

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Elektromagnetické stínění systému bezdrátového  
přenosu elektrické energie**

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>Bc. Jiří SUCHÝ</b>
Osobní číslo:	<b>E19N0013P</b>
Studijní program:	<b>N2612 Elektrotechnika a informatika</b>
Studijní obor:	<b>Komerční elektrotechnika</b>
Téma práce:	<b>Elektromagnetické stínění systému bezdrátového přenosu elektrické energie</b>
Zadávací katedra:	<b>Katedra materiálů a technologií</b>

### Zásady pro vypracování

1. Proveďte literární rešerši v oblasti elektromagnetického stínění systémů pro bezdrátové nabíjení s ohledem na hygienické limity a standardy pro elektromobilitu.
2. Zvolte vhodný systém EM stínění pro vazební prvky v konfiguraci „double D“ a detailně popište jeho provozní vlastnosti (výhody, nevýhody, technické problémy, atd.).
3. Na základě teoretických poznatků proveďte návrh EM stínění pro konkrétní systém WPT (dle zadání vedoucího) a proveďte ověření metodou konečných prvků.
4. Vaše výsledky shrňte a formulujte důležité závěry.



Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Elektronické informační zdroje IEEE (dostupné přes knihovnu ZČU – <http://ieeexplore.ieee.org/>)

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Vladimír Kindl, Ph.D.**  
Katedra výkonové elektroniky a strojů

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**  
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**

  
**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan



  
**Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 9. října 2020

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na literární rešerši v oblasti elektromagnetického stínění systémů pro bezdrátové nabíjení s ohledem na hygienické limity a standardy pro elektromobilitu. Dále se věnuji vlastnímu návrhu WPT systému v konfiguraci „double D“ a vhodného elektromagnetického stínění. Vlastní návrh systému a porovnání typů stínění je ověřeno pomocí metody konečných prvků v programu Ansys Maxwell 3D. Závěrem práce je zhodnocení výsledků dopočítaných i nasimulovaných. Vyjádření konkrétních parametrů elektromagnetických stínění včetně vzdáleností bezpečných úrovní elektromagnetického pole dle platného standardu ICNIRP ve veřejném prostředí.

## **Klíčová slova**

Elektromagnetické stínění, bezdrátový přenos energie, double D, induktivní přenos energie, hygienické limity bezdrátového přenosu energie, elektromobilita, cívka, rezonance, sério-sériová kompenzace, feritové stínění, elektromagnetický návrh, magnetické pole, metoda konečných prvků, Ansys Maxwell 3D

## **Abstract**

The master theses presents the principles of the literature search in the field of electromagnetic shielding of systems for wireless charging with regard to hygienic limits and standard for electromobility. It discusses my own design of the WPT system in the „double D“ configuration and suitable electromagnetic shielding. The actual design of the system and the comparison of different types is verified using finite element methods in Ansys Maxwell 3D. Also, the study concludes all the important calculated and simulated results. Expression of specific parameters of electromagnetic shielding, including the distance of safe levels of the electromagnetic field according to the valid standard ICNIRP in the public environment.

## **Key words**

Electromagnetic shielding, wireless power transfer, double D, inductive power transfer, hygienic limits of wireless power transfer, electromobility, coil, resonance, serial-serial compensation, ferrite shielding, electromagnetic design, magnetic field, finite element method, Ansys Maxwell 3D

## Prohlášení

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

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



.....  
podpis

V Plzni dne 26.5.2021

Bc. Jiří Suchý

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Vladimíru Kindlovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>11</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>14</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>16</b>
<b>1 BEZDRÁTOVÝ PŘENOS ENERGIE</b> .....	<b>17</b>
1.1 HISTORIE BEZDRÁTOVÉHO PŘENOSU ENERGIE .....	17
1.2 SOUČASNÝ STAV POUŽITÍ BEZDRÁTOVÉHO PŘENOSU ENERGIE .....	18
1.2.1 <i>Bezdrátový přenos energie s induktivní vazbou</i> .....	18
1.2.2 <i>Bezdrátový přenos energie s kapacitní vazbou</i> .....	19
1.2.3 <i>Bezdrátový přenos energie s rezonanční vazbou</i> .....	19
1.3 FYZIKÁLNÍ PRINCIP FUNKCE BEZDRÁTOVÉHO PŘENOSU ENERGIE.....	20
1.3.1 <i>Vysvětlení principu funkce bezdrátového přenosu energie s induktivní vazbou</i> .....	20
<b>2 ELEKTROMAGNETICKÉ STÍNĚNÍ</b> .....	<b>22</b>
2.1 SOUČASNÝ STAV A POUŽITÍ EM STÍNĚNÍ V SYSTÉMECH ZABÝVAJÍCÍCH SE PŘENOSEM ENERGIE .....	22
2.2 FYZIKÁLNÍ PRINCIP FUNKCE EM STÍNĚNÍ.....	25
2.3 VOLBA IDEÁLNÍHO SYSTÉMU EM STÍNĚNÍ PRO VAZEBNÍ PRVKY V KONFIGURACI „DOUBLE D“ .....	26
<b>3 LEGISLATIVA A HYGIENICKÉ LIMITY</b> .....	<b>28</b>
3.1 STANDARD PRO ELEKTROMOBILITU.....	28
3.2 STANDARD PRO MOBILNÍ ELEKTRONIKU .....	28
3.3 HYGIENICKÉ LIMITY .....	30
<b>4 LITERÁRNÍ REŠERŠE ELEKTROMAGNETICKÝCH STÍNĚNÍ</b> .....	<b>34</b>
4.1 VLASTNÍ LITERÁRNÍ REŠERŠE EM STÍNĚNÍ PRO RŮZNÉ TYPY WPT SYSTÉMŮ .....	34
<b>5 VLASTNÍ NÁVRH ELEKTROMAGNETICKÉHO STÍNĚNÍ PRO NAVRŽENÝ SYSTÉM BEZDRÁTOVÉHO PŘENOSU ELEKTRICKÉ ENERGIE</b> .....	<b>39</b>
5.1 VLASTNÍ NÁVRH SYSTÉMU WPT S VAZEBNÝM PRVKEM V KONFIGURACI „DOUBLE D“ ZAPOJENÍ ....	39
5.2 VLASTNÍ NÁVRH ELEKTROMAGNETICKÉHO STÍNĚNÍ.....	48
<b>6 OVĚŘENÍ VYPOČÍTANÝCH HODNOT METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ</b> .....	<b>54</b>
6.1 SEZNÁMENÍ S MODELEM V SIMULAČNÍM PROSTŘEDÍ .....	54
6.2 NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY PRO VYPOČTENÉ TEORETICKÉ HODNOTY .....	58
6.3 FYZIKÁLNÍ POROVNÁNÍ NASIMULOVANÝCH VÝSLEDKŮ .....	62
<b>7 VYČÍSLENÍ NÁKLADŮ VLASTNÍHO NÁVRHU</b> .....	<b>72</b>
7.1 NÁKLADY VLASTNÍHO NÁVRHU ELEKTROMAGNETICKÉHO STÍNĚNÍ .....	72
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>74</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>77</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>82</b>



## Úvod

V dnešní době je vlivem své podstaty užívání fosilních paliv stále méně žádoucí a oblíbené. Hodnota znečištění ovzduší má strmě rostoucí trend, především kvůli spalování fosilních paliv, při kterém se uvolňuje oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ), metan ( $\text{CH}_4$ ) a další skleníkové plyny. Tato reakce není závadná pouze pro lidský organismus, snižuje komfort života lidí, hlavně ve velkých městech, ale především ovlivňuje životní prostředí. Můžeme dokonce pozorovat i obrovské klimatické změny naší planety jako je např. globální oteplování. Tento neblahý jev se nyní snažíme alespoň zpomalit, ale zároveň lidé nechtějí upustit od svého komfortu cestování, dovážení zboží nákladními loděmi, rychlého přemístování pomocí letecké nebo automobilové dopravy a obecně celého dopravního segmentu. I přes řadu nevýhod, jež tato varianta přepravy skýtá jako je neustálé zdražování pohonných hmot, jejich omezená kapacita, ale i vojenské konflikty o území s jejich nalezišti, je tento způsob pohonu stále světově nejpoužívanějším [1 - 3].

Alternativou k řešení tohoto problému je využití obnovitelných zdrojů energie a náhrada zastaralých motorů na bázi spalovací technologie perspektivními elektromotory. Segment dopravy využívající plně elektrická vozidla (EV) se nazývá elektromobilita a nyní patří mezi nejrychleji rostoucí koncepty současnosti [4]. K rozmachu elektromobility v dopravě přispívá také její ekologická podstata a využívání tzv. „čisté“ energie. Dokonce i automobilky patřící mezi nejzarytější zastávce spalovacích motorů mají kvůli tlaku EU vždy alespoň jeden model automobilu v elektrické verzi (např. Volkswagen, BMW, Volvo, Renault, Ford, Nissan nebo Škoda) [5 - 7].

Elektromobily dnes ještě nejsou zcela bez vad, hlavní, neustále opakovanou nevýhodou je pořizovací cena, relativně nízký dojezd nebo ne zcela připravená infrastruktura, i když v tomto ohledu se mezi sebou jednotlivé státy velice výrazně liší. Při řešení infrastruktury v elektromobilitě je jedním z hlavních kritérií volba nabíjecích stanic [8, 9]. V dnešní době se běžně vyskytují „chargery“, které poskytují možnost nabíjení pro 4 a maximálně až pro 56 elektromobilů zároveň. [10, 11]

Toto nabíjení by se dalo velmi zjednodušit a udělat uživatelsky přívětivější za použití bezdrátového přenosu energie. Představme si, že místo tahání vodičů a hledání volné

nabíjecí stanice bychom mohli akumulátor svého elektromobilu nabíjet pouhým zastavením na „vhodném“ místě a o nic víc se nestarat. Přesně takovou technologii umožňuje bezdrátový přenos energie, který má dnes už dostatečně vysokou účinnost a velikost přenášené energie, aby se tato metoda dala implementovat do praxe [12, 13]. Pomocí tohoto typu nabíjení se zvýší bezpečnost nabíjecího procesu pro uživatele při jakémkoliv počasí a komfort použití. V případě dynamického nabíjení je možností využít dokonce nabíjení za jízdy [14]. Při statickém nabíjení by se mohl elektromobil nabíjet vždy při zastavení nad vysílací částí zdroje energie [13].

Uvedením tohoto systému do praxe a řešením veškerých možných vzniklých komplikací se zabývám dále ve své práci. Hlavním cílem je návrh vhodného systému pro bezdrátový přenos energie se zadanými počátečními parametry, dále jeho stínění dle norem ICNIRP 2010 (Mezinárodní komise pro ochranu před neionizujícím zářením), aby nedocházelo k ohrožení řidiče nebo dalších osob uvnitř i vně automobilu, které by se mohly ocitnout v blízkosti magnetického pole během nabíjení. Finální verze této technologie by ideálně měla být maximálně účinná, rychlá a především bezpečná.

Dle uvážení zadaných vstupních parametrů jsem zvolil induktivní přenos energie (IPT) a konkrétně technologii s vazebnými prvky v konfiguraci „double D“, jejíž parametry jsem shledal jako nejvhodnější pro řešení této problematiky [15]. Poté je proveden výpočet parametrů pro vlastní návrh IPT a navržení veškerých dalších částí konstrukce i stínění a číselné zjištění výsledných parametrů navrženého systému. Poslední část mé práce se věnuje právě těmto získaným výsledkům, které jsem ověřil pomocí metody konečných prvků v softwaru Ansys Maxwell 3D. Veškeré výsledné nasimulované veličiny jsou doplněny popisy, schémata zapojení a grafickými závislostmi.

## Seznam symbolů a zkratek

<i>EV</i> .....	Electric Vehicle
<i>EM</i> .....	Electromagnetic
<i>EU</i> .....	European Union
<i>ICNIRP</i> .....	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
<i>IPT</i> .....	Induction Power Transfer
<i>CPT</i> .....	Capacitive Power Transfer
<i>EMI</i> .....	Electromagnetic Interference
<i>EMF</i> .....	Electromagnetic Field
<i>EMC</i> .....	Electromagnetic Compatibility
<i>WPT</i> .....	Wireless Power Transfer
<i>WPC</i> .....	Wireless Power Consortium
<i>AFA</i> .....	AirFuel Alliance
<i>PMA</i> .....	Power Matters Alliance
<i>A4WP</i> .....	Alliance for Wireless Power
<i>DD</i> .....	Double D
<i>DDQ</i> .....	Double D – Quadrature Coil
<i>Qi</i> [čí] .....	Standard pro WPT
<i>LF</i> .....	Low Frequency
<i>RM EMF</i> .....	Radiofrequency Electromagnetic Fields
<i>ESR</i> .....	Equivalent Series Resistance
<i>ESL</i> .....	Equivalent Series Inductance
<i>S – S</i> .....	Sério-Sériová (kompenzace)
<i>SW</i> .....	Software
<i>ANSYS</i> .....	Počítačový program primárně určen pro simulace
<i>MATLAB</i> .....	Matrix laboratoř
<i>FEM</i> .....	Finite Element Method
<i>SolidWorks</i> .....	Strojírenský 3D CAD software
<i>DPH</i> .....	Daň z přidané hodnoty
<i>ks</i> .....	Počet kusů
<i>avg</i> .....	Average

$f$ .....	Frekvence [Hz]
$t$ .....	Čas [s]
$L$ .....	Vlastní indukčnost [H]
$L_1, L_2$ .....	Vlastní indukčnost primárního/sekundárního stupně [H]
$M$ .....	Vzájemná indukčnost [H]
$k$ .....	Činitel vazby [-]
$R$ .....	Elektrický odpor [ $\Omega$ ]
$R_1, R_2$ .....	Elektrický odpor primárního/sekundárního stupně [ $\Omega$ ]
$R_Z$ .....	Elektrický odpor připojené zátěže [ $\Omega$ ]
$C$ .....	Elektrická kapacita [F]
$C_1, C_2$ .....	Elektrická kapacita primárního/sekundárního stupně [F]
$N$ .....	Počet závitů vodiče cívky [-]
$Z_{in}$ .....	Vstupní impedance na svorkách primárního stupně [ $\Omega$ ]
$H$ .....	Intenzita magnetického pole [A/m]
$B$ .....	Indukce magnetického pole [T]
$H_C$ .....	Koercitivní intenzita magnetického pole [A/m]
$B_r$ .....	Remanentní indukce magnetického pole [T]
$H_0$ .....	Původní intenzita magnetického pole [A/m]
$H_x$ .....	Intenzita magnetického pole v hloubce $x$ [A/m]
$\delta$ .....	Hloubka vniku [m]
$\rho$ .....	Měrný odpor vodiče [ $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ]
$\omega$ .....	Úhlová frekvence [rad/s]
$\mu$ .....	Permeabilita obecně [H/m]
$\mu_0$ .....	Permeabilita vakua [H/m]
$\mu_r$ .....	Relativní permeabilita materiálu [H/m]
$d$ .....	Tloušťka stínící stěny [m]
$p$ .....	Koeficient vířivých proudů [-]
$\eta$ .....	Účinnost [%]
$l$ .....	Vzdálenost [m]
$T$ .....	Teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\varepsilon_r$ .....	Relativní permitivita [F/m]
$H_L$ .....	Limitní hodnota intenzity magnetického pole udána ICNIRP [A/m]
$B_L$ .....	Limitní hodnota indukce magnetického pole udána ICNIRP [T]
$U_{bat}$ .....	Výstupní napětí systému WPT dodávané do akumulátoru [V]

---

$P_{bat}$ .....	Výstupní činný výkon systému WPT [W]
$d_{LIC}$ .....	Průměr vodiče cívky [m]
$S_{LIC}$ .....	Průřez vodiče cívky [m <sup>2</sup> ]
$J$ .....	Prostorová hustota elektrického proudu vodiče [A/mm <sup>2</sup> ]
$h_C$ .....	Výška vinutí cívky [m]
$S$ .....	Zdánlivý výkon [VA]
$P$ .....	Činný výkon obecná hodnota [W]
$X_L$ .....	Induktivní reaktance [ $\Omega$ ]
$X_C$ .....	Kapacitní reaktance [ $\Omega$ ]
$f_0$ .....	Rezonanční frekvence [Hz]
$h$ .....	Hloubka materiálu [m]
$B_{MAX-FER}$ .....	Hodnota magnetické indukce uvnitř feritového stínění [T]
$\eta$ .....	Hodnota účinnosti přenosu daného systému [-]
$\eta_{TEORETICKÁ}$ .....	Hodnota účinnosti přenosu daného systému zjištěna výpočtem [-]
$\eta_{REAL}$ .....	Hodnota účinnosti přenosu daného systému zjištěna simulací [-]

## Seznam obrázků

OBRÁZEK 1: SCHÉMA ZAPOJENÍ SYSTÉMU WPT S INDUKTIVNÍ VAZBOU V SÉRIO- SÉRIOVÉ KOMPENZAČNÍ TOPOLOGII .....	20
OBRÁZEK 2: PRINCIP FUNKCE STÍNĚNÍ MAGNETOSTATICKÉHO POLE [29] .....	23
OBRÁZEK 3: ZNÁZORNĚNÍ PRINCIPU FUNKCE STÍNĚNÍ STRÍDAVÉHO MAGNETICKÉHO POLE .....	24
OBRÁZEK 4: ILUSTRACNÍ GRAFICKÉ ROZVŽENÍ TOPOLOGIE WPT SYSTÉMU S ELEKTROMAGNETICKÝM STÍNĚNÍM VE TRIMETRICKÉM POHLEDU ZNÁZORNĚNÉM V PROSTŘEDÍ PROGRAMU SOLIDWORKS 3D CAD .....	27
OBRÁZEK 5: ZOBRAZENÍ NÁVRHU EM STÍNĚNÍ OBSAHUJÍCÍHO FERITOVÉ I HLINÍKOVÉ STÍNĚNÍ [47] .....	35
OBRÁZEK 6: UKÁZKA NAVRŽENÉHO STÍNĚNÍ KOMBINUJÍCÍHO FERITOVÉ TYČE SE ZAKONČENÍM S DESTIČKAMI A HLINÍKOVÝM PLÁTEM [13].....	36
OBRÁZEK 7: HUSTOTA ROZPTYLOVÉHO TOKU SYSTÉMU S VÝKONEM 11 kW PŘI POHLEDU ZEPŘEDU [13].....	36
OBRÁZEK 8: ZJEDNODUŠENÝ MODEL DD VČETNĚ SMĚRU TOKU (VLEVO) A NAVRŽENÁ TOPOLOGIE STÍNĚNÍ Z FERITOVÝCH TYČÍ (VPRAVO) [50].....	37
OBRÁZEK 9: ZNÁZORNĚNÍ GRAFICKÉ ZÁVISLOSTI VELIKOSTI VZDUCHOVÉ MEZERY VZHLEDEM K ČINITELI VAZBY $k$ A VÝKONU $P_{SU}$ [50].....	37
OBRÁZEK 10: NÁVRH AL-FERITOVÉHO EM STÍNĚNÍ WPT SYSTÉMU [40] .....	38
OBRÁZEK 11: ILUSTRACNÍ ZNÁZORNĚNÍ ROZMĚRŮ JEDNOHO PÁRU VINUTÍ V DD ZE SW ANSYS MAXWELL 3D .....	41
OBRÁZEK 12: SCREEN Z ANALÝZY ZNÁZORŇUJÍCÍ PARAMETR ČINITELE VAZBY $k$ PRO $L = 150$ MM.....	42
OBRÁZEK 13: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ KONFIGURACE SYSTÉMU WPT S DC-DC MĚNÍČEM .....	45
OBRÁZEK 14: UKÁZKA TOPOLOGIE PLNÉHO FERITOVÉHO STÍNĚNÍ S TLOUŠTKOU $H = 14$ MM A HLINÍKOVÝM PLÁTEM.....	50
OBRÁZEK 15: UKÁZKA TOPOLOGIE FERITOVÉHO STÍNĚNÍ TVOŘENÉHO TYČEMI S TLOUŠTKOU $H = 14$ MM A HLINÍKOVÝM PLÁTEM.....	51
OBRÁZEK 16: UKÁZKA TOPOLOGIE FERITOVÉHO STÍNĚNÍ S OBDĚLNÍKOVÝMI VÝŘEZY, TLOUŠTKOU $H = 14$ MM A HLINÍKOVÝM PLÁTEM.....	51
OBRÁZEK 17: UKÁZKA TOPOLOGIE TYČOVÉHO FERITOVÉHO STÍNĚNÍ SE ZAKONČENÍMI, TLOUŠTKOU $H = 14$ MM A HLINÍKOVÝM PLÁTEM.....	52
OBRÁZEK 18: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ TOPOLOGIE DOUBLE D CÍVEK V PRACOVNÍM PROSTŘEDÍ SW ANSYS MAXWELL 3D PRO VZDÁLENOST CÍVEK $L_I = 150$ MM.....	55
OBRÁZEK 19: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ POZICE FERITOVÉHO STÍNĚNÍ VZHLEDEM K VINUTÍ Z PRACOVNÍHO PROSTŘEDÍ SW ANSYS MAXWELL 3D PRO VZDÁLENOST CÍVEK $L_I = 150$ MM .....	55
OBRÁZEK 20: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ SYSTÉMU WPT Z PRACOVNÍHO PROSTŘEDÍ ANSYS MAXWELL 3D, ZAHRNÚJÍCÍHO TOPOLOGII CÍVEK DOUBLE D A FERITOVÉ I HLINÍKOVÉ STÍNĚNÍ PRO VZDÁLENOST CÍVEK $L_I = 150$ MM .....	56
OBRÁZEK 21: SCHEMATICKÉ ZOBRAZENÍ EXTERNÍHO OBVODU Z PROGRAMU ANSYS MAXWELL 3D VČETNĚ DOPOČÍTANÝCH VELIČIN PRO VZDÁLENOST CÍVEK $L_I = 150$ MM .....	56
OBRÁZEK 22: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ZÁVISLOSTI INDUKČNOSTI NA ZVÝŠUJÍCÍM SE POČTU ZÁVITŮ $N$ PRO CÍVKY SE VZDÁLENOSTÍ $L_I = 150$ MM VYTVOŘENÉ V PROGRAMU MATLAB .....	57
OBRÁZEK 23: GRAFICKÁ ZÁVISLOST VSTUPNÍHO PROUDU A NAPĚTÍ V ČASOVÉM ÚSEKU $t = 0 - 90$ MS .....	58
OBRÁZEK 24: DETAIL GRAFICKÉHO PRŮBĚHU VSTUPNÍHO A VÝSTUPNÍHO ČINNÉHO VÝKONU SIMULOVANÉHO V PROGRAMU ANSYS SIMPLORER DESIGN PRO HODNOTY VYPOČÍTANÉ PRO VZDÁLENOST CÍVEK $L_I = 150$ MM.....	59
OBRÁZEK 25: DETAIL GRAFICKÉHO PRŮBĚHU VSTUPNÍHO A VÝSTUPNÍHO ČINNÉHO VÝKONU SIMULOVANÉHO V PROGRAMU ANSYS SIMPLORER DESIGN PRO HODNOTY VYPOČÍTANÉ PRO VZDÁLENOST CÍVEK $L_2 = 200$ MM.....	60
OBRÁZEK 26: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ VYKRESLENÉ MAGNETICKÉ INDUKCE V OKOLÍ WPT SYSTÉMU SE VZDÁLENOSTÍ CÍVEK $L_I = 150$ MM PRO PLNÉ FERITOVÉ STÍNĚNÍ S $H = 14$ MM .....	62
OBRÁZEK 27: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ VYKRESLENÉ MAGNETICKÉ INTENZITY V OKOLÍ WPT SYSTÉMU SE VZDÁLENOSTÍ CÍVEK $L_I = 150$ MM PRO PLNÉ FERITOVÉ STÍNĚNÍ S $H = 14$ MM .....	63
OBRÁZEK 28: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ VYKRESLENÉ MAGNETICKÉ INDUKCE V OKOLÍ WPT SYSTÉMU SE VZDÁLENOSTÍ CÍVEK $L_I = 150$ MM PRO TYČOVÉ FERITOVÉ STÍNĚNÍ S $H = 14$ MM.....	64
OBRÁZEK 29: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ VYKRESLENÉ MAGNETICKÉ INTENZITY V OKOLÍ WPT SYSTÉMU SE VZDÁLENOSTÍ CÍVEK $L_I = 150$ MM PRO TYČOVÉ FERITOVÉ STÍNĚNÍ S $H = 14$ MM.....	65
OBRÁZEK 30: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ VYKRESLENÉ MAGNETICKÉ INDUKCE V OKOLÍ WPT SYSTÉMU SE VZDÁLENOSTÍ CÍVEK $L_I = 150$ MM PRO TYČOVÉ FERITOVÉ STÍNĚNÍ ZAKONČENÉ Z OBOU STRAN S $H = 14$ MM	

.....	66
OBRÁZEK 31: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ VYKRESLENÉ MAGNETICKÉ INTENZITY V OKOLÍ WPT SYSTÉMU SE VZDÁLENOSTÍ CÍVEK $L_I = 150$ MM PRO TYČOVÉ FERITOVÉ STÍNĚNÍ ZAKONČENÉ Z OBOU STRAN S $H = 14$ MM .....	67
OBRÁZEK 32: SCREEN ZE SW ANSYS MAXWELL 3D ZNÁZORŇUJÍCÍ SYCENÍ FERITU V TYČOVÉM STÍNĚNÍ SE ZAKONČENÍM Z OBOU STRAN A Z POHLEDU DIMETRIC (3D) .....	70
OBRÁZEK 33: SCREEN ZE SW ANSYS MAXWELL 3D ZNÁZORŇUJÍCÍ SYCENÍ FERITU V TYČOVÉM STÍNĚNÍ SE ZAKONČENÍM Z OBOU STRAN A Z POHLEDU SHORA.....	70

## Seznam tabulek

TABULKA 1: LIMITNÍ ÚROVNĚ VNĚJŠÍHO ELEKTRICKÉHO A MAGNETICKÉHO POLE PRO VEŘEJNÉ PROSTŘEDÍ ..	31
TABULKA 2: LIMITNÍ ÚROVNĚ VNĚJŠÍHO ELEKTRICKÉHO A MAGNETICKÉHO POLE PRO PRACOVNÍ PROSTŘEDÍ.	32
TABULKA 3: POČÁTEČNÍ URČENÉ PARAMETRY NAVRHOVANÉHO WPT SYSTÉMU .....	39
TABULKA 4: PŘEHLED HODNOT DOPOČÍTANÝCH ÚČINNOSTÍ PŘENOSU DANÉHO SYSTÉMU WPT PRO RŮZNÁ NAPÁJECÍ NAPĚTÍ PŘI STANDARDIZOVANÉ FREKVENCII DLE SAE TIR J2954 .....	44
TABULKA 5: SOUHRNNÉ ZOBRAZENÍ DOPOČÍTANÝCH HODNOT SYSTÉMU WPT PRO OBĚ ZVOLENÉ VZDÁLENOSTI CÍVEK .....	47
TABULKA 6: CENOVÝ PŘEPOČET PRVKU FERITOVÉHO STÍNĚNÍ DLE ODEBRANÉHO MNOŽSTVÍ .....	49
TABULKA 7: SOUHRNNÝ PŘEHLED ÚČINNOSTÍ PŘENOSU WPT SYSTÉMU URČENÝCH VÝPOČTEM NEBO SIMULACÍ .....	60
TABULKA 8: VÝSLEDNÉ HODNOTY VZDÁLENOSTÍ BEZPEČNÉ ÚROVNĚ MAGNETICKÉHO POLE PRO TESTOVANÉ TYPY ELEKTROMAGNETICKÉHO STÍNĚNÍ VE VZÁJEMNÉ VZDÁLENOSTI CÍVEK $L_1 = 150$ MM .....	68
TABULKA 9: VÝSLEDNÉ HODNOTY VZDÁLENOSTÍ BEZPEČNÉ ÚROVNĚ MAGNETICKÉHO POLE PRO TESTOVANÉ TYPY ELEKTROMAGNETICKÉHO STÍNĚNÍ VE VZÁJEMNÉ VZDÁLENOSTI CÍVEK $L_2 = 200$ MM .....	68
TABULKA 10: ŘAZENÍ JEDNOTLIVÝCH TYPŮ NAVRŽENÝCH ELEKTROMAGNETICKÝCH STÍNĚNÍ DLE STÍNÍCÍCH VLASTNOSTÍ .....	69
TABULKA 11: SOUHRNNÝ PŘEHLED VŠECH HODNOT MAGNETICKÉ INDUKCE UDÁVAJÍCÍCH SYCENÍ FERITŮ PRO VEŠKERÁ STÍNĚNÍ V OBOU TESTOVANÝCH VZÁJEMNÝCH VZDÁLENOSTECH CÍVEK WPT SYSTÉMU .....	71
TABULKA 12: SOUHRNNÝ PŘEHLED NÁKLADŮ JEDNOTLIVÝCH NAVRŽENÝCH STÍNĚNÍ UDÁVAJÍCÍ JEDNOTKOVOU I CELKOVOU CENU UPRAVENOU DLE POČTU POTŘEBNÝCH KUSŮ FERITOVÝCH BLOKŮ MATERIÁLU N97 .....	72



# 1 Bezdrátový přenos energie

Bezdrátový přenos energie je znám především v anglicky psané literatuře pod názvem Wireless Power Transfer (WPT). Tato technologie se v současnosti opět dostává do hledáčku nejen běžných spotřebitelů, a to i přes fakt, že její princip je znám už desítky let. V této kapitole se zaměřím na historický vývoj tohoto přenosu a následně představím jeho současné využití. Úplným závěrem kapitoly vysvětlím podstatu fyzikálního principu WPT systému s induktivní vazbou, který je využit při návrhu v této práci [12, 26].

## 1.1 Historie bezdrátového přenosu energie

První teoretický náznak o existenci WPT byl zaznamenán krátce po tom, co roku 1820 André-Maria Ampère stanovil tzv. „Ampérův zákon“ pojednávající o vytvoření elektromagnetického pole kolem vodiče, kterým prochází elektrický proud. V návaznosti na něm přišel roku 1831 pan Michael Faraday s tvrzením, že v uzavřeném elektrickém obvodu vzniká vlivem změny indukčního toku elektrické napětí. Tento jev nazval Faradayův zákon elektromagnetické indukce a dal tím teoretický základ všem jeho pokračovatelům.

Realizace bezdrátového přenosu energie je datována ke druhé polovině devatenáctého století a jejím vynálezcem není nikdo jiný než jeden z největších inovátorů a průkopníků techniky, Nikola Tesla. Tento ambiciózní srbský fyzik, vynálezce a konstruktér, se zasloužil o mnoho jedinečných objevů a nápadů, které nebyly dodnes překonány. Jedním z jeho největších inovativních nápadů bylo vytvoření konstrukce bezdrátového přenosu energie. Tuto myšlenku dále rozvíjel a pokoušel se s ní prorazit už za svého života. Jeho snem nebylo nic menšího než bezplatná a zcela bezdrátová distribuce elektrické energie získávané z obnovitelných zdrojů, na kterémkoliv místě na naší planetě. Pro ověření této své teze vytvořil i několik funkčních prototypů. Jedním z jeho experimentů byl bezdrátový přenos energie pomocí vysokofrekvenčních transformátorů pracujících na rezonančním principu (jimž dnes náleží jeho jméno), kde docházelo k vysílání energetických výbojů až do vzdálenosti desítek metrů. I přes neoddiskutovatelný úspěch tohoto experimentu se Tesla ihned dále věnoval plánování dalšího pokusu bezdrátového přenosu elektrické energie. Jeho další experiment přenosu WPT měl být

tentokrát testován přes Atlantický oceán. Výzkum této varianty přenášení elektrické energie se ale bohužel na dlouhou dobu zastavil. Jako důvod byl uveden špatný poměr vysoké pořizovací ceny k přenesenému výkonu a ne zcela uspokojivá účinnost. Pravým důvodem k zastavení práce v této problematice byl příkaz Teslova sponzora, který byl v přímém konfliktu s bezdrátovým přenosem, neboť jeho hlavní podnikatelskou činností byla výroba a prodej měděných vodičů. Od tohoto okamžiku se vývoj WPT zastavil na bezmála čtyřicet let.

Dalšího pokroku se bezdrátový přenos energie dočkal až během druhé světové války, když byl ve formě elektromagnetických vln používán pro účely zjištění nepřátelských letadel, zastával funkci prvního radaru.

Zlepšení systému WPT se podařilo dosáhnout v roce 1983, kdy jej Charles Walton využil v technologii RFID čtečky. Tento koncept byl nadále zdokonalován několik desítek let, dokud v roce 2007 tým výzkumníků amerického MIT nepřišel s první plně funkční konstrukcí.

## 1.2 Současný stav použití bezdrátového přenosu energie

V současné době se technologie WPT opět dostává do popředí a její možnosti využití raketově přibývají. Nejvíce se využití této technologie uplatňuje ve dvou hlavních oblastech, kterými jsou elektromobilita a mobilní elektronika. Tento druh přenosu energie je využíván s nejrůznějšími druhy konstrukčních řešení a vazeb.

### 1.2.1 Bezdrátový přenos energie s induktivní vazbou

Celkem existují tři hlavní způsoby bezdrátového přenosu energie z hlediska využití různých vazeb. Nejpoužívanějším je v současnosti IPT, který se využívá v širokém spektru produktů od mobilní elektroniky, až po nabíjení EV [16]. K realizaci bezdrátového přenosu energie je zde vytvářeno magnetické pole, které vzniká ve vzduchové mezeře mezi primární a sekundární částí vinutí. Celý tento koncept se uvádí do praxe a dosahuje dostačující úrovně přenášených výkonů a účinnosti vztažených k pracovní vzdálenosti cívek. Přenosová vzdálenost je nejčastěji volena v řádu desítek centimetrů z důvodu téměř ideální účinnosti přenosu energie. Dalším důležitým prvkem tohoto systému, se kterým je potřeba uvažovat, je možnost vyosení cívek vysílače a přijímače. Při vychýlení cívek

z osové souměrnosti dochází k rozladění vlastností systému, a proto se snažíme této situaci vyvarovat. Jedním ze způsobů je například maximalizace velikosti cívek nebo přesné umístění (např. místo parkovacího stání) [13, 17].

### 1.2.2 Bezdrátový přenos energie s kapacitní vazbou

Systém využívající kapacitní přenos energie (CPT) má oproti IPT systému řadu výhod. Jednou z nejvýznamnějších je schopnost pronikat skrze kovy, také má nízké výkonové ztráty a menší elektromagnetické rušení (EMI). V této době se o CPT systémy neprojevuje příliš velký zájem v rámci analýzy nebo návrhu, a to z důvodu omezeného porozumění systému [18].

V současnosti se tato technologie nejvíce využívá v oboru biomedicínského mikrosystému, kde je bezdrátové rozhraní nutností. Při tomto způsobu použití máme možnost plně čerpat z výhod kapacitní vazby, tato metoda nám slouží jako zajímavá alternativa k bezdrátovému propojení s implementovanými biomedicínskými mikrosystémy [19, 20]. Další uplatnění našly systémy s kapacitním přenosem energie při nabíjení spotřební a nositelné elektroniky. Do výčtu těchto zařízení spadají mobilní telefony, MP3 přehrávače, chytré hodinky a mnoho dalších [21].

I přes úspěch systémů s bezdrátovým přenosem energie za pomoci kapacitní vazby ve výše zmíněných odvětvích musím konstatovat, že své uplatnění na poli výkonové elektroniky stále hledají a využití pro velké výkony zatím postrádají.

### 1.2.3 Bezdrátový přenos energie s rezonanční vazbou

Tento druh systému WPT s rezonanční vazbou je vhodný pro přenos energie na vzdálenosti od desítek centimetrů až po vzdálenost několika metrů. Na tuto vlastnost navazuje velikost přenášeného výkonu, který je možno regulovat v širokém spektru od několika mW pro napájení spotřební elektroniky až po řádově stovky kW využívaných k nabíjení akumulátorů v elektromobilitě. Přenos energie s rezonanční vazbou disponuje velmi dobrou účinností přenosu, která se pohybuje přibližně mezi 83 – 92 % v závislosti na přenášeném výkonu a vzdálenosti [22 - 24]. Hodnota účinnosti při zvětšování pracovní vzdálenosti je při použití systému s rezonanční vazbou velmi dobrá především díky kompenzaci rozptylového pole vznikajícího vlivem vazebných cívek. K této kompenzaci

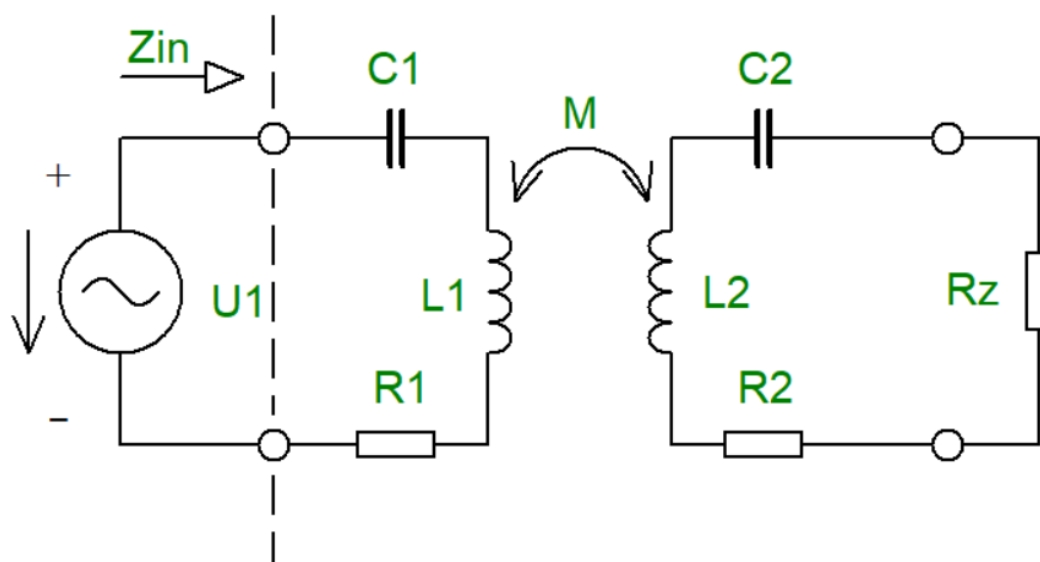
využíváme kondenzátory, které jsou připojeny na primární i sekundární straně a disponují vysokým činitelem jakosti [25 - 27].

### 1.3 Fyzikální princip funkce bezdrátového přenosu energie

Jak už bylo zmíněno, bezdrátový přenos energie je přenos takový, při kterém dochází k přenášení energie mezi zdrojem a cílovým objektem (nejčastěji zátěží) při absenci propojovacích vodičů. Tato metoda přenosu se nejčastěji užívá tam, kde by využití vodičů nebylo možné, mohlo být nebezpečné nebo pouze nekomfortní pro uživatele. V této části se seznámíme s fyzikálním principem funkce systému WPT využívající induktivní vazbou.

#### 1.3.1 Vysvětlení principu funkce bezdrátového přenosu energie s induktivní vazbou

Princip funkce systému WPT s induktivní vazbou je možno nejlépe přirovnat ke vzduchovému transformátoru se vzájemnou vazbou primárního a sekundárního vinutí, tak jak to často zmiňuje odborná literatura [28]. Tento systém dosahuje velmi nízké hodnoty vzájemné indukčnosti  $M$ , a pro nejideálnější zajištění klíčových parametrů systému se používá v rezonančním stavu. Díky tomu dosáhneme vyšší účinnosti, a také velkého výstupního výkonu. K zajištění rezonančního stavu se používají externí kondenzátory  $C_1$  a  $C_2$  (viz. Obrázek 1), které se nachází na primární i sekundární straně vinutí a slouží výhradně ke kompenzaci induktivní reaktance  $X_L$ .



Obrázek 1: Schéma zapojení systému WPT s induktivní vazbou v sério- sériové kompenzační topologii

Ze schématu zapojení (Obrázek 1), si můžeme kromě externích kondenzátorů všimnout také odporů  $R_1$  a  $R_2$  vyskytujících se opět na obou stranách vinutí. Tyto rezistory jsou ve skutečnosti ekvivalentní sériové odpory (ESR), které reprezentují ztráty ve vinutí. Cívka  $L_1$  znázorňující vinutí primární a cívka  $L_2$  vinutí sekundární společně zavádějí do obvodu vlastní indukčnost. Mezi dvojicí indukčností se tvoří indukčnost vzájemná  $M$ , která je velmi nízká. Kompenzujeme vždy pouze vlastní indukčnost cívek, kde cílem je dosáhnout toho, aby systém pracoval s účínkem o velikosti  $\cos(\varphi) = 1$ .

Nejpoužívanější kompenzační topologií je sério-sériová, při které dosáhneme řady důležitých výhod, především v nabíjení baterií. Z tohoto důvodu jsem tuto (S-S) topologii zvolil i v tomto případě [28].

## 2 Elektromagnetické stínění

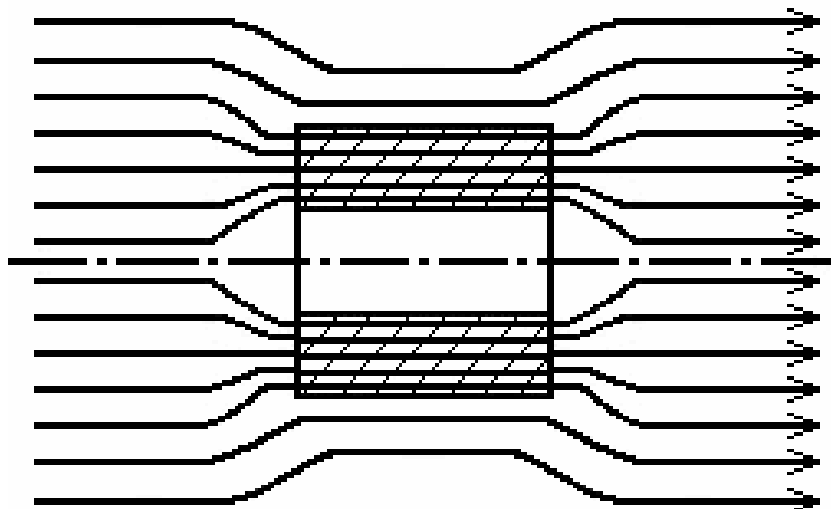
Stínění je nezbytnou součástí každého zařízení, v jehož blízkosti může docházet k vytváření elektromagnetického pole. Tento nežádoucí vliv na okolí a především na lidský organismus chceme co možná nejvíce potlačit, abychom zamezili jeho interakci s živou tkání, ale i jinými zařízeními. Také se snažíme předcházet jakýmkoliv trvalým následkům nebo poškození. Vliv elektromagnetického pole, které vzniká i v našem případě, při bezdrátovém přenosu energie se snažíme utlumit především ve směru, kde předpokládáme přítomnost lidské bytosti. Tento případ může nastat při konkrétní situaci jako je nabíjení elektromobilu technologií WPT. Při tomto procesu předpokládáme možnost výskytu řidiče a pasažérů uvnitř vozu (nad vysílací částí zdroje přenosu energie), ale může nastat i pohyb kolem vozu. Z tohoto důvodu se snažíme omezit jakýkoliv jiný směr přenosu než přímo do přijímače signálu a také těsně za ním. Cílem je aby nedošlo k překročení hygienických limitů neionizujícího záření uvnitř i vně nabíjeného EV. Tyto limity, kterým se věnuji v následující kapitole 3, určují především maximální přijatelnou hodnotu záření, které může přijít do kontaktu se živou tkání bez jakýchkoliv trvalých následků i opakovaně. Cílem EM stínění je udržet hodnotu záření v povolených mezích hygienických limitů udávaných ICNIRP 2010 [28].

### 2.1 Současný stav a použití EM stínění v systémech zabývajících se přenosem energie

Tento typ stínění je v dnešní době již hojně využíván pro nejrůznější aplikace, ale jeho primární cíl je vždy stejný. Pomocí elektromagnetického stínění se snažíme zabránit elektromagnetickému poli vniknout do daného nežádoucího prostoru ať už z hlediska bezpečnosti nebo rušivých vlivů. Stínění vytvořené pro dané zařízení může být velice rozměrné a vzhledem k ceně použitého materiálu i finančně náročné. Z tohoto důvodu většinou není stíněno zařízení jako celek, ale pouze jeho rušivé části (zdroje rušení). V případě nutnosti zabránění nežádoucích vazeb mezi citlivějšími obvody je nezbytné vytvořit stínění pro každou rušivou součást samostatně. Rozměry i cena stínění je závislá na zvoleném typu materiálu stínění, který se vybírá dle základních vlastností jako je pracovní frekvence stíněného zařízení, relativní permeabilita materiálu, koercitivní intenzita mag. pole  $H_C$  nebo hodnota remanentní indukce mag. pole  $B_r$ .

