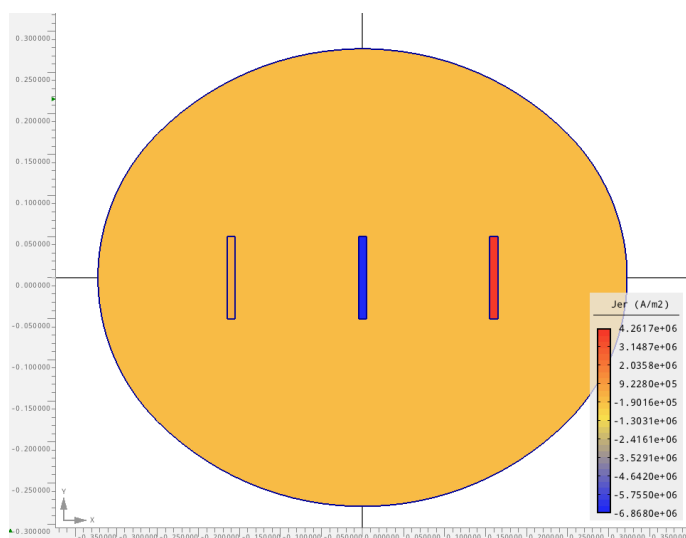
Obr. C4 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 200 mm)



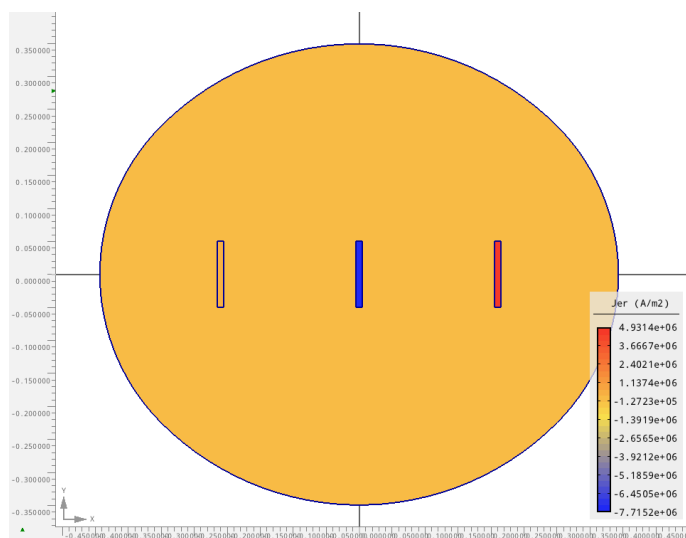
Obr. C5 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 50 mm)



Obr. C6 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 100 mm)



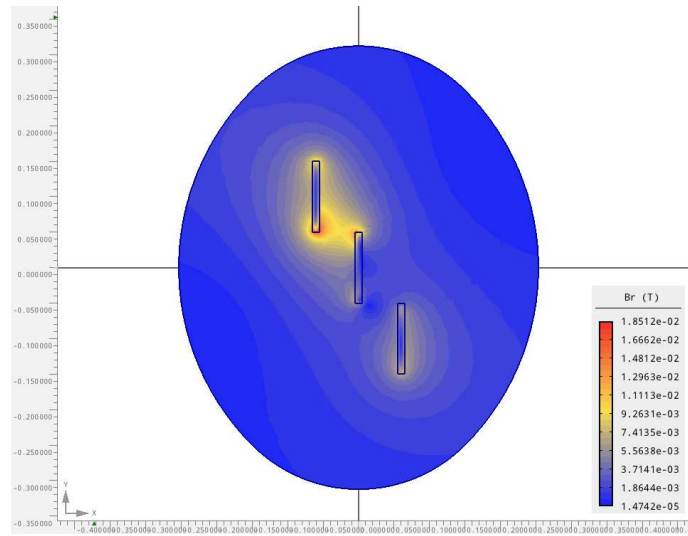
Obr. C7 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 150 mm)



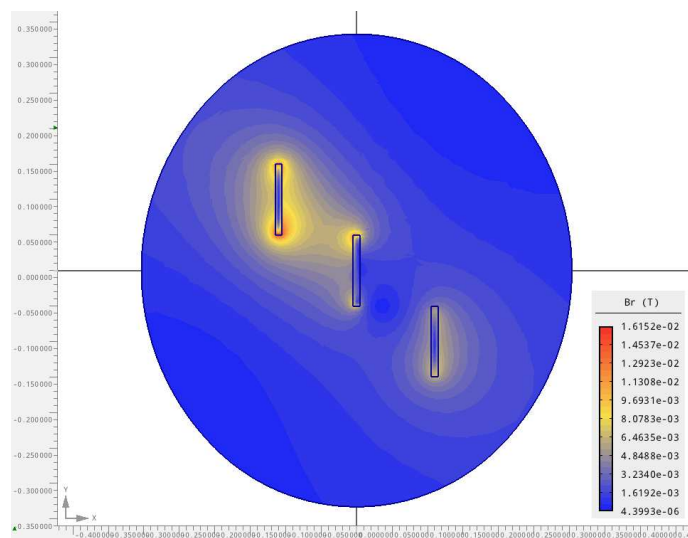
Obr. C8 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 200 mm)

**Příloha D**

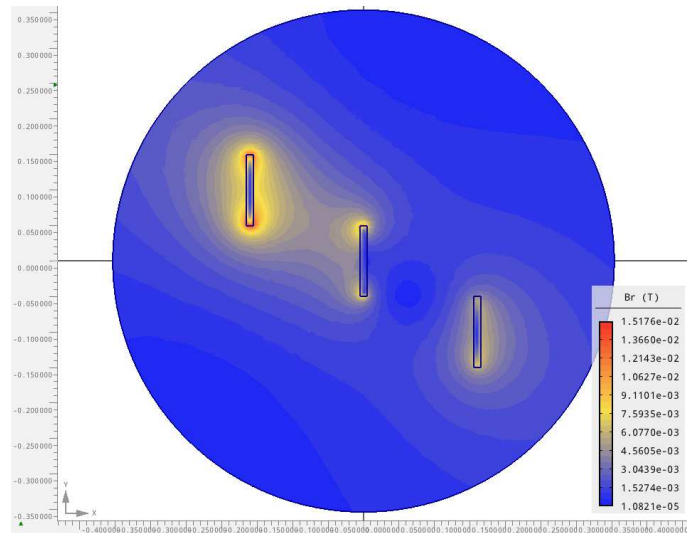
Příloha k přípojnicím z kapitoly 4.4



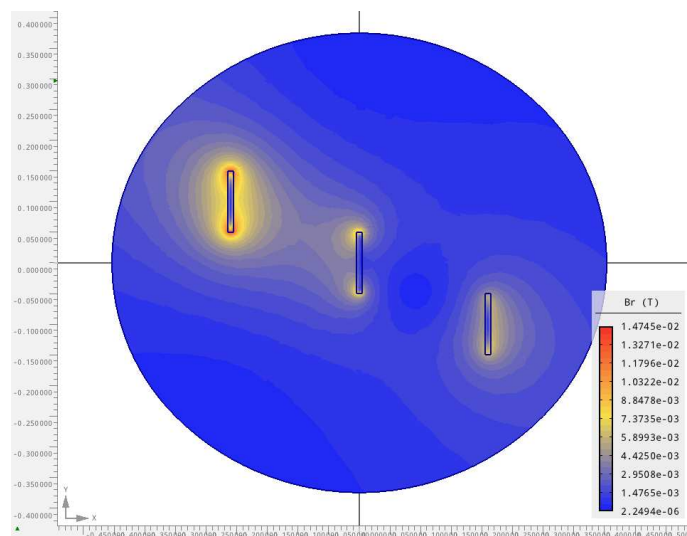
Obr. D1 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 50 mm)



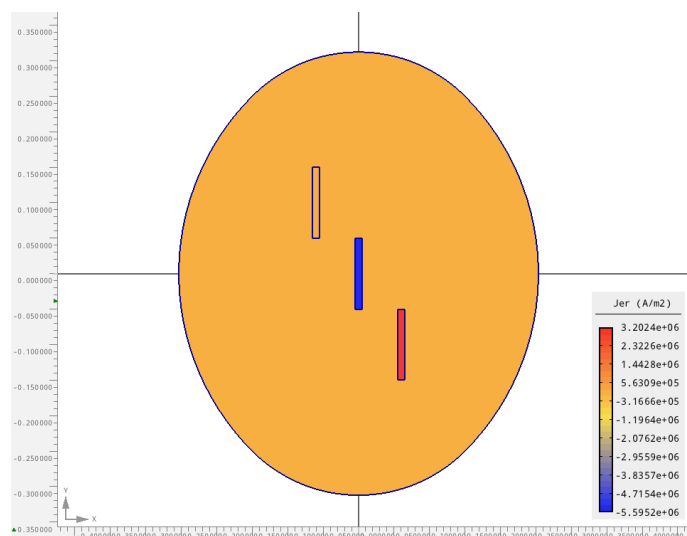
Obr. D2 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 100 mm)



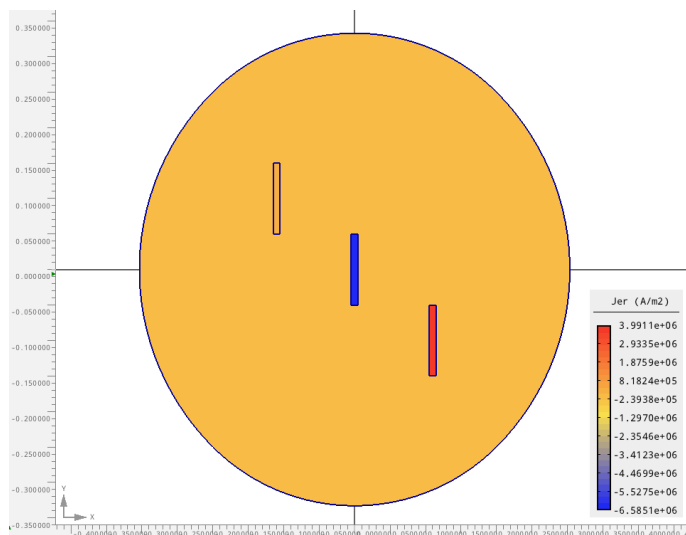
Obr. D3 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 150 mm)



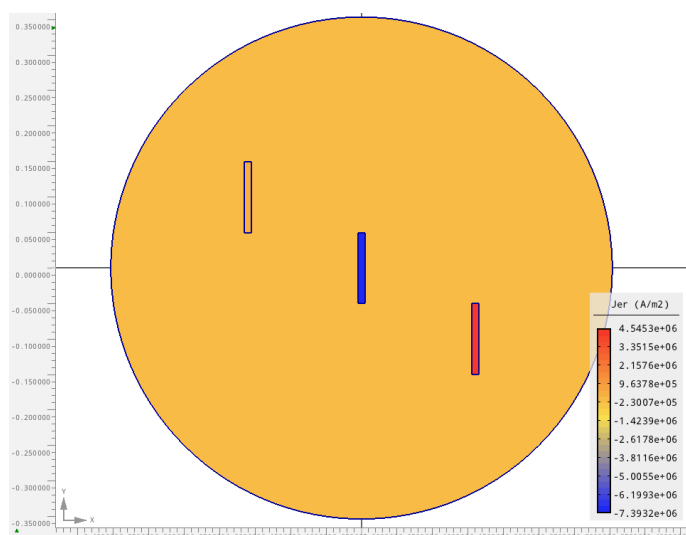
Obr. D4 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 200 mm)



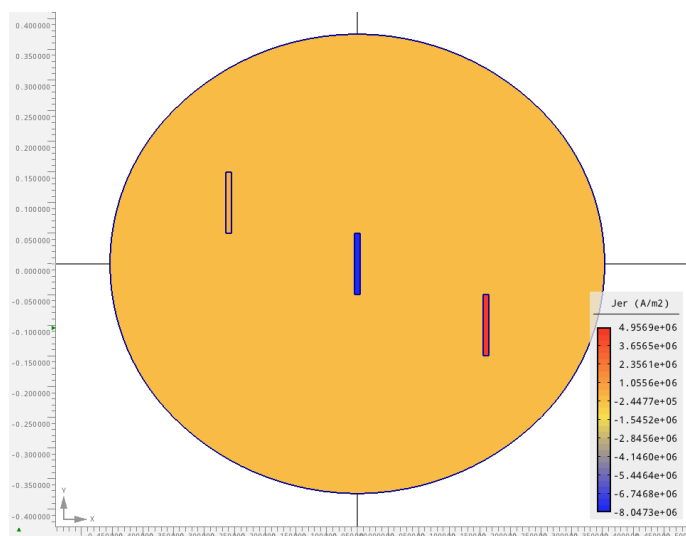
Obr. D5 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 50 mm)



