

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrických pohonů
a trakce

Diplomová práce
ADIP25

SIMULACE INDUKČNÍHO OHŘEVU
V PROSTŘEDÍ ANSYS ACADEMIC RESEARCH
EM



České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrických pohonů a trakce

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Jitka Hornová**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony

Název tématu: **Simulace indukčního ohřevu v prostředí ANSYS Academic Research EM**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Analýza problematiky
- 2) Osvojení vývojového prostředí Maxwell 3D
- 3) Návrh modelů vybraných základních aplikací
- 4) Simulace elektro – tepelných dějů
- 5) Analýza výsledků

Seznam odborné literatury:

- [1] Rada J., Elektrotepelná technika II, České vysoké učení technické v Praze, 1983
- [2] Hradílek Z., Lázničková I., Král V. :Elektrotepelná technika [online]. Dostupné z WWW:<
http://k315.feld.cvut.cz/CD_MPO/CVUT-3-Elektrotepelná.pdf>
- [3] Maxwell_v16_3D, ANSYS Academic Teaching EM, pdf manuals 2013

Vedoucí: Ing. Karel Buhr, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016



prof. Ing. Jiří Lettl, CSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 10. 2014

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

podpis

Anotace:

Tato diplomová práce se zabývá teorií indukčního ohřevu se zaměřením na simulace vybraných modelů v prostředí Maxwell 3D a ePhysics. Simulace se zaměřují zejména na elektro – tepelné děje, vlivy změn kmitočtu, materiálových vlastností a geometrického uspořádání daných modelů.

Klíčová slova: indukční ohřev, Maxwell 3D, ePhysics

Abstract:

The object of this project is to deal with the theory of induction heating with a focus on simulation of selected models in Maxwell 3D and ePhysics. Simulations focus particularly on electro - thermal processes, the effects of changes in the frequency, material properties and geometric arrangement of the models.

Keywords: induction heating, Maxwell 3D, ePhysics

Poděkování:

Děkuji tímto panu Ing. Karlovi Buhrovi, Csc. za cenné rady a informace, které mi poskytl při vedení diplomové práce.

Obsah:

1. Úvod	8
1.1. Cíle práce.....	8
2. Indukční ohřev.....	9
2.1. Úvod do problematiky.....	9
2.2. Princip indukčního ohřevu	9
2.2.1. <i>Vlastnosti vybraných materiálů</i>	10
2.3. Náhradní elektrické schéma indukčního ohřevu	11
2.4. Aplikace indukčního ohřevu	14
2.4.1. <i>Tavící indukční zařízení – kelímkové pece</i>	15
2.4.2. <i>Tavící indukční zařízení – kanálkové pece</i>	16
2.4.3. <i>Indukční vařič</i>	16
3. Simulační prostředí Maxwell 3D.....	18
3.1. Tvorba základních modelů indukčního ohřevu v prostředí Maxwell 3D.....	19
3.1.1. <i>Polygon helix</i>	19
3.1.2. <i>Rectangular helix</i>	20
3.1.3. <i>Rectangular spiral</i>	21
3.1.4. <i>Wave coil</i>	22
3.2. Základní modely indukčního ohřevu – Maxwell 3D.....	23
3.2.1. <i>Parametry modelu desky nad induktorem</i>	23
3.2.2. <i>Parametry modelu nádoby nad induktorem</i>	24
3.2.3. <i>Parametry modelu nádoby uvnitř induktoru</i>	25
3.2.4. <i>Parametry modelu trubky uvnitř spiral induktoru</i>	26
3.2.5. <i>Parametry modelu trubky uvnitř wave induktoru</i>	27
3.3. Analysis Setup a ostatní nastavení v Maxwell 3D	28
4. Simulační prostředí ePhysics.....	30
4.1. Sdílení tepla.....	30
4.2. Tvorba základních modelů indukčního ohřevu v prostředí ePhysics.....	33
4.3. Analysis setup a ostatní nastavení v ePhysics	34
5. Simulace elektro – tepelných dějů vybraných modelů.....	36
5.1. Model indukčního ohřevu – deska nad induktorem – simulace 4 kHz	36
5.1.1. <i>Deska nad induktorem – Maxwell 3D</i>	37
5.1.2. <i>Deska nad induktorem – ePhysics</i>	39

5.2. Model indukčního ohřevu – nádoba nad induktorem – simulace 4kHz.....	41
5.2.1. Nádoba nad induktorem – Maxwell 3D	41
5.2.2. Nádoba nad induktorem – ePhysics	43
5.3. Model indukčního ohřevu – Nádoba uvnitř induktoru – simulace 4 kHz.....	45
5.3.1. Nádoba uvnitř induktoru – Maxwell 3D	45
5.3.2. Nádoba uvnitř induktoru – ePhysics	47
5.4. Model indukčního ohřevu – trubka uvnitř spirál induktoru – simulace 4 kHz	49
5.4.1. Trubka uvnitř spirál induktoru – Maxwell 3D	49
5.4.2. Trubka uvnitř spirál induktoru – ePhysics	51
5.5. Model indukčního ohřevu – trubka uvnitř wave induktoru – simulace 4 kHz.....	53
5.5.1. Trubka uvnitř wave induktoru – Maxwell 3D	53
5.5.2. Trubka uvnitř wave induktoru - ePhysics.....	55
6. Analýza výsledků simulací.....	57
6.1. Vliv kmitočtu na ohmické ztráty modelů	57
6.1.1. Shrnutí vlivu simulačního kmitočtu na ohmické ztráty modelů.....	62
6.2. Vliv materiálových vlastností vsázky na ohmické ztráty ve vsázce	62
6.2.1. Shrnutí vlivu materiálových vlastností na ohmické ztráty vsázky	63
6.3. Vliv geometrie na ohmické ztráty – model nádoba nad induktorem	63
6.3.1. Maxwell 3D - Změna tloušťky stěny u modelu nádoba nad induktorem – tloušťka 10 mm a 3 mm – simulační frekvence 40 kHz.....	64
6.3.2. Shrnutí vlivu změny stěny nádoby na její ohmické ztráty.....	65
7. Závěr.....	66
Seznam použité literatury.....	67
Seznam obrázků	68
Seznam tabulek	70
Seznam příloh.....	70

1. Úvod

Indukční ohřev je jednou z variant tepelného ohřevu, jehož principy se využívají zejména v průmyslových aplikacích jako je např. tavení, tváření, kalení, žíhání materiálů apod. S rozvíjející se elektronikou pronikl indukční ohřev i do domácností v podobě indukčních vařičů, jenž jsou dnes na trhu poměrně často vyhledávané.

Vývoj průmyslových i jiných aplikací je v dnešní době základním stavebním kamenem pro úspěšně prosperující produkty na trhu, jinak tomu pochopitelně není ani u aplikací indukčního ohřevu. Jednou z mnoha metod ve vývoji indukčního ohřevu je např. simulace elektro – tepelných dějů. K těmto a dalším podobně smýšlejícím účelům vyvinula firma ANSYS Academic Research simulační prostředí Maxwell 3D a k němu přidružený ePhysisc.

1.1.Cíle práce

Cílem této práce je:

- popsat problematiku indukčního ohřevu,
- zaměřit se na simulace vybraných modelů vycházejících z použití indukčního ohřevu v domácnosti v prostředí Maxwell 3D a ePhysics,
- analyzovat výsledné elektro – tepelné děje, dále vlivy změn kmitočtu, materiálových vlastností a geometrického uspořádání daných modelů.

2. Indukční ohřev

2.1. Úvod do problematiky

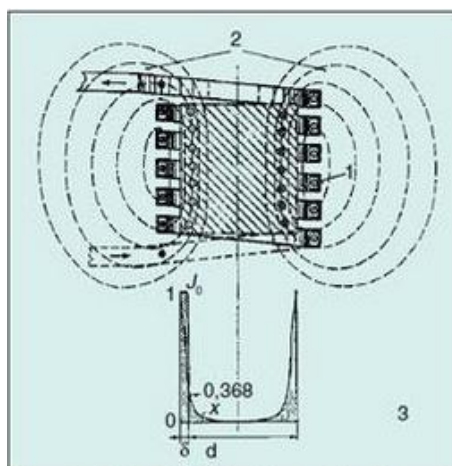
Indukční ohřev patří do oblasti tepelného ohřevu. Krom indukčního ohřevu se lze setkat i např. s dielektrickým ohřevem, jehož principem je ohřev nevodivého materiálu, kde se využívá elektrického pole vysokých frekvencí. Zvláštním typem dielektrického ohřevu je mikrovlnný ohřev, kde teplo je získáno polarizačními jevy při elektrickém působení v dielektriku (přenos energie vlivem mikrovln). Další variantou tepelného ohřevu je odporový ohřev. Při odporovém ohřevu jde o generování tepla vlivem průchodu proudu elektricky vodivým materiálem. [1]

Indukční ohřev má dnes veliké uplatnění v mnoha oborech. Využívá se při svařování, pájení, při ohřevu potravin atd. Následující podkapitoly budou zaměřeny na princip indukčního ohřevu a jeho aplikace.

2.2. Princip indukčního ohřevu

Indukční ohřev využívá principů elektromagnetického pole popsané Maxwellovými rovnicemi. Pro vysvětlení indukčního ohřevu lze uvažovat jednoduchý případ indukčního ohřevu, jde o vinutí, jímž protéká střídavý proud. Díky tomu vzniká střídavé magnetické pole. Pokud je do blízkosti tohoto pole vložena tzv. vsázka, vytvoří pole ve vsázce vířivé proudy a vsázka se začne ohřívat. Tento jev je analogický s nepříznivým ohřevem u transformátoru, kde primární vinutí je podobné cívce, kterou protéká proud a analogii se sekundárním vinutím (to je spojené dokrátka) tvoří vsázka. [1],[2]

Princip indukčního ohřevu je taktéž dokumentován na Obr. 1. Tento obrázek mimo jiné dokumentuje příklad závislosti proudové hustoty J_0 na povrchu válce, jenž se ohřívá, na průměru válce d (průměr je zmenšen o hloubku vniku δ).



Obr. 1: Princip indukčního ohřevu kovového válce [8]

V problematice indukčního ohřevu je často užívaným pojmem tzv. hloubka vniku. Hloubka vniku je definována jako hloubka průniku elektromagnetického pole do aktivního materiálu, které se mění na teplo. Je dána vztahem [1]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma \cdot \mu_r \cdot \mu_0}} = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \gamma \cdot \mu_r \cdot \mu_0}} \quad (m) \quad (1)$$

kde:

ω je úhlový kmitočet ($rad \cdot s^{-1}$),

f je frekvence (Hz),

γ je konduktivita (S/m),

μ_r je relativní permeabilita prostředí (-),

μ_0 je permeabilita vákua (H/m).

Ze vztahu (1) vyplývá, že hloubka vniku mimo jiné závisí na frekvenci. Dosazením různých frekvencí do vztahu (1) s předpokladem, že ostatní parametry jsou konstantní, lze získat poznatek, že čím vyšší je frekvence, tím se ohřeje tenčí vrstva materiálu. S teplotou se taktéž mění měrný odpor induktoru. Hodnota měrného odporu se s teplotou mění dle známého vzorce:

$$\rho_{\vartheta} = \rho_{20^{\circ}C} \cdot (1 + \alpha \cdot (\vartheta - 20)) \quad (\Omega \cdot m) \quad (2)$$

kde:

$\rho_{20^{\circ}C}$ je měrný odpor materiálu při $20^{\circ}C$ ($\Omega \cdot m$); pro induktor většinou měď,
 α je teplotní součinitel měrného odporu (K^{-1}),
 ϑ je teplota materiálu ($^{\circ}C$).

Frekvence a konduktivita resp. měrný odpor však nejsou jedinými parametry, které určují hloubku vniku, proto budou v kap. 2.2.1 blíže popsány některé vlastnosti vybraných materiálů. [4]

2.2.1. Vlastnosti vybraných materiálů

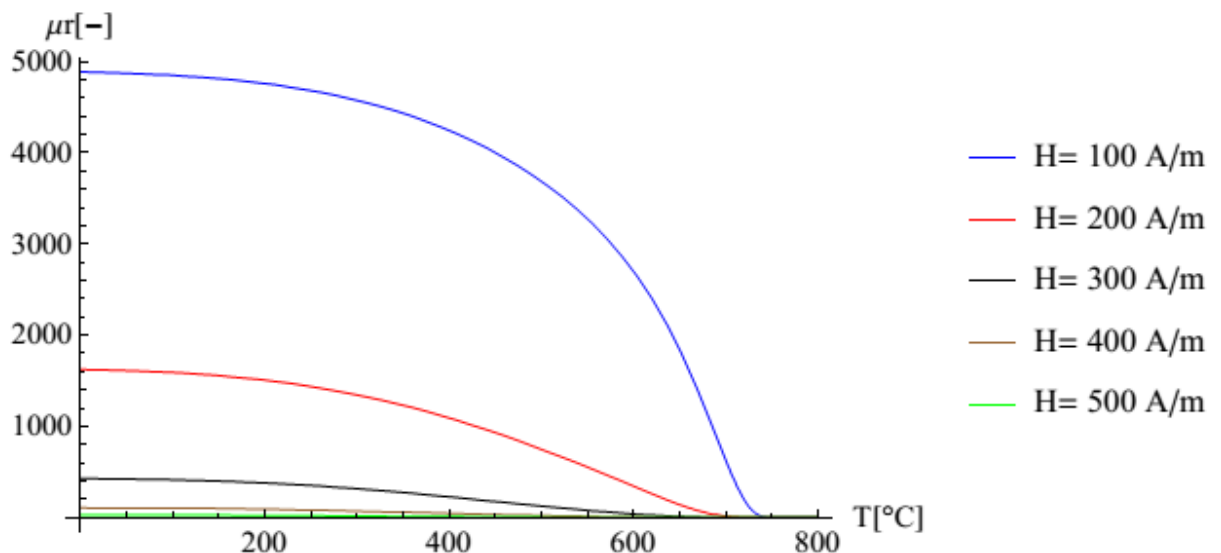
Vsázkou indukčního ohřevu může být např. měď, hliník nebo ocel. Je zřejmé, že tyto materiály mají odlišné vlastnosti:

- měď – má diamagnetické vlastnosti; susceptibilita je záporná a velmi malá; susceptibilita a i relativní permeabilita téměř nezávisí na teplotě a intenzitě magnetického pole, zmagnetování těchto látek je velice slabé,
- hliník – má oproti tomu paramagnetické vlastnosti; susceptibilita paramagnetických látek je oproti diamagnetickým závislá na teplotě; pro zmagnetování paramagnetické látky je třeba poznamenat, že s rostoucí teplotou je potřeba navyšovat intenzitu elektromagnetického pole; zmagnetování paramagnetických látek je ale také velice slabé,

- ocel – patří mezi látky feromagnetické tzn. látky, které mají susceptibilitu o hodně větší než je tomu u látek paramagnetických, a to proto, protože ke zmagnetování feromagnetické látky stačí slabé pole; další výhodou, kterou feromagnetické látky mají oproti paramagnetickým je, že mají zbytkovou magnetizaci, čili po přerušení pole se již nevrátí do svého výchozího stavu, nýbrž si částečně uchovají svou orientaci.

Z popsaných poznatků plyne, že měď a hliník budou mít relativní permeabilitu blízkou 1, kdežto relativní permeabilita u feromagnetické oceli se mění s intenzitou magnetického pole a s teplotou. [15]

Získání teplotní závislosti relativní permeability u feromagnetických materiálů je velmi komplikované. V praxi je potřeba vycházet z měření daných parametrů. Pro přiblížení této problematiky je na Obr. 2 zobrazen příklad teplotní závislosti relativní permeability transformátorových plechů.



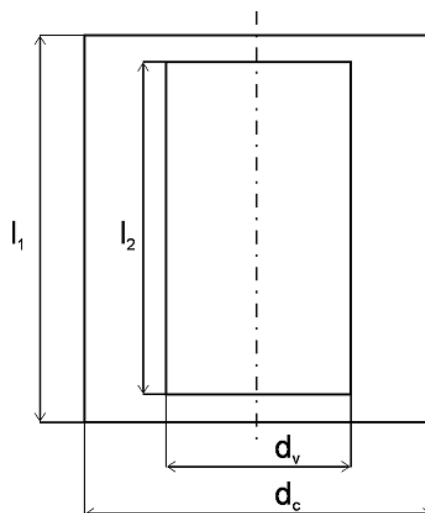
Obr. 2: Typické závislosti relativní permeability na teplotě pro feromagnetickou ocel [16]

Z křivek na Obr. 2 je zjevné, jak se relativní permeabilita feromagnetických materiálů mění s teplotou. Po přesáhnutí Curieho teploty relativní permeabilita klesne na hodnotu 1 a materiál tak ztratí své magnetické vlastnosti. Obecněji lze tedy říct, že relativní permeabilita feromagnetických materiálů je závislá na intenzitě magnetického pole a na teplotě.

2.3. Náhradní elektrické schéma indukčního ohřevu

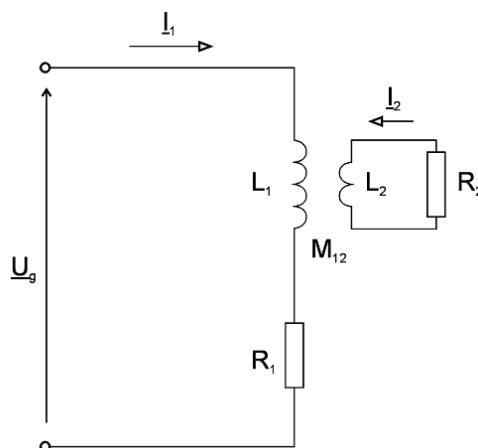
Náhradní elektrické schéma elektrotepelných zařízení lze představit dvěma základními typy. První případ je uvažován tehdy, jde – li o dva souosé elektrické obvody (tj. cívka a vsázka). Druhý případ lze uvažovat tehdy, jde – li o tři souosé elektrické obvody (tj. cívka, vsázka a stínící plášť). [1]

V této práci je uvažován případ dvou sousých elektrických obvodů. Uspořádání takového obvodu je na Obr. 3. Zde je uvažováno, že hloubky vniku cívky a vsázky jsou mnohem menší než skutečné vnitřní průměry cívky i vsázky tj. že $\delta_1 \ll d_1, \delta_2 \ll d_2$. Vsázka je za těchto předpokladů definována délkou vsázky l_2 a průměrem vsázky d_v ($d_v = d_2 - \delta_2$) a cívka délkou cívky l_1 a průměrem cívky d_c ($d_c = d_1 + \delta_1$). [1]



Obr. 3: Náhradní uspořádání dvou sousých elektrických obvodů (cívka a vsázka) [1]

Takovéto uspořádání je snadno vyjádřitelné náhradním elektrickým schématem dle Obr. 4, kde primárním obvodem je znázorněna cívka a sekundárním vsázka.



Obr. 4: Náhradní elektrické schéma uspořádání dvou sousých obvodů [1]

Dále je třeba k příslušné vsázce navrhnout tvar, uspořádání a elektrické parametry cívky tak, aby při napětí U_g odebrala daný výkon. Aby bylo možné tohoto dosáhnout je víc než vhodné, tento obvod více zjednodušit a to pomocí transformačního převodu. Vycházíme tedy ze schématu na Obr. 4 a lze spát, že:

$$R_1 I_1 + j\omega L_1 I_1 + j\omega M_{12} I_2 = U_g \quad (3)$$

$$R_2 I_2 + j\omega L_2 I_2 + j\omega M_{12} I_1 = 0 \quad (4)$$

Z rovnice rovnice (4) vyjádříme I_2 a dosazením do rovnice (3) lze získat proud ve vinutí cívky I_1 :

$$I_1 = \frac{U_g}{R_1 + j\omega L_1 + \frac{\omega^2 M_{12}^2}{R_2 + j\omega L_2}} \quad (5)$$

Jak je vidět z rovnice (5), je jasné, že $R_1 + j\omega L_1 + \frac{\omega^2 M_{12}^2}{R_2 + j\omega L_2} = Z_1$. Impedanci induktoru Z_1 lze dále rozepsat ve tvaru:

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1 + \frac{\omega^2 M_{12}^2}{R_2 + j\omega L_2} = R_1 + j\omega L_1 + \frac{\omega^2 M_{12}^2 (R_2 - j\omega L_2)}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \quad (6)$$

Pro převod platí, že:

$$\hat{p}_{12} = \frac{\hat{I}_2}{\hat{I}_1} = -\frac{j\omega M_{12}}{R_2 + j\omega L_2} \quad (7)$$

Protože je potřeba ale spíše absolutní hodnota, lze dle Pythagorovy věty psát, že:

$$p_{12} = \frac{|I_2|}{|I_1|} = \frac{\sqrt{\omega^2 M_{12}^2}}{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}} \quad (8)$$

Čili také platí, že:

$$p_{12}^2 = \frac{\omega^2 M_{12}^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \quad (9)$$

Úpravou rovnice (6) a dosazením rovnice (9) do rovnice (6) lze psát:

$$Z_1 = R_1 + p_{12}^2 R_2 + j\omega(L_1 - p_{12}^2 L_2) = R_I + j\omega L_I \quad (10)$$

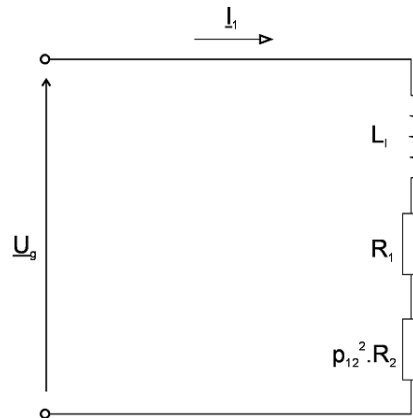
Čili výsledný odpor primárního obvodu R_I je dán jako součet vlastního odporu cívky a převedeného odporu vsázky, tedy:

$$R_I = R_1 + p_{12}^2 R_2 \quad (11)$$

a výsledná indukčnost primárního obvodu L_I je dána jako rozdíl vlastní indukčnosti cívky a převedené indukčnosti vsázky, tedy:

$$L_I = L_1 - p_{12}^2 L_2 \quad (12)$$

Díky tomuto odvození lze potom náhradní schéma na Obr. 4 zjednodušit na Obr. 5.



Obr. 5: Zjednodušené náhradní elektrické schéma uspořádání dvou souosých obvodů [1]

Častěji se ale v praxi lze setkat se zadaným napětím U_g , napájecím kmitočtem f a příkonem cívky P_1 , pak je celá situace a vztahy mnohem komplikovanější. [1], [2]

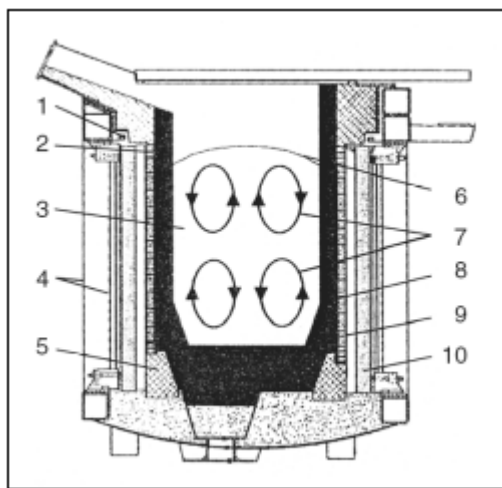
2.4. Aplikace indukčního ohřevu

Indukční ohřev se využívá např. na ohřev materiálu pro tavení, tváření, kalení, žíhání apod. Tváření pomocí indukčního ohřevu se často užívá např. v továrnách na valivá ložiska, při výrobě zápusťkových výkovek atd. Díky indukčnímu ohřevu tak lze ohřívat přířezy, úlomky nebo ústřihy či například ohřívat tyčový materiál, nebo lze např. ohřívat konce tyčového materiálu. Pro každý tento ohřev je definováno přesné konstrukční uspořádání. Další typickou aplikací je kalení. Jde v principu o ohřev materiálu na kalící teplotu a pak se prudce materiál ochladí sprchou. Běžné kalení užívá kmitočtů 50 Hz až 10 000 Hz, ale pro kalení malých součástek nebo pro malé hloubky prokalení se užívá vyšší frekvence (např. 30 kHz). Indukční ohřev lze užít i pro svařování trubek. [2]

Další podkapitoly budou zaměřeny na základní tavící indukční zařízení (kelímkové a kanálkové pece) a na indukční ohřev aplikovaný v domácnosti (indukční vařiče).

2.4.1. Tavicí indukční zařízení – kelímkové pece

Příklad konstrukčního uspořádání kelímkové pece lze vidět na Obr. 6.



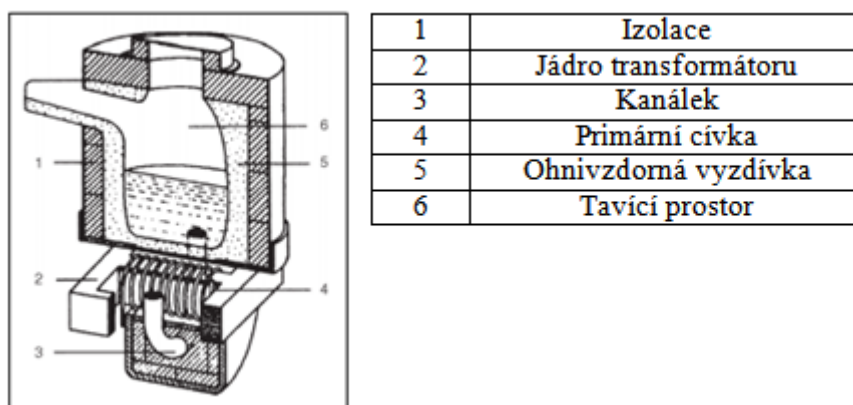
1	Kroužek spojený nakrátko
2	Prstenec chlazený vodou
3	Tavenina
4	Ocelová kostra
5	Betonový prstenec
6	Kopulovitá hladina taveniny
7	Pohyb taveniny
8	Kelímek
9	Induktor
10	Svazek plechů

Obr. 6: Tavicí indukční zařízení - indukční kelímková pec [9]

Díky chlazenému induktoru, který je napájený ze střídavého proudu o frekvenci typicky 50 až 1000Hz, dochází ke vzniku vířivých proudů a také ke vzniku elektromagnetických sil uvnitř kelímku. Tím je zajištěno promíchávání taveniny. Vlivem podtlaku u stěny kelímku v tavenině, a vlivem přetlaku v ose taveniny dochází taktéž ke vzdouvání. Vzdouvání a tedy i intenzita víření rostou s měrným příkonem, dále rostou s klesajícím kmitočtem, a klesají s měrnou elektrickou vodivostí. Svazek plechů zajišťuje, aby magnetický tok tek l uvnitř cívky, čili aby se tok nedostal do dalších částí pece. Kelímek bývá často z křemičitého písku. [2], [9]

2.4.2. Tavicí indukční zařízení – kanálkové pece

Příklad konstrukčního uspořádání kanálkové pece lze vidět na Obr. 7.



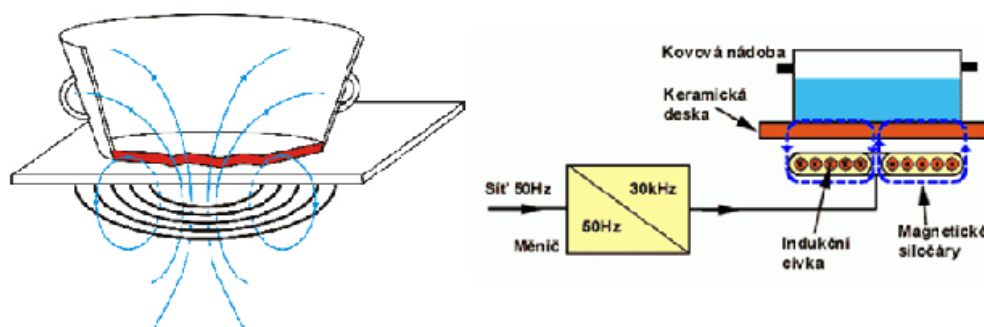
Obr. 7: Tavicí indukční zařízení - kanálková pec [9]

V tavicím prostoru je tavenina. Tavicí prostor obepíná ohnivzdorná vyzdívka s izolací. Pod tavicím prostorem je induktor s kanálkem, který induktor obepíná. V principu jde o analogii závitu nakrátko. Působením elektromagnetických sil na roztavený kov uvnitř kanálku dochází k míchání vsázky. Velkou nevýhodou těchto pecí je fakt, že při první tavně je třeba nalít roztavený kov do kanálku. Tyto pece se využívají zejména ke zušlechťování šedé slitiny či k tavení barevných kovů. Oproti kelímkovým pecím tyto pece využívají k tavení síťové frekvence. [2], [9]

Existují i velké pece zvané bubnové kanálkové pece. Výhodou těchto pecí je, že se dají natáčet do různé polohy při výměně nebo např. při čištění induktorů. Používají se v první řadě k tavení hliníku. [2], [9]

2.4.3. Indukční vařič

Indukční vařič pracuje na principu indukčního ohřevu. Jedná se o sklo – keramickou desku, pod kterou je uložena cívka. Tato cívka je napájena střídavým elektrickým zdrojem. Pokud je na desku položeno nádobí (vsázka) z magnetického materiálu a bude – li cívkou protékat střídavý proud z měniče frekvence, začnou se indukovat vířivé proudy uvnitř dna nádoby a díky tomu se dno nádoby začne ohřívat. Tyto proudy však nemohou ohřát sklo – keramickou desku, která je nevodivá. Princip indukčního vařiče je ilustrován na Obr. 8. [3], [7]



Obr. 8: Princip indukčního vařiče [7], [5]

Teplο vzniká při tomto typu indukčního ohřevu dvěma způsoby:

- největší část tepla vzniká právě vlivem indukování vířivých proudů při použití magnetického materiálu (nádoby) , vlivem odporu a těchto proudů pak vzniká teplo; nádoba by tedy měla být vyrobena z takového materiálu, jenž má dostatečně velký měrný odpor, aby byla schopna při průchodu proudu generovat teplo,
- menší část tepla je vyprodukována vlivem hystereze magnetického materiálu (nádoby) při jeho magnetizaci - v nádobě při indukčním ohřevu dochází ke stálému přemagnetování a vznikají tak hysterezní ztráty; dá se tedy říci, že teplo vzniká také tím, že magnetický materiál, z něhož je nádoba vyrobena, při indukčním ohřevu pořád reaguje na změny magnetického pole. [3], [7]

Z principu indukčního vařiče vyplývají jeho výhody i nevýhody. Jelikož se ohřívá pouze dno nádoby, dochází ke snížení tepelných ztrát, tedy je zde lepší účinnost přenosu tepla, taktéž lepší rovnoměrnost ohřevu. Mezi další výhodou indukčních vařičů patří čištění vařiče (jedná se o plochou desku). Další výhodou je, že kdyby došlo k přehřátí nádoby, indukční vařič má pro tento případ samovypínací schopnost. Po odejmutí nádoby z magnetického materiálu se po velice krátké době vařič sám vypne a plocha vařiče, na které byla nádoba postavena, nepřesáhne 100 °C. Výhoda, kterou ocení zejména rodiny s dětmi, je ta, že vlivem indukčního ohřevu se neohřívá sklo – keramická deska. Je však teplá z toho důvodu, že teplo z nádoby se odráží zpět do desky, ale teplá je pouze ta část, kde se nádoba dotýkala sklo – keramické desky. Nevýhodou je, že pro tento způsob ohřevu musí být nádoba z magnetického materiálu. Dnes už ale existují i tzv. redukce indukce (z magnetického materiálu), které se postaví na sklo – keramickou desku a na tuto redukci lze pak položit i jiné nemagnetické nádoby. Při použití této redukce se ale musí ohřát samotná redukce a ta teprve pak ohřívá nádoby z nemagnetického materiálu. Další nevýhodou hlavně u přenosných indukčních vařičů je hlučnost způsobená chlazením elektroniky uvnitř indukčního vařiče. [3], [5], [6]

3. Simulační prostředí Maxwell 3D

Maxwell 3D je simulační prostředí, jenž umožňuje snadno vytvořit 3D model. Tímto usnadněním může být např. modul RMXprt pro rychlé vytvoření modelů základních typů točivých strojů. Model lze ale také vytvořit např. v Inventoru a uložit projekt do formátu podporovaného Maxwellem a snadno pak vyřešit elektrické, magnetostatické, přechodné děje či děje vířivými proudy v modelu. Maxwell 3D ke svým výpočtům využívá tzv. metodiku FEA z anglického Finite Element Analysis. Jde o metodu konečných prvků (též zvanou MKP), která předpokládá, že model, jenž je vytvořen, má konečný tvar. Je to tedy metoda řešení soustavy rovnic, jenž popisují model konečných rozměrů. [10], [11]

Maxwell 3D dovoluje vyřešit model pomocí řešení elektrického pole:

- **Electrostatic fields** – jde o řešení elektrostatického pole v dielektriku, lze zde dodatečně vypočítat kapacity, síly a momenty působící v modelu,
- **DC conduction fields** – jde o řešení DC elektrického pole ve vodičích,
- **Transient Electric fields** – jde o přechodné děje v elektrickém poli,

nebo pomocí řešení magnetického pole:

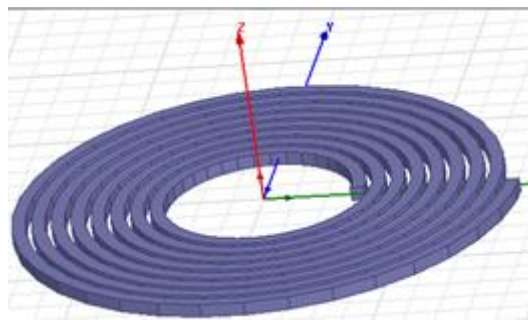
- **Magnetostatic fields** – jde o řešení magnetostatické pole,
- **Transient magnetic fields** – jde o řešení přechodných dějů v magnetickém poli, např. řešení přechodných dějů ve vinutích či permanentních magnetech,
- **Eddy Current fields** – jde o řešení pole vířivých proudů, jenž vzniká v pevném vodiči modelu. [10]

3.1. Tvorba základních modelů indukčního ohřevu v prostředí Maxwell 3D

Pro simulaci základních aplikací indukčního ohřevu byl použit řešič pole vířivých proudů (**Eddy Current**). První dva navržené modely (deska a nádoba nad induktorem) vycházejí z aplikace indukčního ohřevu pro domácnost. Od těchto modelů se odvíjí další tři modely, které vznikly změnou tvaru a uspořádáním prvních dvou modelů. Rozmezí teplot feromagnetických materiálů vsázek, které lze simulací těchto modelů získat, se pohybuje přibližně do 250°C, není tedy přesáhnutá Curierova teplota. Vsázkou je v této práci model desky, nádoby a trubky. Model induktoru, kterým bude protékat proud, lze vytvořit v prostředí Maxwell 3D pomocí předdefinovaných tvarů, popsanych orientačně níže. Detailní význam jednotlivých pojmů je uveden v přílohách A až D.

3.1.1. Polygon helix

Polygon helix¹ (mnohoúhelníkovou šroubovici) je možné vidět na Obr. 9. Tvar Polygon helix lze měnit v závislosti na zadávání základních parametrů.



Obr. 9: Maxwell 3D - Polygon helix

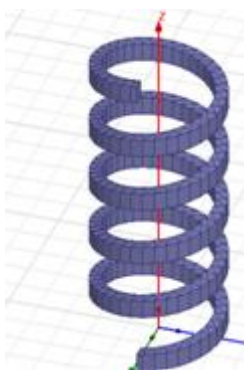
Základní parametry tohoto předdefinovaného tvaru v prostředí Maxwell 3D jsou tyto [12]:

- **PolygonSegments** – počet segmentů v mnohoúhelníkovém řezu; určuje tvar šroubovice,
 - 0 = kruh,
 - 3 = trojúhelník
 - 4 = čtverec
 - 5 = pětiúhelník
 - Atd.,
- **PolygonRadius** – vnější poloměr vodiče, který tvoří šroubovici,
- **StartHelixRadius** – vnitřní poloměr šroubovice; je definován od osy otáčení šroubovice do středu průřezu na segmentu; musí být větší než dvojnásobek PolygonRadius,
- **RadiusChange** – změna poloměru na přelomu šroubovice,
- **Pitch** – rozteč mezi jednotlivými závity šroubovice (stoupání mezi jednotlivými závity šroubovice),
- **Turns** – počet závitů šroubovice,
- **SegmentsPerTurn** – počet segmentů, které vytvoří každé kolo; je 0 pro skutečnou křivku, 3 tvoří v jednom kole trojúhelník, 4 čtverec, 5 pětiúhelník atd.,
- **RightHanded** – směr vinutí; zadává se nenulová hodnota pro pravotočivou spirálu.

¹ Pro větší objasnění parametrů Polygon helix jsou v příloze A obrázky upřesňující význam zadávaných parametrů.

3.1.2. Rectangular helix

Rectangular² helix (obdélníkovou šroubovici) je možné vidět na Obr. 10. Tvar Rectangular helix lze měnit v závislosti na zadávání základních parametrů.



Obr. 10: Maxwell 3D - Rectangular helix

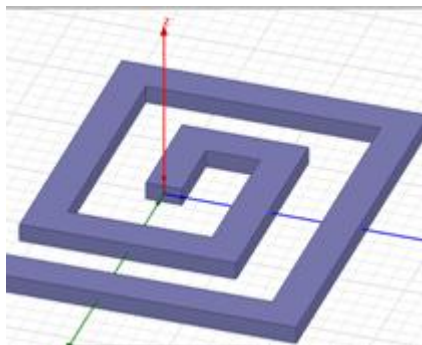
Základní parametry tohoto předdefinovaného tvaru v prostředí Maxwell 3D jsou tyto [12]:

- **RectHeight** – výška obdélníkového průřezu,
- **RectWidth** – šířka obdélníkového průřezu,
- **StartHelixRadius** - vnitřní poloměr šroubovice; je definován od osy otáčení šroubovice do středu průřezu na segmentu; musí být větší než dvojnásobek PolygonRadius,
- **RadiusChange** – změna poloměru na přelomu šroubovice,
- **Pitch** – rozteč mezi jednotlivými závití šroubovice (stoupání mezi jednotlivými závití šroubovice), musí být delší než RectHeight,
- **Turns** – počet závití šroubovice,
- **SegmentsPerTurn** – počet segmentů, které vytvoří každé kolo; je 0 pro skutečnou křivku, 3 tvoří v jednom kole trojúhelník, 4 čtverec, 5 pětiúhelník atd.,
- **RightHanded** – směr vinutí; zadává se nenulová hodnota pro pravotočivou spirálu.

² Pro větší objasnění parametrů Rectangular helix jsou v příloze B obrázky upřesňující význam zadávaných parametrů.

3.1.3. Rectangular spiral

Rectangular spiral³ (obdélníkovou spirálu) je možné vidět na Obr. 11. Tvar Rectangular spiral lze měnit v závislosti na zadávání základních parametrů.



Obr. 11: Maxwell 3D - Rectangular spiral

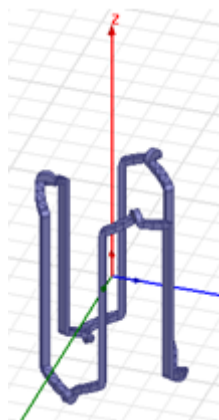
Základní parametry tohoto předdefinovaného tvaru v prostředí Maxwell 3D jsou tyto [12]:

- **Xpos** – umístění počátečního bodu spirály ve směru osy x,
- **Ypos** – umístění počátečního bodu spirály ve směru osy y,
- **TurnSep** – oddělovací vzdálenosti mezi závity,
- **Turns** – celkový počet závitů ve spirále,
- **Width** – šířka spirály,
- **Height** – výška spirály (pokud bude šířka 0, značí to plechový objekt).

³ Pro větší objasnění parametrů Rectangular spiral jsou v příloze C obrázky upřesňující význam zadávaných parametrů.

3.1.4. Wave coil

Wave coil (vlnovou cívku) je možné vidět na Obr. 12. Tvar Wave coil lze měnit v závislosti na zadávání základních parametrů.



Obr. 12: Maxwell 3D - Wave coil

Základní parametry tohoto předdefinovaného tvaru v prostředí Maxwell 3D jsou tyto [12]:

- **DiaGap** – průměr jádra na straně mezery,
- **DiaYoke** – průměr jádra na straně jha,
- **Length** – délka jádra,
- **Skew** – úhel zkosení v rozsahu délky jádra,
- **Slots** – počet drážek (jdou zadávat po násobcích 30),
- **SlotType** – typ drážky (1 – 7),
- **Hs0** – výška otevření drážky,
- **Hs1** – výška klínu drážky,
- **Hs2** – tělesná výška drážky,
- **Bs0** – šířka otevření drážky,
- **Bs1** – maximální šířka klínu drážky,
- **Bs2** – spodní šířka těla drážky (je 0 pro paralelní zuby),
- **Rs** – zaoblení spodní části drážky,
- **FilletType** – 0 pro čtvrtkruh, 1 pro tečné připojení,
- **Layers** – počet vrstev vinutí,
- **CoilPitch** – cívková rozteč (měřeno v drážkách),
- **EndExt** – jednostranná koncová prodloužená délka,
- **SpanExt** – axiální délka na konci rozpětí (0 je bez rozpětí),
- **SegAngle** – úhel na segment na konci rozpětí,
- **PolePitch** – rozteč tyčových párů měřeno v drážkách,
- **LenRegion** – délka kraje,
- **InfoCoil** – zadává se 0 pro vinutí, 1 pro jednu cívku, 100 pro region.

3.2. Základní modely indukčního ohřevu – Maxwell 3D

V této práci bylo vytvořeno pět základních modelů indukčního ohřevu a to:

- **deska nad induktorem** (induktor vytvořen pomocí polygon helix),
- **nádoba nad induktorem** (induktor vytvořen pomocí polygon helix),
- **nádoba uvnitř induktoru** (induktor vytvořen pomocí rectangular helix),
- **trubka uvnitř spiral induktoru** (induktor vytvořen pomocí rectangular helix),
- **trubka uvnitř wave (vlnového) induktoru** (induktor vytvořen pomocí wave coil).

V následujících podkapitolách jsou tabelárně zřehledněny základní parametry vytvořených modelů (induktory jednotlivých modelů jsou vytvořeny v Maxwell 3D z mědi a vsázky z magnetické oceli).

3.2.1. Parametry modelu desky nad induktorem

V Tab. 1 jsou zřehledněny základní parametry modelu induktoru (jde o parametry Polygon helix v prostředí Maxwell 3D) a modelu desky.

Tab. 1: Základní parametry modelu desky nad induktorem

Polygon helix (Mnohoúhelníková šroubovice):			
parametr	poznámka	hodnota	jednotka
PolygonSegments	4 = čtverec	4	-
PolygonRadius	-	1,5	cm
StartHelixRadius	-	15	cm
RadiusChange	-	3,1	cm
Pitch	-	0	cm
Turns	-	8	-
SegmentsPerTurn	-	36	-
RightHanded	-	1	-
<u>disk</u>			
parametr	poznámka	hodnota	jednotka
r_d	poloměr disku	41	cm
v	výška disku	1,5	cm

3.2.2. Parametry modelu nádoby nad induktorem

V Tab. 2 jsou zřehledněny základní parametry modelu induktoru⁴ (jde o parametry Polygon helix v prostředí Maxwell 3D) a modelu nádoby.

Tab. 2: Základní parametry modelu nádoba nad induktorem

Polygon helix (Mnohoúhelníková šroubovice):			
parametr	poznámka	hodnota	jednotka
PolygonSegments	4 = čtverec	4	-
PolygonRadius	-	1,5	cm
StartHelixRadius	-	15	cm
RadiusChange	-	3,1	cm
Pitch	-	0	cm
Turns	-	8	-
SegmentsPerTurn	-	36	-
RightHanded	-	1	-
<u>nádoba</u>			
parametr	poznámka	hodnota	jednotka
r ₁	vnitřní poloměr	40	cm
r ₂	vnější poloměr	41	cm
v	výška nádoby	20	cm
d	tloušťka stěny a dna	1	cm

⁴ Lze si všimnout, že parametry modelu induktoru jsou shodné s modelem induktoru v kap. 3.2.1.

3.2.3. Parametry modelu nádoby uvnitř induktoru

V Tab. 3 jsou zřehledněny základní parametry modelu induktoru (jde o parametry Rectangular helix v prostředí Maxwell 3D) a modelu nádoby⁵.

Tab. 3: Základní parametry modelu nádoby uvnitř induktoru

Rectangular helix (Obdélníková šroubovice):			
parametr	poznámka	hodnota	jednotka
RectHeight	-	1,5	cm
RectWidth	-	1,5	cm
StartHelixRadius	-	42	cm
RadiusChange	-	0	cm
Pitch	-	3	cm
Turns	-	8	-
SegmentsPerTurn	-	36	-
RightHanded	-	1	-
<u>nádoba</u>			
parametr	poznámka	hodnota	jednotka
r_1	vnitřní poloměr	40	cm
r_2	vnější poloměr	41	cm
v	výška nádoby	20	cm
d	tloušťka stěny a dna	1	cm

⁵ Lze si všimnout, že parametry modelu nádoby jsou shodné s modelem nádoby v kap. 3.2.2.

