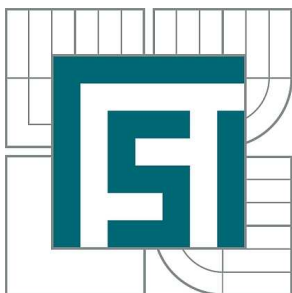


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# SIMULACE MAGNETICKÉHO OBVODU MAGNETOREOLOGICKÉ SPOJKY METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ

SIMULATION OF MAGNETORHEOLOGICAL CLUTCH MAGNETIC CIRCUIT USING THE FINITE  
ELEMENT METHOD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JOZEF DLUGOŠ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAKUB ROUPEC, Ph.D.

BRNO 2012



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Jozef Dlugoš

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

**Simulace magnetického obvodu magnetoreologické spojky metodou konečných prvků**

v anglickém jazyce:

**Simulation of magnetorheological clutch magnetic circuit using the finite element method**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem bakalářské práce je analýza rozložení magnetického pole v zadané magnetoreologické spojce a optimalizace parametrů magnetického obvodu užitím MKP softwaru Ansys Workbench.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat:

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Formulaci řešeného problému a jeho analýzu
4. Vymezení cílů práce
5. Návrh metodického přístupu k řešení
6. Analýzu a interpretaci získaných výsledků
7. Závěr

Forma práce: Průvodní zpráva

Typ BP: analytická

Účel zadání: pro V-V a tvůrčí činnost ÚK

Seznam odborné literatury:

- [1] NOVÁČEK, V. Konstrukce MR spojky. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 91 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jakub Roupec.
- [2] GONCALVES, F.D., AHMADIAN, M., CARLSON, J.D. Investigating the magnetorheological effect at high flow velocities, Smart Materials and Structures, vol. 15, no. 1, s. 75-85.
- [3] KAVLICOGLU, B. M, et al. A High-Torque Magneto-Rheological Fluid Clutch, Proceedings of SPIE Conference on Smart Materials and Structures, San Diego. 2002.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jakub Roupec, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 15.12.2011

L.S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty



---

## **ABSTRAKT**

Táto bakalarárska práca sa zaoberá analýzou magnetického poľa magnetoreologickej (MR) spojky a využitím zistených poznatkov. Prvá časť práce je spracovaná ako rešerše, potrebná pre riešenie daného problému. Nasleduje časť, v ktorej je vytváraný model MR spojky. Jeho magnetické pole, vypočítané programom využívajúcim metódu konečných prvkov (MKP), sa zhoduje s reálne nameranými výsledkami. Posledná časť práce je odľahčenie MR spojky, s ohľadom na existujúci model jej magnetického poľa.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

MKP analýza, magnetoreologická spojka, B-H krivka, magnetické pole

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis analyses magnetic field of a magnetorheological (MR) clutch and works with knowledge of these findings. The first part is treated as a background research required to solve the thesis. Following section is making a model of MR clutch. Its magnetic field, calculated in the program that use the finite element method (FEM), matches with actual measured results. The last part of the work is lightening the MR clutch, with a respect of the existing magnetic field model.

## **KEY WORDS**

FEM analysis, magnetorheological clutch, B-H curve, magnetic field



---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

DLUGOŠ, J. *SIMULACE MAGNETICKÉHO OBVODU MAGNETOREOLOGICKÉ SPOJKY METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 78 s. Vedúci bakalárskej práce Ing. Jakub Roupec, Ph.D.



---

## **PREHLÁSENIE AUTORA O PÔVODNOSTI PRÁCE**

Týmto prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne za pomoci vedúceho práce Ing. Jakuba Roupca, Ph.D. a s využitím uvedenej literatúry.

V Brne dňa 23. 5. 2012

.....  
Jozef Dlugoš



---

## **POĎAKOVANIE**

Chcel by som sa úprimne poďakovať vedúcemu práce Ing. Jakubovi Roupcovi, Ph.D. za ochotu, trpezlivosť a hodnotné rady. Ďalej ďakujem psychickej podpore priateľom a financiám rodičom.





**OBSAH**

<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>15</b>
<b>2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA.....</b>	<b>16</b>
2.1 MR kvapaliny .....	16
2.1.1 Princíp a zloženie.....	16
2.1.2 Typy použitia.....	17
2.1.3 História, súčasnosť a budúcnosť.....	18
2.2 Magnetostatická analýza v ANSYS Workbench.....	19
2.2.1 Solver Controls .....	20
2.3 MR spojky .....	21
2.3.1 Rozdelenie MR spojok .....	21
2.3.2 Konštrukcia existujúcej MR spojky .....	23
2.4 B-H krivky .....	24
<b>3 FORMULÁCIA RIEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA.....</b>	<b>26</b>
<b>4 VYMEDZENIE CIEĽU PRÁCE .....</b>	<b>27</b>
<b>5 NÁVRH METODICKÉHO PRÍSTUPU K RIEŠENIU .....</b>	<b>28</b>
<b>6 ANALÝZA A INTERPRETÁCIA ZÍSKANÝCH ÚDAJOV .....</b>	<b>29</b>
6.1 Zjednodušený model verzia 1 .....	30
6.2 Zjednodušený model verzia 2.....	32
6.3 Skutočný model verzia 1 .....	34
6.4 Skutočný model verzia 2 .....	35
6.5 Zjemňovanie mriežky .....	38
6.6 Odľahčenie statorovej časti .....	39
6.7 Experimentálne overenie odľahčenia statorovej časti .....	43
6.8 Odľahčenie lamiel .....	45
6.9 Overenie materiálu statoru a lamiel.....	47
<b>7 ZÁVER .....</b>	<b>49</b>
<b>ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV .....</b>	<b>51</b>
<b>ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN .....</b>	<b>53</b>
<b>ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV.....</b>	<b>54</b>
<b>ZOZNAM TABULIEK .....</b>	<b>55</b>
<b>ZOZNAM PRÍLOH .....</b>	<b>56</b>



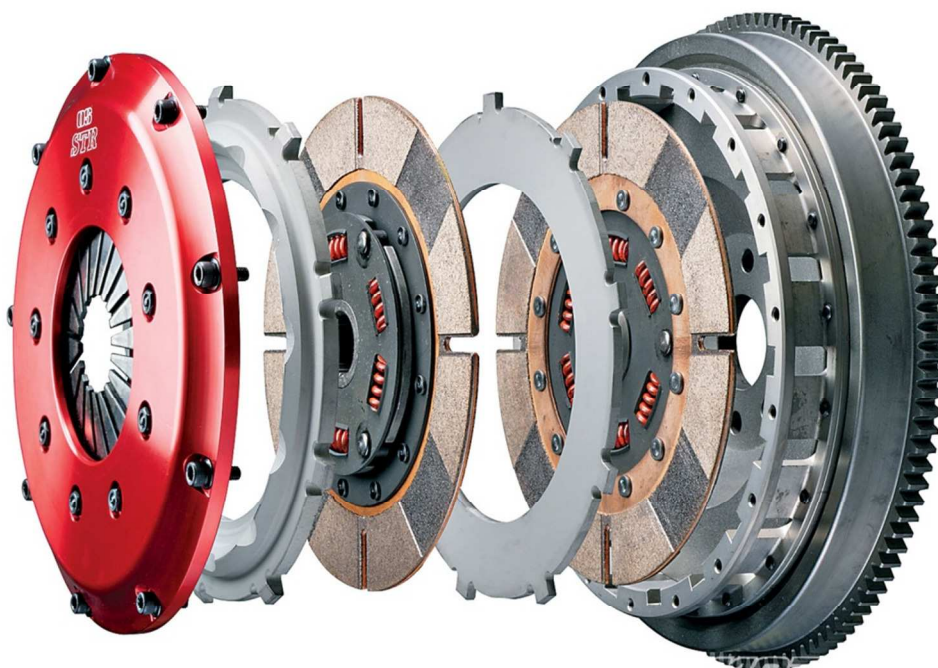
## 1 ÚVOD

Pri predstave veľmi výkonného automobilu si každý predstaví obrovskú akceleráciu, maximálnu rýchlosť, vysoký točiaci moment a iné. Ale výkon je len jedna zo zložiek, ktoré potrebuje stroj pre svoju konkurencieschopnosť. Veľmi dôležité je tento výkon preniesť. Túto funkciu, medzi inými, plní spojka.

Spojka využíva fyzikálny princíp trecích, väzbových, pružných a iných síl. To znamená, že keď je spojka zopnutá, sily prenášané cez určité médium (MR kvapalina, lamela a iné) držia stator a rotor v súbežných otáčkach. Pri rôznych otáčkach statora a rotora je spojka vypnutá alebo, ľudovo povedané, šmýka.

MR spojka využíva ako médium magnetoreologickú (MR) kvapalinu. Tá je charakteristická svojou zmenou vlastností v závislosti na magnetickom poli, v ktorom sa nachádza. Pri súčasnom veľkom rozvoji výskumu materiálov, sa hľadajú nové konštrukčné riešenia, ktoré by tieto materiály využili.

Momentálne nie je MR spojka konkurencieschopná ostatným konvenčným spojkám. Je to z dôvodu jej mladého a krátkeho rozvoja. Táto bakalárska práca sa venuje analýze magnetického obvodu, vďaka ktorému MR kvapalina mení svoju zdanlivú viskozitu, a následnému odľahčeniu spojky.



Obr. 1.1 Konvenčná dvojlamelová závodná spojka OS Giken [1]

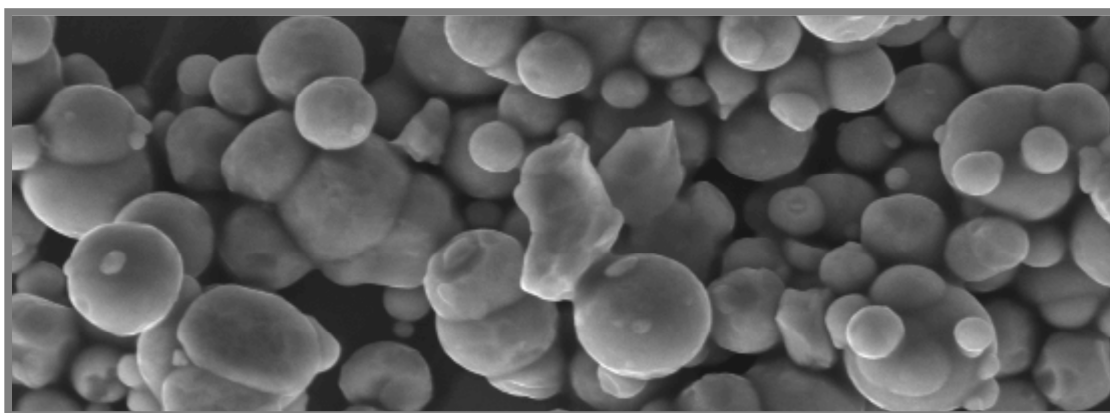
## 2 PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

### 2.1 MR kvapaliny

MR kvapaliny sú zaradené medzi tzv. *smart* (z angl. inteligentné) materiály a to v podkategórii *field responsive fluids* (z angl. kvapaliny reagujúce na pole). Do tejto podkategórie patria aj elektoreologické (ER) kvapaliny a niektoré typy polymérnych gélov [2]. Hlavná charakteristika MR kvapalín je ich schopnosť sa návratne zmeniť z voľne tečúcej, lineárne viskóznej tekutiny, na semi-tuhú látku s medzou klzu rýchlo a priebežne kontrolovateľne v prípade vystavenia magnetickému poľu.