Nejběžnější dělení stínění, se kterým máme možnost se setkat, je na stínění elektrického pole a pole magnetického. Při stínění elektrického pole se snažíme principiálně docílit snížení nebo úplné eliminace kapacitní vazby mezi danými objekty. V praxi je vhodné pro dosažení tohoto efektu použít celokovový kryt zařízení, který zamezí kapacitním vazbám. Bohužel ani celokovový kryt není ideální, neboť uvnitř mohou vznikat parazitní kapacitní vazby mezi vodiči samotnými nebo mezi vodičem a zemí. Tento problém lze částečně řešit vložením dokonale uzemněné vodivé desky mezi vodiče s kapacitní vazbou, tímto dochází ke snížení rušení. U stínění elektrického pole se klade vyšší důraz na dokonalé uzemnění všech částí stínění (např. krytu), než na tloušťku jejich materiálu a to z důvodu průchodu jen malého proudu. Uzemnění může být konstrukčně složitější u pohyblivých nebo odnímatelných částí systému jako jsou dveře, víka atd.

Druhým typem je stínění magnetického pole, které se dále rozlišuje na stínění magnetostatického pole, které je využíváno pro stejnosměrná nebo střídavá magnetická pole o nízkých frekvencích a stínění střídavého magnetického pole. K odstínění magnetostatického pole využíváme magneticky vodivé cesty, jež „pohlcují“ magnetické pole do svého nitra a zamezují tím jeho průchodu do chráněné oblasti za stíněním [28]. Princip stínění je znázorněn na následujícím obrázku (viz. *Obrázek 2*).

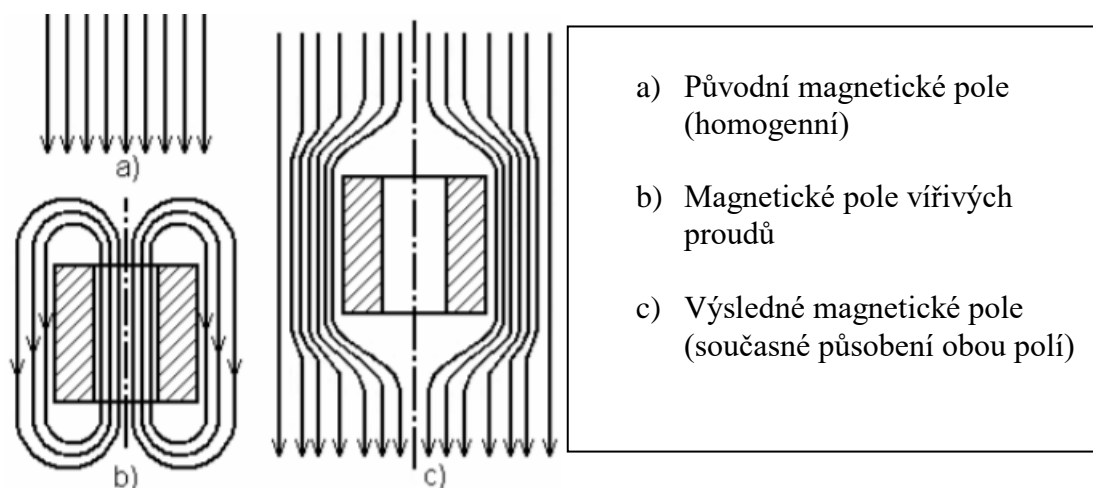


**Obrázek 2: Princip funkce stínění magnetostatického pole [29]**

Vzhledem k povaze mé odborné práce je důležitější stínění střídavého magnetického pole, kterému se budu nadále věnovat v této práci. Tento druh stínění je určený pro

magnetická střídavá pole se středními a vyššími kmitočty, často je označován jako elektromagnetické stínění.

Stínění střídavého magnetického pole je specifický druh stínění využívá principu závislosti vytvoření vířivých proudů naindukovaných ve stěnách krytu vlivem působení střídavého magnetického pole. Ve chvíli vystavení krytu (stínění) vlivům střídavého magnetického pole se v jeho stěnách indukují vířivé proudy, které při tomto účelu vnímáme pozitivně, neboť působí svým vlastním polem na původní magnetické pole a dochází k zeslabování účinků pole původního [28]. Znázornění celého principu v grafické podobě je k dispozici níže (viz. *Obrázek 3*).



**Obrázek 3: Znázornění principu funkce stínění střídavého magnetického pole**

Mezi velikostí vířivých proudů a výslednou velikostí magnetického pole platí nepřímá úměrnost, a proto je dáno, že čím jsou vířivé proudy větší, tím více zeslabují účinky výsledného magnetického pole. S touto znalostí je zcela jasná výhoda využití dobře vodivých materiálů ke konstrukci stínění. Na stínění má také vliv povrchový jev, někdy známý jako skinefekt, který zapříčiní nerovnoměrné rozložení vířivých proudů v celém povrchu. Velikost magnetické intenzity směrem do povrchu má exponenciálně klesající závislost danou následujícím vztahem.

$$H_x = H_0 \cdot e^{-\frac{x}{\delta}} \text{ [A/m]} \quad (1)$$



Z předešlého vztahu (1) je patrné, že dalším klíčovým parametrem je hloubka vniku  $\delta$ , která je vyjádřena jako následující podíl:

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu}} \quad [\text{m}] \quad (2)$$

Dosažením do rovnice (2) pro výpočet hloubky vniku nám vyplývá, že je to udávající parametr pro míru tlumení magnetického pole. V případě použití této znalosti k návrhu stínění musíme dodržet podmínku poměru  $p$ , který se nazývá koeficient vířivých proudů. Tento poměr nám zadává, že ekvivalentní tloušťka vodivé vrstvy  $d$  nesmí být větší než tloušťka stínící stěny. Koeficient vířivých proudů je dán následujícím vztahem (3).

$$p = \frac{d}{\delta} > 1 \quad [-] \quad (3)$$

V případě, že velikost  $p$  je menší než 1, dochází k rovnoměrnému rozložení vířivých proudů v celém povrchu a stínící účinek není dostačující. Opačným případem je  $p > 1$ , při kterém je stínění dostačující. Z tohoto důvodu dochází ke shromáždění vířivých proudů u povrchu stínění, kde zabraňují vniknutí rušivého magnetického pole do vnitřních částí krytu zařízení.

Na základě nabytých znalostí můžeme konstatovat, že se snižující se hloubkou vniku můžeme použít menší tloušťku stínění k dosažení požadovaného útlumu magnetického pole. Abychom se zbavili rušení síťového kmitočtu a jeho celých násobků, je ideální použít pro stínění feromagnetický materiál s vysokou hodnotou relativní permeability  $\mu_r$ .

## 2.2 Fyzikální princip funkce EM stínění

Hlavní funkcí elektromagnetického stínění pro zapojení cívek znázorňující tzv. vzduchový transformátor, je omezení průchodu magnetického pole do okolí, kde není jeho přítomnost vyžadována. Při přenášeném výkonu v řádu desítek kilowattů může být tento nevyžádaný magnetický tok nejen kontraproduktivní k vlivu funkčnosti zařízení, ale i velmi nebezpečný.

Stínění je nejčastěji navrhováno jako uspořádaný celek feritových jader, který leží za

vysílací a přijímací částí systému. Ferit znemožňuje průchodu magnetického pole do okolí nevyžádaným směrem a dochází k usměrnění výsledného toku do vymezeného prostoru hlavní vazby. Parametry materiálu stínění feritových jader musí splňovat požadavky na pracovní frekvenci systému, často lehce předdimenzováno řádově na stovky kilohertzů. Dále relativní permeabilitu odpovídající hodnotě  $\mu \geq 1450$  a mechanické rozměry by měly být ideálně voleny k velikosti cívek zdroje a přijímače přenášeného výkonu.

Celá sestava stínění by v ideálním případě měla představovat plnou desku, která by dosahovala nejlepších stínících vlastností, ale s přihlédnutím na finanční stránku při zajištění velkého množství feritů a jejich vysokou hmotnost se častěji používá ideálně zvolená kompozice feritových tyčí s určitými výřezy. Tato metoda lze nasimulovat v SW prostředí za použití FEM a určení ideálních vlastností kompozice stínění s ohledem na reálné vlastnosti zvoleného materiálu.

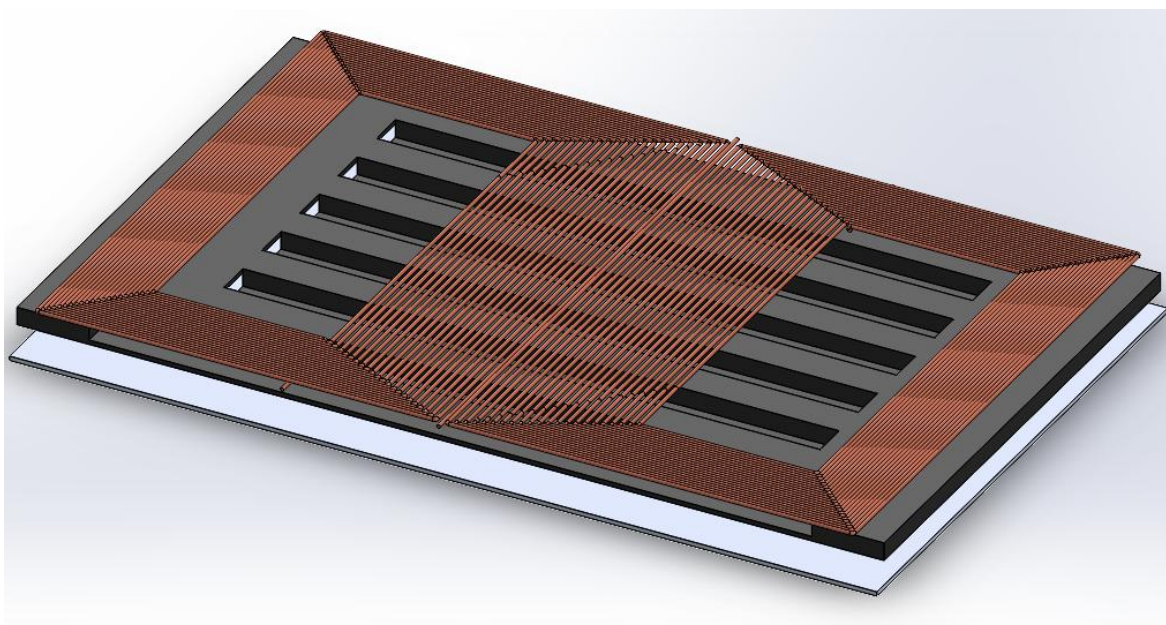
Při testování různých druhů EM stínění je nezbytné kontrolovat parametry vlastní a vzájemné indukčnosti, neboť se nám bude tato veličina vlivem změny stínění měnit a je klíčové držet celý systém ve stavu rezonance. Z tohoto důvodu bude docházet k přepočítávání obvodu z hlediska velikosti kondenzátorů, abychom udrželi konstantní pracovní frekvenci  $f = 85$  kHz, dle standardu SAE TIR J2954.

### **2.3 Volba ideálního systému EM stínění pro vazební prvky v konfiguraci „double D“**

Jedním z nosných celků této práce je navrhnout ideální elektromagnetické stínění pro mnou již navržený systém bezdrátového přenosu energie se splněnými požadovanými parametry (vstupní a výstupní napětí, frekvence, účinnost přenosu). Elektromagnetické stínění musí být přizpůsobeno danému systému přenášejícímu energii ve formě rozměrů, ale i materiálu, dáno dle doporučení hygienických limitů a platné legislativy. Nejčastěji se při volbě elektromagnetického stínění setkáváme s feromagnetickým materiálem, který využívá své vlastnosti ke stínění magnetického pole. Tímto materiálem bývá velmi často ferit, který musí plnit vlastnosti materiálu s úzkou hysterezní smyčkou. Především musí být vhodný pro použití i pro vyšší frekvence než je rozsah  $f = 10 - 100$  Hz.

Společným znakem magneticky měkkých materiálů je úzká hysterezní smyčka a nižší koercitivní intenzita ( $H_C < 800$  A/m). Tyto materiály mají nízké hysterezní ztráty

a ztráty zapříčiněné vířivými proudy, také se vyznačují vysokou relativní permeabilitou  $\mu_r$ , která v průběhu magnetizace klesá [30]. Stínění vyrobené z tohoto materiálu bývá velmi účinné, ale v plné formě (plný objekt) i velmi finančně nákladné, neboť s kvalitou materiálu a jeho vlastnostmi roste i pořizovací cena. Z tohoto důvodu je mým úkolem přizpůsobit topologii a velikost stínění tak, abych našel co možná nejlepší kompromis mezi stínícími vlastnostmi a cenou stínění. Celá tato topologie se bude nacházet nad horní částí vinutí přijímače a pod spodní částí vinutí vysílače abychom co nejvíce omezili rozptyl elektromagnetického pole systému bezdrátového přenosu energie. Tato soustava bývá doplněna ještě o nevodivě spojenou desku z hliníku, který je značně levnější, a jeho vlastnosti jsou dostačující k zamezení elektrického pole. Poloha hliníkových plátů je nad feritovým stíněním (viz. *Obrázek 4*). Kompletní ilustrativní znázornění celkové topologie včetně obou párů cívek a stínění je možné nalézt v *příloze A*.



**Obrázek 4: Ilustrační grafické rozvžení topologie WPT systému s elektromagnetickým stíněním ve trimetrickém pohledu znázorněném v prostředí programu SolidWorks 3D CAD**

### 3 Legislativa a hygienické limity

Předmětem této části mé práce bude legislativa a hygienické limity, které jsou jedním z klíčových bodů návrhu. Jak jsem již zmínil, vlivy záření EM pole mají neblahé účinky nejen pro člověka, a proto se snažíme udržovat určitá prostorová a funkční omezení, abychom dodrželi stanovené bezpečné hygienické limity pro styk s lidskou tkání. Tyto legislativy a limity jsou dány Mezinárodní komisí pro ochranu před neionizujícím zářením (ICNIRP). Dále existují dvě hlavní skupiny standardů, které se udávají pro systémy WPT, a to jsou standardy pro elektromobilou a mobilní elektroniku, kde každá ze skupin čítá celou řadu legálních a používaných standardů [31, 32].

#### 3.1 Standard pro elektromobilitu

Vytvoření obecných standardů v tomto stále ještě mladém a rychle se rozvíjejícím odvětví chrání nejen uživatele, ale také napomáhá zvyšování komfortu. V rámci velké konkurence, která mezi automobilkami v tomto sektoru sílí s každým nově vyráběným modelem, se můžeme díky jednotným standardům dočkat spojení jejich vlivu v infrastruktuře a například využívat kompatibility všech nabíjecích stanic napříč konkurenčními společnostmi. Jedná se o souhrnné sjednocení hygienických limitů, ale také technických specifikací. Doposud je platný standard pro bezdrátové nabíječky určující bezpečnostní limity (EMF), elektromagnetickou kompatibilitu (EMC), úroveň výkonu, způsoby testování nebo kritéria definující součinnost systému. Tento stále platný standard byl vydán organizací SAE International (Society of Automotive Engineers) již v roce 2010. Konkrétní kódové označení standardizace je SAE J2954, jenž se zabývá jednosměrným nabíjením ze sítě do vozidla, obousměrný přenos by měl být pokryt až v následující verzi standardu. Současná norma se zabývá výhradně stacionárními aplikacemi a pokrývá pouze nadzemní instalace. Pro celý systém je normovaná pracovní frekvence určena hodnotou  $f = 85 \text{ kHz}$  (81,39 – 90 kHz), dalším určujícím parametrem je minimální účinnost celého řetězce. Velikost minimální účinnosti je vyčíslena pro systémy s proměnnou vzájemnou pozicí na  $\eta = 85 \%$  a pro systémy s fixní pozicí vazebných cívek systému dokonce na minimální účinnost  $\eta = 90 \%$ . [33]

#### 3.2 Standard pro mobilní elektroniku

V oblasti mobilní elektroniky se vyskytuje hned několik standardů pro bezdrátové

nabíjení. Asi nejznámějším je standard Qi [čí], který je dnes už podporovaný předními výrobci mobilních a nositelných zařízení (Apple, Samsung, Xiaomi, Sony a mnoho dalších). Jak už jeho název napovídá, jedná se o standard bezdrátového nabíjení původem z čínštiny, kde jeho doslovný překlad znamená „přírodní energie“. Tento přední světový standard byl vytvořen sdružením WPC (Wireless Power Consortium) v roce 2008 a od té doby je využíván společnostmi z různých průmyslových odvětví, za zmínku určitě stojí velkovýrobce nábytku IKEA, která zařízení obsahující tento standard implementuje přímo do nábytku ve svém sortimentu (typicky noční stůl nebo lampička s bezdrátovou nabíječkou) [34].

WPC-Qi využívá IPT, tedy pracuje na bázi elektromagnetické indukce a je běžně využívanou technologií nejen pro nabíjení smartphonů. Vzhledem k principu přenosu energie je kladen důraz na konstrukční parametry mobilního zařízení jako je koeficient vazby nebo vlastní indukčnost přijímacího zařízení. Důležitými parametry, kterými disponují zařízení s tímto standardem, jsou například dvě výkonové úrovně (5 a 15 W), maximální dosah přenášené energie, který je udáván až do vzdálenosti  $l = 40$  mm. Frekvenční rozsah systému je pro nižší výkonovou úroveň udáván jako  $f = 110 - 205$  kHz a pro vyšší výkonovou úroveň je pracovní frekvence mezi  $f = 80 - 300$  kHz. Minimální hodnota účinnosti systému je vyjádřena  $\eta = 70$  %, ale může se pohybovat i kolem hranice  $\eta = 75$  % [35 - 37].

Druhým celosvětově užívaným standardem je AirFuel, jenž vznikl pod vedením skupiny AFA (AirFuel Alliance), která se zrodila sjednocením dřívějších standardů PMA (Power Matters Alliance) a A4WP (Alliance for Wireless Power). K jejich sloučení došlo v roce 2015, z důvodu vytvoření konkurence vůči rychle se rozšiřujícímu WPC-Qi. A4WP využívá principu magnetické rezonance, zatímco PMA využívá (podobně jako Qi) elektromagnetické indukce, ale při rozdílné frekvenci. Po vzniku aliance převzalo AFA oba zmíněné principy indukce i rezonance. AirFuel s induktivním standardem (PMA) pracuje ve frekvenčním rozsahu  $f = 277 - 357$  kHz a minimální účinnost přenosu musí být  $\eta = 70$  %. Druhý AirFuel standard rezonančního typu (A4WP) využívá rezonanční vazby na kmitočtech  $f = 6,78$  MHz a  $f = 13,56$  MHz, ale jeho účinnost vzhledem k vyšší úrovni frekvence dosahuje jen hodnot okolo  $\eta = 60$  % [38 - 42].

Sloučením PMA a A4WP se chtělo docílit celosvětové jednoty ve standardizaci

bezdrátového nabíjení, které by přineslo vyšší pohodlnost uživatelům a jisté usnadnění výrobcům při konstrukci a implementaci zařízení. Bohužel tento cíl nebyl zcela naplněn, ale alespoň se zmenšil počet konkurenčních stran na poli bezdrátového nabíjení mobilních a nositelných zařízení. Podporu tomuto standardu vyjádřili společnosti Intel, Starbucks, Qualcomm, Samsung, Duracell a desítky dalších.

### 3.3 Hygienické limity

V případě vystavení lidského těla (tkáně) vlivům EM pole dochází k deformaci pole zapříčiněnou charakteristickými vlastnostmi biologických organismů. Uvnitř těla dochází k indukovaní vířivých proudů, které vznikají díky vysoké vodivosti a nižší relativní permitivitě tkáně (přibližně  $\epsilon_r = 100$  F/m). Tyto vířivé proudy mají majoritní podíl na změně tvaru elektromagnetického pole uvnitř organického objektu a mohou zvyšovat jeho interní teplotu. Na tělo jako na jakýkoliv jiný objekt vystavený účinkům elektromagnetického pole působí dva hlavní vlivy [40, 43].

Vliv elektrické složky nám udává, že při nízkých frekvencích je naindukovaná intenzita elektrického pole uvnitř těla několikanásobně menší, než intenzita pole vnějšího. Také můžeme konstatovat, že souhrnný proud protékající tělem při perfektním zemním spojení je spíše ovlivněn prostorovými rozměry a tvarem těla, než-li vlastní vodivostí tkáně. Něco jiného se děje v jednotlivých orgánech, ve kterých je rozložení vířivých proudů dáno výlučně vodivostí tkáně.

Další složkou ovlivňující biologický organismus je magnetická složka pole. Tato složka je ale na rozdíl od složky elektrické velmi málo ovlivňována externím magnetickým polem, protože hodnota relativní permeability je  $\mu_r = 1$  H/m. Magnetické pole je vlivem vystavení lidského těla ovlivněno jen minimálně a magnetická indukce  $B$  vnější i vnitřní (uvnitř těla) zůstává stejná. Důležitou vlastností je, že magnetická složka postihuje více prostorově výraznější lidi, a to z důvodu, že se uvnitř většího těla mohou uzavírat proudové smyčky o větší ploše. V případě, že orientace vnějšího pole (osa pólu) je čelem k tělu, tak se indukuje silnější elektrické pole. Naopak pokud je v ose těla orientováno vnější pole, tak dochází k zeslabení účinků vířivých proudů [44].

Naše tělo reaguje na různé frekvence vnějšího elektromagnetického pole různým

způsobem, ale je zjištěno, že elektromagnetické pole přesahující určité limity má neblahý vliv na lidské zdraví (změny nálad, poruchy spánku, zhoršená motorika, deprese, atd.) a při nadměrném vystavování se tomuto poli dochází i k řadě vážných onemocnění (Alzheimerova choroba nebo leukemie u dětských pacientů) [45].

Pro ochranu před těmito vlivy a pro stanovení bezpečnostních limitů vznikla mezinárodní komise pro ochranu před neionizujícím zářením (ICNIRP). Tato mezinárodní komise udává pro veřejné využití dvakrát až pětkrát přísnější limity indukovaného elektrického pole než v pracovním prostředí, a to především z důvodu nejistoty věku exponované osoby a jejímu zdravotnímu stavu. Jelikož není možné provádět měření indukovaného elektrického pole vně vystaveného těla, tak komise vytvořila dva měřitelné standardy udávající bezpečné hraniční hodnoty elektrické intenzity  $H_L$  a magnetické indukce  $B_L$  vně těla. Tyto limity jsou dány vyhláškou „ICNIRP GUIDELINES“ z roku 2010 [46]. Komise udává doporučené hodnoty pro dvě základní frekvenční kategorie, které jsou LF (1 Hz – 100 kHz) a RF EMFS (100 kHz – 300 GHz). Vzhledem k tématu mé práce a zvolené pracovní frekvenci  $f = 85$  kHz se zaměřuji na nízkofrekvenční část vyhlášky. Doporučené limity jsou zcela bezpečnou hranicí pro exponované osoby i v pravidelném vystavování se EM poli. V následující tabulce *Tabulka 1* jsou přehledně znázorněny všechny doporučené limity pro LF část vyhlášky ICNIRP 2010 vytvořené pro využití ve veřejném prostředí.

**Tabulka 1: Limitní úrovně vnějšího elektrického a magnetického pole pro veřejné prostředí**

Frekvenční pásmo	E [kV/m]	H [A/m]	B [T]
1 Hz – 8 Hz	5	$3,2 \times 10^4 / f^4$	$4 \times 10^{-2} / f^2$
8 Hz – 25 Hz	5	$4 \times 10^3 / f$	$5 \times 10^{-3} / f$
25 Hz – 50 Hz	5	$1,6 \times 10^2 / f$	$2 \times 10^{-4}$
50 Hz – 400 Hz	$2,5 \times 10^2 / f$	$1,6 \times 10^2 / f$	$2 \times 10^{-4}$
400 Hz – 3 kHz	$2,5 \times 10^2 / f$	$6,4 \times 10^4 / f$	$8 \times 10^{-2} / f$
3 kHz – 10 MHz	$8,3 \times 10^{-2} / f$	21	$2,7 \times 10^{-5}$

V tabulce (*Tabulka 1*) vidíme znázorněné hodnoty limitních úrovní elektrického a magnetického pole pro veřejné prostředí. Těmto hodnotám může být biologický subjekt (lidská bytost, zvíře) vystaveno dlouhodobě bez jakýchkoliv trvalých následků.

Nejvýznamnější hodnoty z hlediska kmitočtového rozsahu pro tuto práci jsou zvýrazněny žlutě (poslední řádek). Všechny udané hodnoty jsou v efektivní hodnotě, ale výstupem ze softwaru budou hodnoty maximální, a proto provedu přepočítání pomocí rovnic (4 - 6):

$$E_{MAX} = E \cdot \sqrt{2} = 83 \cdot \sqrt{2} = 117,3797 \text{ [V/m]} \quad (4)$$

$$H_{MAX} = H \cdot \sqrt{2} = 21 \cdot \sqrt{2} = 29,6985 \text{ [A/m]} \quad (5)$$

$$B_{MAX} = B \cdot \sqrt{2} = 27 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{2} = 38,1838 \cdot 10^{-6} \text{ [T]} \quad (6)$$

Výsledné přepočítané limitní hodnoty v absolutní hodnotě jsou pro elektrickou intenzitu  $E_{MAX} = 117,38 \text{ V/m}$ , magnetickou intenzitu  $H_{MAX} = 29,7 \text{ A/m}$  a magnetickou indukci  $B_{MAX} = 38,18 \text{ } \mu\text{T}$ . Pro úplnost přidávám tabulku (*Tabulka 2*) s doporučenými bezpečnými úrovněmi elektrického a magnetického pole pro pracovní (průmyslová) prostředí. Jak již bylo předesláno, tyto úrovně jsou značně shovívavější oproti prostředí veřejnému. Tyto hygienické limity jsou nastaveny mezinárodní komisí ICNIRP pouze pro úzkou skupinu lidí, kteří musí prokázat vědomostní úroveň (pracovník znalý) a zároveň být v dobré fyzické kondici při vystavení se účinkům elektrického a magnetického pole.

**Tabulka 2: Limitní úrovně vnějšího elektrického a magnetického pole pro pracovní prostředí**

Frekvenční pásmo	E [kV/m]	H [A/m]	B [T]
1 Hz – 8 Hz	20	$1,63 \times 10^5 / f^2$	$0,2 / f^2$
8 Hz – 25 Hz	20	$2 \times 10^4 / f$	$2,5 \times 10^{-2} / f$
25 Hz – 300 Hz	$5 \times 10^2 / f$	$8 \times 10^2$	$1 \times 10^{-3}$
300 Hz – 3 kHz	$5 \times 10^2 / f$	$2,4 \times 10^5 / f$	$0,3 / f$
3 kHz – 10 MHz	$1,7 \times 10^{-1} / f$	80	$1 \times 10^{-4}$

Z hodnot znázorněných v předchozí tabulce (*Tabulka 2*) můžeme určit limitní úrovně vnějšího elektrického a magnetického pole pro pracovní prostředí a námi zvolený pracovní kmitočet  $f = 85 \text{ kHz}$ . Tyto hodnoty jsou zvýrazněny žlutě, ale vzhledem k povaze a finální aplikaci problematiky uváděné v této práci, kde směřuji k využití elektromagnetického stínění bezdrátových systémů přenosu energie například při nabíjení



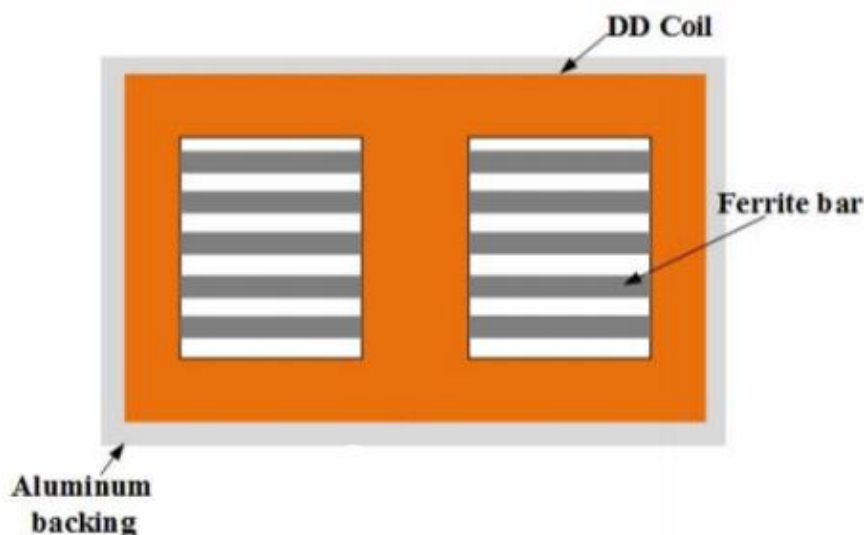
elektromobilů, tak by v tomto případě bylo nemožné selektovat uživatele dle fyzické úrovně nebo dle úrovně odborného seznámení (viz. pracovník znalý). Toto je stěžejním důvodem proč budu dále využívat výlučně přísnější limitní hodnoty vnějšího elektrického a magnetického pole pro veřejné prostředí k porovnání mnou navržených stínění.

## 4 Literární řešerše elektromagnetických stínění

Tato část je věnována literární řešerši návrhů elektromagnetických stínění systémů bezdrátového nabíjení. Důvodem k sepsání této kapitoly byl průzkum již napsaných odborných prací, poučení se z chyb minulých a především možnost využít již zjištěné poznatky při tvorbě vlastního návrhu. Rešerše se skládá z několika hlavních prací nebo studií, jež jsem našel při svém průzkumu tohoto tématu, a které ovlivnili můj náhled na danou problematiku. Uvedené poznatky implementuji do svého vlastního návrhu, který je uskutečněn dle zadaných počátečních hodnot s ohledem na standardy a hygienické limity.

### 4.1 Vlastní literární řešerše EM stínění pro různé typy WPT systémů

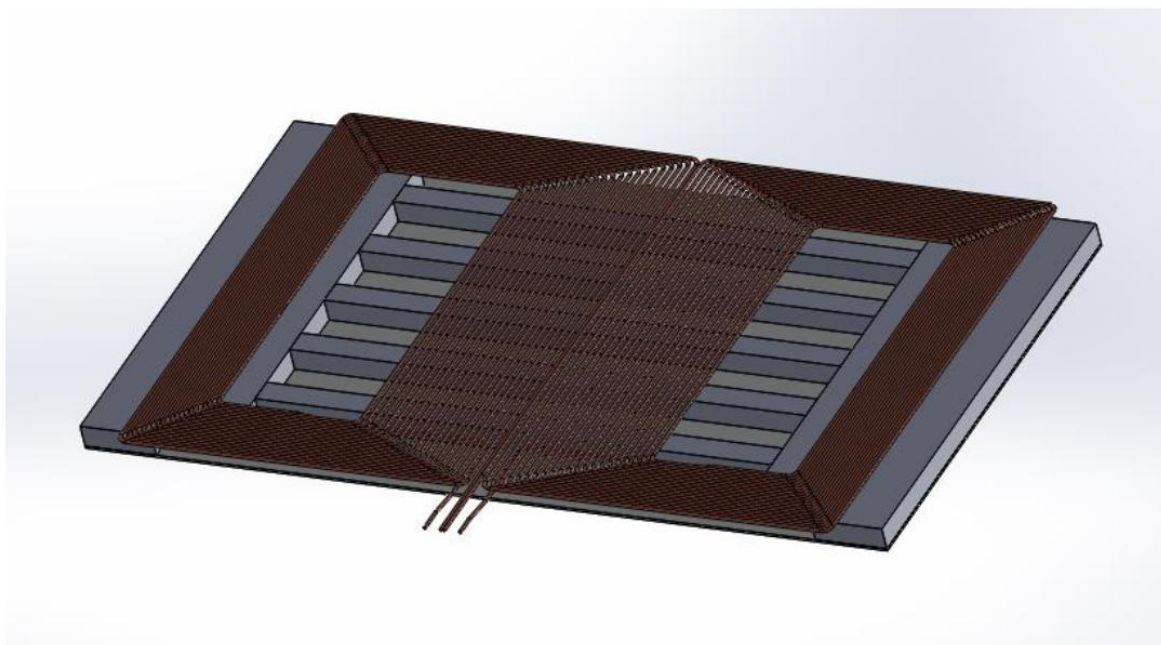
Převážná většina odborné literatury pojednává o návrhu elektromagnetického stínění s bezdrátovým přenosem elektrické energie při využití v elektromobilitě se stejnou konstrukcí EM stínění. Tato konstrukce odpovídá nejpoužívanějším typům bezdrátových systémů, kterými jsou single-coil, double D nebo DDQ. Pro konstrukce s jednou nebo i více cívkami je nejběžnější návrh stínění v uspořádání, kde na vinutí cívky je přidáno feritové stínění (z materiálu s úzkou hysterezní smyčkou). Z vnější strany feritů je stínění zakončeno hliníkovým plátem, jehož úkolem je chránit okolní prostředí a objekty před vlivem elektromagnetického pole unikajícího ze systému [13, 40, 47 - 51]. Feritové stínění má za úkol vést většinu magnetického toku pod cívkou. Tento systém stínění je často uváděn pro řešení nabíjení v elektromobilitě kvůli jeho dobrým stínícím vlastnostem a malým rozměrům. Bez využití stínění by docházelo k indukování vířivých proudů do EV, které má kovový podvozek a vznikaly by velmi výrazné ztráty (kvalita přenosu by upadala). Celá struktura popsaného stínění je znázorněna na následujícím *obrázku 5*.



Obrázek 5: Zobrazení návrhu EM stínění obsahujícího feritové i hliníkové stínění [47]

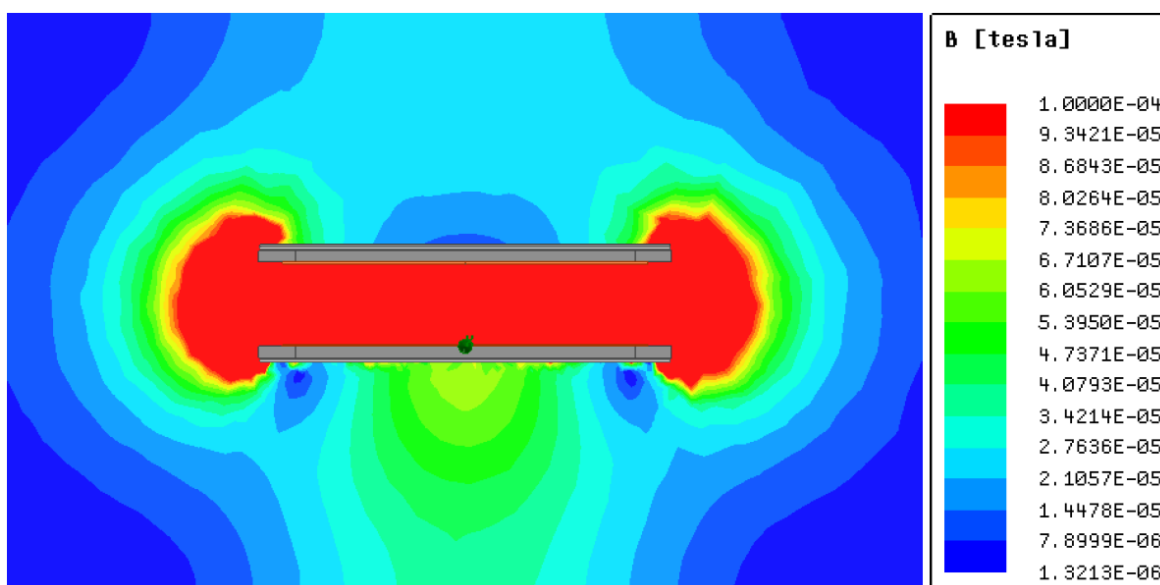
Na výše uvedeném znázornění je patrné využití feritových tyčí s pravidelnými rozestupy a plného hliníkového stínění (ve formě plátu) pro konfiguraci cívek v double D. Z uvedeného výzkumu [47] vyplývá, že DD struktura s hliníkovým plátem a feritovými tyčemi má nízký únikový tok magnetického pole a malé ztráty v hliníkové části stínění v porovnání s ostatními druhy stínění. Při dalším srovnání s jinými strukturami systémů a stínění bylo zjištěno u tohoto typu vyšší koeficient vazby.

Další prací, která pomohla utvořit můj pohled na tuto problematiku, je návrh systému bezdrátového přenosu energie s výstupním výkonem  $P = 11$  kW v konfiguraci cívek DD a vzdáleností cívek  $l = 200$  mm [13]. Tato práce také pojednává o možnostech elektromagnetického stínění, za ideální považuje feritové stínění tyčového typu se zakončením ze stran a hliníkovou deskou. Později pro vyšší stínící účinnost byl přidán za feritovými tyčemi tenký plát (5 mm) tvořený destičkami ze stejného feritového materiálu N87. Feritové stínění bylo tvořeno celkem z pěti paralelních tyčí a hliníková deska měla tloušťku  $h = 5$  mm. K dispozici je náhled topologie stínění na obrázku 6.



Obrázek 6: Ukázka navrženého stínění kombinujícího feritové tyče se zakončením s destičkami a hliníkovým plátem [13]

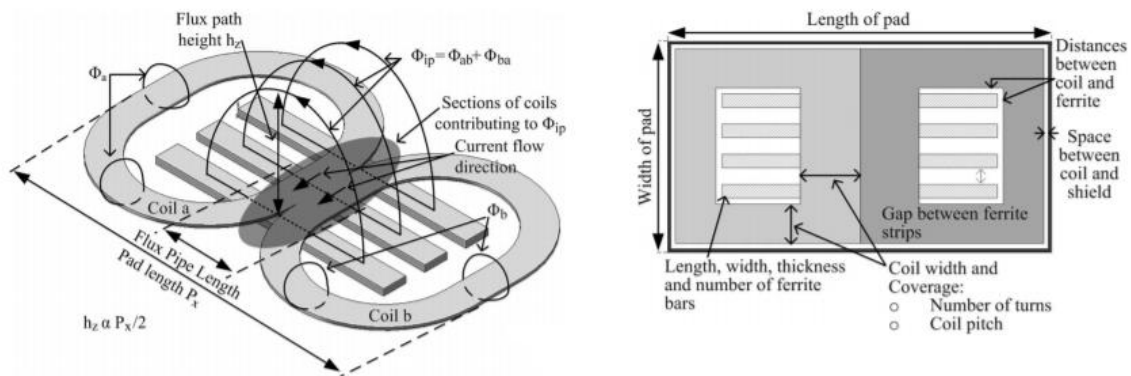
Výsledné stínění mělo za důsledek eliminaci nebezpečné úrovně elektromagnetického pole do vzdálenosti 750 mm od středu cívek dle normy ICNIRP. Znázornění je na obrázku 7.



Obrázek 7: Hustota rozptylového toku systému s výkonem 11 kW při pohledu zepředu [13]

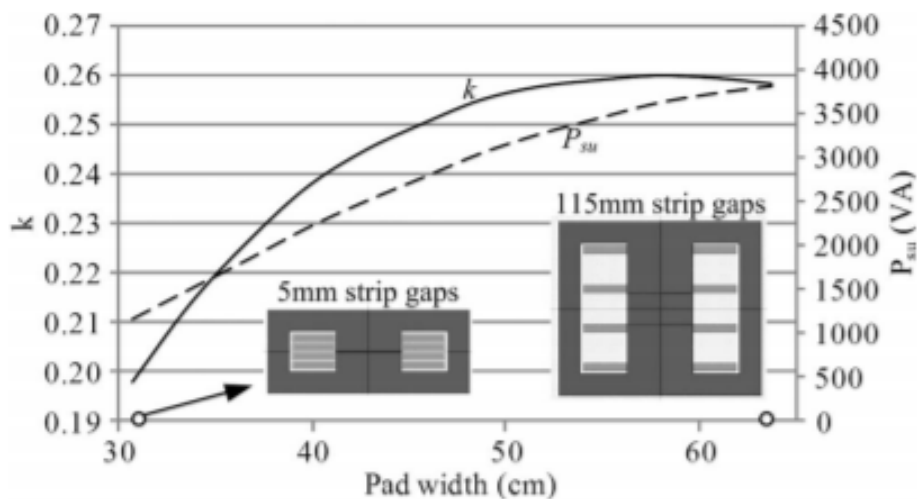
Jednou z dalších podrobných studií ovlivňující můj vlastní návrh je odborná práce zabývající se dobíjením EV pomocí IPT systému s cívkami v double D. Tato topologie vazebných členů, je zvolena kvůli až pětinasobně větší zóně nabíjení oproti kruhové

topologii. Výsledný systém je navržen pro přenos výkonu o hodnotě  $P = 2$  kW na vzdálenost  $l = 200$  mm a frekvenci  $f = 20$  kHz [50]. Pro dodržení hygienických limitů je daný systém WPT opatřen stíněním, které je tvořeno z feritových prutů. Ferity jsou proloženy vzduchovými mezerami a z vnější strany systému je přidáno plné hliníkové stínění. Náhled tohoto návrhu je uveden na následujícím obrázku 8.



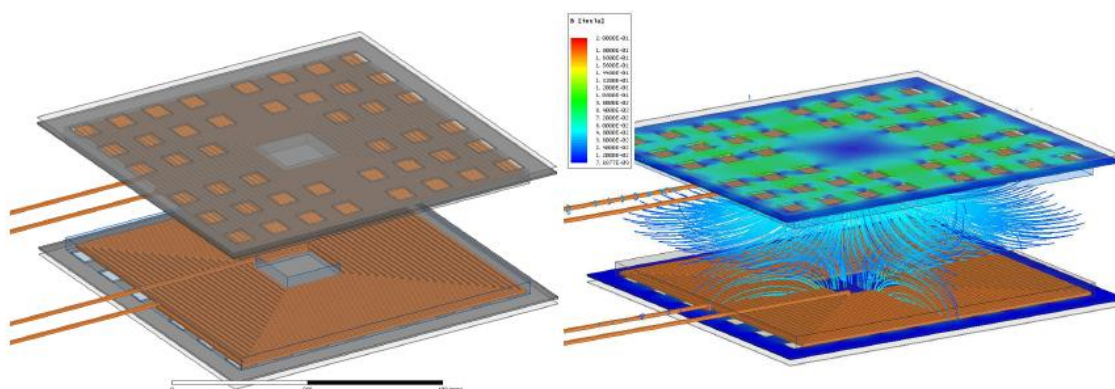
Obrázek 8: Zjednodušený model DD včetně směru toku (vlevo) a navržená topologie stínění z feritových tyčí (vpravo) [50]

Tento typ znázorněného stínění (feritového i hliníkového) zaručuje extrémně nízký únikový tok ze zadní strany systému. V dané studii byl vybrán materiál N87 na feritové stínění z důvodu nízkých ztrát při teplotě  $T = 80$  °C. Dále je zkoumána závislost velikosti vzduchové mezery mezi feritovými jádry typu I, vzhledem k činiteli vazby  $k$  a výkonu  $P_{SU}$  (viz. Obrázek 9).



Obrázek 9: Znáznornění grafické závislosti velikosti vzduchové mezery vzhledem k činiteli vazby  $k$  a výkonu  $P_{SU}$  [50]

Poslední uvedenou ukázkou je studie problematiky systémů bezdrátového přenosu energie, kde je kapitola věnována stínění EM pole [40]. Návrh je v tomto případě řešen pro systém přenášející výkon  $P = 4 \text{ kW}$  při frekvenci  $f = 85 \text{ kHz}$  udanou dle standardu SAE TIR J2954 [33]. Vzdálenost cívek je určena jako  $l = 200 \text{ mm}$  a bylo zvoleno stínění maticového typu ležícího na zadních stranách obou cívek. Materiál určený pro konstrukci tohoto stínění je feritový materiál N87 s relativní permeabilitou  $\mu_r$  přesahující hodnotu 1450 H/m a pracovní frekvencí do 500 kHz. Výsledný návrh EM stínění obsahuje feritovou a hliníkovou část, první zmíněná má za úkol pojmout maximální množství spřaženého toku a jeho usměrnění pro docílení lepší vazby s druhou cívkou. Druhou částí je hliníkový plát, který rozměrově přesahuje ferit a smyslem jeho využití je, aby v případě přesycení feritového jádra vytvořil vířivé proudy, které udrží elektromagnetické pole v aktivní oblasti cívek. Grafické znázornění systému WPT včetně navrženého stínění se nachází na *obrázku 10*.



Obrázek 10: Návrh Al-feritového EM stínění WPT systému [40]

Hygienické limity udané dle ICNIRP 2010 [46] pro veřejné prostředí jsou splněny ve vzdálenosti cca 400 mm od středu cívek ve směru osy Z. Tento návrh elektromagnetického stínění je plně postačující a s přihlédnutím k přidavnému elektrickému stínění, které je tvořeno kovovým podvozkem vozidla, budou parametry ještě vylepšeny.

## 5 Vlastní návrh elektromagnetického stínění pro navržený systém bezdrátového přenosu elektrické energie

V této části své práce se převážně věnuji vlastnímu návrhu bezdrátového systému přenosu elektrické energie a jeho elektromagnetickému stínění. Při návrhu bezdrátového systému je mým cílem splnit základní parametry, které jsem si vytyčil a při návrhu elektromagnetického stínění je zcela klíčové provést návrh s ohledem na hygienické limity a standardy pro elektromobilitu.