3.2.4. Parametry modelu trubky uvnitř spirál induktoru

V Tab. 4 jsou zpřehledněny základní parametry modelu induktoru⁶ (jde o parametry Rectangular helix v prostředí Maxwell 3D) a modelu trubky.

Tab. 4: Základní parametry modelu trubky uvnitř spirál induktoru

Rectangular helix (Obdélníková šroubovice):			
parametr	poznámka	hodnota	jednotka
RectHeight	-	1,5	cm
RectWidth	-	1,5	cm
StartHelixRadius	-	42	cm
RadiusChange	-	0	cm
Pitch	-	3	cm
Turns	-	8	-
SegmentsPerTurn	-	36	-
RightHanded	-	1	-
trubka			
parametr	poznámka	hodnota	jednotka
r_1	vnitřní poloměr	40	cm
r_2	vnější poloměr	41	cm
v	výška nádoby	30	cm
d	tloušťka stěny	1	cm

⁶ Lze si všimnout, že parametry modelu induktoru jsou shodné s modelem induktoru v kap. 3.2.3.

3.2.5. Parametry modelu trubky uvnitř wave induktoru

V Tab. 5 jsou zřehledněny základní parametry modelu induktoru (jde o parametry Wave Coil v prostředí Maxwell 3D) a modelu trubky⁷.

Tab. 5: Základní parametry modelu trubky uvnitř wave induktoru

WaveCoil (Vlnová cívka):			
parametr	poznámka	hodnota	jednotka
DiaGap	-	86	cm
DiaYoke	-	2	cm
Length	-	20	cm
Skew	-	0	°
Slots	-	90	-
SlotType	-	1	-
Hs0	-	0,1	cm
Hs1	-	0,1	cm
Hs2	-	1	cm
Bs0	-	0,1	cm
Bs1	-	0,1	cm
Bs2	-	1	cm
Rs	-	0	cm
FilletType	-	0	-
Layers	-	2	-
CoilPitch	-	3	-
EndExt	-	0,5	cm
SpanExt	-	1,8	cm
SegAngle	-	10	°
PolePitch	-	6	-
LenRegion	-	21,5	cm
InfoCoil	-	1	-
<u>trubka</u>			
parametr	poznámka	hodnota	jednotka
r_1	vnitřní poloměr	40	cm
r_2	vnější poloměr	41	cm
v	výška nádoby	30	cm
d	tloušťka stěny	1	cm

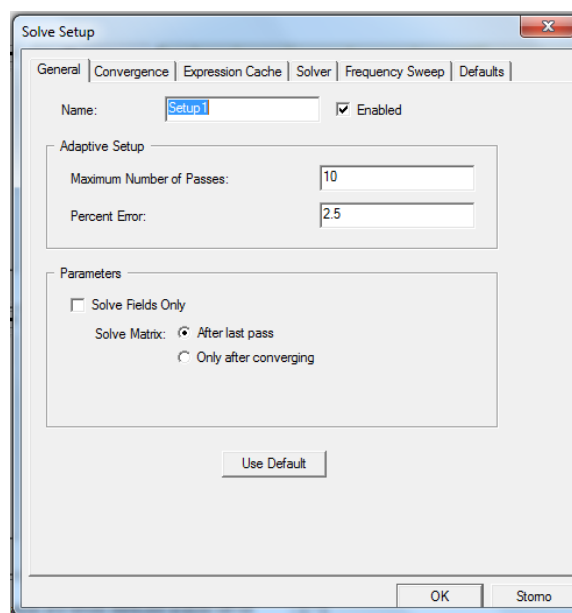
⁷ Lze si všimnout, že parametry modelu trubky jsou shodné s modelem trubky v kap. 3.2.4.

3.3. Analysis Setup a ostatní nastavení v Maxwell 3D

Pro potřeby simulace je třeba nadefinovat proud, který protéká vlnutím (zvoleno 125A při uvažování plného vodiče). Dále je třeba nadefinovat Analysis Setup (nastavení řešení samotné simulace). Nastavení Analysis Setup simulací je znázorněno pro větší přehlednost na Obr. 13, Obr. 14 a Obr. 15.

Z Obr. 13 je zřejmé, že je třeba nastavit:

- Maximum Number of passes [12]:
 - tj. maximální počet cyklů zjemnění sítě,
 - pokud je toto číslo příliš vysoké, může být simulace nepřiměřeně dlouhá nebo na vyřešení nebude stačit operační paměť v PC,
 - voleno 10,
- Percent Error [12]:
 - tj. procento chyb v simulačním řešení,
 - čím je toto číslo menší, tím je výpočet přesnější,
 - zvoleno 2.5 procent chyb.

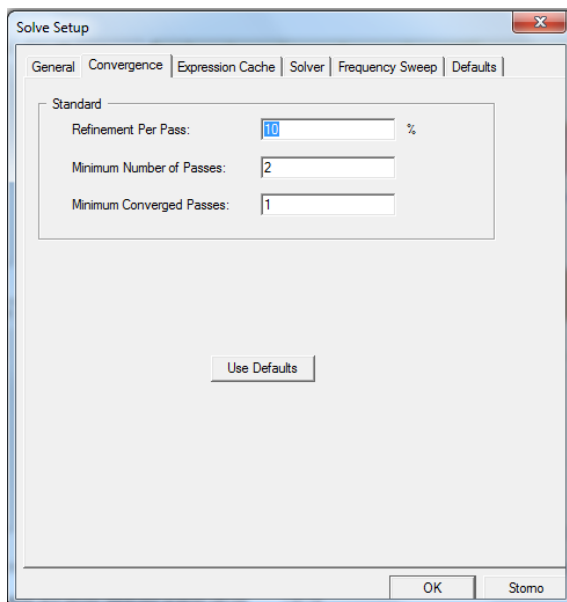


Obr. 13: Nastavení analysis setup modelu Maxwell 3D - general

Z Obr. 14 vyplývá, že je též třeba nastavit:

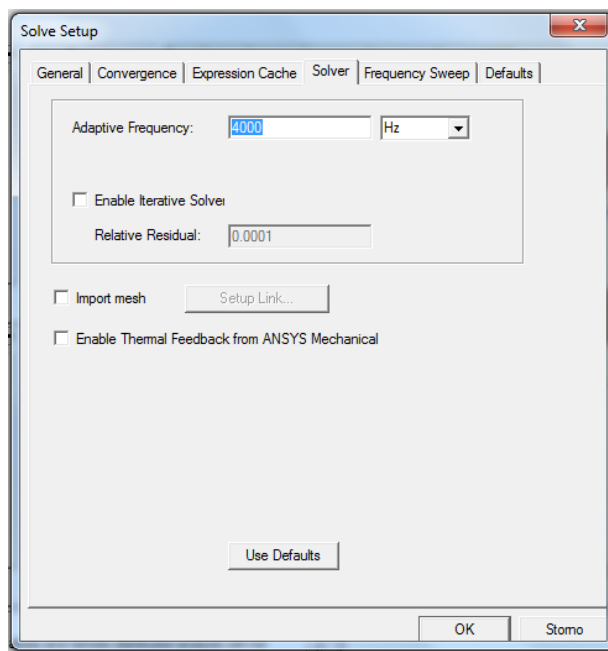
- Refinement Per Pass [12]:
 - jde o zpřesnění průchodů v procentech,
 - určuje kolik čtyřstěnů se přidá při každé iteraci adaptivně zjemněnému procesu,
 - voleno 10,
- Minimum Number of Passes [12]:
 - minimální počet adaptivních průchodů,
 - voleno 2,

- Minimum converged passes [12]:
 - minimální počet adaptivních přechodů k pokračování po dosažení konvergenčních kritérií,
 - voleno 1.



Obr. 14: Nastavení setup modelu Maxwell 3D - convergence

Základní simulační frekvence je volena 4kHz viz Obr. 15.



Obr. 15: Nastavení setup modelu Maxwell 3D – solver

Výsledky simulací, které lze získat tímto nastavením, jsou prezentovány v kap. 5.

4. Simulační prostředí ePhysics

Simulační prostředí ePhysics podporované firmou Ansoft je software, jenž slouží k simulování tepelných dějů modelů. Tento program umožňuje následující typy řešení modelů:

- **Static Thermal** – je zaměřen na výpočet rozložení teploty v ustáleném stavu modelu s nelineárními materiálovými vlastnostmi a s nelineárními konvekčními a radiačními okrajovými podmínkami, a s proměnným tepelným zatěžovacím cyklem,
- **Static Stress** – je zaměřen na analýzu v ustáleném stavu s respektováním mechanických deformací a pnutí, které jsou důsledkem zatížení tepelných, elektromagnetických či mechanických,
- **Transient Thermal** – je zaměřen na výpočet rozložení teploty v přechodných stavech na modelu s respektováním nelineárních materiálových vlastností, nelineárních konvekčních a radiačních okrajových podmínek a s tepelným zatížením, které generuje časově proměnné teplotní pole. [12]

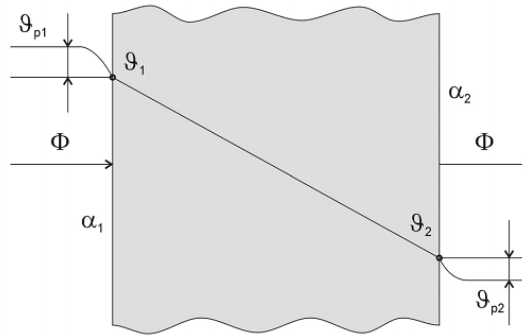
4.1. Sdílení tepla

Sdílení tepla (neboli přenos tepla prostředím) existuje ve třech základních variantách:

- radiace tj. vedení tepla sáláním,
- kondukce tj. přestup tepla vedením,
- konvekce tj. vedení tepla prouděním.

Tyto principy se mohou uplatňovat i současně. Pro potřeby dále prováděných simulací v prostředí ePhysics je níže vysvětlen pouze princip konvekce a radiace.

Konvekce je přenos tepelné energie způsobený pohybem tekutiny pohybující se podél stěny tělesa. Pohyb tekutiny může být volný (přirozená konvekce), nebo vyvozený vnějším zdrojem (nucená konvekce). Vedení tepla prouděním lze obecně popsat na Obr. 16, na němž lze vidět teploty ϑ_1 na začátku stěny a ϑ_2 na konci stěny. Okolí prostředí před stěnou je definováno teplotou prostředí ϑ_{p1} a za stěnou teplotou prostředí ϑ_{p2} (pozn. ϑ_{p1} a ϑ_1 nebývají stejné, neboť na povrchu stěny je vždy kapalina nebo plyn a ty se konvekce neúčastní). Koeficienty α_1 a α_2 jsou součinitelé přestupu tepla konvekcí. Tyto koeficienty jsou závislé na typu proudění (laminární či turbulentní proudění), na fyzikálních vlastnostech proudící tekutiny, na rozměrech tělesa, u něhož dochází ke kontaktu s proudící tekutinou atd. [1]



Obr. 16: Vedení tepla prouděním [1]

V takto definovaném případě lze vyjádřit vedení tepla prouděním následujícím vztahem [1]:

$$\Phi = \alpha_1 \cdot S \cdot (\vartheta_{p1} - \vartheta_1) = \alpha_2 \cdot S \cdot (\vartheta_{p2} - \vartheta_2) \quad (W) \quad (13)$$

kde:

Φ je výkon způsobený konvekcí (W),

S je plocha stěny (m^2),

ϑ_1 (resp. ϑ_2) je teplota stěny na začátku (resp. na konci) ($^{\circ}C$),

ϑ_{p1} (resp. ϑ_{p2}) je teplota prostředí na začátku (resp. na konci) stěny ($^{\circ}C$),

α_1 (resp. α_2) je součinitel přestupu tepla konvekcí v prostředí na začátku (resp. na konci) stěny ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$).

Radiace (přenos tepla sáláním) je přenos tepla vyvolaný elektromagnetickým vlněním vystupujícím z tělesa. Pokud má těleso vyšší teplotu než 0 K, pak na povrchu toto těleso vyzařuje tepelnou energii. Těleso je ale také schopno energii, kterou vyzařují okolní tělesa, absorbovat. Radiace je definována různými zákony, jako např. Zákon Snellův, Zákon Stefanův-Boltzmanův a jinými. [13]

Pro potřeby simulačního prostředí ePhysics je nejdůležitějším pojmem pro radiaci tzv. emisivita materiálu. Emisivita materiálu vychází z Kirchhoffova zákona, který říká, že úhrná zářivost šedého tělesa M_{ξ} ku relativní pohltivosti šedého tělesa A_{ξ} se rovná úhrné zářivosti černého tělesa M_{ζ} ku relativní pohltivosti černého tělesa A_{ζ} . Tyto poměry jsou závislé pouze na absolutní teplotě tělesa a nemá na ně vliv barva povrchu. Jinak napsáno:

$$\frac{M_{\xi}}{A_{\xi}} = f(T) = \frac{M_{\zeta}}{A_{\zeta}} = M_{\zeta} \quad (14)$$

Je – li uvažován Stefan – Boltzmanův zákon daný vztahem:

$$M = \sigma \cdot T^4 \quad (W \cdot m^{-2}) \quad (15)$$

kde:

M je intenzita záření absolutně černého tělesa ($W \cdot m^{-2}$),

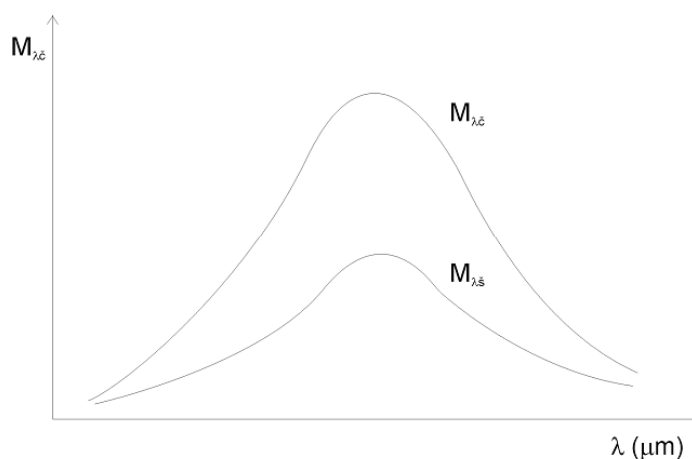
σ je Stefan – Boltzmanova konstanta daná jako $5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$,

T je teplota (K),

pak emisivita je dána vztahem:

$$A_{\xi} = \frac{M_{\xi}}{M_{\zeta}} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4}{\sigma \cdot T^4} = \varepsilon \quad (16)$$

Na Obr. 17 lze vidět spektrální zářivost pro šedivý a černý povrch.



Obr. 17: Spektrální zářivost pro šedivý a černý povrch [1]

Emisivity jednotlivých materiálů lze zřehlednit na Obr. 18.

Materiál	Emisivita ε (-)
absolutně černé těleso	1
saze, grafit	0,95
zoxidovaná ocel	0,85-0,95
zoxidovaná měď	0,7
cihla pálená	0,9
cihla šamotová	0,8
zoxidovaný hliník	0,3
lesklý hliník	0,1
leštěná ocel	0,29
leštěný nikl	0,07
leštěné stříbro	0,02
voda, led (hladký povrch)	0,96
sklo	0,94

Obr. 18: Emisivity jednotlivých materiálů [1]

Pokud je uvažován případ radiace, kde jsou dvě tělesa uspořádána tak, že jedno těleso zcela obklopuje prostorově druhé těleso (pokud platí, že $S_1 \ll S_2$), pak je sálavý výkon vyjádřen vztahem:

$$\Phi = \frac{S_1 \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{S_1}{S_2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right)} \quad (W) \quad (17)$$

kde:

σ je Stefan – Boltzmanova konstanta daná jako $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$,

S_1 je povrch mnohem menšího tělesa (m^2),

S_2 je povrch většího tělesa (m^2),

T_1 je teplota mnohem menšího tělesa (K),

T_2 je teplota většího tělesa (K),

ε_1 je emisivita mnohem menšího tělesa (-),

ε_2 je emisivita většího tělesa (-).

Pro jiné uspořádání těles se pochopitelně výpočet sálavého toku změní. [1]

4.2. Tvorba základních modelů indukčního ohřevu v prostředí ePhysics

Modelování v ePhysics je založené na stejném principu jako u Maxwell 3D. Z důvodu úspory času lze modely vytvořené v Maxwellu zkopírovat do ePhysics. Užitím tohoto postupu ale nejsou modely přiřazeny materiálové vlastnosti, proto je třeba materiál danému modelu manuálně přiřadit. Modely indukčního ohřevu v ePhysics jsou parametricky i materiálově totožné s modely vytvořenými v Maxwell 3D (viz kap. 3.2). Pro účely této práce byl zvolen řešič **Static Thermal** (tj. teplotní rozložení modelu v ustáleném stavu).

4.3. Analysis setup a ostatní nastavení v ePhysics

Pro správné odsimulování modelů v prostředí ePhysics je třeba vhodně nastavit tzv. Basic Convection and Radiation Boundary (základní konvekční a radiační okrajové podmínky).

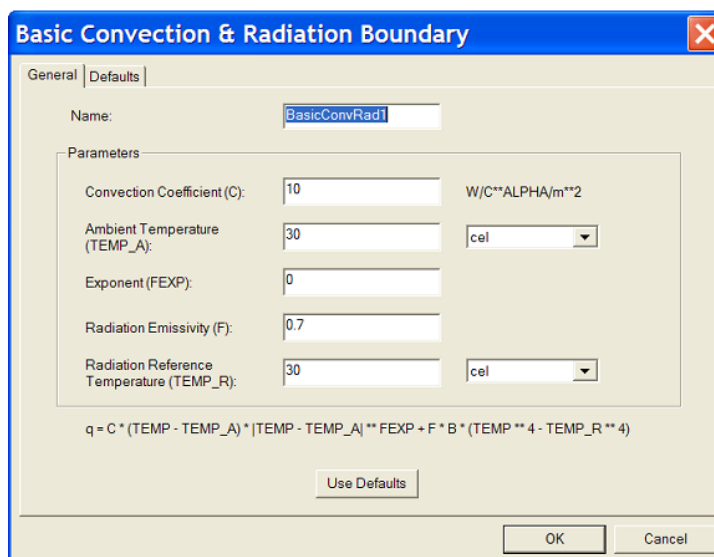
V modelech v prostředí ePhysics je třeba definovat základní radiační a konvekční okrajové podmínky dle Obr. 19. Základní konvekční a radiační okrajové podmínky jsou v ePhysics hodnoceny na základě této rovnice [12]:

$$(-k) \cdot \nabla T \cdot \mathbf{n} = C \cdot |T - T_a|^{FEXP} \cdot (T - T_a) + F \cdot B \cdot (T^4 - T_r^4) \quad (18)$$

kde:

- k je tepelná vodivost ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$),
- T je teplota povrchu (K),
- \mathbf{n} je jednotkový vektor povrchu,
- T_a je okolní teplota proudění (K),
- C součinitel přestupu tepla konvekcí ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$),
- $FEXP$ je konvekční exponent, definovaný v rozmezí od 0 do 1,
- T_r je referenční teplota radiace (K),
- B je Stefan – Boltzmanova konstanta daná hodnotou $5,669 \cdot 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$,
- F je emisivita (-).

Z rovnice (18) vyplývá, že výraz $C \cdot |T - T_a|^{FEXP} \cdot (T - T_a)$ definuje přestup tepla konvekcí a výraz $F \cdot B \cdot (T^4 - T_r^4)$ definuje přestup tepla radiací.

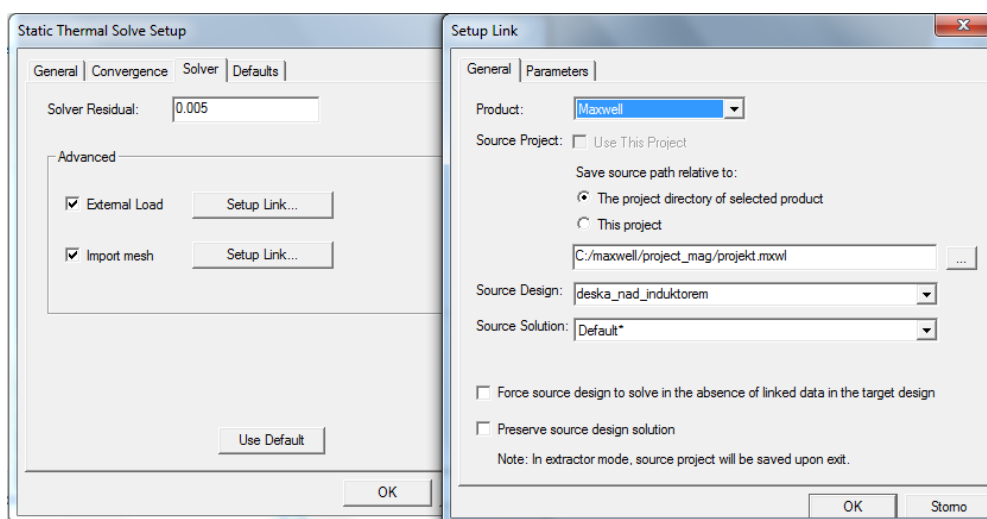


Obr. 19: ePhysics - Basic convection and radiation boundary

V ePhysics je třeba definovat také analysis setup. Nastavení setupu je možné dvěma způsoby:

- lze užít buď stejné nastavení parametrů analysis setup v Maxwell 3D (nazváno setup1) jako v kap. 4.3 a je třeba mimo jiné dále nastavit:
 - external load – tj. cestu k příslušnému modelu z projektu vytvořeného v Maxwell 3D,
- nebo je možné načíst veškeré nastavení včetně sítě modelů z projektu vytvořeného v Maxwell 3D (nazváno setup2), pak je třeba nastavit:
 - Maximum number of passes na hodnotu 1, protože se užije síť z modelu vytvořeného v Maxwell 3D,
 - external load a také zadat cestu k síti modelu vytvořeného v Maxwell 3D (tj. import mesh).

Příklad zadání cesty k external load je zobrazen na Obr. 20.



Obr. 20: ePhysics – analysis setup - solver – external load

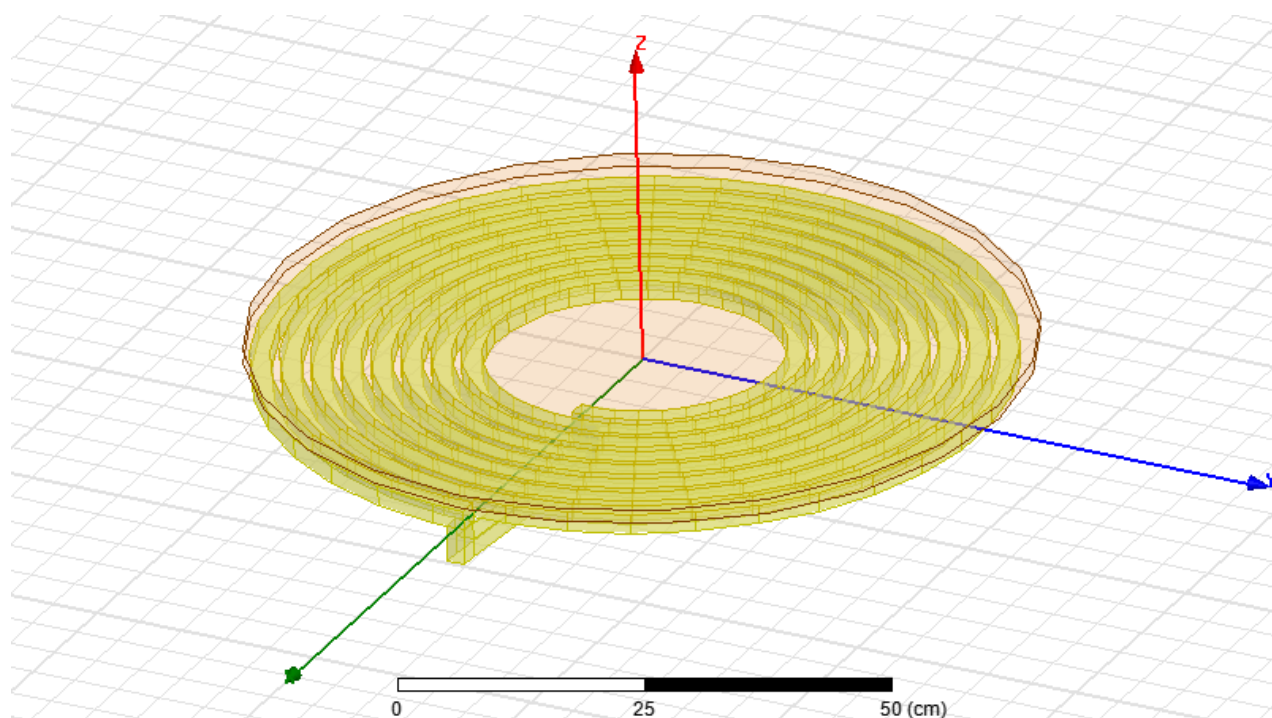
Výsledky simulací, které lze získat tímto nastavením, jsou též prezentovány v kap. 5.

5. Simulace elektro – tepelných dějů vybraných modelů

V následujících podkapitolách jsou zobrazeny výsledky simulací pěti vytvořených modelů s parametry a nastavením simulací dle kap. 3 a 4 v programech Maxwell 3D i v ePhysics. Pro tyto modely je uvažován simulační kmitočet 4 kHz. Simulace v ePhysics byly zkoumány z pohledu nastavení – setup1 i setup2 (blíže viz kap. 4.3).

5.1. Model indukčního ohřevu – deska nad induktorem – simulace 4 kHz

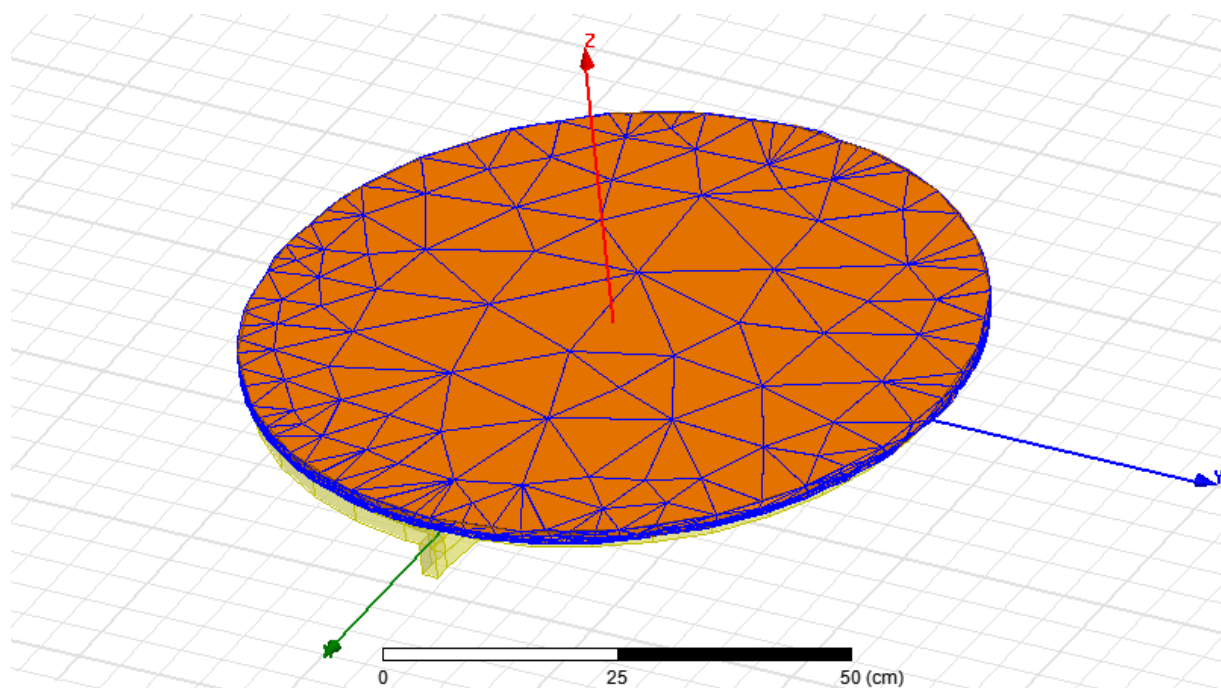
Na Obr. 21 je vidět vytvořený model desky nad induktorem užitý v Maxwell 3D i v ePhysics. Parametry tohoto modelu jsou uvedeny v Tab. 1 v kap. 3.2.1.



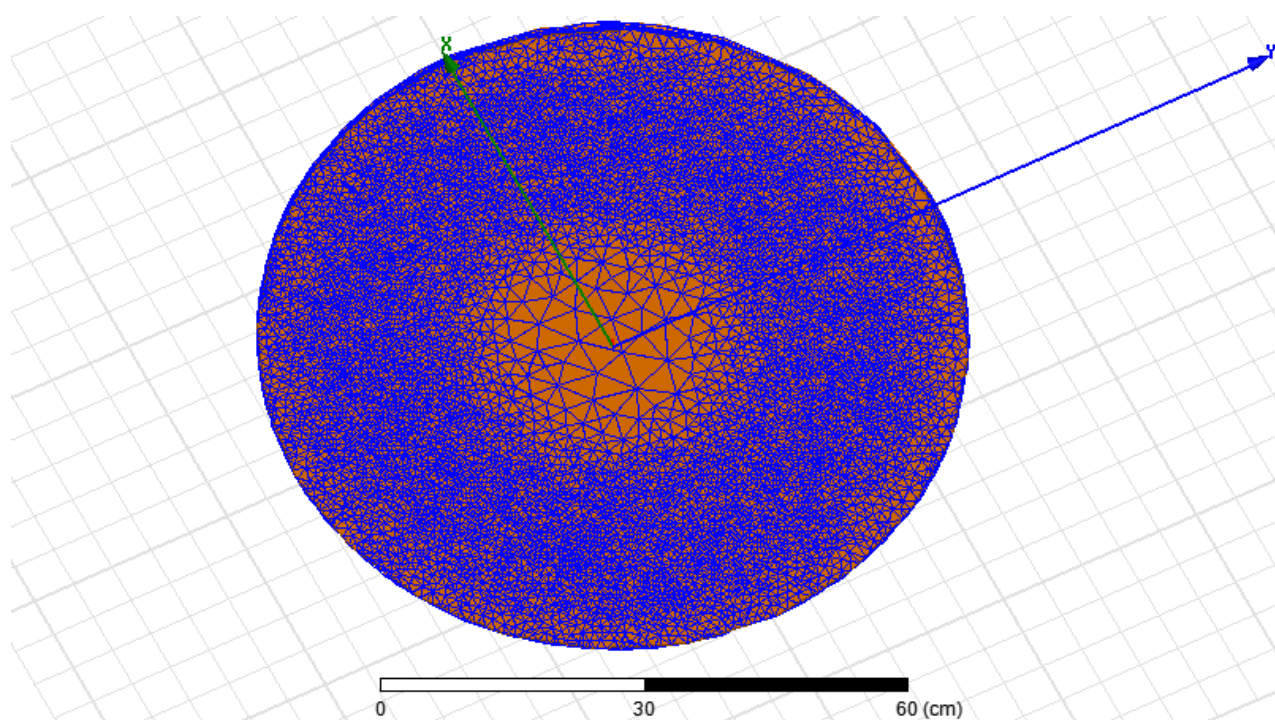
Obr. 21: Model - deska nad induktorem

5.1.1. Deska nad induktorem – Maxwell 3D

Na Obr. 22 a Obr. 23 je zobrazeno, jak po simulaci modelu desky nad induktorem vypadá mapová síť na povrchu desky. Porovnáním těchto dvou obrázků je možné říci, že ze spod desky je síť mnohem hustší než z vrchu. Tento poznatek je dán faktem, že induktor působí právě na spodní stranu desky a proto se zde uplatní mnohem větší množství výpočtů při simulaci.

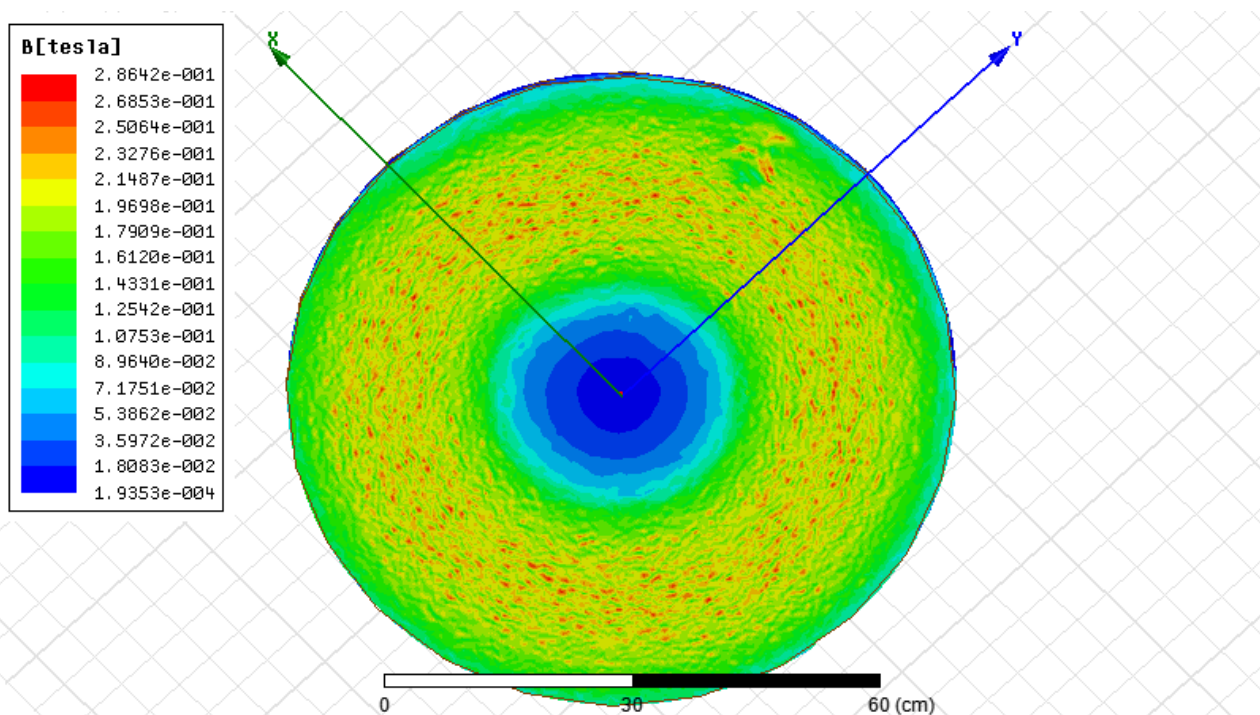


Obr. 22: Deska nad induktorem - rozložení sítě desky – horní pohled



Obr. 23: Deska nad induktorem - rozložení sítě na povrchu desky – spodní pohled - bez viditelnosti induktoru

Na Obr. 24 je povrchové rozložení magnetické indukce ve spodním pohledu desky (opět bez viditelnosti induktoru). Rozložení magnetické indukce na povrchu desky se pohybuje někde okolo 0,11 T až 0,28 T.

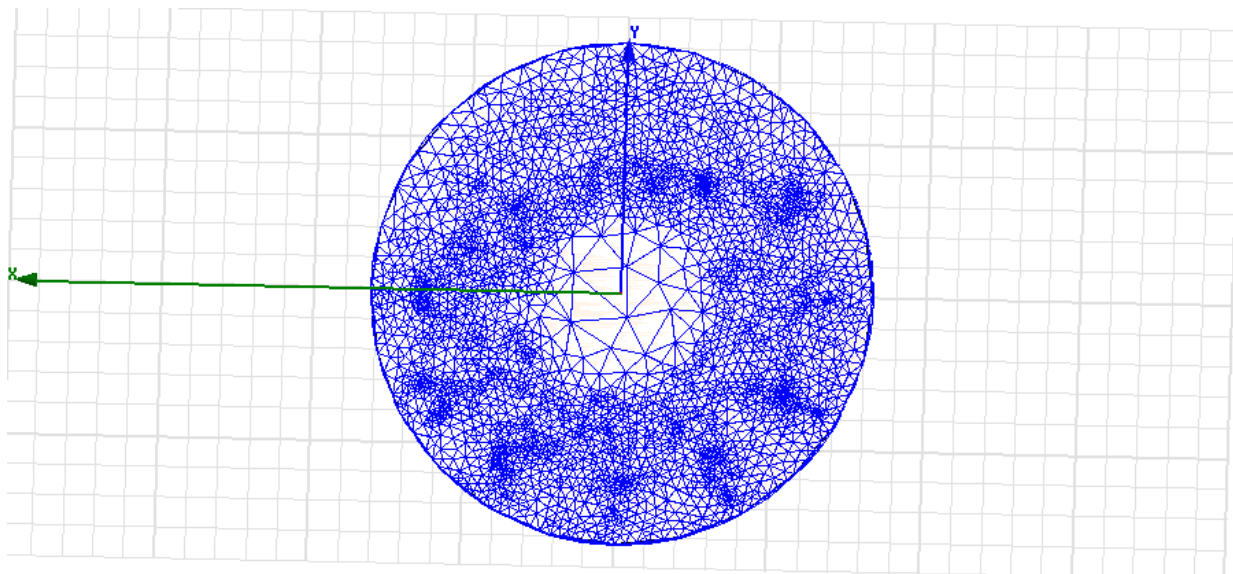


Obr. 24: Deska nad induktorem –rozložení magnetické indukce na povrchu desky – bez viditelnosti induktoru – spodní pohled

Další obrázky z této simulace jsou zdokumentovány v příloze E.

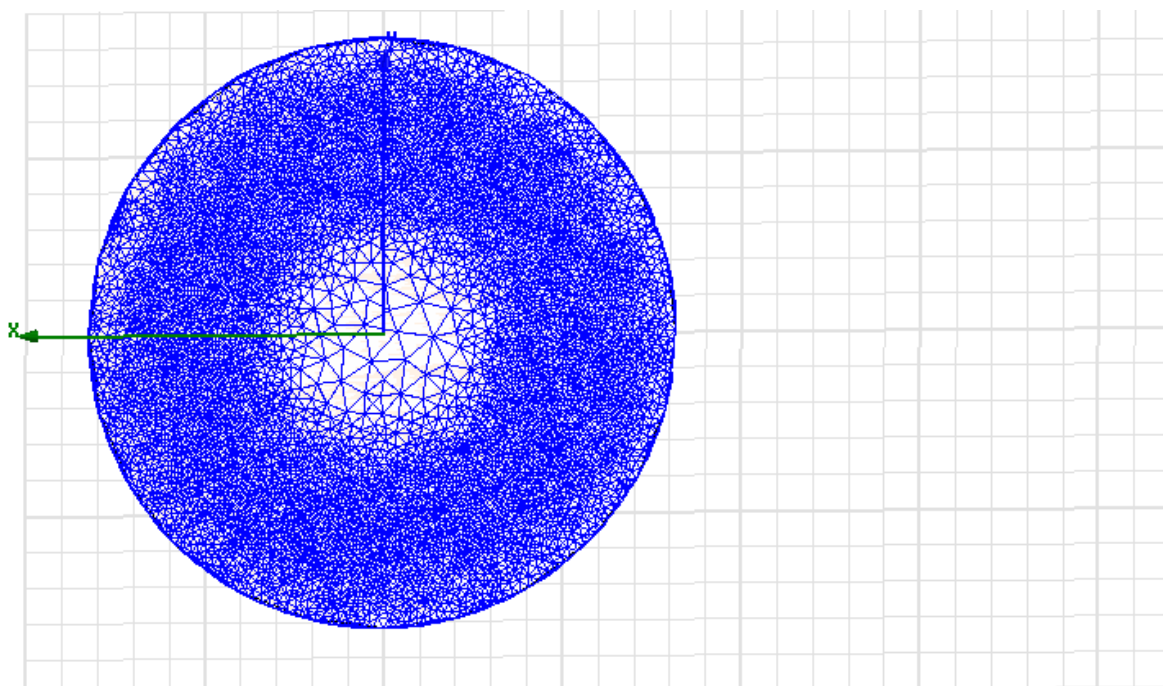
5.1.2. Deska nad induktorem – ePhysics

Na Obr. 25 je zobrazena síť na povrchu desky v modelu desky nad induktorem při nastavení analysis setup1 (tzn. síť desky byla automaticky vytvořena pomocí ePhysics).



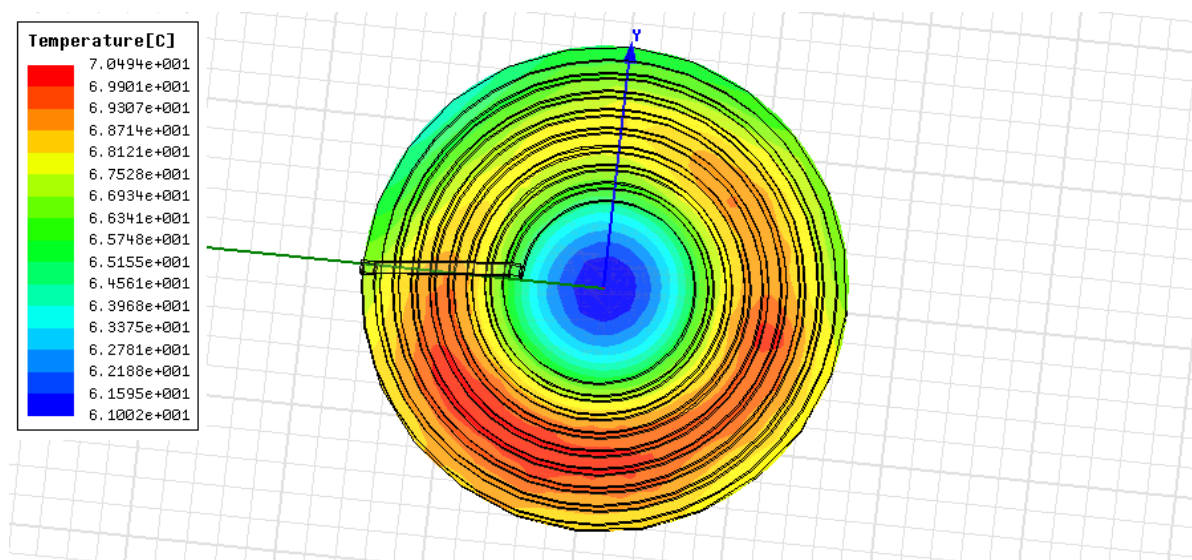
Obr. 25: Deska nad induktorem – síť desky – ePhysics – spodní pohled – setup1

Na Obr. 26 je totožný model s nastavením setup2 (tzn. síť desky a ostatní nastavení bylo převzato z vytvořeného modelu v projektu z Maxwell 3D). Porovnáním těchto výsledků simulace lze konstatovat, že síť v obou případech nejsou totožné. Obr. 26 je totožný s Obr. 23 z důvodu převzetí sítě z modelu vytvořeném v Maxwell 3D, kdežto při stejném manuálním nastavení parametrů analysis setup v ePhysics jako u modelu v Maxwell 3D je rozložení sítě jiné (viz Obr. 25).



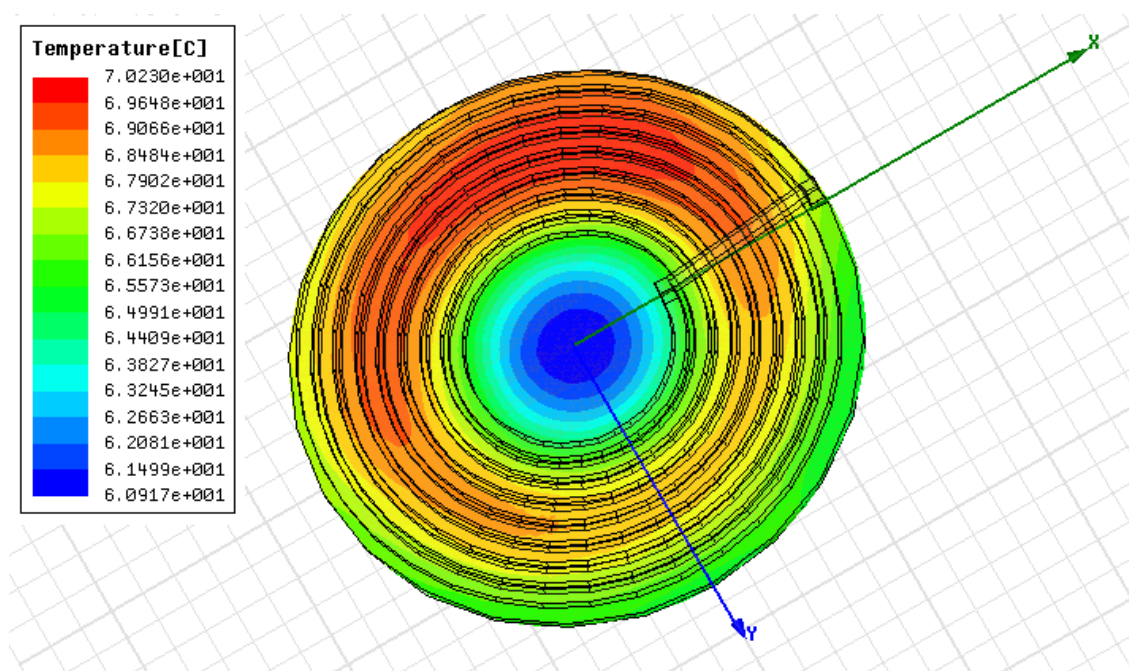
Obr. 26: Deska nad induktorem – síť na povrchu desky – ePhysics – spodní pohled – setup2

Na Obr. 27 je dokumentováno teplotní rozložení na povrchu desky ze spodního pohledu. Tento model je odsimulovaný v setup1. Teploty se v tomto pohledu na povrchu desky pohybují v rozmezí okolo 66°C až 70°C. Lze také vidět nerovnoměrné rozložení teploty. Tento jev je vzniklý pravděpodobně tím, že tepelné pole je buzeno magnetomotorickou silou, danou stejným počtem ampér závitů, ale v dolní části obrázku je na vnějším průměru plocha (přes kterou se pole uzavírá) větší a tudíž je větší i magnetická indukce (tzn. vyšší teploty).