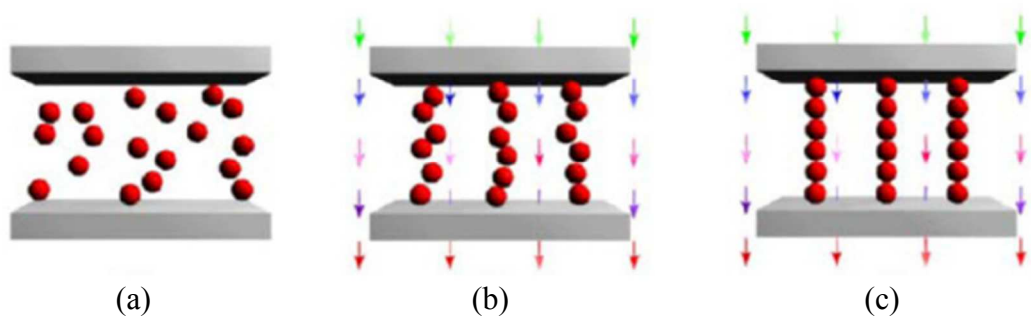
#### 2.1.1 Princíp a zloženie

MR kvapaliny sú disperzie obsahujúce polarizovateľné častice (keramické, zliatinové alebo kovové) o veľkosti rádovo v mikrometroch rozptýlené vo vodnej alebo organickej tekutine. Najpoužívateľnejší magnetický materiál v príprave MR kvapalín je vysoko čistý železný prášok (Fe). Ten má prirodzene guľčkový tvar a tým minimalizuje anizotropiu tvaru magnetického poľa (obr. 2.1). Čo sa týka nosnej kvapaliny, je dôležité, aby nebola reaktívna s magnetickými časticami alebo s materiálom, z ktorého sa skladá zariadenie. Hlavné vlastnosti, ktoré musia byť pri jej výbere zvažované, sú viskozitný index (udáva mieru zmeny viskozity v závislosti na teplote – priorita je, aby došlo k zmenám čo najmenším), antioxidačné vlastnosti, teplota varu, teplota tuhnutia a vyparovací tlak pri zvýšenej teplote.



Obr. 2.1 Železné častice pod elektrónovým mikroskopom [3]

Práve vo vyššie uvedenom zložení je zapríčinené *smart* správanie sa MR kvapalín. Keď je prítomné magnetické pole, magnetické častice sa zmagnetizujú a začnú správať ako malé magnety [4]. Následne sa usporiadajú do smeru rovnobežného so smerom magnetickej indukcie (obr. 2.2, obr. 2.3).



Obr. 2.2 Schéma orientácie kovových častíc MR kvapaliny: (a) chaoticky – bez magnetického poľa; (b) – čiastočne zoradené; (c) – plne zoradené [5]



(a) (b)

Obr. 2.3 Snímky vonkajšieho vzhľadu MR kvapaliny: (a) bez magnetického poľa; (b) v magnetickom poli [6]

Takto vzniknuté reťazové štruktúry zabraňujú pohybu kvapaliny a tým zvyšujú zdanlivú viskozitu suspenzie. Mechanická energia potrebná na sklz týchto reťazových štruktúr sa zvyšuje so zvyšujúcou sa intenzitou magnetického poľa [7]. MR kvapalina reaguje na zmenu magnetického poľa v priebehu niekoľkých milisekúnd - celková odozva zariadenia je 10 až 20 milisekúnd, a preto predstavujú jednu z najrýchlejších elektro-mechanických rozhraní.

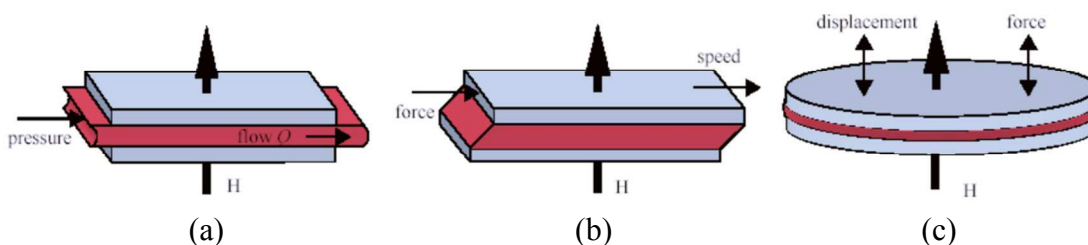
Pre kompletnosť zloženia MR kvapalín je nutné uviesť poslednú zložku a to sú aditíva. Ich úlohou je zlepšiť vlastnosti suspenzie a to napr. zabraňovať usádzaniu magnetických častíc, vytvárať ochranný plášť na časticiach, zvyšovať odolnosť a zabraňovať oxidácií. Pri použití vody, ako tekutej zložky MR kvapaliny, sú používané aditíva na kontrolovanie pH [4].

### 2.1.2 Typy použitia

Väčšina zariadení, ktoré pracujú na princípe MR kvapalín, používa jeden z troch módov toku vid'. obr. 2.4:

- *Pressure driven flow mode* (z angl. tlakom riadený mód toku – ventilový mód) - nepohyblivé póly. Tento princíp využívajú tlmiče, tlmiče rázov a ventily. Je vhodný pre aplikáciu v automobilových podvozkoch.
- *Direct-shear mode* (z angl. mód priameho šmyku – šmykový mód) - relatívne pohyblivé póly translačne alebo rotačne kolmo na aplikované magnetické pole. Využitie je v spojkách, brzdách, zámkach a tlmičoch so strednými frekvenciami pohybu.

- *Squeeze-film mode* (z angl. mód stláčaného filmu – ťahovo-tlakový) – relatívne pohyblivé póly v smere aplikovaného magnetického poľa. Reprezentanti tohto módu sú tlmiče využívané pri veľkých zaťaženiach a krátkej dráhe pohybu alebo silentbloky [8].



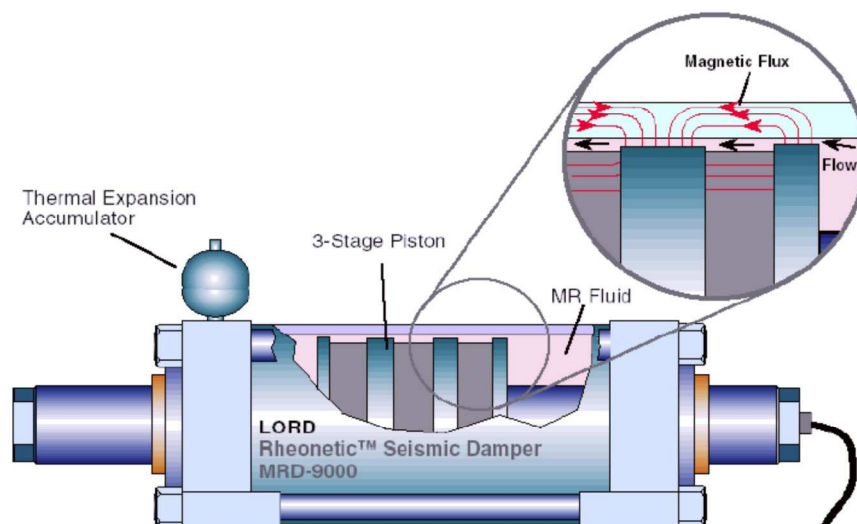
Obr. 2.4 Zaťažovacie módy MR kvapalín: (a) ventilový; (b) šmykový; (c) ťahovo-tlakový [3]

### 2.1.3 História, súčasnosť a budúcnosť

O prvotný objav a vývoj MR kvapalín sa zaslúžil Američan Jacob Rabinow v roku 1947. Jeho práca bola nezávislá no takmer konkurujúca s prácou Willisa Winslowa ohľadom ER kvapalín, ktorá vznikla, ako veľa vynálezov, náhodou. Vedci používajúci mramor a olej na konštrukciu vysokonapäťových vypínačov si všimli, že keď bol vypínač v pracovnom režime, tak sa mramor rozpadol na prášok v oleji, ktorý sa zmenil z tekutého stavu na pastu v prítomnosti vysokého napätia [2, 9]. Prvé MR kvapaliny boli použité v magneticky riadených spojkách v automobilovom priemysle v päťdesiatych a v Apollo opravných moduloch v šesťdesiatych rokoch 20. storočia.

J. David Carlson, ktorý riadi materiálové oddelenie spoločnosti Lord Corp., tvrdí, že najväčšia výzva súčasnosti je navýšenie procesu výroby MR kvapalín. „Je veľký rozdiel medzi vytvorením 1 litru tejto veci v laboratóriu a vytvorením jej v 218 litrových galónoch pre automobilový priemysel,“ hovorí, poukazujúc na to, že takýto sud MR kvapaliny váži približne pol tony. „Logisticky povedané, je to výzva miešania a manipulácie s materiálom vo veľkej miere.“ Napriek tomu sa MR kvapaliny objavili v automobiloch ako Chevrolet Corvette 2003, Audi R8, Ferrari 599GTB, Ferrari 458 Italia, Range Rover Evoque a iné. Japonský inžinieri boli prví, ktorí použili MR tlmiacu technológiu ako pomoc, pre stabilizovanie budov pri zemetraseniach a to v japonskom Múzeu vznikajúcej vedy a techniky v Tokiu (obr. 2.5).

Vedci vidia budúcnosť napríklad vo vstrekaní biokompatibilnej MR kvapaliny priamo do krvného obehu, kde by boli schopní kontrolovať tok krvi do rakovinových nádorov. Alebo možno budú prúdiť v žilách robotov, aby mohli vytvoriť pohyb rúk a končatín prirodzený ako ľudia [10].



Obr. 2.5 Seizmický tmič od firmy Lord použitý v Múzeu vznikajúcej vedy a techniky v Tokiu [9]

## 2.2 Magnetostatická analýza v ANSYS Workbench

2.2

Magnetické pole vzniká ako odozva na elektromagnet (je tvorený cievkou navinutou z drôtu okolo oceľového jadra, ktorou prechádza elektrický prúd) alebo magnet permanentný [11]. *Magnetostatic* je názov magnetickej analýzy, ktorú ponúka MKP program ANSYS Workbench. Typické použitie tejto analýzy je v elektrických zariadeniach, transformátoroch, pri indukčnom ohreve, elektromagnetických pohonoch, urýchľovačoch častíc, lekárskech a geofyzikálnych nástrojoch i iných. *Magnetostatic* analýza vyžaduje pre svoje použitie niekoľko nevyhnutných podmienok, ako aj dovoľuje určité operácie:

- Model musí mať 3-D geometriu.
- Geometria musí pozostávať z jedného telesa – v prípade sústavy telies slúži príkaz *multibody part* (viď. Príloha I). Ten zadefinuje kontaktné plochy súčiastok, pretože *Magnetostatic* používa prvok SOLID117, ktorý nepodporuje kontaktné elementy.
- Vzduch obklopujúci skúmanú fyzikálnu geometriu musí byť vymodelovaný ako časť celkovej geometrie – príkaz *Enclosure* (viď. Príloha I). Je dôležité, aby výsledná geometria bola jedno teleso spolu so vzduchom (*multibody part*).
- Pri použití symetrického modelu je pre zrýchlenie výpočtu vhodné využiť nástroj *Symmetry*. Ten dokáže rozdeliť plne symetrický model alebo identifikovať roviny symetrie pri časti symetrického modelu.
- Umožňuje *multi-step solution* – riešenie rozdelené do krokov.