Obr. D6 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 100 mm)



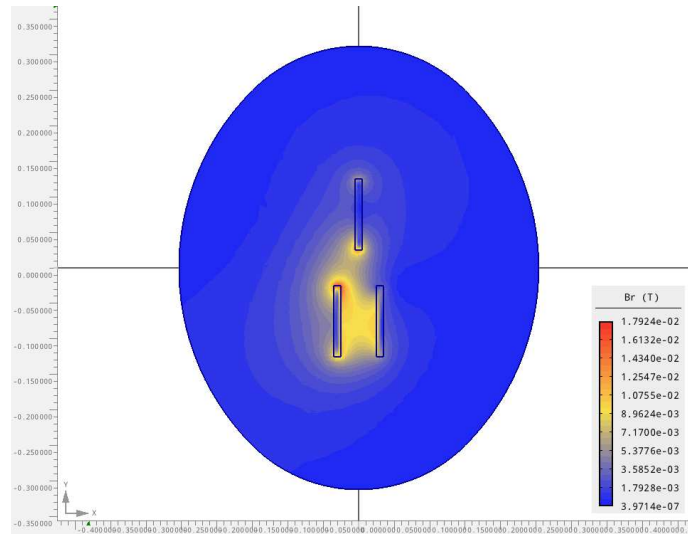
Obr. D7 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 150 mm)



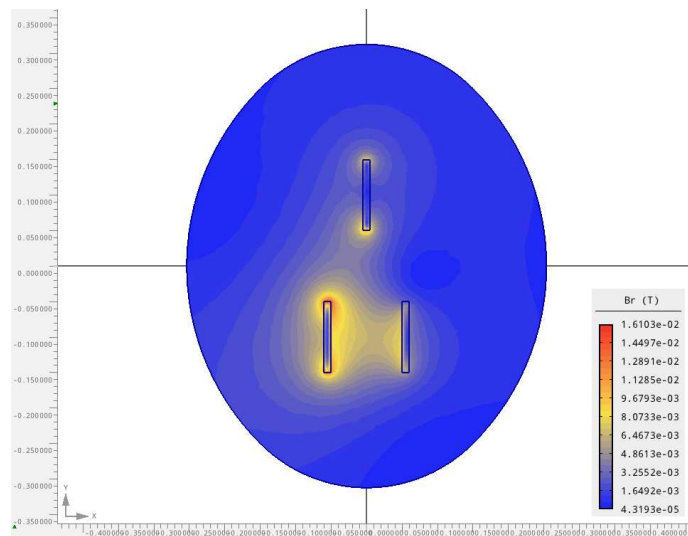
Obr. D8 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 200 mm)

**Příloha E**

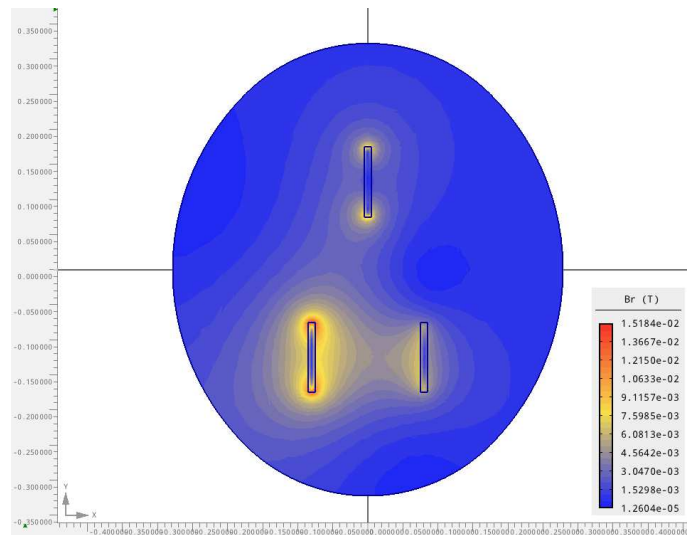
Příloha k přípojnicím z kapitoly 4.5



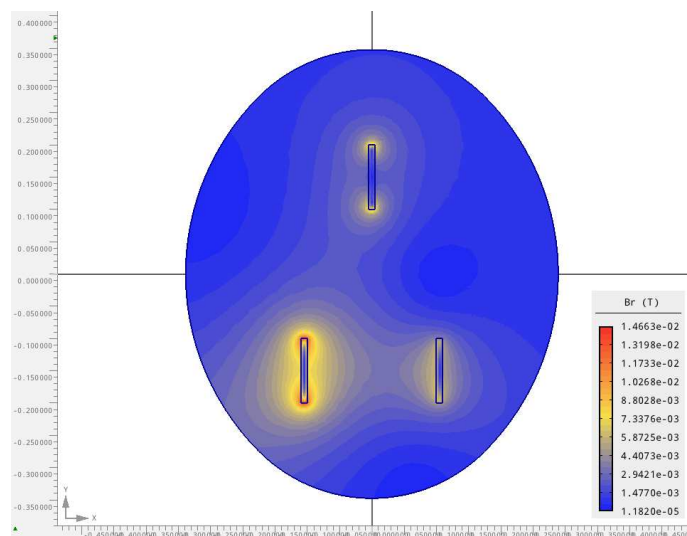
Obr. E1 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 50 mm)



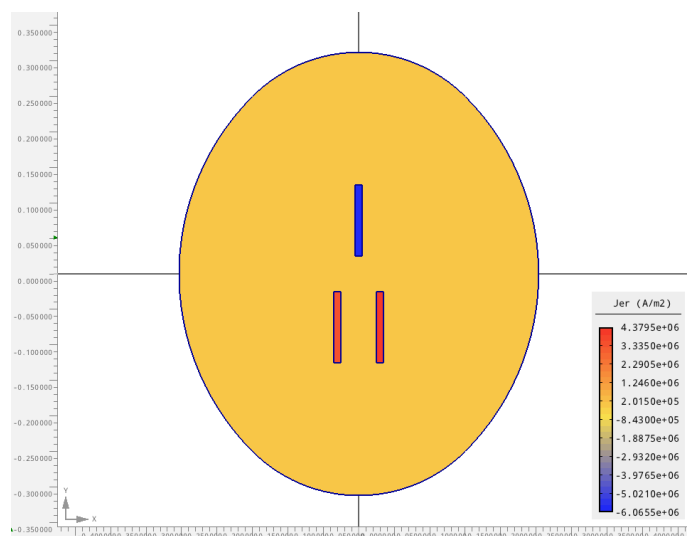
Obr. E2 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 100 mm)



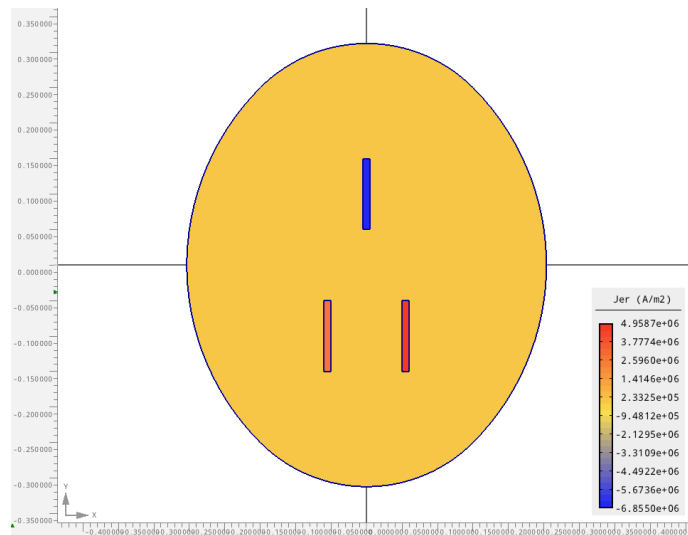
Obr. E3 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 150 mm)



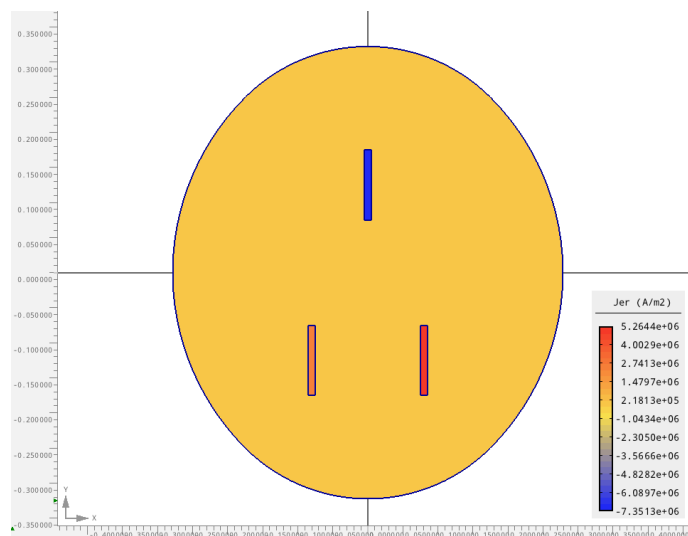
Obr. E4 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 200 mm)



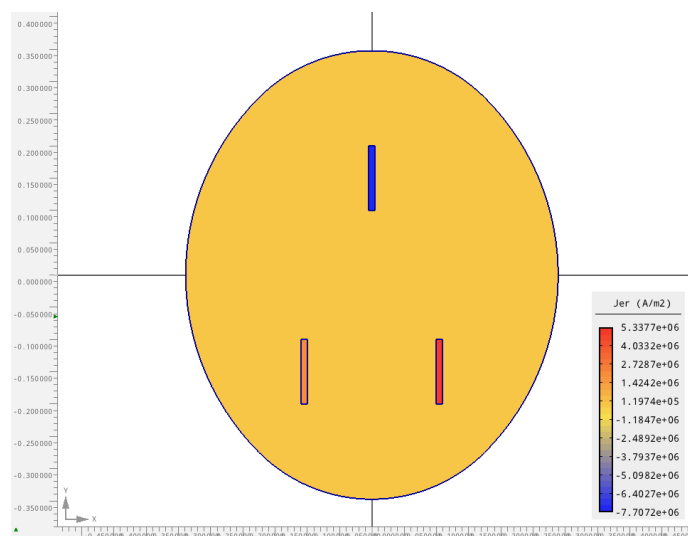
Obr. E5 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 50 mm)



Obr. E6 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 100 mm)



Obr. E7 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 150 mm)

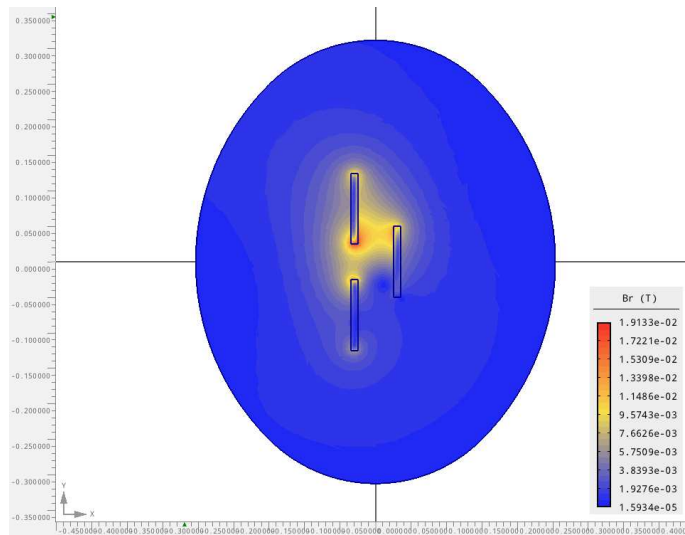


Obr. E8 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 200 mm)