Obr. 27: Deska nad induktorem - teplotní rozložení na povrchu desky – spodní pohled – setup1

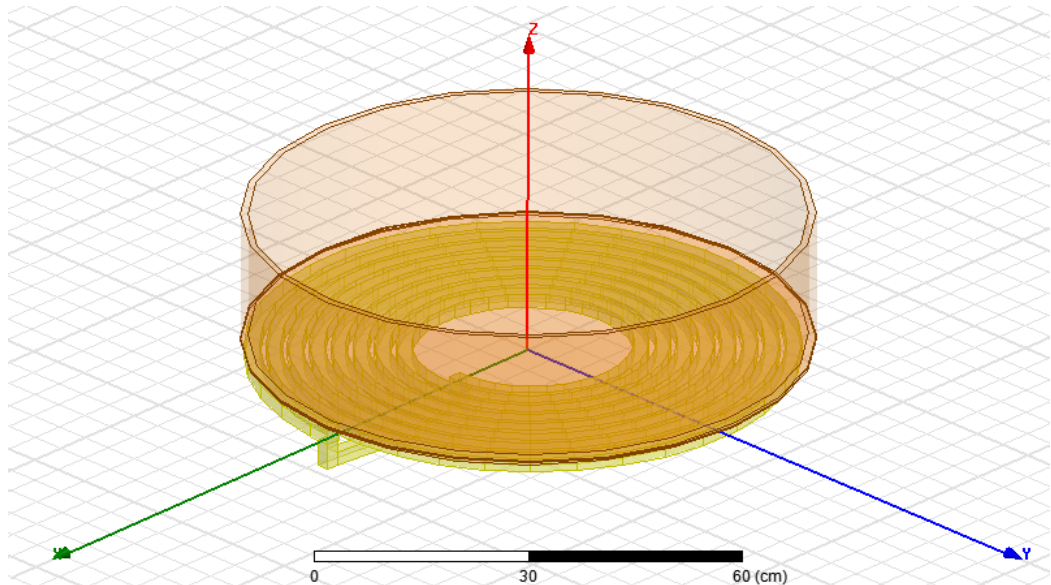
Na Obr. 28 je totožný model s nastavením setup2. Porovnáním těchto výsledků simulace lze konstatovat, že teplotní rozložení u obou simulací je podobné. Sice se tedy liší sítě při jednotlivých simulacích, ale vliv na povrchové rozložení teplot je minimální.



Obr. 28: Deska nad induktorem - teplotní rozložení na povrchu desky – spodní pohled – setup2

5.2. Model indukčního ohřevu – nádoba nad induktorem – simulace 4kHz

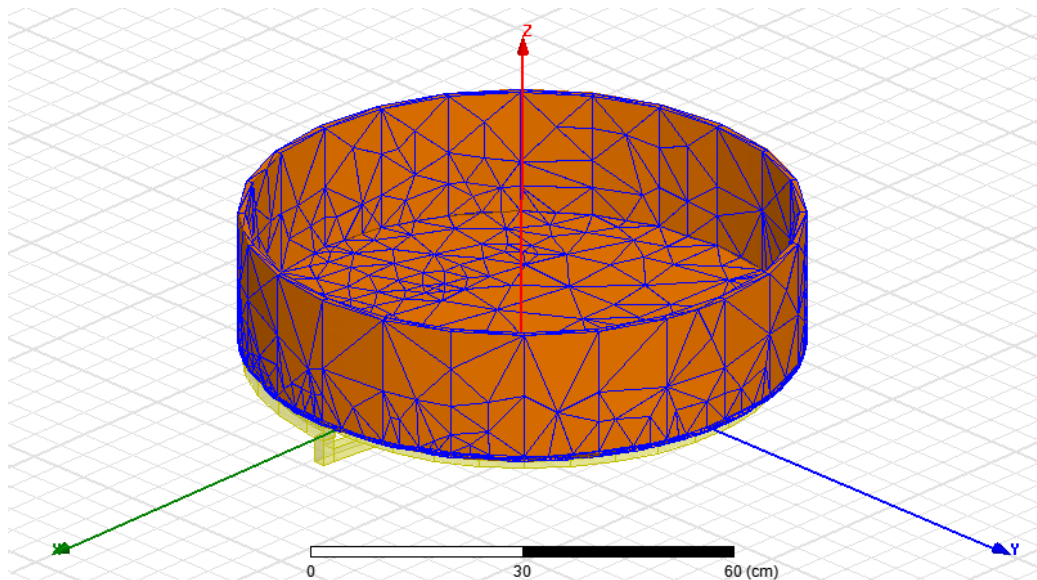
Na Obr. 29 je demonstrován vytvořený model nádoby nad induktorem užitý v Maxwell 3D i v ePhysics. Parametry tohoto modelu jsou uvedeny v Tab. 2 v kap. 3.2.2.



Obr. 29: Model – nádoba nad induktorem

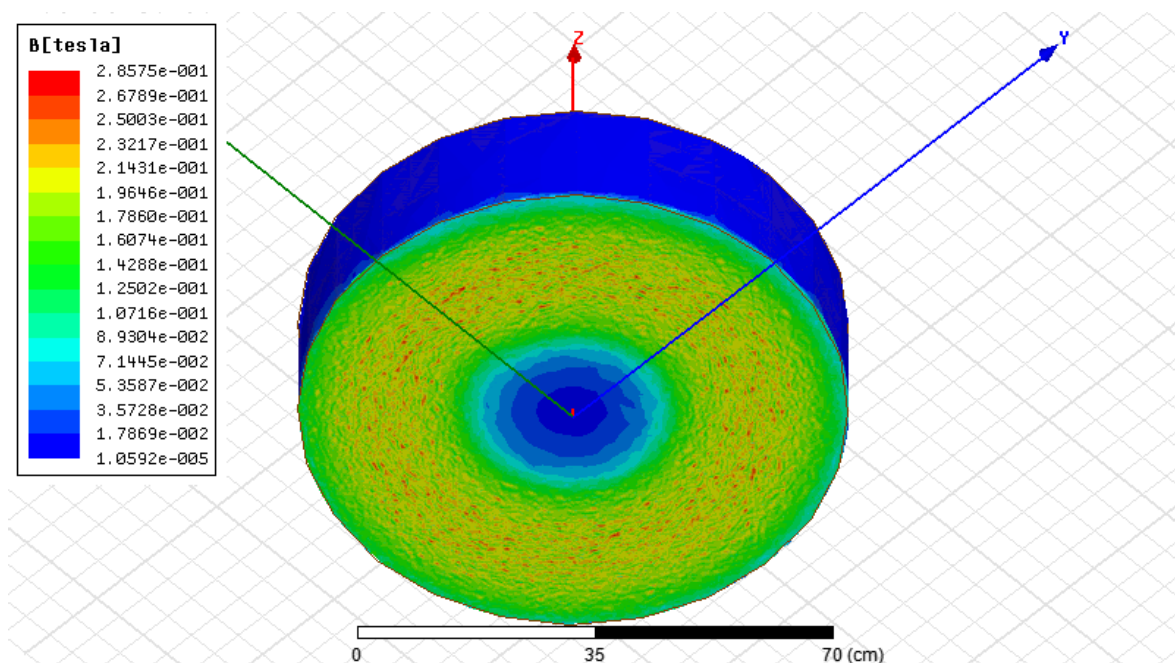
5.2.1. Nádoba nad induktorem – Maxwell 3D

Na Obr. 30 je zobrazena síť na povrchu nádoby. Hustota sítě ve spodním pohledu na povrchu nádoby je větší než je zobrazeno v pohledu na Obr. 30 (analogie s modelem desky nad induktorem).



Obr. 30: Nádoba nad induktorem – rozložení sítě na povrchu nádoby

Na Obr. 31 je zobrazeno rozložení magnetické indukce ve spodním pohledu na povrchu nádoby. Indukce se z tomto pohledu pohybuje okolo 0,11T až 0,28T jako tomu je u modelu desky nad induktorem.

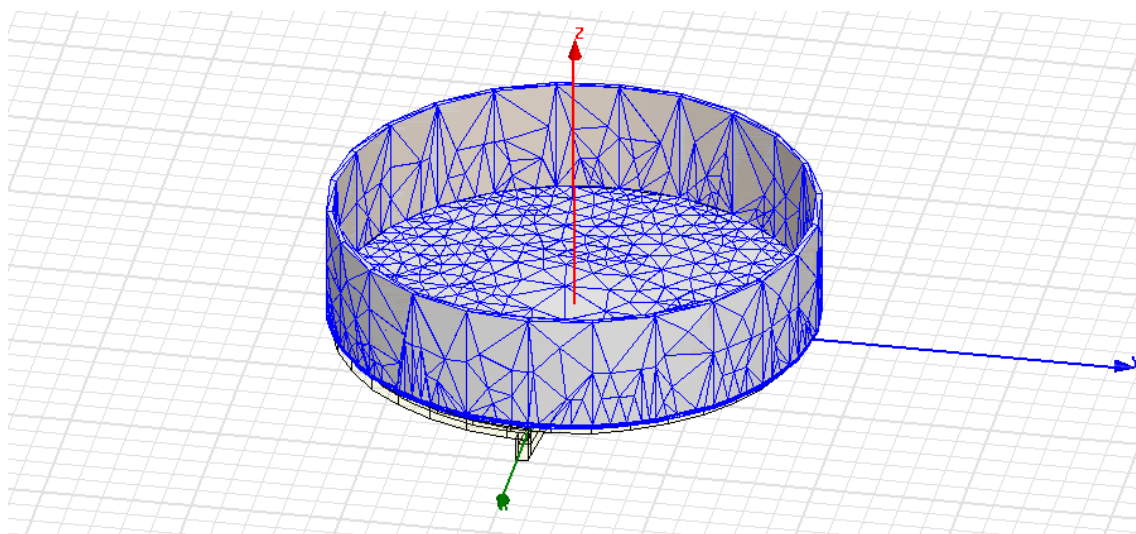


Obr. 31: Nádoba nad induktorem – rozložení magnetické indukce na povrchu nádoby – spodní pohled – bez viditelnosti induktoru

Další obrázky z této simulace jsou zdokumentovány v příloze F.

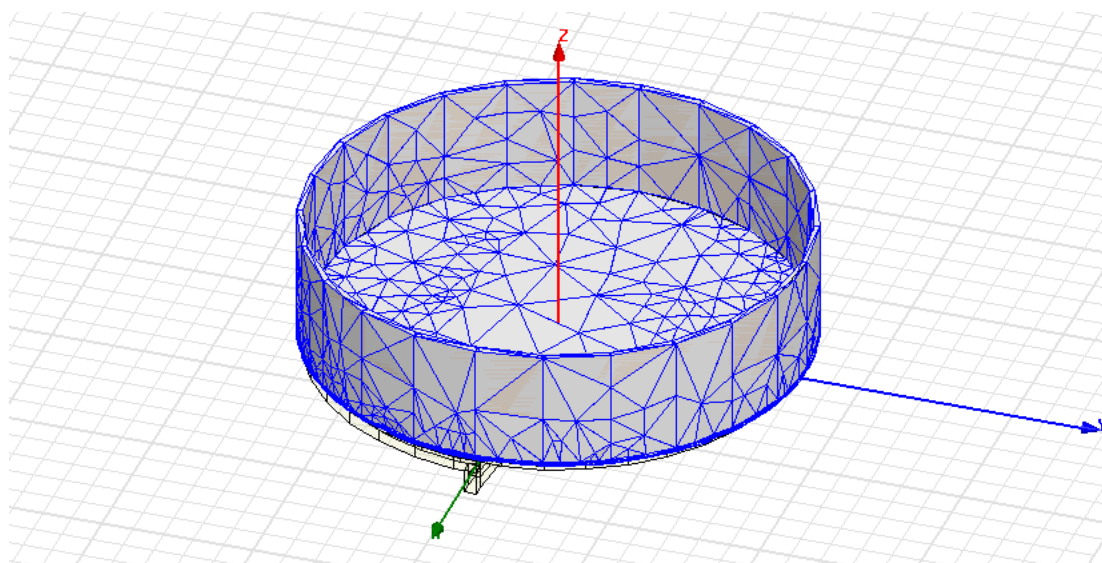
5.2.2. Nádoba nad induktorem – ePhysics

Na Obr. 32 je zobrazena síť na povrchu nádoby v modelu nádoby nad induktorem při nastavení analysis setup1 (tzn. síť nádoby byla automaticky vytvořena pomocí ePhysics).



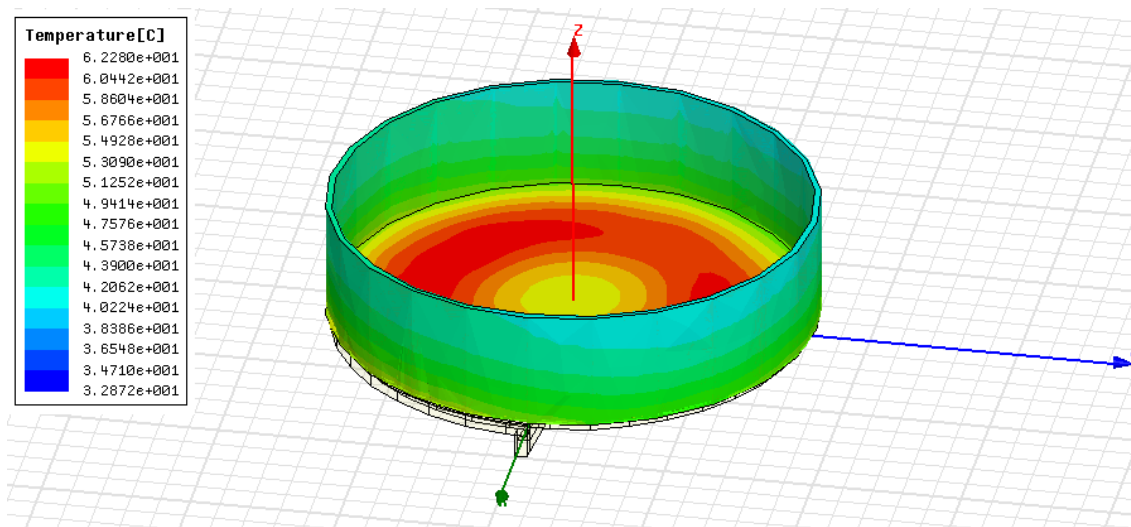
Obr. 32: Nádoba nad induktorem – rozložení sítě na povrchu nádoby – ePhysics – setup1

Na Obr. 33 je totožný model s nastavením setup2 (tzn. síť nádoby a ostatní nastavení bylo převzato z vytvořeného modelu v projektu z Maxwell 3D). Porovnáním těchto výsledků simulace lze opět konstatovat, že sítě v obou případech nejsou totožné. Obr. 33 je totožný s Obr. 30 z důvodu převzetí sítě z modelu vytvořeném v Maxwell 3D, kdežto při stejném manuálním nastavení parametrů analysis setup v ePhysics jako u modelu v Maxwell 3D je rozložení sítě jiné (viz Obr. 32).



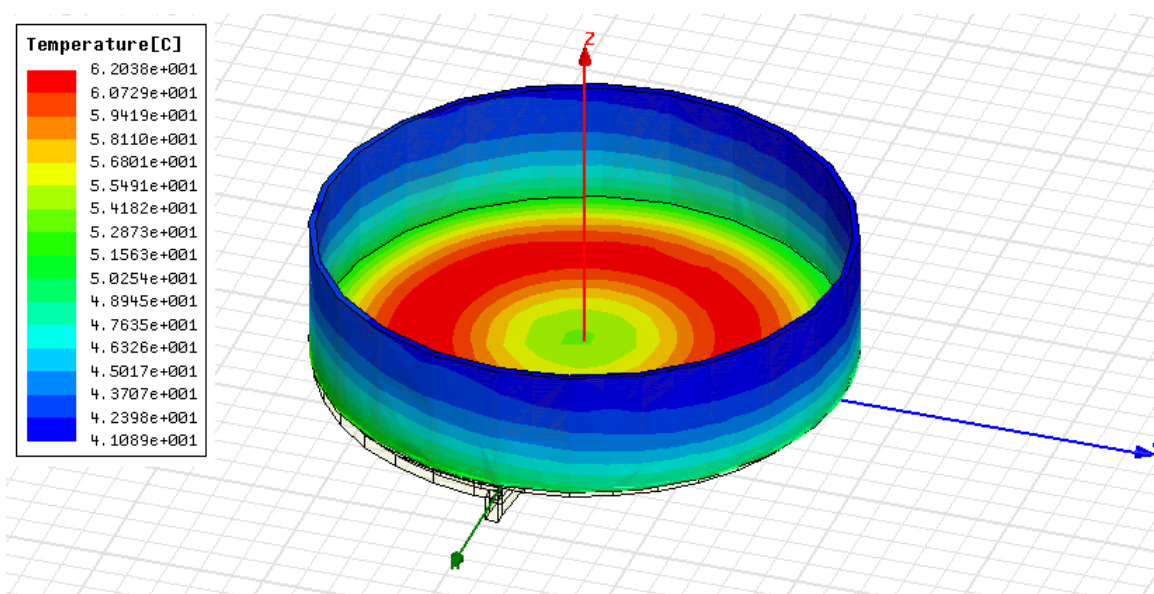
Obr. 33: Nádoba nad induktorem – rozložení sítě na povrchu nádoby – ePhysics – setup2

Na Obr. 34 je možné vidět teplotní rozložení na povrchu nádoby. Tento model je odsimulovaný v setup1. Teploty se na vnějším plášti nádoby pohybují v rozmezí přibližně od 42°C do 55°C a na dně nádoby se pohybují v rozmezí od 54°C do 62°C. Lze též konstatovat, že teplotní rozložení na povrchu dna nádoby je též jako v prvním modelu ovlivněno konstrukčním uspořádáním induktoru.



Obr. 34: Nádoba nad induktorem –teplotní rozložení na povrchu nádoby – setup1

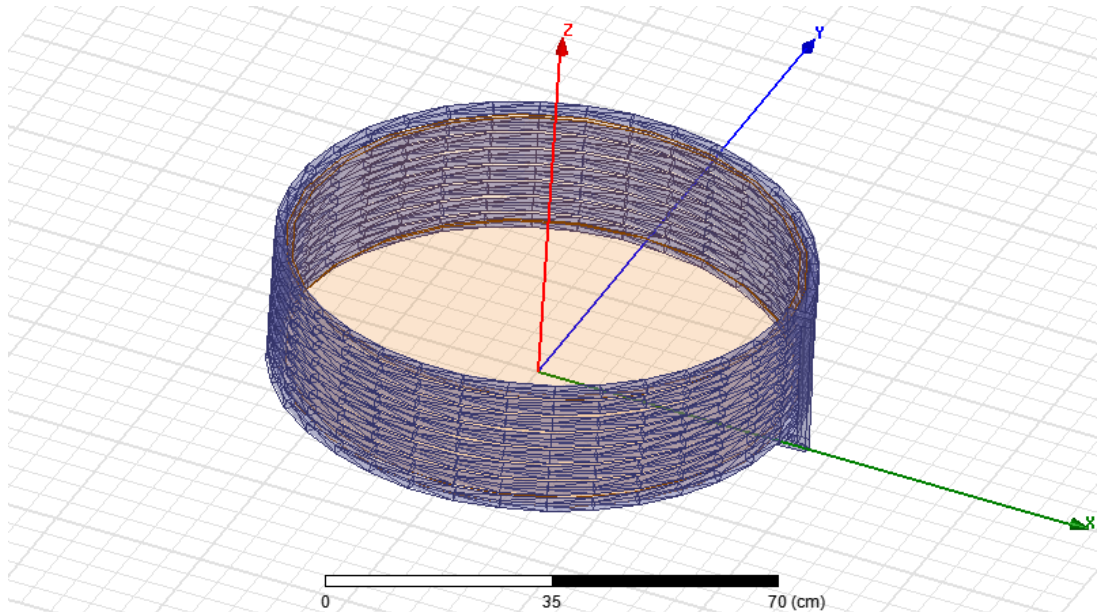
Na Obr. 35 je teplotní rozložení na povrchu nádoby. Model je ale odsimulovaný v nastavení setup2. Teplotní rozložení na vnějším povrchu pláště nádoby se pohybují v rozmezí přibližně od 41°C do 52°C a na dně nádoby se pohybují v rozmezí od 52°C do 62°C. Porovnáním Obr. 34 a Obr. 35 lze soudit, že i přes odlišné barevné rozlišení je teplotní rozložení u obou nastavení přibližně stejné. Opět tedy různé síť neovlivní povrchové teplotní rozložení modelu nádoby nad induktorem.



Obr. 35: Nádoba nad induktorem – teplotní rozložení na povrchu nádoby – setup2

5.3. Model indukčního ohřevu – Nádoba uvnitř induktoru – simulace 4 kHz

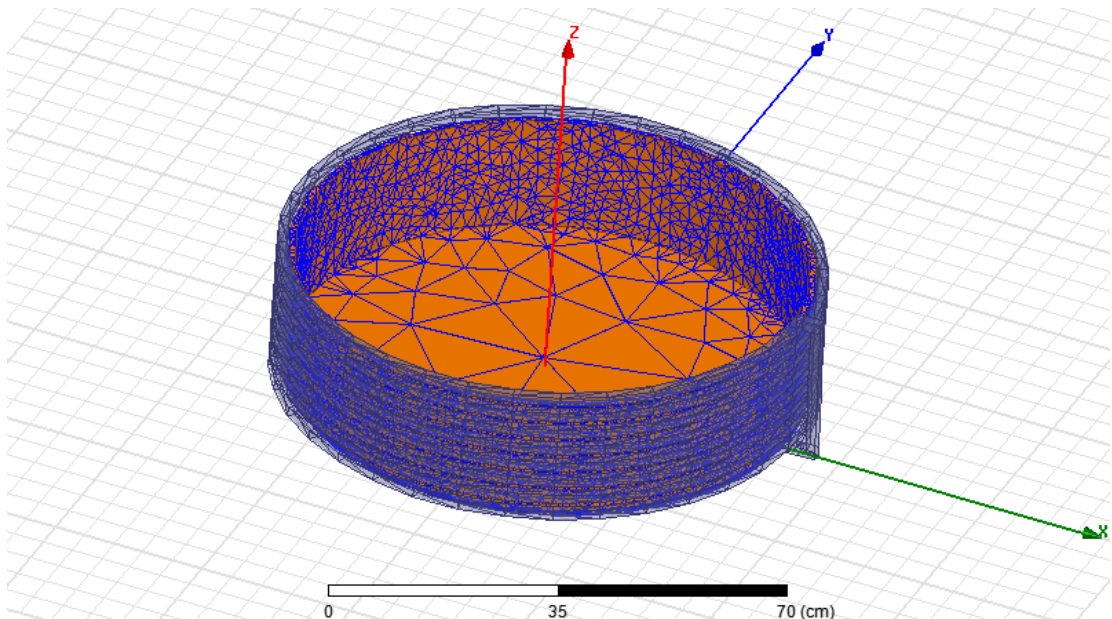
Na Obr. 36 je zobrazen vytvořený model nádoby uvnitř induktoru užitý v Maxwell 3D i v ePhysics. Parametry tohoto modelu jsou uvedeny v Tab. 3 v kap. 3.2.3.



Obr. 36: Model - nádoba uvnitř induktoru

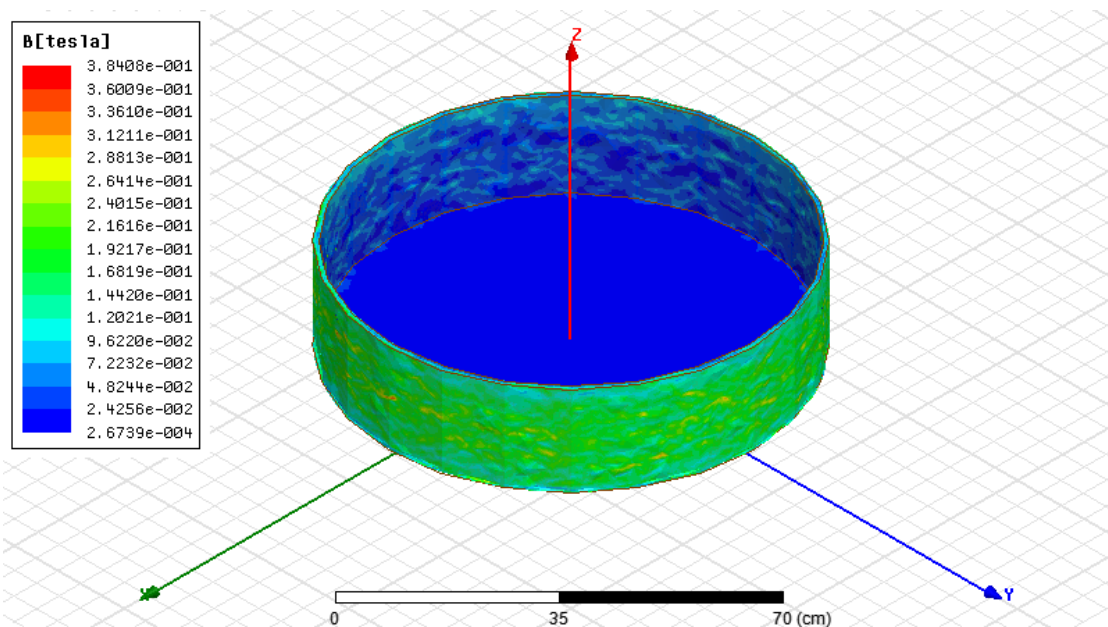
5.3.1. Nádoba uvnitř induktoru – Maxwell 3D

Na Obr. 37 je možné vidět rozložení sítě na povrchu nádoby. Rozložení sítě se liší od sítí předchozích modelů, což je způsobeno změnou konstrukčního uspořádání induktoru. Jak lze vysledovat, je hustota sítě větší v oblastech, kde dochází k působení induktoru (tj. na stěnách nádoby).



Obr. 37: Nádoba uvnitř induktoru – rozložení sítě na povrchu nádoby

Na Obr. 38 je demostrováno rozložení magnetické indukce na povrchu nádoby. Na vnějším plášti nádoby se indukce pohybuje okolo 0,12T až 0,28T. Oproti tomu na vnitřním plášti nádoby se rozložení indukce na povrchu pohybuje v rozmezí od 0,267 mT do 0,097T. Na dně nádoby je dle předpokladu magnetická indukce nejnižší (tj.0,267 mT v celé oblasti).

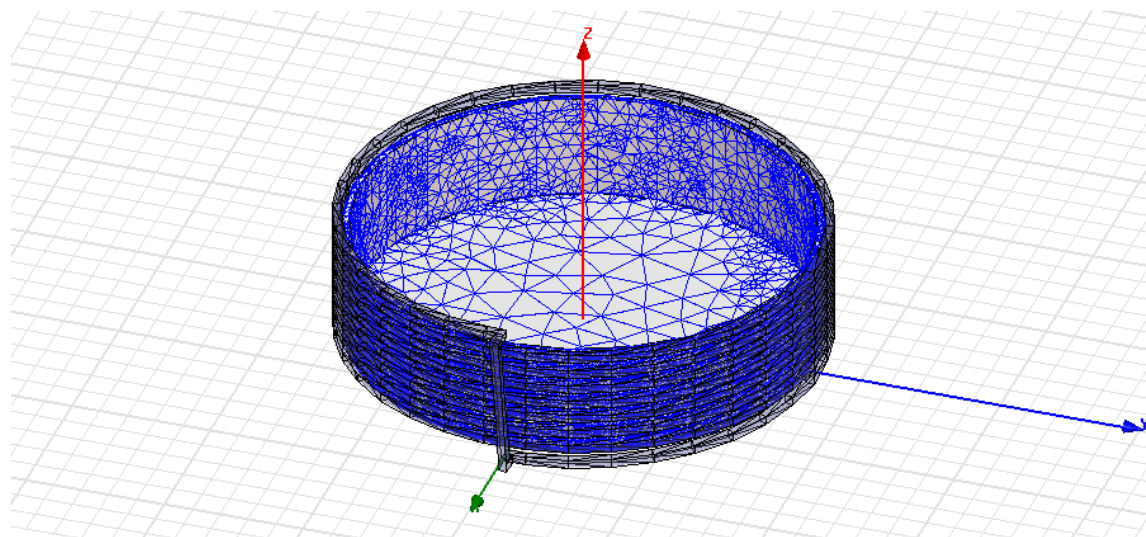


Obr. 38: Nádoba uvnitř induktoru –rozložení magnetické indukce na povrchu nádoby – bez viditelnosti induktoru

Další obrázky z této simulace jsou zdokumentovány v příloze G.

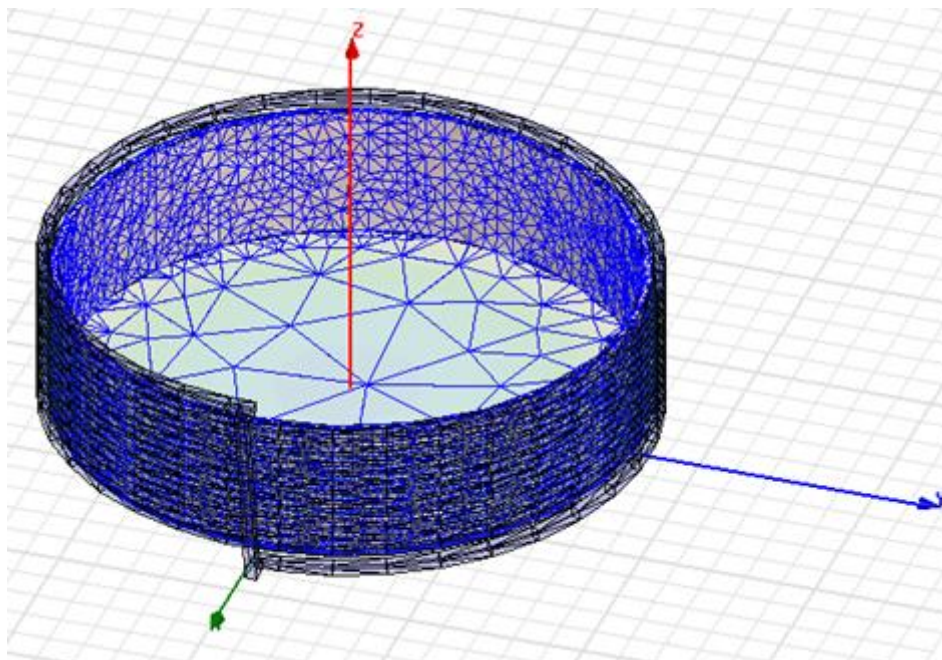
5.3.2. Nádoba uvnitř induktoru – ePhysics

Na Obr. 39 je zobrazena síť na povrchu nádoby v modelu nádoby uvnitř induktoru při nastavení analysis setup1 (tzn. síť nádoby byla automaticky vytvořena pomocí ePhysics).



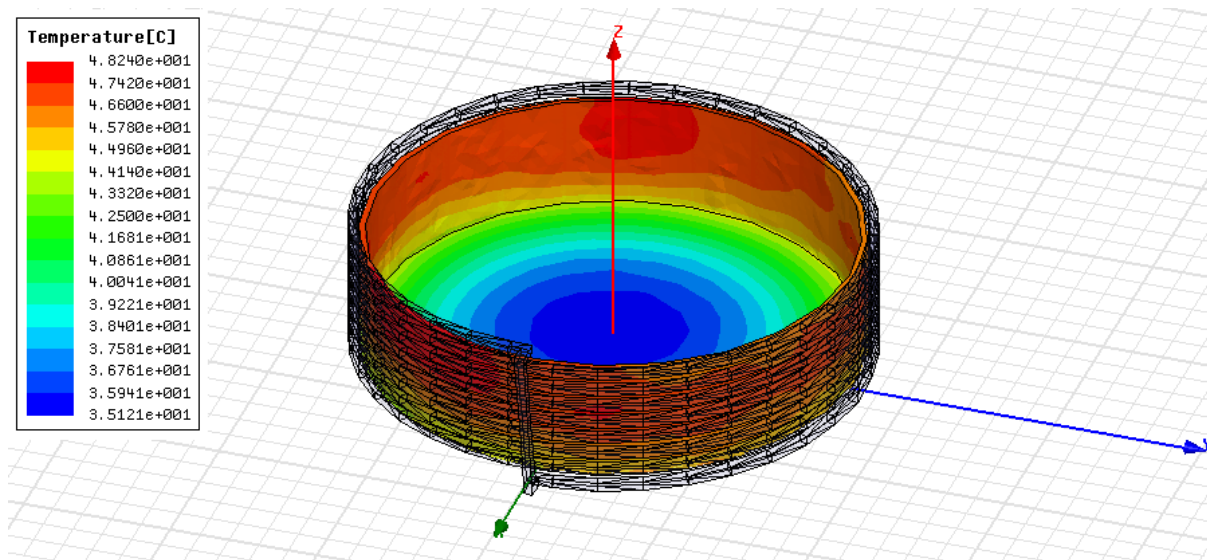
Obr. 39: Nádoba uvnitř induktoru — rozložení sítě na povrchu nádoby – setup1

Na Obr. 40 je totožný model s nastavením setup2 (tzn. síť nádoby a ostatní nastavení bylo převzato z vytvořeného modelu v projektu z Maxwell 3D). Síť v obou případech nejsou totožné. Analogicky jako v předchozích případech je Obr. 40 totožný s Obr. 37.



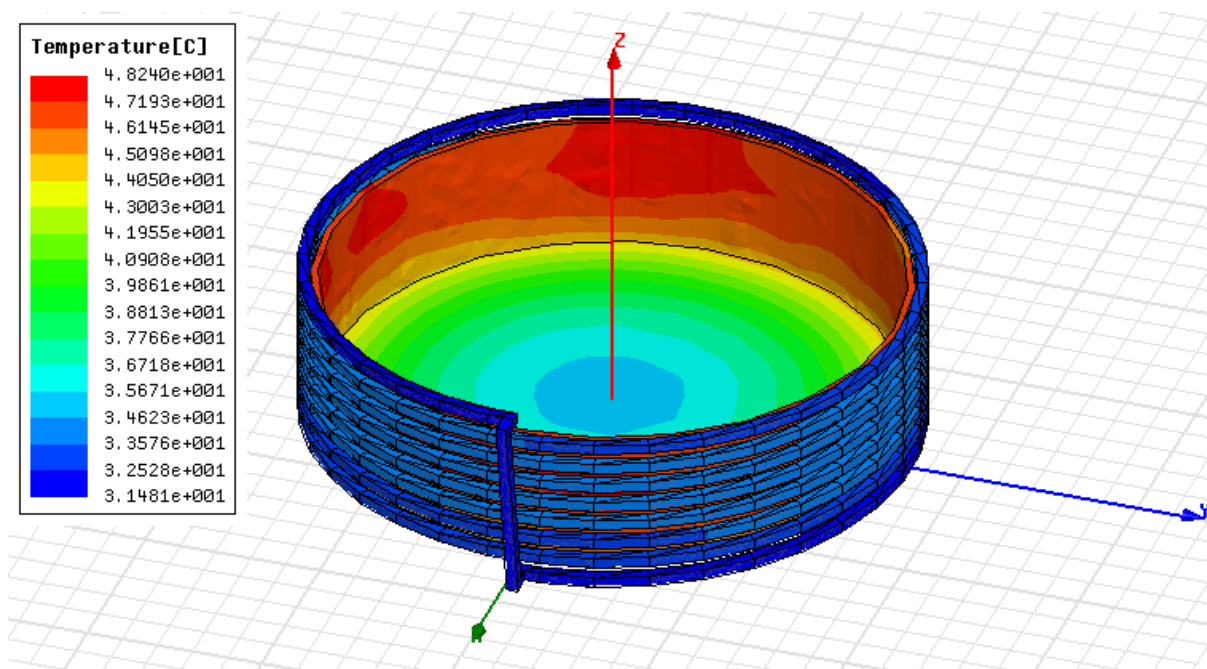
Obr. 40: Nádoba uvnitř induktoru — rozložení sítě na povrchu nádoby – setup2

Na Obr. 41 je ukázán výsledek teplotního rozložení na povrchu nádoby uvnitř induktoru. Model je odsimulovaný v nastavení setup1. Teploty se na povrchu vnějšího pláště pohybují v rozmezí od 45°C do 48°C a na dně nádoby od 35°C do 43°C. Jak se dalo očekávat, vyšší teploty jsou na těch částech nádoby, jenž obepíná induktor.



Obr. 41: Nádoba uvnitř induktoru –teplotní rozložení na povrchu nádoby – setup1

Na Obr. 42 je také výsledek teplotního rozložení na povrchu nádoby uvnitř induktoru ale model je odsimulovaný v nastavení setup2. Teploty se na dně nádoby pohybují v rozmezí od 35°C do 44°C. Teplotní rozložení na povrchu nádoby je tedy opět přibližně stejné při nastavení setup1 i setup2.

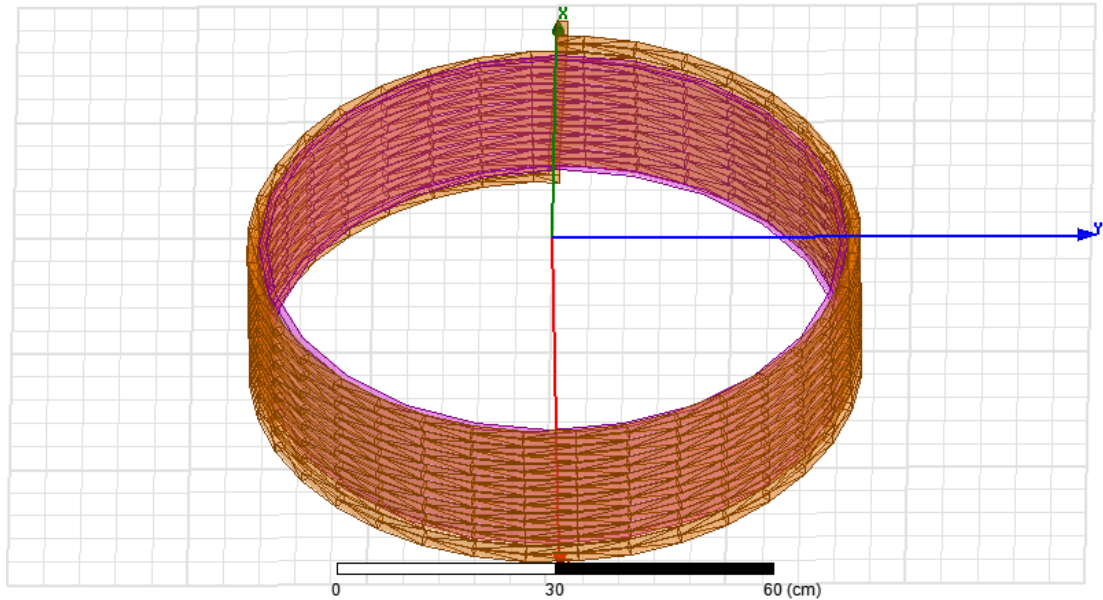


Obr. 42: Nádoba uvnitř induktoru – teplotní rozložení na povrchu nádoby – setup2

5.4. Model indukčního ohřevu – trubka uvnitř spiral induktoru – simulace

4 kHz

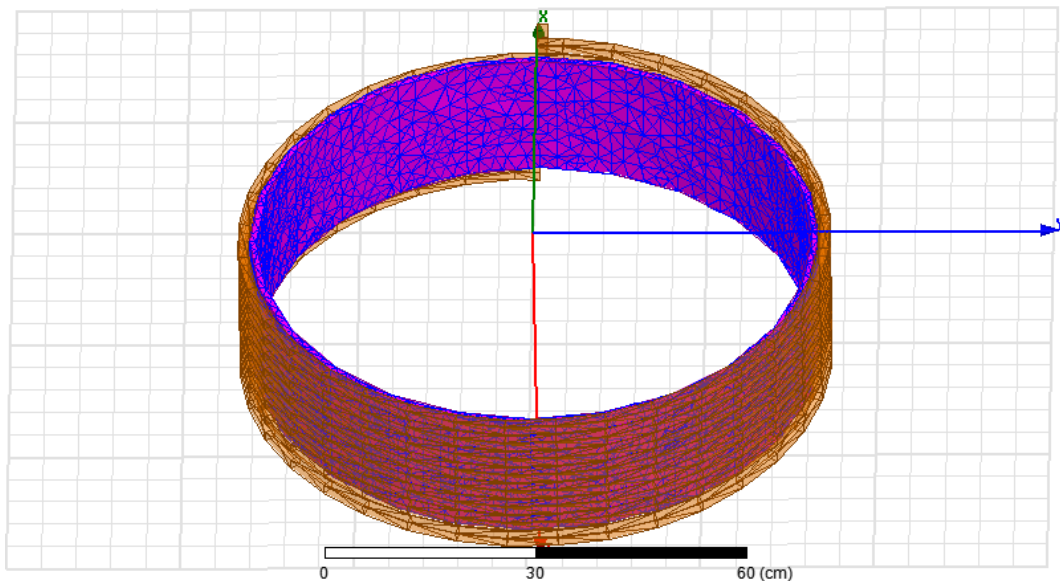
Na Obr. 43 je dokumentován vytvořený model trubky uvnitř spiral induktoru užitý v Maxwell 3D i v ePhysics. Parametry tohoto modelu jsou uvedeny v Tab. 4 v kap. 3.2.4.



Obr. 43: Model – trubka uvnitř spiral induktoru

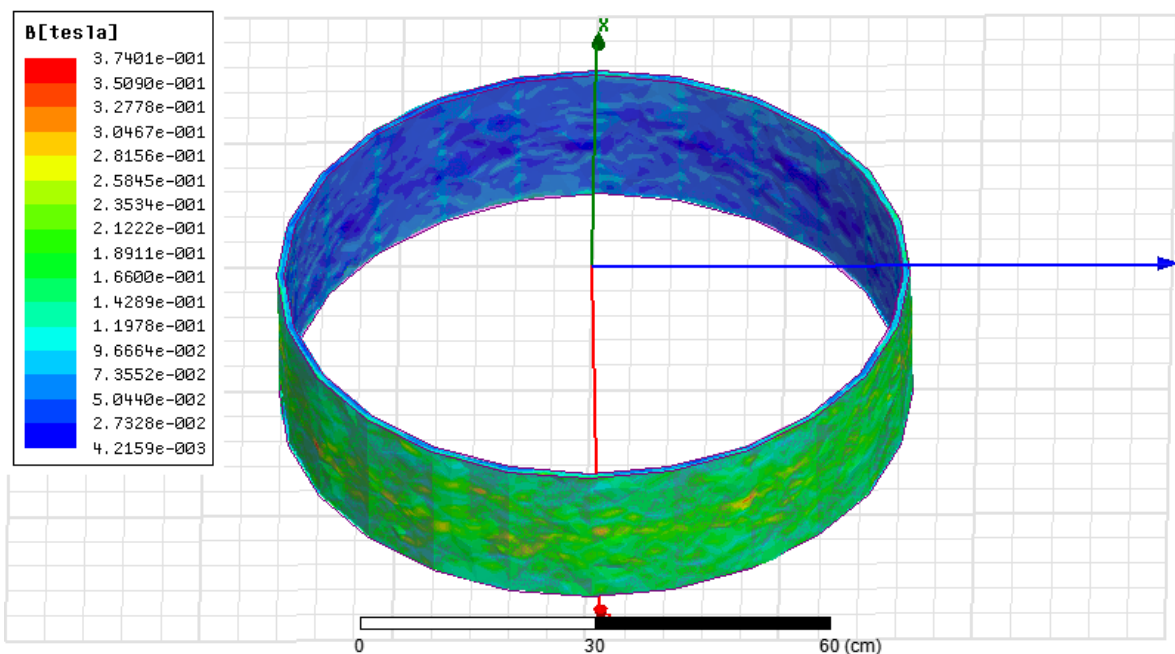
5.4.1. Trubka uvnitř spiral induktoru – Maxwell 3D

Z Obr. 44 je vidět, jak vypadá síť na povrchu trubky. Porovnáním s Obr. 37 lze vysledovat, že síť pláště na povrchu nádoby se shoduje se sítí na povrchu trubky, což lze předpokládat z konstrukčního uspořádání.



Obr. 44: Trubka uvnitř spiral induktoru - rozložení sítě na povrchu trubky

Na Obr. 45 je vidět rozložení magnetické indukce na povrchu trubky. Indukce se na vnějším plášti trubky pohybuje v rozmezí okolo 0,12T až 0,28T. Na vnitřním plášti se magnetická indukce pohybuje v rozmezí od 4,2mT do 0,097T. Rozložení magnetické indukce v tomto modelu je tedy téměř shodné s modelem nádoby uvnitř induktoru.