Workbench odporúča používať čo najmenej pyramídových elementov v kritických oblastiach modelu, ktoré sú aplikované na spájanie z hexagonálnych elementov na tetrahedrány. Túto minimalizáciu je možné dosiahnuť špecifikovaním tvaru elementov v príkaze *Method* (viz. Príloha I). Pre detailnejšie možnosti ohľadom nastavenia siete odporúčam hľadať v [12] výraz „*Physics Preference*,“ kde sú uvedené aj vysvetlivky.



### 2.2.1 Solver Controls

*Solver Controls* (z angl. ovládanie riešiča) ponúka dve metódy riešenia a to je priama alebo iteračná. Pri priamej metóde je konvergencia zaručená, ale jej nevýhodou je technická náročnosť výpočtu zo stránky operačnej pamäte. Pri použití iteračnej metódy nenastáva problém s operačnou pamäťou, na druhej strane nie je zaručená konvergencia.

Typ riešiča je špecifikovaný príkazom EQSLV. Ten sa skladá z viacerých vstupných parametrov ako je *Lab*, *TOLER*, *MULT*, *KeepFile* (spôsob zadávania príkazu vid'. Príloha I).

*Lab* špecifikuje typ riešiča rovnice:

(a) *Priame*:

- **SPARSE** – Prednastavený (*Program Controlled, Direct*) riešič, ktorý je alternatívou iteračných riešičov, pretože kombinuje rýchlosť a robustnosť. Všeobecne platí, že potrebuje operačnú pamäť zrovnateľnú s PCG riešičom.

(b) *Iteračné*:

- **PCG** – *Pre-codnitioned Conjugate Gradient* riešič. Vyžaduje menej miesta na disku ako SPARSE, je rýchlejší pre väčšie modely a je vhodný pre nelineárne analýzy. Vyžaduje dvojnásobok operačnej pamäte oproti JCG riešiču. Dokáže zvládnuť zle podmienené matice.
- **JCG** – *Jacobi Conjugate Gradient* riešič. Efektívny pre prenos tepla, elektomagnetizmus, piezoelektrizmus a akustické problémy.
- **ICCG** – *Incomplete Conjugate Gradient* prednastavený riešič (*Iterative*), ktorý využíva viac operačnej pamäte ako JCG, ale je aj viac robustný pre zle podmienené matice.
- **ITER** – Automaticky volí iteračný riešič pre konkrétne vlastnosti riešeného problému. Je dostupný len pre elektrostatické, ustálené alebo prechodné tepelné, lineárne statické a plne prechodné štrukturálne analýzy bez superelementov. Ak je použitý automatický iteračný riešič, ale podmienky pre výber nie sú splnené, program prepne na SPARSE riešič.
- **QMR** – *Quasi-Minimal Residual* iteračný riešič. Dostupný pre štrukturálne, kvapalinové, magnetické a elektrické stupne voľnosti. Tento riešič je vhodný pre vysokofrekvenčné magnetické aplikácie, a pritom je stabilnejší ako ICCG.

Podrobnejšie informácie ohľadom riešičov sú v [11] v kategórii „EQSLV.“

Ďalší parameter príkazu EQSLV je *MULT*, ktorý kontroluje maximálny počet iterácií uskutočnených počas výpočtov. Používa sa len v spojení s PCG riešičom. Prednastavená hodnota je 2,5 pre nelineárne a 1,0 pre lineárne analýzy. Maximálny počet iterácií je rovný  $MULT \cdot DOF$ , pričom DOF (Degrees of Freedom) je počet stupňov voľnosti. Iterácie pokračujú dokým nebola dosiahnutá konvergencia riešenia alebo nebol vykonaný maximálny počet iterácií. Ak riešenie nekonverguje pre hodnoty  $1,0 \leq MULT \leq 3,0$  alebo pre menej ako 10 000 iterácií, je veľká pravdepodobnosť, že konvergencia nenastane vôbec a je potrebná úprava modelu.

Pri riešení magnetického poľa je veľmi dôležité držať sa rád, ktoré nám program ANSYS Workbench ponúka. Zdroje týchto rád sú v Solution Information (vid'.



Príloha I) a v Helpe [12]. Pri jednoduchých modeloch, sa dá použiť metóda pokus-omyl. Ako náhle je model zložitejší, jeho výpočet trvá veľmi dlho (rádovo aj dni), a preto strácame veľa času, ktorý v praxi samozrejme nemáme.

## 2.3 MR spojky

2.3

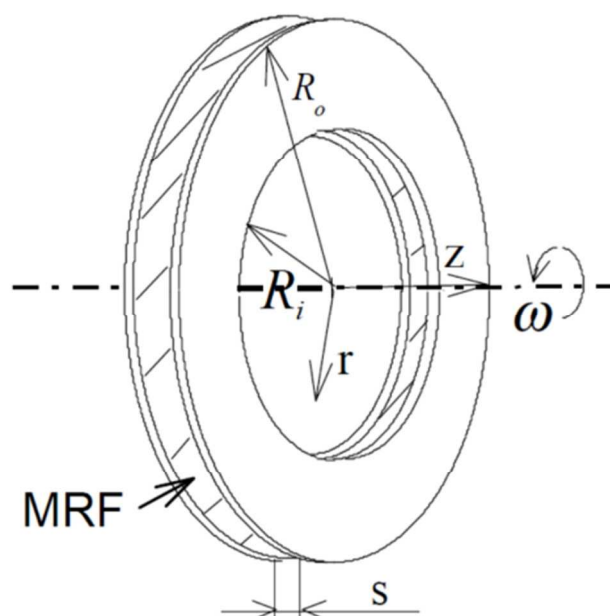
Magnetoreologické spojky sú charakteristické veľmi dobrou kontrolovateľnosťou prenášaného točivého momentu a malými reakčnými časmi. Najväčšia výhoda oproti bežným spojkám pozostáva v ich elektrickom ovládaní bez mechanizmov. Vzhľadom na niekoľko nevyriešených problémov, MR spojky zatiaľ nezaplňujú veľkú časť trhu.

### 2.3.1 Rozdelenie MR spojok

2.3.1

Rozdelenie, ktoré si popíšeme, je na spojky s axiálnou a radiálnou medzerou:

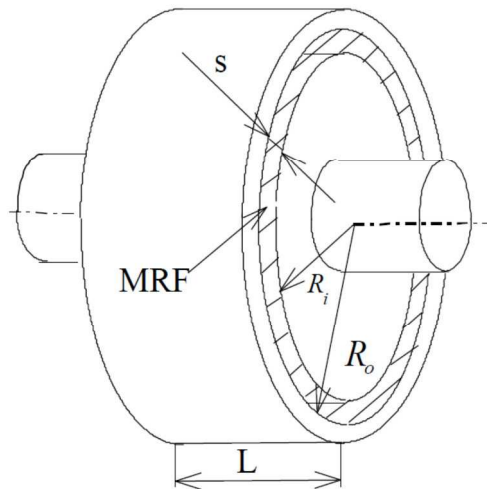
(a) Axiálna medzera



Obr. 2.6 Schéma MR spojky s axiálnou medzerou [13]

Zdanlivá viskozita MR kvapaliny sa zvyšuje so zväčšujúcim sa polomerom  $r$  (viď. obr. 2.6). Spojky s axiálnou medzerou sa vyznačujú skokovou zmenou prenášaného točivého momentu pri prechode z neaktivovaného do aktivovaného stavu. Tento nechcený jav môže byť obmedzený voľbou vhodnej geometrie a to vnútorného polomeru  $R_i$  a vonkajšieho  $R_o$  [14].

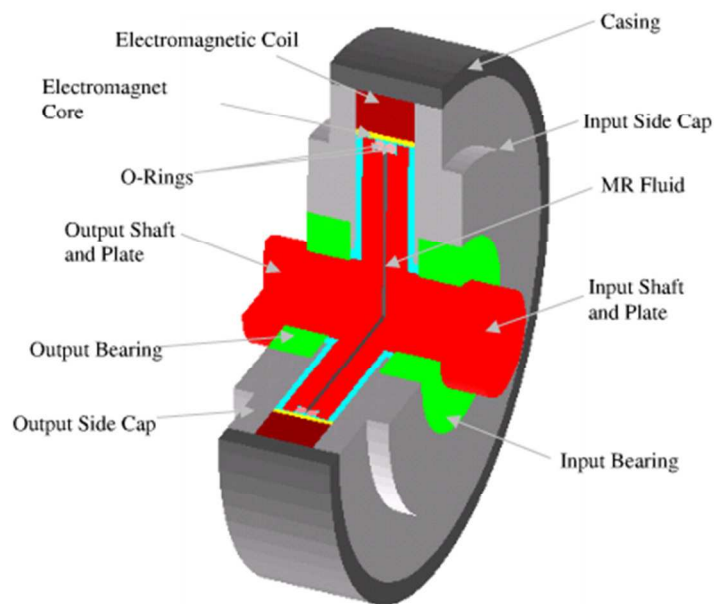
(b) Radiálna medzera



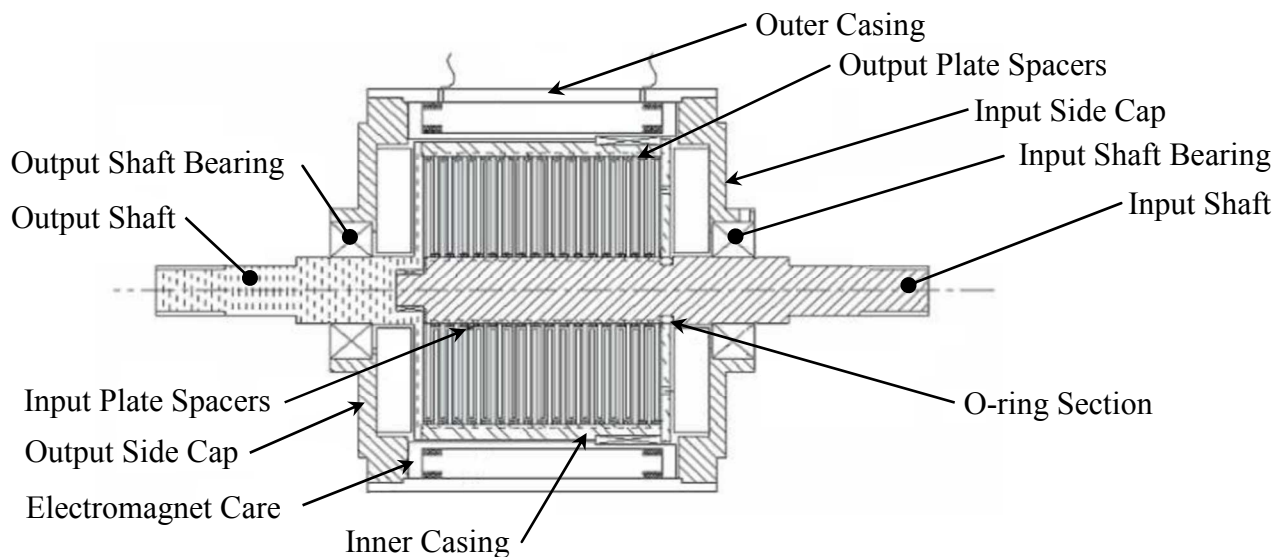
Obr. 2.7 Schéma MR spojky s radiálnou medzerou [13]

Pre malé hrúbky medzery  $s$  sa zdanlivá viskozita MR kvapaliny zvyšuje so zväčšujúcou sa dĺžkou medzery  $L$  (vid'. obr. 2.7). Pri týchto spojkách dochádza k plynulej zmene prenášaného točivého momentu [14].