### 5.1 Vlastní návrh systému WPT s vazebným prvkem v konfiguraci „double D“ zapojení

Tento návrh bezdrátového systému vychází z teoretických poznatků dané problematiky a zadání mé práce. Mým úkolem je provést návrh WPT systému s předem danými parametry, jejichž hodnoty se nachází v tabulce níže (Tabulka 3).

Tabulka 3: Počáteční určené parametry navrhovaného WPT systému

Počáteční zvolené hodnoty	
$U_{bat} =$	400 V
$f =$	85 000 Hz
$P_{bat} =$	50 000 kW
$\eta >$	90%

Tyto zadané hodnoty znázorňují velikost výstupního napětí systému  $U_{bat}$ , výstupním výkonem  $P_{bat} = 50$  kW, použitou pracovní frekvenci  $f = 85$  kHz (tato hodnota je dána standardem pro elektromobilitu) a minimální dosažená účinnost při bezdrátovém přenosu elektrické energie by měla být vyšší než  $\eta = 90\%$ . Tato zadaná účinnost je dána pro stacionární uložení cívek dle standardu SAE TIR J2954. V návrhu systému se snažíme dosáhnout co možná nejvyšší a zároveň nejlepší hodnoty účinnosti přenosu. Omezujících 90 % je nutností pro praktickou využitelnost systému na trhu. Výstupní (přenesený) výkon  $P_{bat}$  je v dnešní době opět běžnou hodnotou v rámci nabíjení v oblasti elektromobility, ale při využití vodičového propojení.

Prvním krokem návrhu je výběr vhodné topologie a mechanických rozměrů cívek s přihlédnutím k reálnému využití. Je nutné brát v potaz reálné rozměry automobilu, výšku mezi primární a sekundární stranou systému WPT (vzdálenost mezi cívkou v zemi a cívkou umístěnou v podlaze elektromobilu). Dále uvažuji také o možném maximálním napájecím napětí, které je limitováno danou nabíjecí stanicí. Jako topologii cívek svého návrhu jsem dle zadání zvolil systém double D (DD, DDP, double-DPad), který má výrazně lepší vlastnosti v oblasti rozptylového pole. Tento typ zapojení zahrnuje dva páry kruhových nebo spirálových cívek, které jsou vzájemně zapojeny v elektricky paralelním spojení a magneticky sériovém spojení. Důvodem tohoto zapojení je snížení indukčnosti a zároveň zvýšení magnetického pole což je pro tento návrh velmi výhodné [13, 52]. Při takovémto zapojení cívek (S-S kompenzace) je nezbytné zvážit také vliv skin efektu, který se projevuje vysokofrekvenčními ztrátami v obvodu. Jeho vliv lze úspěšně potlačit použitím lakovaných (vzájemně izolovaných) vodičů ideálně typu licna. Tyto vodiče mají skvělé vlastnosti vysokou proudovou odolnost, teplotní odolnost a eliminují vznik skin efektu. Volba měděné lakované licny je ideální logická volba vzhledem k povaze jejího použití v komplexním návrhu WPT systému. V tomto konkrétním případě se přikláním k využití licny s průměrem vodiče  $d_{LIC} = 4$  mm, což nám udává i přibližnou výšku jednoho vinutí cívky  $h_C$ , a také můžeme dopočítat jmenovitý průřez vodiče pomocí rovnice (7) [53].

$$S_{LIC} = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \left(\frac{d_{LIC}}{2}\right)^2 \quad (7)$$

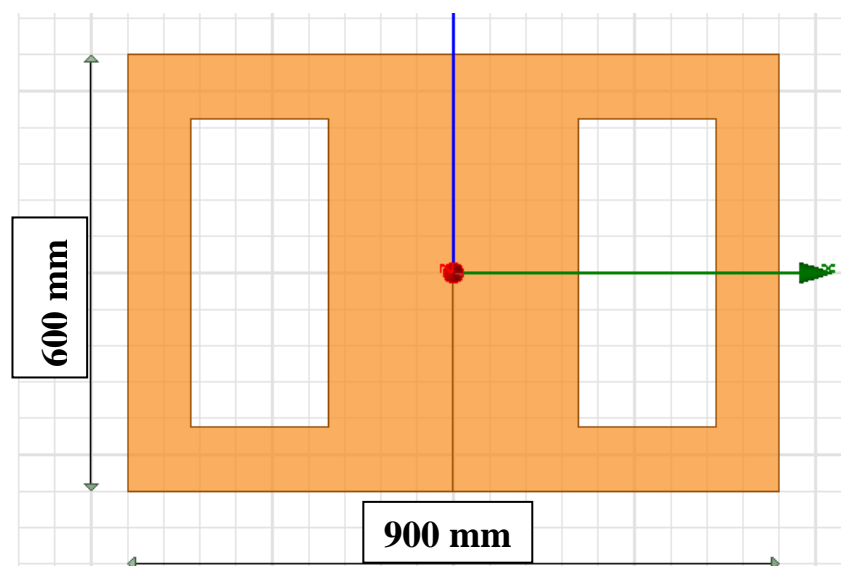
Tento průřez  $S_{LIC} = 50,265$  mm<sup>2</sup> je možné dosadit do vztahu (8) pro výpočet proudové hustoty, která je udána jako poměr maximálního procházejícího proudu vodičem děleného jeho jmenovitým průřezem [53].

$$J_{LIC} = \frac{I}{S_{LIC}} \quad (8)$$

Měděné vodiče byly poptány u společnosti INKOSAS [54], která nabízí také licny na zakázku ze svazku spojených drátků o velikosti průměru vodiče  $\phi = 0,1$  mm.



Po výběru topologie (typu zapojení) cívek je dalším systematickým krokem volba vlastních rozměrů cívek a vzdálenosti mezi nimi. Mnou navržený systém vychází z reálných rozměrů a možností dnešních automobilů a vhodné implementaci statického systému bezdrátového přenosu elektrické energie na pozice jednotlivých parkovacích míst. Abychom zamezili, co možná největšímu vychýlení pozic cívek, je vhodné zvolit větší rozměr, a to takový, který je možný implementovat i do podlahy EV. Celý návrh podléhá fyzikálním a odborným znalostem, dle kterých je dáno, že nejvyšší možné efektivity dosáhneme při konkrétním poměru stran v osách X a Y. Tyto rozměry jsou udávány jako poměr stran 3:2. Při tomto zjištěném poměru dochází k největšímu přenášenému výkonu a nejlepší vazbě [13, 55, 56]. Větší rozměr vinutí je také výhodný pro lepší zachycení magnetického toku v oblasti, která se nachází mezi cívkami. Mnou zvolené rozměry s respektováním poměru stran a reálnými rozměry EV jsou 900x600 mm. Znázornění jednoho páru vinutí DD je na *obrázku 11*.



Obrázek 11: Ilustrační znázornění rozměrů jednoho páru vinutí v DD ze SW Ansys Maxwell 3D

Zvolené rozměry kladou důraz na zesílení šířky ve středové oblasti tzv. flux pipe, kterou prochází hlavní magnetický tok. Jedná se o oblast důležitou nejen pro vinutí, ale i stínění systému. Oproti masivní flux pipe oblasti je důležité minimalizovat rozměry

v ostatních částech vinutí z důvodů snížení odporu vinutí a úspore mědi. Výsledný tvar vinutí připomíná písmena DD, z toho také byl odvozen jejich název [50]. Celý systém jsem se rozhodl dle uvážení průměrné výšky podlahy EV od vozovky podrobit analýze ve dvou vzájemných vzdálenostech cívek  $l_1 = 150$  mm a  $l_2 = 200$  mm.

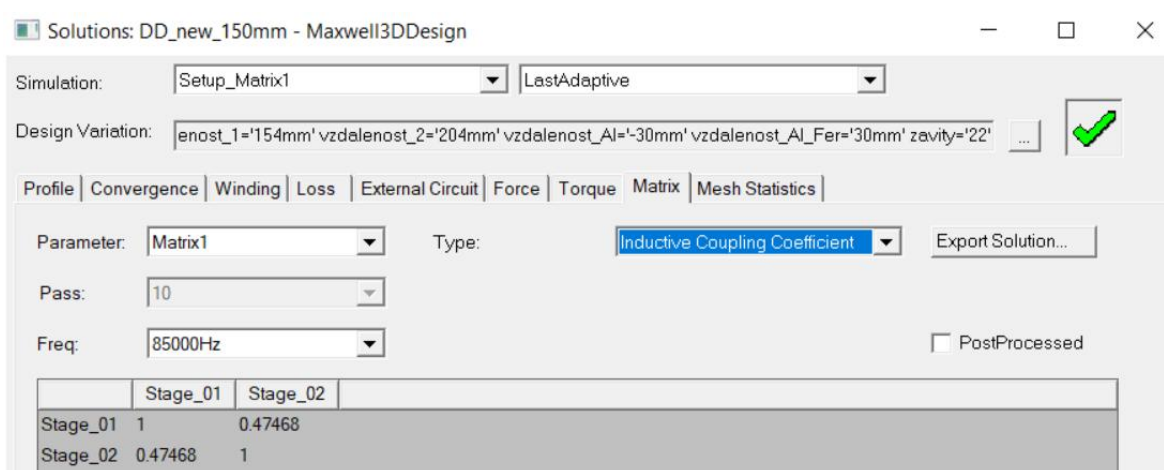
Výpočet vlastního návrhu WPT systému využívajícího IPT se zakládá na několika základních fyzikálních vztazích (9, 10), ze kterých popisujeme základní dění v oblasti cívek [53, 57, 58].

$$M = k \cdot L \quad (9)$$

$$\omega = 2 \pi \cdot f \quad (10)$$

První vztah (9) nám udává závislost vzájemné indukčnosti  $M$  na činiteli vazby  $k$  a vlastní indukčnosti cívky  $L$ . Další rovnice (10) udává hodnotu úhlové rychlosti  $\omega$  na frekvenci  $f$  a konstantě. Pro lepší znázornění vnitřních závislostí a parametrů zapojení je elektrický obvod schematicky vykreslen už na předchozím *obrázku 1*.

Obvod se skládá z primární a sekundární strany, kde máme zadány jen základní parametry (viz. *Tabulka 3*). Pro číselné určení ostatních parametrů obvodu je klíčové zjistit velikost činitele vazby  $k$ , pro již určené rozměry a rozvržení vinutí. Hodnotu činitele vazby jsem zjistil za pomoci vykreslení parametrického modelu double D v SW nástroji Ansys Maxwell 3D. Po přiřazení modelu všech potřebných vlastností a omezení jsem provedl analýzu v úloze typu *eddy current*, z čehož jsem zjistil parametr  $k$ . Výstup ze softwaru je patrný na *obrázku 12*, kde je udán činitel vazby (mezi vinutími *Stage\_01* a *Stage\_02*). Toto zjištění proběhlo pro obě vzdálenosti cívek  $l_1$  i  $l_2$ .



Obrázek 12: Screen z analýzy znázorňující parametr činitele vazby  $k$  pro  $l = 150$  mm

Po určení výše uvedených hodnot  $k_1 = 0,47468$  a  $k_2 = 0,35599$  je potřeba pochopit chování obvodu ve smyslu, že pro ideální fungování systému budeme vyžadovat, aby elektrický obvod byl ve stavu rezonance. V tomto specifickém stavu dochází k maximálnímu přenosu činného výkonu  $P$ , a také současně ke snížení zdánlivého výkonu  $S$ . Obvod dostaneme do rezonance pouze při konkrétní hodnotě frekvence, která je dána Thomsonovým vztahem (11 - 13). Tento vztah vychází z rovnosti kapacitní a induktivní reaktance (11), které po rozložení na základní vztahy (12) obsahující námi hledanou  $\omega_0$  [57, 58].

$$X_L = X_C \quad (11)$$

$$\omega_0 \cdot L = \frac{1}{\omega_0 \cdot C} \quad (12)$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{L \cdot C} \quad (13)$$

Pro určení rezonanční frekvence  $f_0$  z rovnice (13) použijeme dosazení do vztahu (10). Ve stavu rezonance a využití sério-sériového spojení můžeme pro jednoduchost zavést symetrické cívky i jejich indukčnosti  $L_1$  a  $L_2$ , pro které náleží symetrické parametry jako je stejný odpor vinutí nebo kapacita (14 - 16).

$$L_1 = L_2 \quad (14)$$

$$C_1 = C_2 \quad (15)$$

$$R_1 = R_2 \quad (16)$$

Nyní si mohu v závislosti na předchozích zjištěních určit přibližné velikosti odporu vinutí  $R_1 = R_2 = 0,2 \Omega$ . Dále mohu z počátečních hodnot výstupního činného výkonu  $P_{bat}$  a napětí  $U_{bat}$  určit pomocí rovnice (17) výstupní proud  $I_{bat}$  [59].

$$I_{bat} = \frac{P_{bat}}{U_{bat}} \quad (17)$$

Po dosazení zjistíme, že číselná hodnota proudu je  $I_{bat} = 125 \text{ A}$ , za  $P_{bat}$  je v tomto případě dosazena dvojnásobná hodnota výkonu, neboť byl vzorec upraven pro stejnosměrné obvody. Tento parametr použijeme pro zjištění potřebné vzájemné indukčnosti  $M$ , kterou nám udává následující vztah (20). Při určení číselné hodnoty  $M$  je potřebné znát hodnotu

odporu zátěže  $R_Z$ , kterou určíme dosazením do vztahu (18) vycházejícího z Ohmova zákona [57].

$$R_Z = \frac{U_{bat}}{I_{bat}} \quad (18)$$

Po dosazení známých hodnot získáme velikost odporu zátěže  $R_Z = 6,4 \Omega$ . V této chvíli potřebujeme určit už jen poslední veličinu, která je nezbytná ke zjištění vzájemné indukčnosti. Touto veličinou je vstupní (napájecí) napětí  $U_I$ . Toto napětí je voleno tak, aby bylo napájecí hodnota napětí standardně dostupná. V tomto případě byla zvolena špičková hodnota třífázového napětí v síti, která je vyčíslena následujícím výpočtem (18) [53].

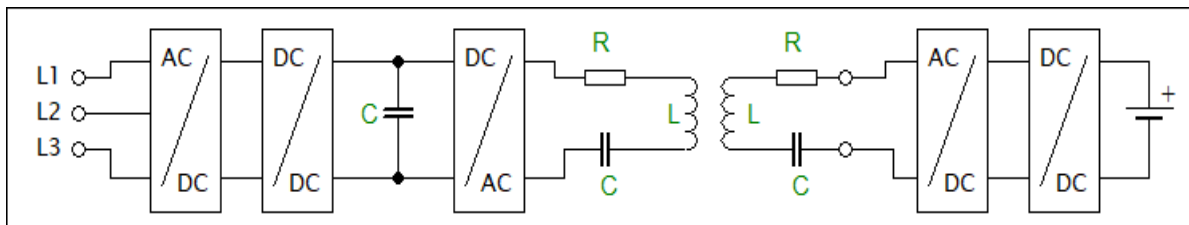
$$U_{1m} = U_1 \cdot \sqrt{2} \quad (19)$$

Výpočtem předchozího vztahu získáme hodnotu  $U_{1m} \sim 565 \text{ V}$  a po zjištění finálních hodnot přeneseného výkonu a jeho účinnosti, která byla pouze  $\eta = 83,798 \%$  jsem byl nucen se znalostí chování a funkčnosti obvodu zvýšit napájecí napětí. K tomuto kroku jsem dospěl, protože ke zvýšení účinnosti je zapotřebí zvýšení činitele jakosti, kterého můžeme dosáhnout vyšší indukčností. Napětí bylo možné zvýšit pouze za předpokladu použití zvyšovacího pulzního měniče nebo přímo pulzního usměrňovače na primární straně systému. Toto napětí  $U_I$  bylo zvýšeno pomocí metody přepočítávání až na hodnotu  $U_I = 800 \text{ V}$ . Provedl jsem testovací přepočty i pro vyšší napájecí napětí např.  $U = 1000 \text{ V}$  (viz. *Tabulka 4*), ale vzhledem k menší změně účinnosti a uvážení nutnosti zvýšení napájecího napětí jsem se rozhodl pro  $U_I = 800 \text{ V}$ . Hlavním důvodem bylo docílení ideálního kompromisu účinnosti přenosu a velikosti dodaného napájecího napětí.

**Tabulka 4: Přehled hodnot dopočítaných účinností přenosu daného systému WPT pro různá napájecí napětí při standardizované frekvenci dle SAE TIR J2954**

Přehled hodnot teoretické účinnosti systému pro různá napájecí napětí			
f [kHz]	85	85	85
$U_I$ [V]	565	800	1000
$\eta_{\text{TEORETICKÁ}}$ [%]	83,798	93,740	95,997

Ke splnění mé počáteční podmínky výstupního napětí systému  $U_{bat} = 400V$  jsem zvolil následující konfiguraci systému WPT včetně DC-DC měniče, která je znázorněna na obrázku 13. Na primární i sekundární straně pracuji s napětím  $U = 800V$  a koeficientem převodu rovném 1, ale na svorkách baterie je příchozí napětí z výstupu DC-DC měniče o požadované velikosti  $U_{bat} = 400 V$ .



Obrázek 13: Grafické znázornění konfigurace systému WPT s DC-DC měničem

Určením napájecího napětí máme vše potřebné pro určení vzájemné indukčnosti mezi vinutími. Tuto hodnotu zjistíme dosazením do vztahu (20) [59].

$$M = \frac{|U| \cdot \omega + \sqrt{U_1^2 - 4 \cdot I_{bat}^2 \cdot R_1 \cdot (R_2' + R_z') \cdot \omega^2}}{2 \cdot \omega^2 \cdot I_{bat}} \quad (20)$$

V tuto chvíli už známe reálnou hodnotu  $M = 11,584 \mu H$ , kterou dále můžeme dosadit do rovnice (9). Zde je možné z podílu hodnot vzájemné indukčnosti a činitele vazby určit vlastní indukčnost  $L$  [57].

$$L = \frac{M}{k} \quad (21)$$

Tato indukčnost dle vztahu (21) je stejná pro primární i sekundární stranu  $L_1 = L_2 = 24,404 \mu H$  pro vzdálenost  $l_1$ . Dále můžeme určit hodnoty externích kondenzátorů, které se dopočítají dle upraveného Thomsonova vztahu viz. vzorec (22) [53, 57].

$$C = \frac{1}{\omega_0^2 \cdot L} \quad (22)$$

Kondenzátory primární a sekundární strany jsou velikostně sobě odpovídající a dosahují hodnoty kapacity  $C_1 = C_2 = 143,66 \text{ nF}$ . V tento moment jsem již schopen vyčíslit odporový parametr zátěže, pro jehož vyjádření použiji následující odvozenou rovnici (23) [59].

$$\frac{d\eta}{dR_Z} = 0 \rightarrow R_{Z-opt} = \sqrt{\frac{R_2 \cdot (R_1 \cdot R_2 + \omega^2 \cdot M^2)}{R_1}} \quad (23)$$

Tato hodnota odporu zátěže je hodnotou optimální, kterou však nebudeme moci prakticky využít z důvodu následného snížení přenosového výkonu. Hodnota  $R_{Z-Opt} = 6,1899 \Omega$  je ale velmi blízká použitému  $R_Z = 6,4 \Omega$ . Tímto znám velikosti všech pasivních součástí elektrického obvodu a jsem schopen vyjádřit teoretické hodnoty požadovaných výkonů na vstupu (primární části) i na výstupu (sekundární části) systému WPT. Velikost potřebného výkonu dodaného na primární stranu je udána následujícím vztahem (24) [59].

$$P_1 = \frac{(R_2 + R_Z) \cdot |U_1|^2}{R_1 \cdot (R_2 + R_Z) + M^2 \cdot \omega^2} \quad (24)$$

Dosazením do vzorce (24) získám teoretickou hodnotu nutného dodaného výkonu k získání požadované výkonové hladiny ( $P_{bat} = 50 \text{ kW}$ ) na výstupu. Na primární stranu je třeba dodat výkon o velikosti  $P_1 = 53\,340,75 \text{ W}$ . Při zajištění této vstupní hodnoty získáme na výstupu požadovaný výkon  $P_2$ , který si teoreticky ověříme pomocí rovnice níže (25) [59].

$$P_2 = \frac{M^2 \cdot \omega^2 \cdot |U_1|^2}{[R_1 \cdot (R_2 + R_Z) + M^2 \cdot \omega^2]^2} \quad (25)$$

Ověření výstupního výkonu dle předchozího vztahu (25) proběhlo po číselném dosazení úspěšně, neboť se hodnota  $P_2$  rovná počáteční zadané hodnotě výstupního výkonu  $P_{bat}$ . A zároveň díky této rovnici máme matematicky vyjádřeno velikost  $P_2 = 50 \text{ kW}$ . Nyní jsem již schopen vyjádřit teoretickou účinnost přenosu systému z poměru vypočítaných výkonů  $P_1$  a  $P_2$  nebo za použití vztahu (26), který provede tento výpočet z prvotních hodnot. Tento vztah užívám pro ověření předchozích výpočtů a zároveň pro přesnější výsledný údaj bez ovlivnění zaokrouhlování při výpočtech [59].

$$\eta = R_Z \cdot |I_2|^2 = \frac{M^2 \cdot \omega^2 \cdot R_Z}{(R_2 + R_Z) \cdot (R_1 \cdot (R_2 + R_Z) + M^2 \cdot \omega^2)} \quad (26)$$

Při vyjádření číselného poměru výkonu a příkonu systému dostaneme hodnotu účinnosti  $\eta = 0,937369 \approx 93,737 \%$ . Tato účinnost systému je z mého pohledu velmi dobrá, protože

splňuje a dokonce o více než 3,5 % přesahuje minimální zadanou účinnost systému WPT. Tato hodnota účinnosti je ale pouze teoretická (vypočtená) a při vyjádření je nezbytné dále uvážit také maximální teoretickou účinnost zjištěnou z rovnice (27). V tomto vztahu figuruje dosažení zjištěné účinnosti (26) do předchozího vztahu (23) [59].

$$\eta_{MAX} = \frac{2 \cdot R_1 \cdot R_2 + M^2 \cdot \omega^2 - 2 \cdot \sqrt{R_1 \cdot R_2 \cdot (R_1 \cdot R_2 + M^2 \cdot \omega^2)}}{M^2 \cdot \omega^2} \quad (27)$$

Vyčíslením tohoto posledního vztahu (27) je získán poslední důležitý parametr návrhu WPT systému a to hodnota maximální teoretické účinnosti systému  $\eta_{MAX} = 0,93740 \approx 93,74 \%$ . Tato hodnota je vyšší než vypočítaná teoretická účinnost  $\eta$ , což je logickým vyústěním a zároveň kontrolou výpočtu. Obě velikosti účinností jsou velmi podobné, liší se pouze o 0,0032 %. S těmito informacemi můžeme pracovat při praktické konstrukci WPT systému i při následném návrhu elektromagnetického stínění.

Veškeré dosažené hodnoty zmíněné v této kapitole 4.1 byly zaznamenány a dopočítány pro vzdálenost cívek  $l_1 = 150\text{mm}$ . Celý postup jsem zopakoval taktéž pro vzdálenost  $l_2 = 200\text{mm}$  a souhrnné výsledky dosažené za pomoci vztahů (9 - 27) jsou znázorněny v následující tabulce 5.

**Tabulka 5: Souhrnné zobrazení dopočítaných hodnot systému WPT pro obě zvolené vzdálenosti cívek**

Hodnoty dopočítané pro vzdálenost $l_1 = 150\text{ mm}$ (vlevo) a $l_2 = 200\text{ mm}$ (vpravo)		
f [Hz]	85000	85000
$U_1$ [V]	800	800
$\omega$ [rad/s]	534070,75	534070,7511
$P_{bat}$ [W]	50000	50000
$U_{bat}$ [V]	800	800
$I_{bat}$ [A]	125	125
M [H]	1,16E-005	1,16E-005
$R_Z$ [ $\Omega$ ]	6,4	6,4
$R_1, R_2$ [ $\Omega$ ]	0,2	0,2
k [-]	0,47468	0,35599
$L_1, L_2$ [H]	2,44037E-05	3,254E-05
$C_1, C_2$ [F]	1,43664E-07	1,07742E-07
$R_{z-optimální}$ [ $\Omega$ ]	6,189869	6,189869
$\eta$ [-]	0,937369	0,937369
$\eta_{MAX}$ [-]	0,937401	0,937401

## 5.2 Vlastní návrh elektromagnetického stínění

Návrh elektromagnetického stínění vychází z teoretických znalostí a konkrétních hodnot systému bezdrátového přenosu elektrické energie. Nejdříve je potřeba vybrat takový materiál, jehož fyzikální vlastnosti budou vhodné (úzká hysterezní smyčka) a jeho finanční náklady co nejnižší.

Jak jsem již zmínil v teoretické části, vhodný materiál by měl být magneticky měkký ferit, který se využívá ve vysokofrekvenční technice a obecně se jeho frekvence udává v širokém frekvenčním pásmu desítek kHz až desítek GHz. Běžně se tyto materiály vyrábějí pomocí práškové metalurgie, kde se využívá spojení  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  s vhodným dvoumocným kovem (např. Ni, Mn, Zn, Mg, Co, Cd) [60]. Magneticky měkké ferity jsou několikanásobně dražší v poměru k magneticky tvrdým feritům, ale parametry magneticky tvrdých feritů nejsou vhodné pro tvorbu stínění především vlivem nízké pracovní frekvence. Využívají se nejčastěji jako jádra v transformátorech a zachovávají si svůj magnetismus [61].

Ze skupiny měkkých feritů jsem zvolil několik materiálů, které jsem mezi sebou porovnával. Do této skupiny jsem vybral materiály N27 ( $\mu_r = 2000$  H/m), N41 ( $\mu_r = 2800$  H/m) a N51 ( $\mu_r = 3000$  H/m), které mají frekvenční rozsah do  $f = 100$  kHz. Každý materiál má své klady a zápory, například N27 má nízkou relativní permeabilitu, ale je levnější než zbylé dva materiály. Dále jsem uvažoval o materiálech z vyšší frekvenční hladiny do  $f = 500$  kHz. V této skupině jsem vybral materiály N87, N88, N95, N96 a N97. Zde je uveden také jeden z nejběžnějších materiálů N87 nebo N95 a N96, které mají výhodné teplotní vlastnosti. Pro svůj návrh jsem po uvážení všech možností zvolil materiál N97, který má nejnižší ztráty ze zmíněných materiálů, jeho relativní permeabilita je  $\mu_r = 2300$  H/m, ale je dražší než například standardní N87 [62]. Vzhledem k ceně jsem provedl průzkum nabídky z Číny a východního trhu s elektronikou, ale používají odlišné značení a neuvádějí kompletní specifikaci zboží [63]. Také s ohledem na započítání poštovného jsem od výběru z těchto zahraničních portálů upustil, neboť bych se mohl dopustit chyby vlivem výběru špatného nebo neexistujícího materiálu.

Po výběru materiálu stínění přichází na řadu nalezení ideálního segmentu stínění z daného materiálu. Celé stínění je třeba složit z malých částí (segmentů), které jsou



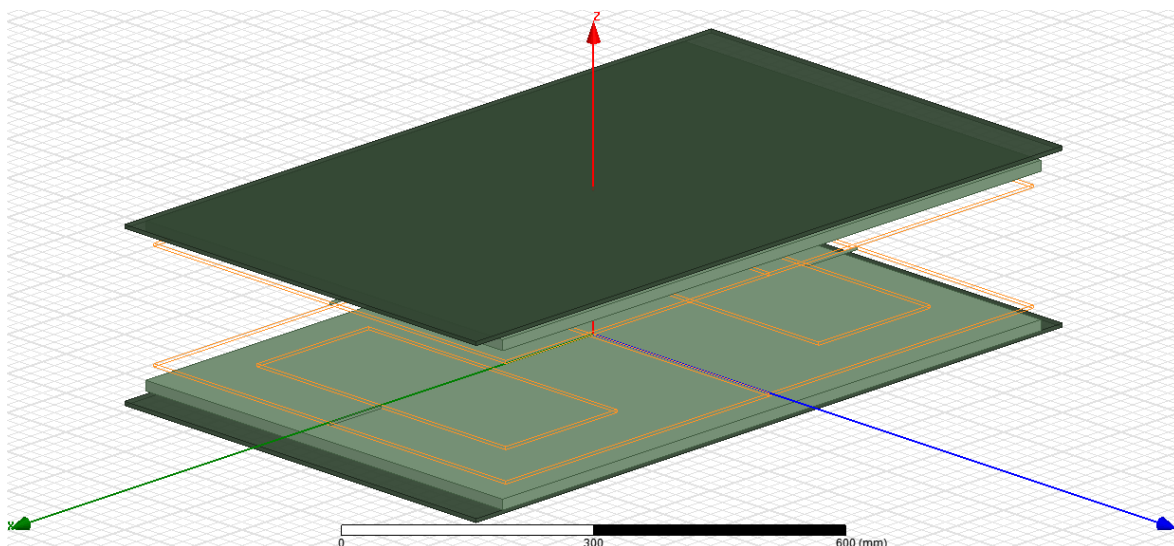
nesporně levnější, než-li vytvářet stínění na zakázku. Jako ideální segment stínění pro tento návrh jsem zvolil feritové jádro typu I z materiálu N97 od výrobce TDK. Tento feritový kvádr je o rozměrech (v x š x h) 102x38x7 mm. V *tabulce 6* je znázorněn cenový přepočít feritového bloku k počtu odebraných kusů [64].

**Tabulka 6: Cenový přepočít prvku feritového stínění dle odebraného množství**

Množství [ks]	Jednotková cena [Kč]	Rozšířená cena [Kč]
<b>1</b>	201,74	201,74
<b>10</b>	181,57	1815,70
<b>25</b>	137,03	3425,75
<b>50</b>	133,10	6655,00
<b>100</b>	116,85	11685,00
<b>250</b>	108,99	27247,50
<b>500</b>	104,80	52400,00

Jak je patrné z hodnot z tabulky, tak se zvyšujícím se odebíraným množstvím feritových bloků jejich jednotková cena klesá. Cena jednotky i přepočít rozšířené ceny je udán včetně DPH.

Dalším krokem návrhu stínění je zvolit topologii a rozměry stínění. Různé topologie jsou navrženy z teoretických znalostí a s přihlédnutím k použitému množství feritových bloků. Prvním druhem topologie je plná deska z materiálu N97 a složená z jednotlivých segmentů. Tato topologie byla vzhledem k rozměrům bloků navržena pro dva různé rozměry tloušťky (7 a 14 mm). Plná topologie je znázorněna pro rozměr  $h = 14$  mm na *obrázku 14*.



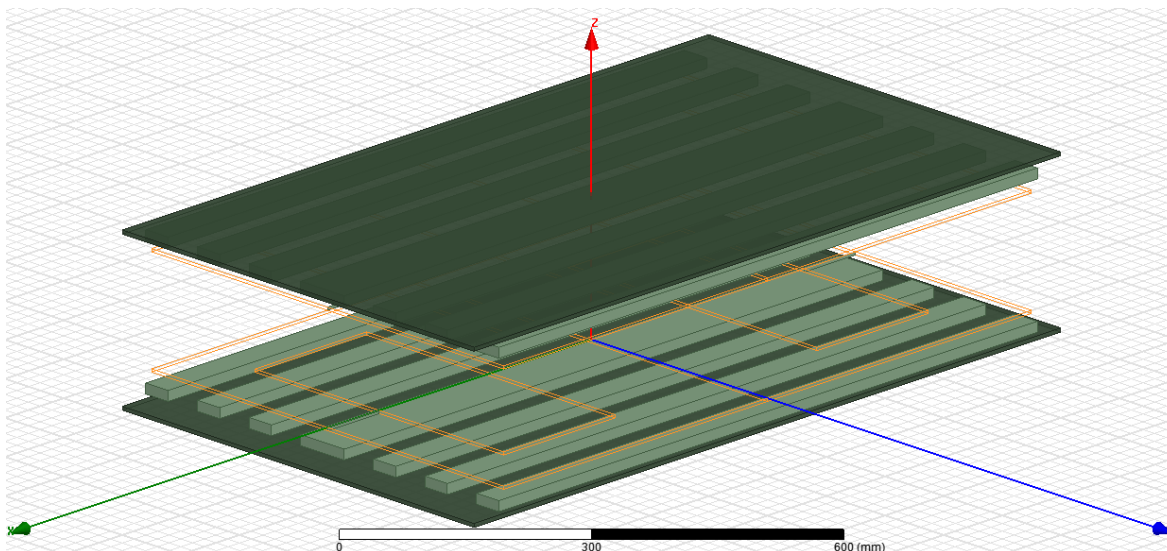
**Obrázek 14:** Ukázka topologie plného feritového stínění s tloušťkou  $h = 14$  mm a hliníkovým plátem

Návrh plného stínění o rozměrech překrývající plochy cívek (900x600 mm) je nejnákladnější a zároveň ideální formou stínění. Rozměry feritové desky jsou závislé nejen na velikosti cívek, ale také na rozměrech skládaných feritových segmentů. Celkové rozměry feritu neodpovídají rozměrům cívek, a to z důvodu, že není možné feritové bloky dělit (řezat, rozbítjet atd.). Jejich rozbitím bychom narušili jejich vnitřní strukturu, vlastnosti a navíc by se z feritu uvolňovali zdraví nebezpečné látky. Z těchto závažných důvodů jsem se rozhodl pro rozměry dané násobky celých čísel zvoleného bloku a získal jsem rozměry 918x608x14 mm a 918x608x7 mm. Za použití vzorce (28) zjistíme objem obou plných stínění (ovšem pouze jedné poloviny systému).

$$V = a \cdot b \cdot c \quad (28)$$

Feritové stínění s rozměrem  $h = 14$  mm má objem  $V_1 = 0,00781402 \text{ m}^3$  a na jeho složení je potřeba 288 ks feritových bloků materiálu N97. Stínění s poloviční hloubkou má poloviční objem  $V_2 = 0,003907008 \text{ m}^3$ , a také se skládá přesně z poloviny feritových bloku, tedy ze 144 ks.

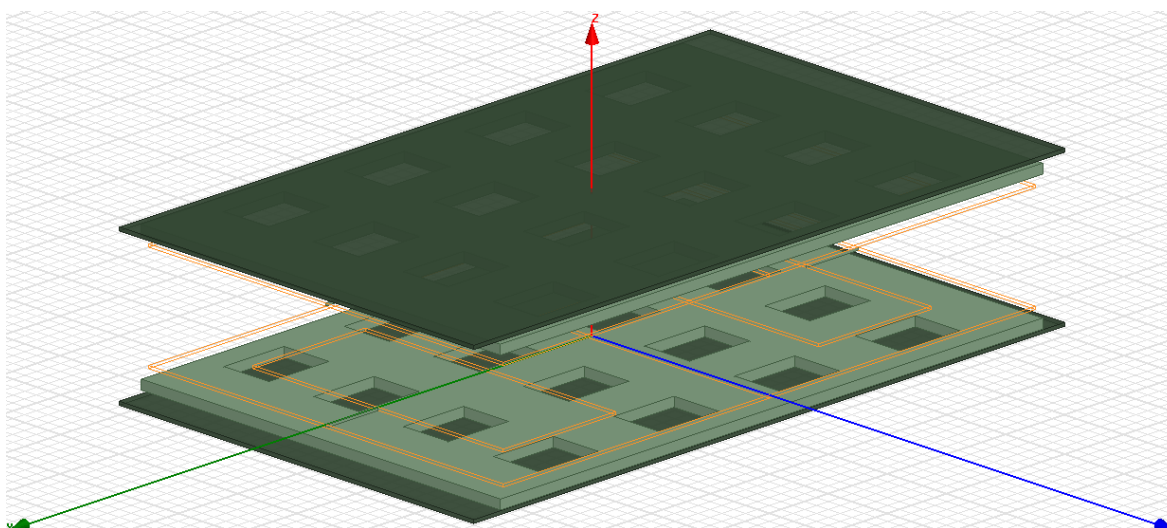
Druhou odlišnou topologií je stínění tvořené z feritových tyčí o rozměrech vhodných dle feritového bloku. Grafický náhled na toto stínění je na *obrázku 15*.



**Obrázek 15:** Ukázka topologie feritového stínění tvořeného tyčemi s tloušťkou  $h = 14$  mm a hliníkovým plátem

Zmíněné stínění je tvořeno 8 tyčemi, z nichž dvě jsou ve středu osy X spojeny. Toto spojení je úmyslné abychom dostali více stínění do oblastí s největším tokem. Rozměry jedné tyče stínění jsou  $918 \times 38 \times 14$  mm. Mezi tyčemi (kromě středových) jsou mezery o velikosti 50 mm. Celkový objem po výpočtu vztahu (28) je  $V = 0,003907008$  m<sup>3</sup>, což je totožné jako u plného plátu s  $h = 7$  mm. Stejně tak odpovídá i počet potřebného množství feritů, které je opět 144 ks.

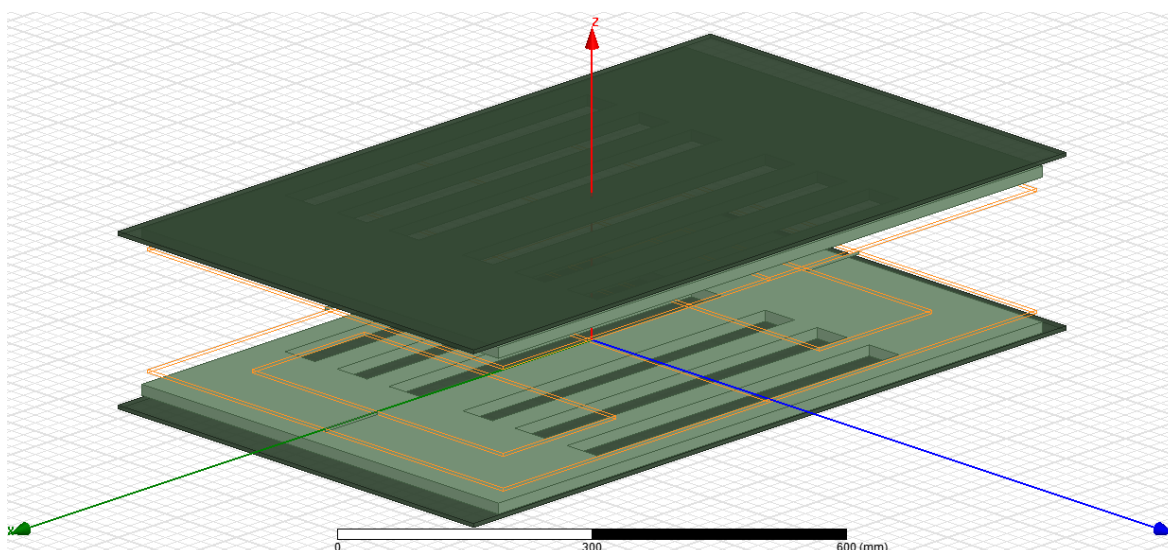
Třetím speciálně zvoleným typem stínění je tzv. čtvercová (v našem případě obdélníková) topologie. Jedná se o plnou feritovou desku s pravidelnými obdélníkovými výřezy. Pro lepší představu je tato topologie představena na *obrázku 16*.



**Obrázek 16:** Ukázka topologie feritového stínění s obdélníkovými výřezy, tloušťkou  $h = 14$  mm a hliníkovým plátem

Znázorněné stínění obsahuje 16 pravidelných obdélníkových výřezů o velikosti 102x76x14 mm. Tyto rozměry odpovídají přesně 4 ks chybějících feritových bloků na jeden výřez. Rozměry stínění opět odpovídají velikosti cívek, jedná se tedy o rozměr 918x608x14 mm. Celkový objem elektromagnetického stínění byl dle výpočtu (28) vyčíslen na  $V = 0,006078 \text{ m}^3$ , což v přepočtu odpovídá 224 ks použitým segmentům feritu N97 na jednu desku (polovinu) stínění systému WPT.

Posledním navrženým typem stínění je tyčové stínění s plnými zakončeními na obou užších stranách cívek. Tato topologie je ilustrativně zobrazena na obrázku 17.



**Obrázek 17: Ukázka topologie tyčového feritového stínění se zakončeními, tloušťkou  $h = 14 \text{ mm}$  a hliníkovým plátem**

U dané topologie opět můžeme vidět úmyslné zesílení ve středové oblasti (podobně jako u stínění složeného z feritových tyčí), a také šesti pravidelných výřezů o rozměrech 510x38x14 mm. Celkové rozměry jsou opět 918x608x14 mm a přidané zakončení má z každé strany velikost 204x608x14 mm. Objem celého stínění byl opět vypočítán dle rovnice (28) a je stanoven na hodnotu  $V = 0,005643 \text{ m}^3$ . Tento objem je dosažen složením celkem 208 ks feritových bloků.

Počty kusů segmentů udané dle výpočtu objemu (28) zahrnují pouze potřebu na jedno stínění. Pro finální výpočet nákladů je potřeba počítat s množstvím dvojnásobným.

Dle znalostí elektromagnetického stínění můžeme předpokládat nejlepší stínící vlastnosti u topologií s největším množstvím použitých feritů (také nejdražších) jako jsou

např. plné stínění o síle 14 mm nebo stínění s obdélníkovými výřezy. Naopak nejhorší stínící vlastnosti vlivem malého množství použitého feritu se dají předpokládat u stínění s použitím feritových tyčí.

## 6 Ověření vypočítaných hodnot metodou konečných prvků

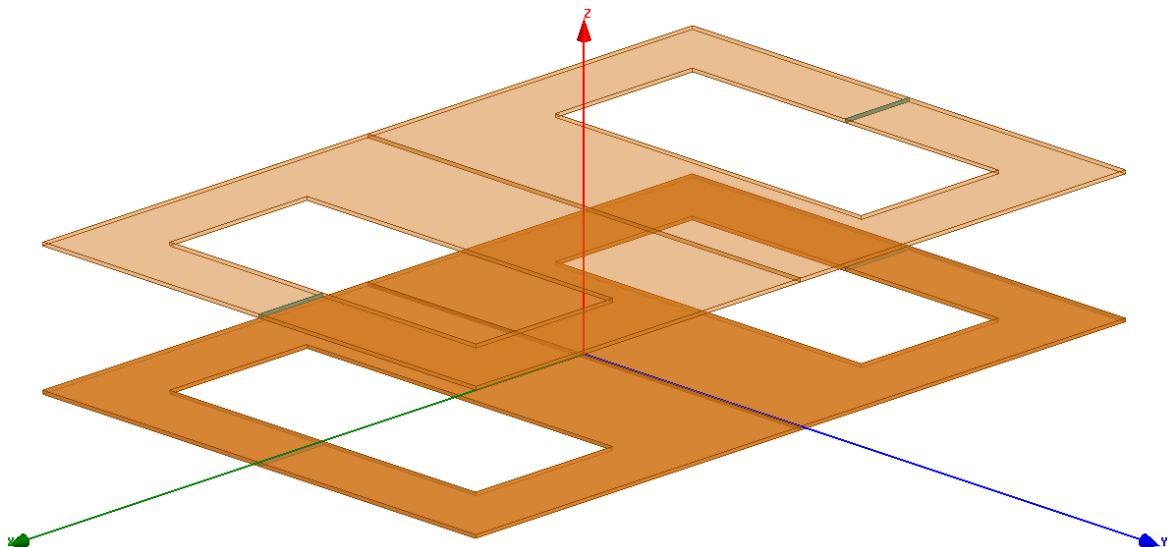
V této části se věnuji ověření vypočítaných (teoretických) hodnot pomocí 3D simulace v programu Ansys Maxwell 3D s využitím metody konečných prvků (FEM). Objektem simulace bude vlastní návrh bezdrátového systému přenosu elektrické energie s ohledem na počáteční zadané veličiny, a také veškeré topologie elektromagnetického stínění.

Kapitulu dělím do tří hlavních částí. V první podkapitole představím vlastní sestrojené modely v SW prostředí, dále prokazují naměřené výsledky včetně grafických znázornění. Poslední část této kapitoly věnuji porovnání a zhodnocení získaných a ověřených výsledků pomocí FEM.