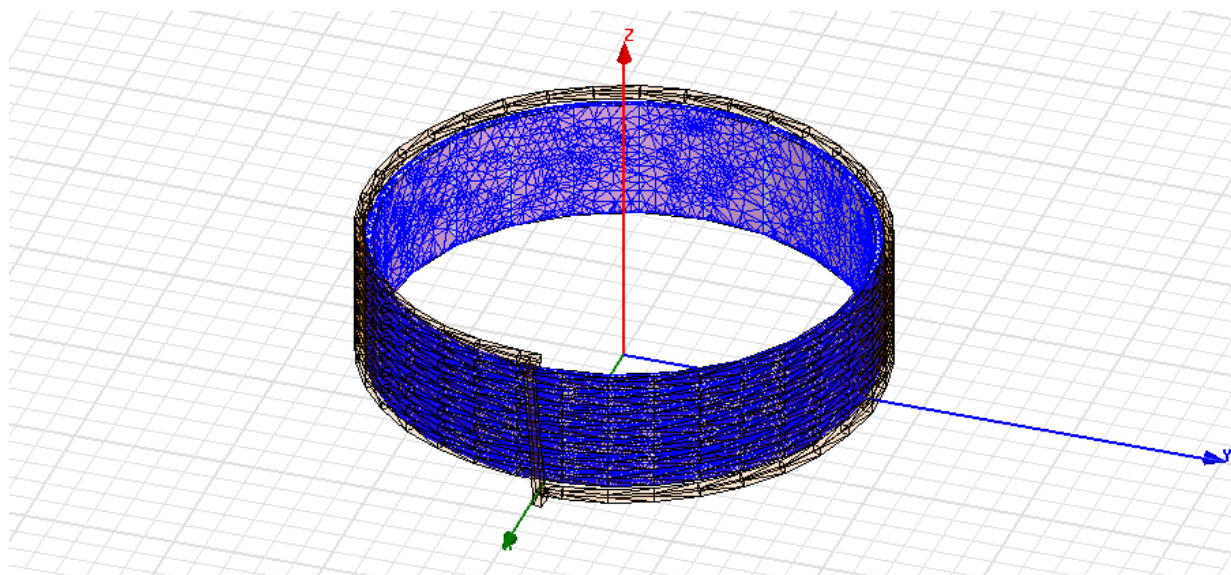


Obr. 45: Trubka uvnitř spirál induktoru - rozložení magnetické indukce na povrchu trubky - bez viditelnosti induktoru

Další obrázky z této simulace jsou zdokumentovány v příloze H.

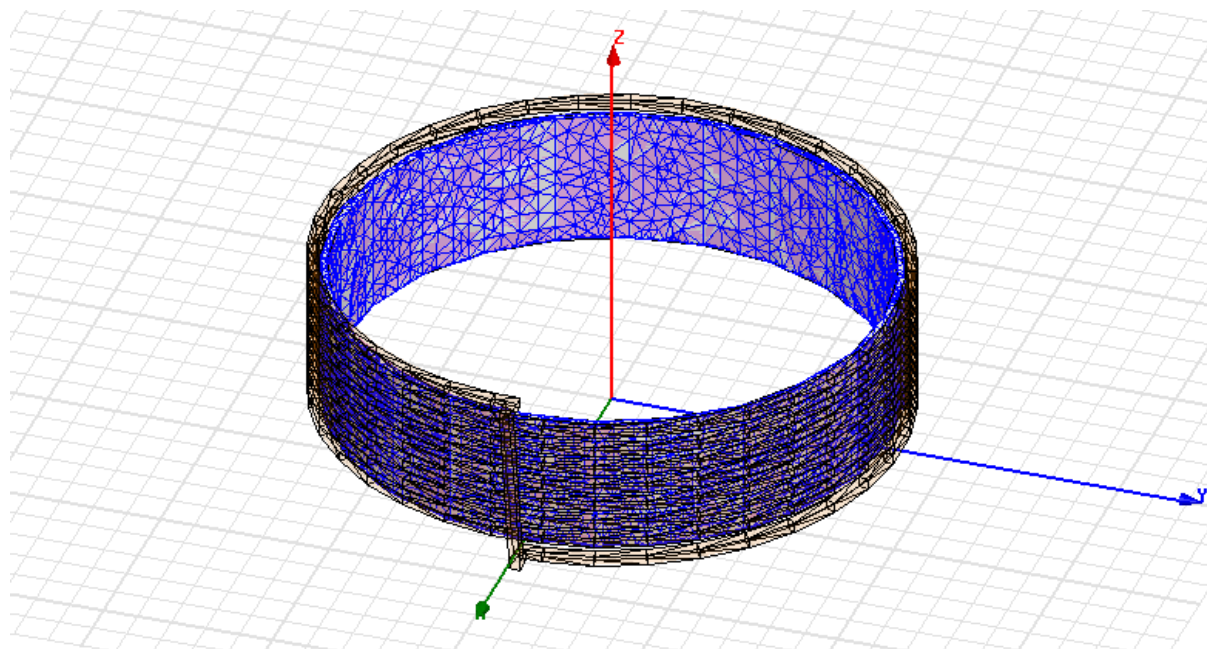
5.4.2. Trubka uvnitř spirál induktoru – ePhysics

Síť na povrchu trubky v modelu trubky uvnitř spirál induktoru při nastavení analysis setup1 je zobrazena na Obr. 46 (tzn. síť trubky byla automaticky vytvořena pomocí ePhysics).



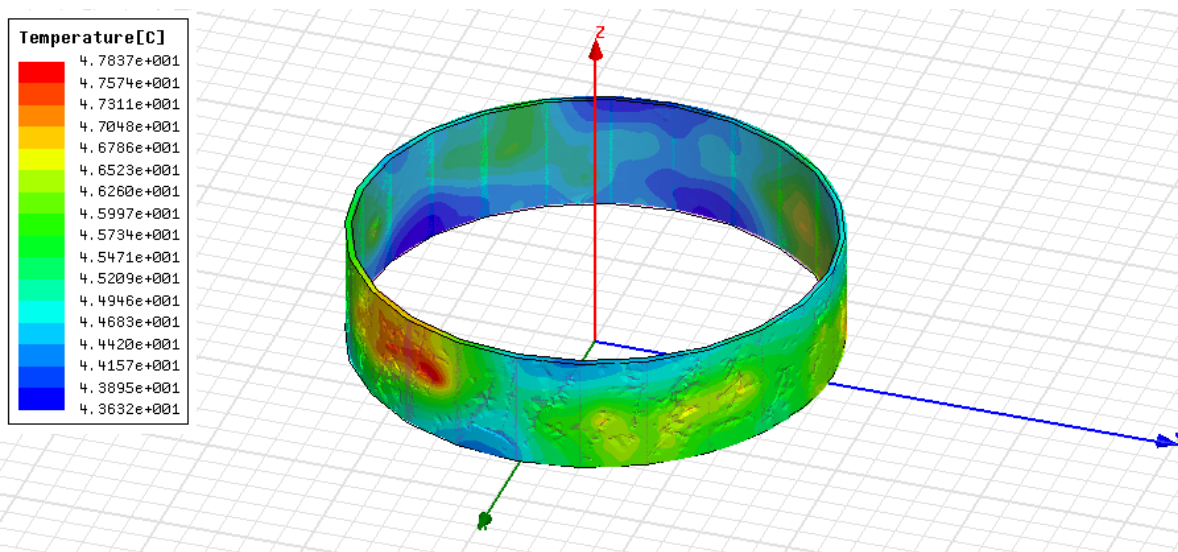
Obr. 46: Trubka uvnitř spirál induktoru – rozložení sítě na povrchu trubky – setup1

Na Obr. 47 je totožný model s nastavením setup2 (tzn. síť trubky a ostatní nastavení bylo převzato z vytvořeného modelu v projektu z Maxwell 3D). Sítě v obou případech nejsou totožné. Analogicky jako v předchozích případech je Obr. 47 totožný s Obr. 44.



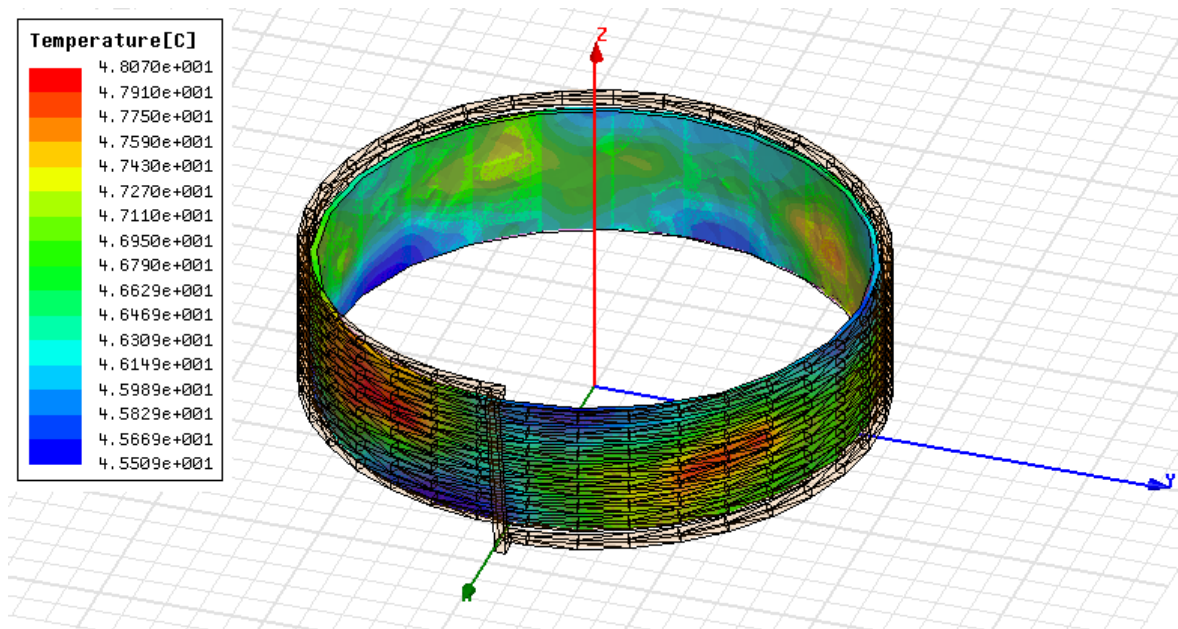
Obr. 47: Trubka uvnitř spirál induktoru – rozložení sítě na povrchu trubky – setup2

Na Obr. 48 je možné vidět teplotní rozložení na povrchu trubky při simulaci v nastavení setup1. Teploty se na vnějším plášti trubky pohybují v rozmezí přibližně od 44°C do 47°C.



Obr. 48: Trubka uvnitř spirál induktoru –teplotní rozložení na povrchu trubky – setup1

Na Obr. 49 je zobrazeno teplotní rozložení na povrchu trubky při simulaci v nastavení setup2. Teplotní rozložení na vnějším povrchu pláště trubky se pohybuje v rozmezí přibližně od 45°C do 48°C. Porovnáním Obr. 48 a Obr. 49 lze soudit, že je teplotní rozložení u obou nastavení přibližně stejné. Opět tedy různé sítě neovlivní teplotní rozložení na povrchu modelu.

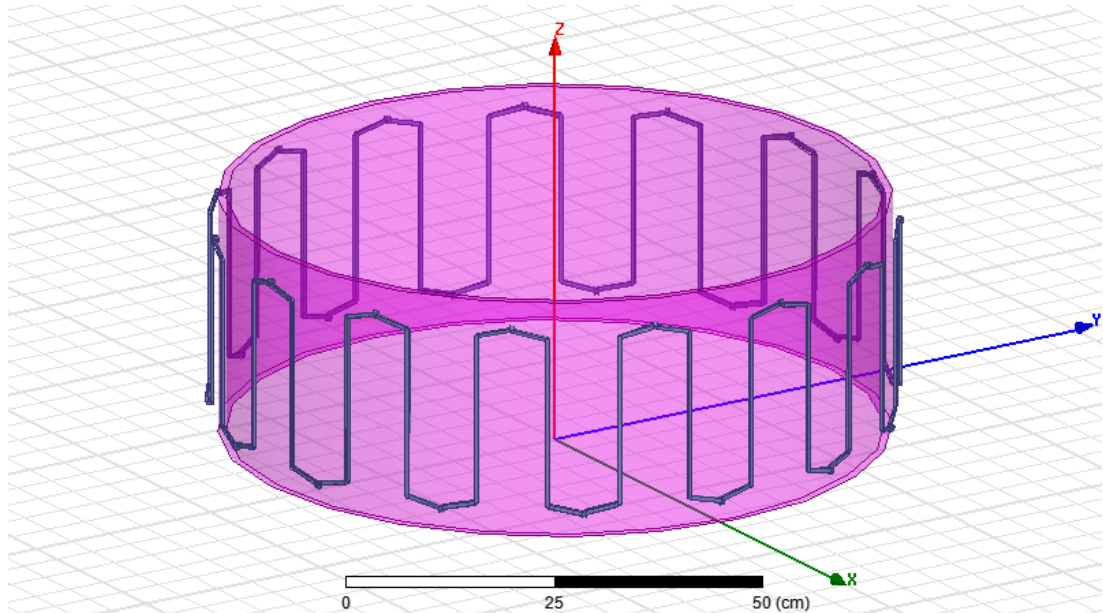


Obr. 49: Trubka uvnitř spirál induktoru – teplotní rozložení na povrchu trubky – setup2

5.5. Model indukčního ohřevu – trubka uvnitř wave induktoru – simulace

4 kHz

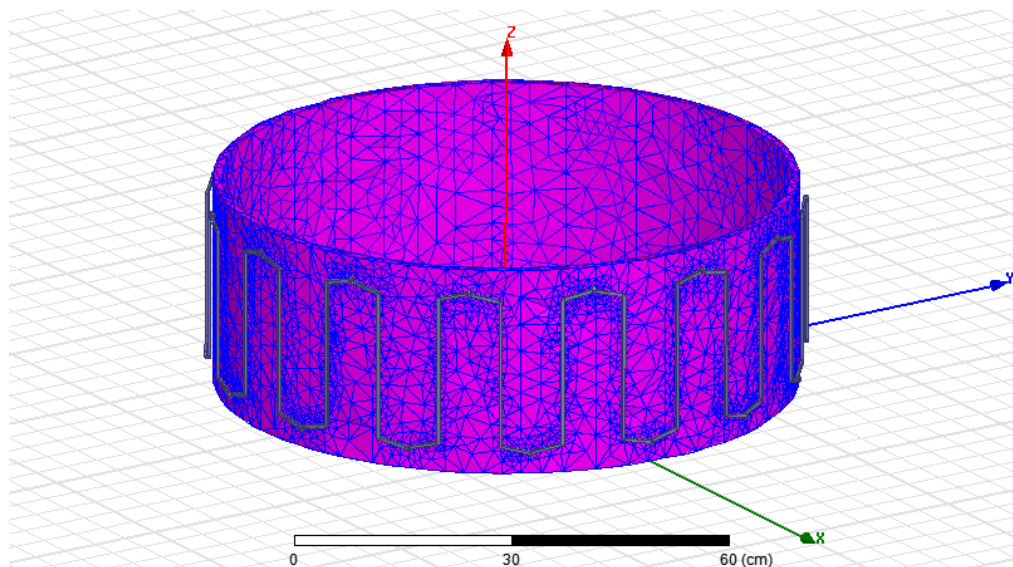
Na Obr. 50 je vidět vytvořený model trubky uvnitř wave induktoru užitý v Maxwell 3D i v ePhysics. Parametry tohoto modelu jsou uvedeny v Tab. 5 v kap. 3.2.5.



Obr. 50: Model – trubka uvnitř wave (vlnového) induktoru

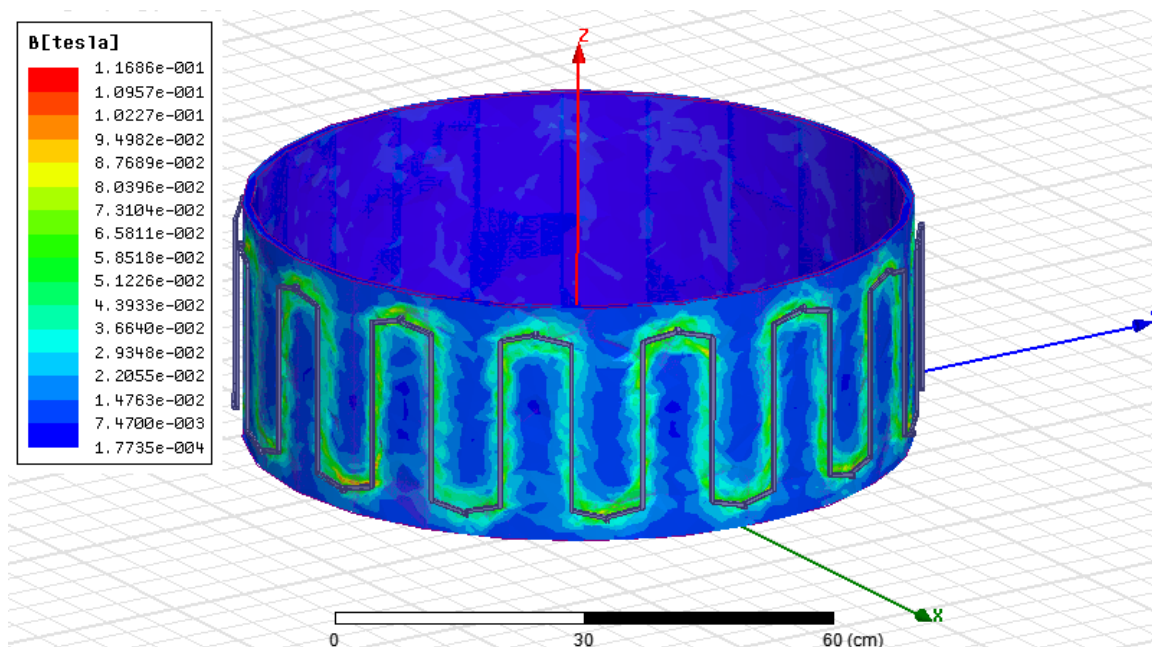
5.5.1. Trubka uvnitř wave induktoru – Maxwell 3D

Na Obr. 51 je vidět rozložení sítě na povrchu trubky. Toto rozložení je podle očekávání jiné než u modelu trubky uvnitř spirál induktoru. Tento fakt je daný jiným konstrukčním uspořádáním induktoru.



Obr. 51: Trubka uvnitř wave induktoru – rozložení sítě na povrchu trubky

Na Obr. 52 lze vidět rozložení magnetické indukce na povrchu trubky. Indukce se na vnějším plášti trubky pohybuje v rozmezí okolo 0,065T v místech, kde je vinutí. Je zřejmé, že rozložení indukce na povrchu trubky je mnohem menší, než u ostatních modelů. Tento poznatek je dán odlišným geometrickým uspořádáním induktoru. V porovnání s modelem trubky uvnitř spirál induktoru je vytvořená magnetická indukce tohoto modelu mnohem menší.

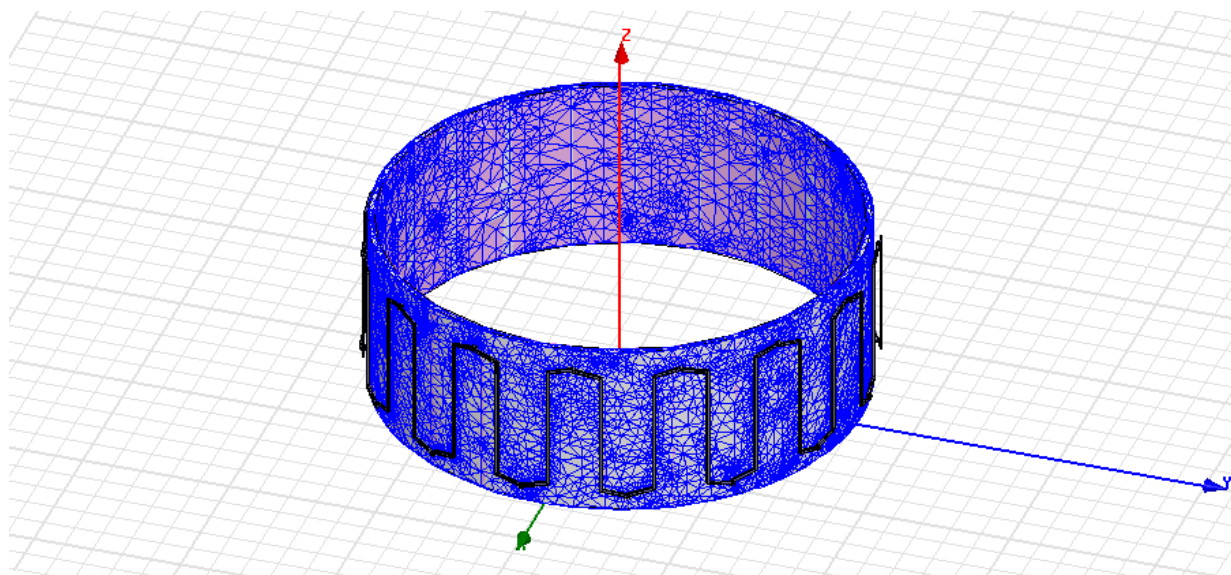


Obr. 52: Trubka uvnitř wave induktoru – rozložení magnetické indukce na povrchu trubky

Další obrázky z této simulace jsou zdokumentovány v příloze I.

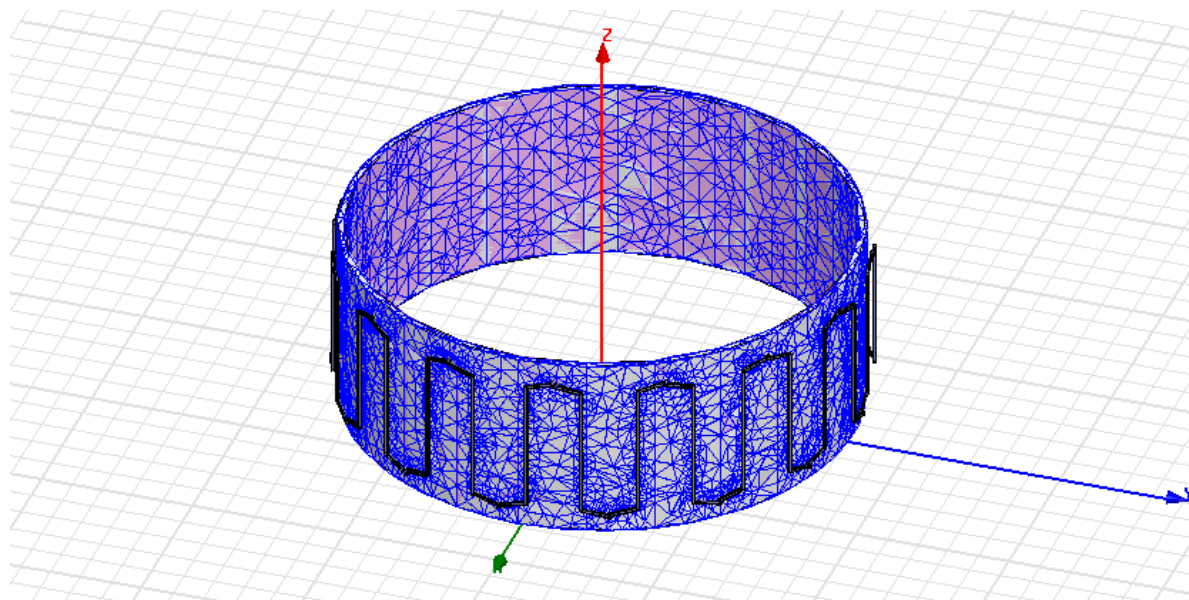
5.5.2. Trubka uvnitř wave induktoru - ePhysics

Síť na povrchu trubky v modelu trubky uvnitř wave induktoru při nastavení analysis setup1 je zobrazena na Obr. 53 (tzn. síť trubky byla automaticky vytvořena pomocí ePhysics).



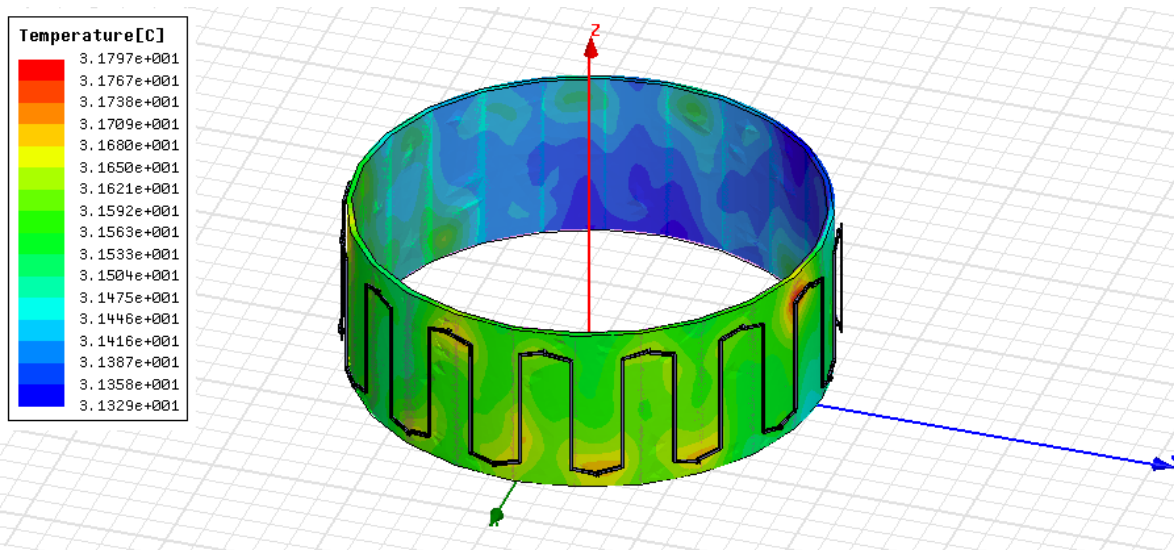
Obr. 53: Trubka uvnitř wave induktoru – rozložení sítě na povrchu trubky – setup1

Na Obr. 54 je totožný model s nastavením setup2 (tzn. síť trubky a ostatní nastavení bylo převzato z vytvořeného modelu v projektu z Maxwell 3D). Síť v obou případech nejsou totožné. Analogicky jako v předchozích případech je Obr. 54 totožný s Obr. 51.



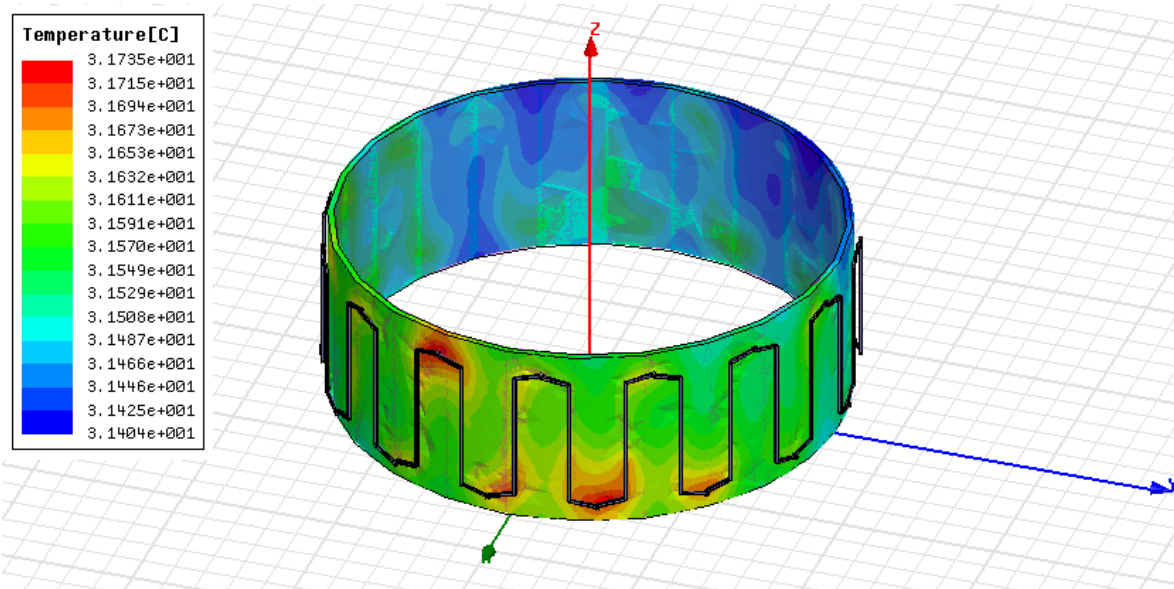
Obr. 54: Trubka uvnitř wave induktoru – rozložení sítě na povrchu trubky – setup2

Na Obr. 55 je možné vidět teplotní rozložení na povrchu trubky při simulaci v nastavení setup1. Teploty se na vnějším plášti trubky pohybují v rozmezí přibližně od 31,15°C do 31,18°C.



Obr. 55: Trubka uvnitř wave induktoru – teplotní rozložení na povrchu trubky – setup1

Na Obr. 56 je teplotní rozložení trubky při simulaci v nastavení setup2. Teplotní rozložení na vnějším povrchu pláště trubky se pohybuje v rozmezí přibližně od 31,14°C do 31,17°C. Porovnáním Obr. 55 a Obr. 56 lze soudit, že je teplotní rozložení u obou nastavení přibližně stejné jako je tomu u všech ostatních modelů. Toto rozložení teplot je dle předpokladu menší, než je tomu u předchozího modelu a to z důvodu jiného konstrukčního uspořádání induktoru.



Obr. 56: Trubka uvnitř wave induktoru – teplotní rozložení na povrchu trubky – setup2

6. Analýza výsledků simulací

Cílem prováděných simulací je posoudit vlivy změny kmitočtu, materiálových vlastností a geometrického uspořádání modelu na velikosti ztrát v plášti induktoru (vsázka). Pro modelování účinků vířivých proudů slouží v prostředí ANSYS Academic Research – Maxwell 3D řešič Eddy Current. V tomto řešiči nelze do simulace zahrnout účinek teploty na vlastnosti feromagnetik. Proto jsou simulace prováděné v pásmu teplot pod Curieho bodem. Vlivy změny kmitočtu, materiálových vlastností a geometrického uspořádání modelu na velikosti ztrát budou hodnoceny v následujících podkapitolách.

6.1. Vliv kmitočtu na ohmické ztráty modelů

V práci byly u všech vytvořených modelů zkoumány závislosti ohmických ztrát na simulovaném kmitočtu u vsázek i induktorů. Výsledky simulací jsou tabelárně zpřehledněny v příloze J. Z těchto výsledků byly vytvořeny grafy závislosti ohmických ztrát na simulační frekvenci.

Ohmické ztráty obecně řešič Eddy Current v programovém prostředí Maxwell 3D počítá ze vztahu [14]:

$$P = \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}{8 \cdot \sigma}} \cdot \int_{S_{ur}} \vec{H}_t \cdot \vec{H}_t^* \cdot dS \quad (W) \quad (19)$$

kde:

ω je úhlový kmitočet ($rad \cdot s^{-1}$); je vyjádřen vztahem $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$; f je simulovaná frekvence (Hz),

μ_0 je permeabilita vakua (H/m),

μ_r je relativní permeabilita (-),

σ je konduktivita (S/m),

\vec{H}_t je tangenciální složka magnetické intenzity (A/m),

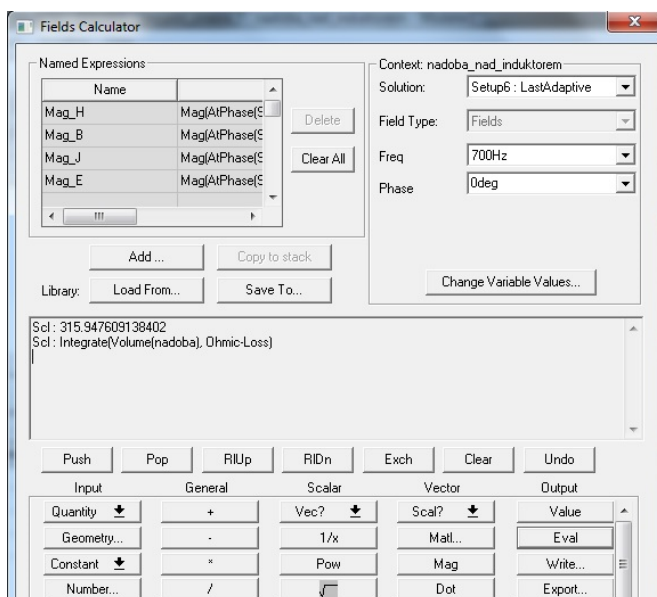
\vec{H}_t^* je komplexně združená tangenciální složka magnetické intenzity (A/m).

Dosazením $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ do rovnice (19), lze získat vztah:

$$P = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}{8 \cdot \sigma}} \cdot \int_{S_{ur}} \vec{H}_t \cdot \vec{H}_t^* \cdot dS \quad (W) \quad (20)$$

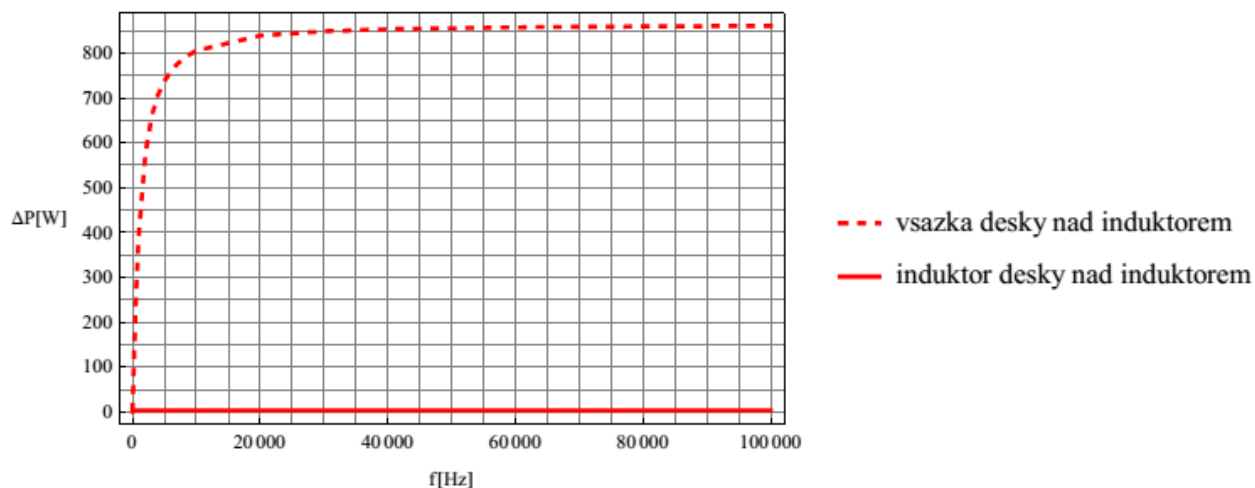
Ze vztahu (20) vyplývá, že na vzniku ohmických ztrát v ohřívaném materiálu se přestává podílet složka daná hysterezí a veškeré ztráty jsou dány účinkem vířivých proudů.

K výpočtu ohmických ztrát lze v prostředí Maxwell 3D použít modul Calculator. Pro výpočet ztrát v Calculatoru je třeba použít následující metodiku zápisu viz Obr. 57.



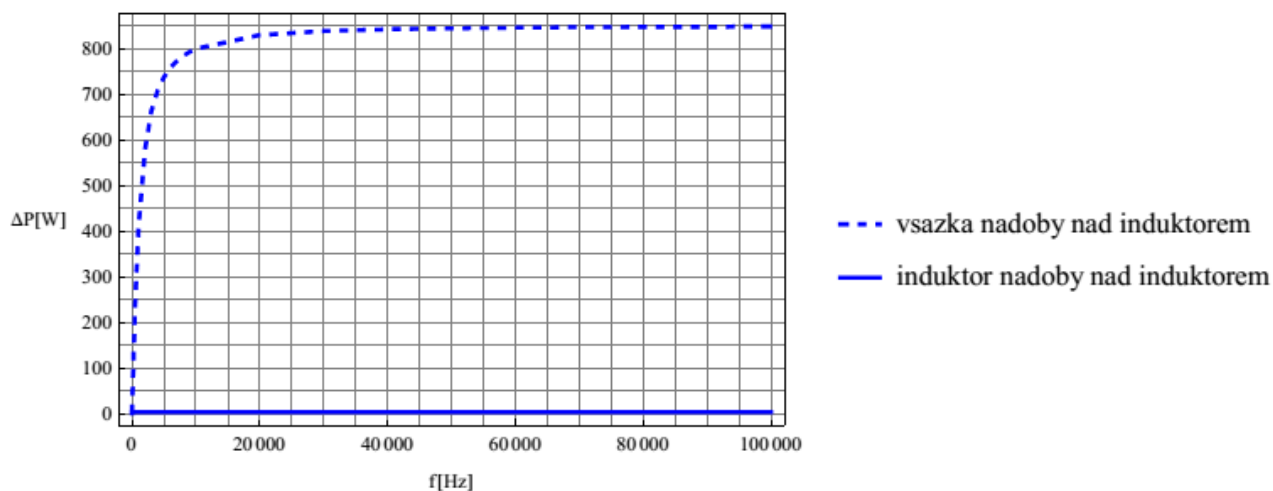
Obr. 57: Maxwell Calculator – příklad výpočtu ohmických ztrát ve vsázce

Na Obr. 58 je možné vysledovat závislost ohmických ztrát na simulační frekvenci pro model desky nad induktorem. Přibližně do 10kHz je průběh ohmických ztrát u desky této závislosti značně strmý a dále pak už jen mírně roste se zvyšující se frekvencí. Ztrátový výkon induktoru tohoto modelu je 4,22 W v celém frekvenčním rozsahu.



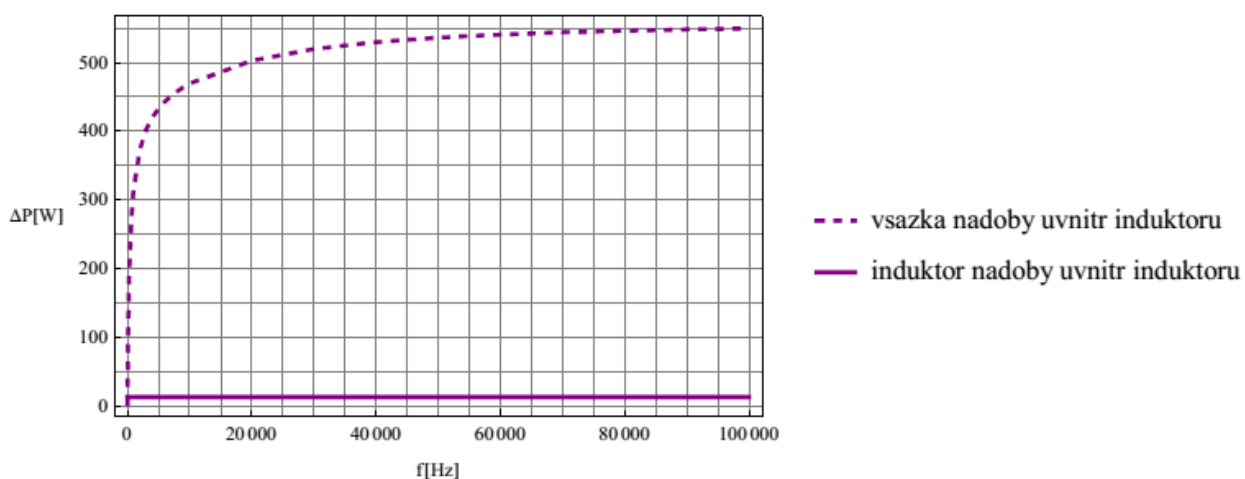
Obr. 58: Závislost ohmických ztrát na frekvenci - model desky nad induktorem

Na Obr. 59 je znázorněna závislost ohmických ztrát na simulační frekvenci modelu nádoby nad induktorem (pozn. průběh ztrát je podobný průběhu ztrát modelu desky nad induktorem). Do přibližně 10 kHz ohmické ztráty nádoby velice strmě rostou s frekvencí a dále se mění už jen velmi málo. Ztrátový výkon induktoru je jako v předchozím případě 4,22 W v celém frekvenčním rozsahu.



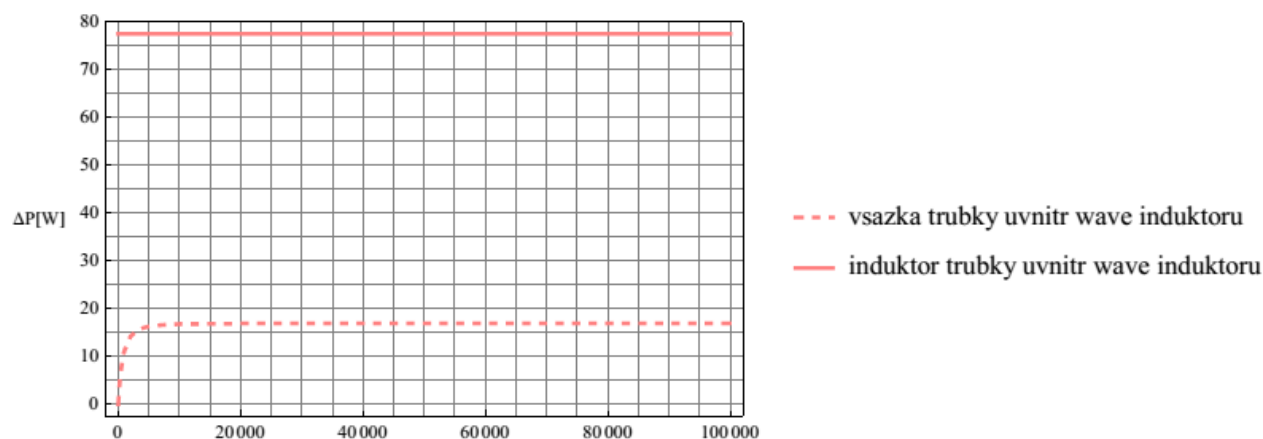
Obr. 59: Závislost ohmických ztrát na frekvenci - model nádoby nad induktorem

Na Obr. 60 jsou průběhy závislosti ohmických ztrát na frekvenci modelu nádoby uvnitř induktoru podobné předchozím případům. Ohmické ztráty nádoby do přibližně 10 kHz velice strmě rostou, následně pak rostou jen nepatrně se zvyšující se frekvencí. Ztrátový výkon induktoru je 12,79 W v celém frekvenčním rozsahu.



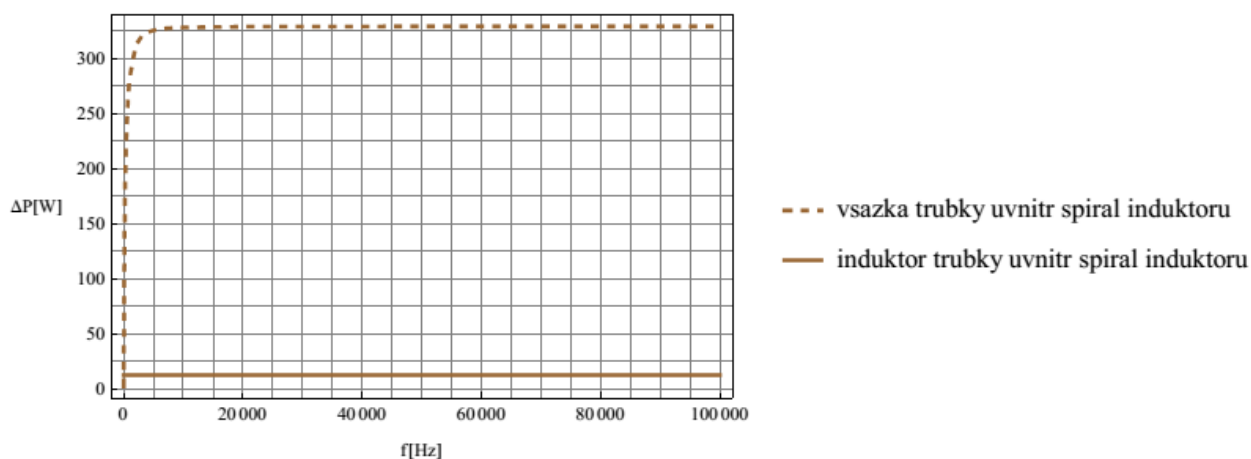
Obr. 60: Závislost ohmických ztrát na frekvenci - model nádoby uvnitř induktoru

Na Obr. 61, na kterém je závislost ohmických ztrát na simulační frekvenci modelu trubky uvnitř wave induktoru, lze vidět, že se značně liší od předchozích výsledků simulace. Ztrátový výkon induktoru je zde vyšší než ohmické ztráty trubky a činí 77,48 W. I při 100 kHz simulační frekvence dosáhly ohmické ztráty trubky nízkých hodnot v porovnání s ostatními modely, zde konkrétně 16,97 W. Z těchto výsledků lze jednoznačně říci, že je tento model zcela neefektivní.