Na obrázkoch obr. 2.8 a obr. 2.9 sú uvedené vybrané konštrukčné riešenia MR spojok.



Obr. 2.8 Dvojdisková axiálna MR spojka [15]



Obr. 2.9 Multidiskový axiálny MR diferenciál [16]

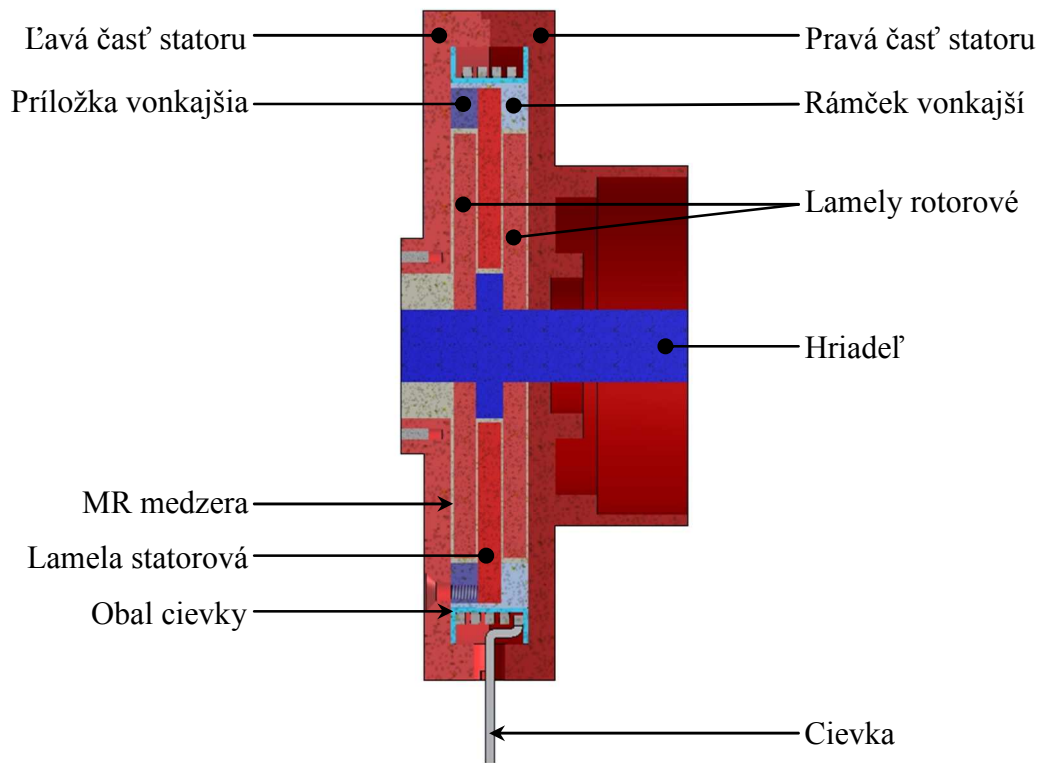
### 2.3.2 Konštrukcia existujúcej MR spojky

2.3.2

Z obr. 2.10 a tab. 2.1 je zrejme ktoré časti spojky majú na jej hmotnosť najväčší vplyv. Je to Ľavá a Pravá časť statoru. Hriadeľ je relatívne objemný, ale je vyrobený z ľahkej duralovej liatiny, takže je zachovaná jeho nízka hmotnosť. Dôvod, prečo tento materiál nie je použitý pri ostatných častiach spojky je jeho paramagnetizmus (veľmi mierne zosilňuje magnetické pole vid' kap. 2.4). Na rozdiel od Hriadeľa, Ľavá a Pravá časť plnia funkciu lamiel, takže musia magnetické pole zosilňovať výrazne – musia byť vyrobené z feromagnetického látky napr. z ocele.

Tab. 2.1 Hmotnosti jednotlivých súčiastok zostrojenej MR spojky

Súčiastka	Materiál	Hmotnosť [kg]
Pravá časť statoru	ocel'	1,004
Ľavá časť statoru	ocel'	1,276
Hriadeľ	dural	0,052
Lamela statorová	ocel'	0,361
Lamela rotorová	ocel'	0,261
Rámček vonkajší	dural	0,061
Príložka vonkajšia	hliník	0,044
Obal cievky	plast	0,009
Cievka	meď	0,369
<b>Celkovo</b>		<b>3,437</b>



Obr. 2.10 Zjednodušený model zostrojenej MR spojky [14]

## 2.4 B-H krivky

B-H krivky sú matematicky popísané rovnicou:

$$B = H\mu_r\mu_0 \quad (1)$$

kde:

$B$	T	magnetická indukcia
$H$	$A.m^{-1}$	intenzita magnetického poľa
$\mu_0$	$H.m^{-1}$	permeabilita vákua
$\mu_r$	-	relatívna permeabilita

Vzťah potrebný pre veľkosť magnetickej indukcie je:

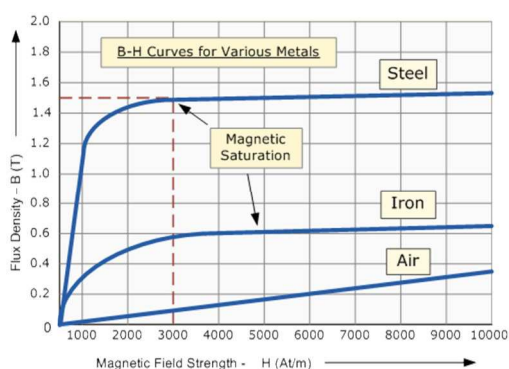
$$B = \frac{\phi}{S} \quad (2)$$

kde:

$\phi$	Wb	magnetický indukčný tok
$S$	$m^2$	plocha, ktorou prechádza magnetický indukčný tok

Vzťah (2) vyjadruje dôležitú nepriamu úmeru, kde so znižujúcou plochou sa zväčšuje magnetická indukcia. Magnetický indukčný tok je závislý na el. prúde pretekajúcom cievkou, geometrických vlastnostiach cievky a vedenia.

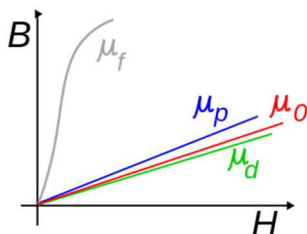
Na obr. 2.11 sú zobrazené B-H krivky rôznych materiálov a to lineárnych (vzduch) a nelineárnych (ocel, železo). Vzťah (1) nám predstavuje B-H krivku, z ktorej vidno smernicu – permeabilitu – sklonu krivky závislosti magnetickej indukcie  $B$  na intenzite magnetického poľa  $H$ . Z matematiky je dobre známe, že priamky majú nemennú smernicu (lineárne materiály majú konštantnú permeabilitu) a nelineárne krivky majú smernicu premenlivú (nelineárne materiály majú premennú permeabilitu). Táto zmena veľkosti permeability je spôsobená zoradením sa veľmi malých častíc materiálu. Tie sú pri určitej hodnote intenzity magnetického poľa zoradené v najdokonalejšej možnej polohe, a preto so zvyšujúcou sa intenzitou magnetického poľa nedochádza k zmene magnetickej indukcie.



Obr. 2.11 B-H krivky ocele, železa a vzduchu [17]

Materiály môžeme rozdeliť na tri základné skupiny (obr. 2.12) podľa toho ako reagujú na vonkajšie magnetické pole:

- *feromagnetické* – na magnetické pole reagujú najsilnejšie, sú schopné byť zmagnetizované tzn. aj po zániku vonkajšieho magnetického poľa dokážu udržať magnetizmus. Vo všeobecnosti platí, že výrazne zosilňujú silové účinky magnetického poľa. Pre permeabilitu feromagnetických látok platí  $\mu_f \gg \mu_0$ , pričom  $\mu_0$  je permeabilita vákua.
- *paramagnetické* – tieto látky sa správajú magneticky, len v prítomnosti vonkajšieho magnetického poľa,  $\mu_p > \mu_0$ .
- *diamagnetické* – po vložení takéhoto materiálu do magnetického poľa sa zoslabí tzn.  $\mu_d < \mu_0$ .



Obr. 2.12 B-H krivka feromagnetického (sivá), paramagnetického (modrá), diamagnetického materiálu (zelená) a vákua (červená) [18]

### **3 FORMULÁCIA RIEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA**

V súčasnosti nevieme ako vypadá magnetické pole v jednotlivých častiach obvodu alebo v oblasti mimo meracej drážky, v ktorej máme výsledky z merania Hallovou sondou. Tá ma hrúbku 1 mm a pre jej aplikáciu je nutná vyššie spomínaná drážka. Preto sa objavuje ďalší problém, a to ako veľmi drážka ovplyvňuje jej okolie z hľadiska magnetického správania. Reálne namerané výsledky poslúžia ako porovnanie s MKP výsledkami.

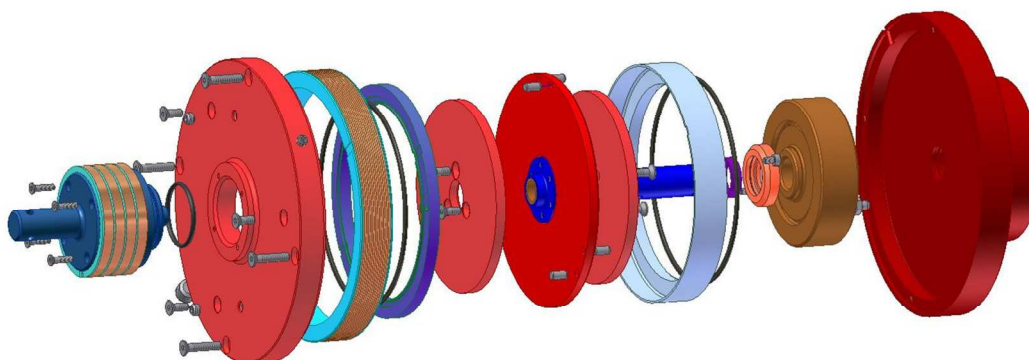
Aby sme boli schopní navrhnúť odľahčenie spojky, ktoré je potrebné z dôvodu jej vysokej hmotnosti v dôsledku predimenzovania niektorých súčiastok, je nutné poznať správanie sa magnetického poľa v pevných častiach. Takéto meranie Hallovou sondou je nemožné. Preto sa ako možnosť naskytuje vytvorenie virtuálneho modelu – MKP analýza, na základe ktorého môžeme navrhnúť odľahčenie a po realizácii ho aj overiť.

#### 4 VYMEDZENIE CIEĽU PRÁCE

Hlavný cieľ bakalárskej práce je vytvorenie zatiaľ neexistujúceho modelu magnetického poľa zostrojenej MR spojky a jeho overenie. Nasleduje odľahčenie spojky s ohľadom na zachovanie jej funkcie, ktoré bude experimentálne overené. Pri riešení sa objavuje vedľajší cieľ a to zostavenie postupu – návodu – pre analýzu magnetického poľa.

Kontrolovateľné ciele:

1. Zistenie rozloženia magnetického poľa v zadanej MR spojke použitím MKP softwaru ANSYS Workbench.
2. Porovnanie magnetického poľa na MKP modeli s reálne nameranými výsledkami na existujúcej MR spojke.
3. Zmenšenie hmotnosti spojky s využitím znalostí o rozložení magnetického poľa z predchádzajúcich bodov.



Obr. 4.1 Rozpad existujúcej MR spojky na jednotlivé komponenty [14]

## **5 NÁVRH METODICKÉHO PRÍSTUPU K RIEŠENIU**

Pri riešení bakalárskej práce sa postupovalo podľa tohto metodického postupu.