### 6.1 Seznámení s modelem v simulačním prostředí

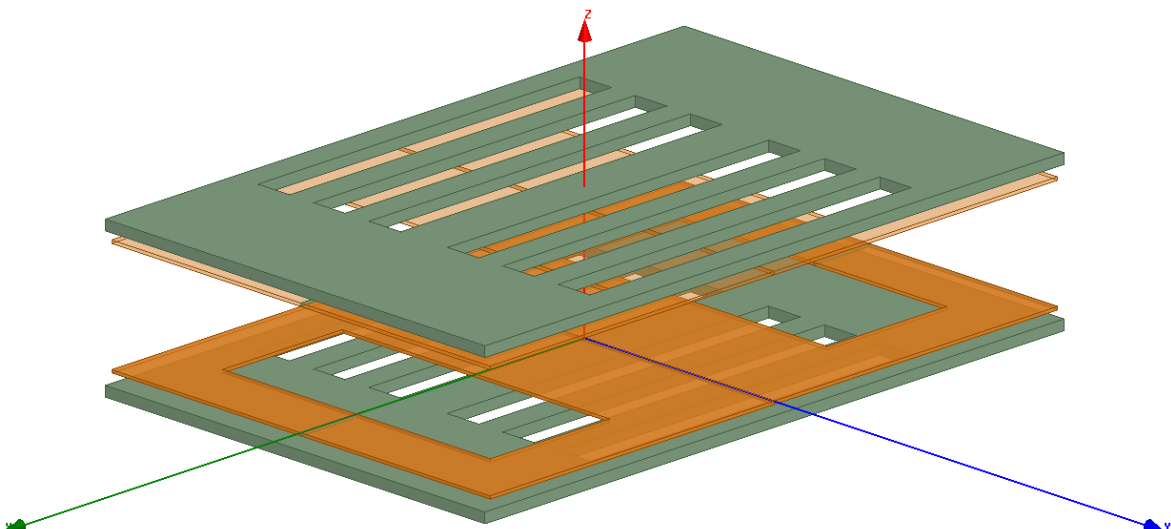
Základní částí 3D simulace v programu s využitím metody konečných prvků je vytvoření okolí modelu, ve kterém bude výpočet probíhat. Tento prostor se nazývá region a jeho rozměry jsou klíčové, pokud chceme docílit přesných výsledků. Velikost regionu musí být dostatečná, aby byl program schopen provést výpočet v požadovaných oblastech. Naopak příliš velký region zpomaluje výpočet a v krajních případech zahltí výpočetní nástroj. V tomto ohledu jsem dospěl ke kompromisu a zvolil jsem velikost regionu 2400x1450x2900 mm. Tyto rozměry jsou dostatečné pro budoucí vykreslení magnetického pole a ověřování požadovaných veličin. Největší rozměr regionu je výška, která nám znázorní vykreslení stínících vlastností navrženého elektromagnetického stínění.

Další nezbytnou částí modelu jsou dva páry cívek v topologii DD, které jsou zrcadlené tak, aby mezi nimi byly dvě již zmíněné vzdálenosti  $l_1 = 150$  mm a  $l_2 = 200$  mm. Pro tyto vzdálenosti proběhly veškeré simulace ve 2D i 3D prostoru. Samotné rozměry cívek jsou znázorněny na *obrázku 11*. Cívky jsou navrženy pro maximální vzdálenost vodičů v oblasti flux pipe (v místě přiblížení obou cívek), kde je šířka 176 mm, což je dvojnásobek oproti zbylé části double D, kde je šířka pouze 88 mm. Velikost cívky v ose Z se odvíjí od průměru vodiče  $d_{LIC}$ , který je stanoven jako  $d_{LIC} = 4$  mm. Celá topologie obou párů DD cívek je znázorněna na následujícím *obrázku 18*.



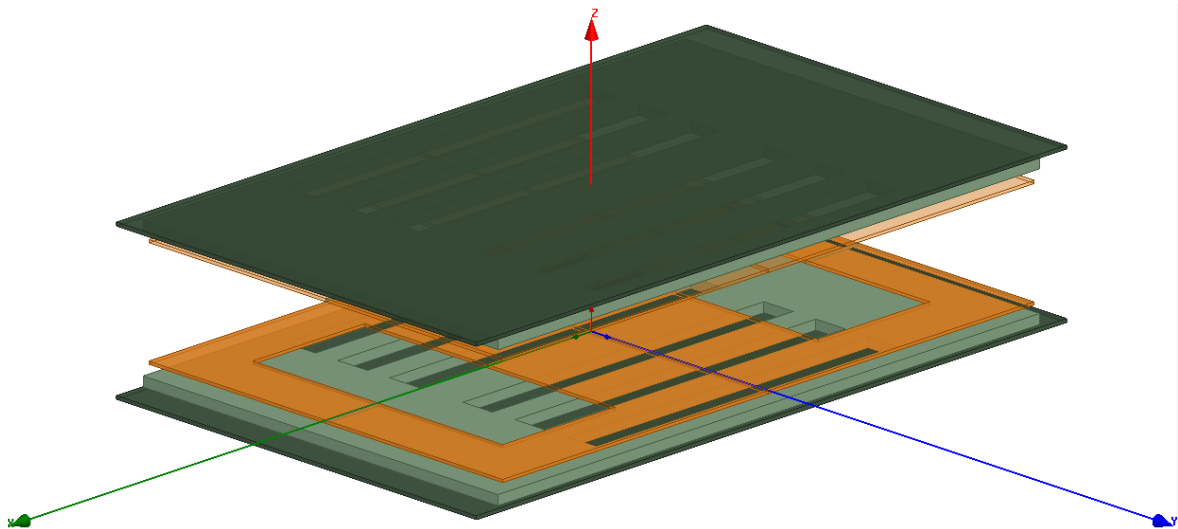
Obrázek 18: Grafické znázornění topologie double D cívek v pracovním prostředí SW Ansys Maxwell 3D pro vzdálenost cívek  $l_1 = 150$  mm

Nedílnou součástí modelu WPT systému je i mnou navržené stínění, které jak už víme z části 4.2, se skládá z pěti různých topologií, které budu pomocí SW nástroje testovat a porovnávat jejich vlastnosti. Všechny použité topologie jsou vyobrazeny na předchozích *obrázcích 14 až 17*. Feritová stínění jsou vždy umístěna v blízkosti párů cívek z té strany, kde chceme zabránit průchodu elektromagnetickému poli. Přesná poloha stínění je zobrazena také na *obrázku 19*.



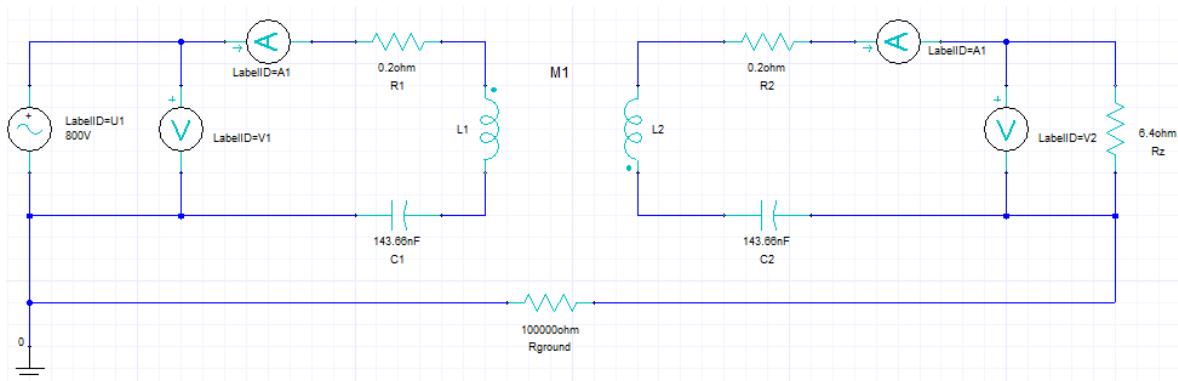
Obrázek 19: Grafické znázornění pozice feritového stínění vzhledem k vinutí z pracovního prostředí SW Ansys Maxwell 3D pro vzdálenost cívek  $l_1 = 150$  mm

Poslední viditelnou částí modelu je hliníková deska a tloušťce  $h = 5$  mm. Tato část stínění slouží především ke stínění elektrického pole. Vzhledem k nižší ceně hliníku není potřeba ubírat z plného stínění, ale naopak je výhoda udělat přesah hliníkové desky i přes stínění z feritu (materiál N97). Celkové rozměry hliníkových desek jsou 1000x610x5 mm. Pro znázornění pozice hliníkového stínění vůči ostatním prvkům systému je zde vyobrazení kompletního viditelného modelu na *obrázku 20*.



**Obrázek 20:** Grafické znázornění systému WPT z pracovního prostředí Ansys Maxwell 3D, zahrnujícího topologii cívek double D a feritové i hliníkové stínění pro vzdálenost cívek  $l_1 = 150$  mm

Právě popsany model skládající se z cívek, feritů i hliníku zastává v obvodu pouze roli ztrátového odporu, a také samozřejmě vlastní a vzájemné indukčnosti. Tyto parametry jsou součástí externího obvodu, který je vytvořen pro simulaci elektrického obvodu daného zařízení. Tento obvod je vyobrazen na následujícím *obrázku 21*.



**Obrázek 21:** Schematické zobrazení externího obvodu z programu Ansys Maxwell 3D včetně dopočítaných veličin pro vzdálenost cívek  $l_1 = 150$  mm



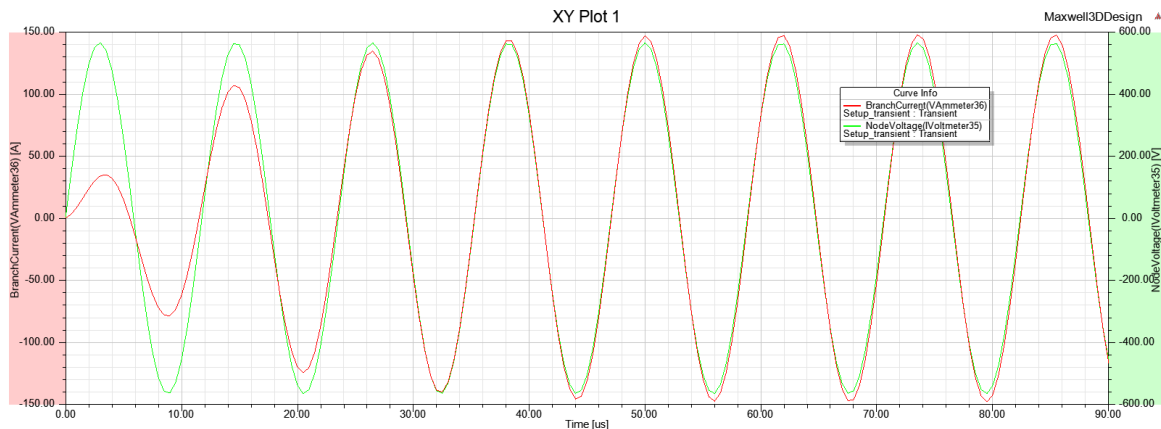
Externí obvod využívá S-S kompenzace, a také plní funkci externího napájecího zdroje pro navržený model. Veškeré hodnoty uvedené v *obrázku 21*, jsou dopočítané veličiny z kapitoly 4.1, které jsou shrnuty také v *tabulce 5*. Uvedený obvod zahrnuje zdroj střídavého napájecího napětí  $U_1 = 800$  V, zvolené odpory vinutí  $R_1$ ,  $R_2$ , externí kondenzátory  $C_1$ ,  $C_2$ , odporovou zátěž  $R_Z$  a veličiny  $L_1$  a  $L_2$ , které jsou přímo dosazovány do externího obvodu z navrženého 3D modelu.

V celém modelu je nezbytné upravit elektrické parametry tak, aby odpovídali vypočteným veličinám. Ve výpočtu vycházíme pouze z hodnoty činitele vazby  $k$  (zjištěného z parametrického modelu v úloze *eddy current*) a navržených rozměrů. Zjištěné hodnoty rezistorů a kondenzátorů pomocí výpočtu jednoduše zavedeme do externího obvodu, obdobně jako nastavíme napět'ový zdroj na vytyčenou hodnotu střídavého napětí. Složitější je nastavení parametru indukčnosti, kterou jsme vyjádřili pomocí vztahu (21) na hodnotu  $L_1 = L_2 = 24,404$   $\mu\text{H}$ . Tento parametr nastavíme pomocí počtu závitů  $N$ , které ovšem musíme udržovat v jednotkách celých čísel z hlediska reálnosti návrhu a případné konstrukce. Pro toto ladění indukčnosti v závislosti na počtu závitů  $N$ , lze vyjádřit opět pomocí parametrické úlohy. Z následujícího grafického znázornění (*Obrázek 22*) je jasně zřetelné, že pro udanou indukčnost se pohybujeme v nižších jednotkách počtu závitů  $N$ .



**Obrázek 22:** Grafické znázornění závislosti indukčnosti na zvyšujícím se počtu závitů  $N$  pro cívky se vzdáleností  $l_1 = 150$  mm vytvořené v programu Matlab

Po naladění obvodu WPT systému do rezonance, pro kterou jsou vyjádřeny číselné parametry, přichází vykreslení vstupních průběhů napětí  $U_1$  a proudu  $I_1$  pomocí transientní úlohy. Tento ilustrativní průběh je zobrazen na *obrázku 23*, pro vzdálenost cívek  $l_2$  a časový úsek  $t = 90 \mu\text{s}$ .

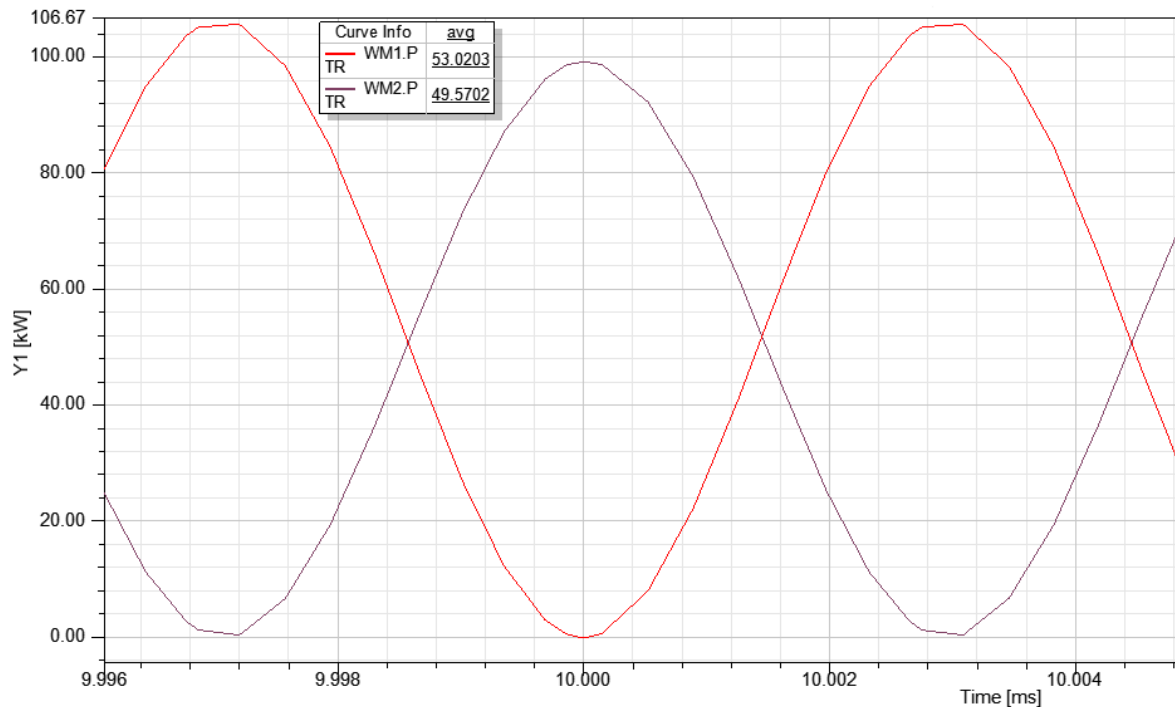


**Obrázek 23:** Grafická závislost vstupního proudu a napětí v časovém úseku  $t = 0 - 90 \mu\text{s}$

Na obrázku je jasně viditelné, že oba průběhy (napětí i proudu) jsou ve společné fázi. Vzhledem k tomu, že sledujeme prvních několik period signálu, tak máme možnost pozorovat i zvyšující se nástup vstupního proudu  $I_1$ , dokud se neustálý po odeznění přechodového děje. Přechodový děj pomíjí po době přibližně  $5\tau$ .

## 6.2 Naměřené výsledky pro vypočtené teoretické hodnoty

Po docílení stavu dokonalé rezonance v elektrickém obvodu WPT systému je třeba výsledky samotného systému ověřit. K tomuto účelu ověření bezdrátového přenosu elektrické energie a zjištění reálné hodnoty přenášených výkonů použijeme softwarový nástroj Ansys Simplorer Design, který dokáže vykreslit výstupní charakteristiky jen ze zadaných obvodových veličin. Do programu schematicky zakreslím obvodové schéma (viz. *Obrázek 21*) včetně dopočtených veličin pro obě zvolené vzdálenosti cívek  $l_1$  a  $l_2$ . Výslednou grafickou závislost znázorňující průběhy vstupního ( $P_1$ ) a výstupního ( $P_2$ ) výkonu pro zadané parametry vzdálenosti cívek 150 mm můžeme vidět na *obrázku 24*.



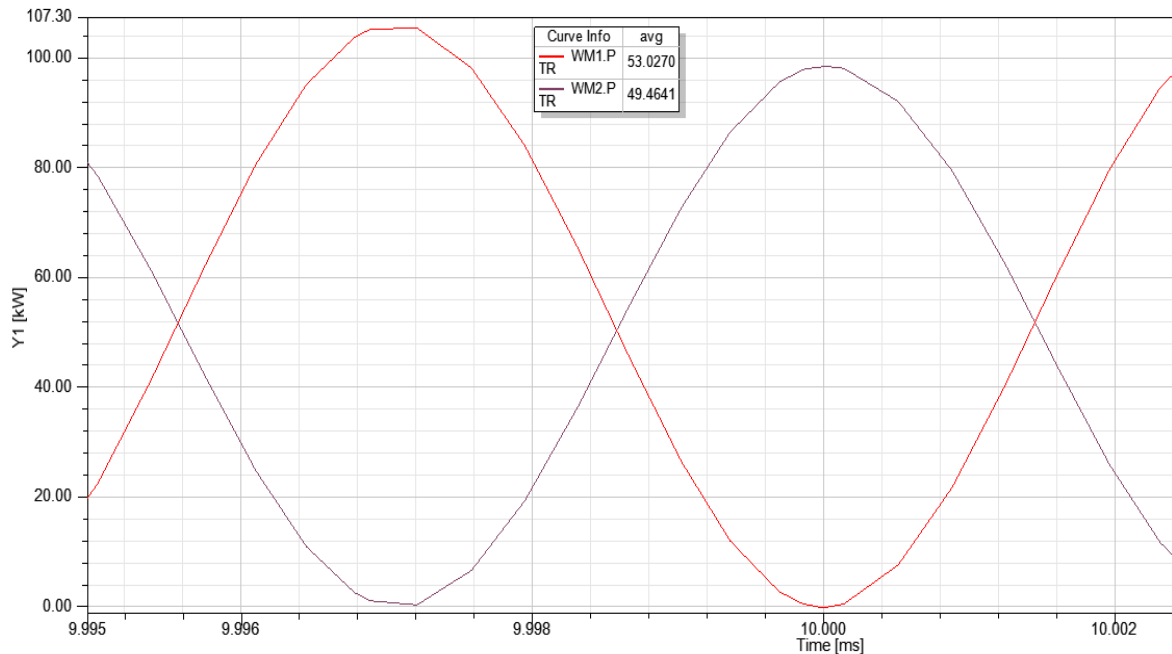
**Obrázek 24:** Detail grafického průběhu vstupního a výstupního činného výkonu simulovaného v programu Ansys Simplorer Design pro hodnoty vypočítané pro vzdálenost cívek  $l_1 = 150$  mm

Kromě zjištěných charakteristik jsem ze softwaru zjistil zadáním funkce *avg* průměrnou hodnotu obou vykreslených výkonů. K docílení větší přesnosti jsem použil průměrnou hodnotu počítanou v časovém úseku  $t = 400 - 10500$   $\mu\text{s}$ , spodní hranici rozmezí hodnot jsem volil s ohledem na ustálení hodnot po počátečním zkreslení (zákmitech) při spuštění systému. Velikosti odečtených výkonů jsou  $P_{1-AVG} = 53,0203$  kW a  $P_{2-AVG} = 49,5702$  kW. Z těchto hodnot můžeme za použití rovnice (29) určit reálnou hodnotu účinnosti přenosu navrženého WPT systému.

$$\eta_{REAL} = \frac{P_{2-AVG}}{P_{1-AVG}} \cdot 100 \quad (29)$$

Dosažením do uvedeného vztahu získáme výslednou účinnost přenosu  $\eta_{REAL} = 93,493$  %, tato hodnota je velice dobrá a odpovídá i v porovnání s teoretickým výpočtem ( $\eta_{TEORETICKÁ} = 93,737$  %). Obě účinnosti se liší pouze o 0,244 % a splňujeme i podmínku, že reálná účinnost nepřesahuje maximální teoretickou účinnost. Dalším kladným zjištěním je velikost přeneseného výstupního výkonu, která se oproti zadané vstupní veličině liší o méně než 1 % (konkrétně o 0,8596 %).

Stejný proces jsem provedl i pro zjištění výkonových charakteristik systému se vzájemnou vzdáleností cívek  $l_2 = 200$  mm. Výsledné průběhy činných výkonů včetně jejich průměrné hodnoty jsou uvedeny na obrázku 25.



**Obrázek 25: Detail grafického průběhu vstupního a výstupního činného výkonu simulovaného v programu Ansys Simplorer Design pro hodnoty vypočítané pro vzdálenost cívek  $l_2 = 200$  mm**

Z výše uvedeného obrázku jsme schopni odečíst průměrné hodnoty výkonu na primární i sekundární straně, které jsou  $P_{1-AVG} = 53,0270$  kW a  $P_{2-AVG} = 49,4641$  kW. Za použití již zmíněného vztahu (29) vypočítáme reálnou účinnost přenosu systému také pro vzdálenost cívek  $l_2$ . Tato účinnost přenosu je  $\eta_{REAL} = 93,281$  %, což je o 0,212 % méně oproti reálné účinnosti pro vzdálenost  $l_1$ . Při porovnání teoretické a reálné účinnosti přenosu systému zjistíme, že jejich rozdíl je pouze 0,456 %. Velikost účinností je i v tomto případě velmi dobrá a zjištěná reálná hodnota splňuje podmínku  $\eta_{MAX} > \eta_{REAL}$ . Pro ověření mého tvrzení a přehlednost všech popsaných účinností je k dispozici *tabulka 7*, která obsahuje souhrnné výsledky účinností přenosu navrženého WPT systému.

**Tabulka 7: Souhrnný přehled účinností přenosu WPT systému určených výpočtem nebo simulací**

Určeno	Označení	Pro $l_1 = 150$ mm	Pro $l_2 = 200$ mm
Výpočtem	$\eta_{TEORETICKÁ}$ [%]	93,7369	93,7369
Výpočtem	$\eta_{MAX}$ [%]	93,7401	93,7401
Simulací	$\eta_{REAL}$ [%]	93,4929	93,2810

Dále přecházím ze simulačního prostředí Simploreru k Maxwell 3D, kde pracuji nejenom se systémem bezdrátového přenosu elektrické energie, ale především s jeho stíněním. Docílení zjištěných výkonů ze Simploreru si v Ansys Maxwell 3D ověřím (kromě zadání vypočtených veličin do schématu externího obvodu) průběhy proudu a napětí na primární straně. Důkaz o rovnosti těchto průběhů z obou SW nástrojů je dán

v příloze B. Nyní uvedu zjištěnou velikost proudu  $I_{l-150mm} \sim 133$  A, díky které mohou dokončit výpočet proudové hustoty vodiče ze vztahu (8). Výsledná hodnota pro  $l_1$  je dána  $J_{150mm} = 33,25$  A/mm<sup>2</sup>, a totožná velikost je i pro vzdálenost cívek  $l_2 = 200$  mm, kde  $J_{200mm} = 33,25$  A/mm<sup>2</sup>. Jedná se o špičkové hodnoty prostorové hustoty proudu vodičů. Tyto parametry a průběhy byly časově závislé, a proto bylo nezbytné je řešit v transienčním typu úlohy, nyní bych však rád upustil od navrženého systému a začal se věnovat elektromagnetickému stínění a jeho vlivu na navržený systém. Pro vykreslení grafických znázornění magnetické indukce, intenzity a sycení feritů je potřeba ustálený stav (úloha typu *eddy current*).

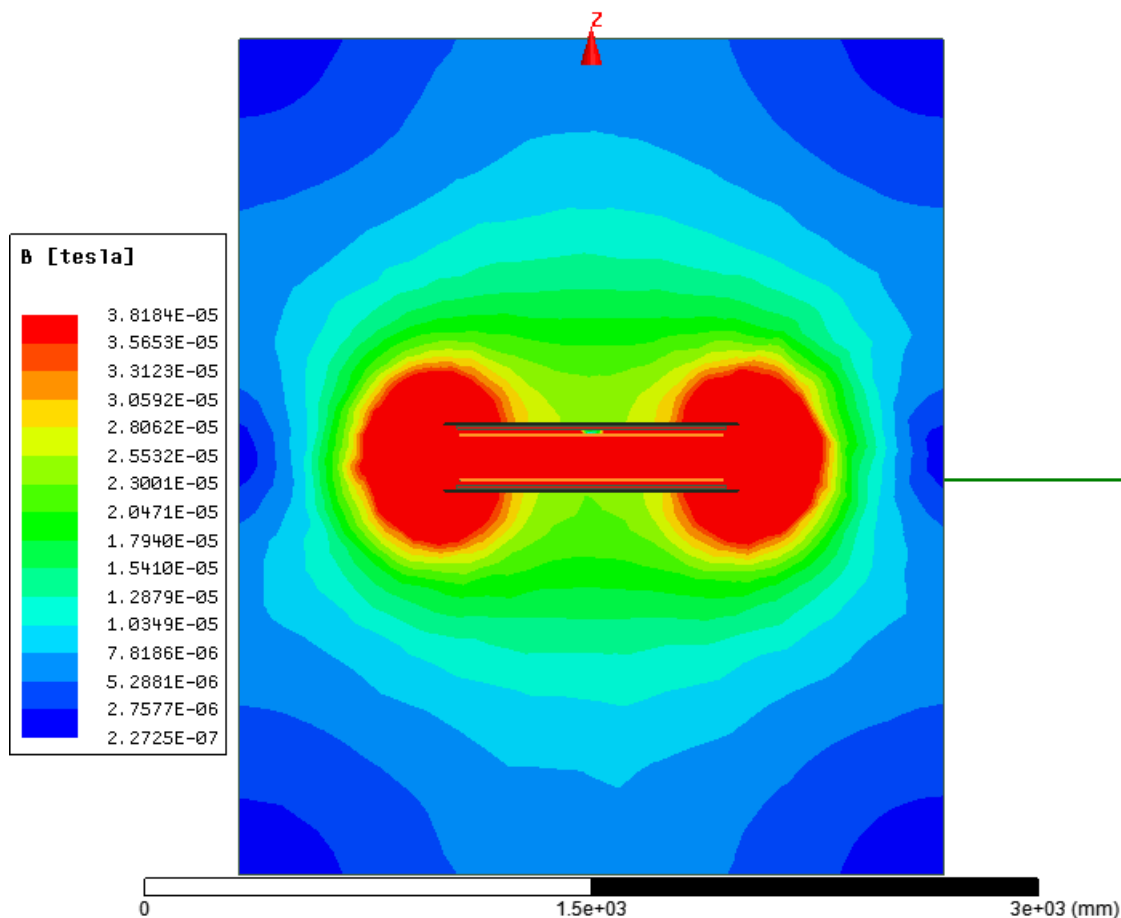
Po ověření ideálního fungování navrženého WPT systému jsem doplnil systém o elektromagnetické stínění, jehož několik topologií jsme si podrobně představili v předchozí kapitole 5.1. Doplněním feritového a hliníkového stínění dochází k narušení vlastností funkčního modelu. Elektrický obvod je vyveden ze stavu rezonance zapříčiněný změnou vlastní indukčnosti  $L_1$  a  $L_2$ . Tato změna je dána vložení stínění do blízkosti cívek, čímž jsme změnil jejich vlastnosti. Z tohoto důvodu je nutné pro každou topologii i vzájemnou vzdálenost cívek upravovat obvod tak, abychom opět docílili stavu rezonance.

Možností úprav je několik, ale pouze některé jsou „povolené“. Tím je myšleno, abychom nezměnili požadované počáteční parametry obvodu (např. frekvenci, účinnost přenosu, výstupní výkon, vstupní a výstupní napětí). Povolenou možností je zcela jistě změna počtu závitů  $N$ , který lze ale měnit pouze v rámci celých čísel. Z tohoto důvodu se jedná o velký skok v hodnotách indukčnosti (cca o desítky  $\mu$ H). S uvážením všech nabytých znalostí jsem se rozhodl pro metodu posuvu obou druhů stínění, neboť vzdálenost stínění má přímý vliv na vlastní indukčnost cívek. Pro perfektní naladění obvodu zpět do rezonance jsem použil transienční úlohu pro daný model a samotné ladění jsem prováděl až už vzájemnou vzdáleností mezi stíněními, tak i vzdáleností vůči cívce. Prakticky to bylo řešeno posuvem feritového stínění, které má větší vliv na parametr indukčnosti, a proto jsem ho použil jako „hrubé“ ladění. Naopak posuvem hliníkového stínění jsem řešil „jemné“ doladění aby zmíněná indukčnost odpovídala té teoretické až do desetitisícin  $\mu$ H. Tento proces ladění byl nezbytný pro odečtení následujících grafických znázornění magnetické intenzity a indukce, vykreslovaných v ustáleném stavu.

### 6.3 Fyzikální porovnání nasimulovaných výsledků

Jednotlivé charakteristiky jsou vykresleny pro různé typy stínění, ale vždy ve stejném měřítku hodnot. Měřitko je upraveno dle hygienických standardů ICNIRP 2010, které udává maximální bezpečnou hodnotu magnetické indukce pro veřejné prostory  $B_{MAX} = 38,1837$  T a maximální bezpečnou hodnotu magnetické intenzity pro veřejné prostory  $H_{MAX} = 29,6985$  A/m [46]. Dle těchto parametrů udávajících kvalitu stínění veřejného prostoru a vzdálenosti záření nebezpečného magnetického pole můžeme hodnotit kvalitu jednotlivých navržených elektromagnetických stínění.

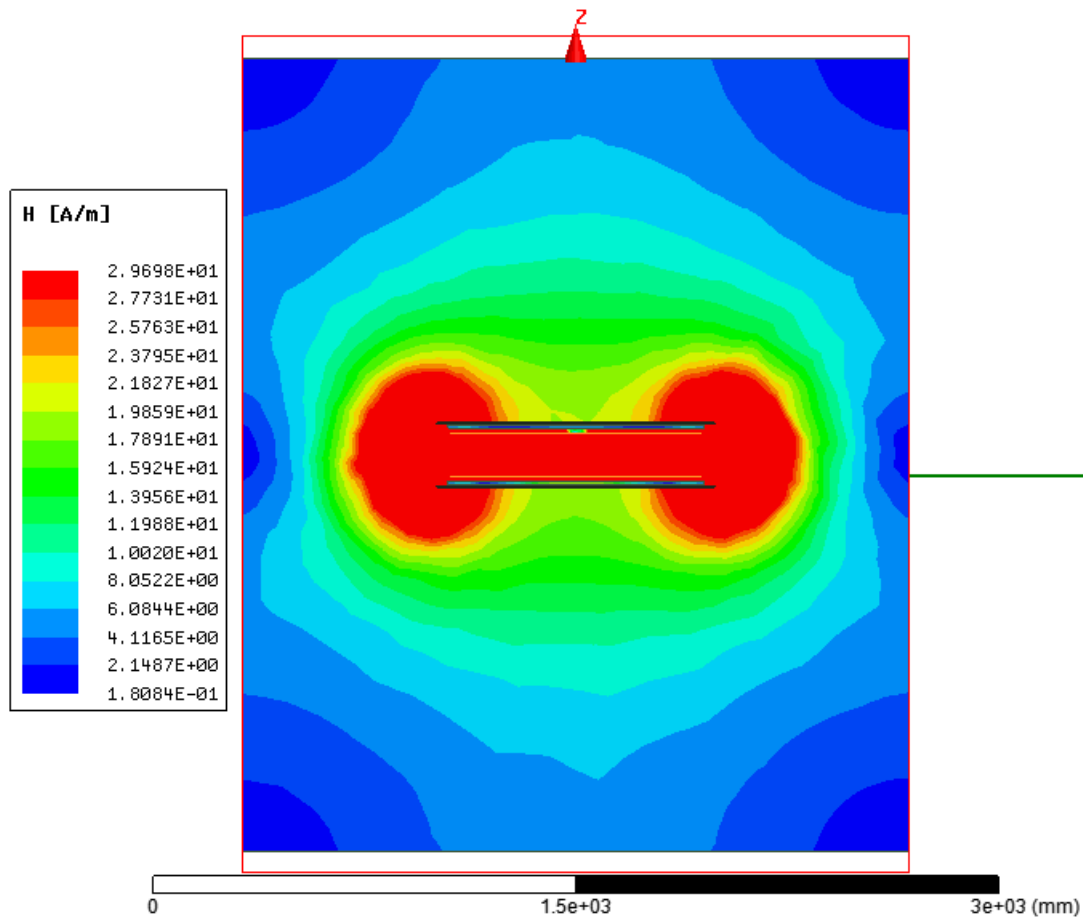
Topologie stínění s nejlepšími vlastnostmi se dle předpokladů, které jsou podloženy obrázky 26 a 27 stalo plné stínění o tloušťce feritů  $h = 14$  mm.



Obrázek 26: Grafické znázornění vykreslené magnetické indukce v okolí WPT systému se vzdáleností cívek  $l_1 = 150$  mm pro plné feritové stínění s  $h = 14$  mm

Výše uvedené rozložení špičkové hodnoty magnetické indukce  $B_{MAX}$  v prostoru je znázorněno v okamžiku  $Phase = 135^\circ$ , kdy je v tomto stavu velikost maximální

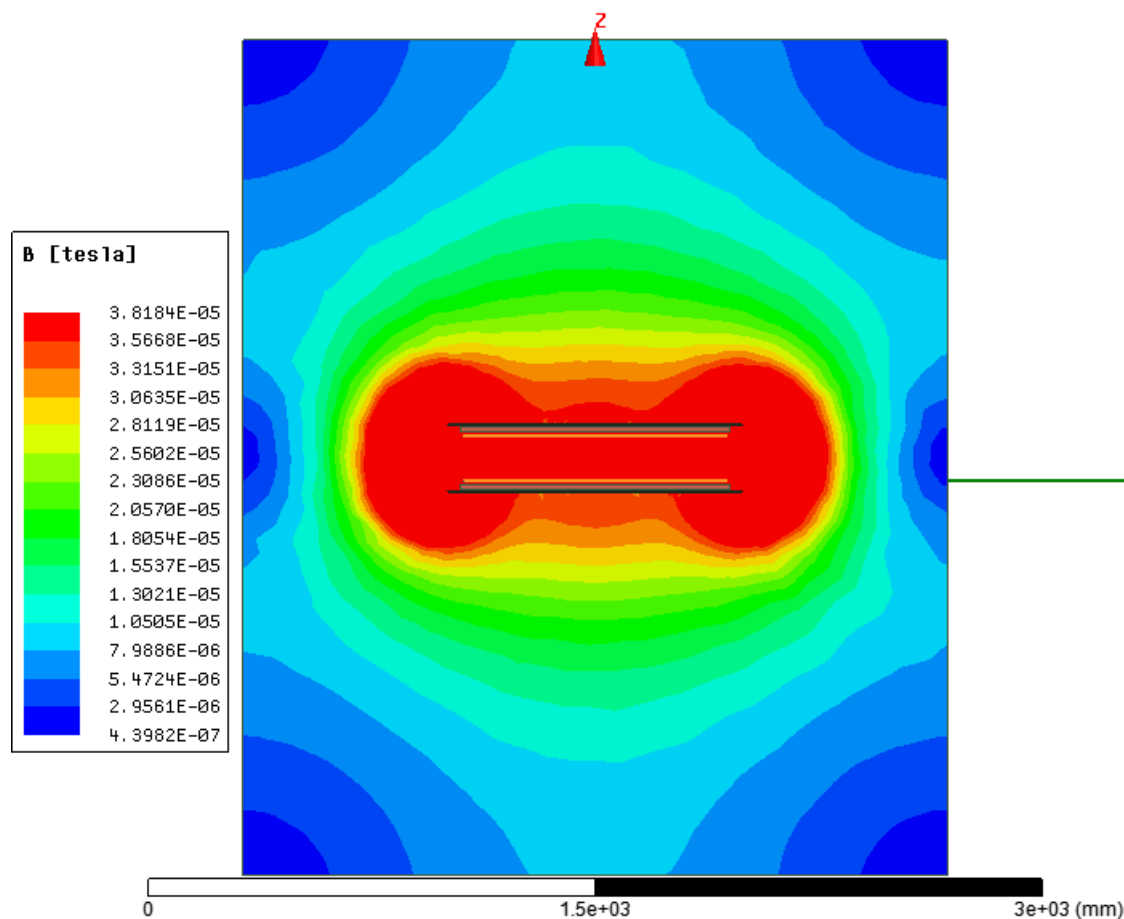
(amplituda). Tento stav byl zjištěn pomocí opakovaných simulací a veškeré další vykreslení hodnot  $B$  a  $H$  je udáno v témže okamžiku. Na dalším *obrázku 27* můžeme vidět znázorněnou magnetickou intenzitu v okolí systému s plným feritovým stíněním o tloušťce  $h = 14$  mm.



**Obrázek 27:** Grafické znázornění vykreslené magnetické intenzity v okolí WPT systému se vzdáleností cívek  $l_l = 150$  mm pro plné feritové stínění s  $h = 14$  mm

Vykreslení magnetické indukce i intenzity do prostoru je pro dané stínění velmi podobné. Můžeme pozorovat „únik“ magnetického pole pouze na koncích stínění ve formě kruhových laloků. Detailní vykreslení magnetického pole pro tento typ stínění je k dispozici v *příloze C* a vykreslení pomocí SW nástroje Matlab v *příloze D*.

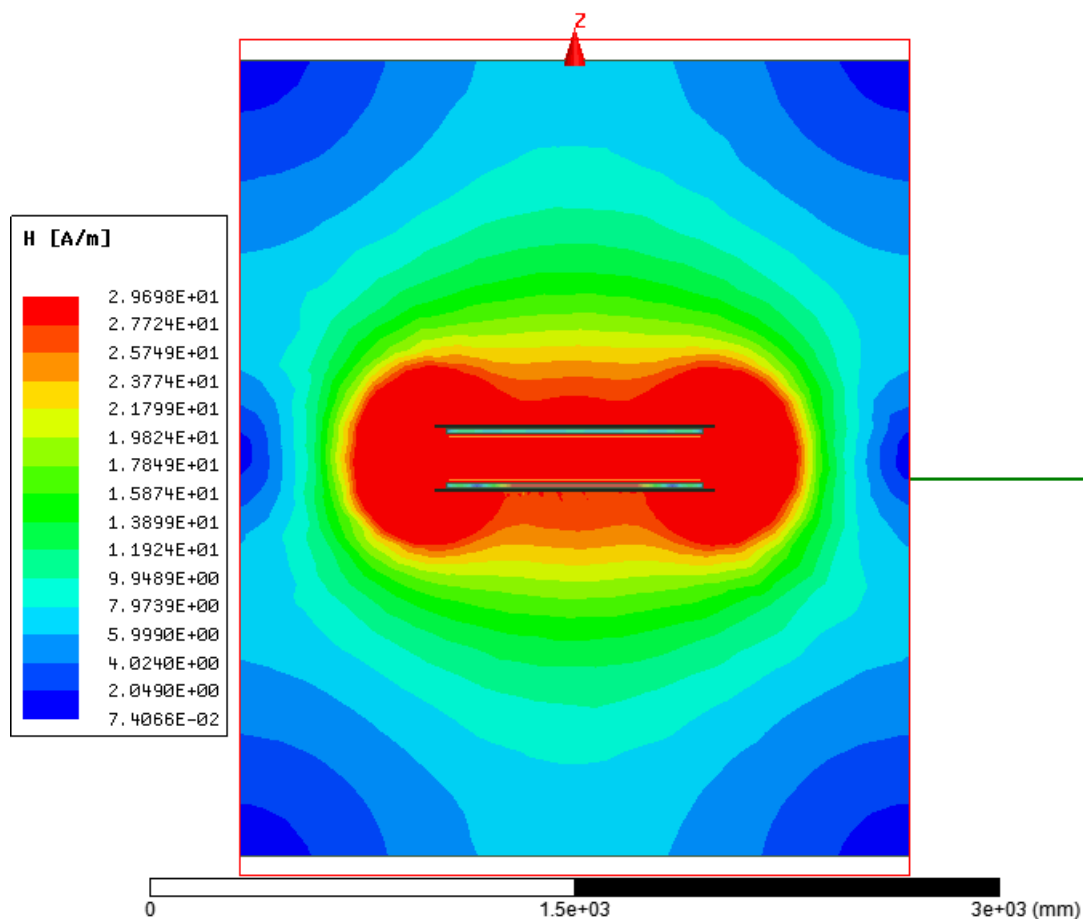
Pro porovnání přidávám důkaz o nejhorším testovaném feritovém stínění, kterým bylo tyčové stínění znázorněné na *obrázcích 28* a *29*.



Obrázek 28: Grafické znázornění vykreslené magnetické indukce v okolí WPT systému se vzdáleností cívek  $l_1 = 150$  mm pro tyčové feritové stínění s  $h = 14$  mm

Uvedené tyčové stínění je výrazně horší při porovnání magnetické indukce v okolí stínění oproti předchozímu plnému stínění. Obdobné výsledky můžeme konstatovat i pro porovnání magnetické intenzity, kterou můžeme pro tyčové stínění vidět na *obrázku 29*.

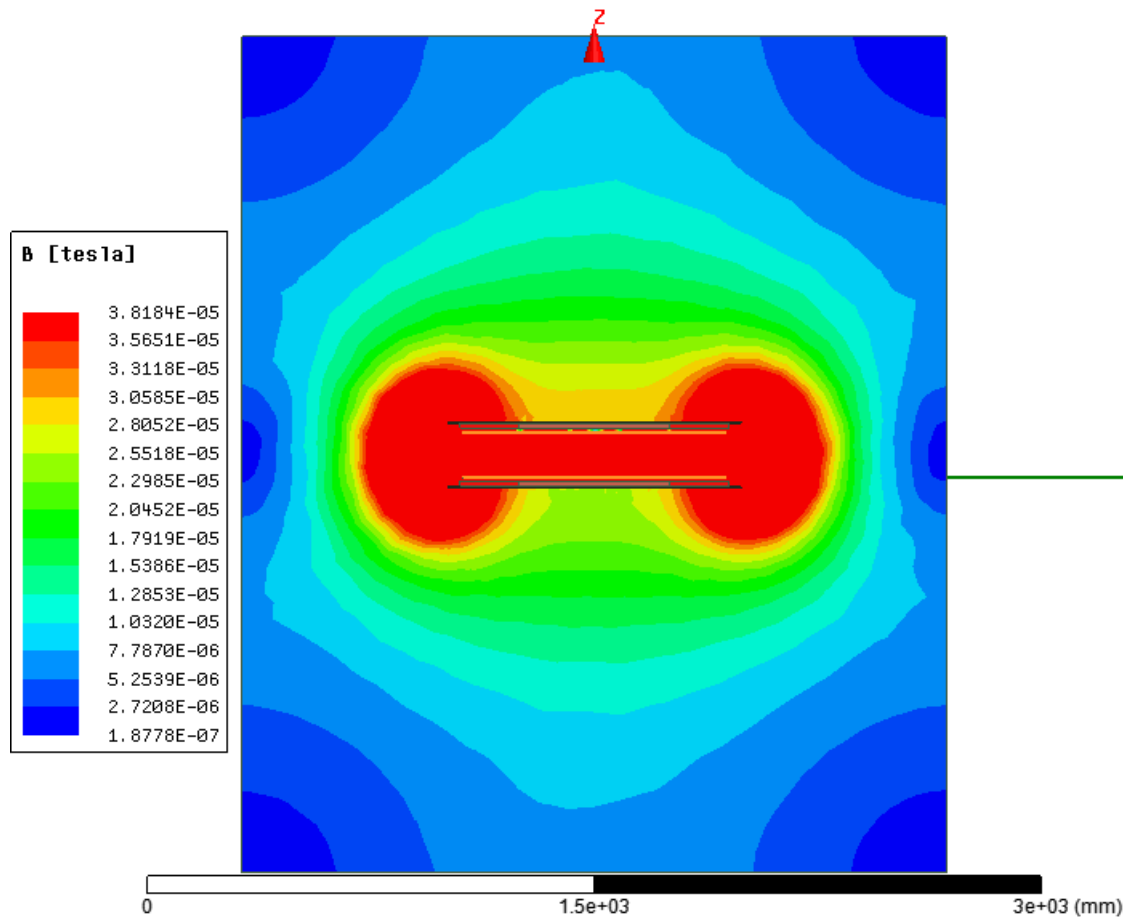




Obrázek 29: Grafické znázornění vykreslené magnetické intenzity v okolí WPT systému se vzdáleností cívek  $l_1 = 150$  mm pro tyčové feritové stínění s  $h = 14$  mm

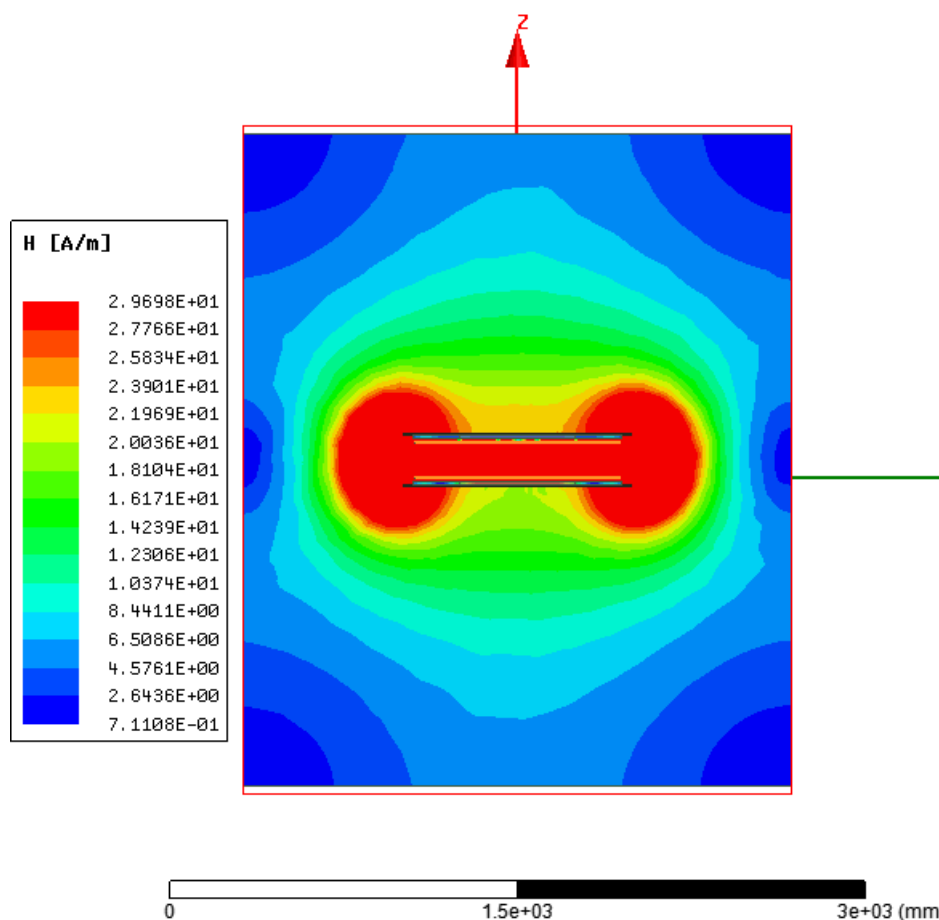
Také toto znázornění magnetické intenzity dokládá nedokonalé stínící vlastnosti tyčové topologie feritů, neboť můžeme pozorovat kromě kruhových laloků jejich značné propojení ve středové části. Vidíme také výrazně větší dosah hraniční bezpečné úrovně v ose Z u magnetické indukce o cca 50 mm a u magnetické intenzity o cca 40 mm oproti plnému stínění (14 mm). Detailní vykreslení magnetického pole oblasti systému s tyčovým stíněním můžeme najít v příloze E a znázornění hodnot pomocí programu Matlab v příloze F.