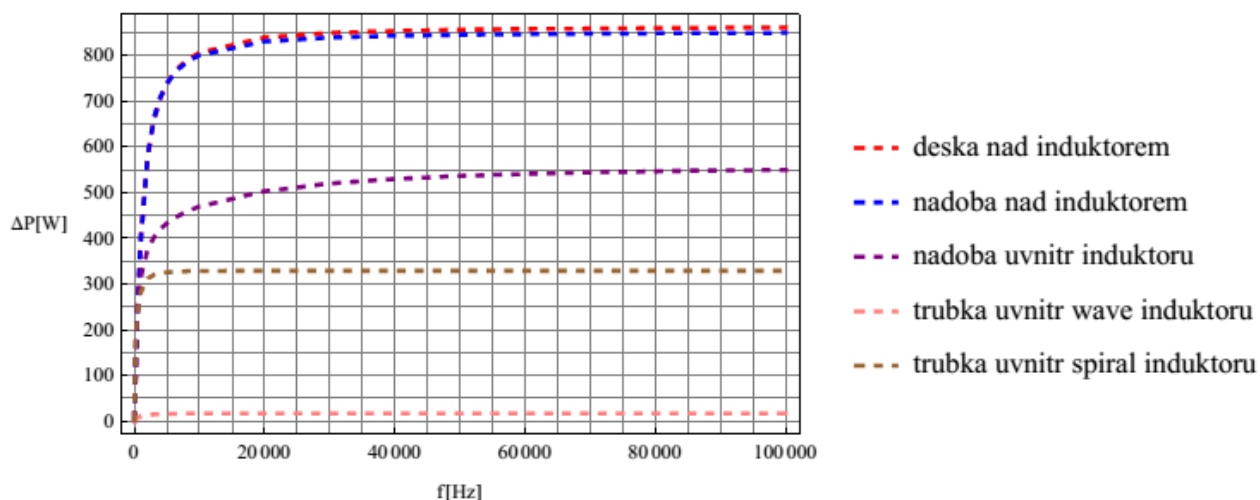
Obr. 61: Závislost ohmických ztrát na frekvenci - model trubky uvnitř wave induktoru

Na Obr. 62 lze vidět závislost ohmických ztrát na simulační frekvenci modelu trubky uvnitř spirál induktoru. Ohmické ztráty trubky se velmi rychle mění do frekvence přibližně 2kHz, pak už je nárůst ztrát s rostoucí frekvencí velice mírný. Ztrátový výkon induktoru je 12,78 W a je konstantní v celém rozsahu změny simulační frekvence.



Obr. 62: Závislost ohmických ztrát na frekvenci - model trubky uvnitř spirál induktoru

Na Obr. 63 je znázorněn jiný pohled na hodnocení ohmických ztrát. Zde lze porovnat mezi sebou pouze ohmické ztráty vsázek jednotlivých modelů. Z tohoto hlediska hodnocení je možné usoudit, že ze všech pěti modelů je možné nejvyšší ohmické ztráty vsázky získat u prvních dvou modelů (tj. modelů desky a nádoby nad induktorem). Nejhorší v tomto porovnání dopadl model trubky uvnitř wave induktoru, který má ohmické ztráty v porovnání s ostatními modely jednoznačně nejmenší.



Obr. 63: Porovnání jednotlivých modelů - závislost ohmických ztrát ve vsázce na frekvenci

Z výsledků simulace lze získat také přehled o účinnosti přenosu jednotlivých modelů. Pro stanovení účinnosti přenosu lze vycházet z výkonové bilance. Protože Maxwell 3D neumožňuje zahrnout do výpočtu ztrátový výkon způsobený konvekcí a radiací, je výsledný vztah pro účinnost přenosu zjednodušen takto:

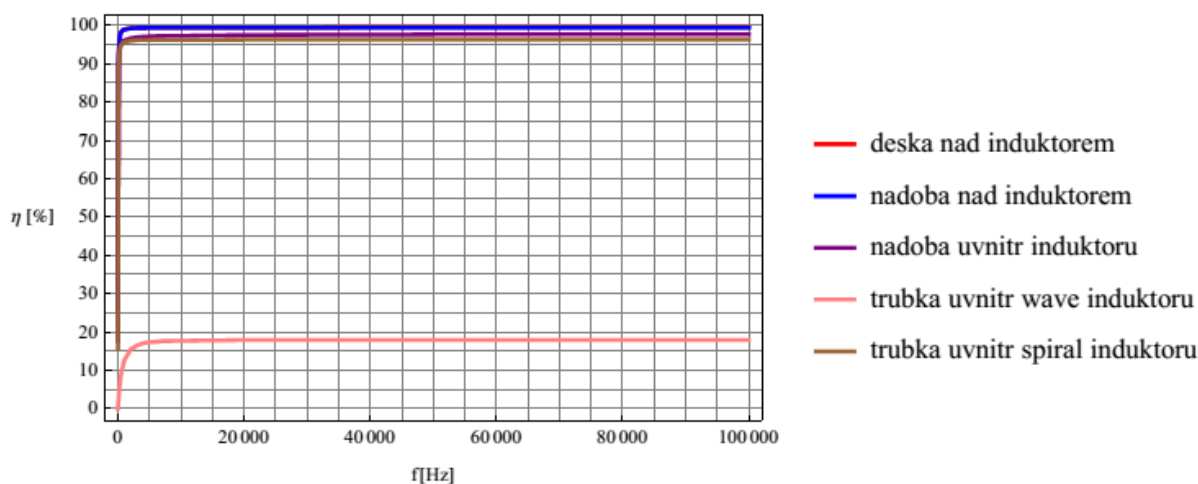
$$\eta = \frac{\Delta P_{vsázky}}{\Delta P_{vsázky} + \Delta P_{induktoru}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (21)$$

kde:

$\Delta P_{vsázky}$ jsou ohmické ztráty vsázky (W),

$\Delta P_{induktoru}$ je ztrátový výkon induktoru (W).

Tyto účinnosti jsou zpřehledněny v příloze J a graficky zobrazeny na Obr. 64. S výjimkou modelu trubky uvnitř wave induktoru se u všech modelů od kmitočtu řádově 1kHz účinnosti téměř neliší a pohybují se nad 95%. Ve výpočtu se ale zanedbávají výkonové ztráty způsobené konvekcí a radiací.



Obr. 64: Porovnání jednotlivých modelů - závislost účinnosti přenosu na frekvenci

6.1.1. Shrnutí vlivu simulačního kmitočtu na ohmické ztráty modelů

Ze vztahu (20), lze usoudit, jak se projeví změna frekvence na ohmických ztrátách vsázky. Tento poznatek lze vysledovat i na výsledných závislostech ztrát na kmitočtu viz Obr. 58 až Obr. 64 u všech modelů. Lze konstatovat, že změna velikosti ohmických ztrát ve vsázce je přibližně do jednotek kHz velmi strmá a dále se průběh ustaluje. Z výsledků simulací je vidět, že nejvyšší účinnosti přenosu lze dosáhnout u prvních dvou modelů (čili modelů desky nad induktorem a nádoby nad induktorem). Nejméně efektivní je z hlediska ohmických ztrát vsázky model trubky uvnitř wave (vlnového) induktoru. V tomto případě totiž ztrátový výkon wave induktoru mnohonásobně převyšuje ohmické ztráty trubky. U všech modelů je ztrátový výkon v induktoru nezávislý na simulační frekvenci a činí zlomek ztrát oproti vsázce, což je příznivé zjištění, neboť snaha je dosáhnout co možná nevyšších ohmických ztrát vsázky a co možná nejnižšího ztrátového výkonu induktoru.

6.2. Vliv materiálových vlastností vsázky na ohmické ztráty ve vsázce

V Tab. 6 lze vidět porovnání ohmických ztrát vsázek jednotlivých modelů vypočtených pomocí modulu Calculator, je – li materiálem vsázky ocel, měď nebo hliník.

Tab. 6: Ohmické ztráty vsázek jednotlivých modelů – vsázkou ocel, měď, hliník

ohmické ztráty (W) pro simulovaný kmitočet 4kHz			
model	vsázka ocel	vsázka Cu	vsázka Al
deska nad induktorem	707,13	30,1	41,85
nádoba nad induktorem	708,29	29,21	40,68
nádoba uvnitř induktoru	444,27	29,27	43,29
trubka uvnitř wave induktoru	16,1	6	8,81
trubka uvnitř spiral induktoru	315,12	23,76	35,74

Ohmické ztráty se v Maxwell 3D, jak již bylo řečeno v kap. 6.1, počítají dle vztahu (19), a při zachování simulované frekvence 4kHz pro všechny modely, je zřejmé, že vliv na ztráty z hlediska materiálových vlastností bude mít relativní permeabilita a konduktivita. Z kap. 2.2.1 vyplývá, že relativní permeabilita mědi a hliníku je v obou případech blízká 1, kdežto relativní permeabilita oceli se mění s intenzitou magnetického pole a s teplotou. Dalším vlivem rozdílnosti ohmických ztrát jsou také různé konduktivity u Cu, Al a oceli. Hodnota konduktivity v prostředí Maxwell 3D u oceli (cast iron) je 1 500 000 S/m, u hliníku (Alluminium) je 38 000 000 S/m a u mědi (Copper) je 58 000 000 S/m.

6.2.1. Shrnutí vlivu materiálových vlastností na ohmické ztráty vsázky

Z Tab. 6 je zjevné, že ohmické ztráty modelu vsázky z oceli se pro simulační frekvenci 4 kHz pohybují řádově okolo stovek wattů s výjimkou modelu trubky uvnitř wave induktoru. Použitím mědi či hliníku jako materiál vsázky se ohmické ztráty pohybují pouze okolo desítek wattů. Jelikož je třeba u vsázky mít co možná nejvyšší ohmické ztráty, aby bylo možné získat určité teplo, je zřejmé, že v tomto případě je vhodným materiálem spíše vsázka z magnetické oceli.

6.3. Vliv geometrie na ohmické ztráty – model nádoba nad induktorem

Protože by zkoumání geometrie na ohmické ztráty všech modelů bylo nepřiměřeně časově náročné, byl vybrán ke zkoumání pouze model nádoby nad induktorem. V tomto zkoumání je možné vycházet z výpočtu hloubky vniku. Pokud je uvažována ocel (cast iron) jako materiál vsázky, lze pro orientační výpočet předpokládat parametry⁸:

- Relativní permeabilita cast iron: $\mu_{rCast-iron} = 60$,
- Permeabilita vakua: $\mu_{0Cast-iron} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$,
- Konduktivita cast iron: $\gamma_{Cast-iron} = 1\,500\,000 \text{ S/m}$,
- Uvažovaná⁹ simulační frekvence $f_{sim} = 40 \text{ kHz}$.

Dosažením do vztahu pro hloubku vniku vyjde:

$$\delta_{model} = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot f_{sim} \cdot \gamma_{Cast-iron} \cdot \mu_{rCast-iron} \cdot \mu_{0Cast-iron}}}$$

$$\delta_{model} = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot 40\,000 \text{ Hz} \cdot 1\,500\,000 \frac{\text{S}}{\text{m}} \cdot 60 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}}} \cdot 1000$$

$$\delta_{model} \approx 0,265 \text{ mm.}$$

⁸ Předpokládané parametry jsou převzaty z cast iron v Maxwell 3D (krom simulační frekvence).

⁹ Simulační frekvence byla zvolena na základě výsledků z kap. 6.1. Pro účely zkoumání geometrie byla vybrána frekvence z té části závislosti ohmických ztrát na frekvenci, kde se ztráty s frekvencí už téměř nemění. Frekvence byla tedy zvolena 40 kHz.

Hloubku vniku pro tento model je možné uvažovat přibližně 0,3 mm. Aby bylo možné posoudit vliv ohmických ztrát z hlediska geometrie modelu, pro jednoduchost byla zkoumána změna tloušťky stěny nádoby v závislosti na ohmických ztrátách. Uvažované tloušťky stěny pro tento model jsou 10 mm, 3 mm, 1 mm, dále přibližně $3 \cdot \delta_{model}$, čili lze uvažovat přibližně 0,8 mm, a $1 \cdot \delta_{model}$, čili přibližně 0,3 mm. Výsledky simulací jsou v Tab. 7.

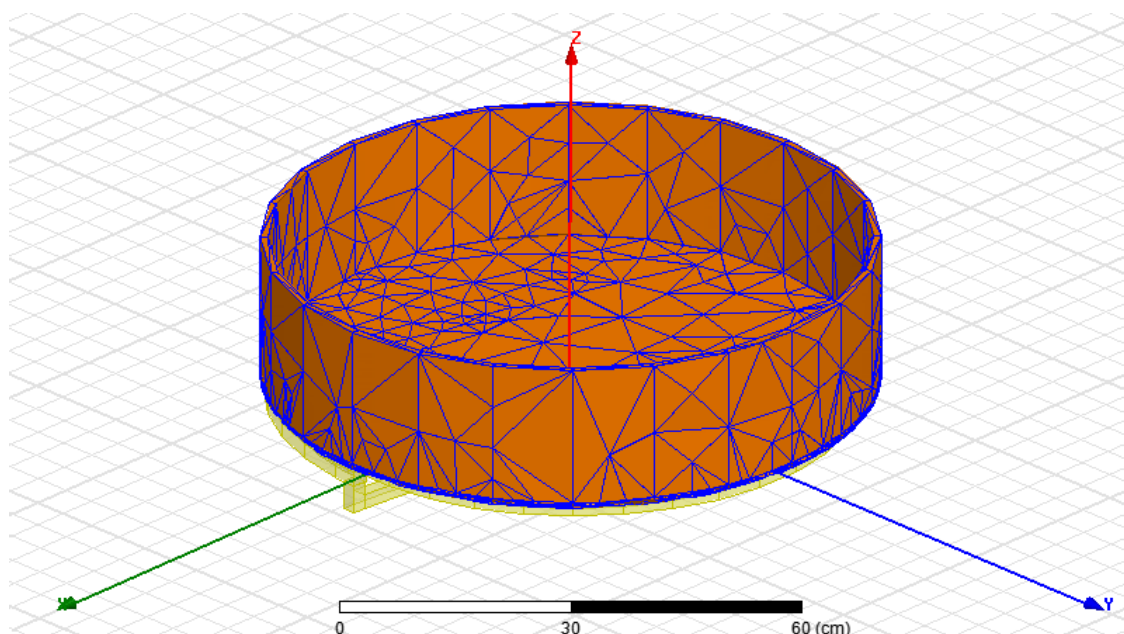
Tab. 7: Model nádoby nad induktorem – závislost tloušťky stěny nádoby na ohmických ztrátách nádoby pro $f_{sim}=4\text{kHz}$ a $f_{sim}=40\text{kHz}$

$d_{stěny}$ (mm)	$\Delta P_{vsazky,4\text{kHz}}$ (W)	$\Delta P_{vsazky,40\text{kHz}}$ (W)
10	708,29	846,63
3	745,22	1130,49
1	1347,27	-
0,8	-	-
0,3	-	-

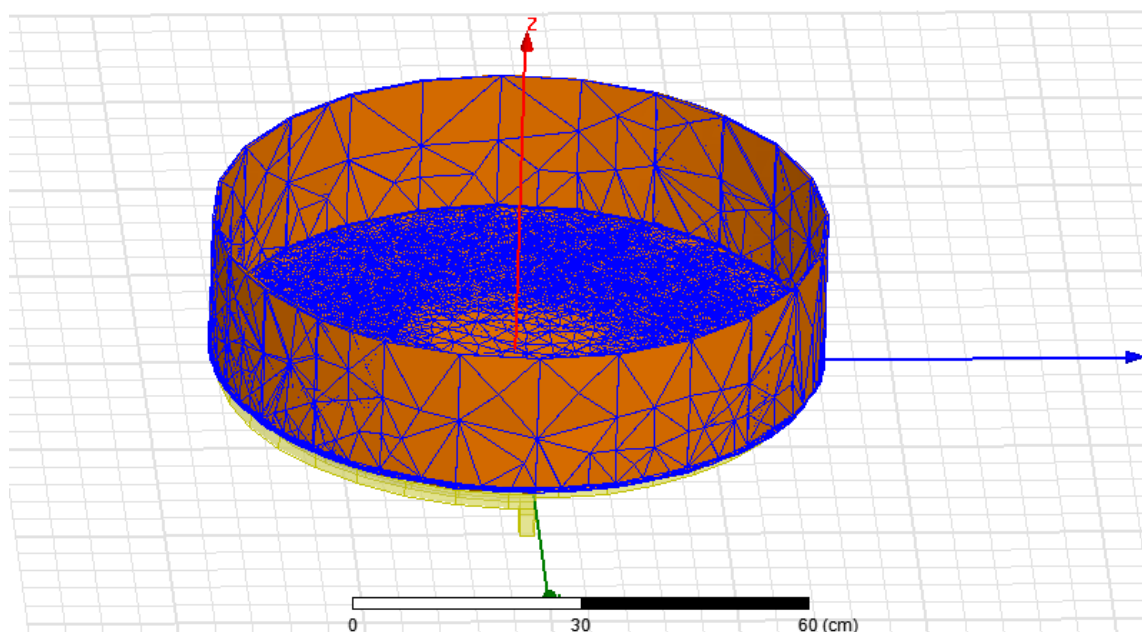
6.3.1. Maxwell 3D - Změna tloušťky stěny u modelu nádoba nad

induktorem – tloušťka 10 mm a 3 mm – simulační frekvence 40 kHz

Na Obr. 65 a Obr. 66 je poukázáno na rozdíly sítí při tloušťce stěny nádoby 10 mm a 3 mm. Pro stěnu tlustou 3 mm je síť mnohem hustší, než pro 10 mm. Tím se vysvětluje, proč ohmické ztráty v Tab. 7 vycházejí pro stěnu 10 mm menší než pro 3 mm. Stěna tlustá 10 mm má menší hustotu sítě a proto je výpočet ohmických ztrát méně přesný.



Obr. 65: Síť na modelu nádoby nad induktorem - stěna 10 mm



Obr. 66: Síť na modelu nádoby nad induktorem - stěna 3 mm

6.3.2. Shrnutí vlivu změny stěny nádoby na její ohmické ztráty

Z Tab. 7 je možné posoudit vliv tloušťky stěny nádoby na ohmických ztrátách. Výsledky simulace ukazují, že se zmenšováním tloušťky stěny (od 10 mm do 1 mm pro tutéž simulační frekvenci) se zvyšují ohmické ztráty. Tyto výsledky jsou ale zatíženy chybou, protože jak lze dokázat z kap. 6.3.1 nejsou hustoty sítí stejné pro různou tloušťku stěny.

Je zřejmé, že z hlediska tvorby modelu v prostředí simulačního programu Maxwell 3D budou nároky na hustotu sítě se zmenšující se tloušťkou stěny výrazně narůstat stejně tak jako časová náročnost výpočtu. V daném případě od 1 mm tlusté stěny a 40kHz simulační frekvence již pomocí Maxwell 3D nebylo možné z důvodu nízkého výpočetního výkonu PC další simulace realizovat viz Tab. 7.

Obecněji lze tedy říci, že pro zvýšení ohmických ztrát ve vsázce je důležité vhodně zvolit simulační frekvenci a také vhodně zvolit tloušťku stěny vsázky. Tímto způsobem se dá také ušetřit na množství použitého materiálu vsázky.

7. Závěr

Simulační prostředí Maxwell 3D od ANSYS Academic Research není na katedře tak dlouho, proto pro práci v tomto programu nejsou k dispozici žádné výukové materiály a je třeba využívat pouze omezenou dostupnou literaturu (manuály, online help). Z tohoto důvodu je modelování a následné simulování složitější, protože je třeba nejprve prostudovat významy použitých předdefinovaných tvarů, jednotlivých nastavení, zadávání parametrů atd. Simulování v prostředí Maxwell 3D je tedy časově náročnější. Protože samotný Maxwell 3D neumožňuje analýzu tepelných dějů, bylo pro zkoumání této problematiky použito prostředí ePhysics. Bohužel se nepodařilo k ePhysics dohledat příslušný manuál a proto bylo čerpání znalostí omezeno pouze na online help v tomto programu.

I přes velikou časovou náročnost bylo v této práci dosaženo všech stanovených cílů:

- byla popsána teorie indukčního ohřevu a její aplikace v průmyslu a jiných odvětvích,
- dále byl proveden návrh pěti modelů indukčního ohřevu vycházejících z použití v domácnosti,
- následně byly zkoumány výsledky elektro – tepelných dějů, a vlivů změn kmitočtu, materiálových vlastností a geometrického uspořádání u těchto modelů a byly ověřeny základní principy.

Ze získaných výsledků je možné zhodnotit, že při vhodné volbě užitých materiálů, geometrického uspořádání modelu, dále vhodně zvolené simulační frekvenci a také vhodně zvolené tloušťky stěny vsázky lze dosáhnout vysoké účinnosti přenosu indukčního ohřevu v modelech. U těchto modelů bylo dosaženo účinnosti 95% a výše avšak bez úvahy ztrátového výkonu způsobeného konvekcí a radiací.

Je třeba též zdůraznit, že Maxwell 3D uvažuje mnoho zjednodušení při simulačních výpočtech. Jedním z těchto zjednodušení je např. neuvažování složky hystereze při výpočtu ohmických ztrát feromagnetických materiálů. Do simulací nelze zahrnout vliv účinku teploty na vlastnosti feromagnetik. Proto jsou simulace prováděné v pásmu teplot pod Curieho bodem. Některá data se při simulaci dokonce vůbec nepodařilo získat z důvodu nízkého výpočetního výkonu PC, např. ohmické ztráty nádoby při tloušťce stěny 1 mm se simulační frekvencí 40kHz. Aby tedy bylo možné aplikovat získané výsledky v praxi, byl by třeba mít k dispozici mnohem delší časový horizont na hlubší ověření výsledků simulací.

Seznam použité literatury

- [1] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika* [online]. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 264 s. [cit. 2014-10-15]. ISBN 978-80-01-04938-9. Dostupné z: http://k315.feld.cvut.cz/CD_MPO/CVUT-3-Elektrotepelnna.pdf
- [2] RADA, Josef. *Elektrotepelná technika II*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1983, 187 s.
- [3] *Indukční ohřev* [online]. Wikipedia. [cit. 2014-10-15]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Induk%C4%8Dn%C3%AD_oh%C5%99ev
- [4] ČERNÝ, Václav. *Indukční ohřev (2)* [online]. [cit. 2014-10-15]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/e1110255.pdf>
- [5] *Indukční ohřev* [online]. fyzmatik. [cit. 2014-10-15]. Dostupné z: <http://fyzmatik.pise.cz/826-indukcni-ohrev.html>
- [6] *Varné desky a trouby* [online]. Energetický poradce PRE. [cit. 2014-10-15]. Dostupné z: <http://www.energetickyporadce.cz/cs/uspory-energie/domaci-spotrebice/varne-desky-a-trouby/>
- [7] DROZD, Zdeněk. *Do you know why...induction cooks?* [online]. Charles University in Prague. [cit. 2014-11-12]. Dostupné z: http://www.mff.cuni.cz/to.en/verejnost/zpravicky/02_indukce.htm
- [8] ČERNÝ, Václav. *Indukční ohřev (1)* [online]. ELEKTRO časopis pro elektrotechniku. [cit. 2015-03-07]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/e1100256.pdf>
- [9] ČERNÝ, Václav. *Indukční ohřev (3)* [online]. ELEKTRO časopis pro elektrotechniku. [cit. 2015-03-07]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25267
- [10] ANSOFT. *Maxwell 3D Electromagnetic and Electromechanical Analysis* [online]. 2006 [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell3D_V11.pdf
- [11] FINK, Milan a Ladislav ŘEZNÍČEK. *FEM/MKP – základy použití metody konečných prvků pro technické výpočty v programu Autodesk Inventor Professional* [online]. 2006 [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: <http://www.spstrutnov.cz/o-skole/projekty/technicke-vypocty/skripta-fem-mkp.pdf>
- [12] ANSYS Academic Research EM. *Maxwell 3D a ePhysics online help*
- [13] RADA, Josef. *Elektrotepelná technika*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985, 344 s.
- [14] ANSYS Academic Research EM. *Maxwell 3D online help - ohmic loss for an Eddy Current Solution*
- [15] REINBOTH, Hermann. *Vlastnosti a použití magnetických materiálů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1975, 510 s.
- [16] KYNCL J., NOVÁK Z. *Výukový materiál vytvořený v prostředí Mathematica*

Seznam obrázků

Obr. 1: Princip indukčního ohřevu kovového válce [8].....	9
Obr. 2: Typické závislosti relativní permeability na teplotě pro feromagnetickou ocel [16]	11
Obr. 3: Náhradní uspořádání dvou sousých elektrických obvodů (cívka a vsázka) [1].....	12
Obr. 4: Náhradní elektrické schéma uspořádání dvou sousých obvodů [1].....	12
Obr. 5: Zjednodušené náhradní elektrické schéma uspořádání dvou sousých obvodů [1].....	14
Obr. 6: Tavící indukční zařízení - indukční kelímková pec [9]	15
Obr. 7: Tavící indukční zařízení - kanálková pec [9].....	16
Obr. 8: Princip indukčního vařiče [7], [5].....	16
Obr. 9: Maxwell 3D - Polygon helix.....	19
Obr. 10: Maxwell 3D - Recangular helix.....	20
Obr. 11: Maxwell 3D - Rectangular spiral.....	21
Obr. 12: Maxwell 3D - Wave coil.....	22
Obr. 13: Nastavení analysis setup modelu Maxwell 3D - general.....	28
Obr. 14: Nastavení setup modelu Maxwell 3D - convergence	29
Obr. 15: Nastavení setup modelu Maxwell 3D – solver	29
Obr. 16: Vedení tepla prouděním [1]	31
Obr. 17: Spektrální zářivost pro šedivý a černý povrch [1]	32
Obr. 18: Emisivity jednotlivých materiálů [1]	32
Obr. 19: ePhysics - Basic convection and radiation boundary.....	34
Obr. 20: ePhysics – analysis setup - solver – external load	35
Obr. 21: Model - deska nad induktorem	36
Obr. 22: Deska nad induktorem - rozložení sítě desky – horní pohled.....	37
Obr. 23: Deska nad induktorem - rozložení sítě na povrchu desky – spodní pohled - bez viditelnosti induktoru.....	37
Obr. 24: Deska nad induktorem –rozložení magnetické indukce na povrchu desky – bez viditelnosti induktoru – spodní pohled	38
Obr. 25: Deska nad induktorem – síť desky – ePhysics – spodní pohled – setup1.....	39
Obr. 26: Deska nad induktorem – síť na povrchu desky – ePhysics – spodní pohled – setup2.....	39
Obr. 27: Deska nad induktorem - teplotní rozložení na povrchu desky – spodní pohled – setup1. 40	
Obr. 28: Deska nad induktorem - teplotní rozložení na povrchu desky – spodní pohled – setup2. 40	
Obr. 29: Model – nádoba nad induktorem	41
Obr. 30: Nádoba nad induktorem – rozložení sítě na povrchu nádoby.....	41
Obr. 31: Nádoba nad induktorem – rozložení magnetické indukce na povrchu nádoby – spodní pohled – bez viditelnosti induktoru.....	42
Obr. 32: Nádoba nad induktorem – rozložení sítě na povrchu nádoby – ePhysics – setup1	43
Obr. 33: Nádoba nad induktorem – rozložení sítě na povrchu nádoby – ePhysics – setup2	43
Obr. 34: Nádoba nad induktorem –teplotní rozložení na povrchu nádoby – setup1.....	44
Obr. 35: Nádoba nad induktorem – teplotní rozložení na povrchu nádoby – setup2.....	44
Obr. 36: Model - nádoba uvnitř induktoru	45
Obr. 37: Nádoba uvnitř induktoru – rozložení sítě na povrchu nádoby.....	45
Obr. 38: Nádoba uvnitř induktoru –rozložení magnetické indukce na povrchu nádoby – bez viditelnosti induktoru	46

Obr. 39: Nádoba uvnitř induktoru — rozložení sítě na povrchu nádoby – setup1	47
Obr. 40: Nádoba uvnitř induktoru — rozložení sítě na povrchu nádoby – setup2	47
Obr. 41: Nádoba uvnitř induktoru –teplotní rozložení na povrchu nádoby – setup1.....	48
Obr. 42: Nádoba uvnitř induktoru – teplotní rozložení na povrchu nádoby – setup2.....	48
Obr. 43: Model – trubka uvnitř spirál induktoru.....	49
Obr. 44: Trubka uvnitř spirál induktoru - rozložení sítě na povrchu trubky.....	49
Obr. 45: Trubka uvnitř spirál induktoru - rozložení magnetické indukce na povrchu trubky - bez viditelnosti induktoru	50
Obr. 46: Trubka uvnitř spirál induktoru – rozložení sítě na povrchu trubky – setup1.....	51
Obr. 47: Trubka uvnitř spirál induktoru – rozložení sítě na povrchu trubky – setup2.....	51
Obr. 48: Trubka uvnitř spirál induktoru –teplotní rozložení na povrchu trubky – setup1	52
Obr. 49: Trubka uvnitř spirál induktoru – teplotní rozložení na povrchu trubky – setup2.....	52
Obr. 50: Model – trubka uvnitř wave (vlnového) induktoru.....	53
Obr. 51: Trubka uvnitř wave induktoru – rozložení sítě na povrchu trubky.....	53
Obr. 52: Trubka uvnitř wave induktoru – rozložení magnetické indukce na povrchu trubky	54
Obr. 53: Trubka uvnitř wave induktoru – rozložení sítě na povrchu trubky – setup1	55
Obr. 54: Trubka uvnitř wave induktoru – rozložení sítě na povrchu trubky – setup2	55
Obr. 55: Trubka uvnitř wave induktoru – teplotní rozložení na povrchu trubky – setup1.....	56
Obr. 56: Trubka uvnitř wave induktoru – teplotní rozložení na povrchu trubky – setup2.....	56
Obr. 57: Maxwell Calculator – příklad výpočtu ohmických ztrát ve vsázce	58
Obr. 58: Závislost ohmických ztrát na frekvenci - model desky nad induktorem	58
Obr. 59: Závislost ohmických ztrát na frekvenci - model nádoby nad induktorem.....	59
Obr. 60: Závislost ohmických ztrát na frekvenci - model nádoby uvnitř induktoru.....	59
Obr. 61: Závislost ohmických ztrát na frekvenci - model trubky uvnitř wave induktoru.....	60
Obr. 62: Závislost ohmických ztrát na frekvenci - model trubky uvnitř spirál induktoru	60
Obr. 63: Porovnání jednotlivých modelů - závislost ohmických ztrát ve vsázce na frekvenci	61
Obr. 64: Porovnání jednotlivých modelů - závislost účinnosti přenosu na frekvenci	62
Obr. 65: Síť na modelu nádoby nad induktorem - stěna 10 mm.....	64
Obr. 66: Síť na modelu nádoby nad induktorem - stěna 3 mm.....	65

Seznam tabulek

Tab. 1: Základní parametry modelu desky nad induktorem	23
Tab. 2: Základní parametry modelu nádoba nad induktorem	24
Tab. 3: Základní parametry modelu nádoby uvnitř induktoru	25
Tab. 4: Základní parametry modelu trubky uvnitř spiral induktoru.....	26
Tab. 5: Základní parametry modelu trubky uvnitř wave induktoru	27
Tab. 6: Ohmické ztráty vsázek jednotlivých modelů – vsázkou ocel, měď, hliník.....	62
Tab. 7: Model nádoby nad induktorem – závislost tloušťky stěny nádoby na ohmických ztrátách nádoby pro $f_{sim}=4\text{kHz}$ a $f_{sim}=40\text{kHz}$	64

Seznam příloh

Příloha A: Objasnění parametrů Polygon helix

Příloha B: Objasnění parametrů Rectangular helix

Příloha C: Objasnění parametrů Rectangular spiral

Příloha D: Objasnění parametrů Wave coil

Příloha E: Výsledky simulací modelu desky nad induktorem – simulační frekvence 4kHz

Příloha F: Výsledky simulací modelu nádoby nad induktorem – simulační frekvence 4kHz

Příloha G: Výsledky simulací modelu nádoby uvnitř induktoru – simulační frekvence 4kHz

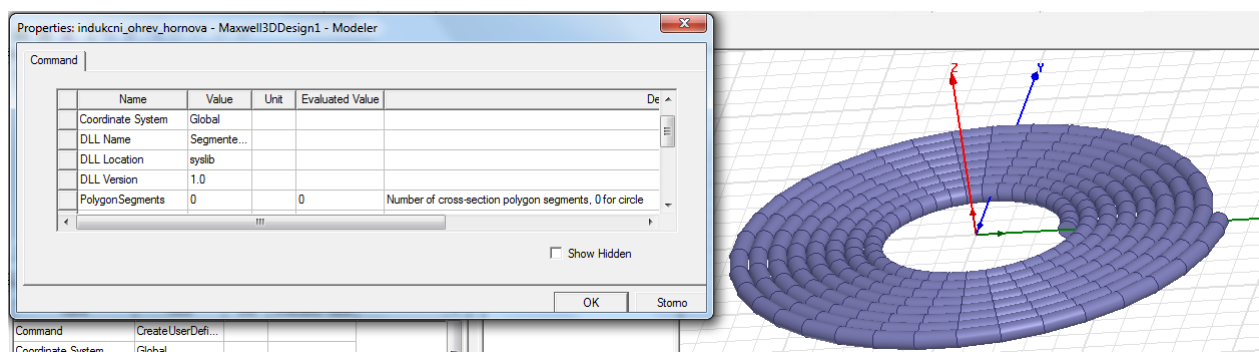
Příloha H: Výsledky simulací modelu trubky uvnitř spiral induktoru – simulační frekvence 4kHz

Příloha I: Výsledky simulací modelu trubky uvnitř wave induktoru – simulační frekvence 4kHz

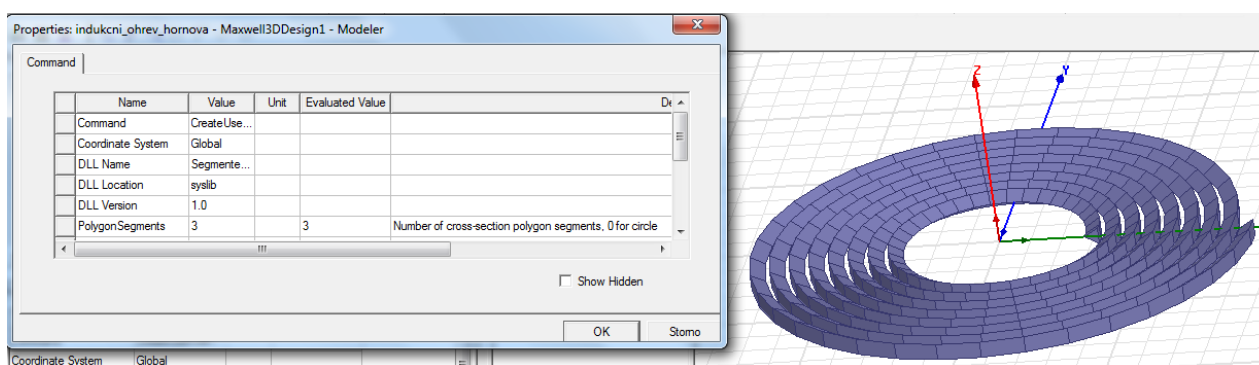
Příloha J: Tabulky výsledků vlivu kmitočtu na ohmické ztráty modelů – simulační frekvence 4kHz

Příloha A

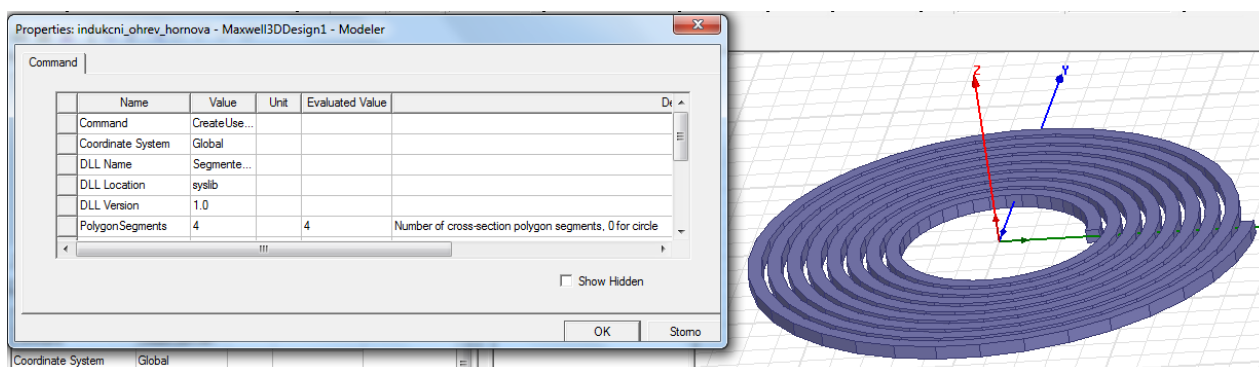
Pro větší objasnění parametrů Polygon helix jsou v příloze A obrázky, jenž upřesňují význam těchto parametrů.



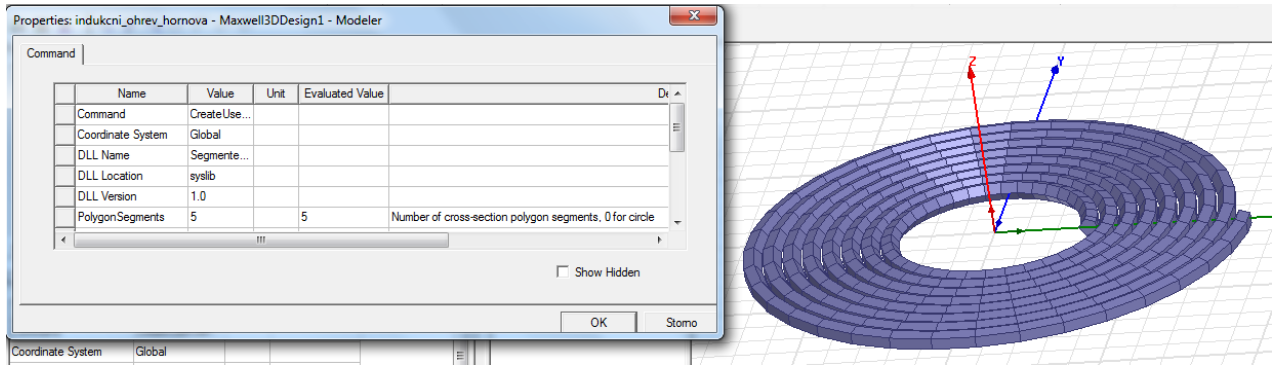
Obrázek 1: Polygon helix - polygon segments = 0



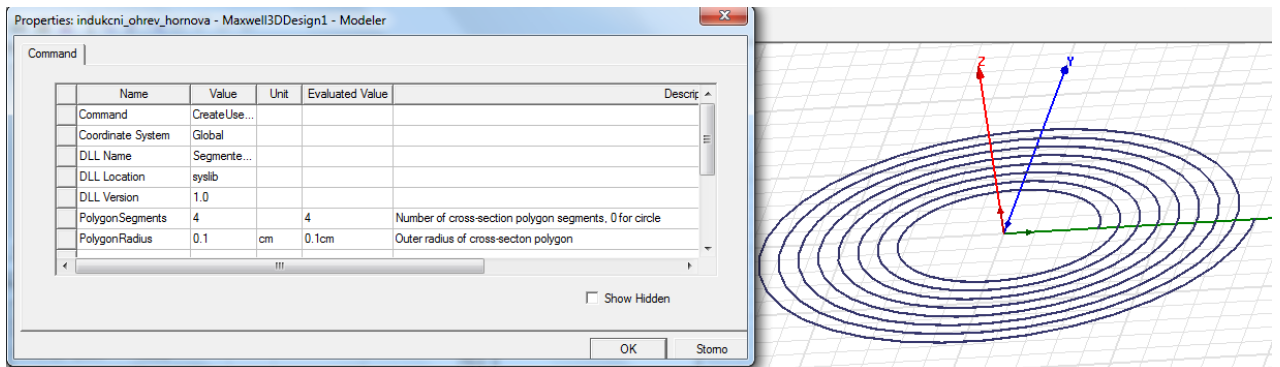
Obrázek 2: Polygon helix - polygon segments = 3



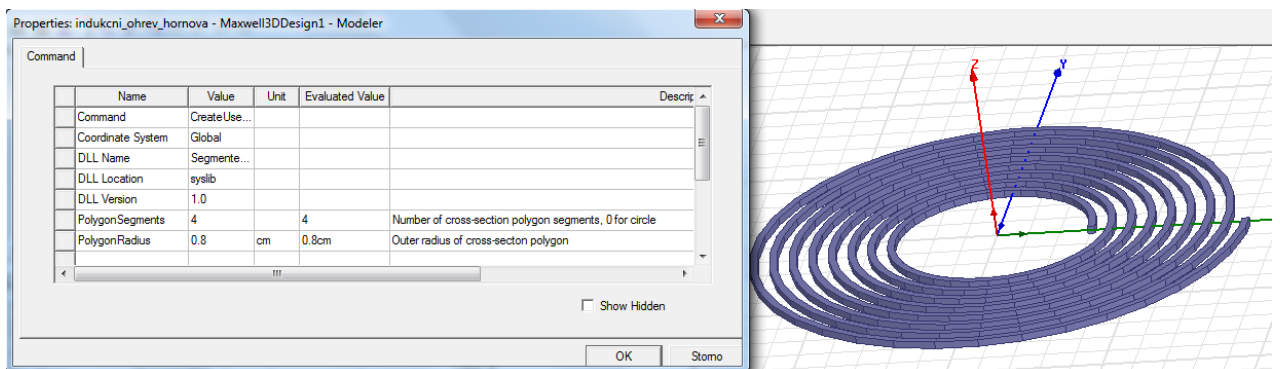
Obrázek 3: Polygon helix - polygon segments = 4



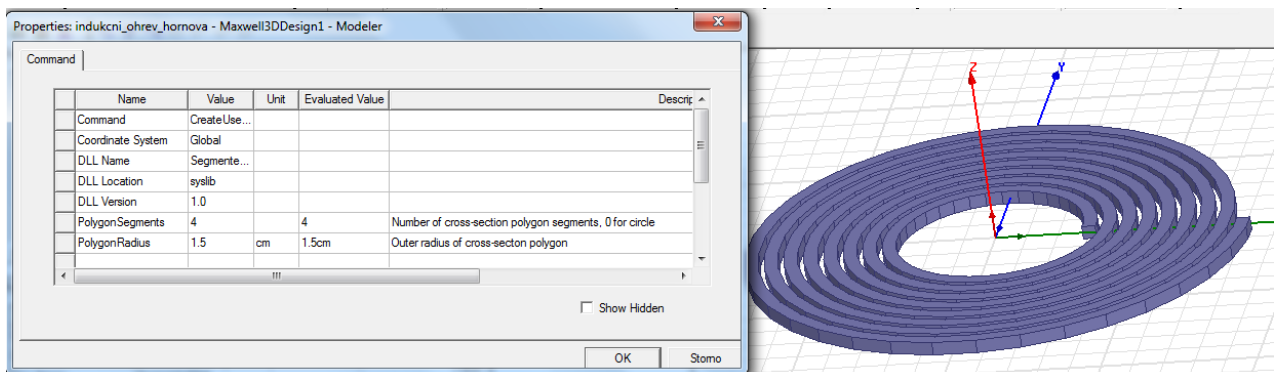
Obrázek 4: Polygon helix - polygon segments = 5



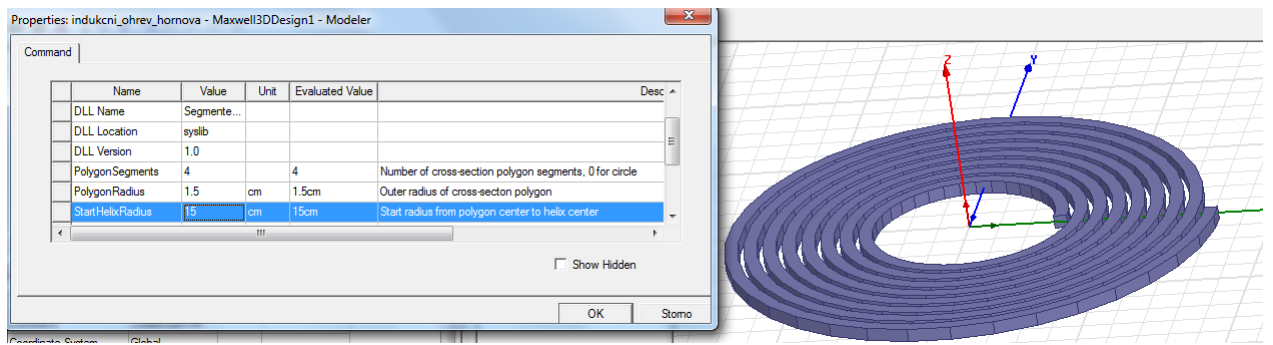
Obrázek 5: Polygon helix - polygon radius = 0,1 cm