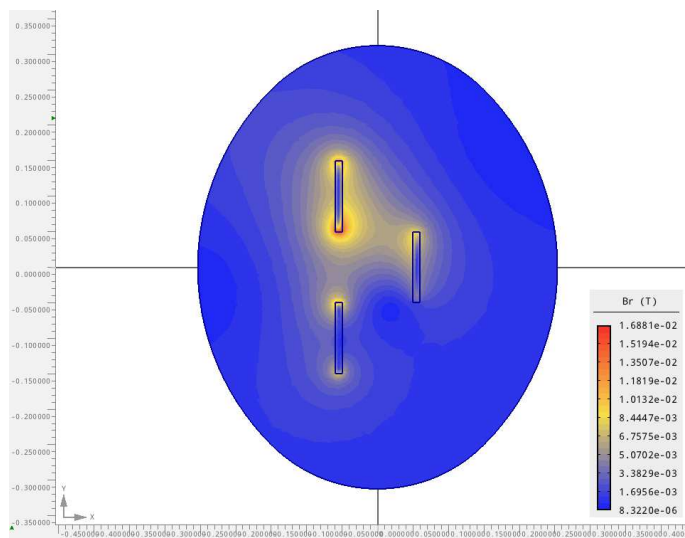


**Příloha F**

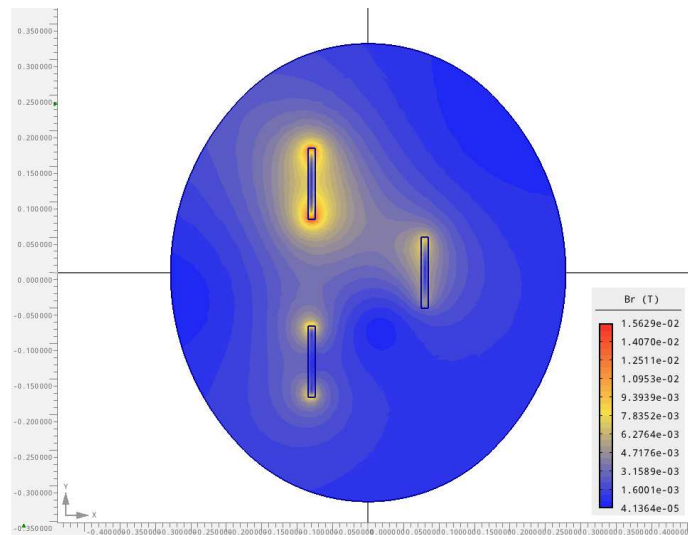
Příloha k přípojnícím z kapitoly 4.6



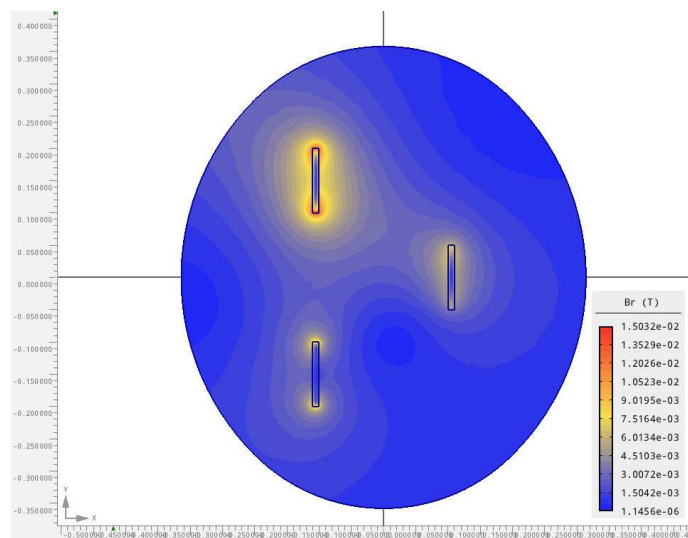
Obr. F1 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 50 mm)



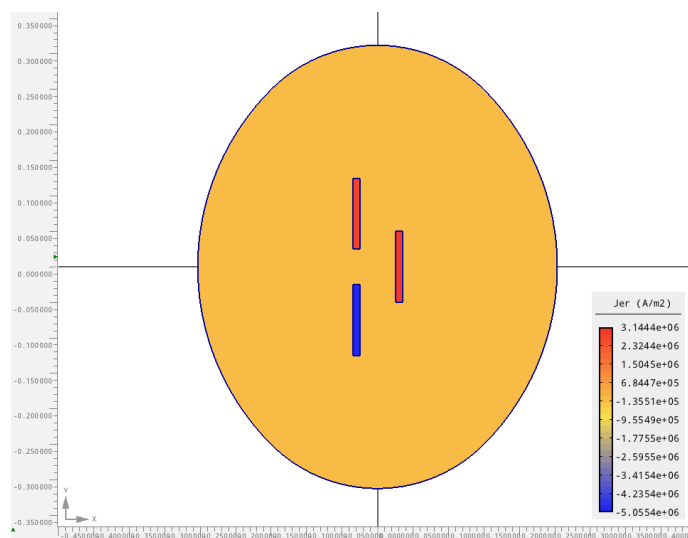
Obr. F2 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 100 mm)



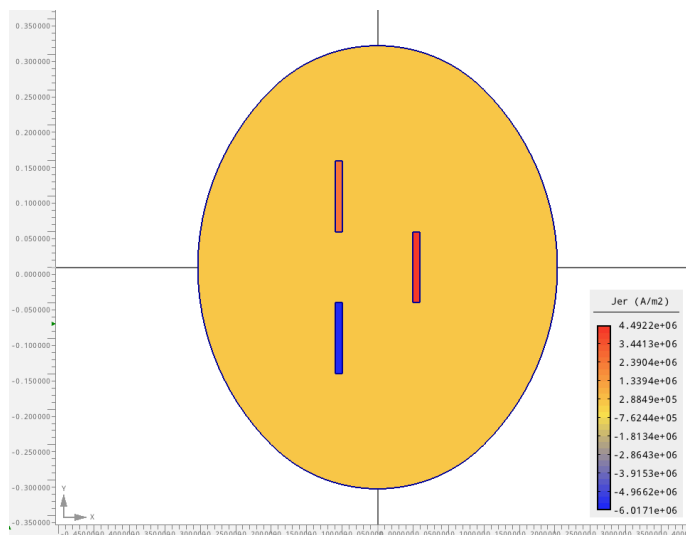
Obr. F3 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 150 mm)



Obr. F4 Rozložení magnetické indukce (vzdálenost 200 mm)



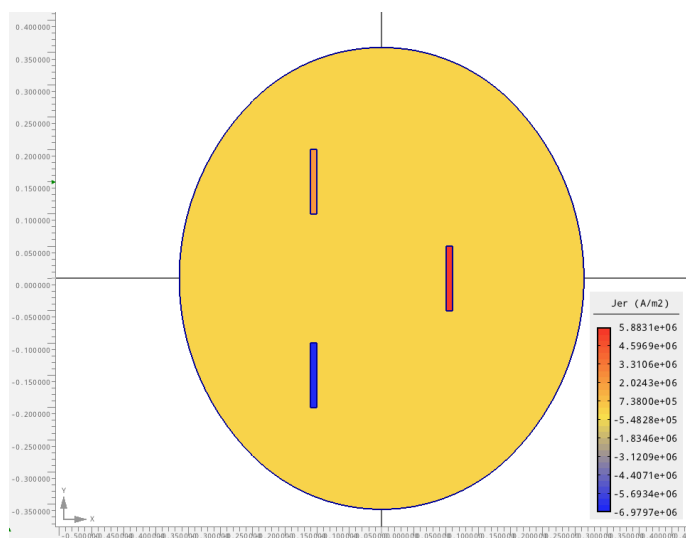
Obr. F5 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 50 mm)



Obr. E6 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 100 mm)



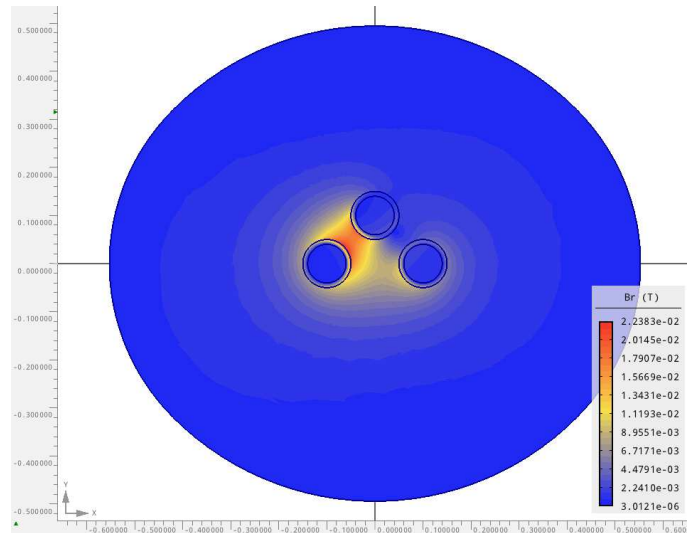
Obr. E7 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 150 mm)



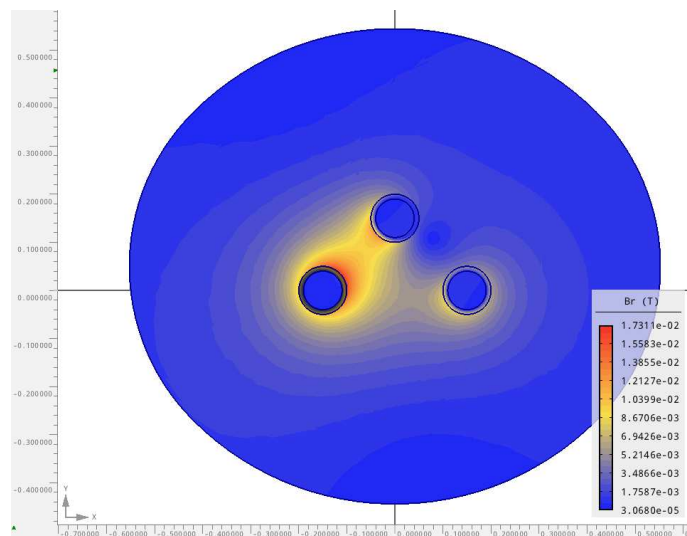
Obr. F8 Rozložení proudové hustoty (vzdálenost 200 mm)

**Příloha G**

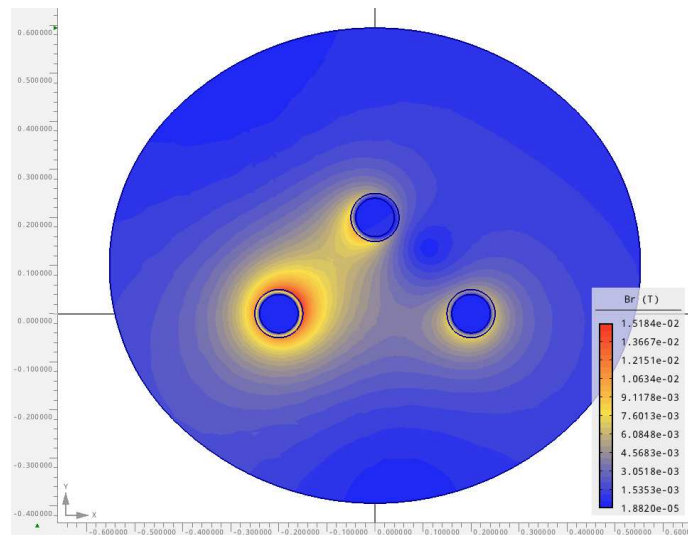
Příloha k přípojnicím z kapitoly 4.8



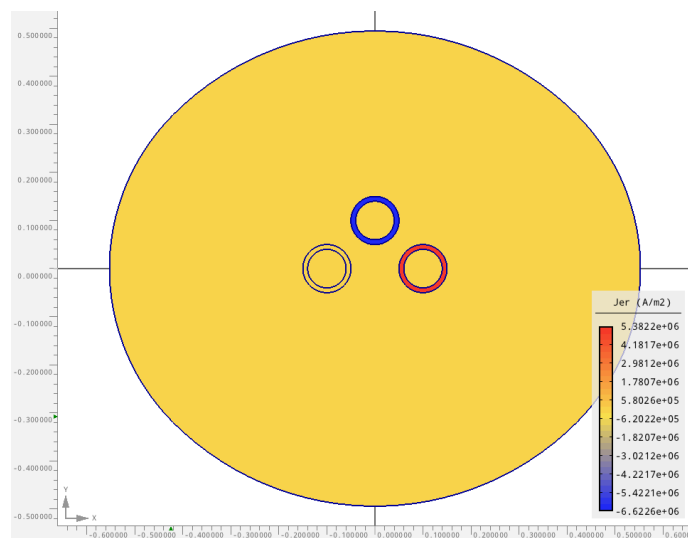
Obr. G1 Rozložení magnetické indukce (trojúhelník\_a)