Z navržených topologií stínění dosahovalo stínění z feritových tyčí zakončené z obou stran velmi dobrých stínících vlastností. Jeho chování a tvar magnetického pole bylo velmi podobné plnému stínění s tloušťkou feritů  $h = 14$  mm. Detailní znázornění je k nahlédnutí v příloze G a vykreslení magnetické indukce a intenzity je v plné velikosti na obrázku 30 a 31.



Obrázek 30: Grafické znázornění vykreslené magnetické indukce v okolí WPT systému se vzdáleností cívek  $l_1 = 150$  mm pro tyčové feritové stínění zakončené z obou stran s  $h = 14$  mm

Výše uvedené prostorové rozložení magnetické indukce je opět převážně jen ve formě dvojice okrajových kruhových laloků. V porovnání s feritovým stíněním z tyčí bez zakončení, má tato topologie výrazně lepší stínící vlastnosti a vzdálenosti bezpečných úrovní magnetického pole se dají srovnávat pouze s plným feritovým stíněním o stejné tloušťce feritů. Na následujícím *obrázku 31* je zobrazení také rozložení magnetické intenzity daného typu stínění.



Obrázek 31: Grafické znázornění vykreslené magnetické intenzity v okolí WPT systému se vzdáleností cívek  $l_l = 150$  mm pro tyčové feritové stínění zakončené z obou stran s  $h = 14$  mm

Toto znázornění magnetické intenzity podobně jako zobrazení magnetické indukce dosahuje pozitivně vnímaných hodnot vzdálenosti mag. pole, které může být nebezpečné ve veřejném prostředí. Jinými slovy se dá konstatovat, že navržené stínění pracuje tak jak má a nebezpečná vzdálenost elektromagnetického pole je dostatečně malá. Další vykreslení magnetických veličin tohoto stínění z vyexportovaných hodnot ze SW Ansys bylo zpracováno v programu Matlab a je uvedeno v příloze H.

Porovnáním všech navržených stínění pro vzájemnou vzdálenost cívek  $l_l = 150$  mm jsem ze zjištěných hodnot vypracoval tabulku 8. Obsahem této tabulky jsou krajní meze vzdálenosti pro bezpečnou úroveň magnetické indukce a intenzity (ve špičkových hodnotách) dle standardu ICNIRP 2010. Jedná se o vzdálenosti v ose X a ose Z od vnějšího rohu vinutí cívek k hranici nebezpečné mezní úrovně.

**Tabulka 8: Výsledné hodnoty vzdáleností bezpečné úrovně magnetického pole pro testované typy elektromagnetického stínění ve vzájemné vzdálenosti cívek  $l_1 = 150$  mm**

Topologie	B - 150 mm		H - 150 mm	
	Osa X [mm]	Osa Z [mm]	Osa X [mm]	Osa Z [mm]
Plné - 14 mm	335,00	215,40	338,00	221,00
Plné - 7 mm	332,00	218,00	388,00	308,20
Tyče	340,53	264,00	342,10	260,00
Tyče se zakončením	335,00	216,68	328,54	226,80
Obdélníkové výřezy	328,70	217,74	332,82	226,80

Výše uvedené hodnoty ve 2. a 3. sloupci jsou pro vzdálenosti bezpečné úrovně magnetické indukce  $B$  v ose  $X$  a ose  $Z$ . Následující dvojice sloupců 4 a 5 je vyhrazena pro vzdálenosti magnetické intenzity, která je bezpečná ve veřejném prostředí. Grafická znázornění prostorového rozložení magnetického pole pro stínění, která zatím nebyla znázorněna, jsou k dispozici v příloze této práce. Konkrétně vyobrazení pro plné stínění s tloušťkou feritů  $h = 7$  mm je k nahlédnutí v příloze *I*, detail stínění v příloze *J* a vykreslení za pomoci kontur v SW Matlab v následující příloze *K*. Dalším navrženým a doposud neznázorněným stíněním je topologie s obdélníkovými výřezy. Grafické vyobrazení magnetických veličin v prostoru toho stínění je v příloze *L* a detailní náhled v příloze *M*. Ani u tohoto typu elektromagnetického stínění nechybí konturové a 3D znázornění za pomoci programu Matlab, které je k vidění v příloze *N*.

Obdobný způsob testování stínění jsem provedl také pro systém WPT se vzájemnou vzdáleností cívek  $l_2 = 200$  mm. Výsledné bezpečné úrovně dosahu magnetického pole od cívek systému bezdrátového přenosu elektrické energie pro tuto vzdálenost jsou uvedeny v tabulce 9.

**Tabulka 9: Výsledné hodnoty vzdáleností bezpečné úrovně magnetického pole pro testované typy elektromagnetického stínění ve vzájemné vzdálenosti cívek  $l_2 = 200$  mm**

Topologie	B - 200 mm		H - 200 mm	
	Osa X [mm]	Osa Z [mm]	Osa X [mm]	Osa Z [mm]
Plné - 14 mm	459,30	400,60	468,80	406,70
Plné - 7 mm	481,40	419,40	479,60	434,50
Tyče	468,90	454,90	475,80	458,70
Tyče se zakončením	470,50	415,00	474,80	428,00
Obdélníkové výřezy	469,90	415,40	476,20	428,60

Rozložení sloupců v *tabulce 9* kopíruje výše vysvětlenou strukturu z *tabulky 8*. Vzdálenosti bezpečné úrovně, se oproti hodnotám ze systému WPT se vzdáleností cívek  $l_1$  zvětšily, což je zapříčiněno lazením velikosti vlastní indukčnosti  $L$  pomocí posuvu stínění. Navržené stínění nebylo možné více přiblížit k cívce, proto jsem zvolil metodu zvýšení počtu závitů (o 1 závit) a následné oddálení stínění. Při tomto naladění se výsledná vzdálenost mezi cívkou a stíněním výrazně zvětšila. Tímto je zapříčiněna výše uvedená větší vzdálenost bezpečného vystavení se magnetickému poli dle standardu ICNIRP 2010 [46].

Grafická znázornění magnetické indukce a intenzity pro systém WPT se vzájemnou vzdáleností cívek  $l_2 = 200$  mm pro všechny navržené typy stínění jsou k dispozici v příloze této práce (*Příloha O - S*). Z důvodu velké podobnosti výsledků ke vzdálenosti  $l_1$  a nadbytečnosti detailu u těchto vykreslení uvádím pouze celková znázornění z programu Ansys Maxwell 3D.

Porovnání vzdáleností z obou *tabulek 8* a *9* udává o navržených topologiích elektromagnetických stínění jasné hodnocení. Pro obě vzdálenosti ( $l_1$  i  $l_2$ ) vyšlo stejné pořadí topologií stínění dle jejich vlastností. Jejich stínící schopnosti jsou uvedeny od nejlepšího (1) po nejhorší (5) v následující *tabulce 10*.

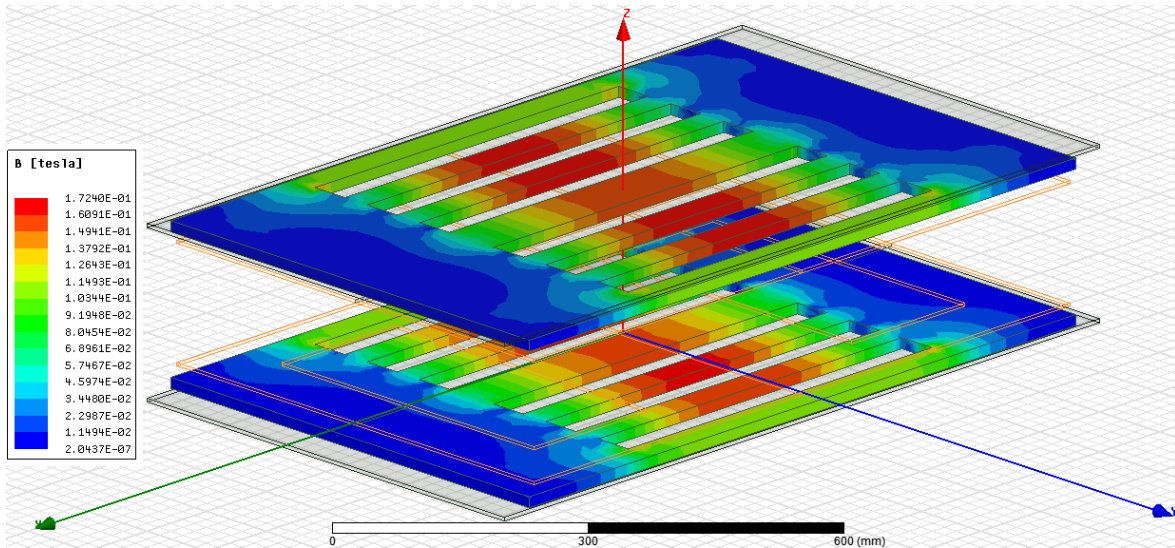
**Tabulka 10: Řazení jednotlivých typů navržených elektromagnetických stínění dle stínících vlastností**

Pořadí	Topologie
1	Plné - 14 mm
2	Tyče se zakončením
3	Obdélníkové výřezy
4	Plné - 7 mm
5	Tyče

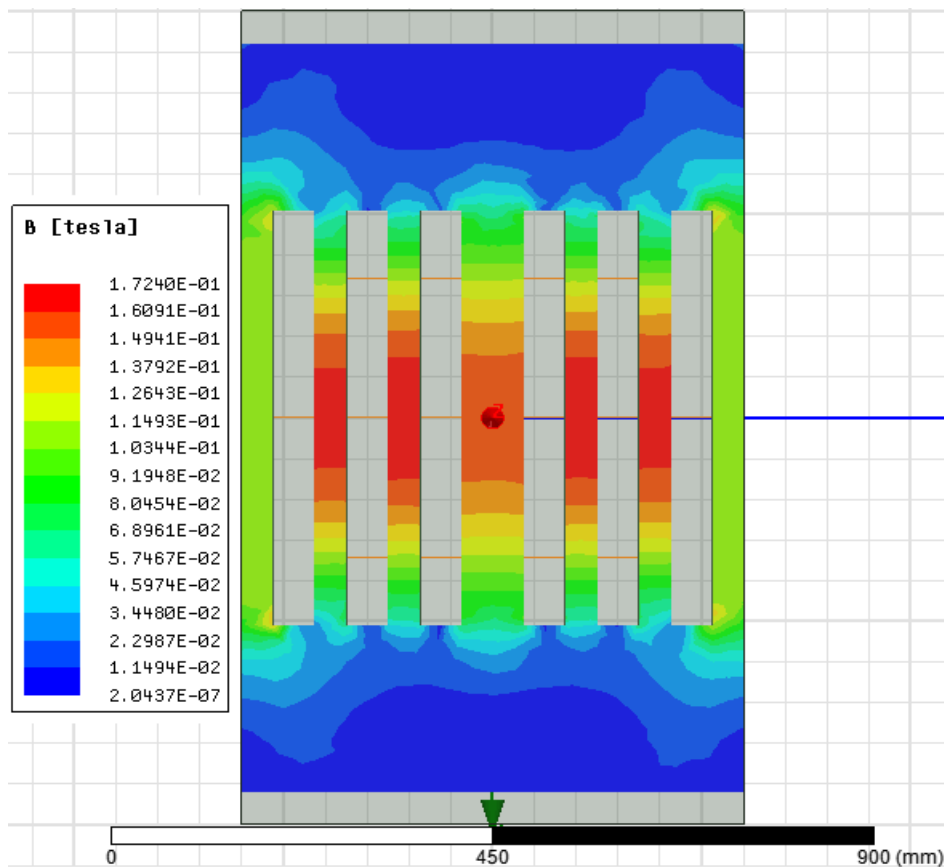
Z výše uvedeného řazení je patrné, že stínění s nejlepšími vlastnostmi jsou popořadě silnější plné stínění, tyčové stínění se zakončeními z obou stran a dále stínění s obdélníkovými výřezy. Ze zbývajících dvojic stínění dopadlo hůře stínění tvořené pouze z feritových tyčí. K tomuto seřazení jsem dospěl z provedených simulací v programu Ansys Maxwell 3D (*Obrázky 26 – 31* a *přílohy C - N*) a vyexportovaných hodnot prostorového magnetického pole (*Tabulky 8* a *9*).

Dalším kritériem, kterému podrobím všechny navržené topologie stínění, je

maximální hodnota magnetické indukce  $B_{MAX}$  zjištěné v materiálu stínění. Jedná se o špičkovou hodnotu sycení feritu. Jako ukázkou vykreslení udávám sycení feritu na tyčovém stínění se zakončením z obou stran, které se nachází na *obrázku 32* v zobrazení *Dimetric* (3D) a pohledu shora na *obrázku 33*.



Obrázek 32: Screen ze SW Ansys Maxwell 3D znázorňující sycení feritu v tyčovém stínění se zakončením z obou stran a z pohledu Dimetric (3D)



Obrázek 33: Screen ze SW Ansys Maxwell 3D znázorňující sycení feritu v tyčovém stínění se zakončením z obou stran a z pohledu shora

Znázorněné stínění je pro vzdálenost cívek  $l_1$  a dosahuje maximální hodnoty magnetické indukce  $B_{MAX-FER} = 0,1724$  T, ostatní zobrazení sycení feritů jednotlivých typů stínění jsou pro tuto vzájemnou vzdálenost cívek uvedeny v příloze T – W. Sycení materiálu stínění pro typy stínění systému WPT s cívkami ve vzdálenost  $l_2$  jsou umístěny v příloze této práce (Příloha X - AB).

Souhrnná data popisující sycení feritů jsou udána v následující tabulce 11, která tyto hodnoty přehledně znázorňuje pro všechny navržená stínění v obou testovaných vzdálenostech.

**Tabulka 11: Souhrnný přehled všech hodnot magnetické indukce udávajících sycení feritů pro veškerá stínění v obou testovaných vzájemných vzdálenostech cívek WPT systému**

Topologie	$B_{MAX-FER}$ [T] (150 mm)	$B_{MAX-FER}$ [T] (200 mm)
Plné - 14 mm	0,08005	0,08460
Plné - 7 mm	0,16583	0,16733
Tyče	0,21895	0,21902
Tyče se zakončením	0,17240	0,17650
Obdélníkové výřezy	0,20733	0,19361

Z přehledu velikostí sycení feritů v jednotlivých typech navržených stínění můžeme konstatovat závěr, že nejlépe, tedy s nejnižší úrovní  $B_{MAX-FER}$  vychází plné stínění (14 mm) poté slabší plné stínění (7 mm), které mělo velice podobné hodnoty jako tyčové stínění se zakončením z obou stran. Nejhůře i v tomto ohledu vychází stínění s obdélníkovými výřezy a tyčové stínění. Toto uvedené pořadí platí pro vzdálenost cívek  $l_1$  i  $l_2$ .

## 7 Vyčíslení nákladů vlastního návrhu

Obsahem této kapitoly je finální vyčíslení reálných nákladů na pořízení elektromagnetického stínění dle vlastního návrhu. Součástí je samozřejmě finanční vyčíslení každého typu stínění, dle skutečných rozměrů a zkompletované z vybraného feritového materiálu N97. Ceny ani rozměry návrhu nejsou idealizované nebo jinak zkrácené.

### 7.1 Náklady vlastního návrhu elektromagnetického stínění

Jedním z hlavních cílů této práce bylo navrhnout elektromagnetické stínění s vhodnými parametry splňujícími počáteční podmínky systému WPT. Nejedná se pouze o nejlepší návrh stínění, ale o nejlepší zvolený kompromis mezi stínícími parametry a celkovou cenou navrženého stínění. Vzhledem k vysokým pořizovacím nákladům feritového materiálu jsou navrženy různé topologie stínění. To proto, abychom našli nejvhodnější alternativu elektromagnetického stínění s nejnižším možným použitím feritů.

Celkové rozměry jednotlivých typů stínění včetně jednotkové ceny feritového bloku jsou uvedeny již v části 4.2 této práce, ale jejich konečný cenový výměr je představen v *tabulce 12*.

**Tabulka 12: Souhrnný přehled nákladů jednotlivých navržených stínění udávající jednotkovou i celkovou cenu upravenou dle počtu potřebných kusů feritových bloků materiálu N97**

Topologie	Množství [ks]	Jednotková cena [Kč]	Celková cena [Kč]
Plné - 14 mm	576	104,80	60 364,80
Plné - 7 mm	288	108,99	31 389,12
Tyče	288	108,99	31 389,12
Tyče se zakončením	416	108,99	45 339,84
Obdélníkové výřezy	448	108,99	48 827,52

Výše znázorněná tabulka obsahuje počet potřebných feritových bloků z materiálu N97 pro realizaci obou částí jednotlivých navržených typů elektromagnetických stínění. Dále jednotkovou cenu vztaženou právě k tomuto počtu, protože s vyšším objednaným množstvím klesá jednotková cena viz. *Tabulka 6*. Zlatým hřebem celého vyčíslení nákladů je celková cena, za kterou je možné si daný typ elektromagnetického stínění pořídit.



Tato cena je velmi rozdílná mezi jednotlivými typy stínění a pohybuje se od 60 365 Kč za plné feritové stínění o tloušťce  $h = 14$  mm až po 31 389 Kč za tyčové nebo slabší plné stínění o tloušťce  $h = 7$  mm. Koncové náklady stínění s obdélníkovými výřezy je druhé nejvyšší a to konkrétně 48 828 Kč. Naopak tyčové stínění se zakončením z obou stran se umístilo v pomyslném cenovém středu s celkovými pořizovacími náklady 45 340 Kč.

Všechny uvedené finanční údaje jsou vypočítané dimenzovány dle skutečné velikosti rozměrů feritového bloku z materiálu N97, který je základním stavebním kusem všech uvedených stínění. Cílem bylo zamezit dělení feritových bloků, které by nebylo možné, a proto je potřeba zvětšit rozměr stínění tak, abychom dělení předcházeli. Zdrojem ke zjištění jednotkové ceny a potřebných informací k sestavení tohoto cenového návrhu mi byla společnost Mouser Electronics [64].

## Závěr

Ve své diplomové práci jsem se zabýval především návrhem systému bezdrátového přenosu elektrické energie a jeho vhodným elektromagnetickým stíněním, které by splňovalo hygienické limity ICNIRP. Při návrhu WPT systému jsem dbal platných standardů elektromobility SAE TIR J2954. Dle zadaných počátečních podmínek jsem zvolil systém využívající induktivní přenos elektrické energie v sério-sériové kompenzaci a s vazebnými prvky v konfiguraci „double D“.

Práce je koncipována do sedmi hlavních kapitol, kde první pojednává o historickém i současném využití systémů WPT a popsání několika používaných druhů vazeb (induktivní, kapacitní a rezonanční).

Následuje představení elektromagnetického stínění a jeho nezbytnost využití v současném světě. V této části se také věnuji fyzikálnímu principu funkce a ideální volbě EM stínění.

Třetí část je vyhrazena pro uvedení legislativy a hygienických limitů. Obsahem této kapitoly je detailní představení jednotlivých standardů, které jsou nezbytné pro vlastní návrh a hygienických limitů udaných mezinárodní komisí pro neionizující záření ICNIRP. Při vlastním návrhu elektromagnetického stínění se řídím stále platnou normou ICNIRP 2010 pro veřejné prostředí udávající hraniční hodnoty elektromagnetického pole. V následující kapitole se věnuji literární rešerši, kde popisují výsledky několika studií a odborných prací zabývajících se WPT systémy v elektromobilitě a jejich stíněním. Zjištěné parametry a topologie byly inspirací pro můj vlastní návrh EM stínění.

Jako další je již zmíněný vlastní návrh WPT systému s podrobným popisem řešení a dopočítanými hodnotami. Provedl jsem zhodnocení elektrických, magnetických i obecně fyzikálních veličin, abych získal komplexní návrh prototypu WPT systému pro zadané počáteční parametry ( $U_{IN}$ ,  $U_{OUT}$ ,  $f$ ,  $\eta$ ,  $P_{OUT}$ ).

Po dopočítání veškerých teoretických veličin jsem provedl jejich ověření za pomoci simulace v SW nástroji Ansys Simplorer Design, pomocí modelu, který jsem vytvořil dle předchozích výpočtů. Výsledky zjištěné simulací navrženého systému bezdrátového přenosu odpovídali teoreticky vypočteným, a proto jsem přistoupil na vlastní návrh elektromagnetického stínění. Vytvořil jsem celkem pět různých topologií EM stínění, kterým jsem navrhl ideální rozměry i materiál. Všechny tyto typy jsem podrobil společným simulacím s WPT systémem v programu Ansys Maxwell 3D, abych porovnal jejich stínící

vlastnosti. Celý tento proces jsem vykonal pro dvě různé vzájemné vzdálenosti párů cívek v „double D“ konfiguraci. První testovací vzdálenost je  $l_1 = 150$  mm a druhá je rovna  $l_2 = 200$  mm. Konečné simulace jsem prováděl při typu úlohy *eddy current* v Ansys Maxwell 3D, protože se tento software jeví jako ideální pro ověření výsledků pomocí metody konečných prvků (FEM).

Poslední část mé práce je věnována vyčíslení reálných nákladů na sestavení elektromagnetického stínění. Jedná se o skutečné finanční náklady potřebné na konstrukci kteréhokoliv navrženého typu stínění s přepočtem jednotkové ceny dle odebraného množství feritových segmentů. Veškeré uvedené ceny jsou se započtením DPH.

Na závěr své práce mohu konstatovat, že všechny vytyčené cíle byly splněny. Počáteční parametry návrhu WPT systému s ohledem na vstupní a výstupní hodnotu napětí byly dodrženy stejně tak i frekvence  $f = 85$  kHz odpovídající standardu pro elektromobilitu (SAE TIR J2954). Velikost požadovaného výstupního výkonu  $P_{OUT} = 50$  kW se oproti výslednému dosaženému výkonu  $P_{bat} = 49,5702$  kW pro vzdálenost  $l_1$  liší o 0,8595 %. Výsledná účinnost přenosu zjištěná simulací je  $\eta_{REAL} = 93,493$  % a oproti teoretické hodnotě je pouze o 0,244 % nižší. Pro  $l_2$  je výkon na výstupu systému roven  $P_{bat} = 49,4641$  kW. Rozdíl vůči zadané  $P_{OUT}$  je 1,0718 % a reálná účinnost byla udána jako  $\eta_{REAL} = 93,281$  %, což je o 0,212 % méně oproti  $\eta_{REAL}$  pro vzdálenost  $l_1$ . Při porovnání s teoretickou hodnotou účinností přenosu je ta reálná jen o 0,456 % nižší.

Zjištěné výsledky vnímám velmi kladně, neboť výsledná účinnost přenosu je v obou případech o více než 3,28 % efektivnější oproti hodnotě zadané standardem pro elektromobilitu věnujícímu se stacionární poloze cívek. Dalším pozitivem je, že i teoretické předpoklady byly velmi přesné a jejich odchylka byla méně než 1 %. Velikost výstupního výkonu byla pro obě simulované vzájemné vzdálenosti cívek menší oproti zadané  $P_{OUT}$ , ale v při vzdálenosti 200 mm byla hodnota menší jen o 1,0718 % a při kratší vzdálenosti 150 mm byla odchylka jen 0,8595 %. Z výše uvedených důvodů i tuto podmínku vnímám jako splněnou.

Porovnání navržených elektromagnetických stínění vyšlo shodně ve všech testovaných kritériích. Mohu konstatovat, že nejlepší vlastnosti z hlediska stínění i sycení feritů má plné stínění o tloušťce  $h = 14$  mm, jako další v pořadí se umístilo tyčové stínění se zakončením z obou stran a pomyslné třetí místo získalo stínění s obdélníkovými výřezy. Zbylé dvě stínění (plné s  $h = 7$  mm a tyčové stínění) dopadli nejhůře a nejsou dostatečně vhodná pro navržený systém WPT.

Při porovnání celkových nákladů stínění je patrné, že cena plného stínění (14 mm) je

vyčíslena na 60 365 Kč, zatímco cena tyčového stínění se zakončením z obou stran vyjde „jen“ na 45 340 Kč. Z tohoto důvodu vybírám tento typ stínění jako ideální k navrženému systému bezdrátového přenosu elektrické energie. Také bych chtěl dodat, že dle hodnot zjištěných simulací (*Tabulka 11*) je vzdálenost bezpečné hranice magnetického pole v ose X vyčíslena na 335 mm a v zásadnější rovině vzhledem k využití systému v ose Z jen na 226,8 mm. Tyto hodnoty jsou udány pro vzdálenost cívek  $l_1 = 150$  mm.

S těmito daty o stínících vlastnostech a ceně zvoleného tyčového stínění se zakončením z obou stran se domnívám, že by bylo vhodné pro budoucí implementaci do praktického využití.

Z hlediska hygienických limitů daných normou ICNIRP 2010, standardem pro elektromobilitu SAE TIR J2954 i příznivým kompromisem přenášeného výkonu a dané účinnosti uvádím, že daný navržený WPT systém s EM stíněním je zcela funkční a vyhovující všem zadaným parametrům.

V případě pokračování práce na tomto prototypu bych se i přes výše uvedené kladné ohlasy dále snažil zlepšit například parametr stínění, kde bych se pokusil snížit ještě více vzdálenost elektromagnetického pole vyzařujícího v osách X a Z (i na úkor zvýšení celkové ceny). Jedná se pouze o kruhové laloky magnetického pole na slabších okrajích cívek DD, proto by mohlo pomoci zvětšit přesah stínění oproti rozměrům použitých cívek. Dále bych se pokusil zvýšit výstupní výkon systému, kde jsem byl nyní limitován zadáním, ale potýkal bych se zde s problémem zvýšení vstupního napětí. Také bych se chtěl více věnovat elektrickému stínění, jež nyní představuje pouze hliníkový plát umístěn v blízkosti feritového stínění.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] J. Ou, X. Liu, X. Li and X. Shi, "Mapping Global Fossil Fuel Combustion CO<sub>2</sub> Emissions at High Resolution by Integrating Nightlight, Population Density, and Traffic Network Data," in *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 9, no. 4, pp. 1674-1684, April 2016, doi: 10.1109/JSTARS.2015.2476347
- [2] A. E. Atabani, Irfan Anjum Badruddin, S. Mekhilef, A.S. Silitonga, A review on global fuel economy standards, labels and technologies in the transportation sector, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 15, Issue 9, December 2011, Pages 4586-4610, ISSN 1364-0321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.092>.
- [3] Tomgram: Michael Klare, Fighting for Oil | TomDispatch. TomDispatch [online]. Copyright © 2020 TomDispatch.com [cit. 06.12.2020]. Dostupné z: <http://www.tomdispatch.com/blog/175865/>
- [4] A. Gupta, K. Verma, S. Chauhan, P. K. Gupta and M. Bansal, "Future of transportation," *2019 2nd International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC)*, Greater Noida, India, 2019, pp. 547-551, doi: 10.1109/PEEIC47157.2019.8976469.
- [5] Five life-changing benefits of electromobility. *Volvo Construction Equipment* [online]. Dostupné z: <https://www.volvoce.com/global/en/news-and-events/news-and-stories/2019/five-life-changing-benefits-of-electromobility/>
- [6] BMW Electromobility: Overview | BMW.com.mt. 301 Moved Permanently [online]. Copyright © BMW AG 2018 [cit. 06.12.2020]. Dostupné z: <https://www.bmw.com.mt/en/topics/fascination-bmw/electromobility2020/electromobility.html>
- [7] ŠKODA eMobility *ŠKODA Homepage* [online]. Copyright ©2019 ŠKODA AUTO a.s. [cit. 06.12.2020]. Dostupné z: <https://www.skoda-auto.com/world/emobility>
- [8] Various Advantages and Disadvantages of Electric Cars - Conserve Energy Future. Conserve Energy Future | Your source for green and sustainable living, environmental news and information [online]. Dostupné z: <https://www.conserve-energy-future.com/advantages-and-disadvantages-of-electric-cars.php>
- [9] Chudy A, Mazurek PA. Electromobility – the Importance of Power Quality and Environmental Sustainability. *Journal of Ecological Engineering*. 2019;20(10):15-23. doi:10.12911/22998993/112713.
- [10] Baucells, Manel and Maiden, Stephen E., Tesla, Inc.: Supercharging Auto Sales. Darden Case No. UVA-QA-0915, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3626122>
- [11] Tesla's largest public Supercharger with 56 V3 stalls goes online. *Teslarati.com - Tesla News, Tips, Rumors, and Reviews* [online]. Copyright © TESLARATI. All rights reserved. [cit. 06.12.2020]. Dostupné z: <https://www.teslarati.com/tesla-largest-supercharger-v3-goes-online/>
- [12] B. Minnaert and N. Stevens, "Maximizing the Power Transfer for a Mixed Inductive and Capacitive Wireless Power Transfer System," *2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, Montreal, QC, Canada, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/WPT.2018.8639265.
- [13] VESELÝ, Tomáš. WPT systém s vazebným prvkom v "double-D" zapojení. Plzeň, 2018. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Kindl, Vladimír.

- [14] T. Fujita, T. Yasuda and H. Akagi, "A Dynamic Wireless Power Transfer System Applicable to a Stationary System," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 4, pp. 3748-3757, July-Aug. 2017, doi: 10.1109/TIA.2017.2680400.
- [15] B. M. Mosammam, N. Rasekh, M. Mirsalim and A. Khorsandi, "Electromagnetic Analysis for DD Pad Magnetic structure of a Wireless Power Transfer (WPT) for Electrical Vehicles," 2018 Smart Grid Conference (SGC), Sanandaj, Iran, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/SGC.2018.8777750.
- [16] H. Funato, H. Kobayashi and T. Kitabayashi, "Analysis of transfer power of capacitive power transfer system," *2013 IEEE 10th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, Kitakyushu, 2013, pp. 1015-1020, doi: 10.1109/PEDS.2013.6527168.
- [17] K. W. Klontz, A. Esser, R. R. Bacon, D. M. Divan, D. W. Novotny and R. D. Lorenz, "An electric vehicle charging system with 'universal' inductive interface," *Conference Record of the Power Conversion Conference - Yokohama 1993*, Yokohama, Japan, 1993, pp. 227-232, doi: 10.1109/PCCON.1993.264219.
- [18] C. Liu and A. P. Hu, "Steady state analysis of a capacitively coupled contactless power transfer system," *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, San Jose, CA, 2009, pp. 3233-3238, doi: 10.1109/ECCE.2009.5316216.
- [19] A. M. Sodagar and P. Amiri, "Capacitive coupling for power and data telemetry to implantable biomedical microsystems," *2009 4th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering*, Antalya, 2009, pp. 411-414, doi: 10.1109/NER.2009.5109320.
- [20] Piipponen KV, Sepponen R, Eskelinen P. A biosignal instrumentation system using capacitive coupling for power and signal isolation. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2007 Oct;54(10):1822-8. doi: 10.1109/TBME.2007.894830. PMID: 17926680.
- [21] S. Y. R. Hui and W. W. C. Ho, "A new generation of universal contactless Battery Charging platform for portable Consumer Electronic equipment," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 3, pp. 620-627, May 2005, doi: 10.1109/TPEL.2005.846550.
- [22] Altfuels [online].[cit. 2021-02-03].  
Dostupné z: <http://www.altfuels.org/events/testdriv/farewell.shtml>
- [23] Businesskorea [online].[cit. 2021-02-03].  
Dostupné z: <http://www.businesskorea.co.kr/english/news/sciencetech/4766-wireless-train-wirelessly-charged-high-speed-train-successfultest-run>
- [24] Elektrickévozy [online].[cit. 2021-02-03].  
Dostupné z: <https://elektrickevozy.cz/clanky/witricity-bezdratove-nabijeni-elektromobilu-pokracovani>
- [25] Chwei-Sen Wang, O. H. Stielau and G. A. Covic, "Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 5, pp. 1308-1314, Oct. 2005, doi: 10.1109/TIE.2005.855672.
- [26] Shinohara N. Beam efficiency of wireless power transmission via radiowaves from short range to long range. *J Korea Electromagn Eng Soc* 2011;10:224–30.
- [27] Shinohara, N. (2012), The wireless power transmission: inductive coupling, radio wave, and resonance coupling. *WENE*, 1: 337-346. <https://doi.org/10.1002/wene.43>
- [28] HROMÁDKA, Miroslav. Elektromagnetické stínění. Plzeň, 2012. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Laurenc, Jiří.
- [29] Chatterton P.A., Houlden M.A.: EMC – Electromagnetic Theory to Practical Design. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 1992. ISBN 0-471-92878-X

- [30] Magnetické materiály. [online]. Copyright © Softima s.r.o.2011 [cit. 25.04.2021]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/07.html>
- [31] Energies | Free Full-Text | Generalized Design Approach on Industrial Wireless Chargers. MDPI - Publisher of Open Access Journals [online]. Copyright © 1996 [cit. 09.12.2020]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/11/2697>
- [32] Lin, Jiali & Saunders, R. & Schulmeister, Karl & Söderberg, P. & Stuck, B.E. & Swerdlow, A. & Taki, Masao & Veyret, Bernard & Ziegelberger, G. & Repacholi, Michael & Matthes, Rüdiger & Ahlbom, Anders & Jokela, Kari & Roy, C.. (2010). ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz).. *Health Phys.* 99. 10.1097/HP.0b013e3181f06c86.
- [33] J2954: Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment Methodology - SAE International . SAE International [online]. Copyright ©2021 SAE International. All rights reserved. [cit. 18.04.2021]. Dostupné z: [https://www.sae.org/standards/content/j2954\\_20210/](https://www.sae.org/standards/content/j2954_20210/)
- [34] Bezdrátové nabíjení a příslušenství - IKEA. IKEA.com – International homepage – IKEA [online]. Dostupné z: <https://www.ikea.com/cz/cs/cat/bezdratove-nabijeni-a-prislusenstvi-41069/>
- [35] Q. Tian and L. Jia, "WPC Qi mobile device Rx coil design and optimization," *2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, New Orleans, LA, USA, 2020, pp. 3140-3146, doi: 10.1109/APEC39645.2020.9124166.
- [36] X. Liu, "Qi Standard Wireless Power Transfer Technology Development Toward Spatial Freedom," in *IEEE Circuits and Systems Magazine*, vol. 15, no. 2, pp. 32-39, Secondquarter 2015, doi: 10.1109/MCAS.2015.2419011.
- [37] Qi Wireless Charging Standard - Electronics Notes [online]. Copyright © [cit. 19.04.2021]. Dostupné z: <https://www.electronics-notes.com/articles/equipment-items-gadgets/wireless-battery-charging/qi-wireless-charging-standard.php>
- [38] Frequency Choice - AirFuel Alliance. Wireless Charging Technology & Standards | AirFuel Alliance [online]. Copyright © 2021 AirFuel Alliance. All rights reserved. [cit. 19.04.2021]. Dostupné z: <https://airfuel.org/frequency-choice/>
- [39] Application: Wireless Charging – GaN & SiC Tech Hub. GaN & SiC Tech Hub [online]. Copyright © Copyright [cit. 19.04.2021]. Dostupné z: <https://gan-sic-power.richardsonrfd.com/applications/application-wireless-charging/>
- [40] KINDL, Vladimír. Problematika systémů bezdrátového přenosu energie. Plzeň, 2017. Habilitační práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [41] Wireless Charging: What You Need To Know - Electronics Maker. Electronics Maker - Electronics News, Magazine, Technology [online]. Copyright © 2020 Electronics Maker. All rights reserved. [cit. 19.04.2021]. Dostupné z: <https://electronicsmaker.com/wireless-charging-what-you-need-to-know>
- [42] N. S. Jeong and F. Carobolante, "Enabling wireless power transfer though a metal encased handheld device," *2016 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, Aveiro, Portugal, 2016, pp. 1-3, doi: 10.1109/WPT.2016.7498817.
- [43] Challis LJ. (2005). Mechanisms for interaction between RF fields and biological tissue.
- [44] Tissue Frequency Chart » IT'IS Foundation. [online]. Copyright © 2010 [cit. 22.04.2021]. Dostupné z: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/tissue-frequency-chart/>
- [45] Applied Bioelectricity: From Electrical Stimulation to Electropathology - J. Patrick Reilly - Knihy Google. Knihy Google [online]. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=rTzTBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=Reilly+JP.+\(1998\).+Applied+bioelectricity.+New+York,+NY:+Springer.&ot](https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=rTzTBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=Reilly+JP.+(1998).+Applied+bioelectricity.+New+York,+NY:+Springer.&ot)

- s=C7jEN8QOLZ&sig=tJxdBW6cPCjNmmSSnLXtCXBJoIA&redir\_esc=y#v=onepage&q&f=false
- [46] ICNIRP [online]. Copyright © [cit. 22.04.2021]. Dostupné z: <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPLFgdl.pdf>
- [47] D. Patil, M. K. McDonough, J. M. Miller, B. Fahimi and P. T. Balsara, "Wireless Power Transfer for Vehicular Applications: Overview and Challenges," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, no. 1, pp. 3-37, March 2018, doi: 10.1109/TTE.2017.2780627.
- [48] R. Chen et al., "Analysis and parameters optimization of a contactless IPT system for EV charger," 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014, 2014, pp. 1654-1661, doi: 10.1109/APEC.2014.6803528.
- [49] R. Bosshard, U. Iruretagoyena and J. W. Kolar, "Comprehensive Evaluation of Rectangular and Double-D Coil Geometry for 50 kW/85 kHz IPT System," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, no. 4, pp. 1406-1415, Dec. 2016, doi: 10.1109/JESTPE.2016.2600162.
- [50] M. Budhia, J. T. Boys, G. A. Covic and C. Huang, "Development of a Single-Sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle IPT Charging Systems," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 1, pp. 318-328, Jan. 2013, doi: 10.1109/TIE.2011.2179274.
- [51] H. H. Park, J. H. Kwon, S. I. Kwak and S. Ahn, "Electromagnetic Shielding Analysis of Multiple Slits on a Metal Plate Coated With a Ferrite Sheet," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 58, no. 5, pp. 1448-1455, Oct. 2016, doi: 10.1109/TEMC.2016.2583788.
- [52] J. T. Boys, "Leakage and coupling of square and double D magnetic couplers," 2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC), 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/SPEC.2016.7846212.
- [53] TKOTZ, Klaus. Příručka pro elektrotechnika. 2., dopl. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2006. ISBN 80-86706-13-3.
- [54] Měděné, mosazné a bronzové dráty. INKOSAS - niklové, titanové, měděné, mosazné polotovary a speciální slitiny [online]. Copyright © Inkosas 2021 [cit. 06.05.2021]. Dostupné z: <https://www.inkosas.cz/templates/medene-mosazne-bronzove-draty.php>
- [55] R. Bosshard, U. Iruretagoyena and J. W. Kolar, "Comprehensive Evaluation of Rectangular and Double-D Coil Geometry for 50 kW/85 kHz IPT System," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, no. 4, pp. 1406-1415, Dec. 2016, doi: 10.1109/JESTPE.2016.2600162.
- [56] R. Feng, D. Czarkowski, F. de Leon and Q. Deng, "Analysis and design of efficient IPT wireless charging systems for electric vehicle," *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2017, pp. 5313-5318, doi: 10.1109/IECON.2017.8216920.
- [57] BENEŠOVÁ, Zdeňka a Marcela LEDVINOVÁ. Základy elektrických obvodů v příkladech. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008. ISBN 978-80-7043-640-0.
- [58] BENEŠOVÁ, Zdeňka a Daniel MAYER. Základní příklady z teorie elektromagnetického pole. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008. ISBN 978-80-7043-737-7.
- [59] KINDL, V. TURJANICA, P. TYRPEKL, M. KAVALÍR, T. ZAVŘEL, M. Návrh vazebních prvků WPT pro bateriové systémy ručního náradí. Západočeská univerzita v Plzni, 2020.
- [60] Magnetické materiály. [online]. Copyright © Softima s.r.o.2011 [cit. 10.05.2021]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/07.html>