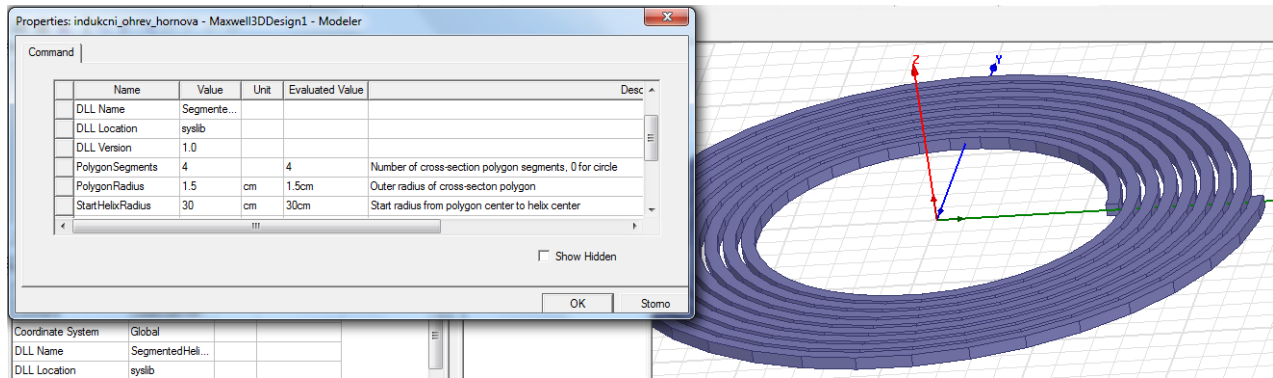
Obrázek 6: Polygon helix - polygon radius = 0,8 cm



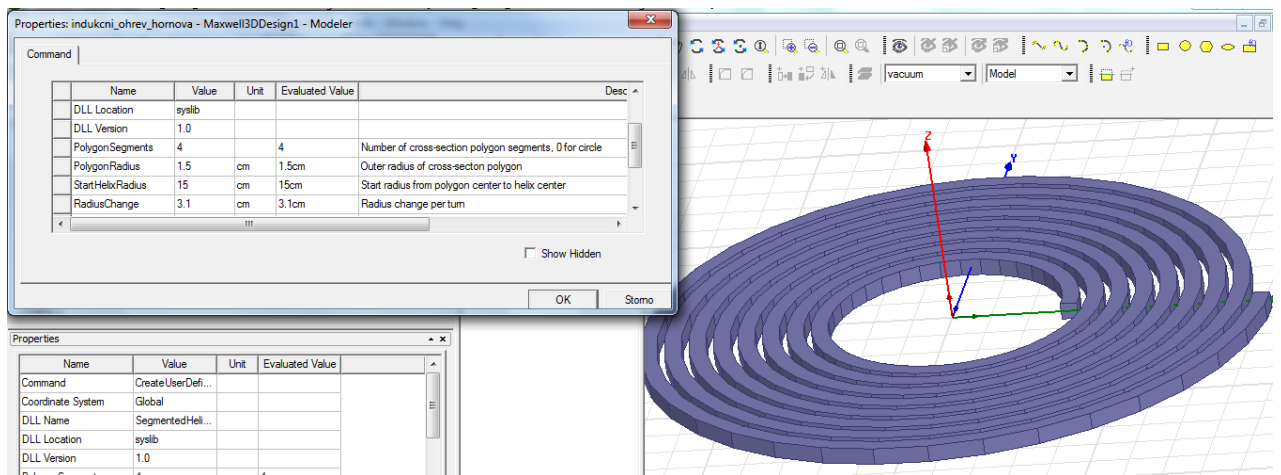
Obrázek 7: Polygon helix - polygon radius = 1,5 cm



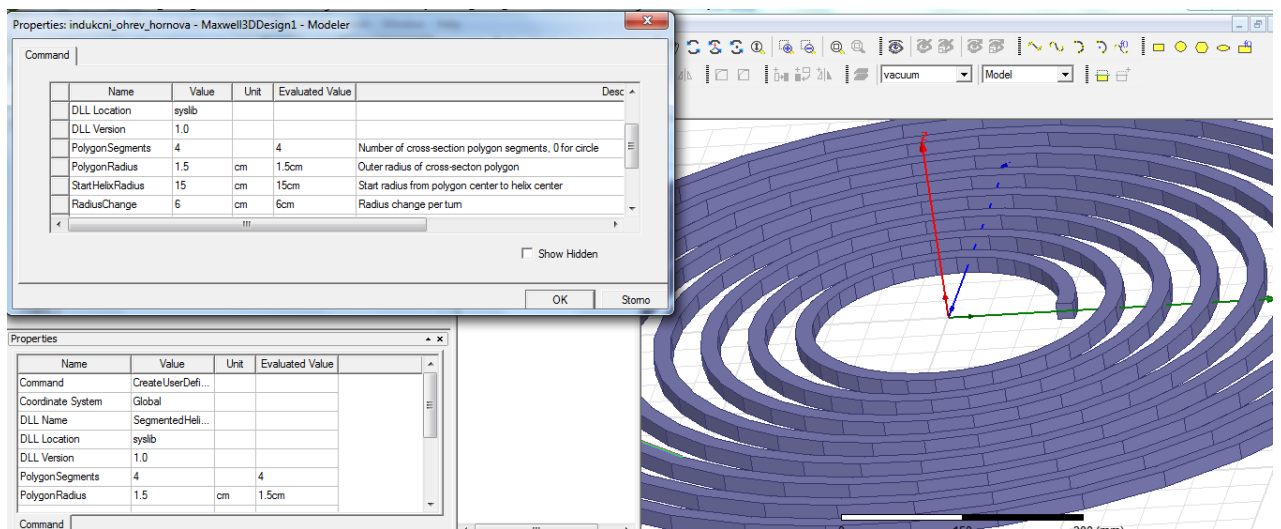
Obrázek 8: Polygon helix - Start helix radius = 15 cm



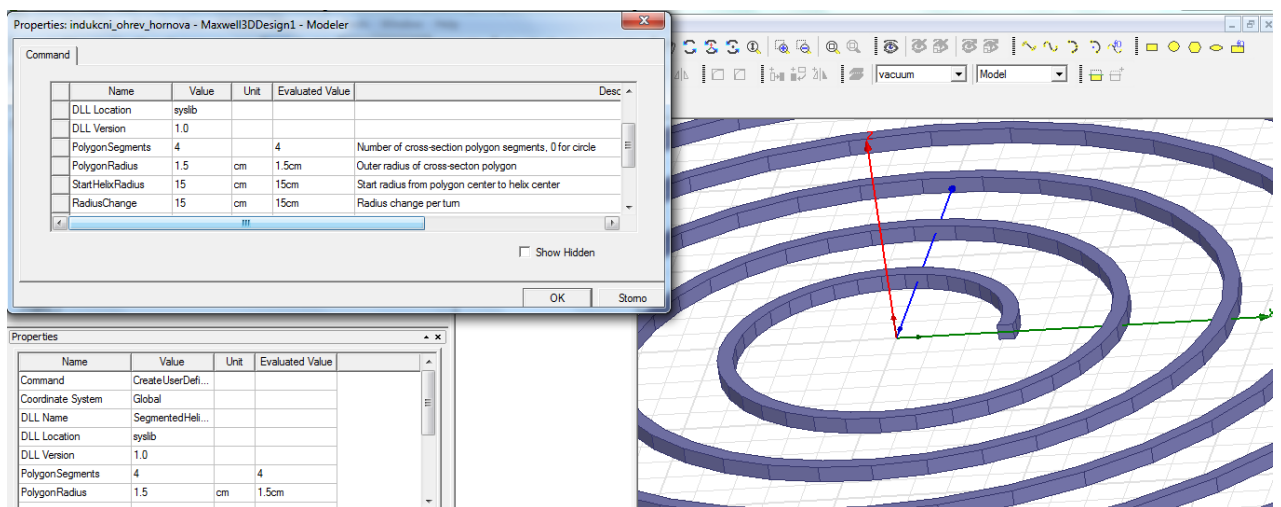
Obrázek 9: Polygon helix - Start helix radius = 30 cm



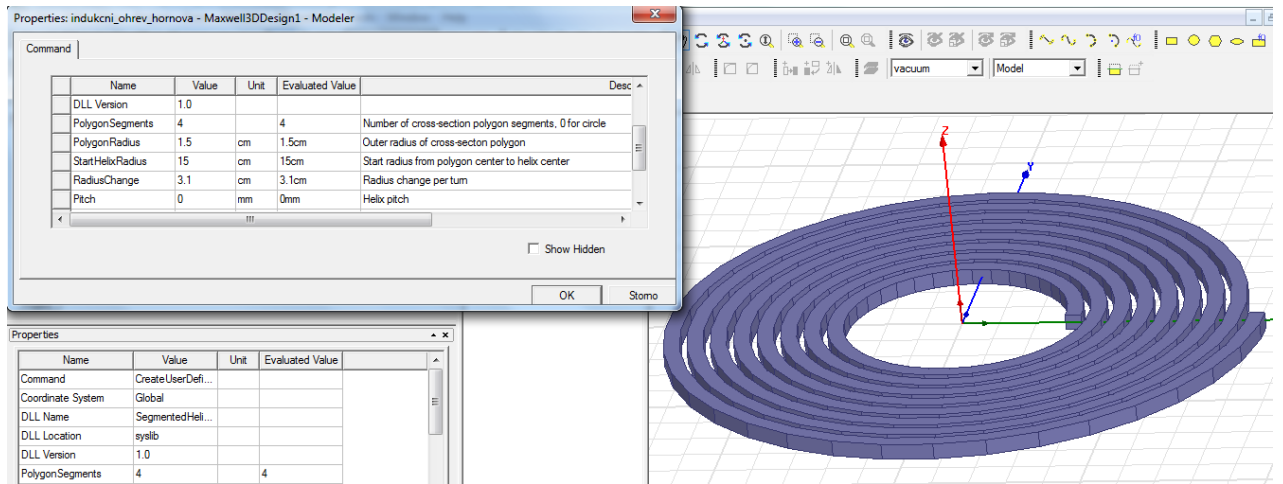
Obrázek 10: Polygon helix - radius change = 3,1 cm



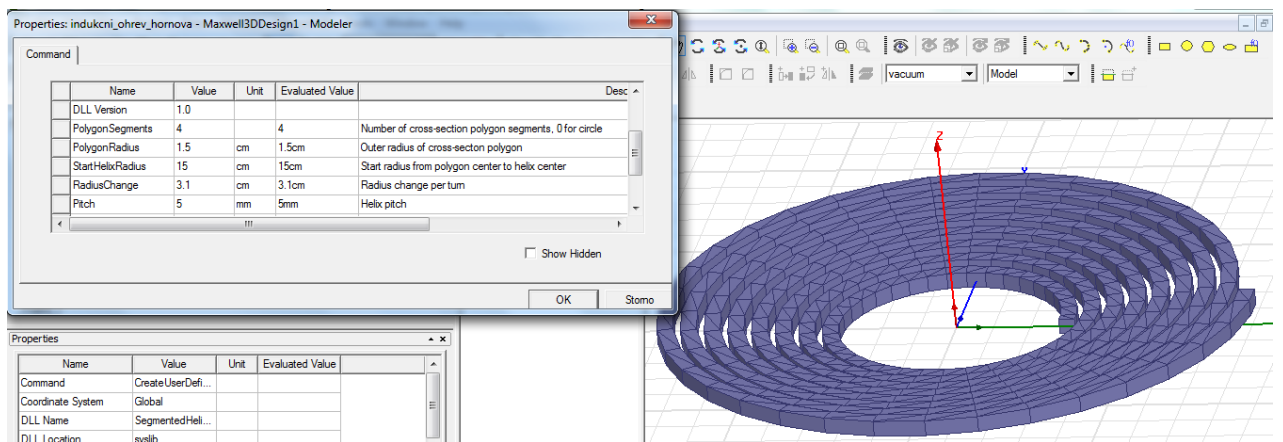
Obrázek 11: Polygon helix - radius change = 6 cm



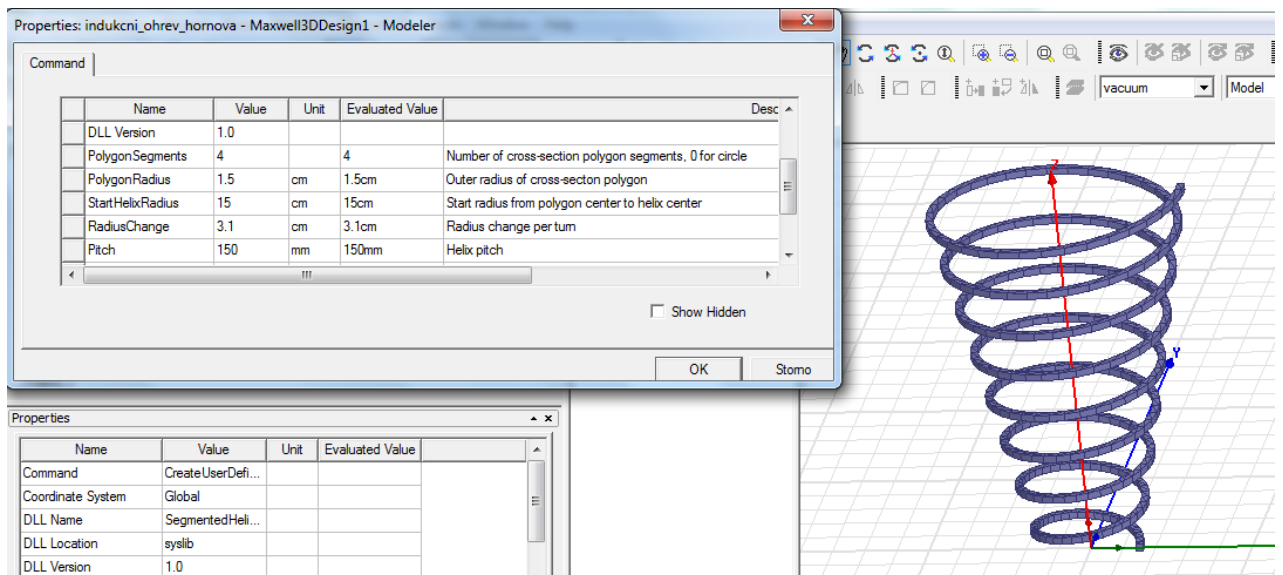
Obrázek 12: Polygon helix - radius change = 15 cm



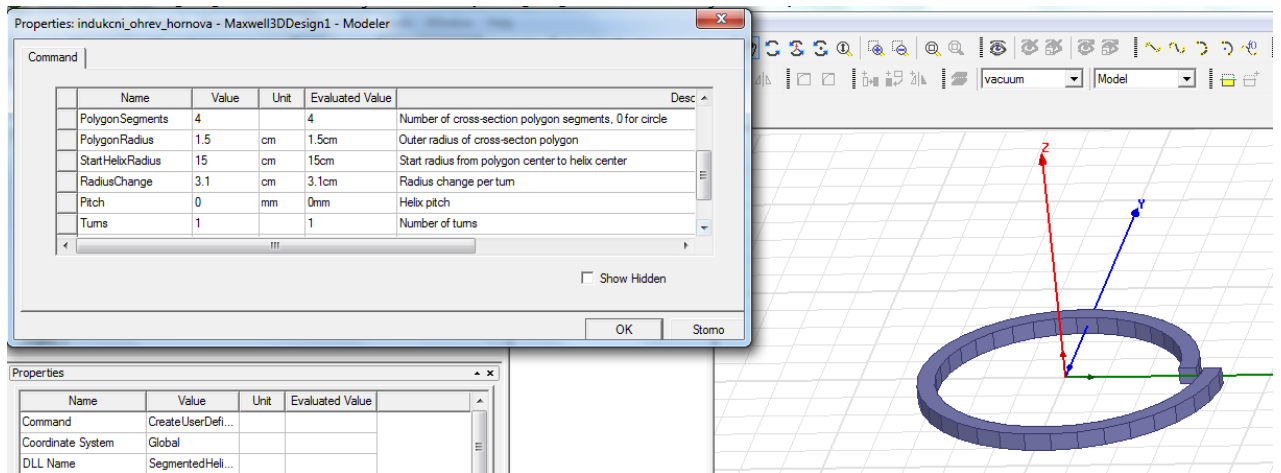
Obrázek 13: Polygon helix - pitch = 0 mm



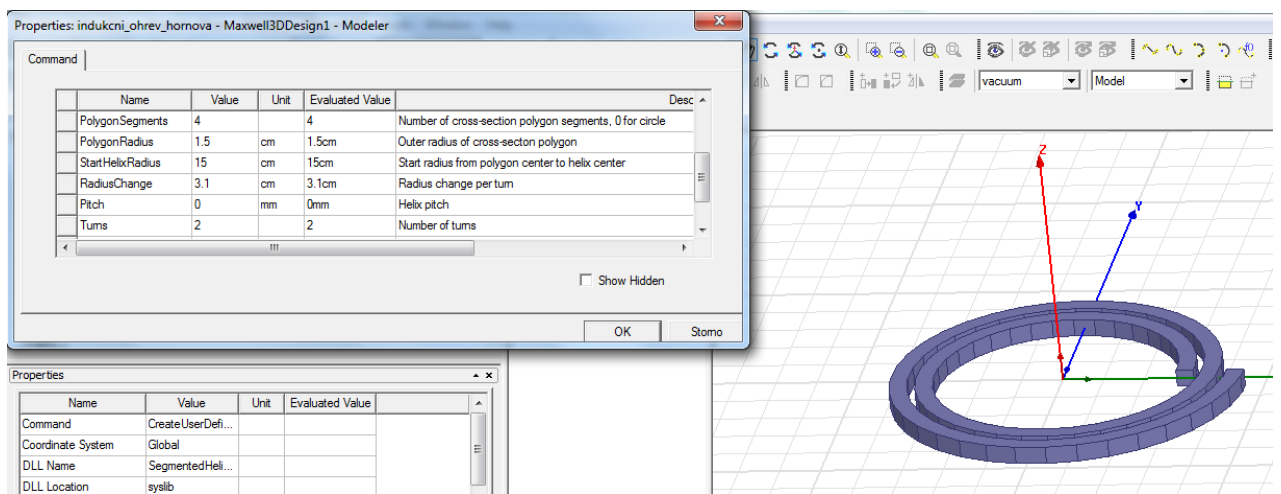
Obrázek 14: Polygon helix - pitch = 5 mm



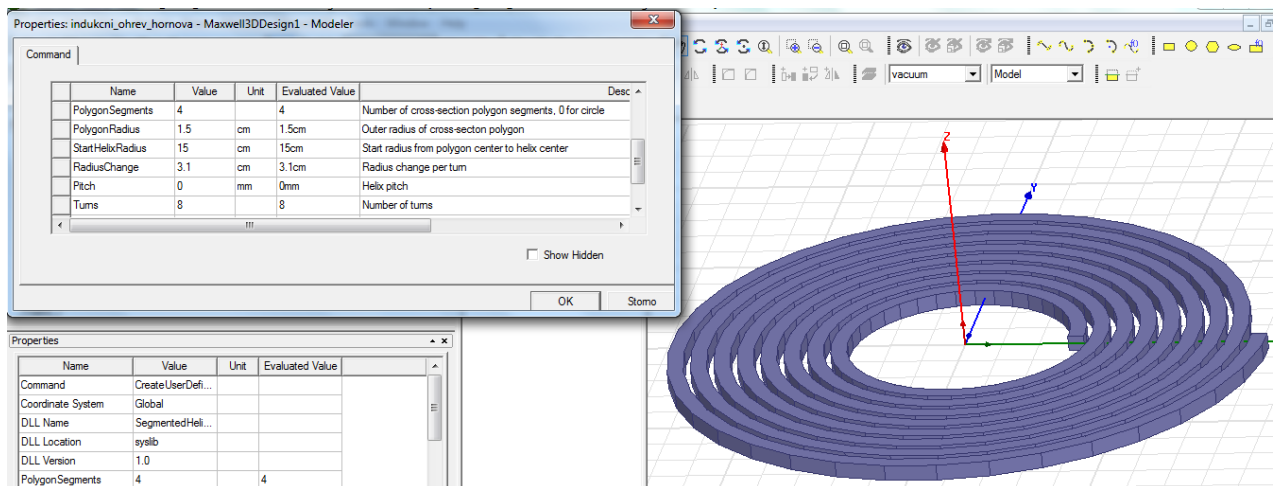
Obrázek 15: Polygon helix - pitch = 150 mm



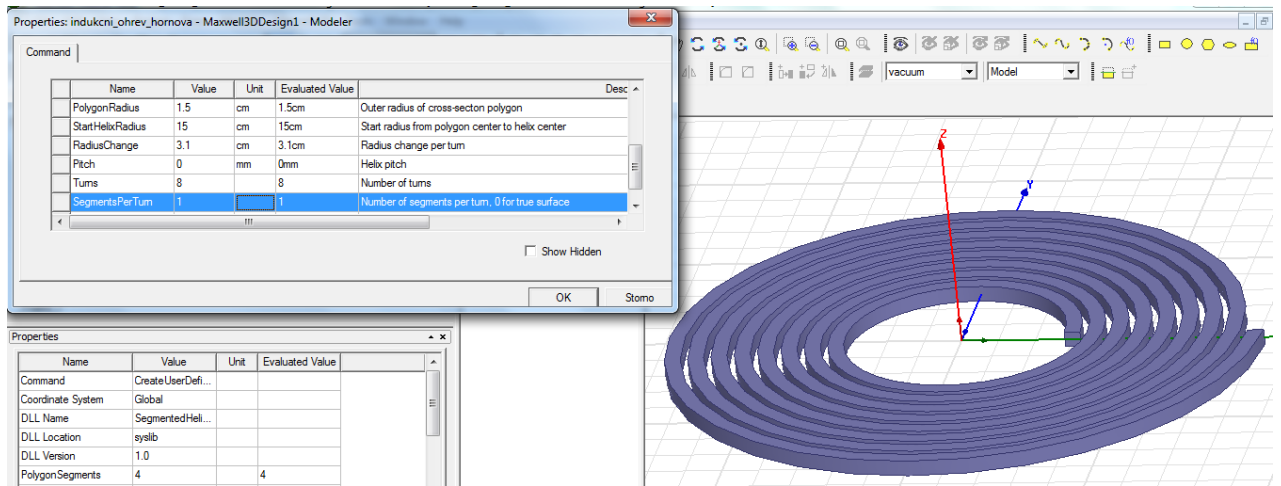
Obrázek 16: Polygon helix - turns = 1



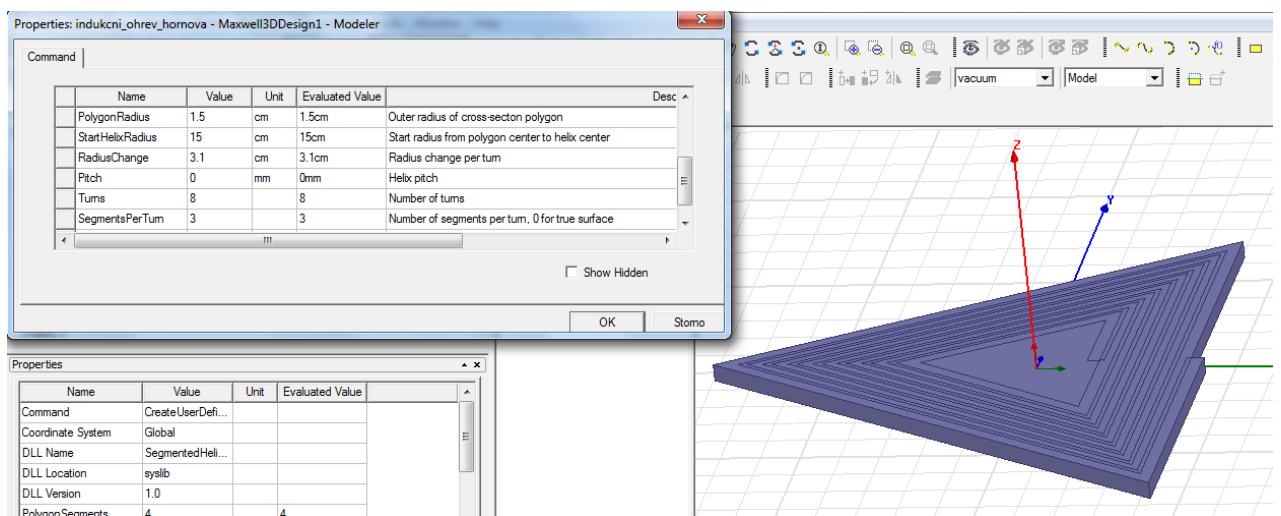
Obrázek 17: Polygon helix - turns = 2



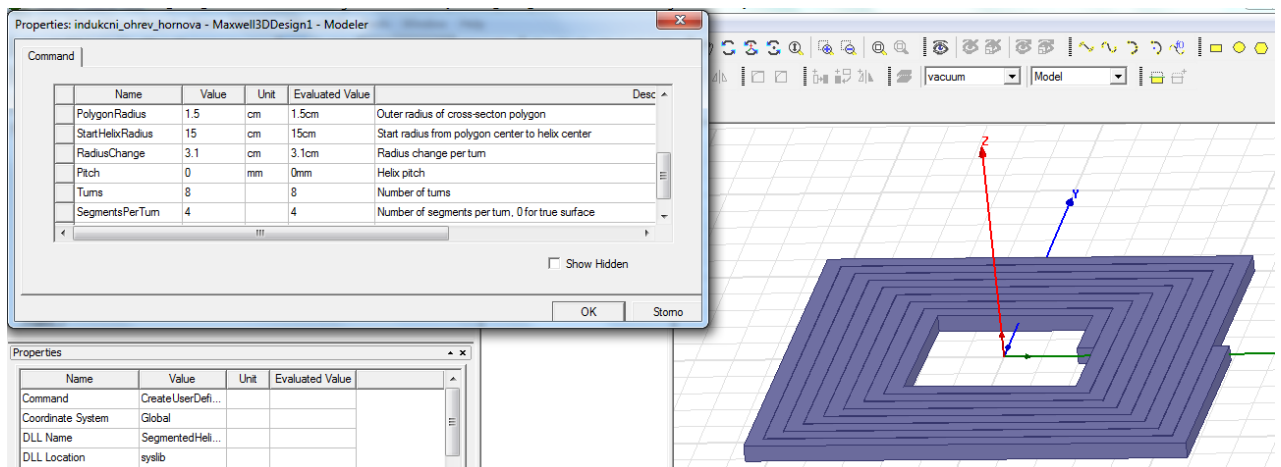
Obrázek 18: Polygon helix - turns = 8



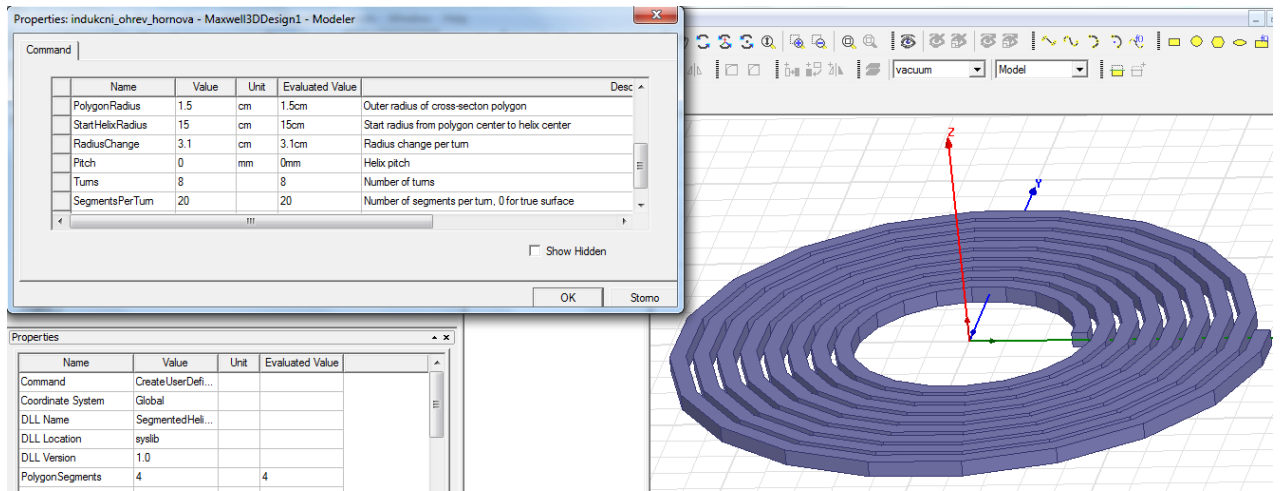
Obrázek 19: Polygon helix - segments per turn = 1



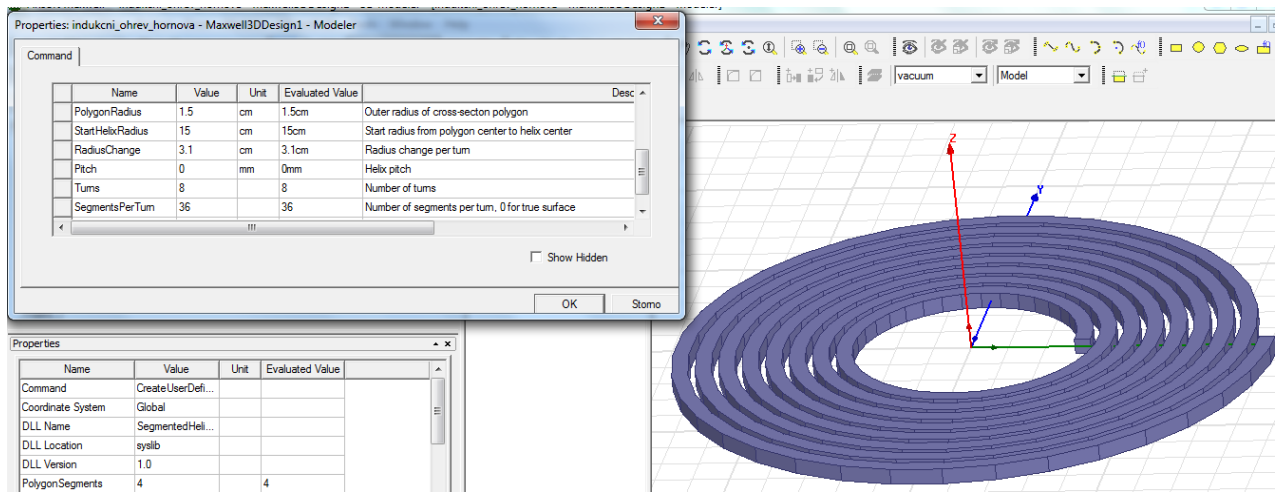
Obrázek 20: Polygon helix - segments per turn = 3



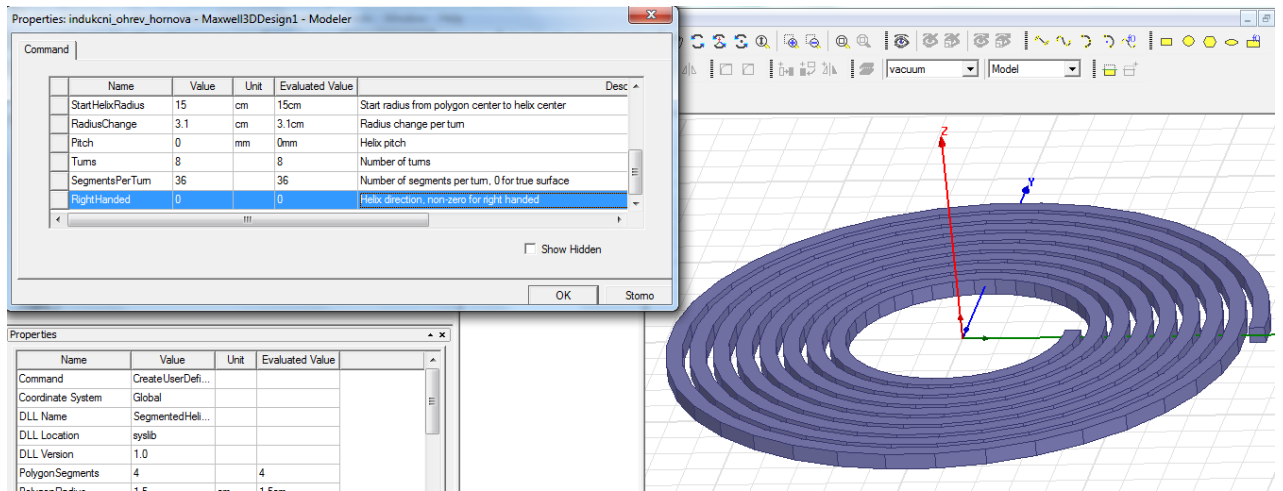
Obrázek 21: Polygon helix - segments per turn = 4



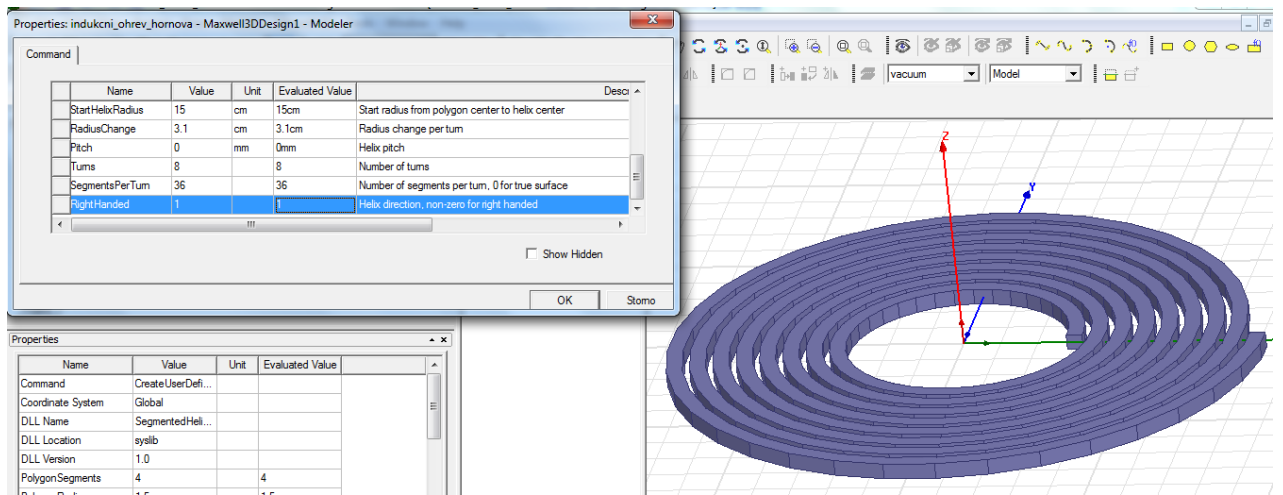
Obrázek 22: Polygon helix - segments per turn = 20



Obrázek 23: Polygon helix - segments per turn = 36



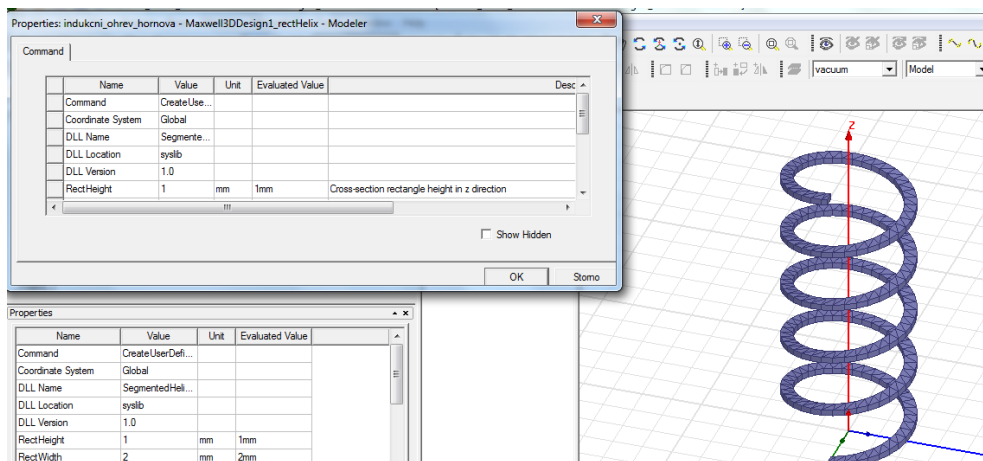
Obrázek 24: polygon helix - Right handed = 0



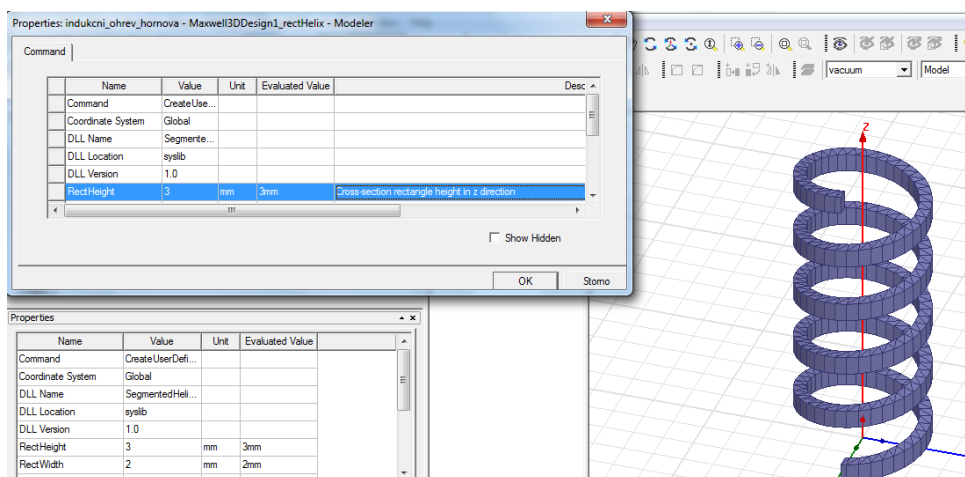
Obrázek 25: Polygon helix - Right handed = 1

Příloha B

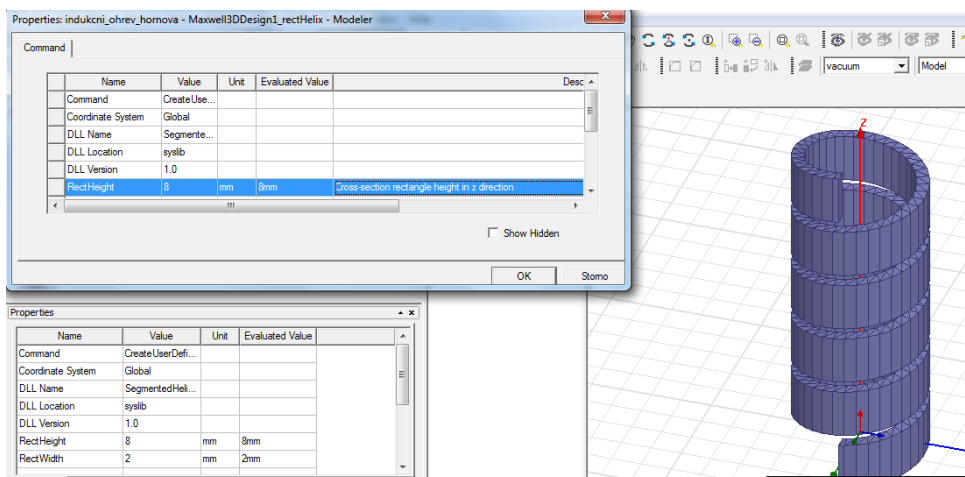
Pro větší objasnění parametrů Rectangular helix jsou v příloze B obrázky, jenž upřesňují význam těchto parametrů.



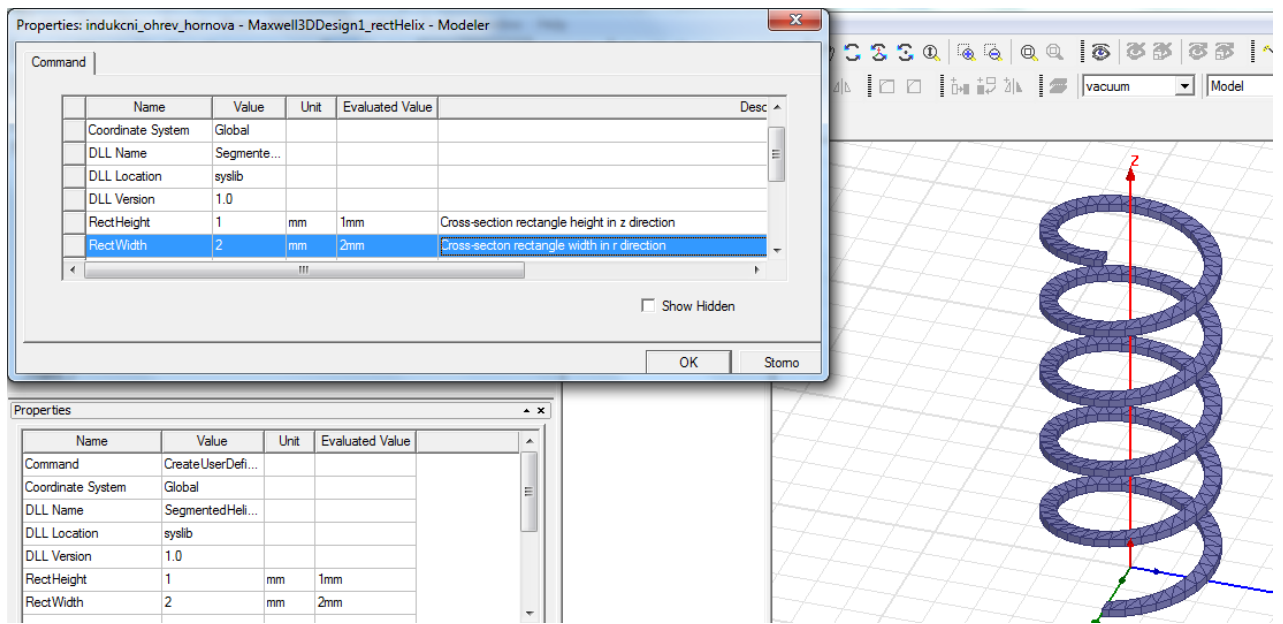
Obrázek 1: Rectangular Helix – Rectangular Height = 1 mm



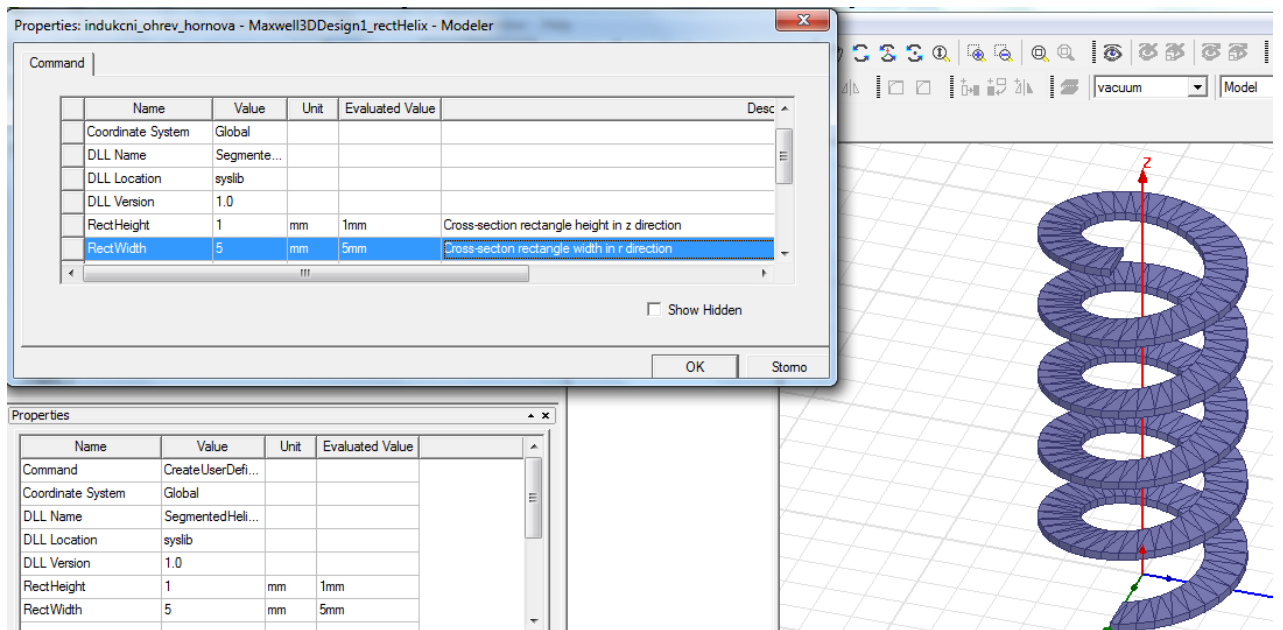
Obrázek 2: Rectangular Helix - Rectangular Height = 3 mm



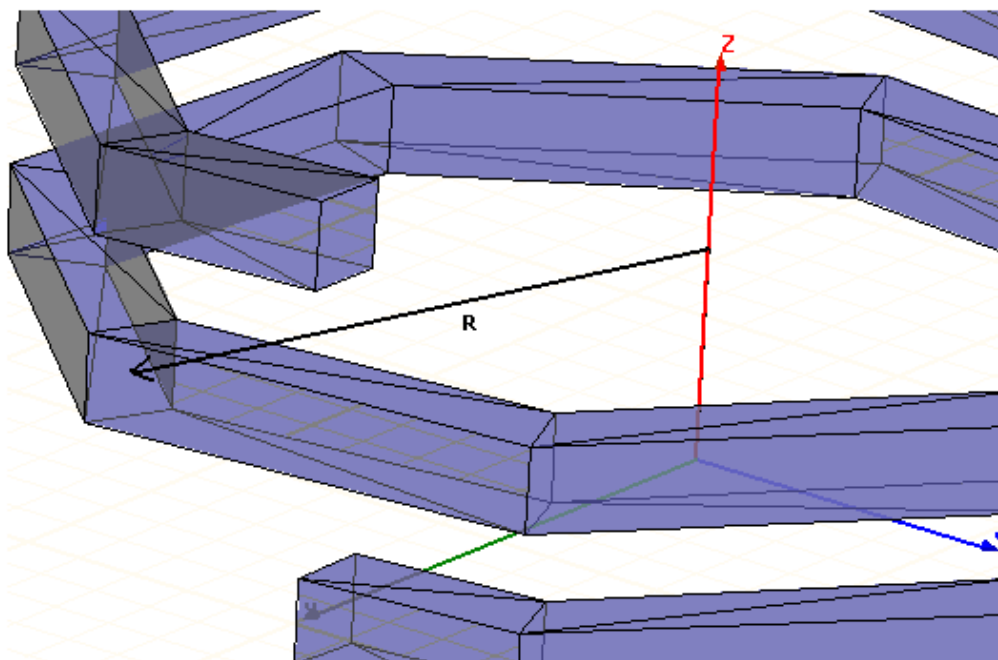
Obrázek 3: Rectangular helix - Rectangular height = 8 mm



Obrázek 4: Rectangular helix - Rectangular width = 2 mm



Obrázek 5: Rectangular helix - rectangular width = 5 mm

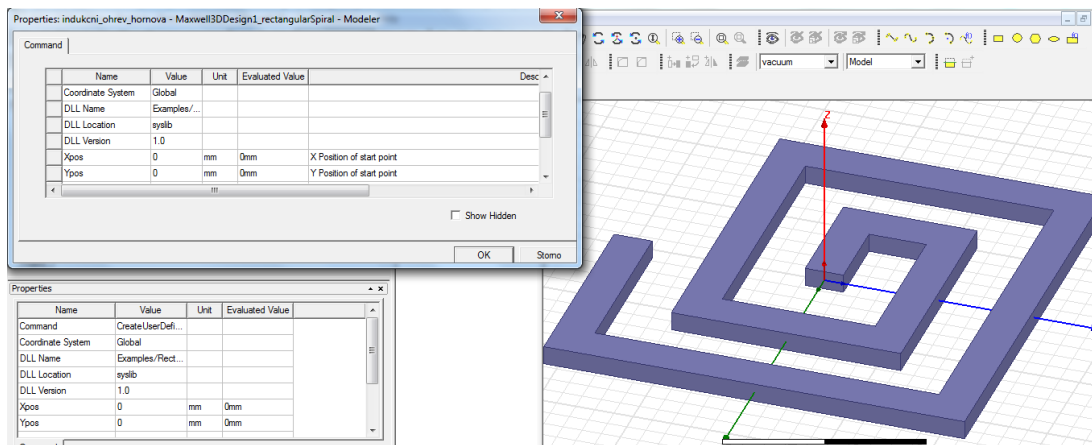


Obrázek 6: Rectangular helix - Start helix radius

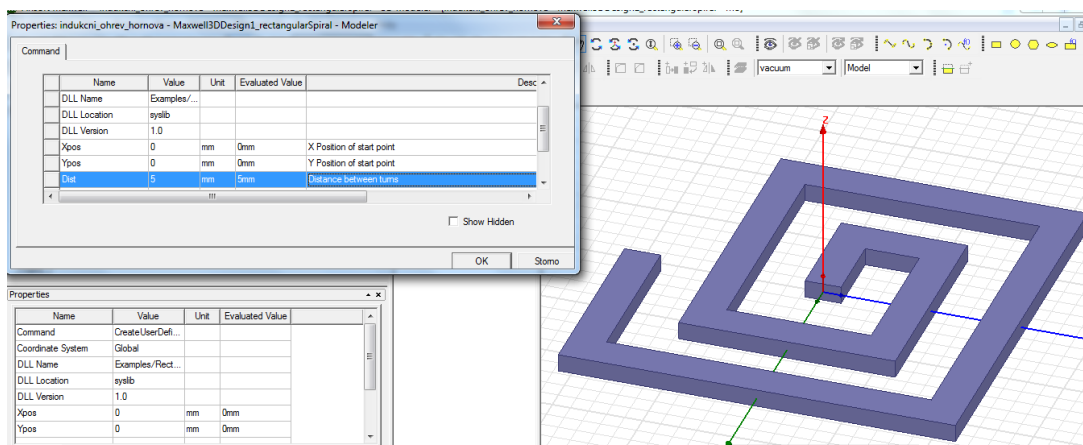
Ostatní parametry jsou analogické s Polygon helix.