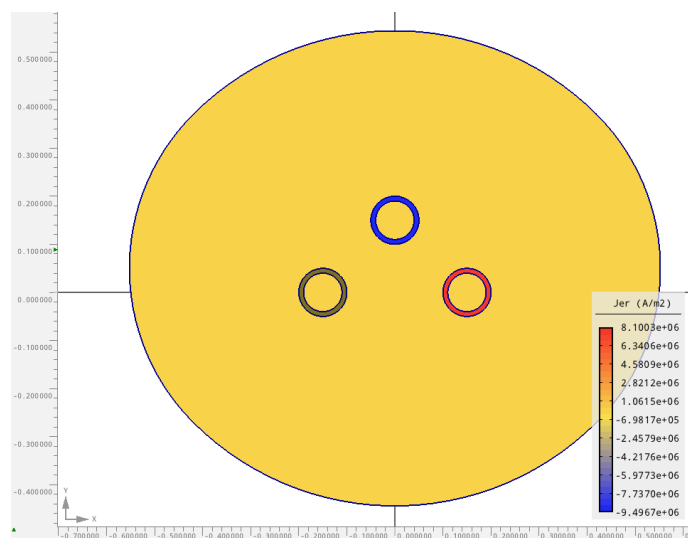
Obr. G2 Rozložení magnetické indukce (trojúhelník\_a)



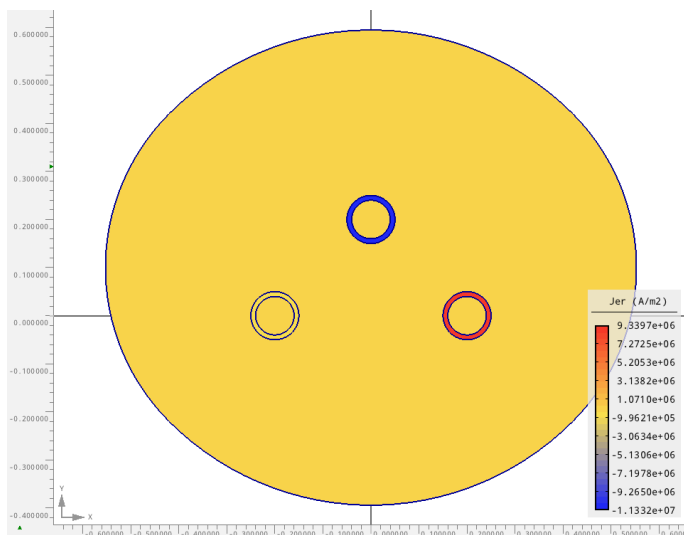
Obr. G3 Rozložení magnetické indukce (trojúhelník\_a)



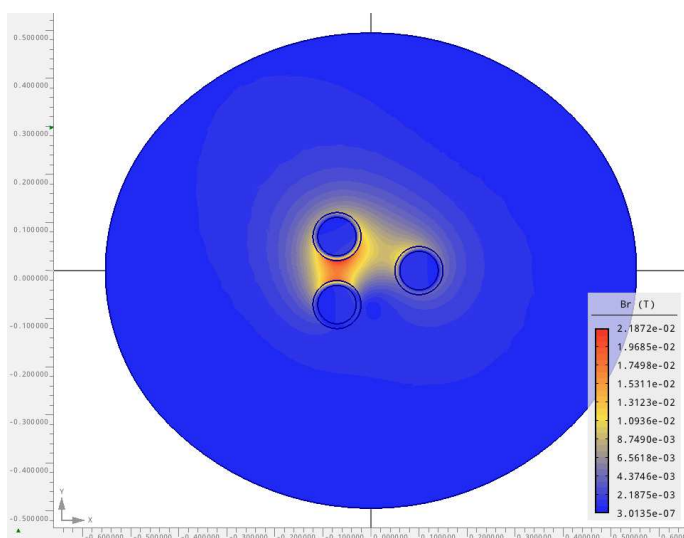
Obr. G4 Rozložení proudové hustoty (trojúhelník\_a)



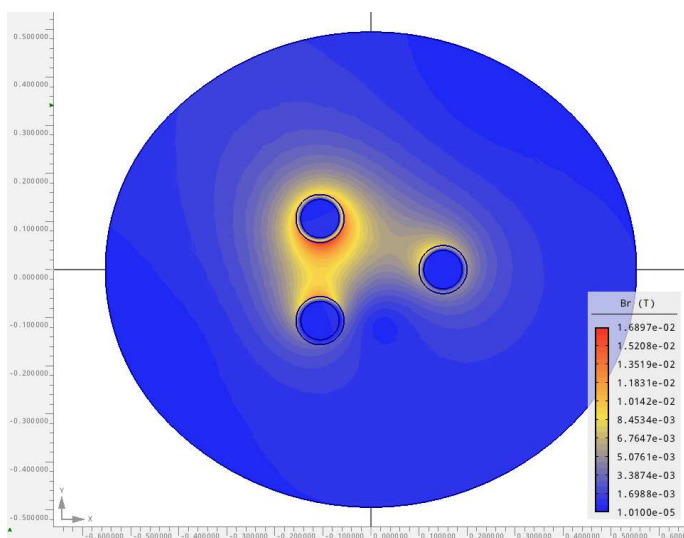
Obr. G5 Rozložení proudové hustoty (trojúhelník\_a)



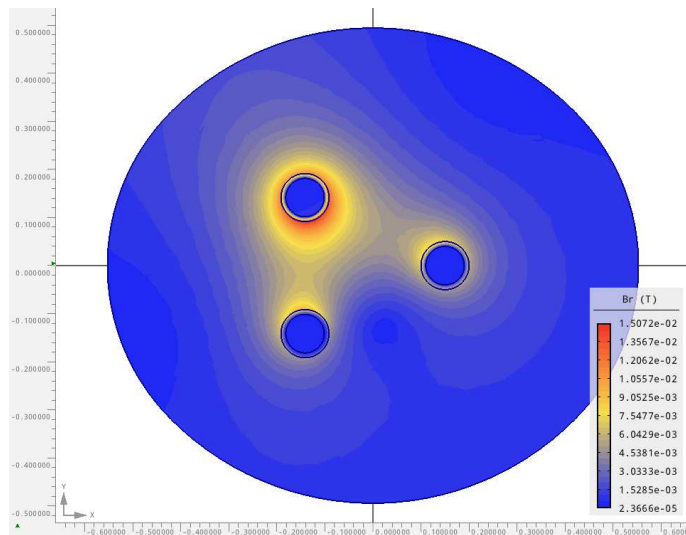
Obr. G6 Rozložení proudové hustoty (trojúhelník\_a)



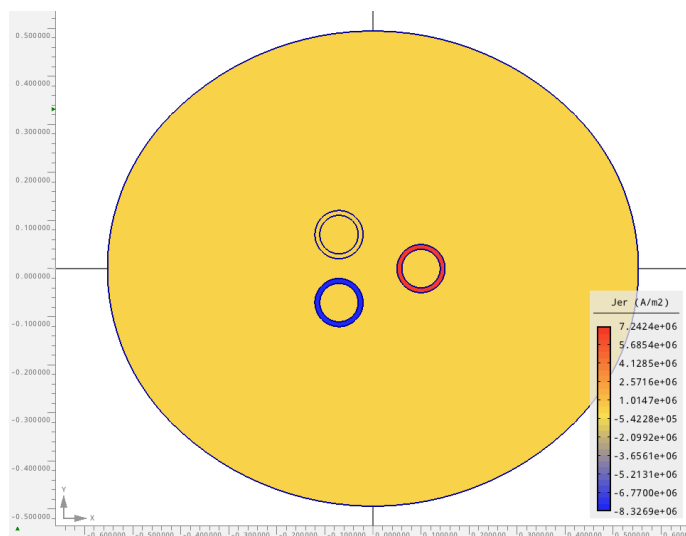
Obr. G7 Rozložení magnetické indukce (trojúhelník\_b)



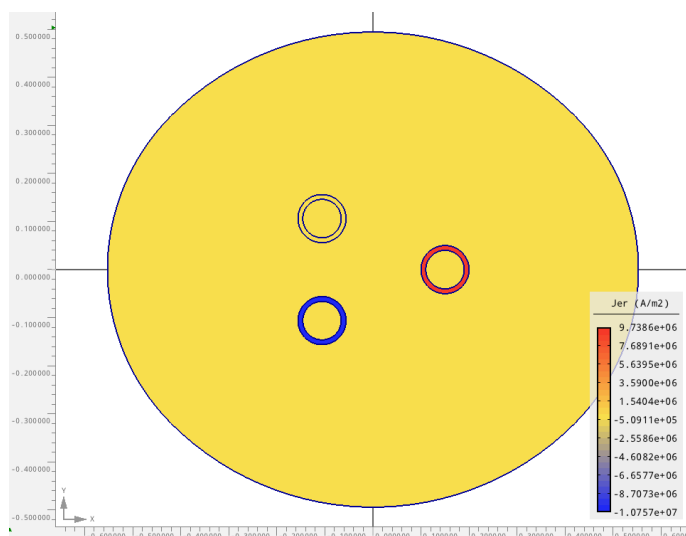
Obr. G8 Rozložení magnetické indukce (trojúhelník\_b)



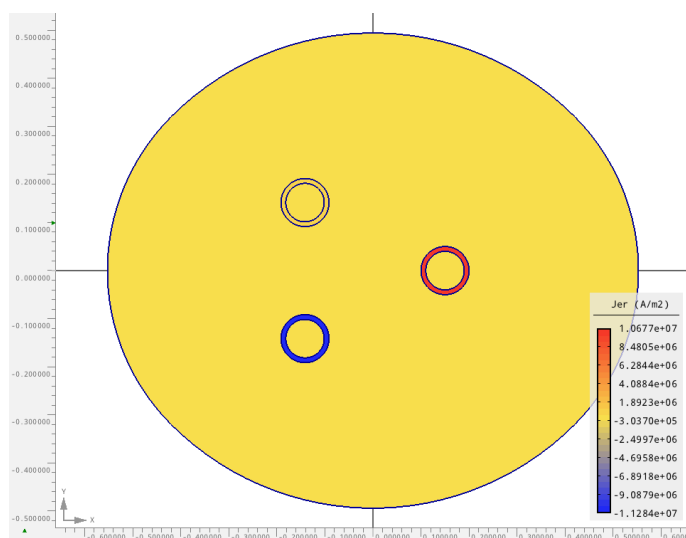
Obr. G9 Rozložení magnetické indukce (trojúhelník\_b)



Obr. G10 Rozložení proudové hustoty (trojúhelník\_b)



Obr. G11 Rozložení proudové hustoty (trojúhelník\_b)

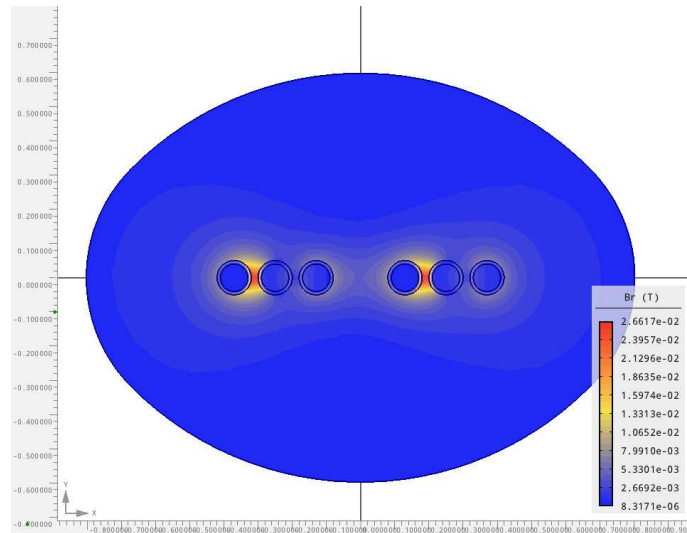


Obr. G12 Rozložení proudové hustoty (trojúhelník\_b)