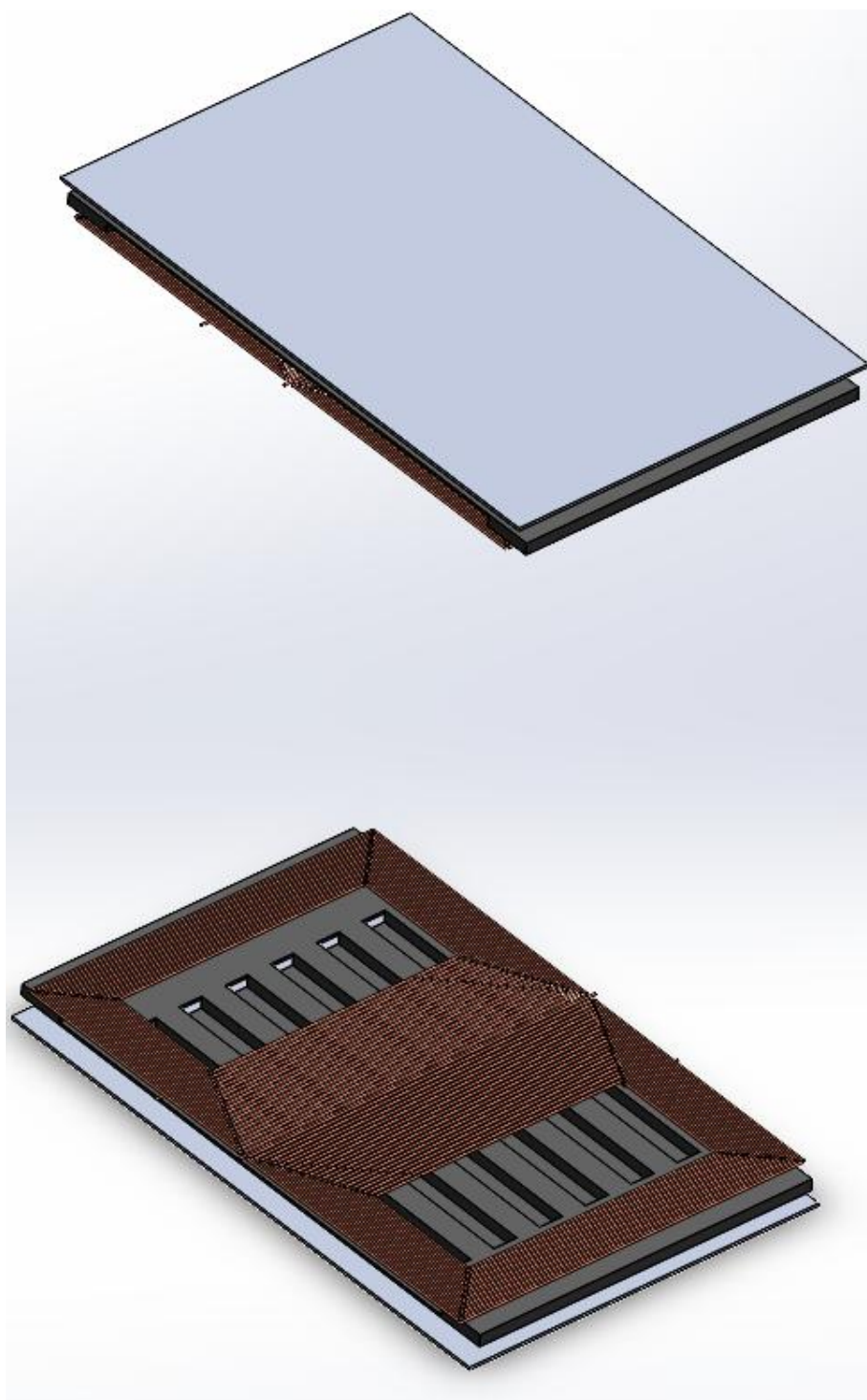
- [61] 100 Years of Innovation in Magnetic Technology | Eclipse Magnetics [online]. Copyright ©E [cit. 10.05.2021]. Dostupné z: [https://www.eclipsemagnetics.com/site/assets/files/2418/ferrite\\_ceramic\\_datasheet.pdf](https://www.eclipsemagnetics.com/site/assets/files/2418/ferrite_ceramic_datasheet.pdf)
- [62] Product catalog: Ferrite materials | TDK Electronics - TDK Europe. Home | TDK Electronics - TDK Europe [online]. Copyright © TDK Electronics AG 2021 [cit. 10.05.2021]. Dostupné z: <https://www.tdk-electronics.tdk.com/en/529404/products/product-catalog/ferrites-and-accessories/epcos-ferrites-and-accessories/ferrite-materials>
- [63] Mnzn Ferrite Magnet Rectangle Block Ferrite Core Soft Ferrite Plate - Buy Mnzn Ferrite Magnet,Rectangle Ferrite Core,Soft Ferrite Plate Product on Alibaba.com. Alibaba.com: Manufacturers, Suppliers, Exporters & Importers from the world's largest online B2B marketplace [online]. Copyright © [cit. 10.05.2021]. Dostupné z: [https://www.alibaba.com/product-detail/MnZn-Ferrite-Magnet-Rectangle-Block-Ferrite\\_1600113615491.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal\\_offer.d\\_title.10be b5d71rhXyq](https://www.alibaba.com/product-detail/MnZn-Ferrite-Magnet-Rectangle-Block-Ferrite_1600113615491.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.10be b5d71rhXyq)
- [64] Mouser [online]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/EPCOS-TDK/B66297K0000X197?qs=xhbEVWpZdWcYYkPIDeZeAg%3D%3D>

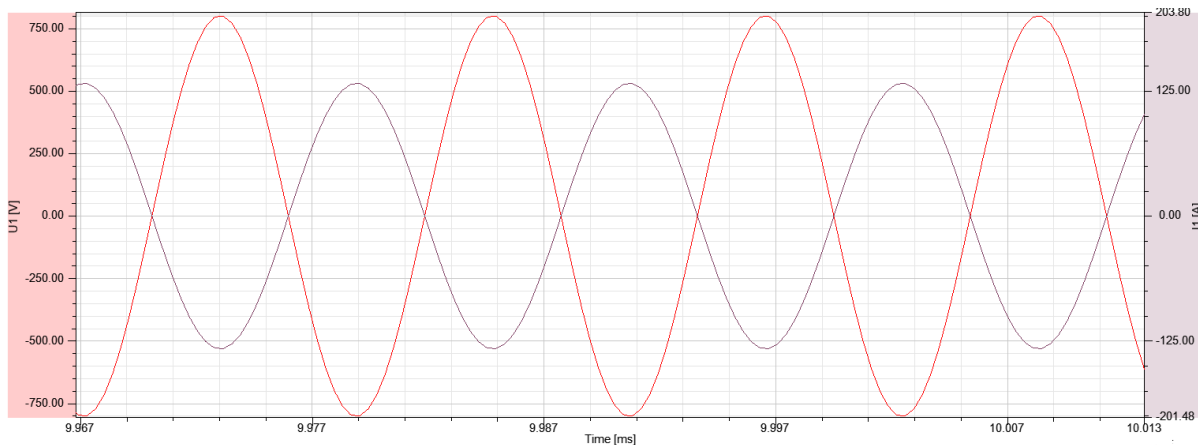
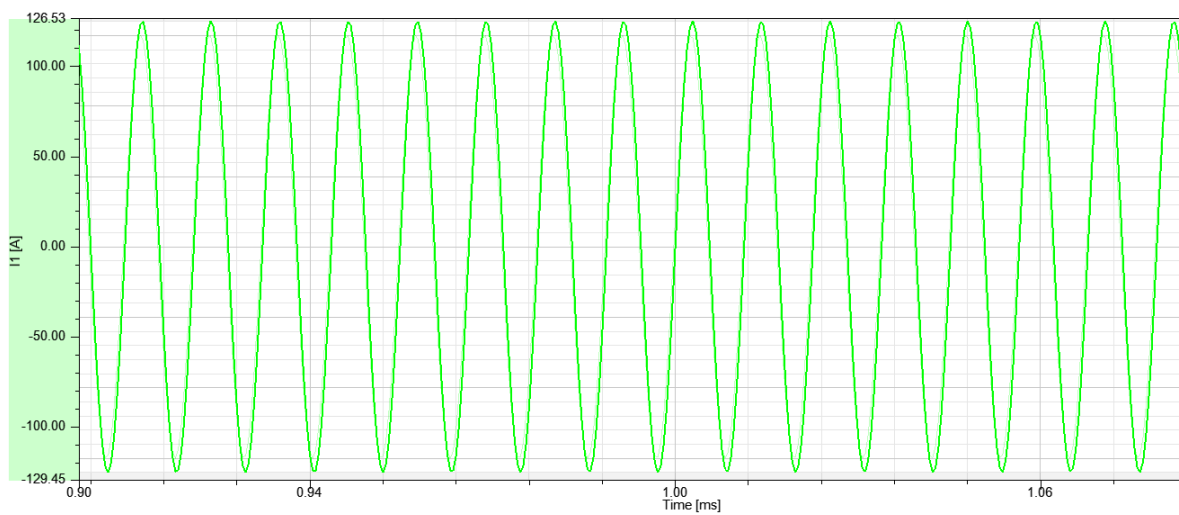
## Přílohy

Příloha A – Kompletní ilustrační znázornění modelu obou párů cívek v topologii double D včetně feritového i hliníkové stínění vytvořeného v programu SolidWorks 3D CAD.....	1
Příloha B – Ověření provázání hodnot modelu testovaného v SW Ansys Simploreru a zkonstruovaného v SW Ansys Maxwell 3D .....	2
Příloha C – Detailní znázornění magnetického pole v prostoru systému WPT s plným feritovým stíněním (14 mm) pro vzdálenost $l_1 = 150$ mm .....	3
Příloha D – Vykreslení magnetického pole v prostoru systému WPT s plným feritovým stíněním (14 mm) pomocí SW nástroje Matlab pro vzdálenost $l_1 = 150$ mm .....	4
Příloha E – Detailní znázornění magnetického pole v prostoru systému WPT s tyčovým feritovým stíněním (14 mm) pro vzdálenost $l_1 = 150$ mm .....	5
Příloha F – Vykreslení magnetického pole v prostoru systému WPT s tyčovým feritovým stíněním (14 mm) pomocí SW nástroje Matlab pro vzdálenost $l_1 = 150$ mm .....	6
Příloha G – Detailní znázornění magnetického pole v prostoru systému WPT s tyčovým feritovým stíněním se zakončením z obou stran pro vzdálenost $l_1 = 150$ mm.....	7
Příloha H – Vykreslení magnetického pole v prostoru systému WPT s tyčovým feritovým stíněním se zakončením z obou stran pomocí SW nástroje Matlab pro vzdálenost $l_1 = 150$ mm .....	8
Příloha I – Kompletní znázornění magnetického pole v prostoru systému WPT s plným feritovým stíněním (7 mm) pro vzdálenost $l_1 = 150$ mm.....	9
Příloha J – Detailní znázornění magnetického pole v prostoru systému WPT s plným feritovým stíněním (7 mm) pro vzdálenost $l_1 = 150$ mm.....	10
Příloha K – Vykreslení magnetického pole v prostoru systému WPT s plným feritovým stíněním (7 mm) pomocí SW nástroje Matlab pro vzdálenost $l_1 = 150$ mm .....	11
Příloha L – Kompletní znázornění magnetického pole v prostoru systému WPT s feritovým stíněním obsahujícím obdélníkové výřezy pro vzdálenost $l_1 = 150$ mm.....	12
Příloha M – Detailní znázornění magnetického pole v prostoru systému WPT s feritovým stíněním obsahujícím obdélníkové výřezy pro vzdálenost $l_1 = 150$ mm.....	13
Příloha N – Vykreslení magnetického pole v prostoru systému WPT s feritovým stíněním obsahujícím obdélníkové výřezy pomocí SW nástroje Matlab pro vzdálenost $l_1 = 150$ mm .....	14
Příloha O – Kompletní znázornění magnetického pole v prostoru systému WPT s plným feritovým stíněním (14 mm) pro vzdálenost $l_2 = 200$ mm.....	15
Příloha P – Kompletní znázornění magnetického pole v prostoru systému WPT s plným feritovým stíněním (7 mm) pro vzdálenost $l_2 = 200$ mm.....	16

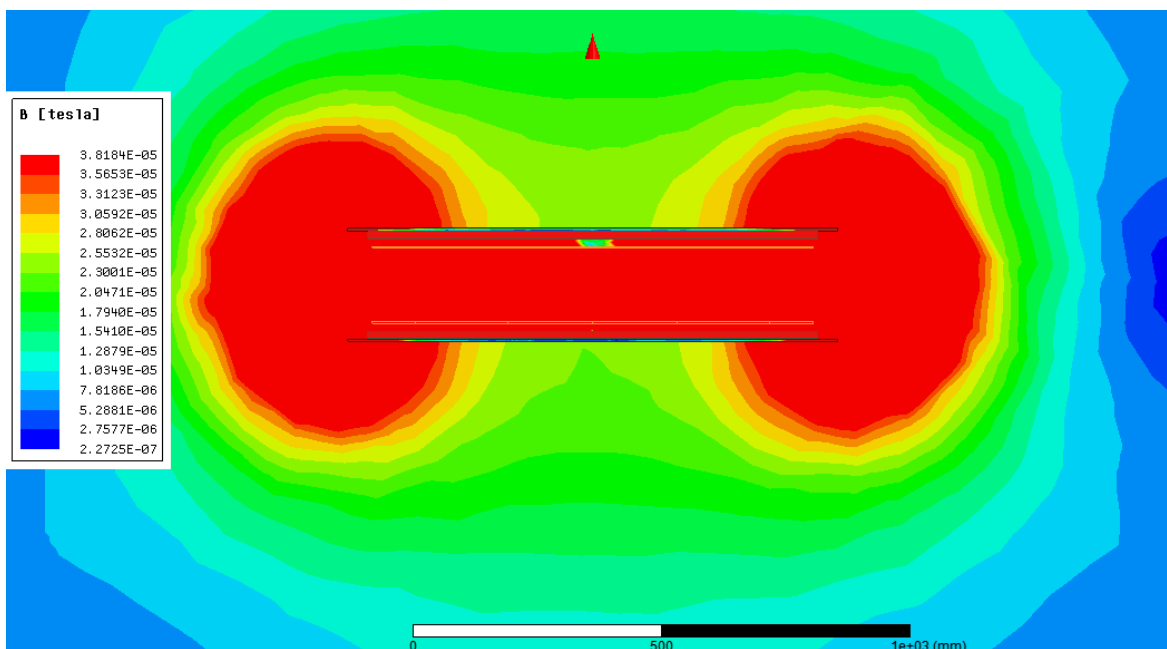
Příloha Q – Kompletní znázornění magnetického pole v prostoru systému WPT s tyčovým feritovým stíněním (14 mm) pro vzdálenost $l_2 = 200$ mm.....	17
Příloha R – Kompletní znázornění magnetického pole v prostoru systému WPT s tyčovým feritovým stíněním se zakončením z obou stran pro vzdálenost $l_2 = 200$ mm.....	18
Příloha S – Kompletní znázornění magnetického pole v prostoru systému WPT s feritovým stíněním obsahujícím obdélníkové výřezy pro vzdálenost $l_2 = 200$ mm.....	19
Příloha T – Barevné vykreslení magnetické indukce znázorňující sycení feritu pro plné stínění (14 mm) se vzdáleností cívek $l_1 = 150$ mm.....	20
Příloha U – Barevné vykreslení magnetické indukce znázorňující sycení feritu pro plné stínění (7 mm) se vzdáleností cívek $l_1 = 150$ mm.....	21
Příloha V – Barevné vykreslení magnetické indukce znázorňující sycení feritu pro tyčové stínění (14 mm) se vzdáleností cívek $l_1 = 150$ mm.....	22
Příloha W – Barevné vykreslení magnetické indukce znázorňující sycení feritu pro stínění obsahující obdélníkové výřezy se vzdáleností cívek $l_1 = 150$ mm.....	23
Příloha X – Barevné vykreslení magnetické indukce znázorňující sycení feritu pro plné stínění (14 mm) se vzdáleností cívek $l_2 = 200$ mm.....	24
Příloha Y – Barevné vykreslení magnetické indukce znázorňující sycení feritu pro plné stínění (7 mm) se vzdáleností cívek $l_2 = 200$ mm.....	25
Příloha Z – Barevné vykreslení magnetické indukce znázorňující sycení feritu pro tyčové stínění (14 mm) se vzdáleností cívek $l_2 = 200$ mm.....	26
Příloha AA – Barevné vykreslení magnetické indukce znázorňující sycení feritu pro tyčové stínění se zakončením z obou stran a vzdáleností cívek $l_2 = 200$ mm.....	27
Příloha AB – Barevné vykreslení magnetické indukce znázorňující sycení feritu pro stínění obsahující obdélníkové výřezy se vzdáleností cívek $l_2 = 200$ mm.....	28

**Příloha A – Kompletní ilustrační znázornění modelu obou párů cívek v topologii double D včetně feritového i hliníkové stínění vytvořeného v programu SolidWorks 3D CAD**

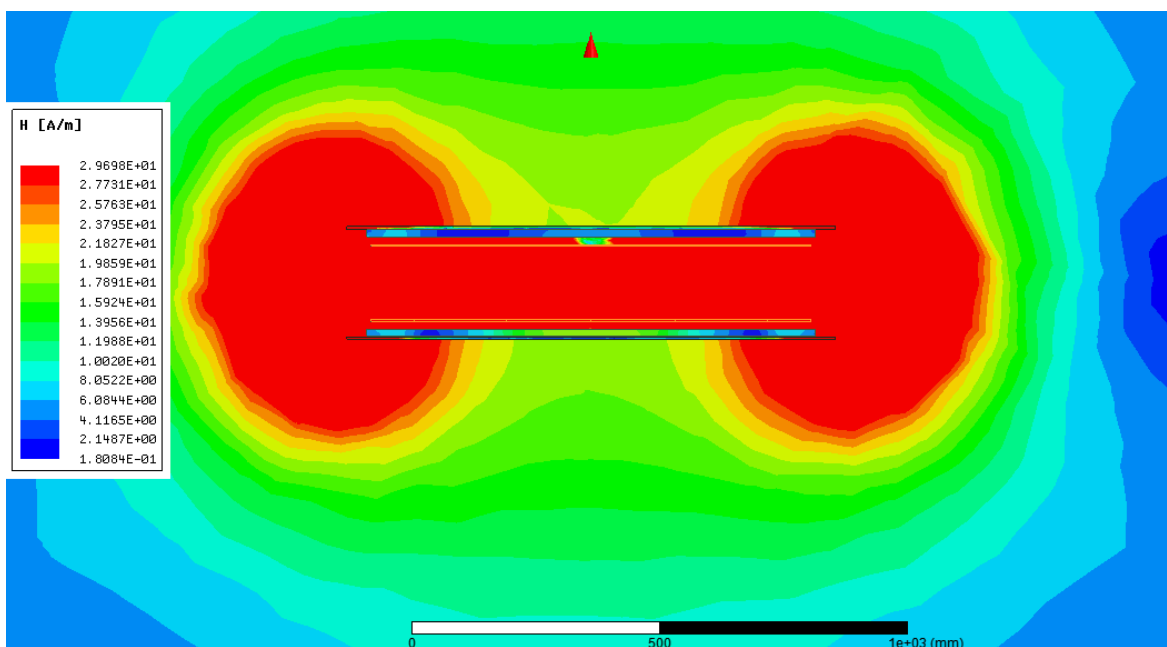


**Příloha B – Ověření provázání hodnot modelu testovaného v SW Ansys Simploreru a zkonstruovaného v SW Ansys Maxwell 3D**a) Screen průběhu ze SW Simplorer pro hodnoty  $l_I = 150$  mmb) Screen průběhu proudu ze SW Ansys pro hodnoty  $l_I = 150$  mm

**Příloha C – Detailní znázornění magnetického pole v prostoru systému WPT s plným feritovým stíněním (14 mm) pro vzdálenost  $l_1 = 150$  mm**

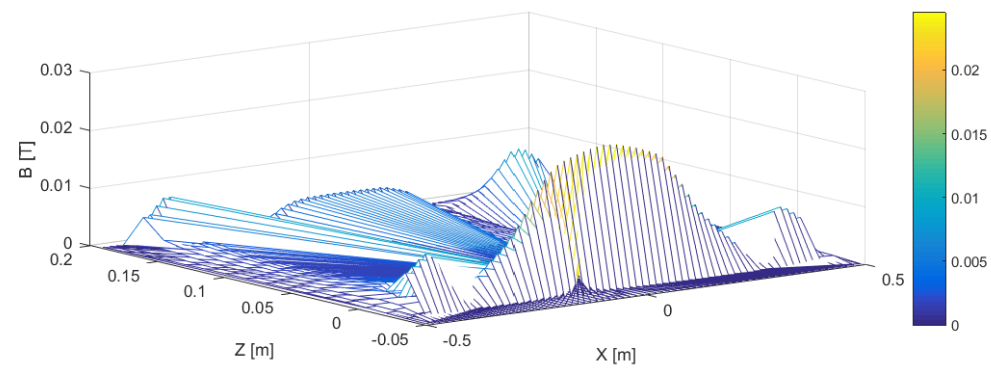
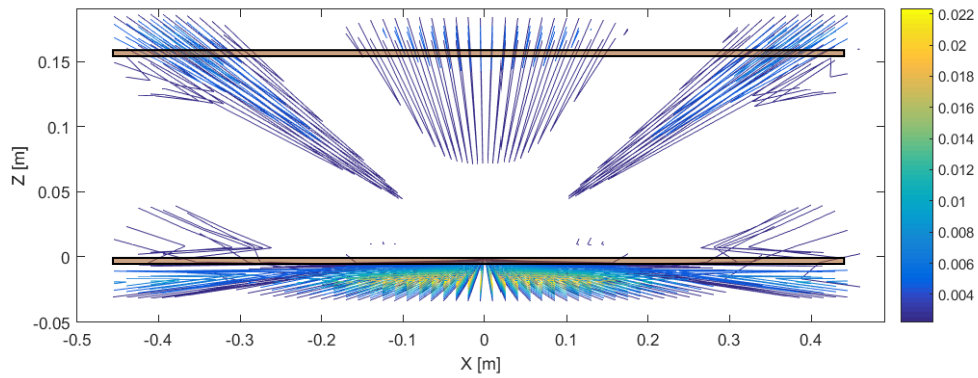


a) Prostorové vykreslení magnetické indukce  $B$

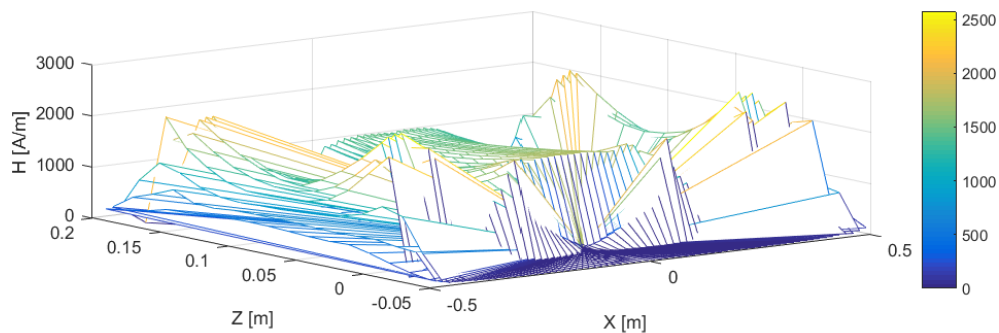
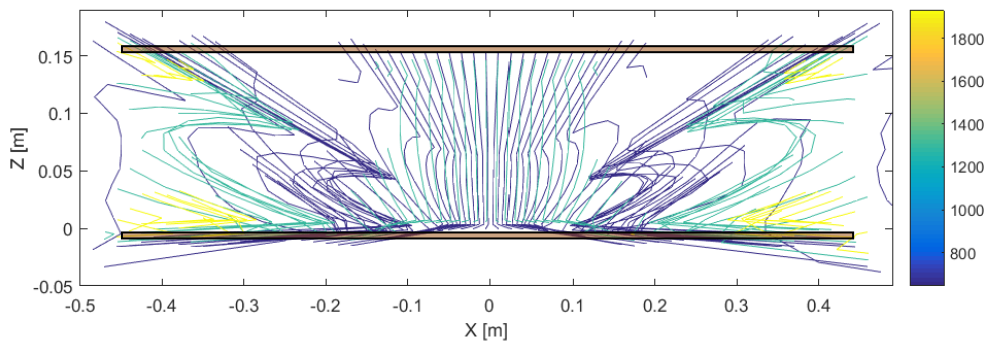


b) Prostorové vykreslení magnetické intenzity  $H$

**Příloha D – Vykreslení magnetického pole v prostoru systému WPT s plným feritovým stíněním (14 mm) pomocí SW nástroje Matlab pro vzdálenost  $l_I = 150$  mm**

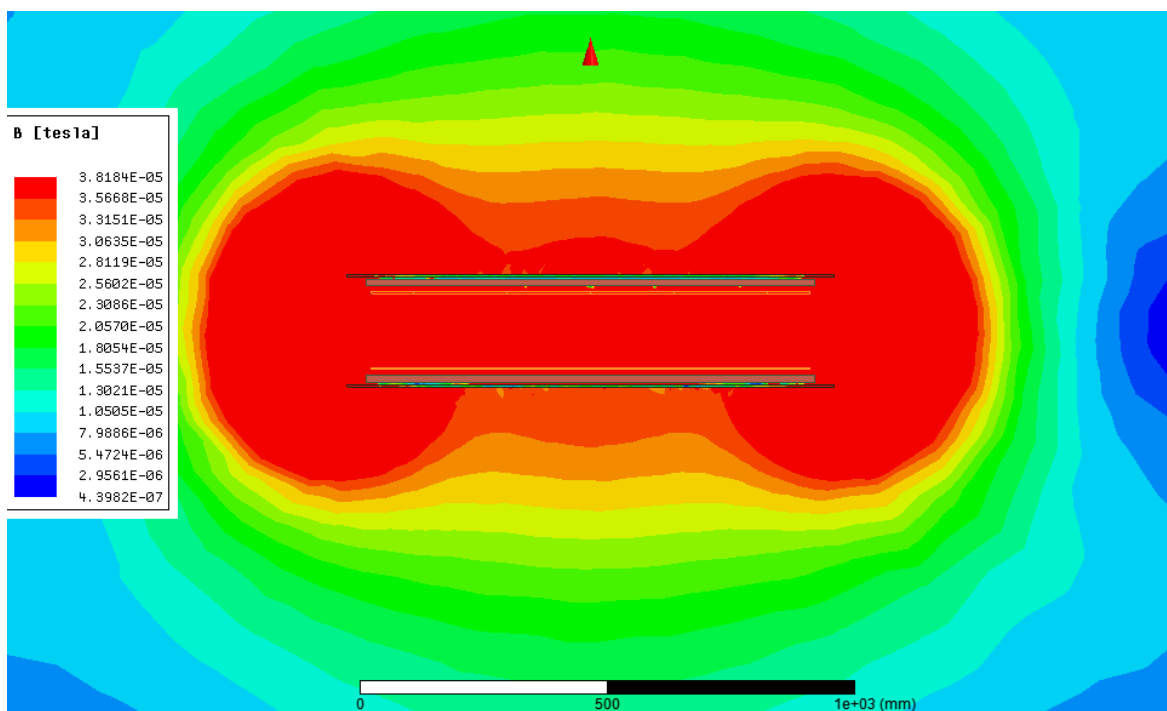


b) Znáznornění magnetické indukce za pomoci příkazu contour a mesh

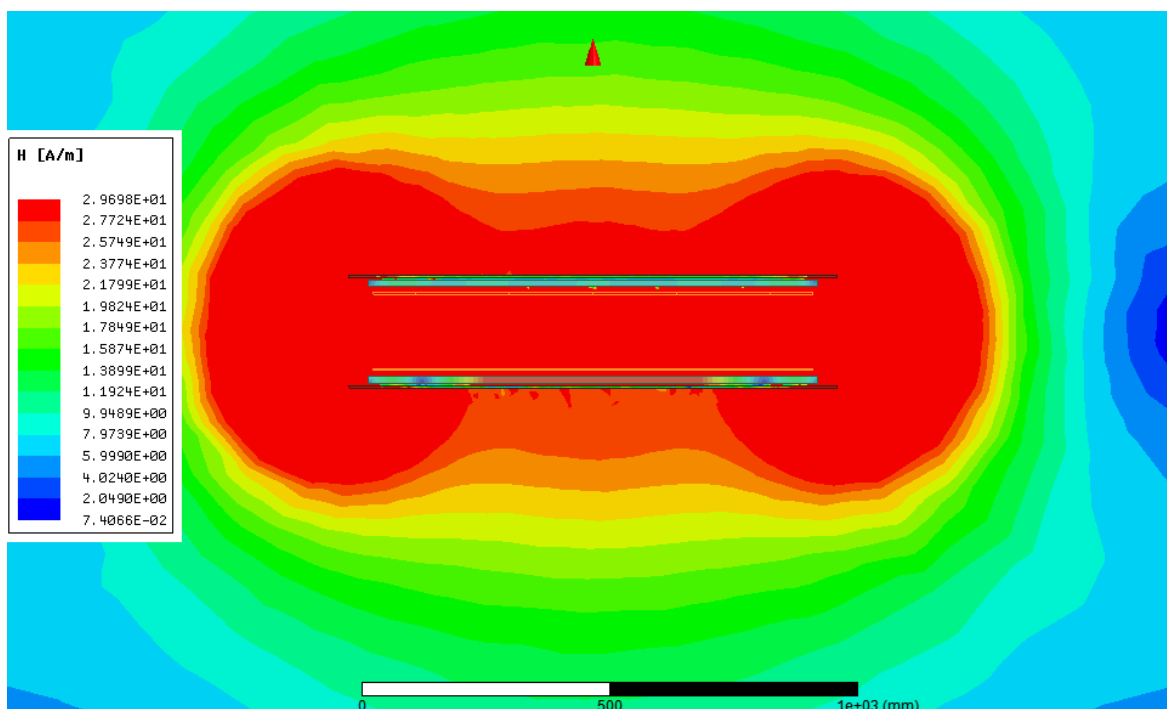


a) Znáznornění magnetické intenzity za pomoci příkazu contour a mesh

**Příloha E – Detailní znázornění magnetického pole v prostoru systému WPT s tyčovým feritovým stíněním (14 mm) pro vzdálenost  $l_1 = 150$  mm**



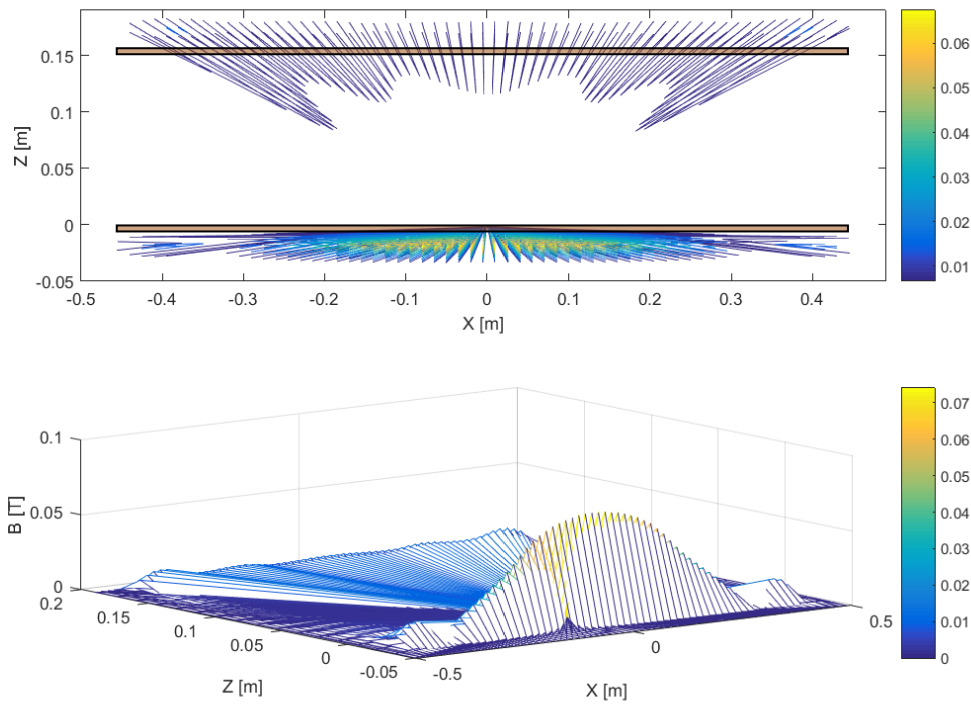
a) Prostorové vykreslení magnetické indukce  $B$



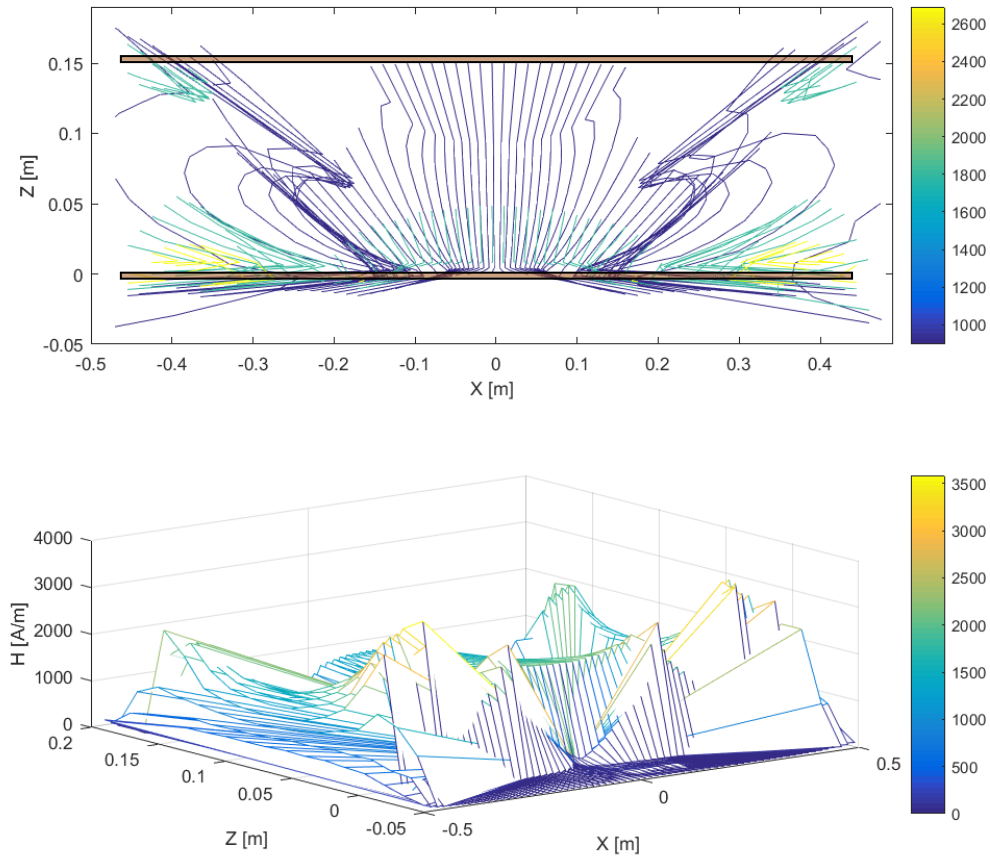
b) Prostorové vykreslení magnetické intenzity  $H$



**Příloha F – Vykreslení magnetického pole v prostoru systému WPT s tyčovým feritovým stíněním (14 mm) pomocí SW nástroje Matlab pro vzdálenost  $l_1 = 150$  mm**

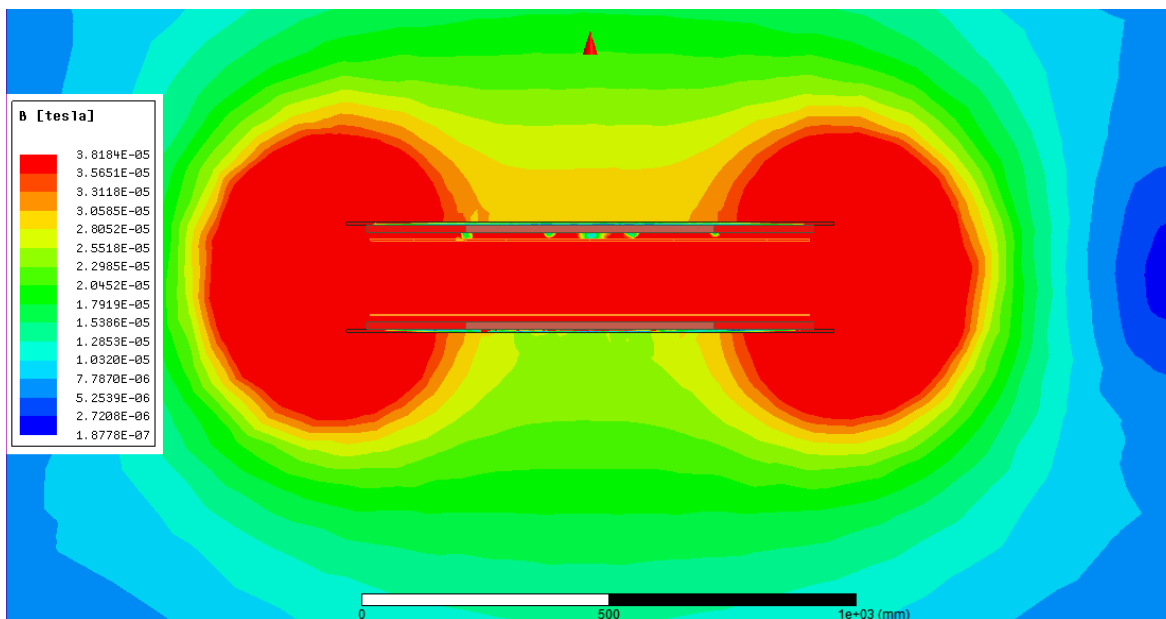


a) Znázornění magnetické indukce za pomoci příkazu contour a mesh

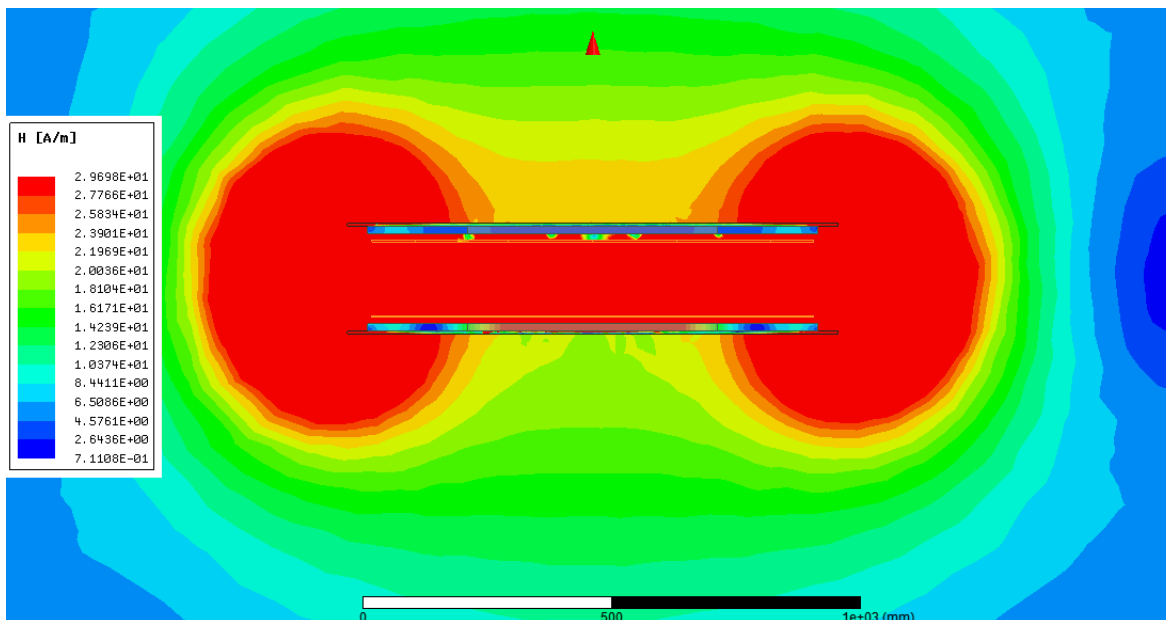


b) Znázornění magnetické intenzity za pomoci příkazu contour a mesh

**Příloha G – Detailní znázornění magnetického pole v prostoru systému WPT s tyčovým feritovým stíněním se zakončením z obou stran pro vzdálenost  $l_1 = 150$  mm**

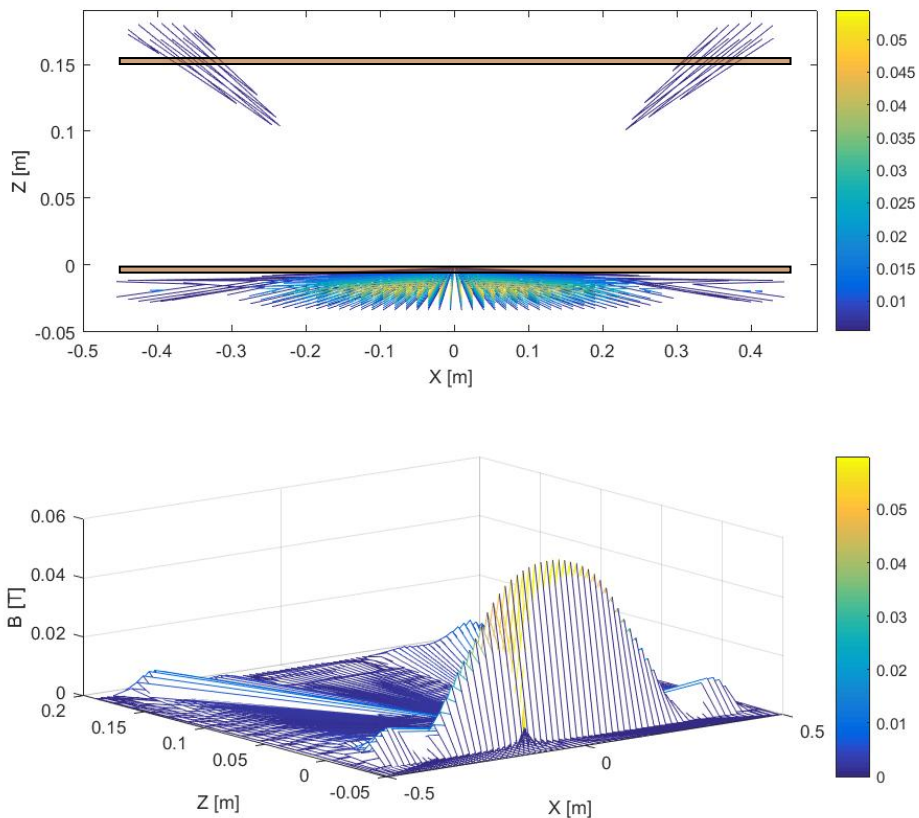


a) Prostorové vykreslení magnetické indukce  $B$

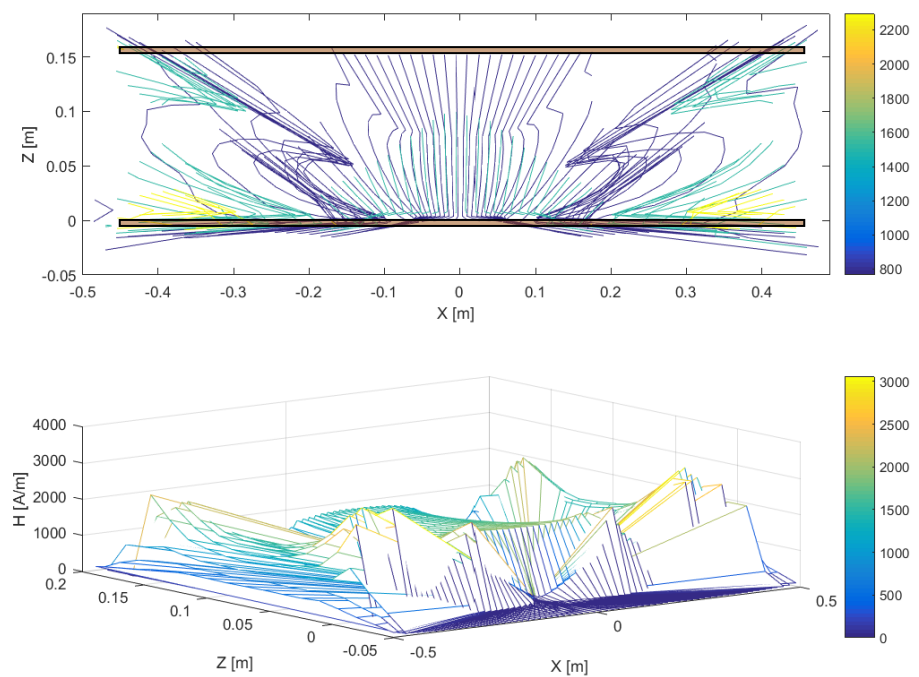


b) Prostorové vykreslení magnetické intenzity  $H$

**Příloha H – Vykreslení magnetického pole v prostoru systému WPT s tyčovým feritovým stíněním se zakončením z obou stran pomocí SW nástroje Matlab pro vzdálenost  $l_1 = 150$  mm**