### *Rešerše*

Táto časť je zameraná na získanie informácií ohľadom MR kvapalín, MR spojok, magnetických materiálov a ANSYS Workbench pre lepšie uvedenie do problematiky. Slúži ako teoretický základ nevyhnutný pre riešenie zadanej bakalárskej práce.

### *Rozloženie magnetického poľa zjednodušeného modelu MR spojky*

Najprv je vytvorený zjednodušený model MR spojky, na ktorom sú zisťované potrebné kroky pre vytvorenie magnetického poľa pomocou MKP analýzy. Model neobsahuje skosenia, zaoblenia, diery, niektoré nepodstatné súčiastky (napr. ložiská) a používa magneticky lineárne materiály. Sú v ňom zjednodušené aj tvary niektorých častí spojky, pre zvýšenie rýchlosti výpočtu a lepšiu manipuláciu s výsledkami.

### *Postupný prechod na reálny model*

V tomto štádiu je postup vytvorenia magnetického poľa v programe ANSYS Workbench dobre známy. Úlohou je zistiť, ktoré zjednodušenia je nevyhnutné zrušiť, aby sme sa čo najviac priblížili reálnym meraniam magnetického poľa. Nasleduje zjemnenie mriežky, pre zvýšenú presnosť výpočtu, a hľadanie vhodného riešiča.

### *Návrh odľahčenia*

Tento návrh vychádza z MKP modelu spojky s výhodne vybranou hustotou mriežky s ohľadom na výpočtový čas a presnosť výpočtu. Následne je vytvorená odľahčená geometria MR spojky v CAD programe, ktorá je privedená do MKP softwaru. V ňom sa vypočíta magnetické pole a zhodnotí, či navrhovaný odber materiálu je prijateľný.

### *Realizácia odľahčenia*

Spojka sa odľahčí na navrhované rozmery vhodnou technologickou operáciou v jednom kroku. Tzn. veľkosť celkového odberu materiálu je zhodná s navrhovaným.

### *Experimentálne overenie navrhovanej zmeny*

Overenie sa skladá z porovnania magnetickej indukcie, ktorú očakávame na základe odľahčeného MKP modelu a ktorá je nameraná po celkovom navrhovanom odľahčení spojky Hallovou sondou.



## 6 ANALÝZA A INTERPRETÁCIA ZÍSKANÝCH ÚDAJOV

Reálne namerané hodnoty magnetickej indukcie (obr. 6.1) vznikli pri meraní Hallovou sondou v meracej drážke MR spojky, ktorá nebola naplnená MR kvapalinou, ale v MR medzere sa nachádzal vzduch [19]. Meralo sa pri el. prúde prechádzajúcom 100 závitovou cievkou 1,5 A. Pre cievky platí vzťah:

$$U_m = I \cdot z = 1,5A \cdot 100 \text{závit} = 150A \cdot \text{závit} \quad (3)$$

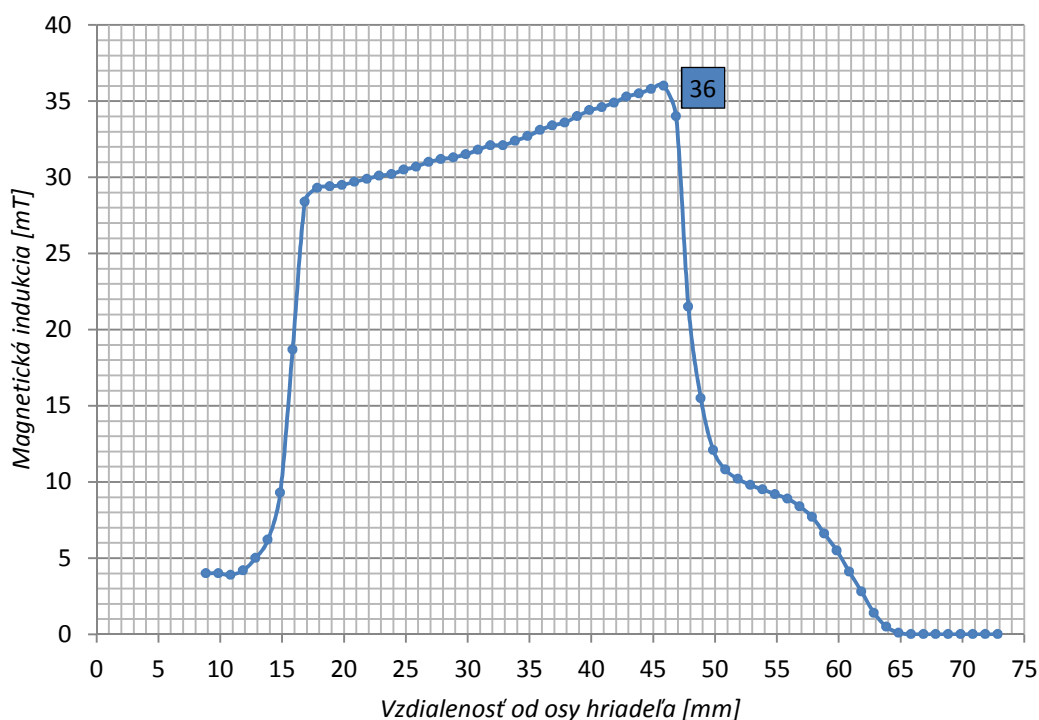
kde:

$U_m$	A.závit	elektromotorické napätie
$I$	A	el. prúd prechádzajúci cievkou
$z$	závit	počet závitov cievky

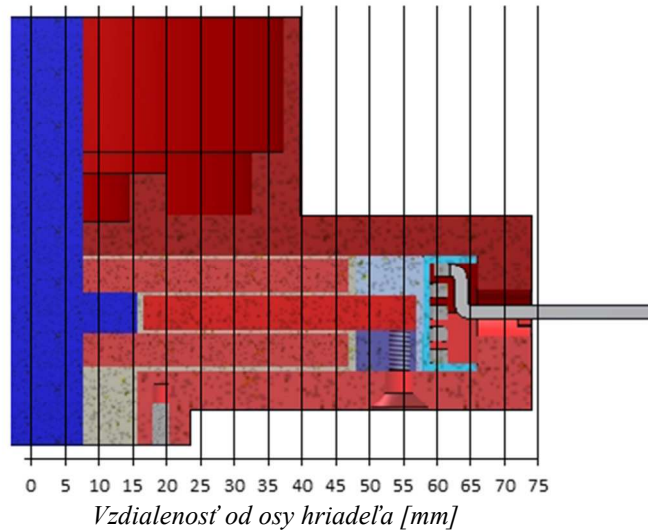
My používame v modeli MR spojky zjednodušenú cievku, ktorá ma 4 závit a preto prepočítame el. prúd prechádzajúci cievkou z upravenej verzie vzorca (3) pri zachovaní konštantného elektromotorického napätia:

$$I = \frac{U_m}{z} = \frac{150A \cdot \text{závit}}{4 \text{závity}} = 37,5A \quad (4)$$

Preto budeme v MKP analýze ako budiaci el. prúd zadávať hodnotu 37,5A (viď. Príloha I).



Obr. 6.1 Graf reálne nameraných hodnôt magnetickej indukcie Hallovou sondou [19]



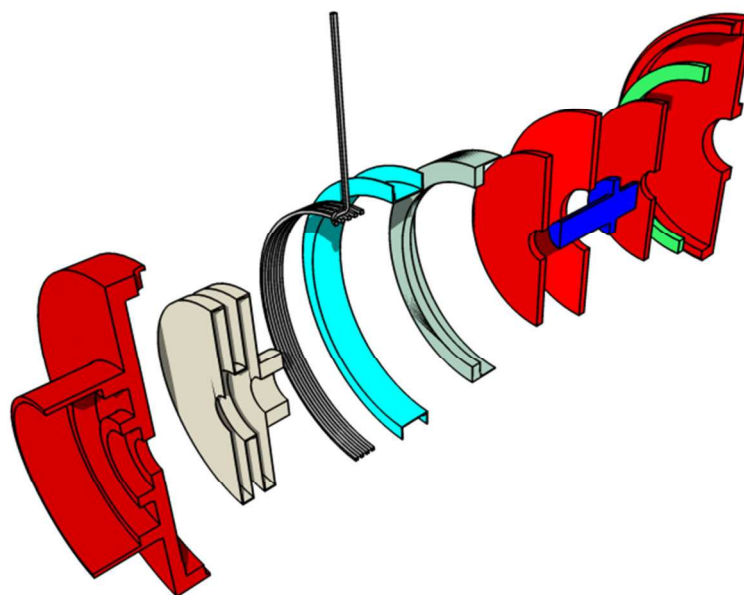
Obr. 6.2 Rozmery MR spojky v radiálnom smere

### 6.1 Zjednodušený model verzia 1

Model neobsahuje šróby, ložiská, meraciu drážku, zaoblenia, skosenia a je v ňom upravená MR medzera (obr. 6.3). V ANSYS Workbench pracujeme s magneticky lineárnym materiálom statoru a lamiel s relatívnou permeabilitou 2 000.

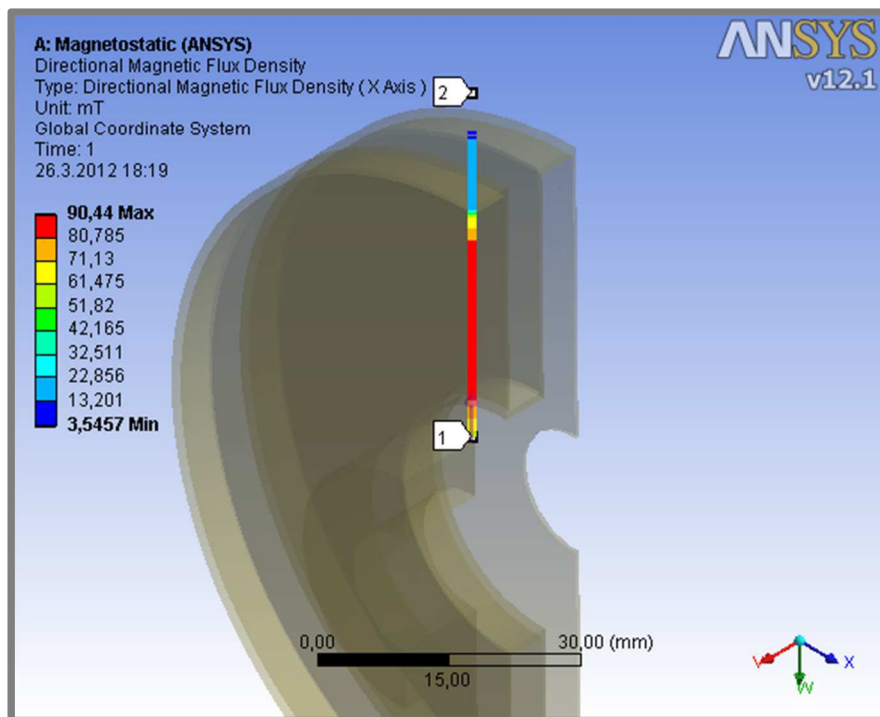
Dôvod použitia takéhoto jednoduchého modelu je uvedený v kap. 5 a to je zistenie potrebných krokov a operácií, pre určenie magnetickej indukcie v MKP programe. Z hľadiska hustoty mriežky je celkový počet elementov 177 314.