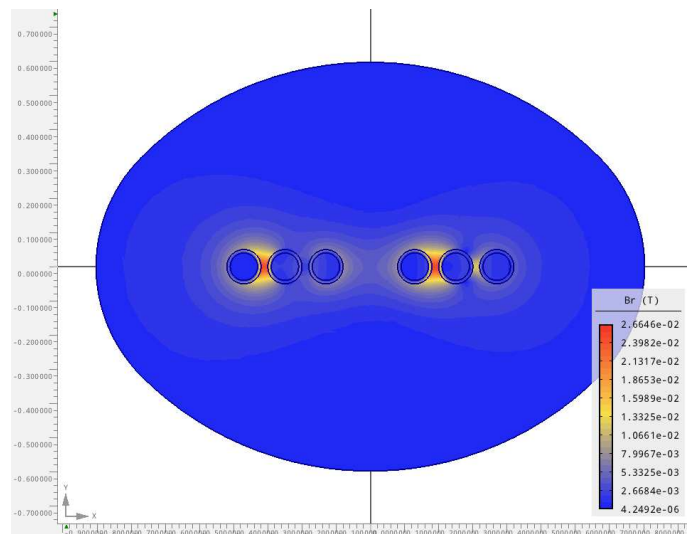


**Příloha H**

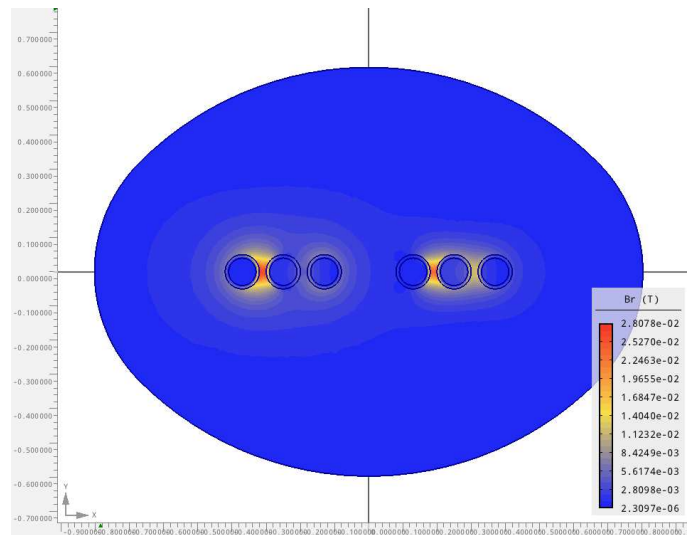
Příloha k přípojnicím z kapitoly 4.9



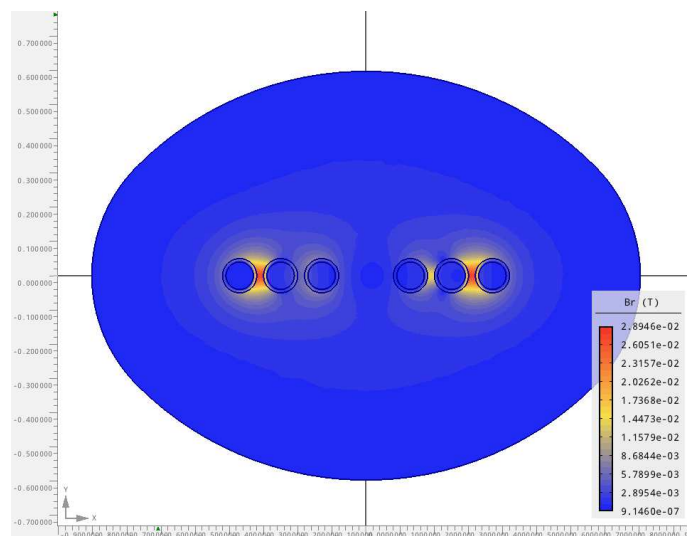
Obr. H1 Rozložení magnetické indukce (zapojení UVW - UVW)



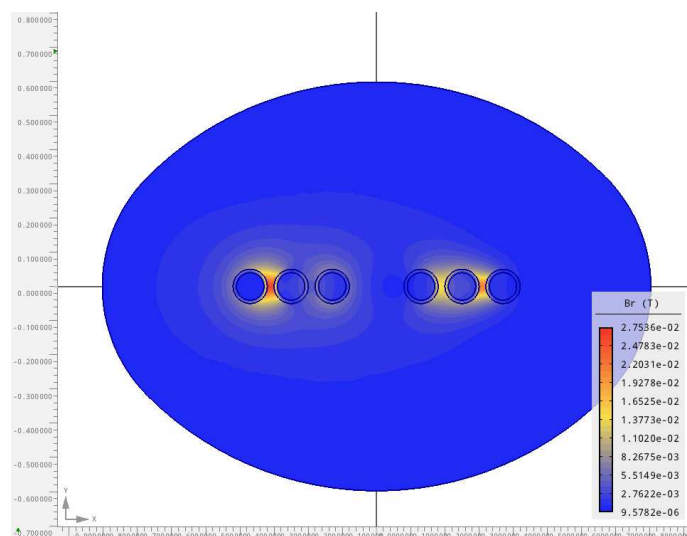
Obr. H2 Rozložení magnetické indukce (zapojení UVW - UWV)



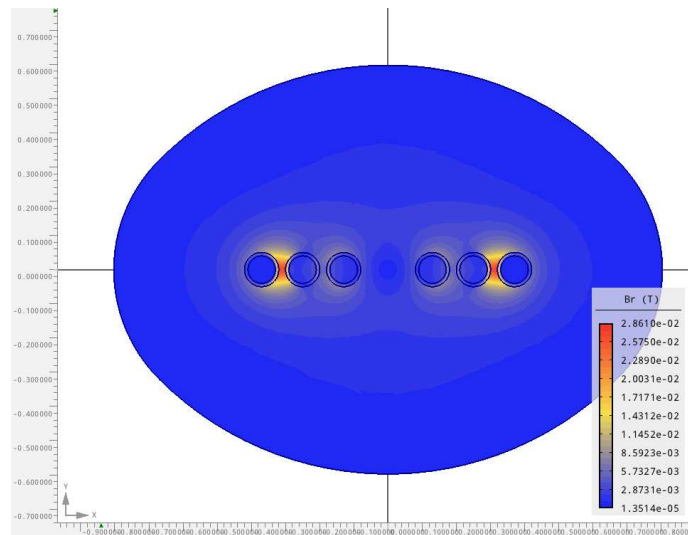
Obr. H3 Rozložení magnetické indukce (zapojení UVW - VUW)



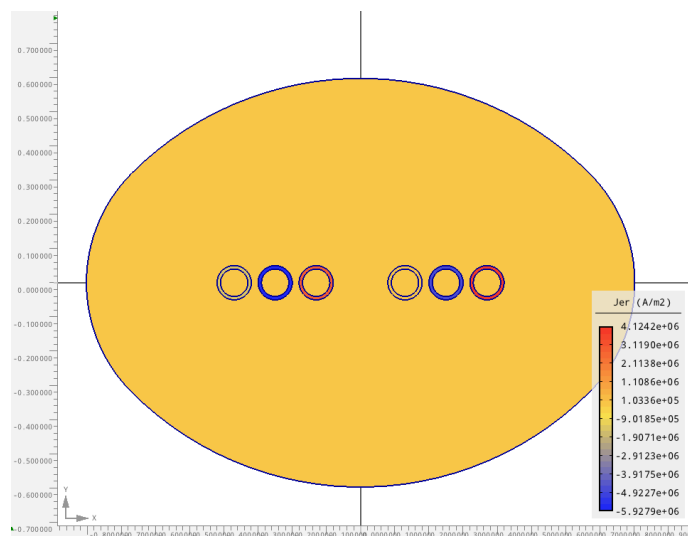
Obr. H4 Rozložení magnetické indukce (zapojení UVW - VWU)



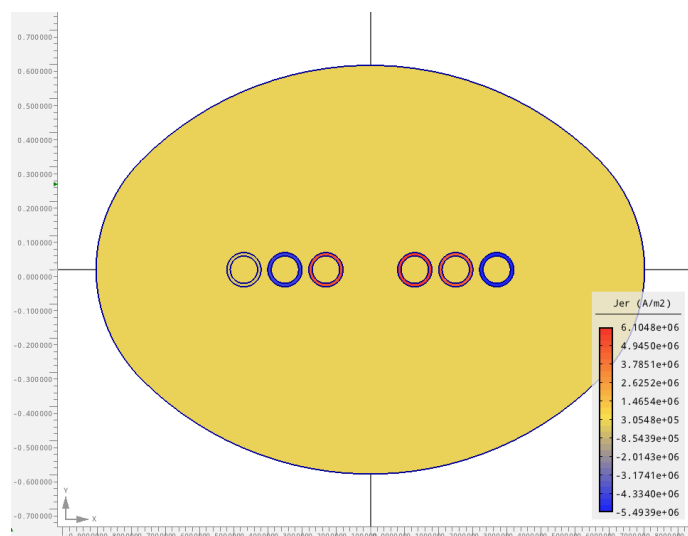
Obr. H5 Rozložení magnetické indukce (zapojení UVW - WUV)



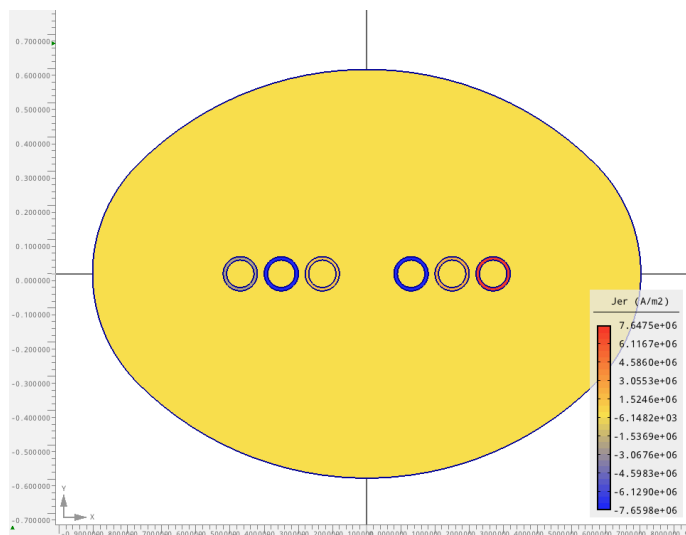
Obr. H6 Rozložení magnetické indukce (zapojení UVW - VWU)



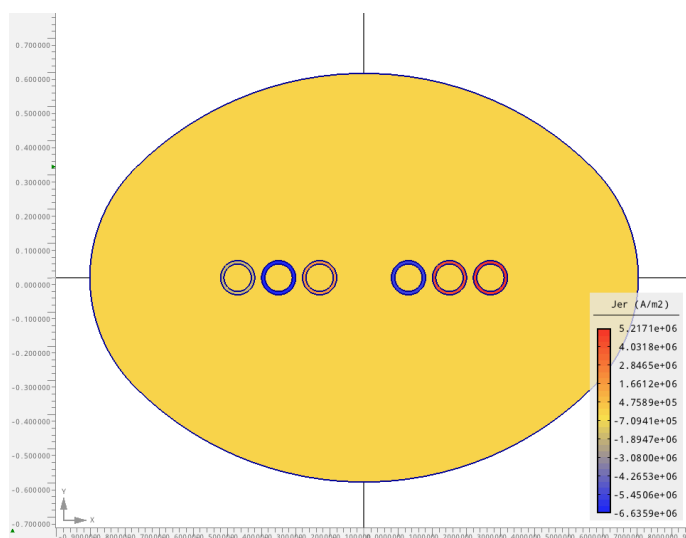
Obr. H7 Rozložení proudové hustoty (zapojení UVW - UVW)