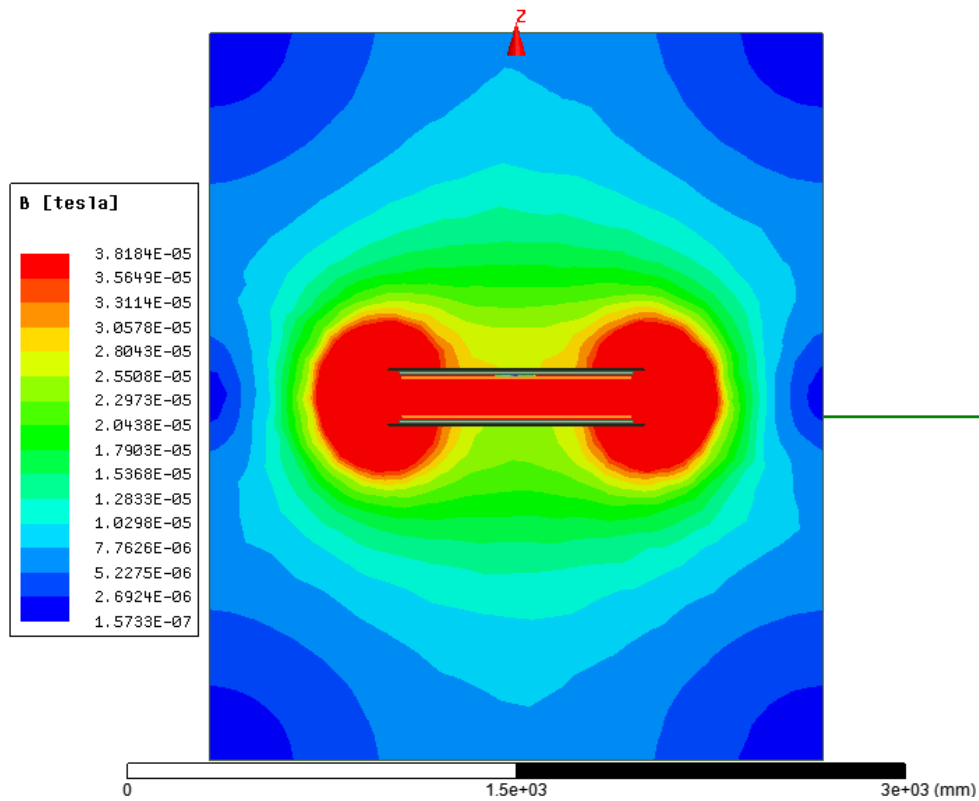


a) Znázornění magnetické indukce za pomoci příkazu contour a mesh

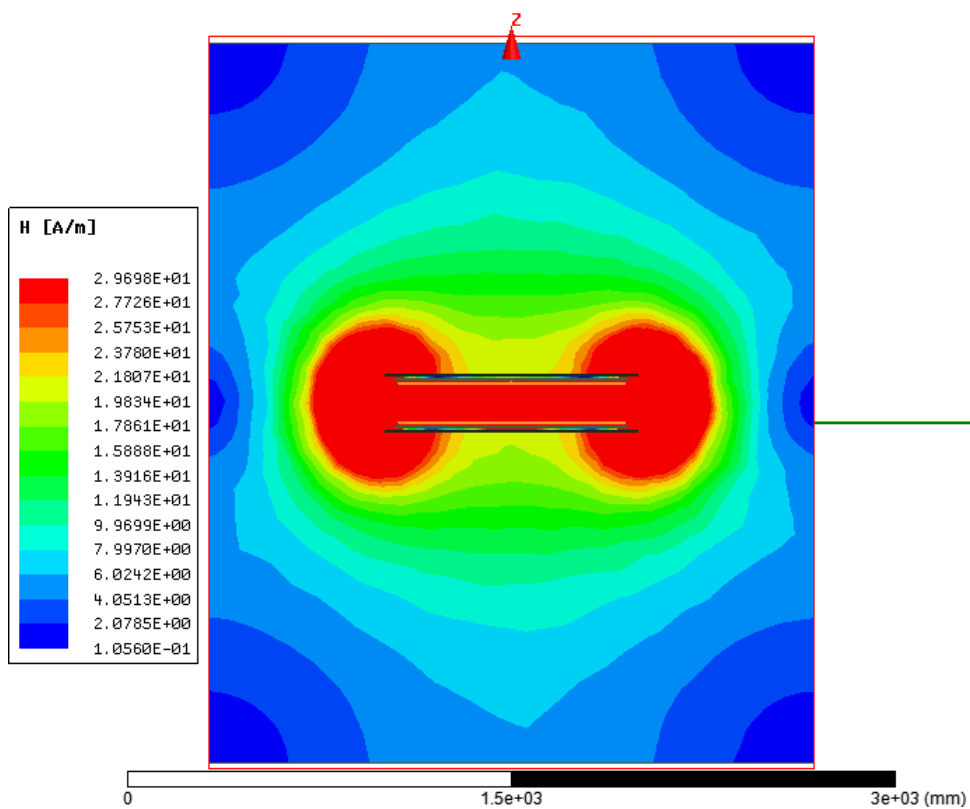


b) Znázornění magnetické intenzity za pomoci příkazu contour a mesh

**Příloha I – Kompletní znázornění magnetického pole v prostoru systému WPT s plným feritovým stíněním (7 mm) pro vzdálenost  $l_I = 150$  mm**

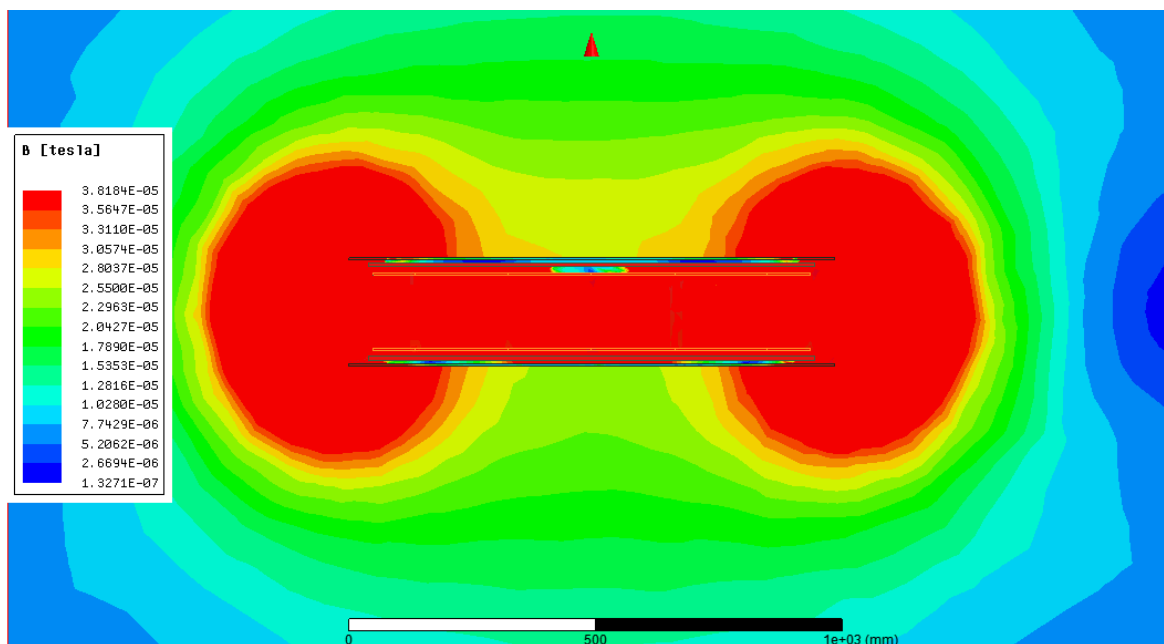


a) Celkové prostorové vykreslení magnetické indukce  $B$

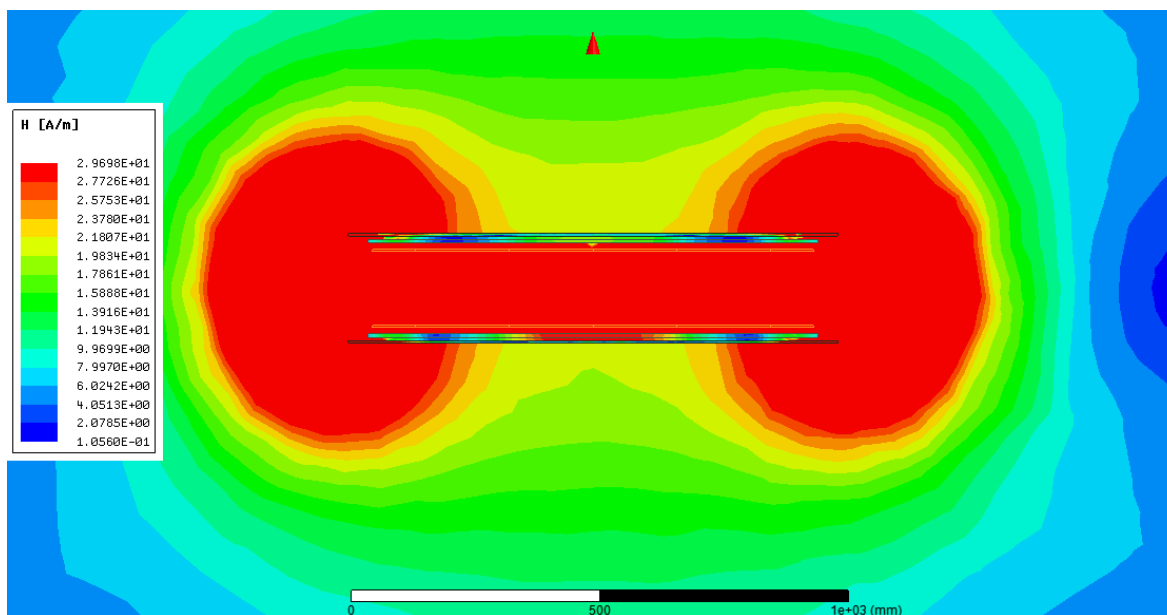


b) Celkové prostorové vykreslení magnetické intenzity  $H$

**Příloha J – Detailní znázornění magnetického pole v prostoru systému WPT s plným feritovým stíněním (7 mm) pro vzdálenost  $l_1 = 150$  mm**

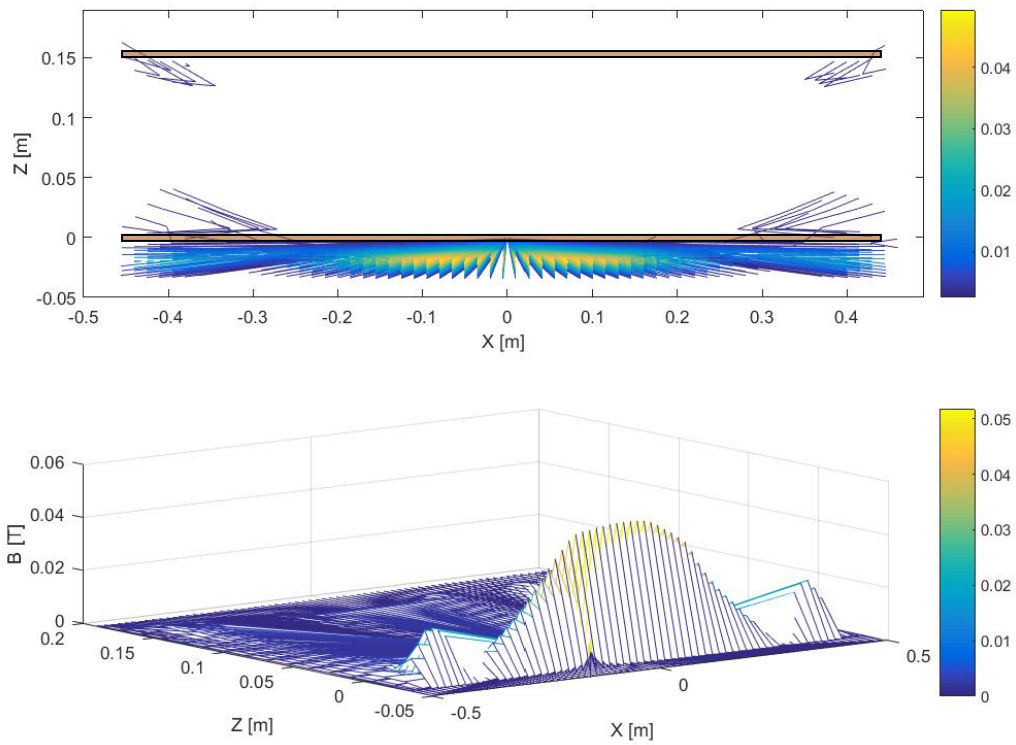


a) Prostorové vykreslení magnetické indukce  $B$

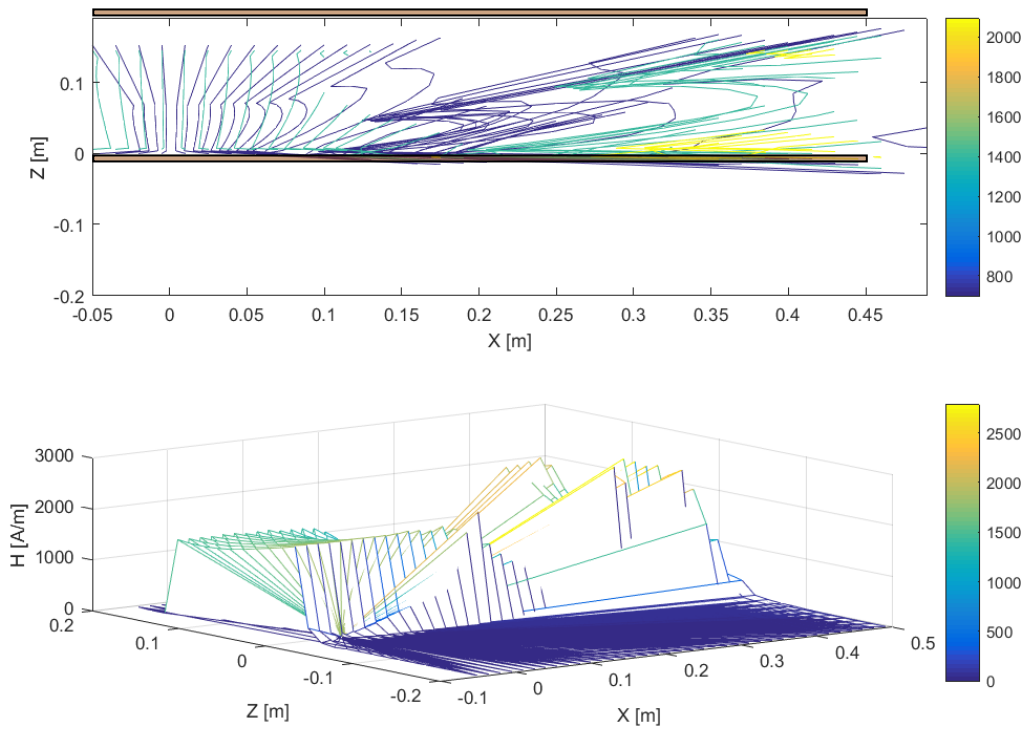


b) Prostorové vykreslení magnetické intenzity  $H$

**Příloha K – Vykreslení magnetického pole v prostoru systému WPT s plným feritovým stíněním (7 mm) pomocí SW nástroje Matlab pro vzdálenost  $l_1 = 150$  mm**

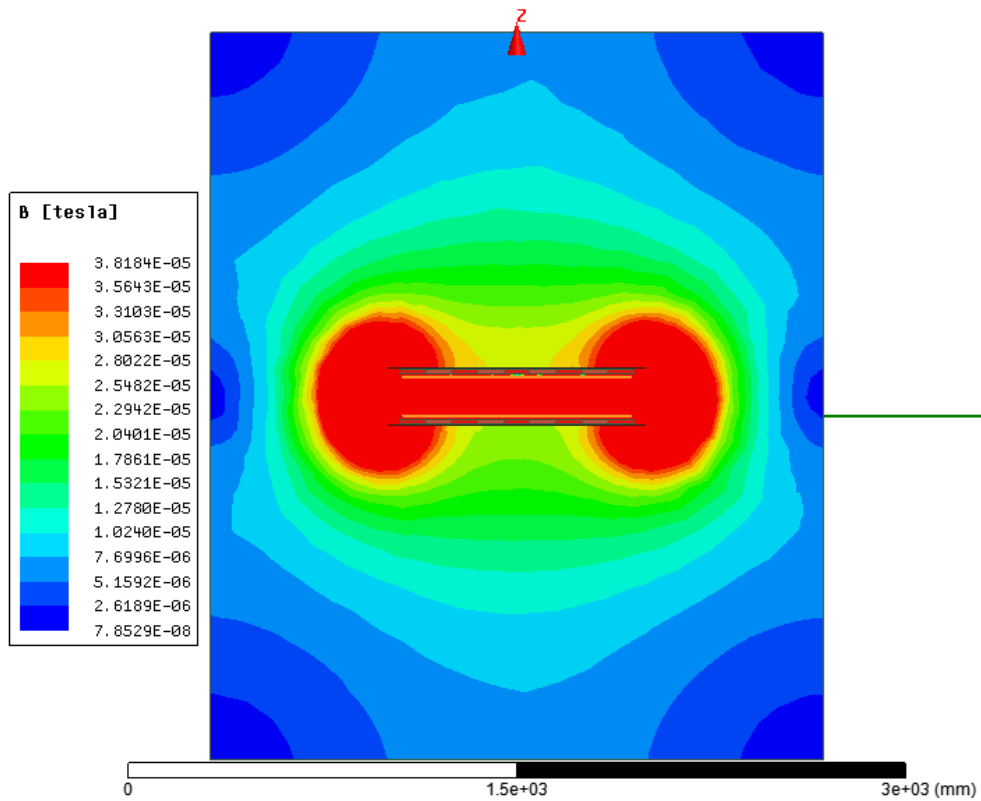


a) Znázornění magnetické indukce za pomoci příkazu contour a mesh

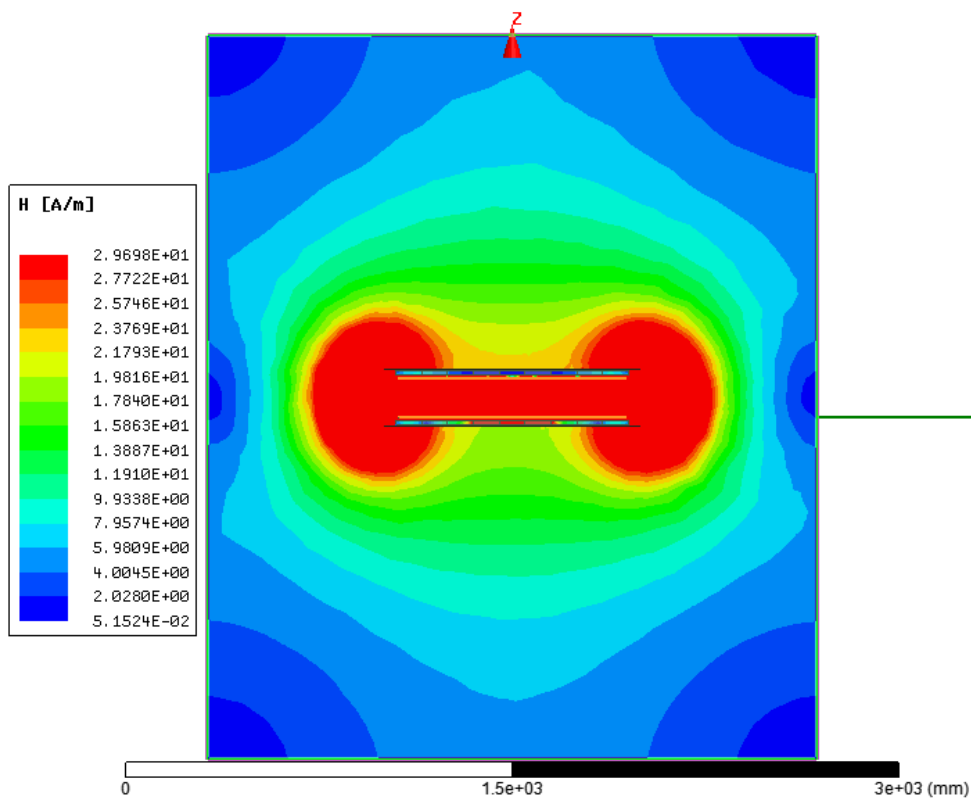


b) Znázornění magnetické intenzity za pomoci příkazu contour a mesh

**Příloha L – Kompletní znázornění magnetického pole v prostoru systému WPT s feritovým stíněním obsahujícím obdélníkové výřezy pro vzdálenost  $l_1 = 150$  mm**

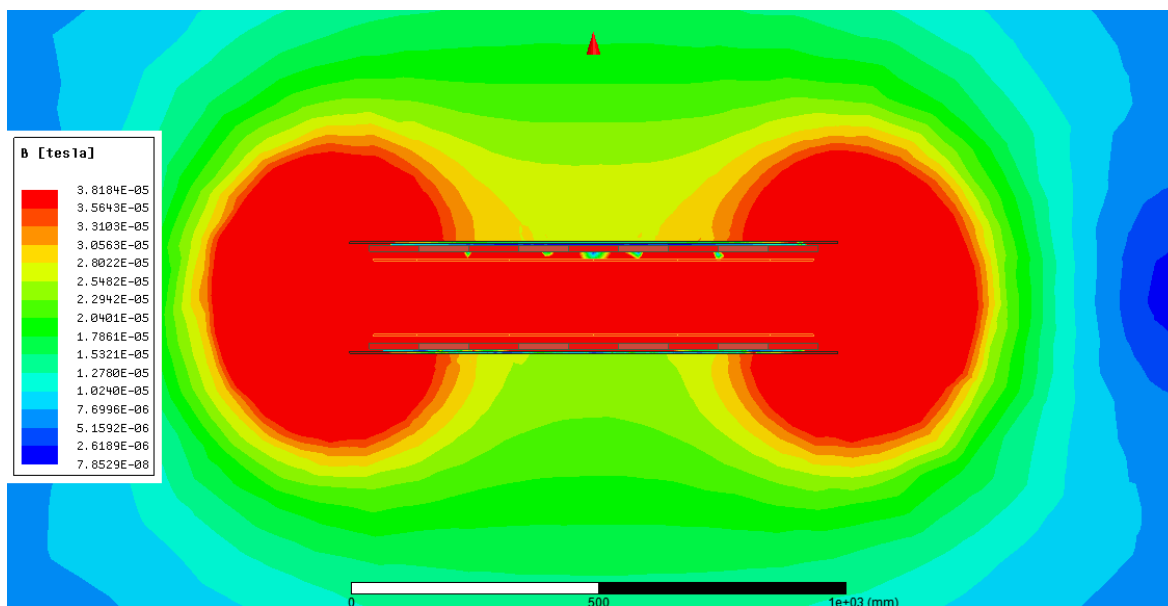


a) Celkové prostorové vykreslení magnetické indukce  $B$

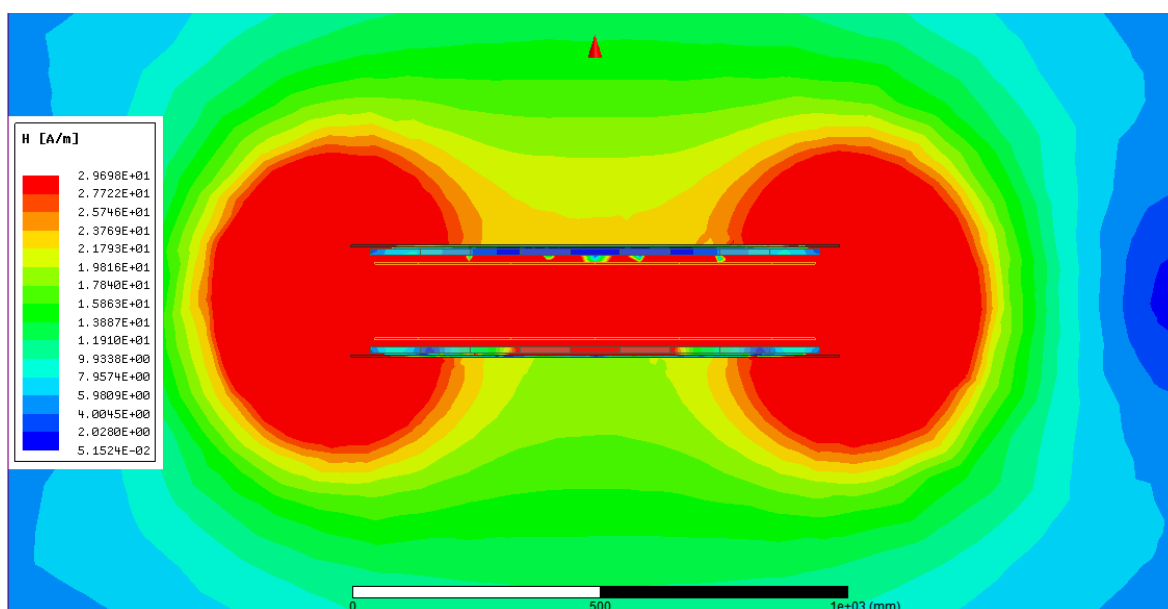


b) Celkové prostorové vykreslení magnetické intenzity  $H$

**Příloha M – Detailní znázornění magnetického pole v prostoru systému WPT s feritovým stíněním obsahujícím obdélníkové výřezy pro vzdálenost  $l_1 = 150$  mm**



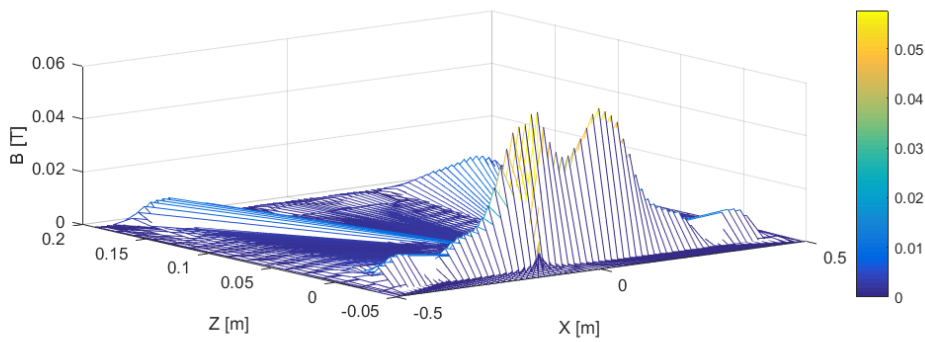
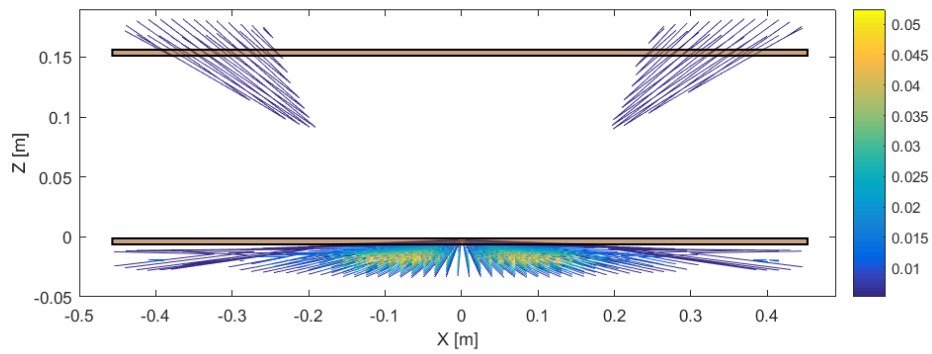
a) Prostorové vykreslení magnetické indukce  $B$



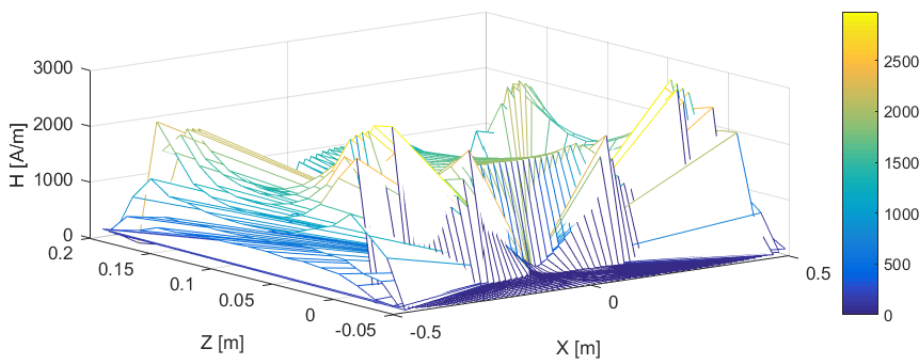
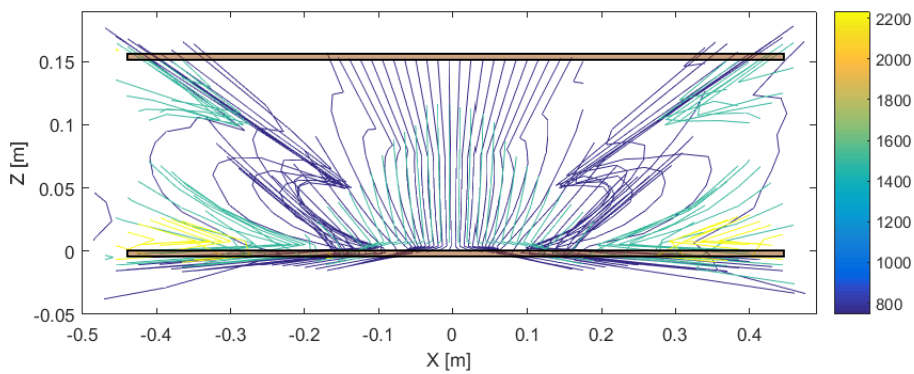
b) Prostorové vykreslení magnetické intenzity  $H$



**Příloha N – Vykreslení magnetického pole v prostoru systému WPT s feritovým stíněním obsahujícím obdélníkové výřezy pomocí SW nástroje Matlab pro vzdálenost  $l_1 = 150$  mm**

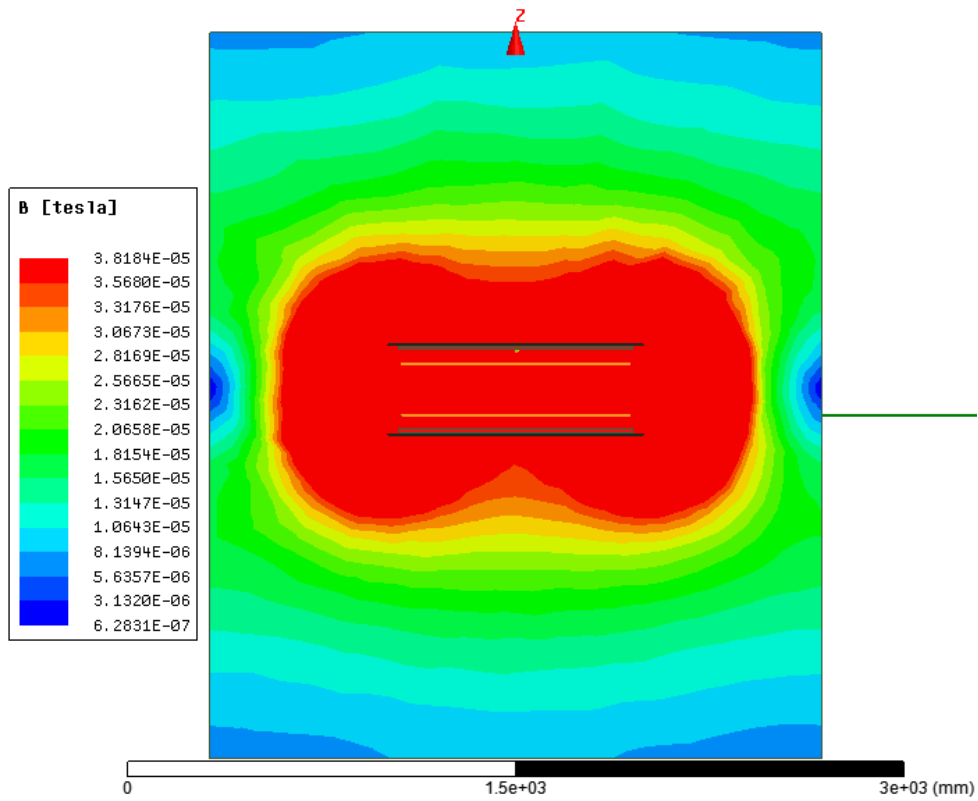


a) Znázornění magnetické indukce za pomoci příkazu contour a mesh

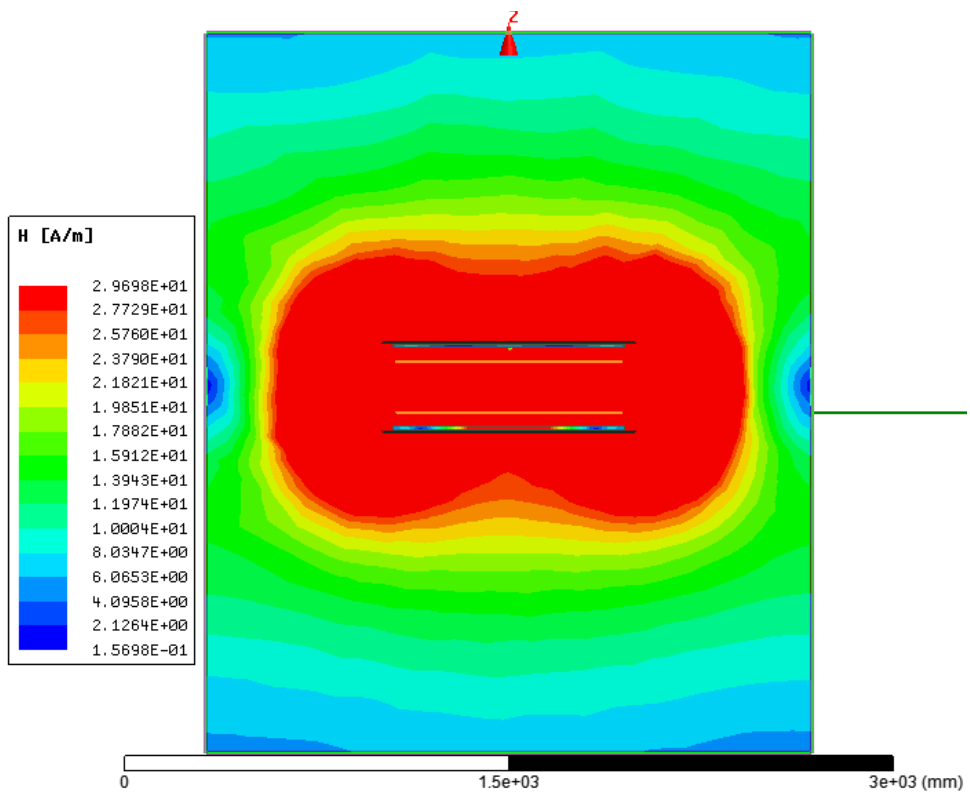


b) Znázornění magnetické intenzity za pomoci příkazu contour a mesh

**Příloha O – Kompletní znázornění magnetického pole v prostoru systému WPT s plným feritovým stíněním (14 mm) pro vzdálenost  $l_2 = 200$  mm**

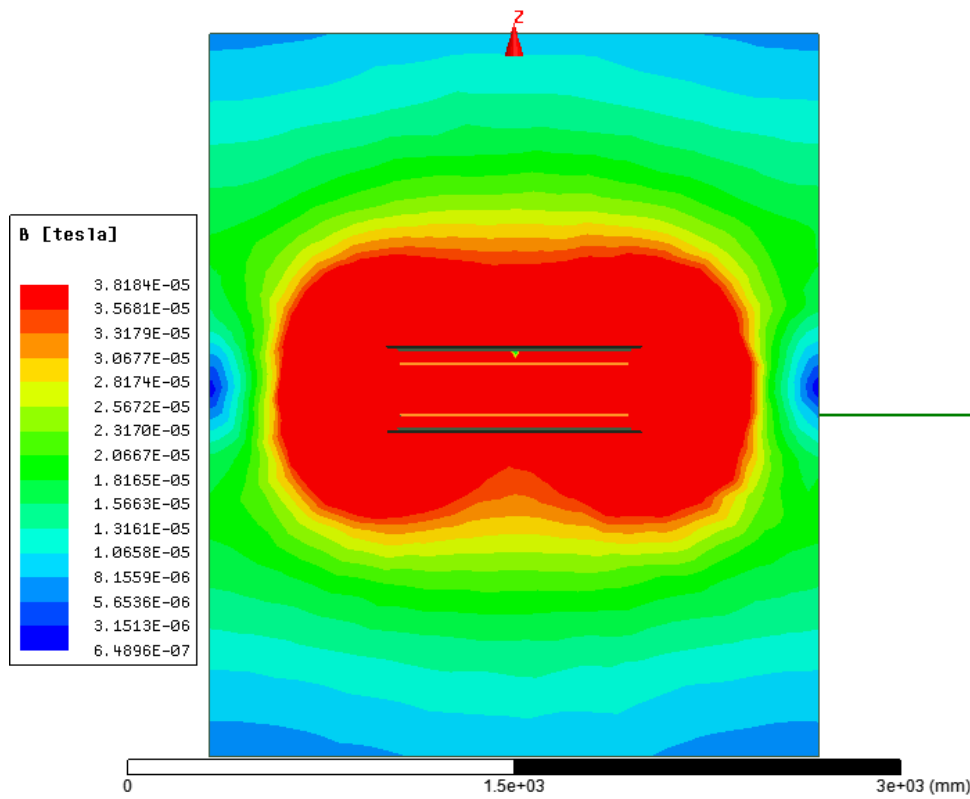


a) Celkové prostorové vykreslení magnetické indukce  $B$

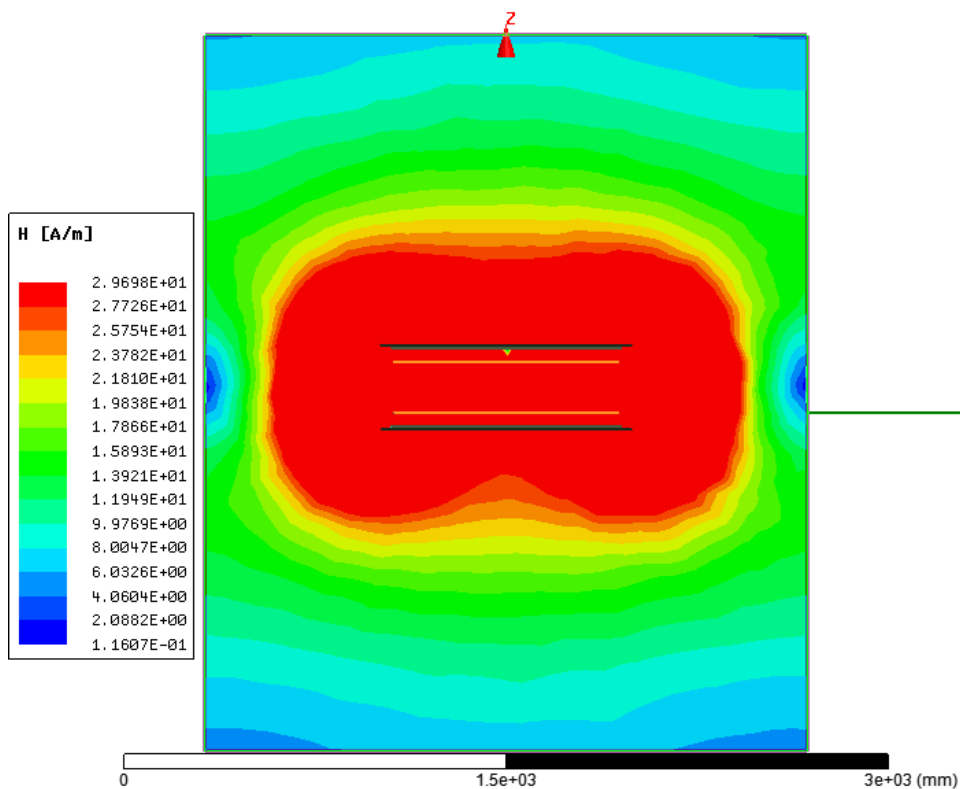


b) Celkové prostorové vykreslení magnetické intenzity  $H$

**Příloha P – Kompletní znázornění magnetického pole v prostoru systému WPT s plným feritovým stíněním (7 mm) pro vzdálenost  $l_2 = 200$  mm**

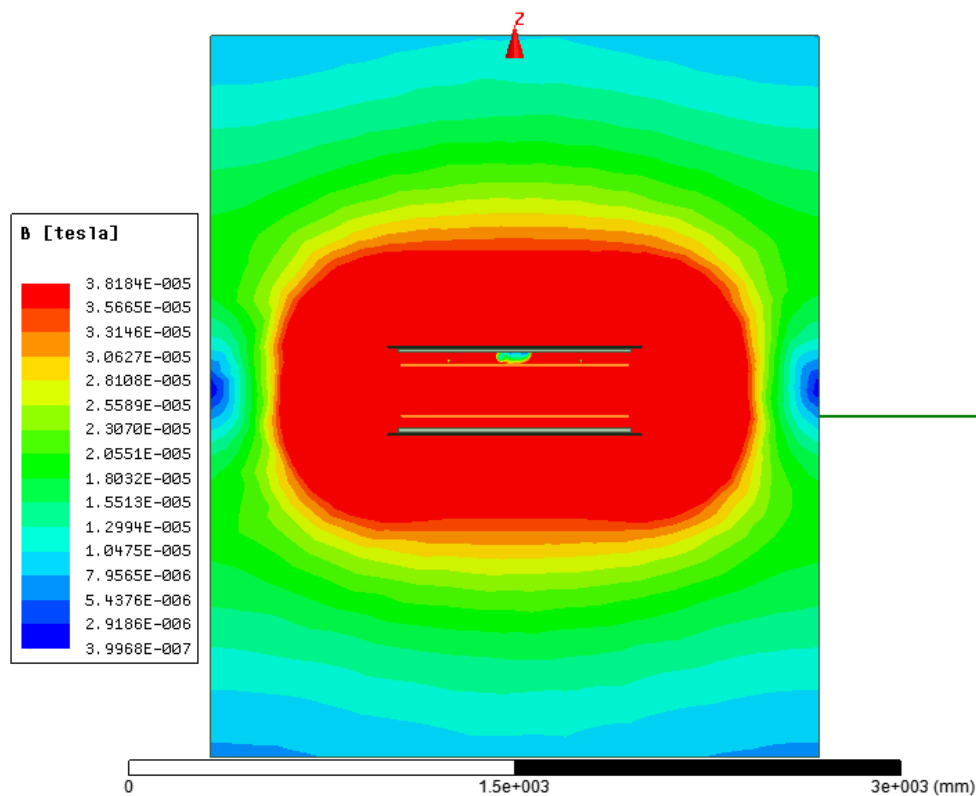


a) Celkové prostorové vykreslení magnetické indukce  $B$

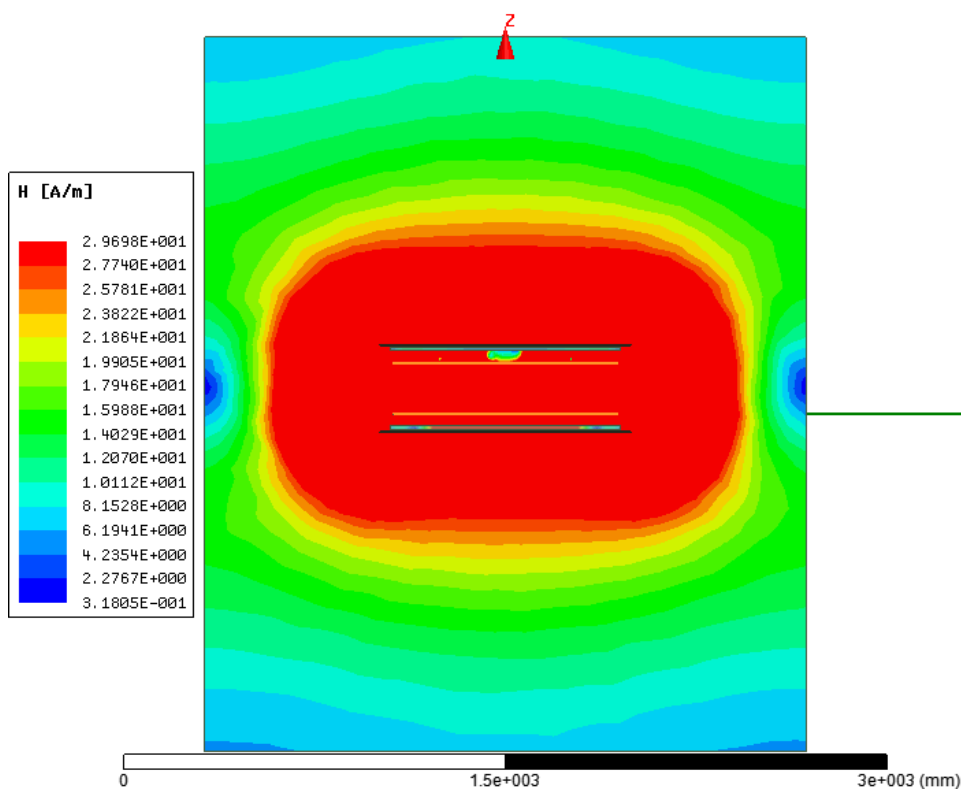


b) Celkové prostorové vykreslení magnetické intenzity  $H$

**Příloha Q – Kompletní znázornění magnetického pole v prostoru systému WPT s tyčovým feritovým stíněním (14 mm) pro vzdálenost  $l_2 = 200$  mm**