*Magnetostatic* analýza podporuje riešenie symetrických úloh (vid' kap. 2.2). Tento najjednoduchší model MR spojky je ale riešený ako 3D teleso, pretože predpokladáme zrušenie určitých zjednodušení, ktoré nie je možné v symetrii definovať a ktoré nám výrazne presnia výsledky.

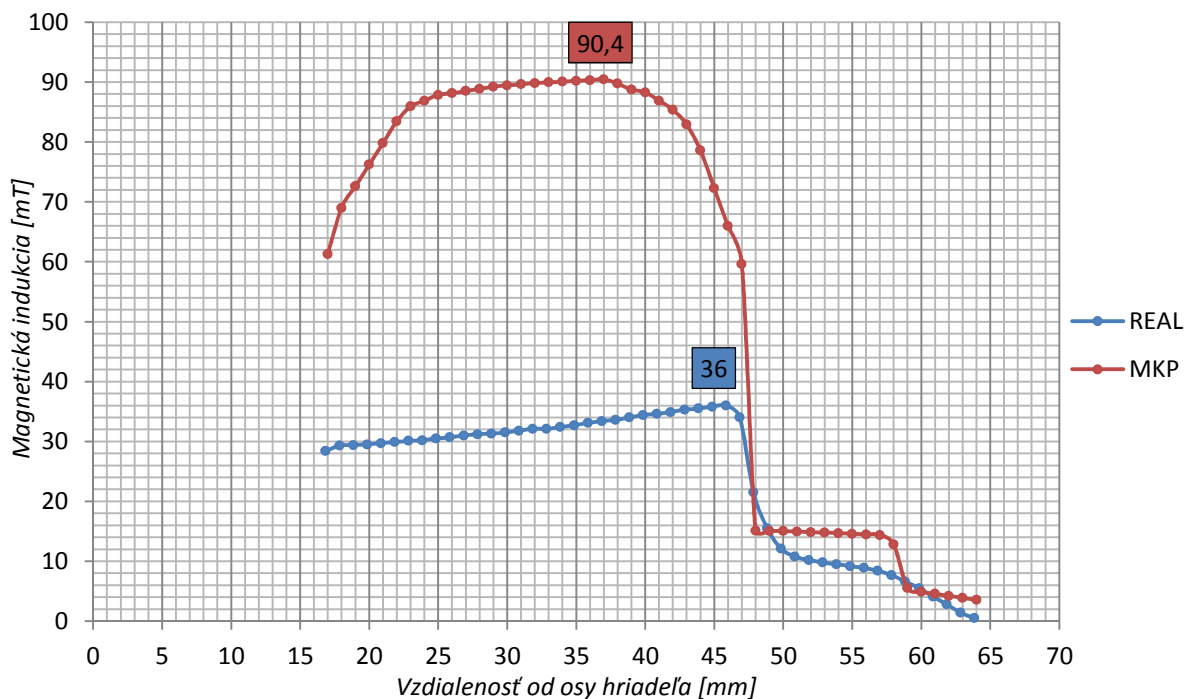


Obr. 6.3 Zjednodušený model verzia 1

Magnetickú indukciu vypočítavame v strede MR medzery, ktorá má hrúbku 0,5 mm (obr. 6.4). Graf na obr. 6.5 je číselné vyjadrenie hodnôt magnetických indukcií na dráhe medzi bodmi 1 a 2, ktoré sú na obr. 6.4. Na tomto grafe vidíme rozdiel medzi reálne nameranými hodnotami a MKP výsledkami, ktorý v porovnaní maxim predstavuje relatívnu chybu 151%.



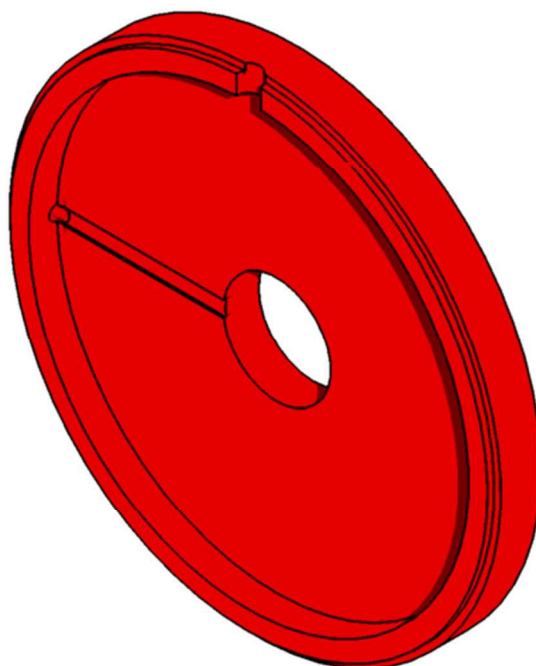
Obr. 6.4 Dráha vypočítavanej magnetickej indukcie v strede MR medzery



Obr. 6.5 Graf reálne nameraných hodnôt a MKP vypočítaných magnetických indukcií Zjedodušeného modelu verzia 1

## 6.2 Zjednodušený model verzia 2

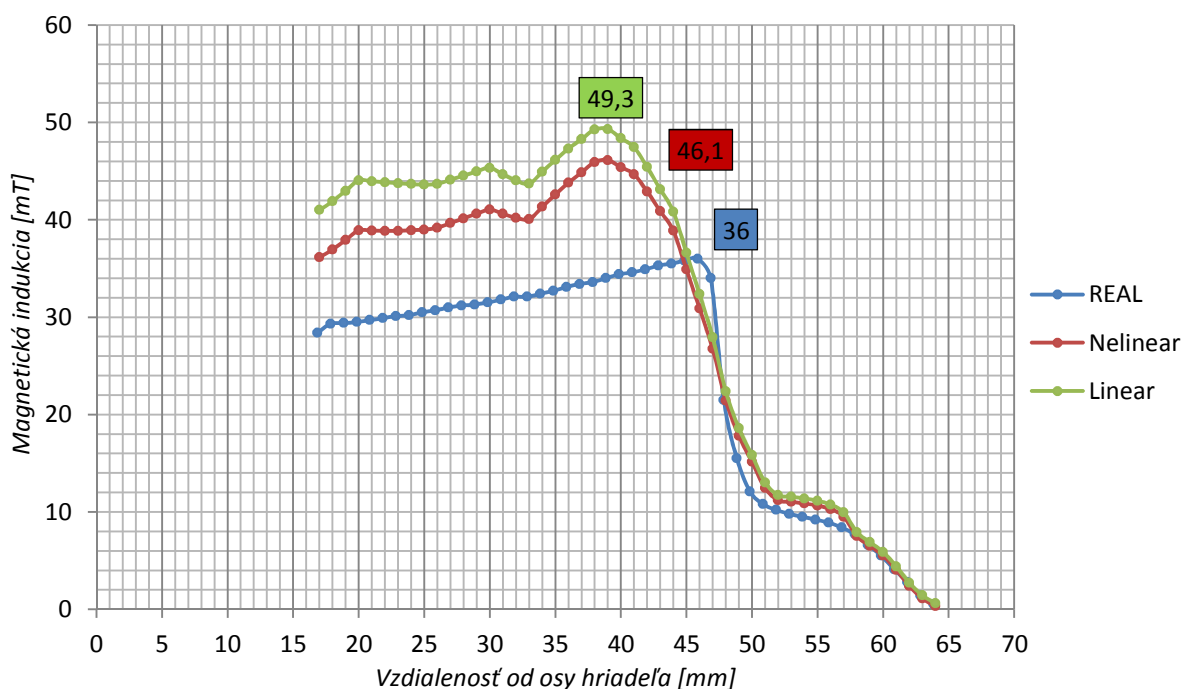
V predchádzajúcej verzii modelu sme zistili, že medzi MKP vypočítanými a nameranými výsledkami Hallovou sondou je výrazný rozdiel. Ako prvé riešenie nás napadá vytvorenie meracej drážky. Tá má šírku 4,5 mm; skutočnú hĺbku 0,8 mm a nachádza sa na ľavej časti statoru. Preto ľavú časť statoru nahradíme modelom zobrazeným na obr. 6.6. Meracej drážke sme doteraz neprikladali veľký vplyv na vypočítanú magnetickú indukciu, kvôli jej malým rozmerom.



Obr. 6.6 Ľavá časť statoru s meracou drážkou

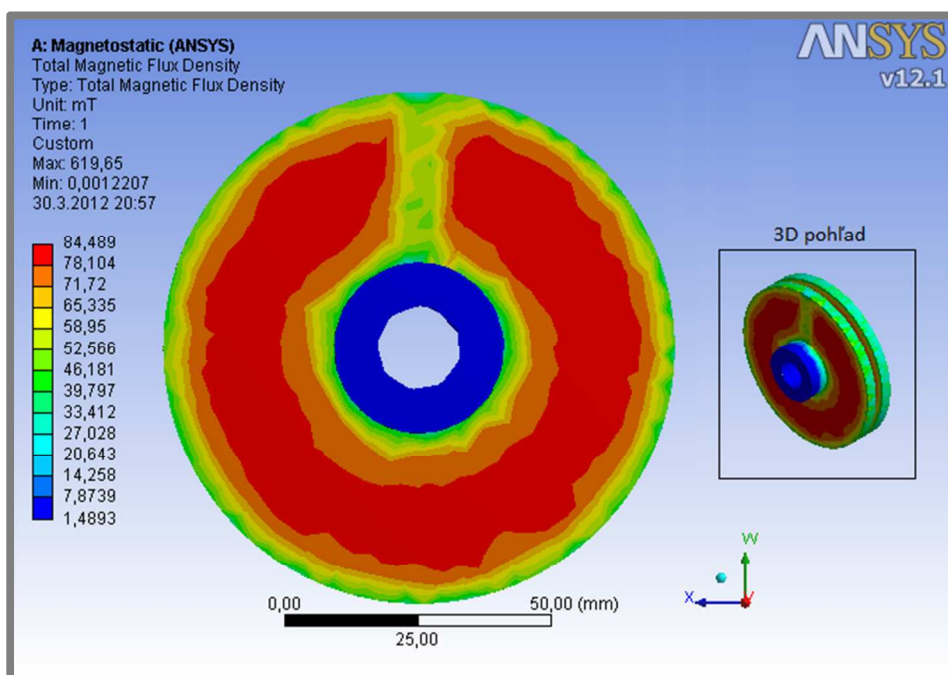
Pri počítaní magnetickej indukcie na MKP modeli s meracou drážkou použijeme dve variácie materiálu lamiel a statoru, a to magneticky lineárny (rovnaký ako v modeli kap. 6.1) a nelineárny (1018 Steel 90,5 HRB). Dráhu, na ktorej budeme počítať magnetickú indukciu pomocou MKP, umiestnime 0,5 mm odo dna meracej drážky. Vyplýva to z rozmerov Hallovej sondy, u ktorej predpokladáme, že meria magnetickú indukciu v strede svojej hrúbky, ktorá je 1 mm.

Graf reálne nameranej a MKP vypočítanej magnetickej indukcie pri použití magneticky lineárneho a nelineárneho materiálu statoru a lamiel (obr. 6.7) ukazuje, že existencia meracej drážky má na výsledky veľký vplyv. Trendy všetkých troch kriviek sa veľmi podobajú. Chyba počítaná medzi extrémami je pri lineárnom materiáli 37% a pri nelineárnom materiáli predstavuje 28%. Preto ďalej budeme používať magneticky nelineárny materiál statoru a zistíme, ktoré zjednodušenia majú zásadný vplyv na priblíženie sa reálne nameraným hodnotám.