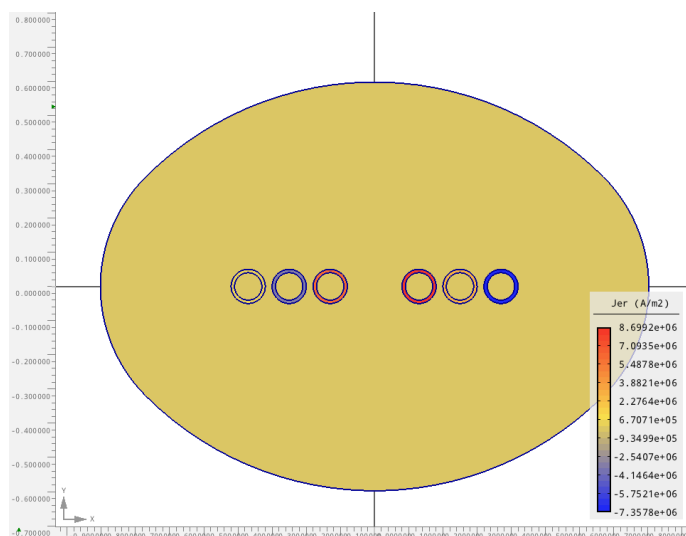
Obr. H8 Rozložení proudové hustoty (zapojení UVW - UWV)



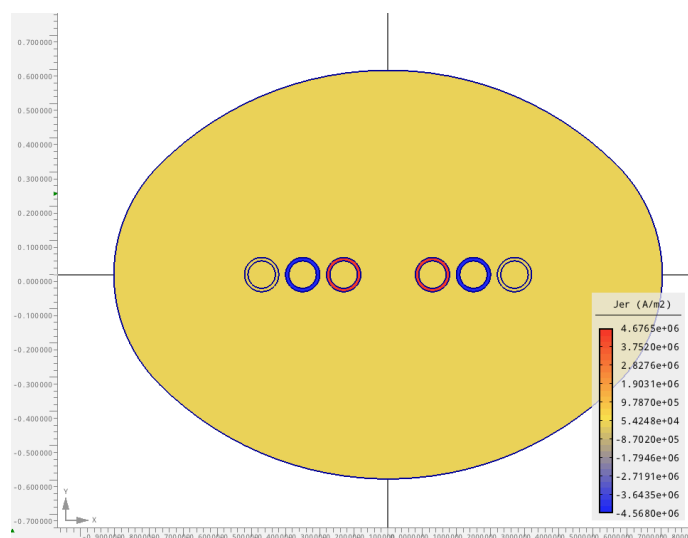
Obr. H9 Rozložení proudové hustoty (zapojení UVW - VUW)



Obr. H10 Rozložení proudové hustoty (zapojení UVW - VWU)



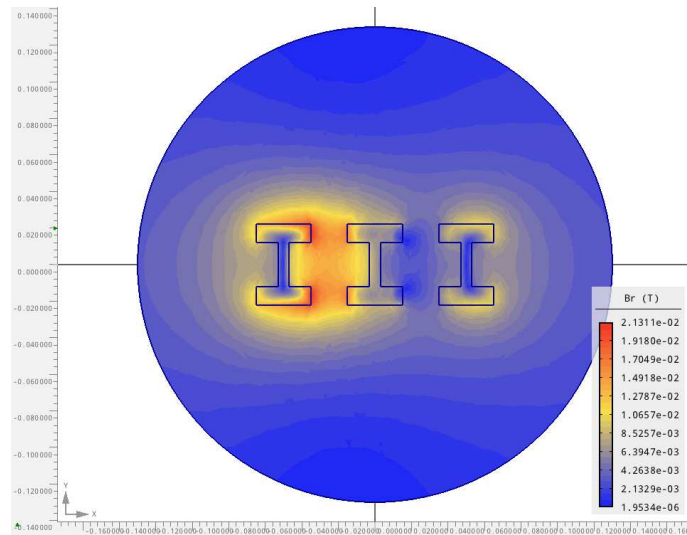
Obr. H11 Rozložení proudové hustoty (zapojení UVW - WUV)



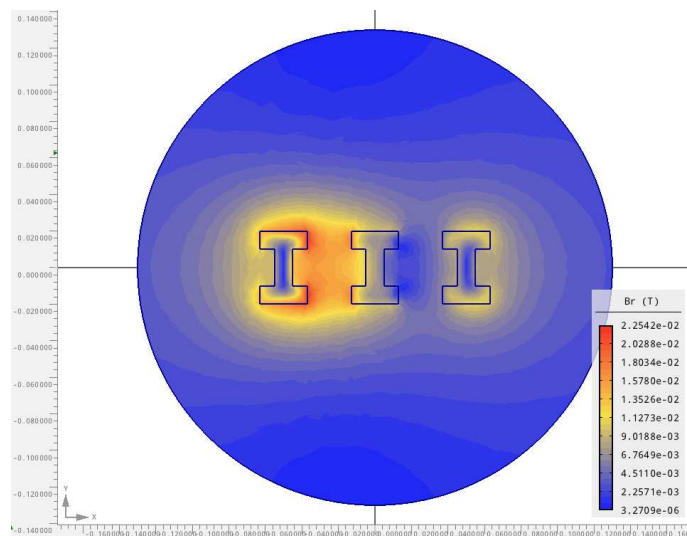
Obr. H12 Rozložení proudové hustoty (zapojení UVW - WVU)

**Příloha I**

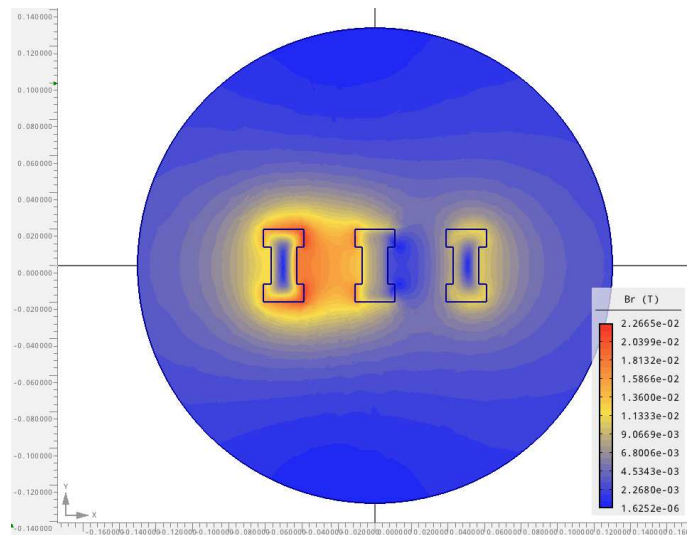
Příloha k přípojnícím z kapitoly 4.10



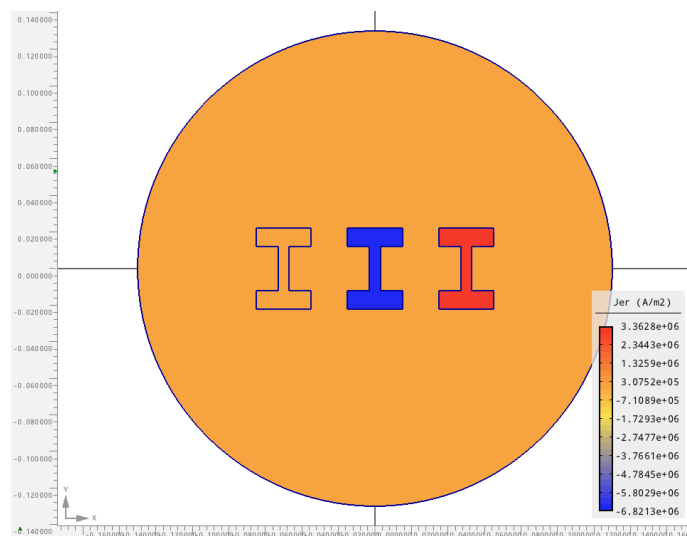
Obr. I1 Rozložení magnetické indukce (typ a)



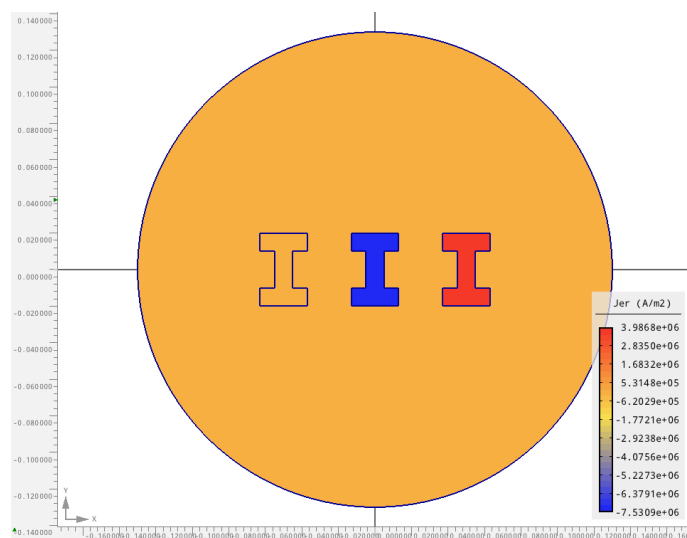
Obr. I2 Rozložení magnetické indukce (typ b)



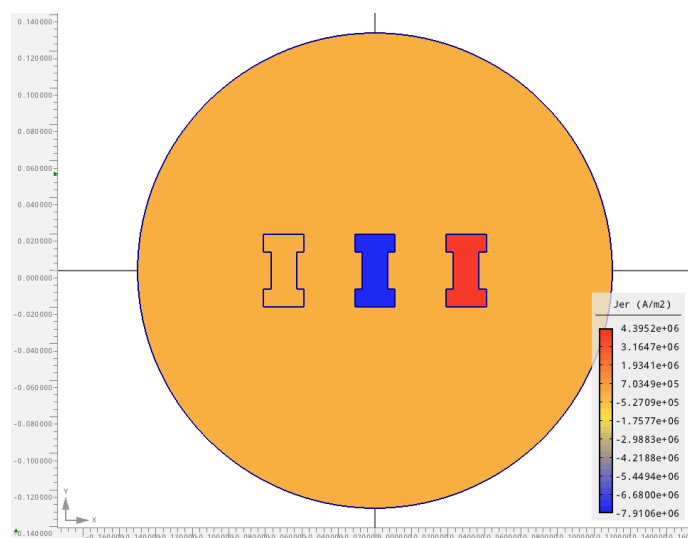
Obr. 13 Rozložení magnetické indukce (typ c)



Obr. 14 Rozložení proudové hustoty (typ a)



Obr. 15 Rozložení proudové hustoty (typ b)

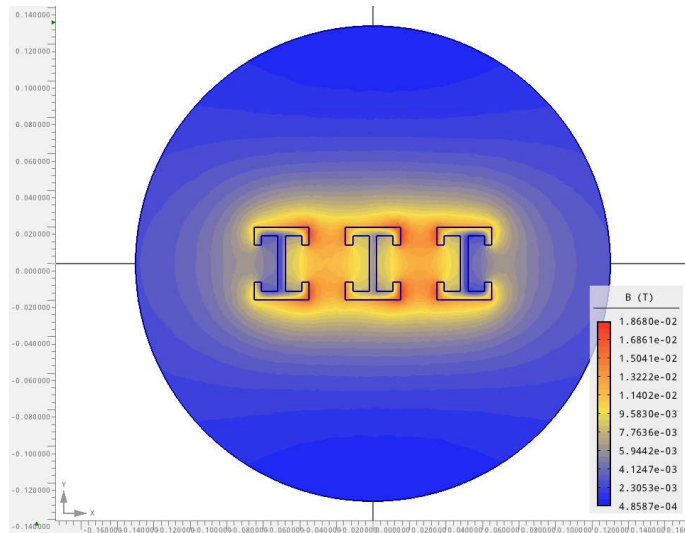


Obr. 16 Rozložení proudové hustoty (typ c)