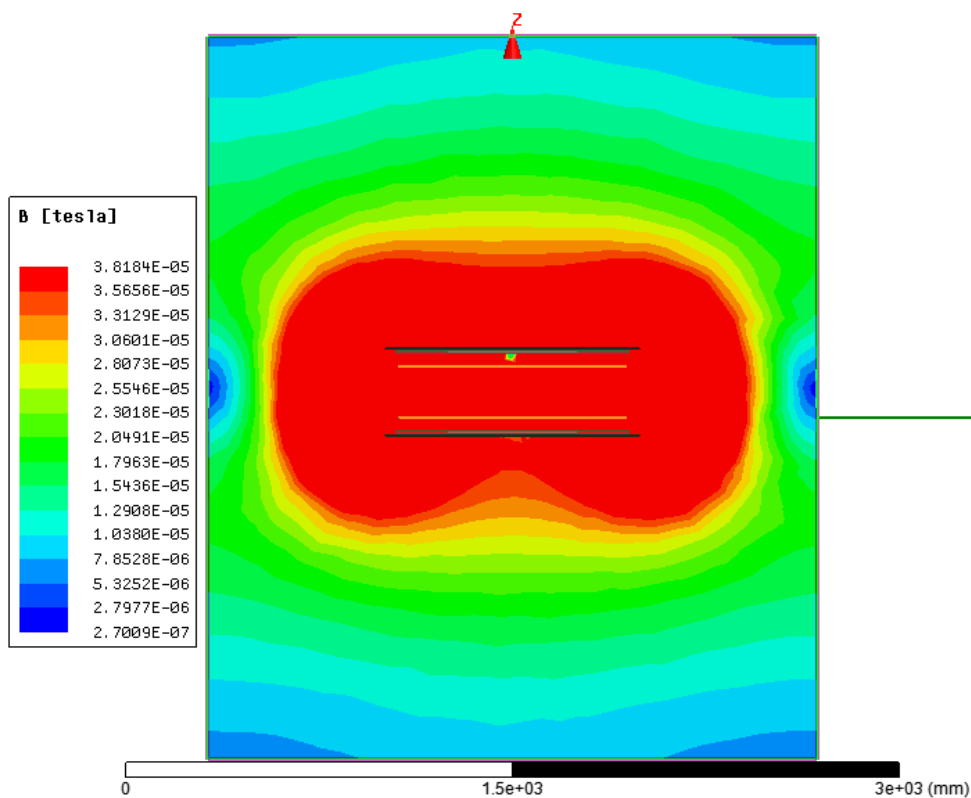


a) Celkové prostorové vykreslení magnetické indukce  $B$

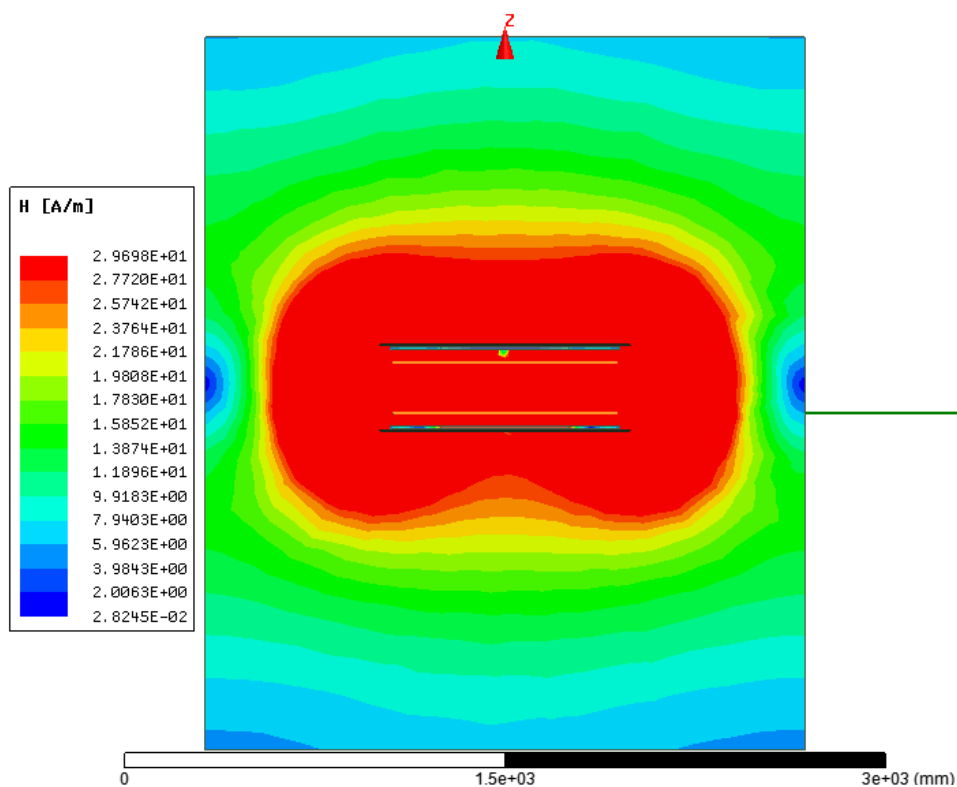


b) Celkové prostorové vykreslení magnetické intenzity  $H$

**Příloha R – Kompletní znázornění magnetického pole v prostoru systému WPT s tyčovým feritovým stíněním se zakončením z obou stran pro vzdálenost  $l_2 = 200$  mm**

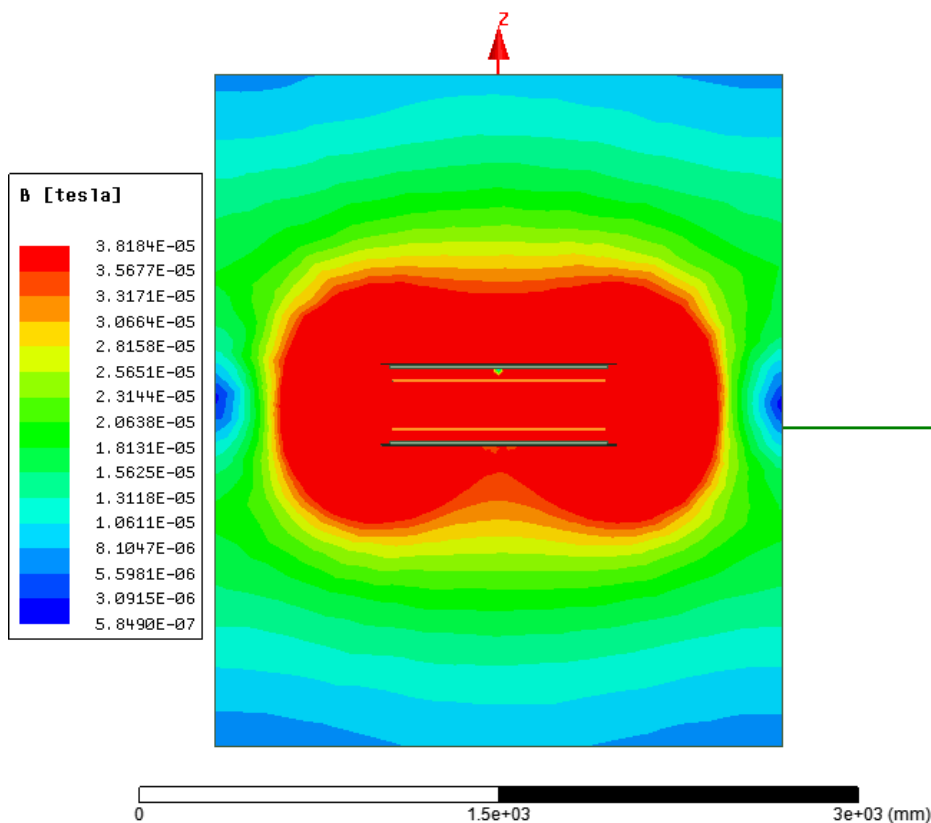


a) Celkové prostorové vykreslení magnetické indukce  $B$

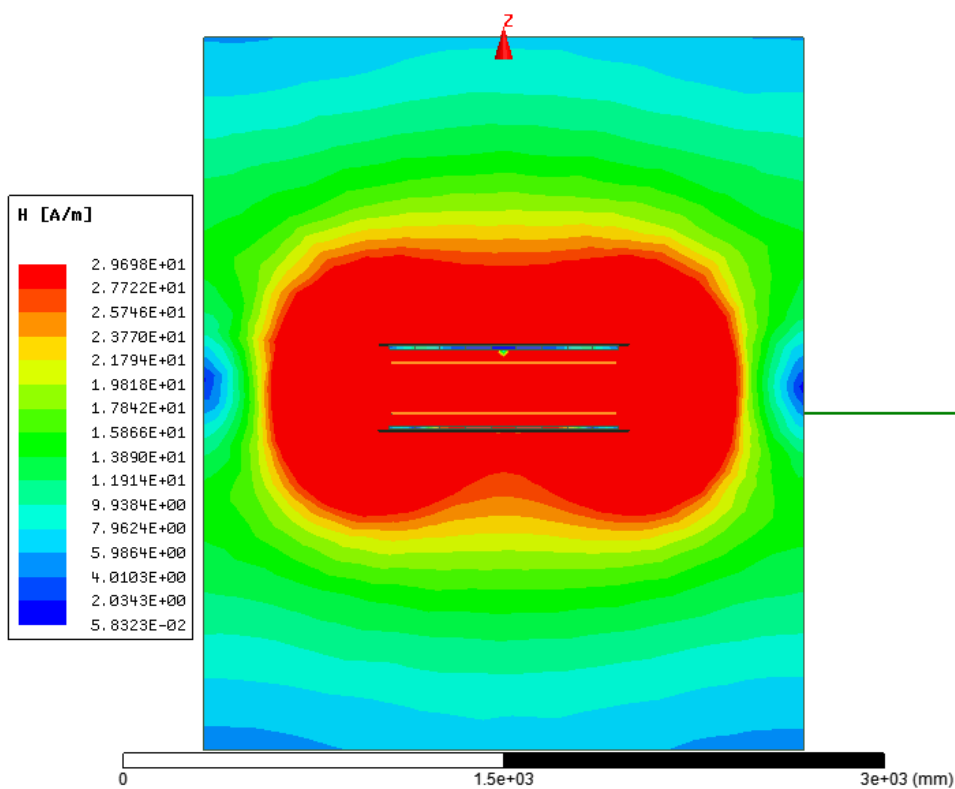


b) Celkové prostorové vykreslení magnetické intenzity  $H$

**Příloha S – Kompletní znázornění magnetického pole v prostoru systému WPT s feritovým stíněním obsahujícím obdélníkové výřezy pro vzdálenost  $l_2 = 200$  mm**

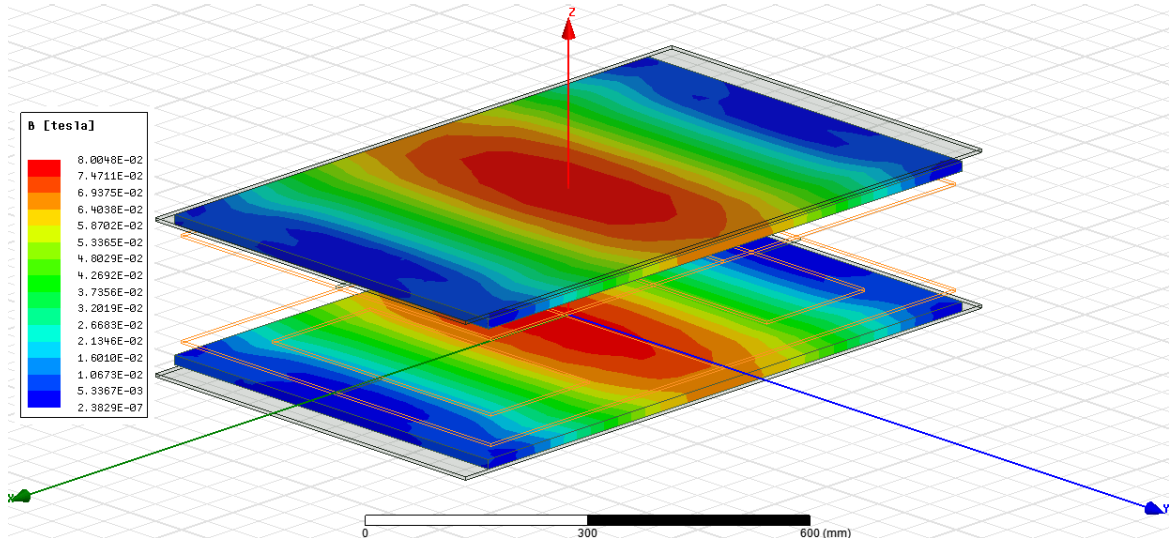


a) Celkové prostorové vykreslení magnetické indukce  $B$

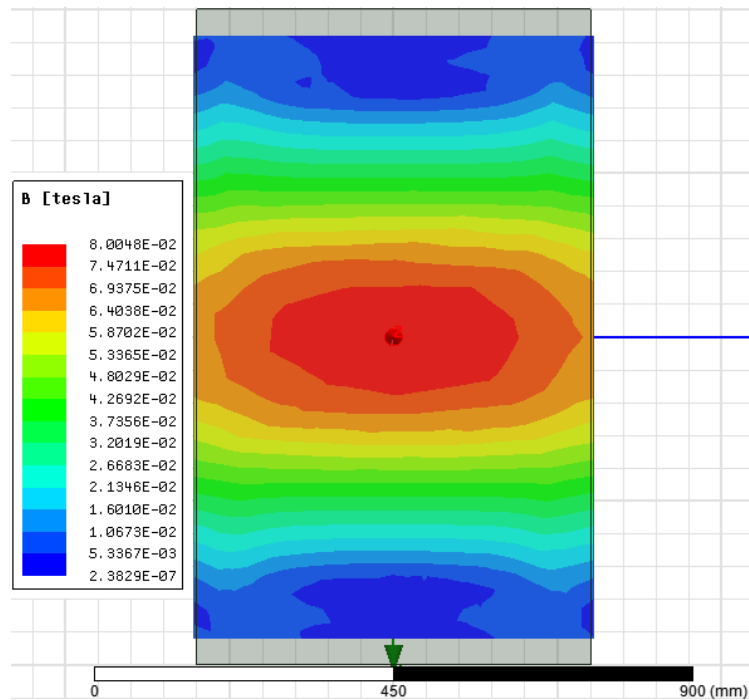


b) Celkové prostorové vykreslení magnetické intenzity  $H$

**Příloha T – Barevné vykreslení magnetické indukce znázorňující sycení feritu pro plné stínění (14 mm) se vzdáleností cívek  $l_1 = 150$  mm**

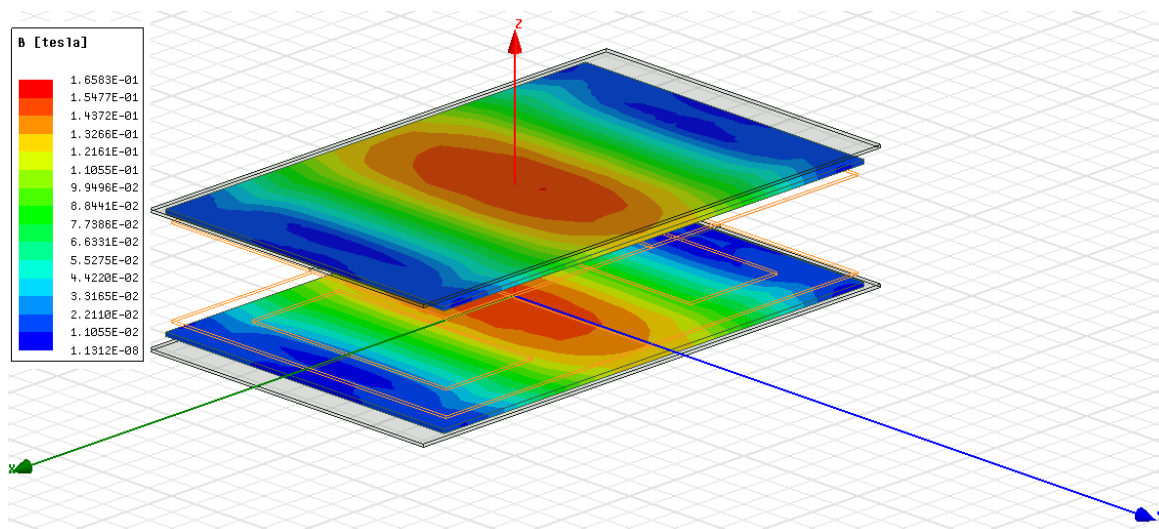


a) Screen ze SW Ansys Maxwell 3D v pohledu *Dimetric*

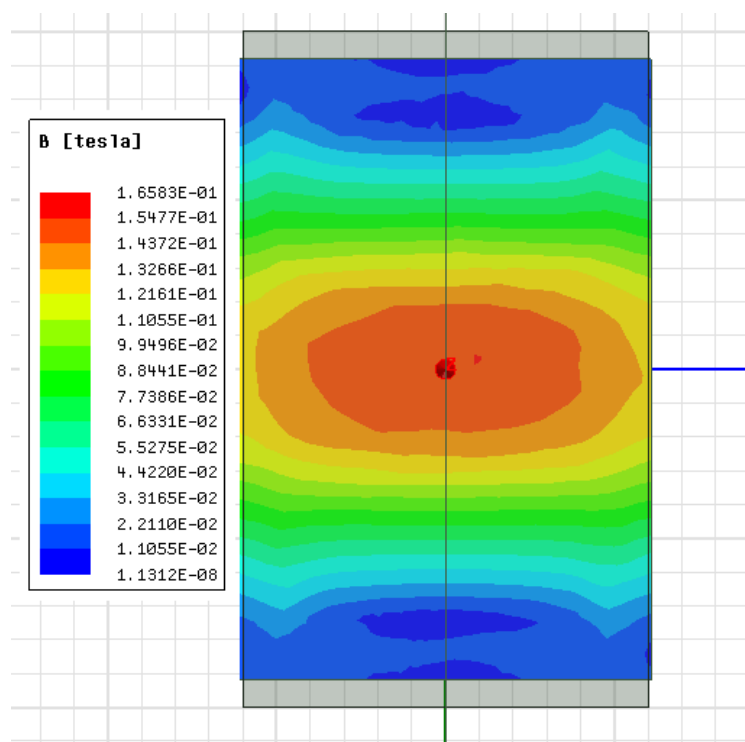


b) Screen ze SW Ansys Maxwell 3D v pohledu shora

**Příloha U – Barevné vykreslení magnetické indukce znázorňující sycení feritu pro plné stínění (7 mm) se vzdáleností cívek  $l_1 = 150$  mm**



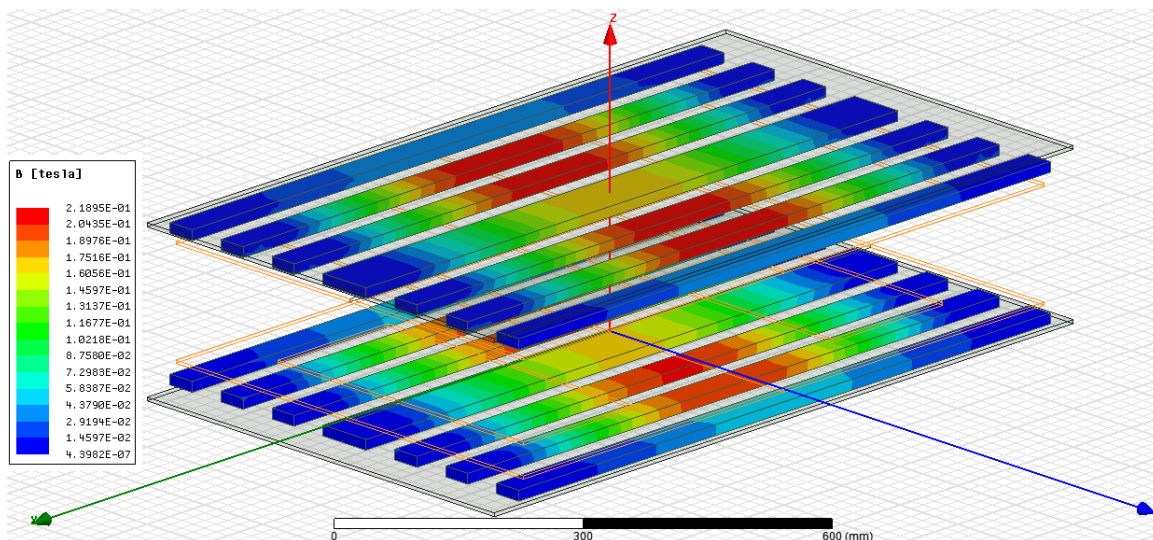
a) Screen ze SW Ansys Maxwell 3D v pohledu *Dimetric*



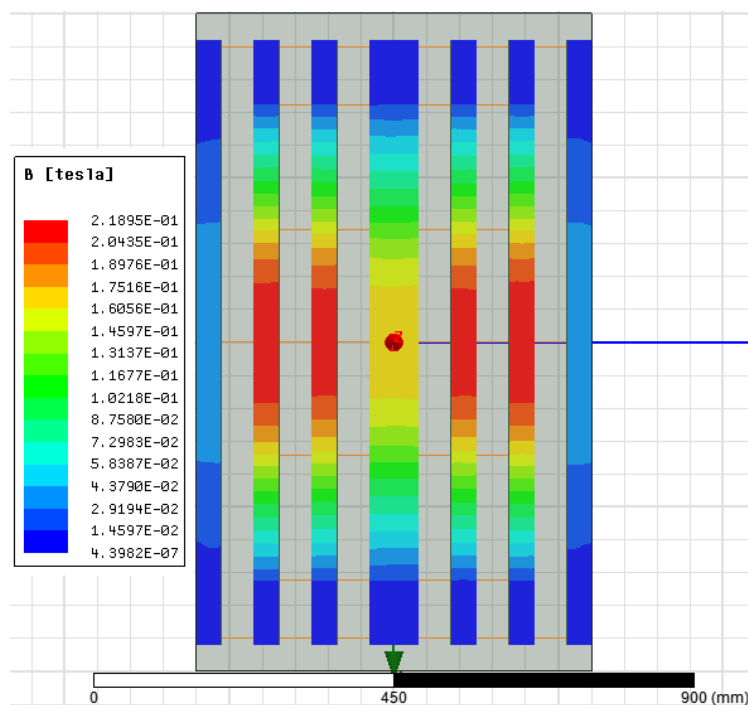
b) Screen ze SW Ansys Maxwell 3D v pohledu shora



**Příloha V – Barevné vykreslení magnetické indukce znázorňující sycení feritu pro tyčové stínění (14 mm) se vzdáleností cívek  $l_I = 150$  mm**

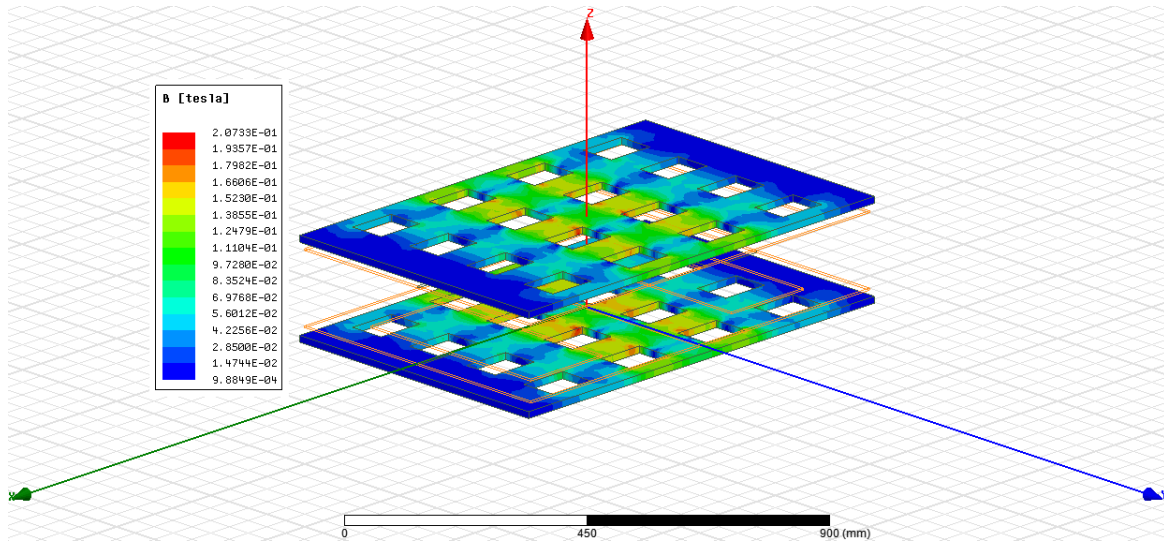


a) Screen ze SW Ansys Maxwell 3D v pohledu *Dimetric*

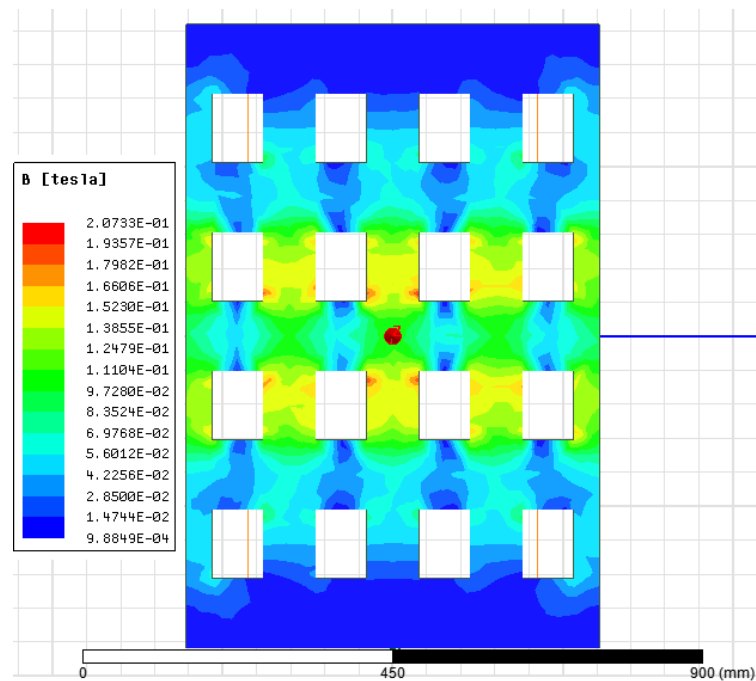


b) Screen ze SW Ansys Maxwell 3D v pohledu shora

**Příloha W – Barevné vykreslení magnetické indukce znázorňující sycení feritu pro stínění obsahující obdélníkové výřezy se vzdáleností cívek  $l_I = 150$  mm**

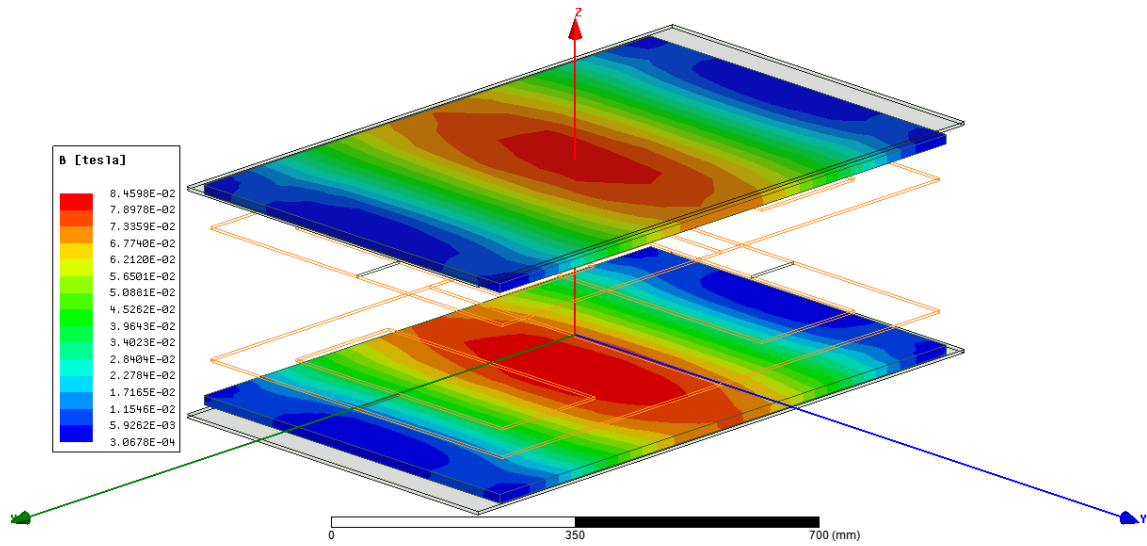


a) Screen ze SW Ansys Maxwell 3D v pohledu *Dimetric*

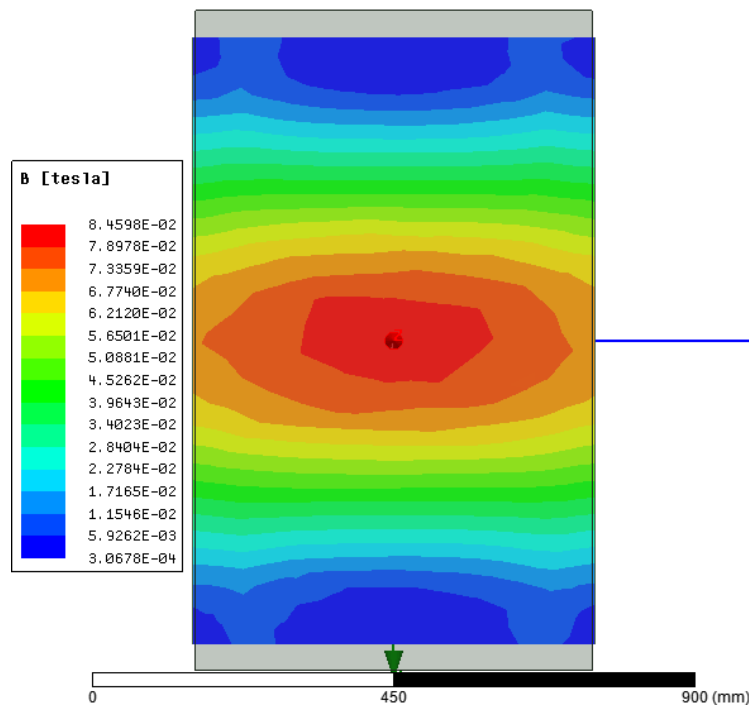


b) Screen ze SW Ansys Maxwell 3D v pohledu shora

**Příloha X – Barevné vykreslení magnetické indukce znázorňující sycení feritu pro plné stínění (14 mm) se vzdáleností cívek  $l_2 = 200$  mm**

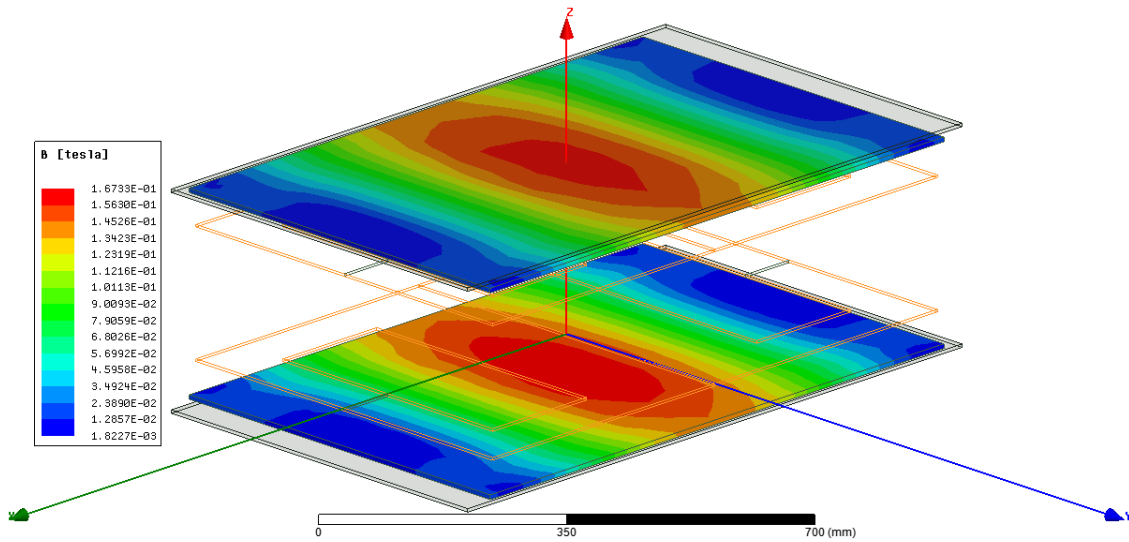


a) Screen ze SW Ansys Maxwell 3D v pohledu *Dimetric*

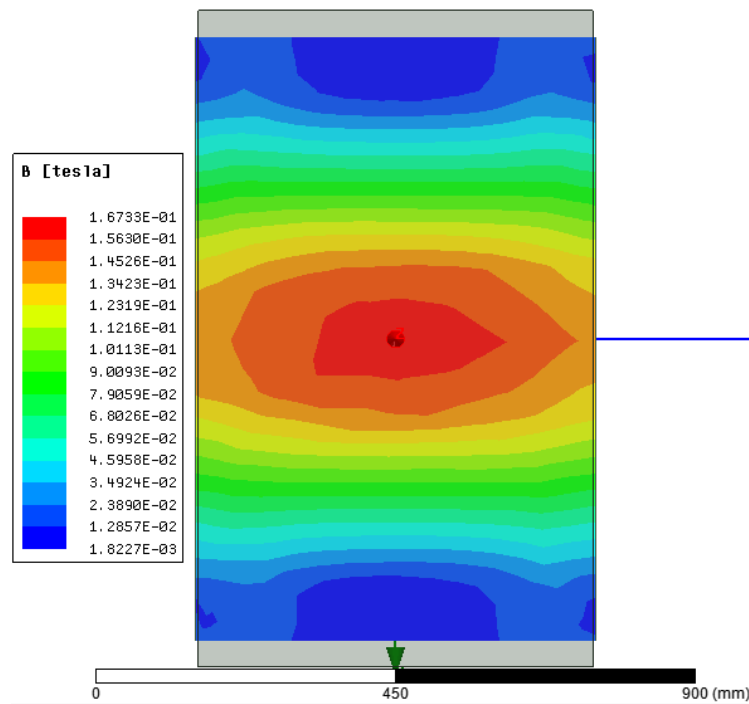


b) Screen ze SW Ansys Maxwell 3D v pohledu shora

**Příloha Y – Barevné vykreslení magnetické indukce znázorňující sycení feritu pro plné stínění (7 mm) se vzdáleností cívek  $l_2 = 200$  mm**

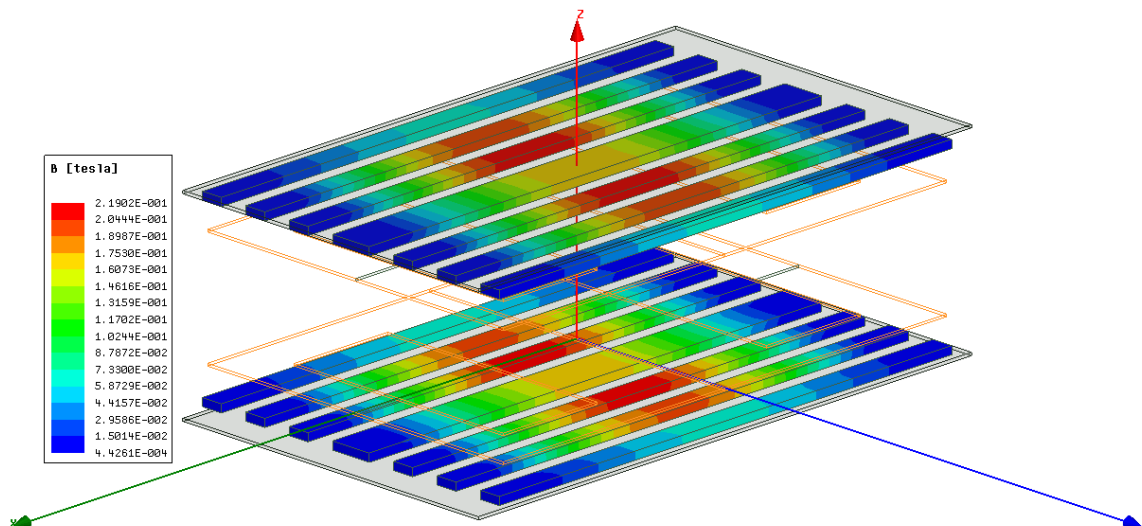


a) Screen ze SW Ansys Maxwell 3D v pohledu *Dimetric*

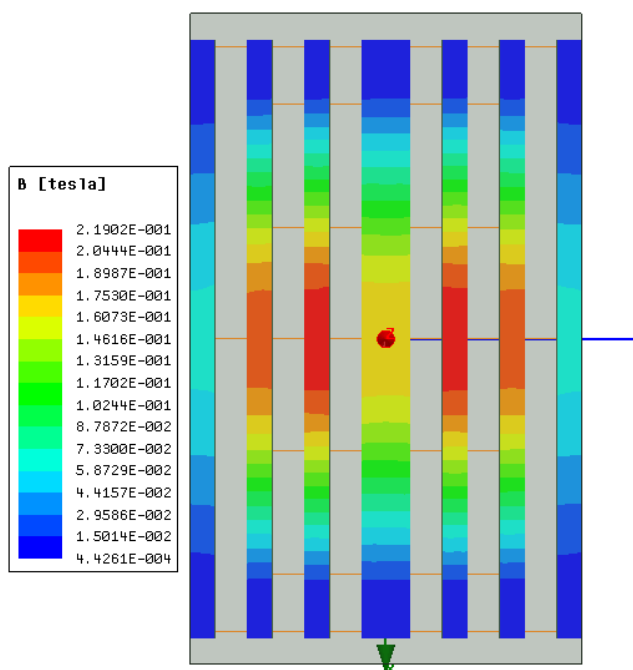


b) Screen ze SW Ansys Maxwell 3D v pohledu shora

**Příloha Z – Barevné vykreslení magnetické indukce znázorňující sycení feritu pro tyčové stínění (14 mm) se vzdáleností cívek  $l_2 = 200$  mm**

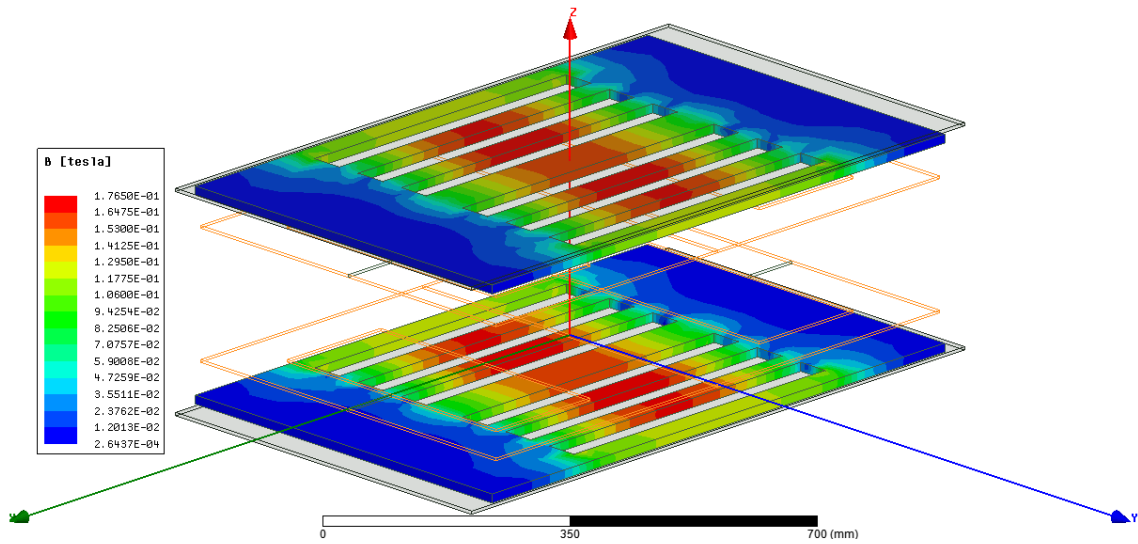


a) Screen ze SW Ansys Maxwell 3D v pohledu *Dimetric*

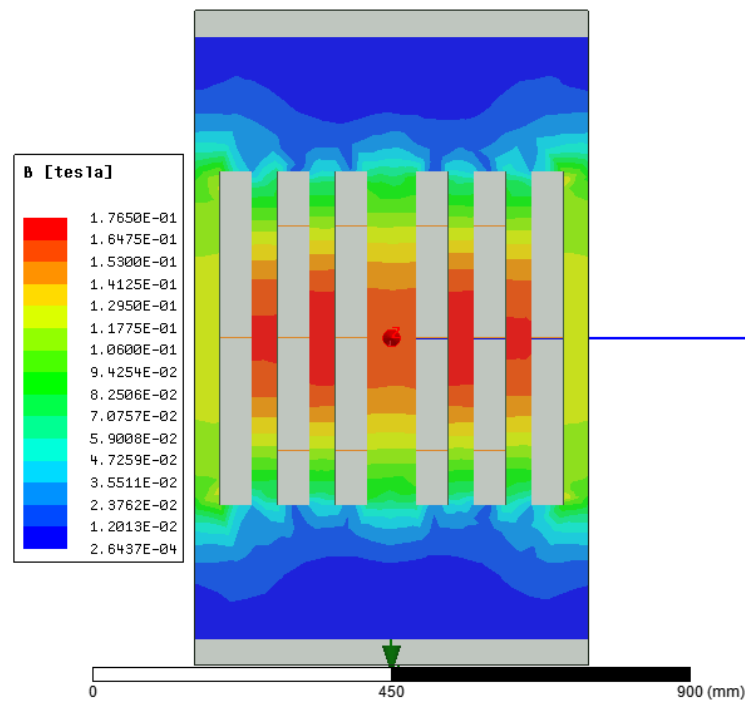


b) Screen ze SW Ansys Maxwell 3D v pohledu shora

**Příloha AA – Barevné vykreslení magnetické indukce znázorňující sycení feritu pro tyčové stínění se zakončením z obou stran a vzdáleností cívek  $l_2 = 200$  mm**

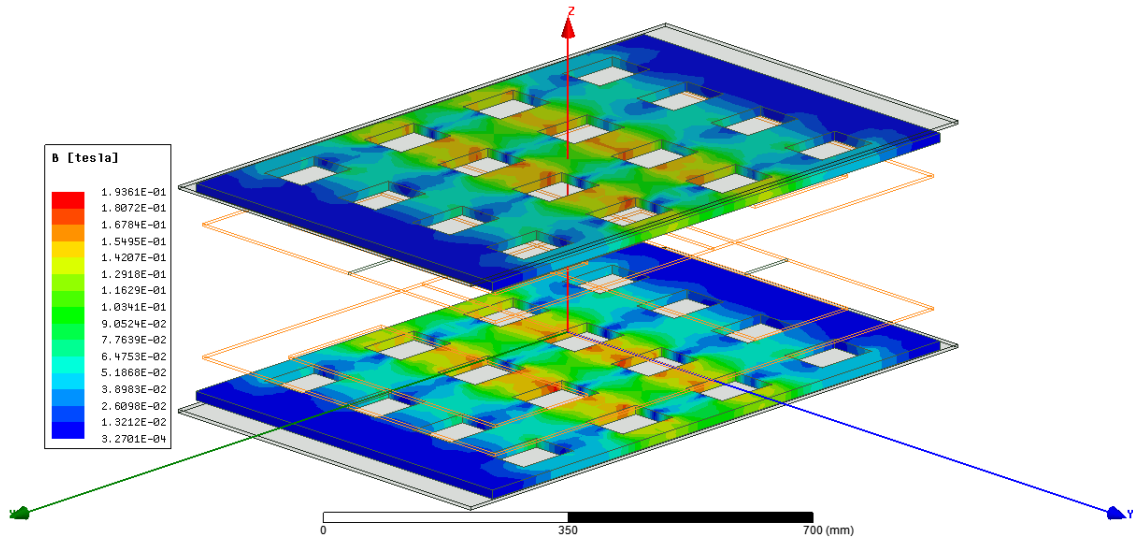


a) Screen ze SW Ansys Maxwell 3D v pohledu *Dimetric*

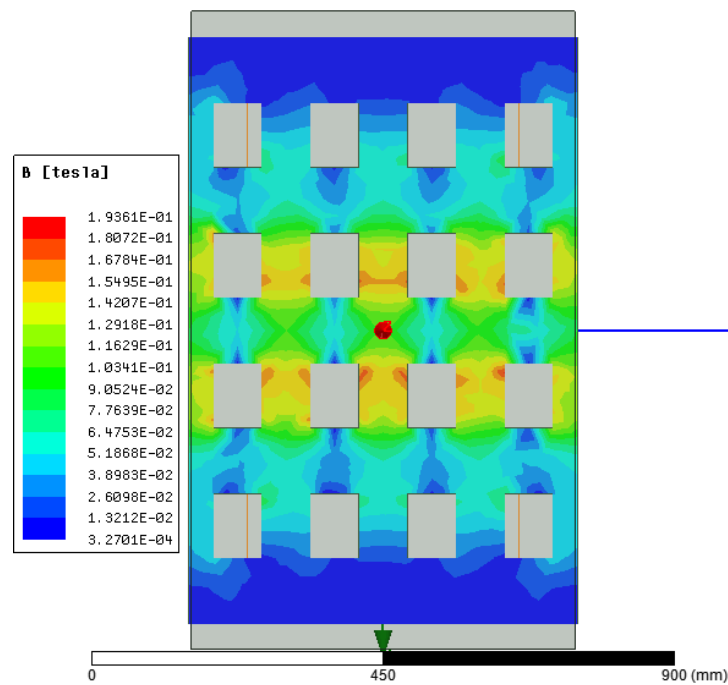


b) Screen ze SW Ansys Maxwell 3D v pohledu shora

**Příloha AB – Barevné vykreslení magnetické indukce znázorňující sycení feritu pro stínění obsahující obdélníkové výřezy se vzdáleností cívek  $l_2 = 200$  mm**



a) Screen ze SW Ansys Maxwell 3D v pohledu *Dimetric*



b) Screen ze SW Ansys Maxwell 3D v pohledu shora