Příloha C

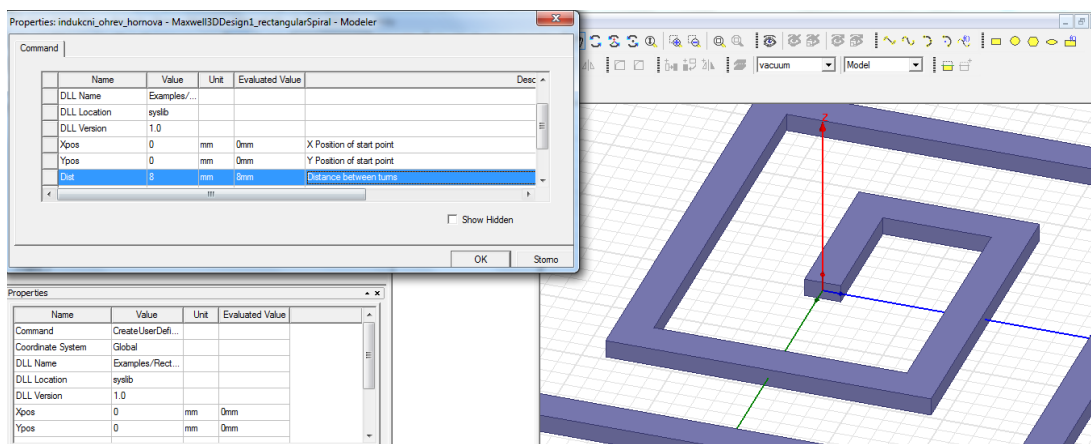
Pro větší objasnění parametrů Rectangular spiral jsou v příloze C obrázky, jenž upřesňují význam těchto parametrů.



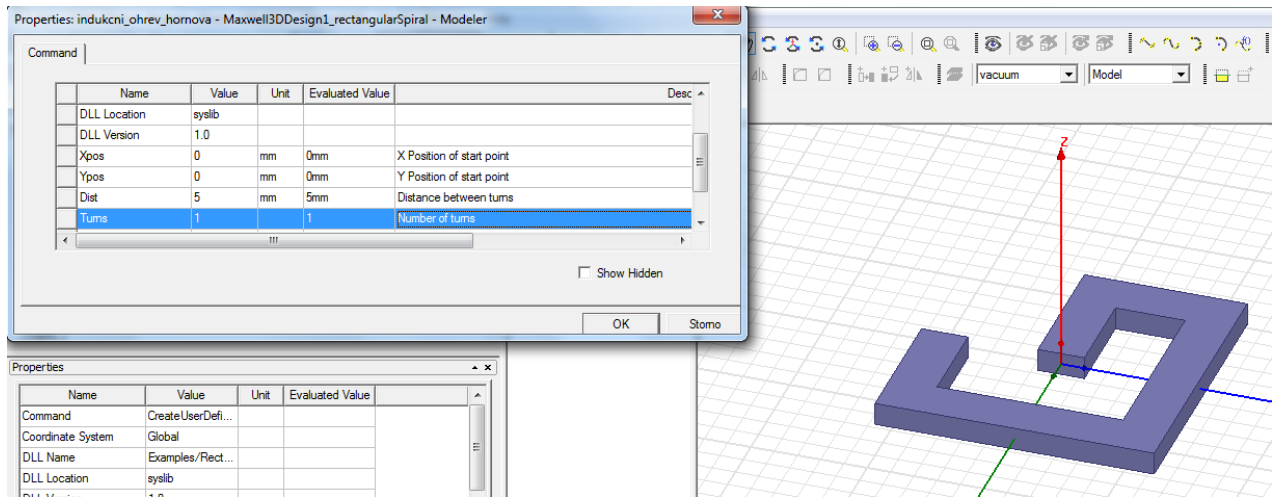
Obrázek 1: Rectangular spiral - pozice Xpoz = 0 a Ypoz = 0



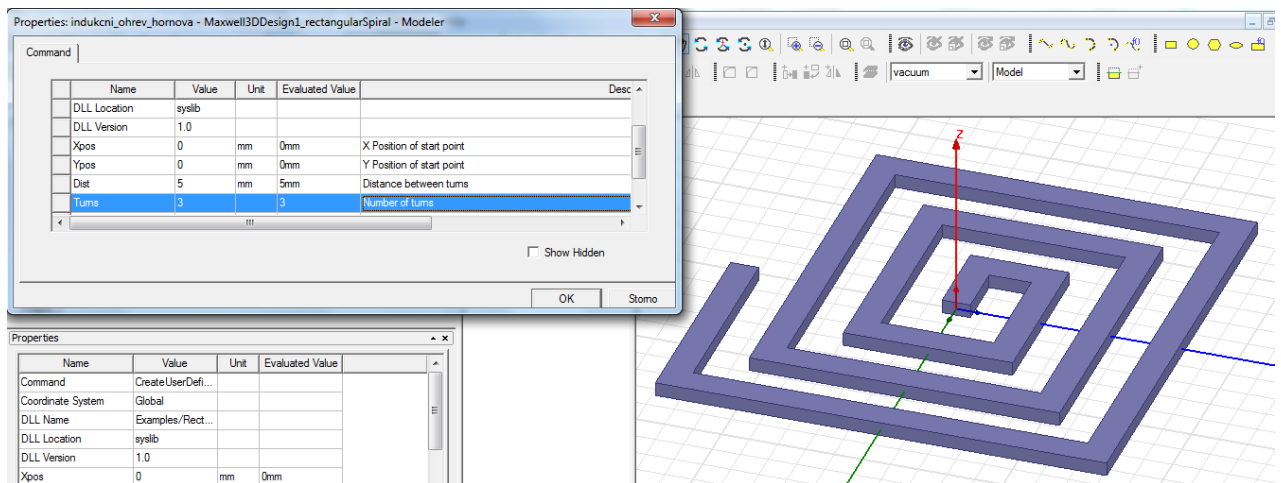
Obrázek 2: Rectangular spiral - Dist = 5 mm



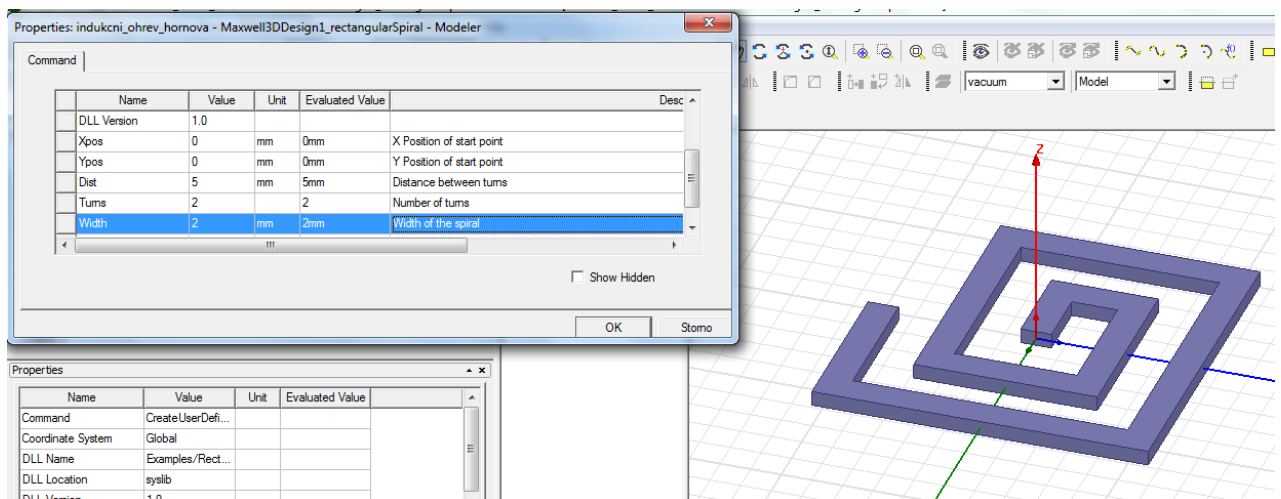
Obrázek 3: Rectangular spiral - Dist = 8 mm



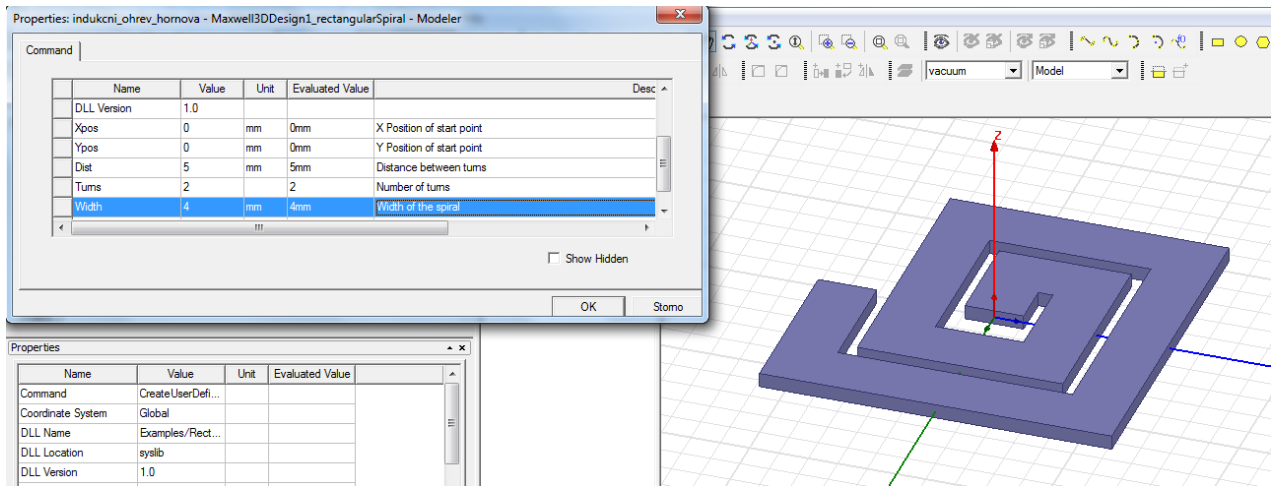
Obrázek 4: Rectangular spiral - Turns = 1



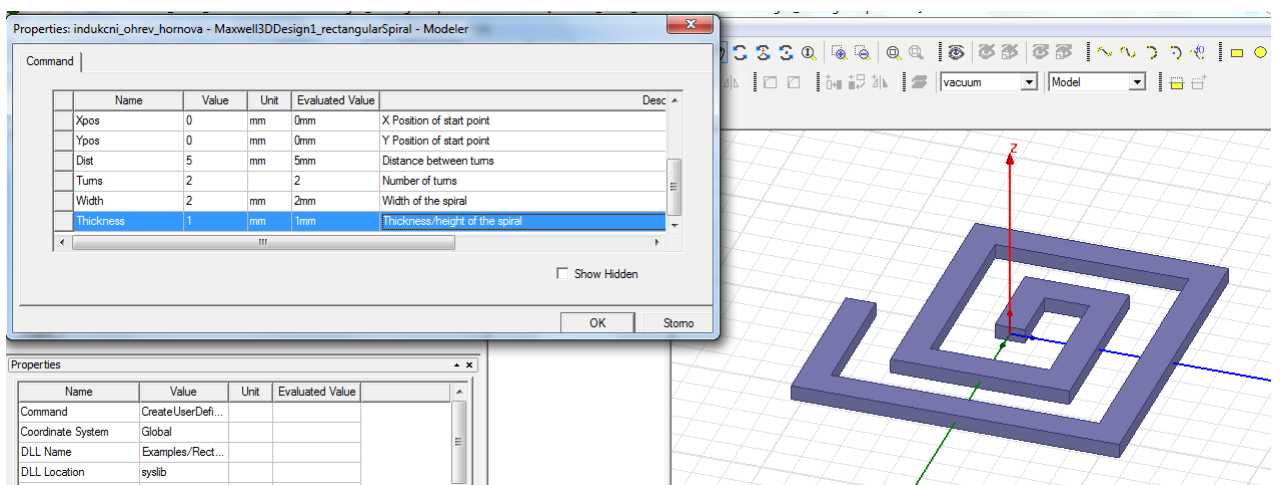
Obrázek 5: Rectangular spiral - Turns = 3



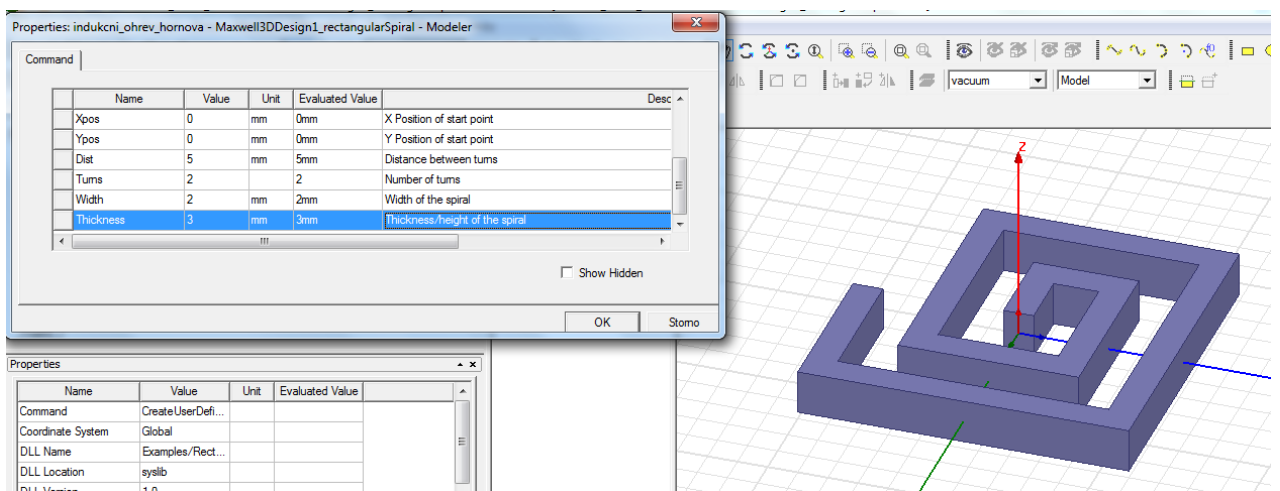
Obrázek 6: Rectangular spiral - width = 2 mm