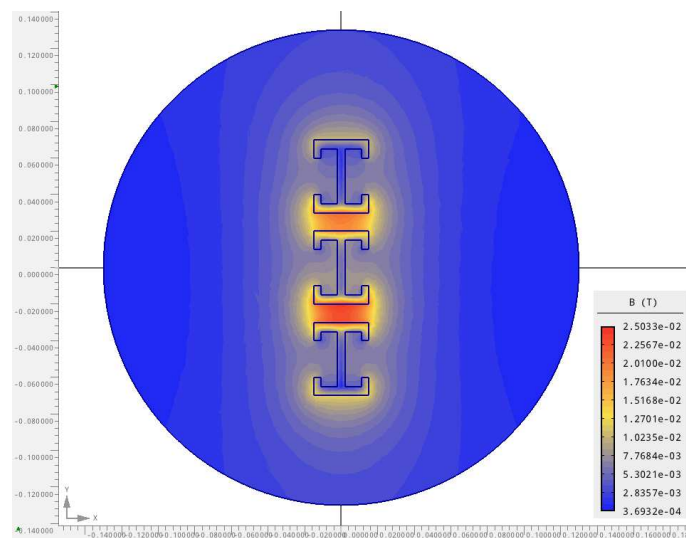


**Příloha J**

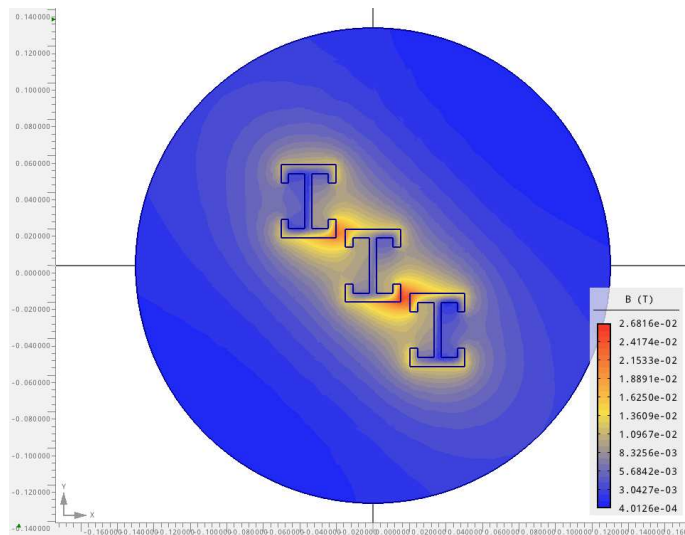
Příloha k přípojnicím z kapitoly 4.11



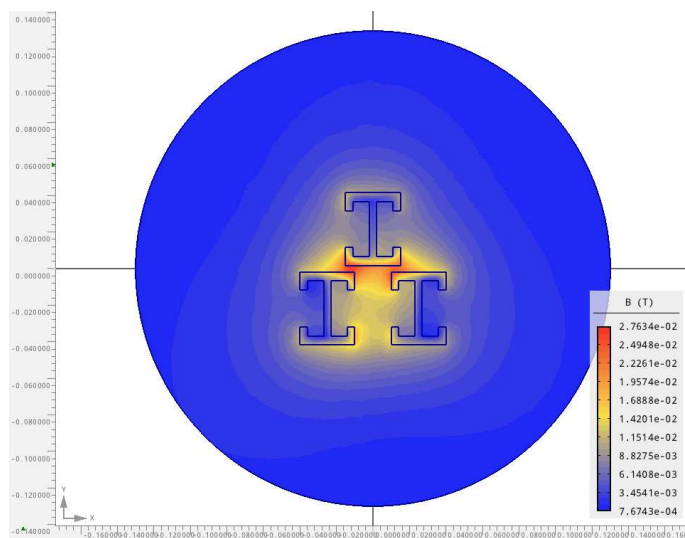
Obr. J1 Rozložení magnetické indukce (vodorovně)



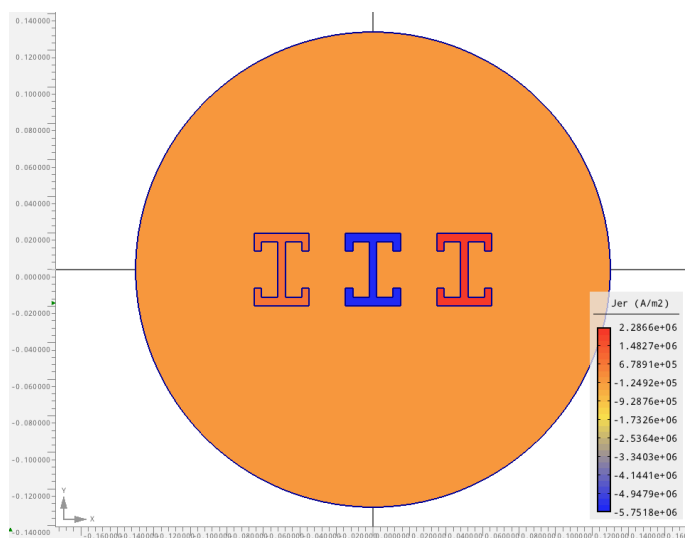
Obr. J2 Rozložení magnetické indukce (svislé)



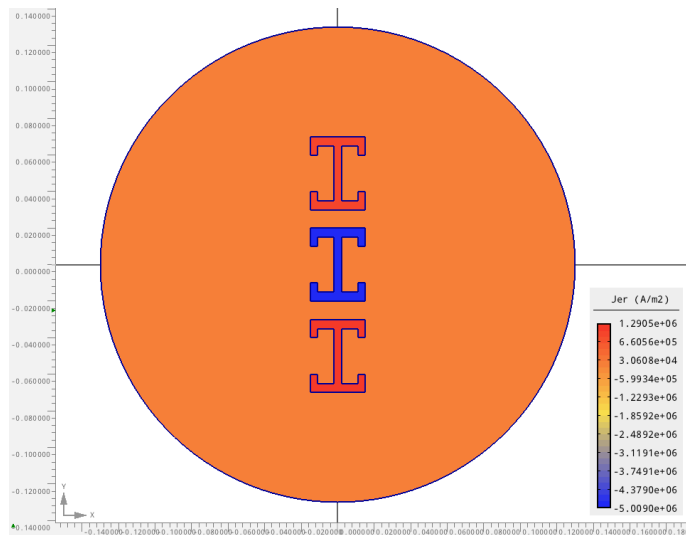
Obr. J3 Rozložení magnetické indukce (šikmé)



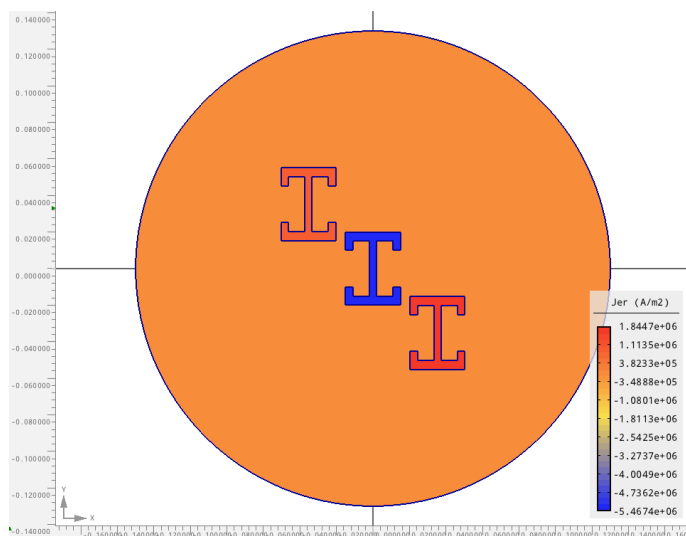
Obr. J4 Rozložení magnetické indukce (trojúhelník)



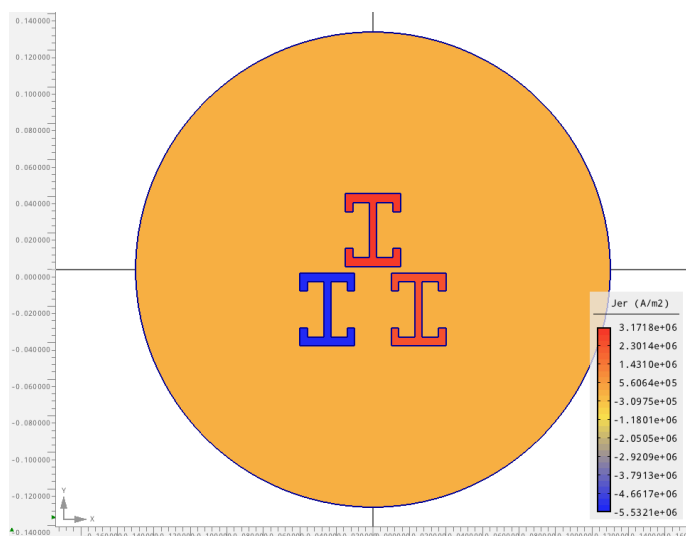
Obr. J5 Rozložení proudové hustoty (vodorovné)



Obr. J6 Rozložení proudové hustoty (svislé)



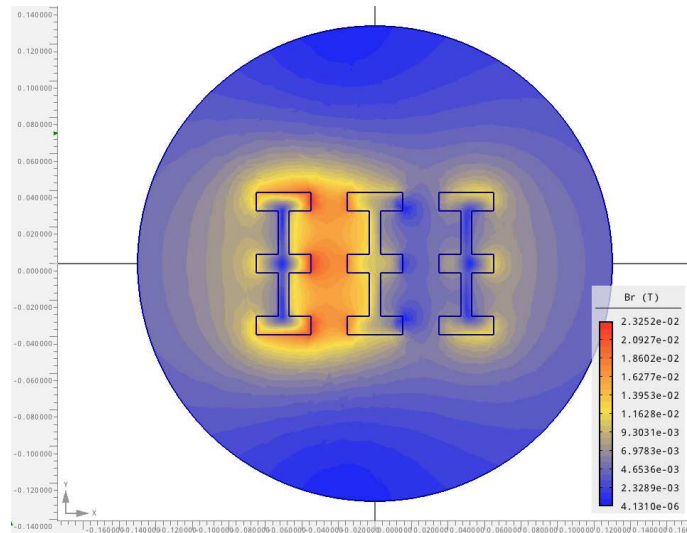
Obr. J7 Rozložení proudové hustoty (šikmé)



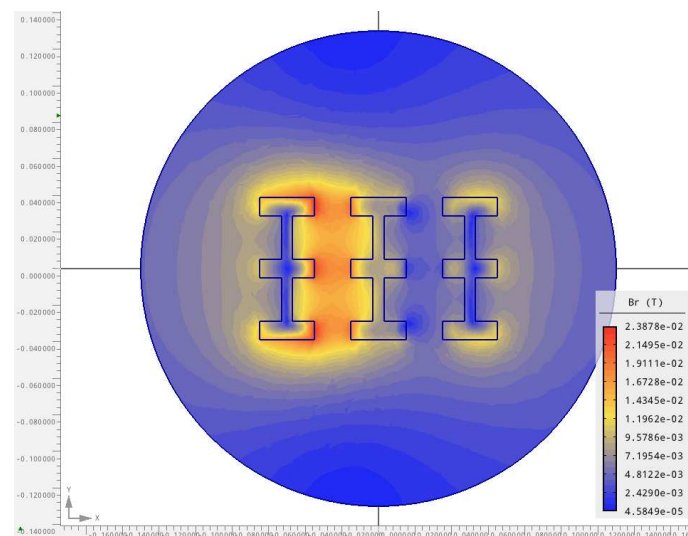
Obr. J8 Rozložení proudové hustoty (trojúhelník)