Obr. 6.7 Graf reálne namerných a MKP vypočítaných magnetických indukcií Zjednodušeného modelu verzia 2 s lineárnym a nelineárnym materiálom

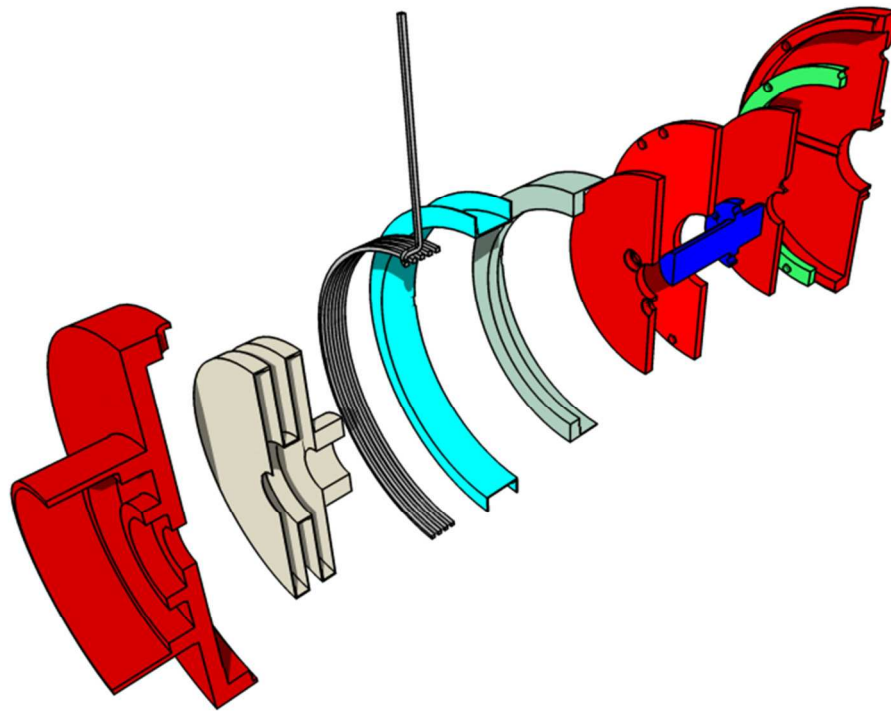
Dôvod veľkého rozdielu medzi Zjednodušeným modelom verzia 1 a 2 je správanie sa meracej drážky ako vrubu na magnetické pole (obr. 6.8). Ďalšie vysvetlenie je v umiestnení dráhy meraného a počítaného magnetického poľa. V Zjednodušenom modeli verzia 1 (kap. 6.1) je meraná a počítaná dráha v rôznych oblastiach materiálu.



Obr. 6.8 Vplyv meracej drážky na magnetickú indukciu MR medzery pri použití nelineárneho materiálu

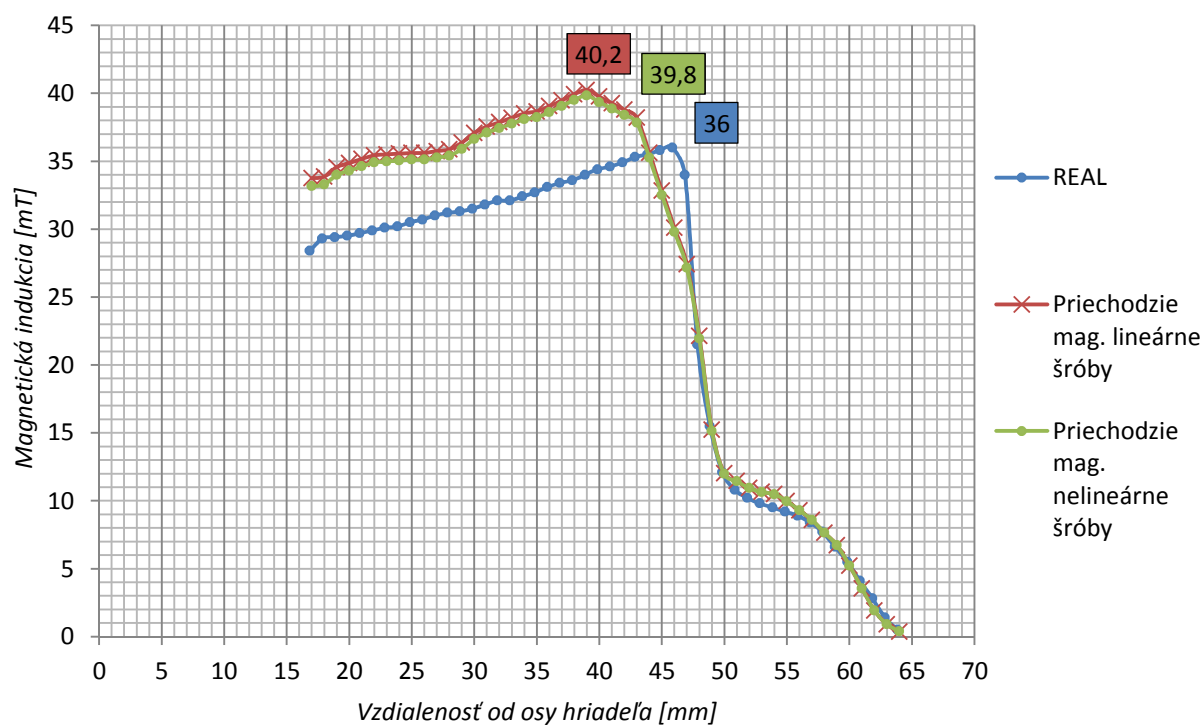
### 6.3 Skutočný model verzia 1

V tejto kapitole zisťujeme aký vplyv na magnetické pole majú spojovacie šróby, a preto Zjednodušený model verzia 2 upravíme o všetky otvory pre šróby a kolíky (obr. 6.9). Tieto otvory budú v *ANSYS Workbench DesignModeler* pomocou príkazu *Enclosure* (viď. Príloha I.) vyplnené telesami, ktorým priradíme kovový materiál. Ten bude najprv magneticky lineárny s relatívnou permeabilitou 800 a následne magneticky nelineárny 1018 Steel 90,5 HRB.



Obr. 6.9 Skutočný model verzia 1

MKP model má 210 261 elementov. Pri nelineárnom materiáli šróbov vyžadoval výpočet 2 050 sekúnd a 1 246 MB operačnej pamäte. Model s lineárnym materiálom šróbov bol menej náročný, trval 647 sekúnd a potreboval 1 249 MB. Z grafu na obr. 6.10 sa dá vyčítať relatívna chyba maxím, voči reálne nameraným hodnotám, pri lineárnom materiáli na 11% a pri nelineárnom to činí 10%. Rozdiel týchto dvoch odchýliek je nevýrazný vzhľadom na rozdiel výpočtových časov, a preto budeme ďalej pracovať s magneticky lineárnym materiálom šróbov s relatívnou permeabilitou 800.

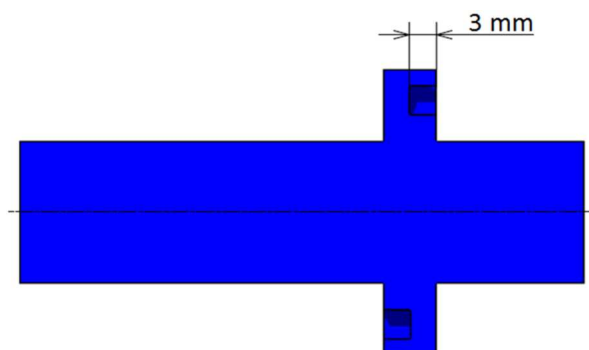


Obr. 6.10 Graf reálne nameraných a MKP vypočítaných magnetických indukcií Skutočného modelu verzia 1 s lineárnym a nelineárnym materiálom šróbov

## 6.4 Skutočný model verzia 2

V predchádzajúcej kapitole sme sa venovali modelu MR spojky s otvormi, ktoré reprezentovali priechodzie šróby. V skutočnosti sú šróby zašróbované len do určitej vzdialenosti a zvyšok otvoru je zaplnený paramagnetickým vzduchom. Preto vymodelujeme hriadeľ, ktorý bude obsahovať nepriechodzie diery do vzdialenosti 3 mm, čo predstavuje skutočnú dĺžku zašróbovanej časti šróbu v hriadeľi (obr. 6.11). Ako aj v predošlých kapitolách, urobíme dve variácie a to pri magneticky lineárnom a nelineárnom materiáli šróbov. Na základe skúseností predpokladáme, že magneticky nelineárny materiál šróbov rapídne zvýši výpočtovú náročnosť pri minimálnom spresnení výpočtu.