Obrázek 7: Rectangular spiral - width = 4 mm

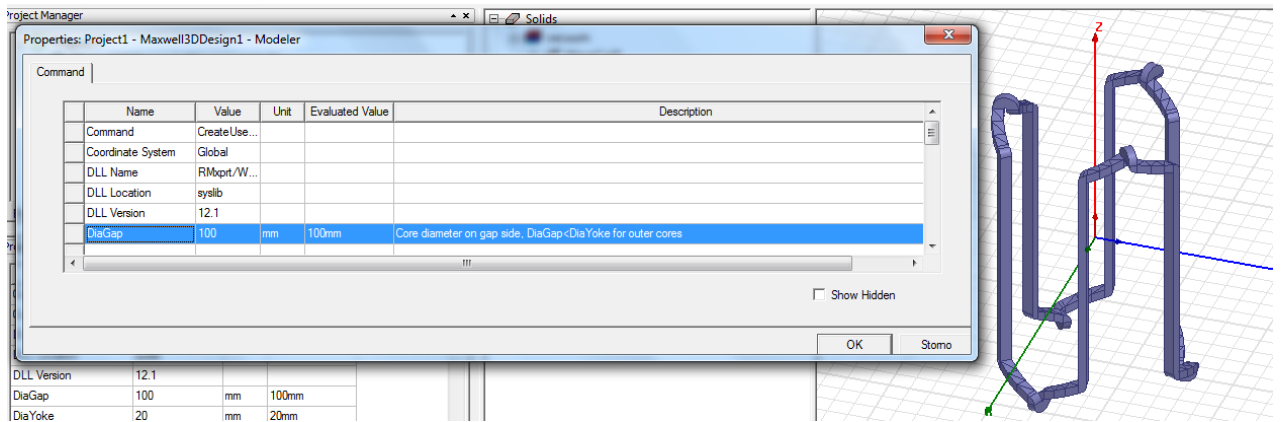


Obrázek 8: Rectangular spiral - Thickness = 1 mm

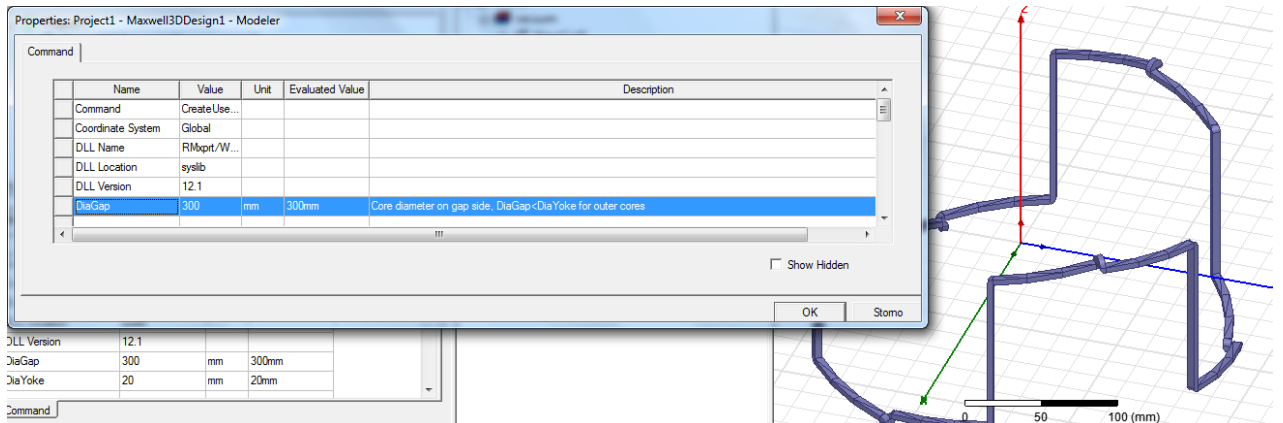


Obrázek 9: Rectangular spiral - Thickness = 3 mm

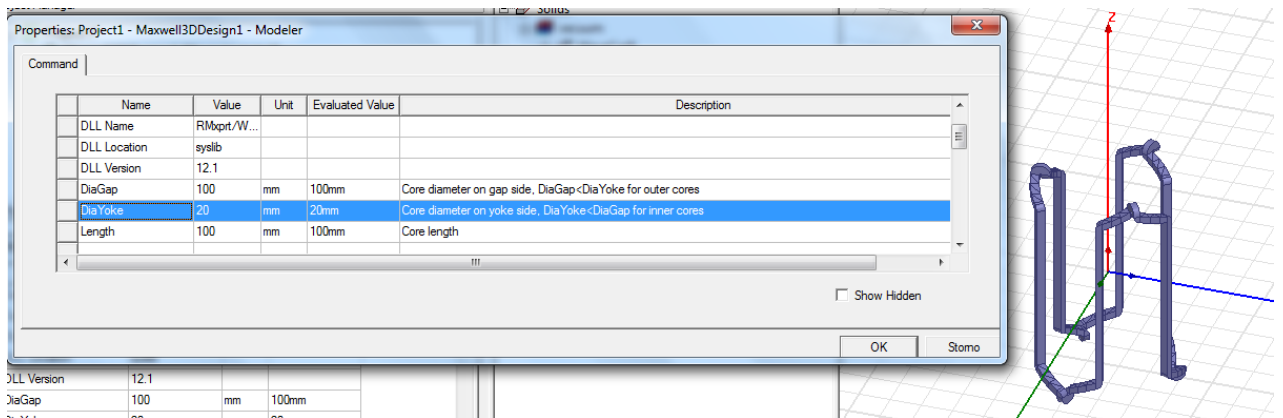
Příloha D



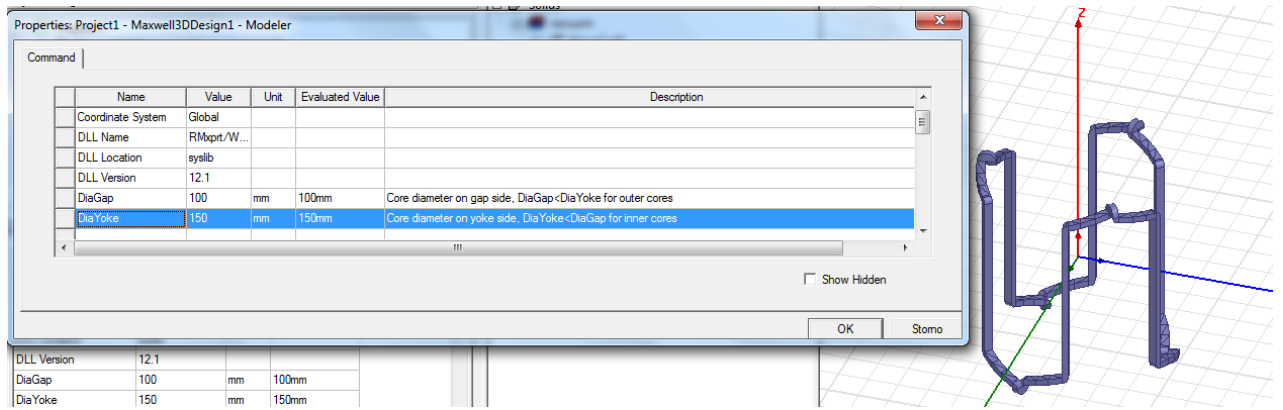
Obrázek 1: Wave Coil - DiaGap = 100 mm



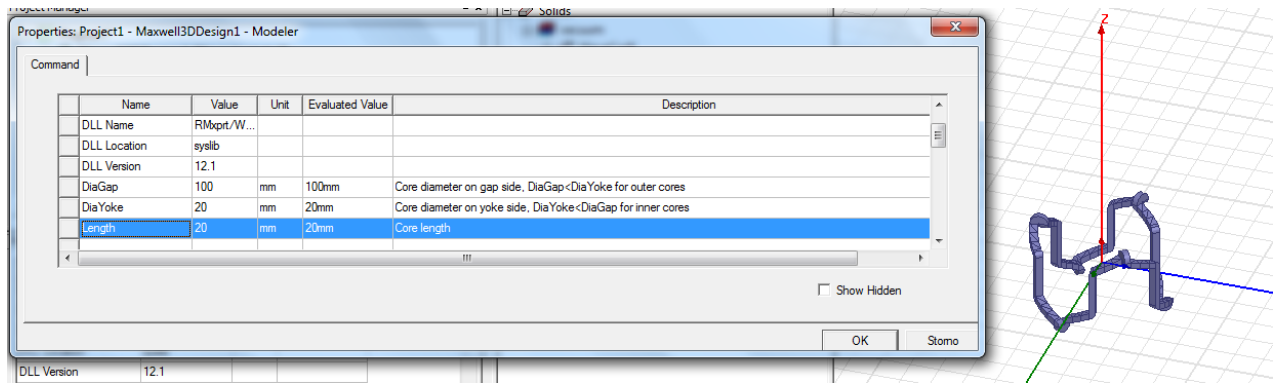
Obrázek 2: Wave Coil - DiaGap = 300 mm



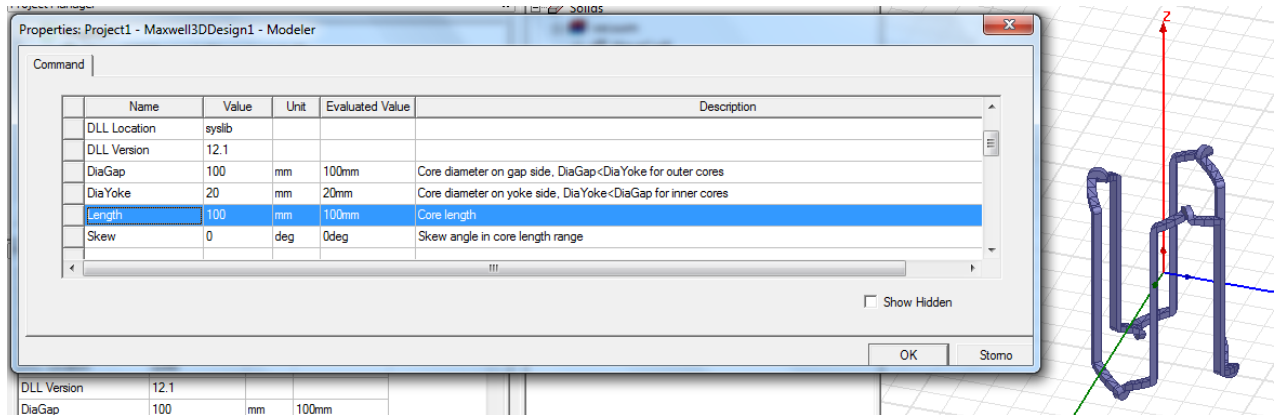
Obrázek 3: Wave Coil - DiaYoke= 20 mm



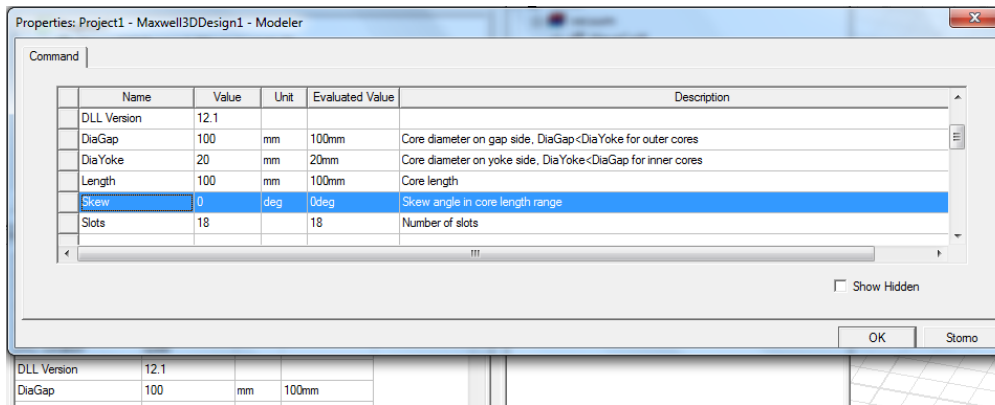
Obrázek 4: Wave Coil - DiaYoke= 150 mm



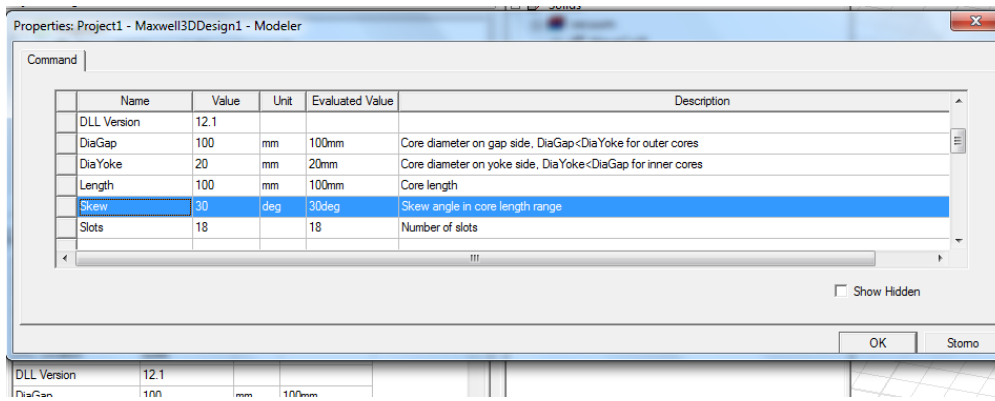
Obrázek 5: Wave Coil - Length= 20 mm



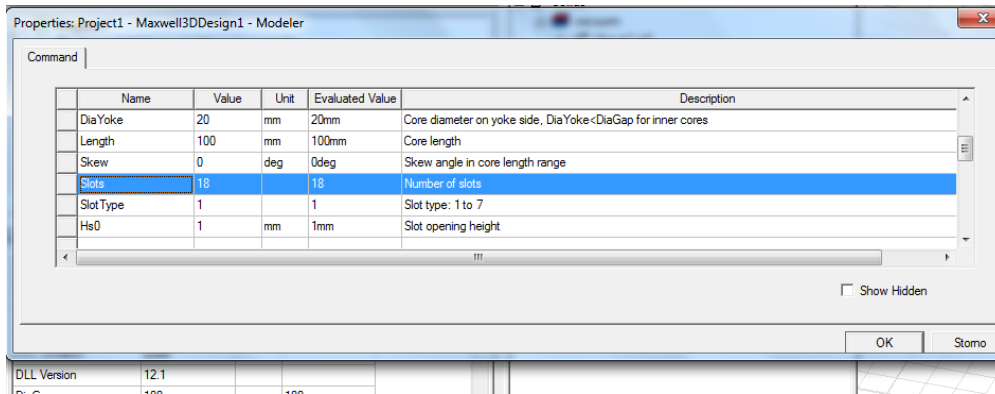
Obrázek 6: Wave Coil - Length= 100 mm



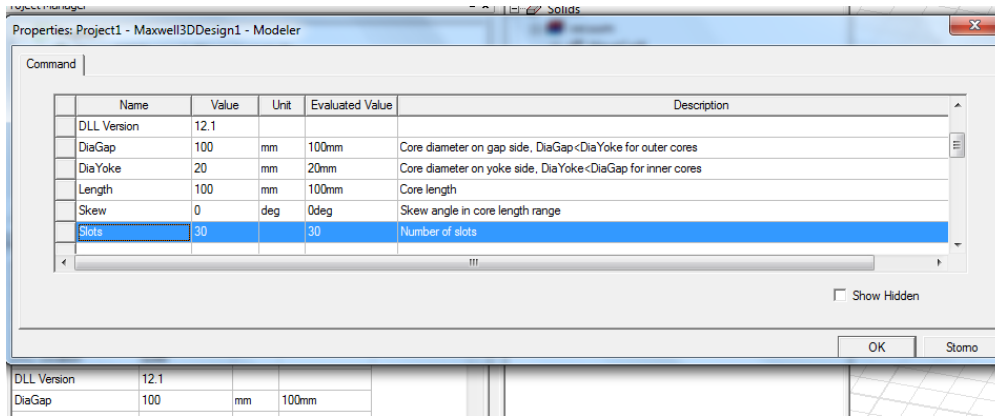
Obrázek 7: Wave Coil - Skew= 0°



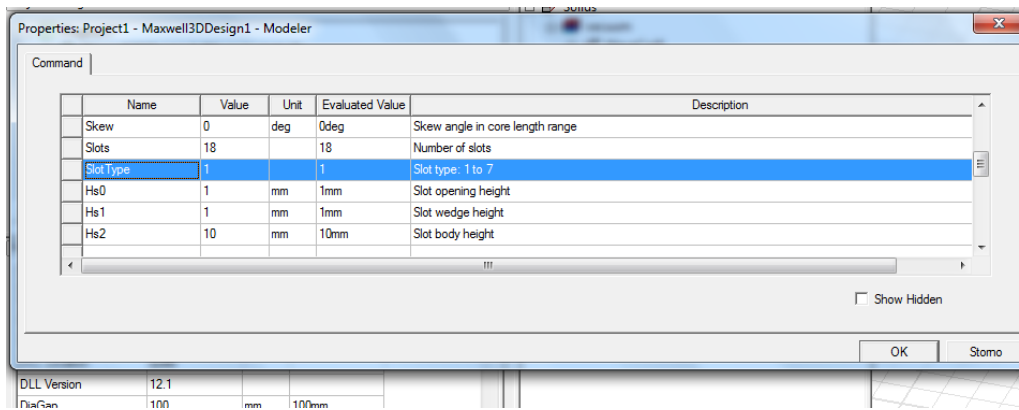
Obrázek 8: Wave Coil - Skew= 30°



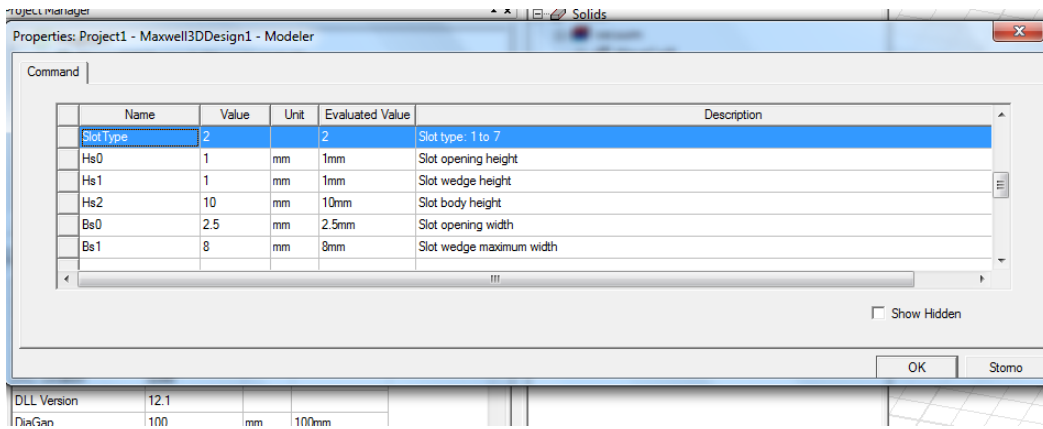
Obrázek 9: Wave Coil - Slots = 18



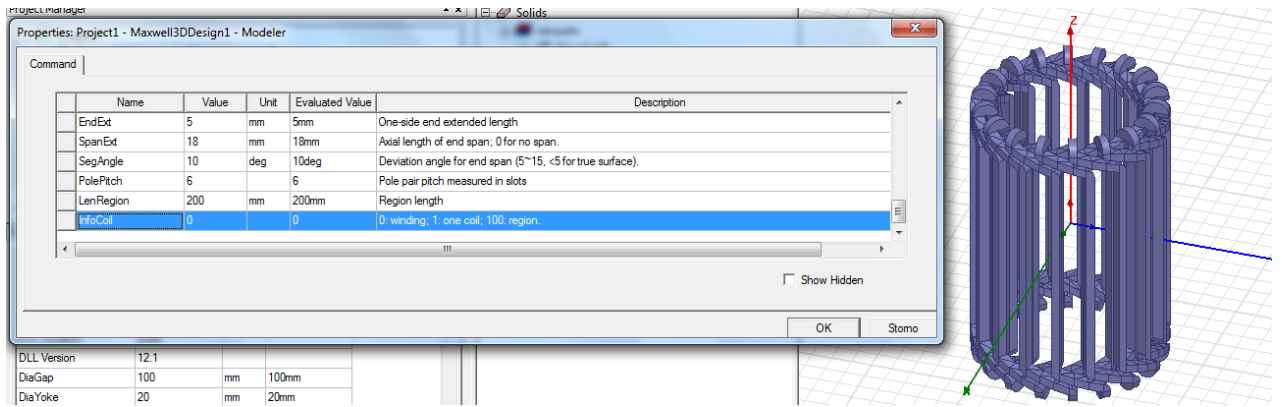
Obrázek 10: Wave Coil - Slots = 30



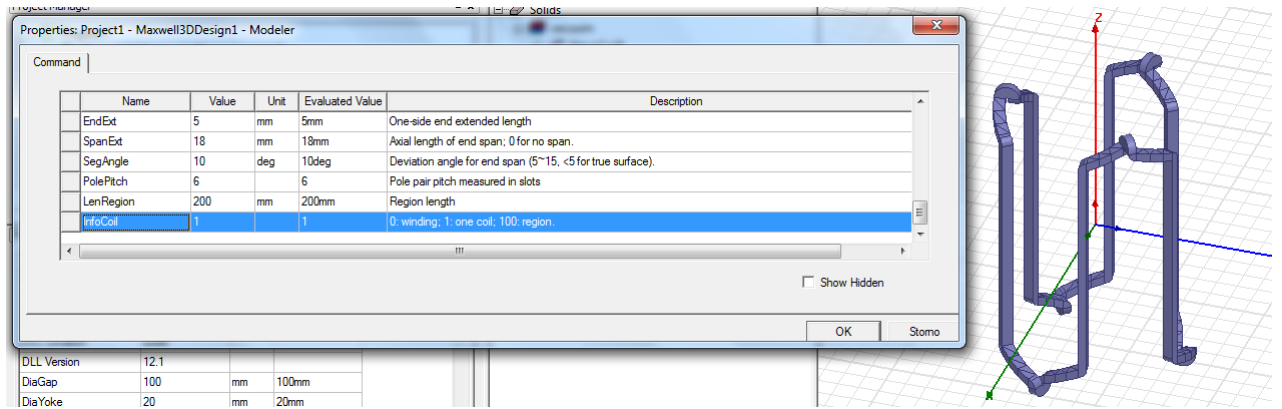
Obrázek 11: Wave Coil - Slot Type = 1



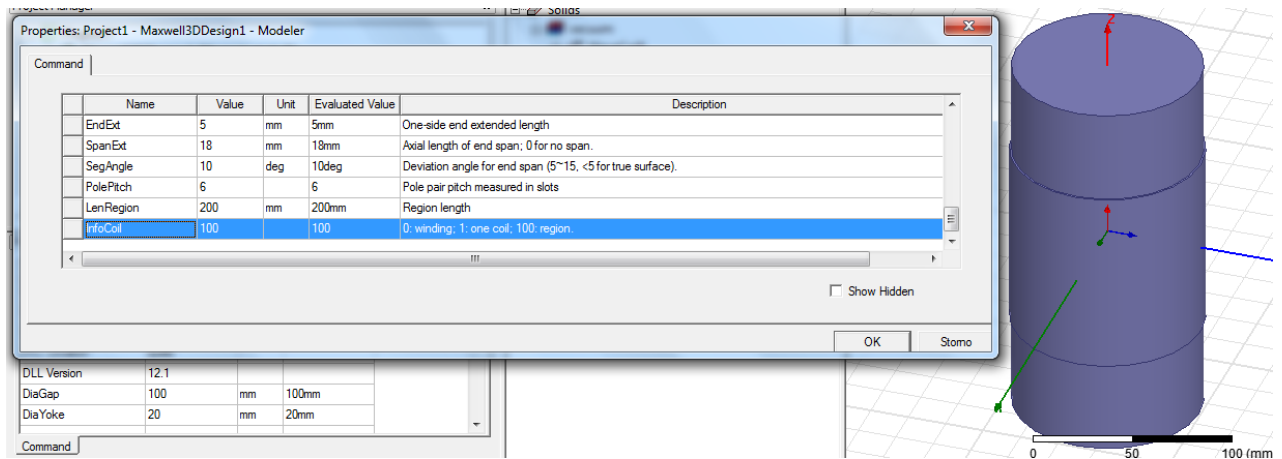
Obrázek 12: Wave Coil - Slot Type = 2



Obrázek 13: Wave Coil - InfoCoil = 0

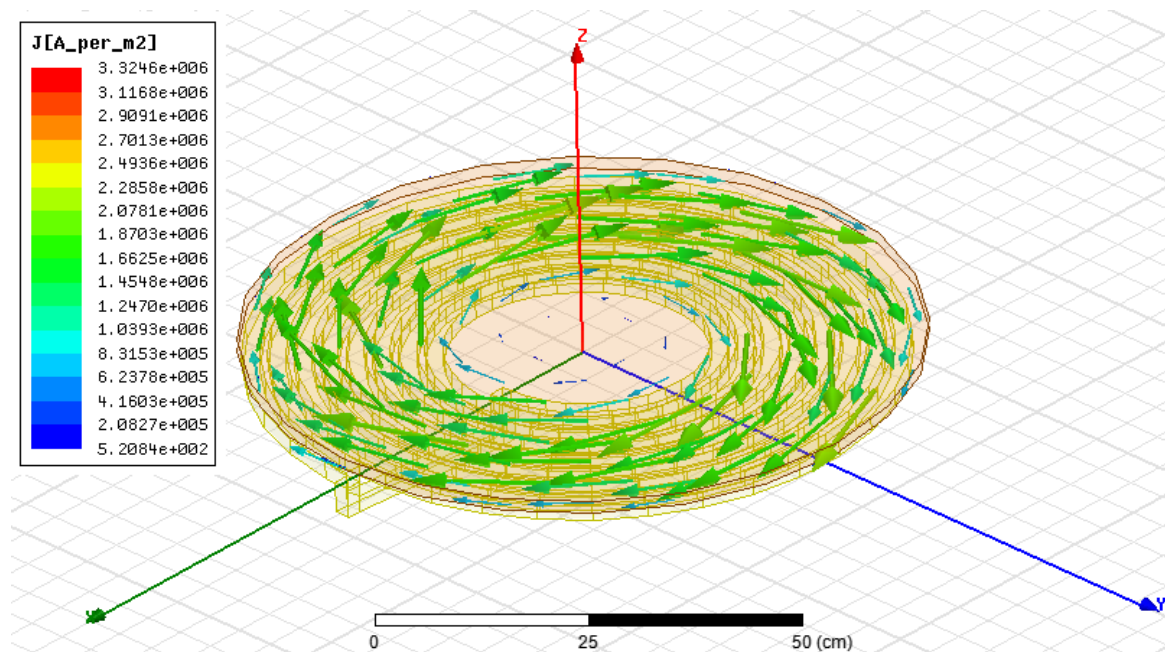


Obrázek 14: Wave Coil - InfoCoil = 1

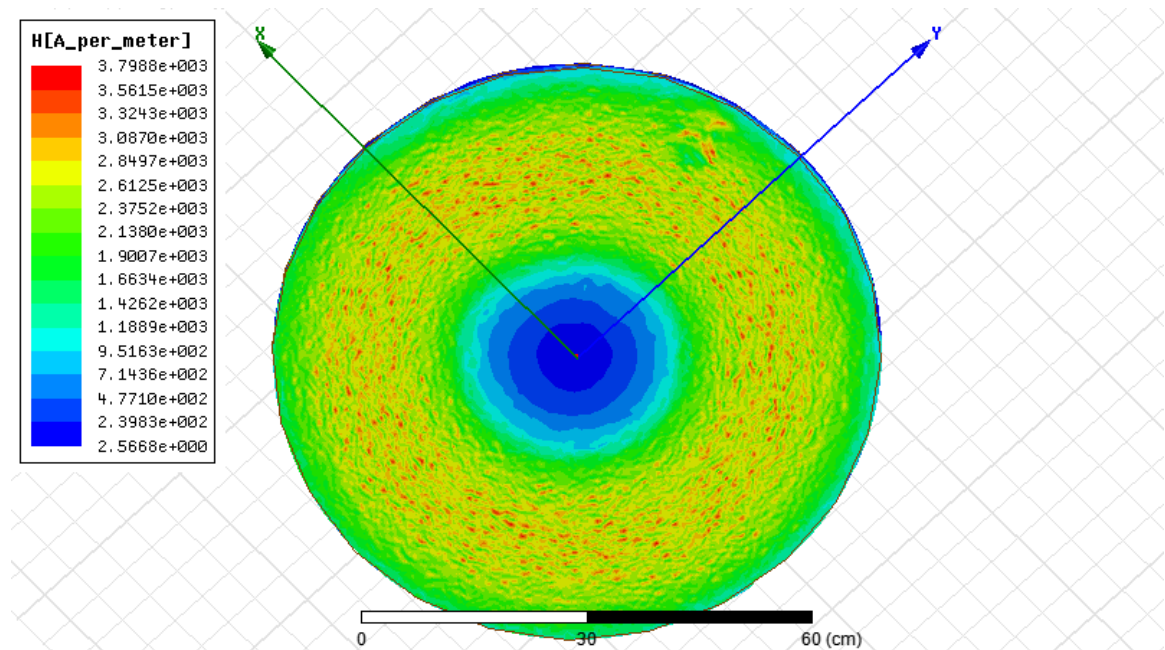


Obrázek 15: Wave Coil - InfoCoil = 100

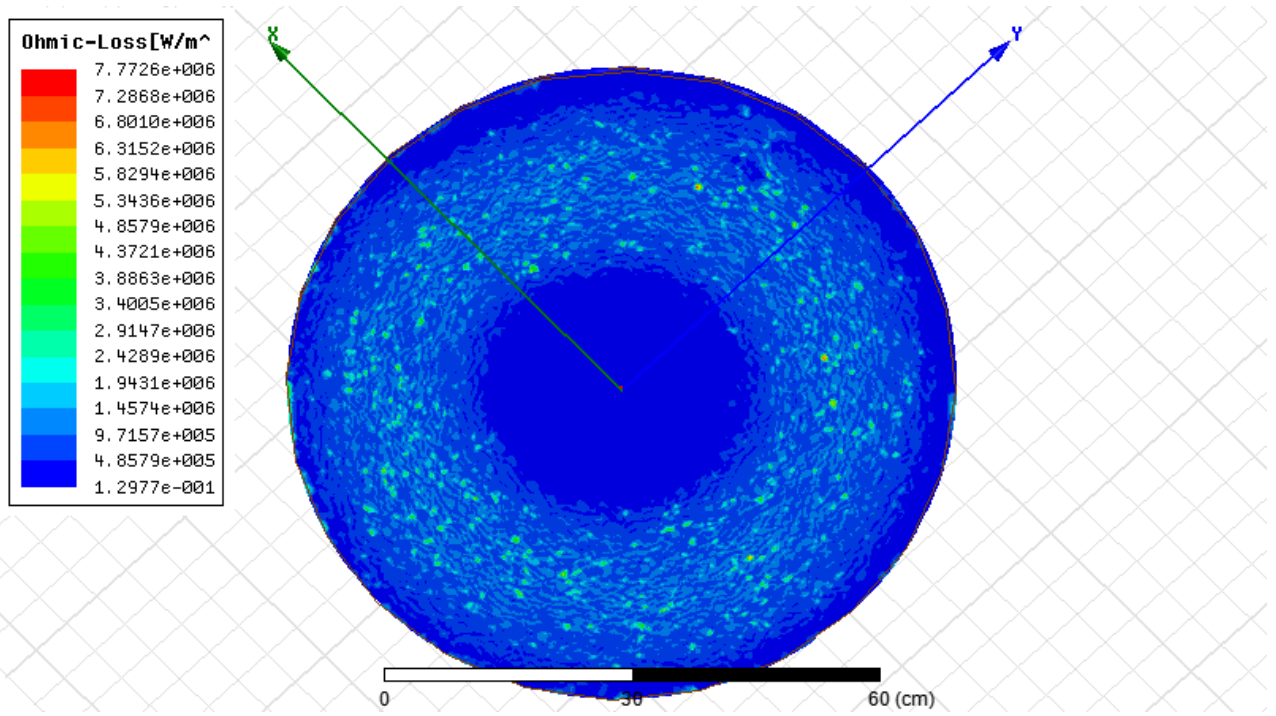
Příloha E



Obrázek 1: Deska nad induktorem – rozložení vektorů proudové hustoty v desce

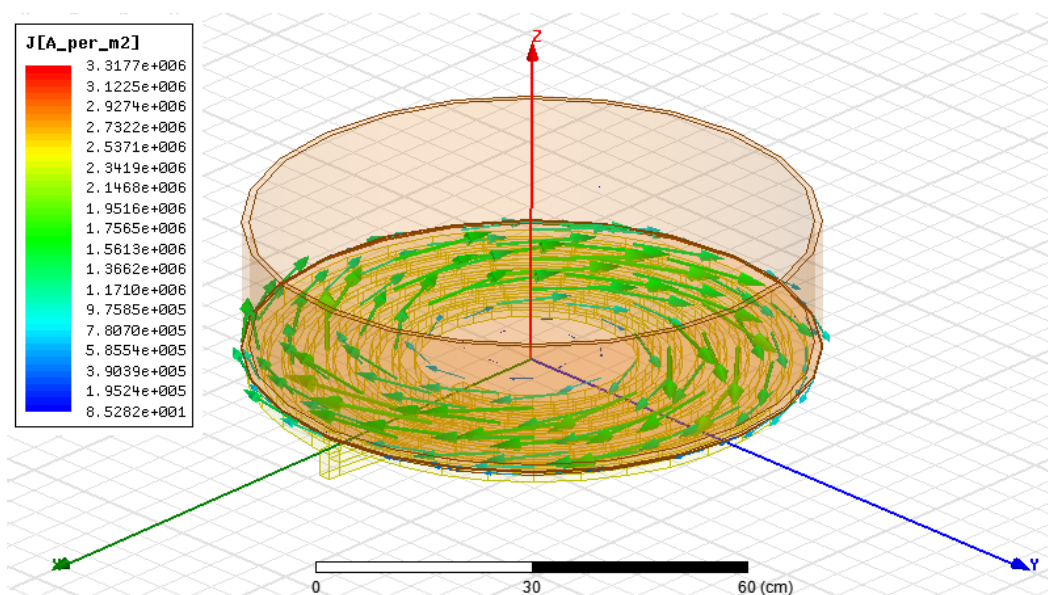


Obrázek 2: Deska nad induktorem – povrchové rozložení magnetické intenzity desky – bez viditelnosti induktoru – spodní pohled

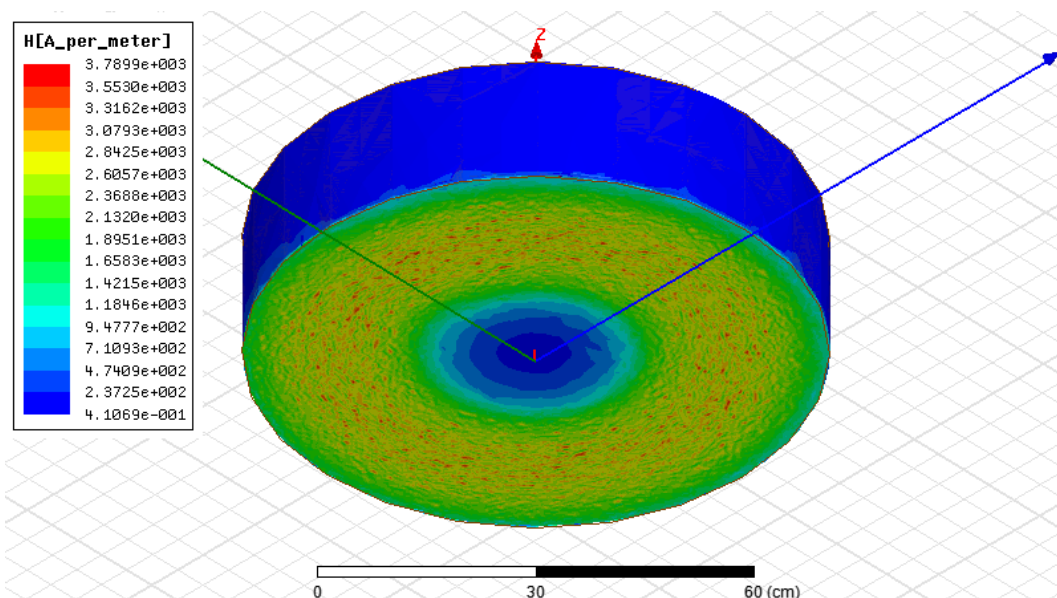


Obrázek 3: Deska nad induktorem – povrchové rozložení ohmických ztrát (W/m²) desky – bez viditelnosti induktoru – spodní pohled

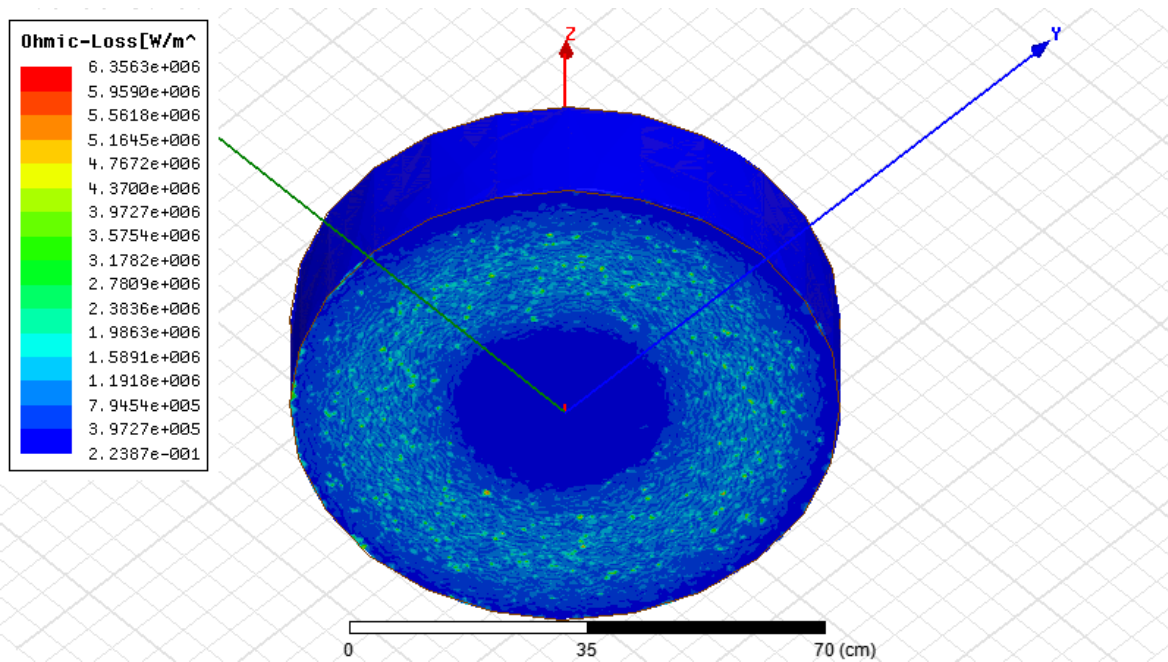
PŘÍLOHA F



Obrázek 1: Nádoba nad induktorem – rozložení vektorů proudové hustoty induktoru

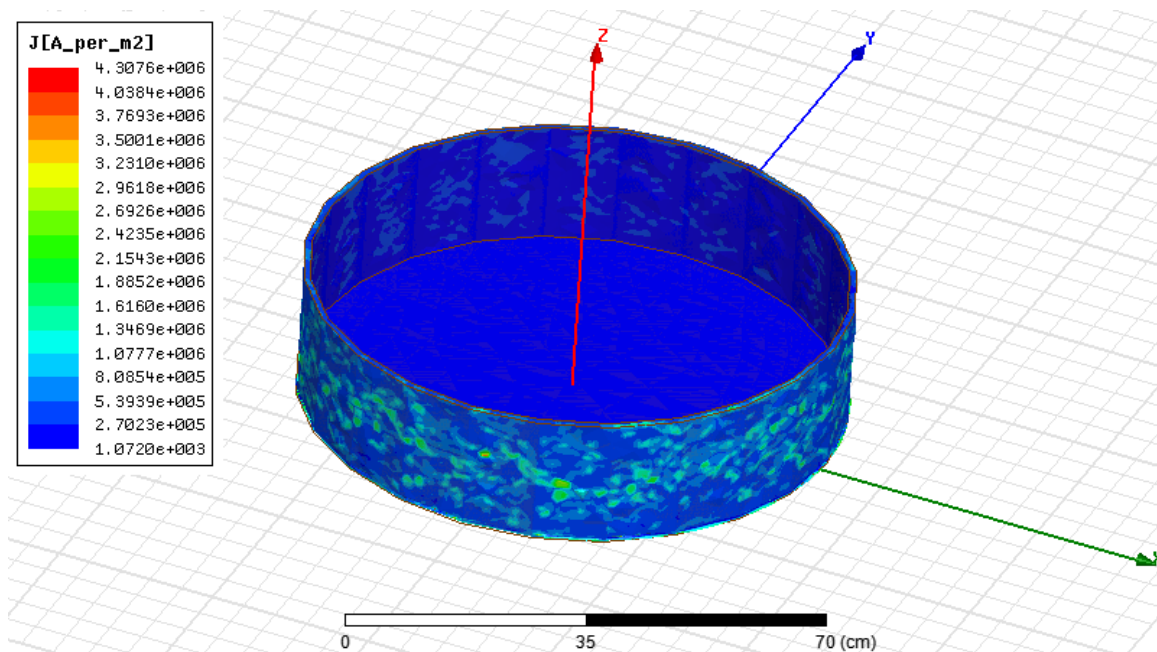


Obrázek 2: Nádoba nad induktorem – povrchové rozložení magnetické intenzity – spodní pohled – bez viditelnosti induktoru

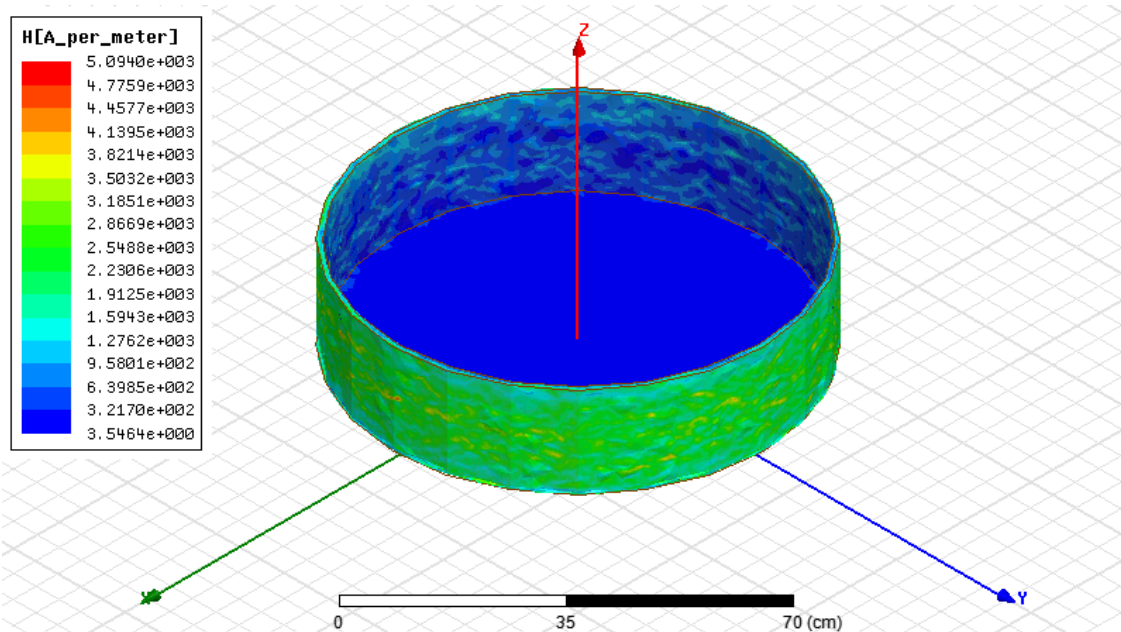


Obrázek 3: Nádoba nad induktorem – povrchové rozložení ohmických ztrát (W/m^2) – spodní pohled – bez viditelnosti induktoru

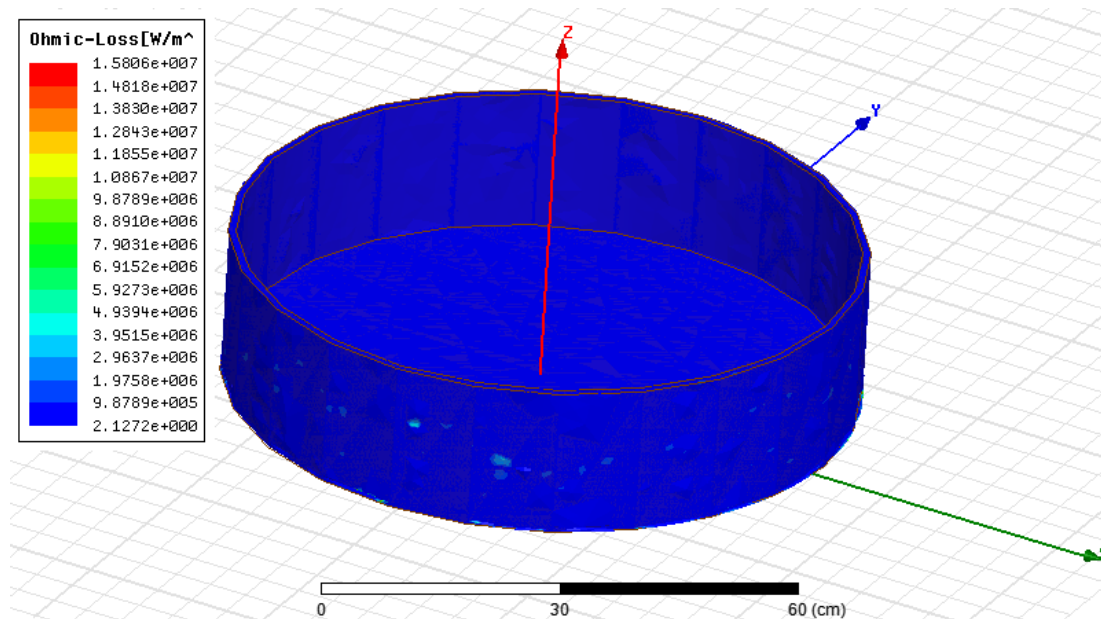
PŘÍLOHA G



Obrázek 1: Nádoba uvnitř induktoru – povrchové rozložení proudové hustoty nádoby – bez viditelnosti induktoru

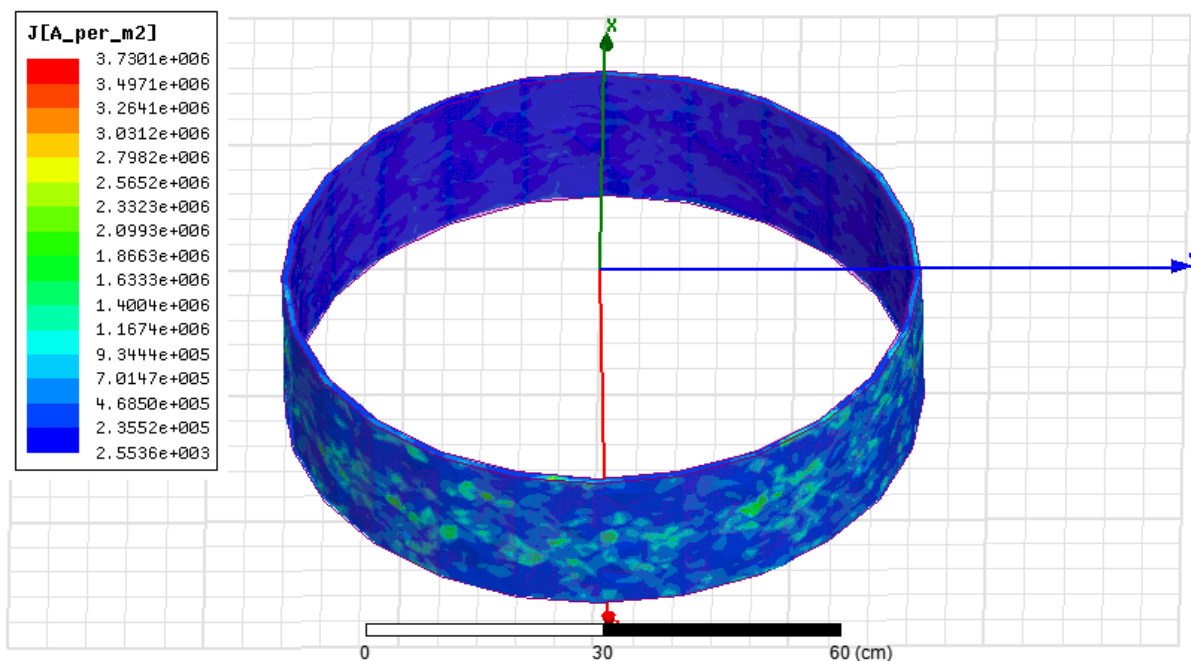


Obrázek 2: Nádoba uvnitř induktoru – povrchové rozložení magnetické intenzity nádoby – bez viditelnosti induktoru

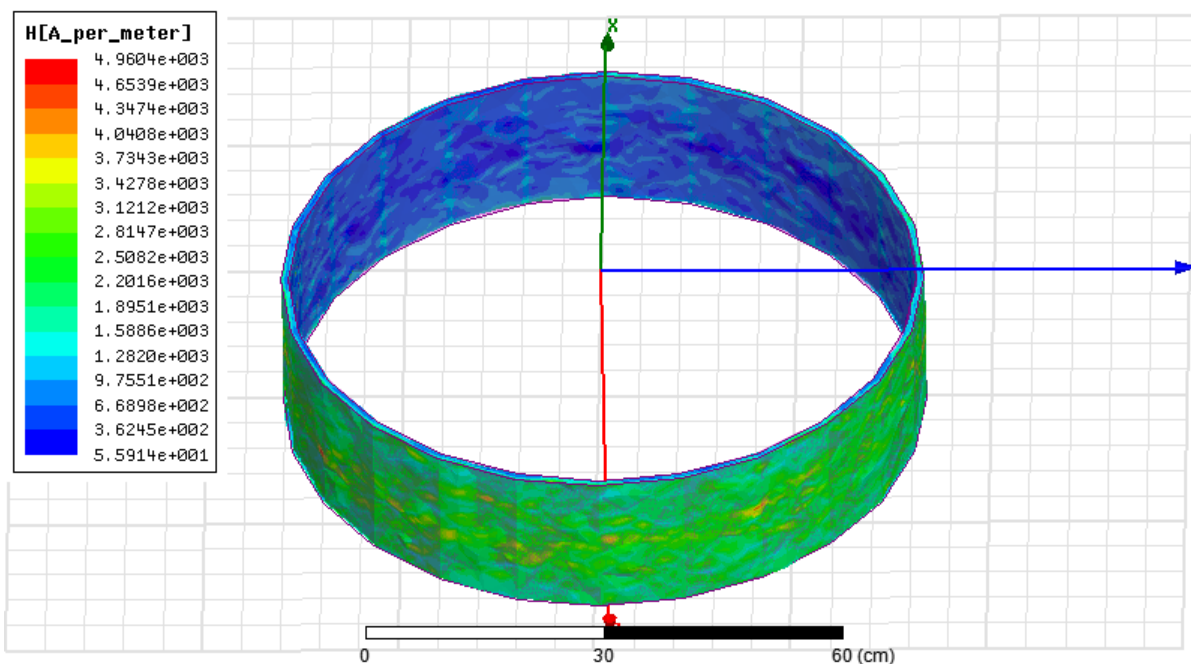


Obrázek 3: Nádoba uvnitř induktoru – povrchové rozložení ohmických ztrát (W/m^2) nádoby – bez viditelnosti induktoru

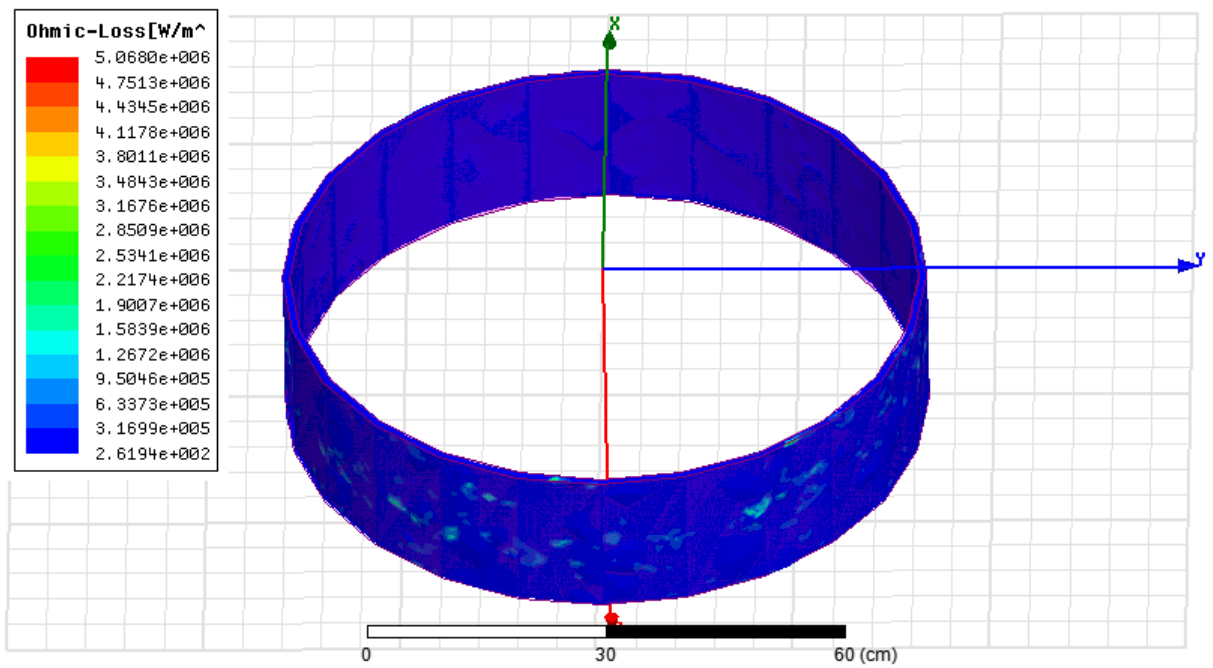
PŘÍLOHA H



Obrázek 1: Trubka uvnitř spirál induktoru - povrchové rozložení proudové hustoty trubky - bez viditelnosti induktoru

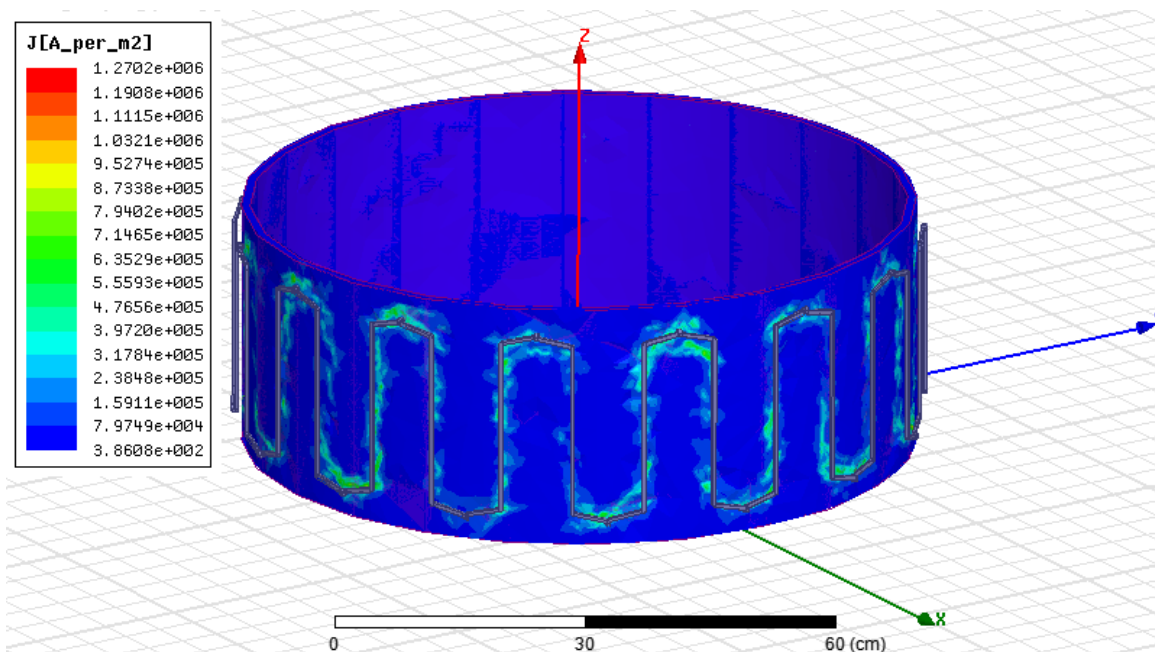


Obrázek 2: Trubka uvnitř spirál induktoru - povrchové rozložení magnetické intenzity trubky - bez viditelnosti induktoru

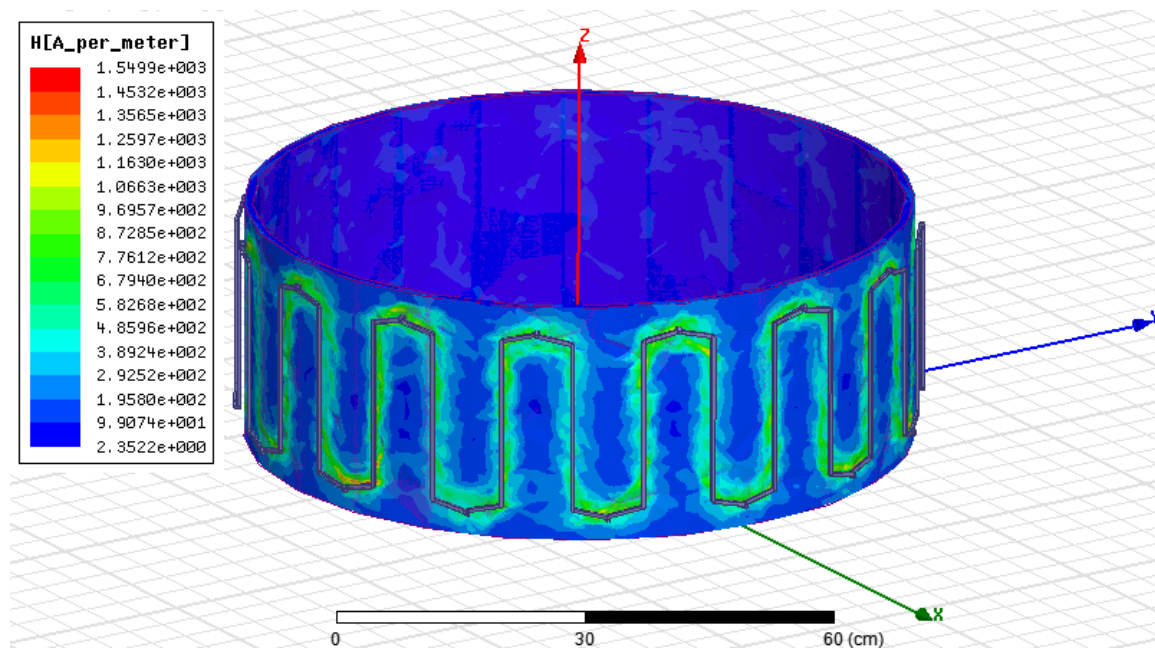


Obrázek 3: Trubka uvnitř spirál induktoru - povrchové rozložení ohmických ztrát trubky (W/m²) - bez viditelnosti induktoru

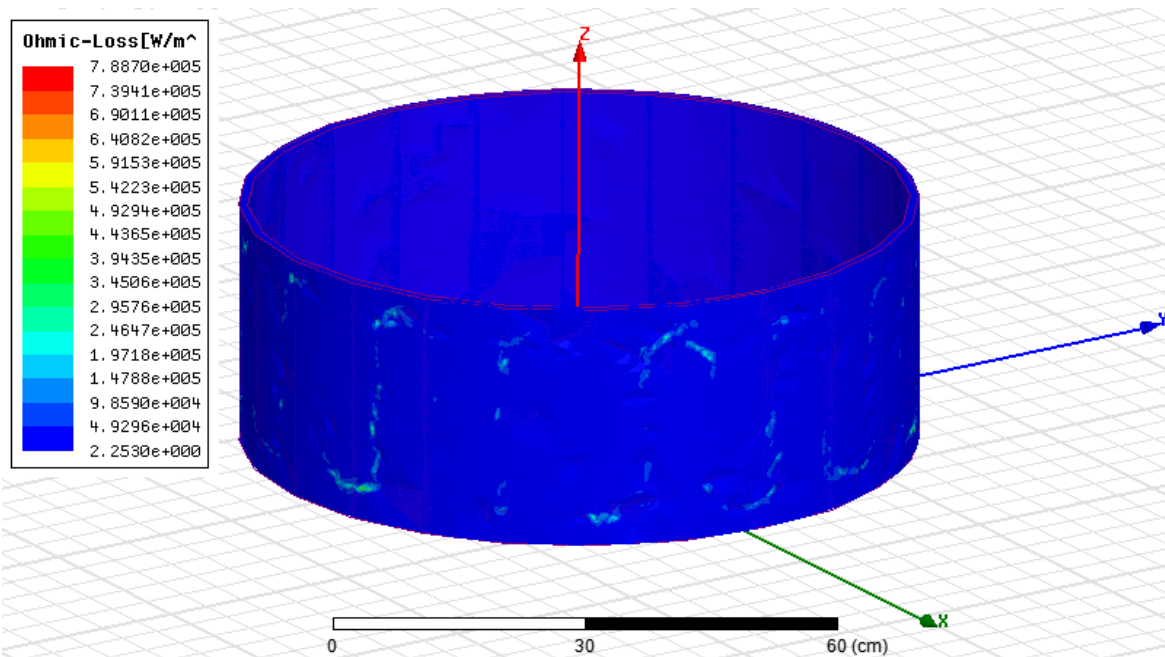
PŘÍLOHA I



Obrázek 1: Trubka uvnitř wave induktoru – povrchové rozložení proudové hustoty trubky



Obrázek 2: Trubka uvnitř wave induktoru – povrchové rozložení magnetické intenzity trubky



Obrázek 3: Trubka uvnitř wave induktoru – povrchové rozložení ohmických ztrát trubky (W/m²) – bez viditelnosti induktoru

PŘÍLOHA J

Tabulka 1: model desky nad induktorem – ohmické ztráty v závislosti na simulované frekvenci

typ modelu	frekvence (Hz)	ohmic Loss vsázka (W)	ohmic Loss induktor (W)	η (%)
deska nad induktorem	10	1,96	4,22	31,7
	100	49,39	4,22	92,1
	200	101,52	4,22	96,0
	300	150,97	4,22	97,3
	400	197,03	4,22	97,9
	500	239,54	4,22	98,3
	600	278,38	4,22	98,5
	700	313,69	4,22	98,7
	800	345,81	4,22	98,8
	900	375,08	4,22	98,9
	1000	401,82	4,22	99,0
	2000	576,47	4,22	99,3
	3000	660,91	4,22	99,4
	4000	708,54	4,22	99,4
	5000	739,15	4,22	99,4
	6000	760,59	4,22	99,4
	7000	776,48	4,22	99,5
	8000	788,68	4,22	99,5
	9000	798,31	4,22	99,5
	10000	806,04	4,22	99,5
20000	839,52	4,22	99,5	
30000	849,25	4,22	99,5	
40000	853,74	4,22	99,5	
50000	856,3	4,22	99,5	
60000	857,96	4,22	99,5	
70000	859,09	4,22	99,5	
80000	859,93	4,22	99,5	
90000	860,55	4,22	99,5	
100000	861,03	4,22	99,5	

Tabulka 2: model nádoby nad induktorem – ohmické ztráty v závislosti na simulované frekvenci

typ modelu	frekvence (Hz)	ohmic Loss vsázka (W)	ohmic Loss induktor (W)	η (%)
nádoba nad induktorem	10	1,45	4,22	25,6
	100	51,82	4,22	92,5
	200	104,06	4,22	96,1
	300	154,57	4,22	97,3
	400	200,97	4,22	97,9
	500	242,95	4,22	98,3
	600	281,09	4,22	98,5
	700	315,95	4,22	98,7
	800	347,89	4,22	98,8
	900	377,2	4,22	98,9
	1000	404,11	4,22	99,0
	2000	579,46	4,22	99,3
	3000	663,03	4,22	99,4
	4000	709,49	4,22	99,4
	5000	738,79	4,22	99,4
	6000	758,97	4,22	99,4
	7000	773,7	4,22	99,5
	8000	784,89	4,22	99,5
	9000	793,65	4,22	99,5
	10000	800,65	4,22	99,5
	20000	830,73	4,22	99,5
	30000	839,37	4,22	99,5
	40000	843,24	4,22	99,5
	50000	845,39	4,22	99,5
	60000	846,75	4,22	99,5
70000	847,68	4,22	99,5	
80000	848,34	4,22	99,5	
90000	848,83	4,22	99,5	
100000	849,21	4,22	99,5	

Tabulka 3: model nádoby uvnitř induktoru – ohmické ztráty v závislosti na simulované frekvenci

typ modelu	frekvence (Hz)	ohmic Loss vsázka (W)	ohmic Loss induktor (W)	η (%)
nádobu uvnitř induktoru	10	2,77	12,79	17,8
	100	99,89	12,79	88,6
	200	161,66	12,79	92,7
	300	199,49	12,79	94,0
	400	227,55	12,79	94,7
	500	249,74	12,79	95,1
	600	267,87	12,79	95,4
	700	283,02	12,79	95,7
	800	295,92	12,79	95,9
	900	307,07	12,79	96,0
	1000	316,82	12,79	96,1
	2000	374,55	12,79	96,7
	3000	402,72	12,79	96,9
	4000	420,44	12,79	97,0
	5000	433,2	12,79	97,1
	6000	443,17	12,79	97,2
	7000	451,38	12,79	97,2
	8000	458,35	12,79	97,3
	9000	464,42	12,79	97,3
	10000	469,79	12,79	97,3
20000	503,18	12,79	97,5	
30000	520,08	12,79	97,6	
40000	530,16	12,79	97,6	
50000	536,68	12,79	97,7	
60000	541,16	12,79	97,7	
70000	544,36	12,79	97,7	
80000	546,73	12,79	97,7	
90000	548,54	12,79	97,7	
100000	549,96	12,79	97,7	

Tabulka 4: model trubky uvnitř wave induktoru – ohmické ztráty v závislosti na simulované frekvenci

typ modelu	frekvence (Hz)	ohmic Loss vsázka (W)	ohmic Loss induktor (W)	η (%)
trubka uvnitř wave induktoru	10	0,06	77,48	0,1
	100	2,33	77,48	2,9
	200	4,17	77,48	5,1
	300	5,53	77,48	6,7
	400	6,69	77,48	7,9
	500	7,69	77,48	9,0
	600	8,59	77,48	10,0
	700	9,37	77,48	10,8
	800	10,06	77,48	11,5
	900	10,66	77,48	12,1
	1000	11,19	77,48	12,6
	2000	14,22	77,48	15,5
	3000	15,39	77,48	16,6
	4000	15,96	77,48	17,1
	5000	16,28	77,48	17,4
	6000	16,43	77,48	17,5
	7000	16,58	77,48	17,6
	8000	16,67	77,48	17,7
	9000	16,73	77,48	17,8
	10000	16,77	77,48	17,8
	20000	16,92	77,48	17,9
	30000	16,95	77,48	17,9
	40000	16,96	77,48	18,0
	50000	16,96	77,48	18,0
	60000	16,97	77,48	18,0
70000	16,97	77,48	18,0	
80000	16,97	77,48	18,0	
90000	16,97	77,48	18,0	
100000	16,97	77,48	18,0	

Tabulka 5: model trubky uvnitř spirálového induktoru – ohmické ztráty v závislosti na simulované frekvenci

typ modelu	frekvence (Hz)	ohmic Loss vsázka (W)	ohmic Loss induktor (W)	η (%)
trubka uvnitř spirálového induktoru	10	2,39	12,78	15,8
	100	106,89	12,78	89,3
	200	169,33	12,78	93,0
	300	200,25	12,78	94,0
	400	221,33	12,78	94,5
	500	237,49	12,78	94,9
	600	250,43	12,78	95,1
	700	260,99	12,78	95,3
	800	269,7	12,78	95,5
	900	276,96	12,78	95,6
	1000	283,06	12,78	95,7
	2000	312,06	12,78	96,1
	3000	320,68	12,78	96,2
	4000	324,23	12,78	96,2
	5000	326,01	12,78	96,2
	6000	327,02	12,78	96,2
	7000	327,64	12,78	96,2
	8000	328,06	12,78	96,3
	9000	328,35	12,78	96,3
	10000	328,55	12,78	96,3
	20000	329,22	12,78	96,3
	30000	329,35	12,78	96,3
	40000	329,39	12,78	96,3
	50000	329,42	12,78	96,3
60000	329,43	12,78	96,3	
70000	329,43	12,78	96,3	
80000	329,44	12,78	96,3	
90000	329,44	12,78	96,3	
100000	329,44	12,78	96,3	

Tabulka 6: účinnosti přenosu jednotlivých modelů v závislosti na simulační frekvenci

	deska nad induktorem	nádoba nad induktorem	nádoba uvnitř induktoru	trubka uvnitř wave induktoru	trubka uvnitř spiral induktoru
frekvence (Hz)	η (%)	η (%)	η (%)	η (%)	η (%)
10	31,7	25,6	17,8	0,1	15,8
100	92,1	92,5	88,6	2,9	89,3
200	96,0	96,1	92,7	5,1	93,0
300	97,3	97,3	94,0	6,7	94,0
400	97,9	97,9	94,7	7,9	94,5
500	98,3	98,3	95,1	9,0	94,9
600	98,5	98,5	95,4	10,0	95,1
700	98,7	98,7	95,7	10,8	95,3
800	98,8	98,8	95,9	11,5	95,5
900	98,9	98,9	96,0	12,1	95,6
1000	99,0	99,0	96,1	12,6	95,7
2000	99,3	99,3	96,7	15,5	96,1
3000	99,4	99,4	96,9	16,6	96,2
4000	99,4	99,4	97,0	17,1	96,2
5000	99,4	99,4	97,1	17,4	96,2
6000	99,4	99,4	97,2	17,5	96,2
7000	99,5	99,5	97,2	17,6	96,2
8000	99,5	99,5	97,3	17,7	96,3
9000	99,5	99,5	97,3	17,8	96,3
10000	99,5	99,5	97,3	17,8	96,3
20000	99,5	99,5	97,5	17,9	96,3
30000	99,5	99,5	97,6	17,9	96,3
40000	99,5	99,5	97,6	18,0	96,3
50000	99,5	99,5	97,7	18,0	96,3
60000	99,5	99,5	97,7	18,0	96,3
70000	99,5	99,5	97,7	18,0	96,3
80000	99,5	99,5	97,7	18,0	96,3
90000	99,5	99,5	97,7	18,0	96,3
100000	99,5	99,5	97,7	18,0	96,3