**Příloha K**

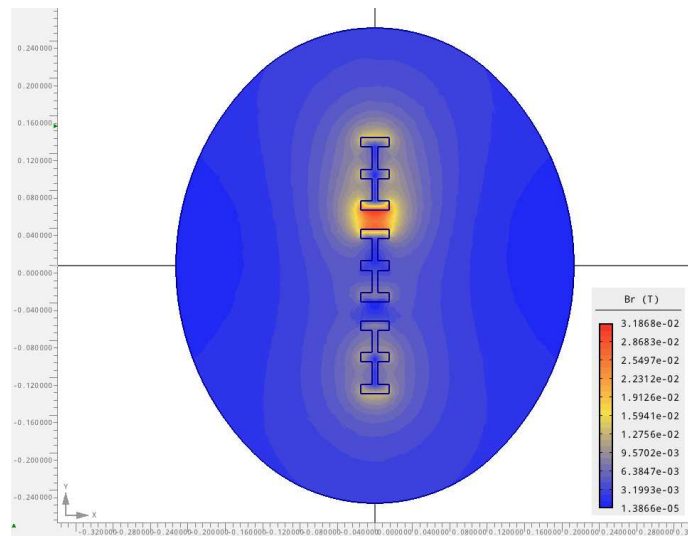
Příloha k přípojnicím z kapitoly 4.12



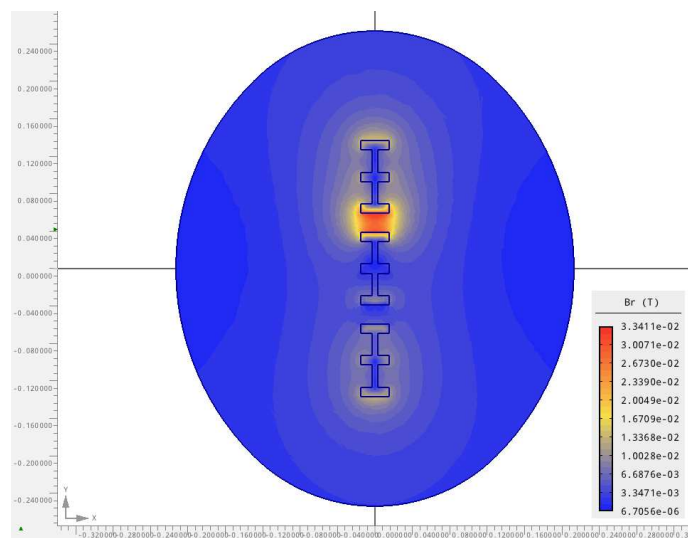
Obr. K1 Rozložení magnetické indukce (Al vodorovné)



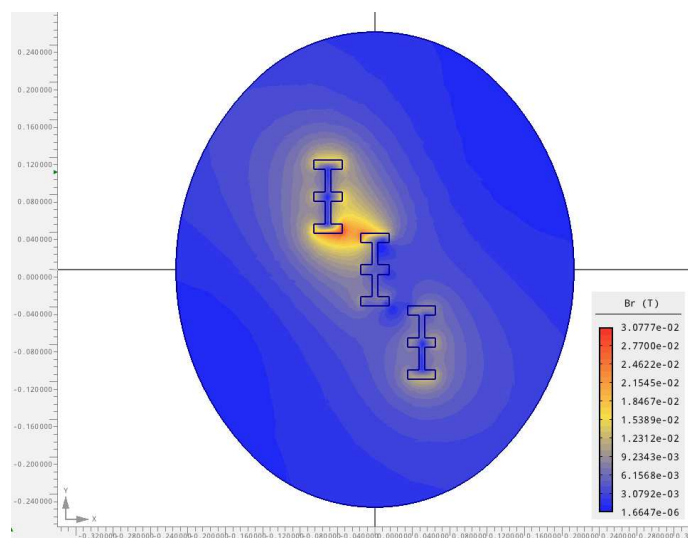
Obr. K2 Rozložení magnetické indukce (Cu vodorovné)



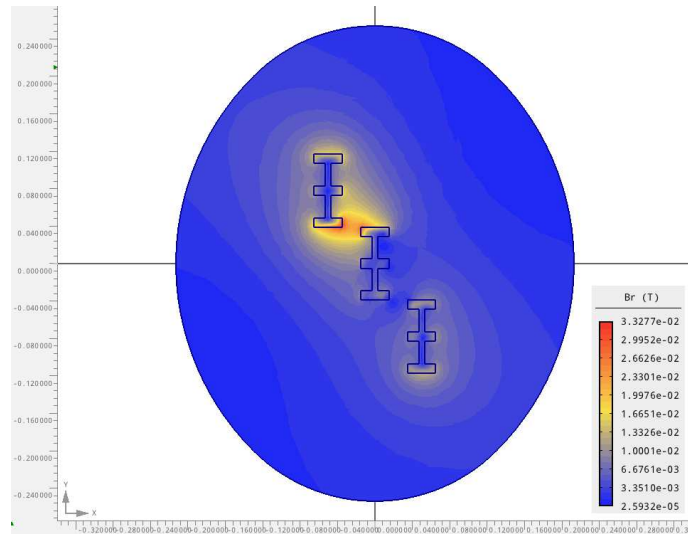
Obr. K3 Rozložení magnetické indukce (Al svislé)



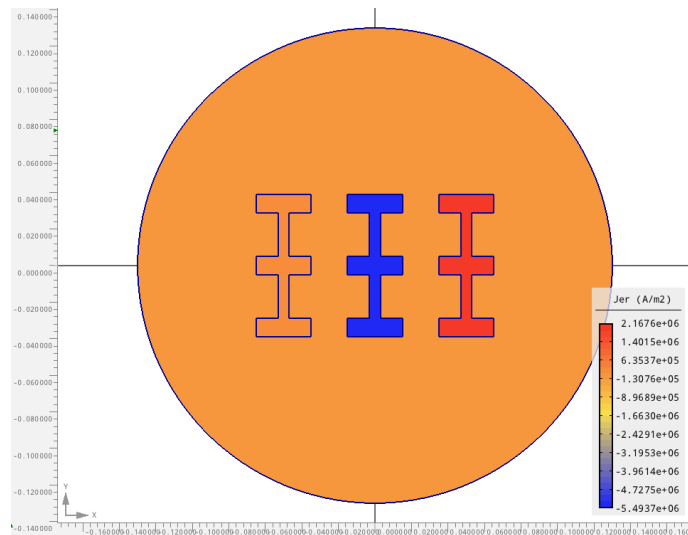
Obr. K4 Rozložení magnetické indukce (Cu svislé)



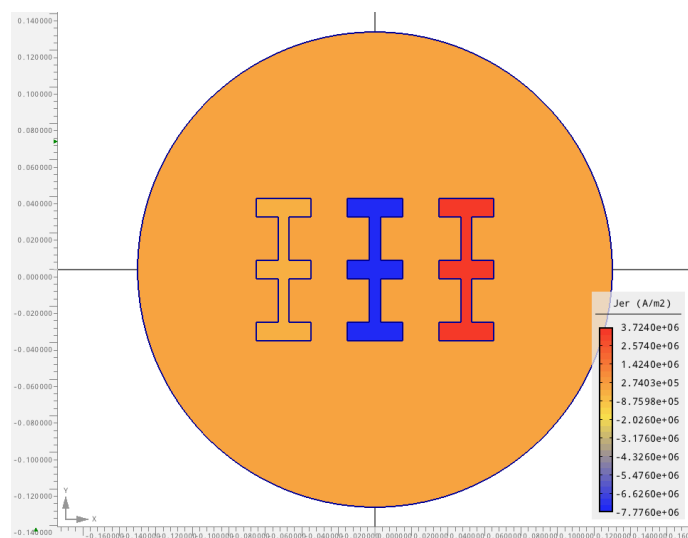
Obr. K5 Rozložení magnetické indukce (Al šikmé)



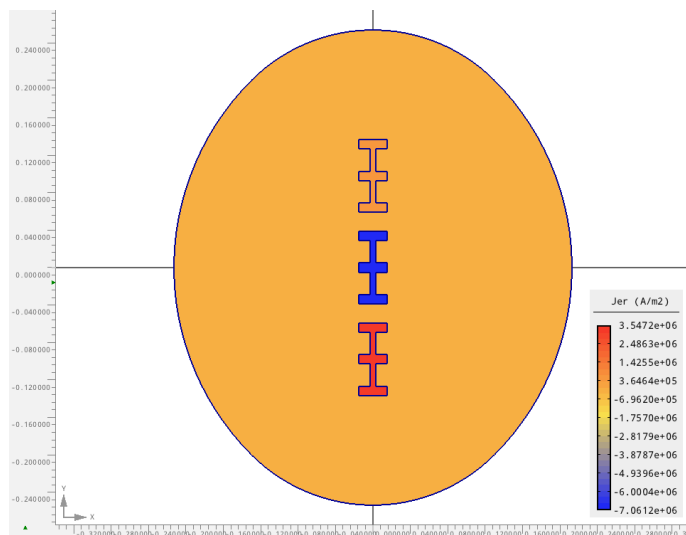
Obr. K6 Rozložení magnetické indukce (Cu šikmé)



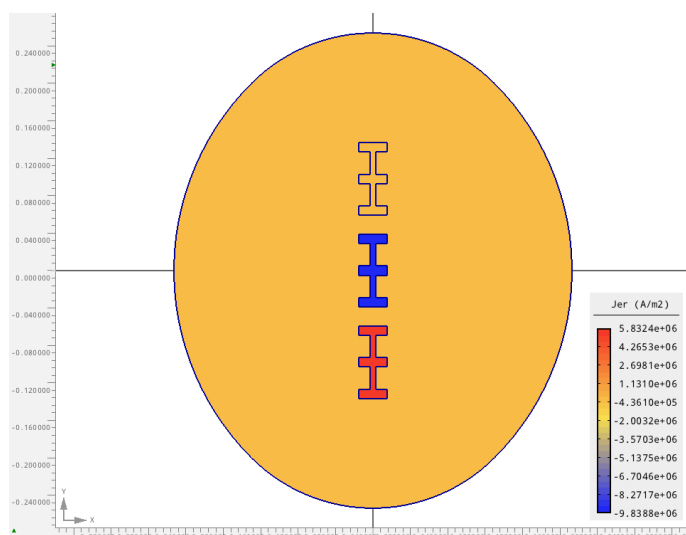
Obr. K7 Rozložení proudové hustoty (Al vodorovné)



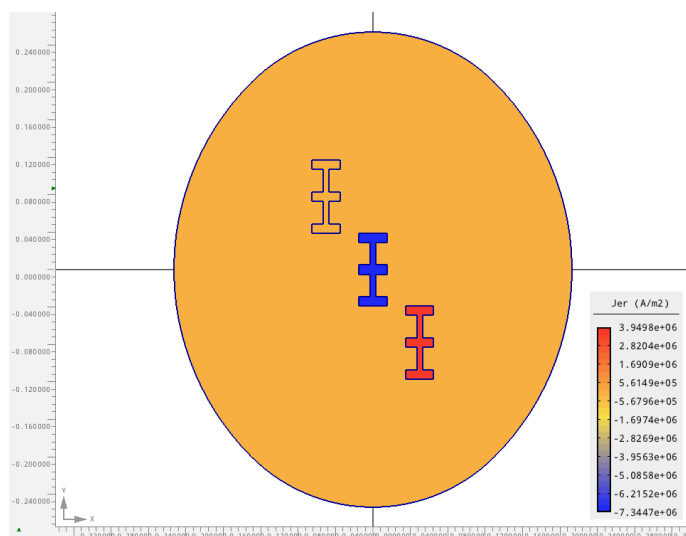
Obr. K8 Rozložení proudové hustoty (Cu vodorovné)



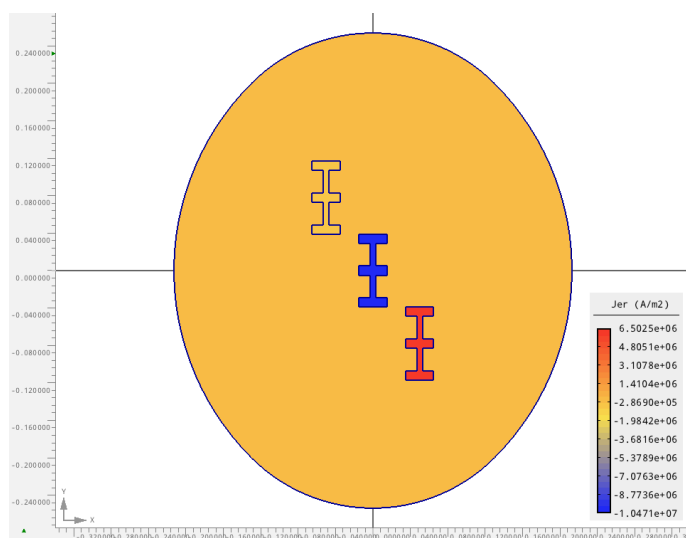
Obr. K9 Rozložení proudové hustoty (Al svislé)



Obr. K10 Rozložení proudové hustoty (Cu svislé)



Obr. K11 Rozložení proudové hustoty (Al šikmé)



Obr. K12 Rozložení proudové hustoty (Cu šikmé)