6.4

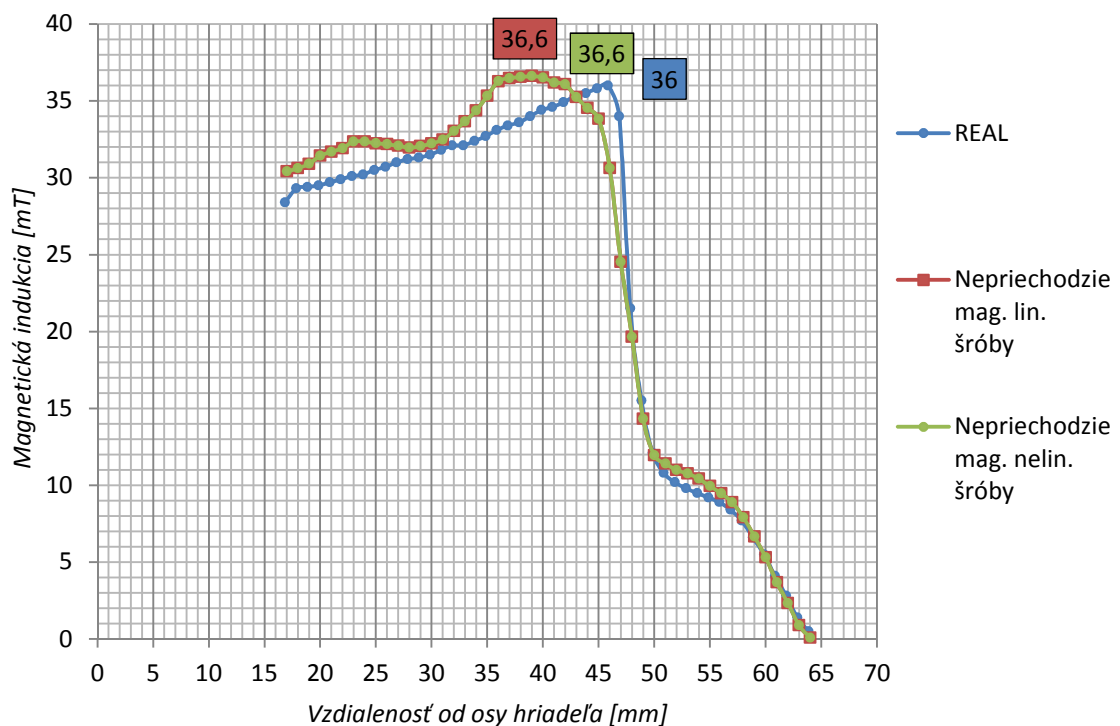


Obr. 6.11 Hriadeľ s nepriechodzími otvormi



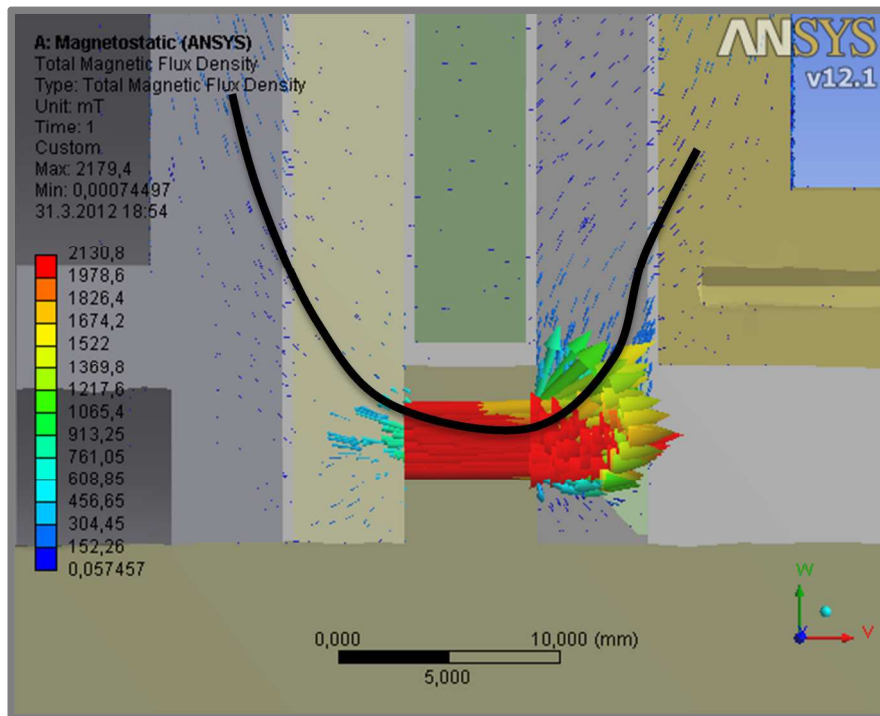
Použitím nepriechodzích otvorov na Hriadeli, sme sa s relatívnou chybou medzi maximami dostali na hodnotu 1% (obr. 6.12). Dôvod je v toku magnetickej indukcie. V prípade priechodzích dier dochádza k „skratu magnetického obvodu“ a magnetická indukcia prechádza od jednej lamely k druhej skrz feromagnetické šróby (obr. 6.13). V prípade uzatvorenia dier na hriadeli - vytvorenie nepriechodzích otvorov - sa magnetická indukcia cez diery v hriadeli nedostane tak ľahko a preto ich musí vzduchovou medzerou obchádzať (obr. 6.14).

Pri použití magnetickej lineárneho a nelineárneho materiálu nepriechodzích šróbov na hriadeli sú MKP vypočítané výsledky veľmi podobné, pričom aj výpočtová náročnosť sa neodlišuje. Pre jednoduchosť budeme používať magnetickej lineárne šróby s relatívnou permeabilitou 800.

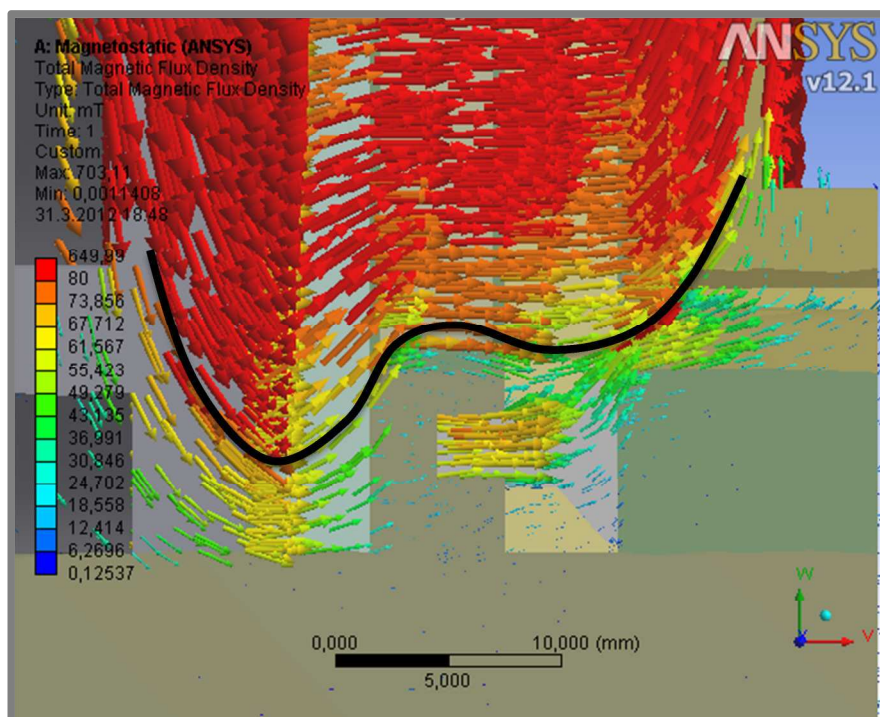


Obr. 6.12 Graf reálne nameraných a MKP vypočítaných magnetických indukcií Skutočného modelu verzia 2 s lineárnym a nelineárnym materiálom šróbov



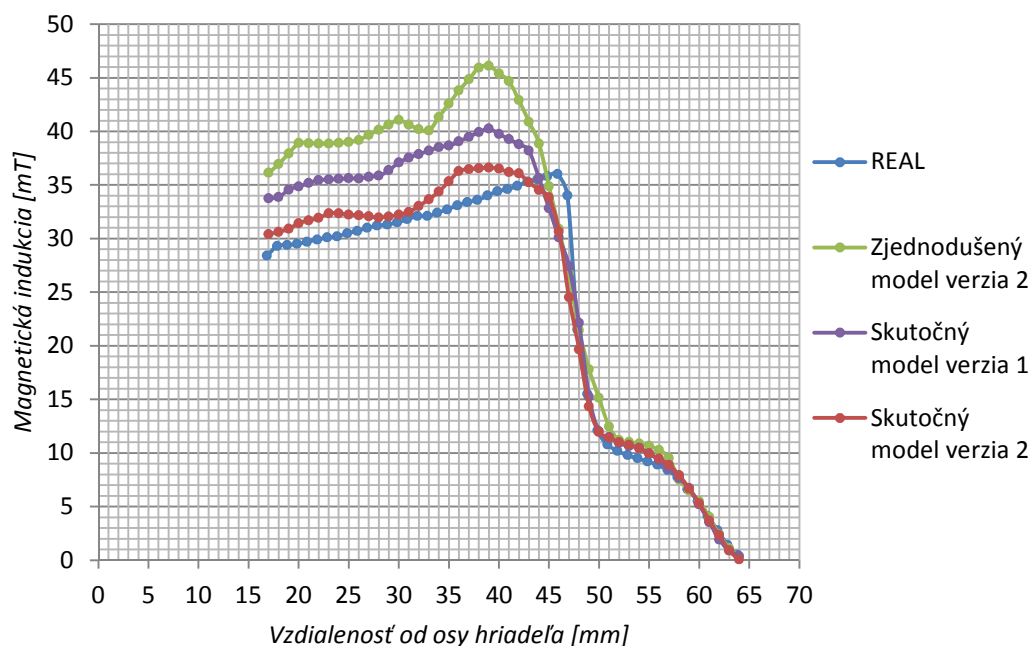


Obr. 6.13 Dráha toku magnetickej indukcie v Skutočnom modeli verzia 1



Obr. 6.14 Dráha toku magnetickej indukcie v Skutočnom modeli verzia 2

Obr. 6.15 predstavuje graf ako sme sa postupne približovali reálne nameraným hodnotám v dôsledku zrušenia jednotlivých zjednodušení.



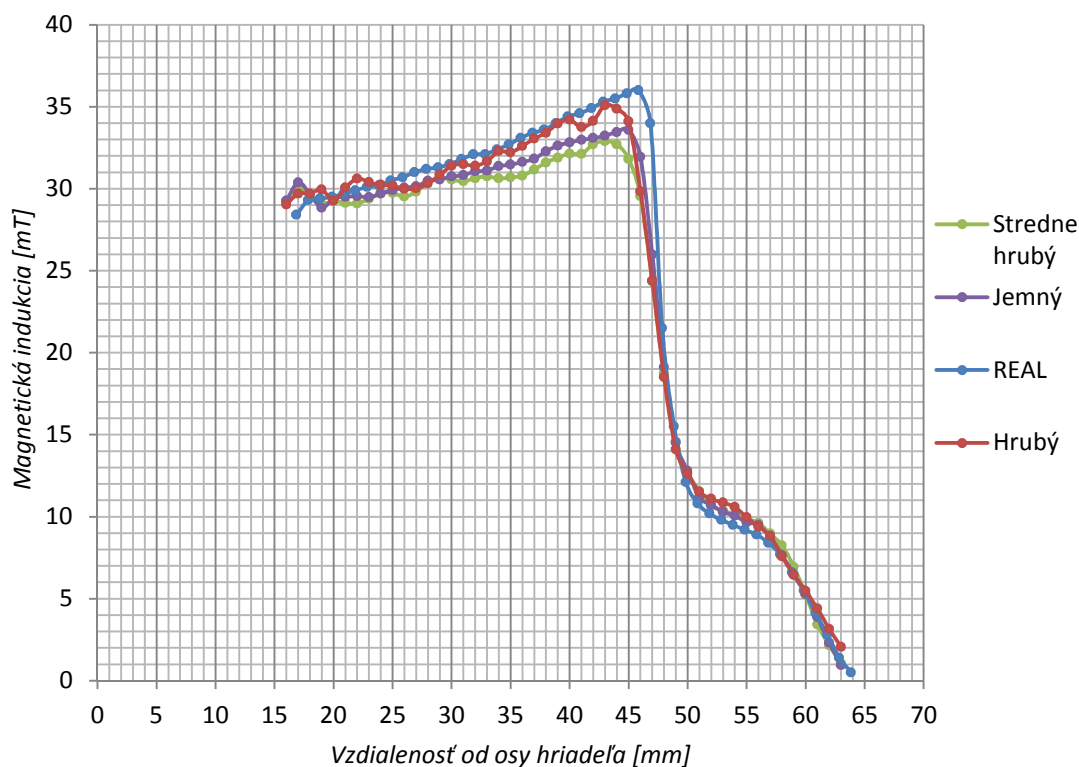
Obr. 6.15 Porovnania magnetických indukcií skúmaných modelov s reálne nameranými hodnotami

## 6.5 Zjemňovanie mriežky

Máme vytvorený model magnetického poľa MR spojky, ktorý sa dostatočne zhoduje s reálne nameranými výsledkami. Tento model je Skutočný model verzia 2 s magneticky lineárnymi šróbami (kap. 6.4). Nasleduje nájdenie vhodnej hustoty mriežky z hľadiska presnosti a náročnosti výpočtu. Vlastnosti mriežok, ktoré porovnávame sú uvedené v tab. 6.1.

Tab. 6.1 Veľkosti elementov a iné vlastnosti troch modelov mriežky

Model	Hrubý	Stredne hrubý	Jemný
MR medzera, lamely	2 mm	1,5 mm	1 mm
Cievka	2 mm	2 mm	2 mm
Stator, hriadeľ	6 mm	3 mm	2 mm
Šróby	Default	2 mm	2 mm
Príložka, rámček, obal cievky	Default	2 mm	2 mm
Vzduchové okolie	10 mm	10 mm	8 mm
Počet elementov	375 934	754 517	1 724 289
Výpočtový čas	1 160 sekúnd	2 077 sekúnd	691 872 sekúnd
Operačná pamäť	1 192 MB	2 373 MB	4 009 MB



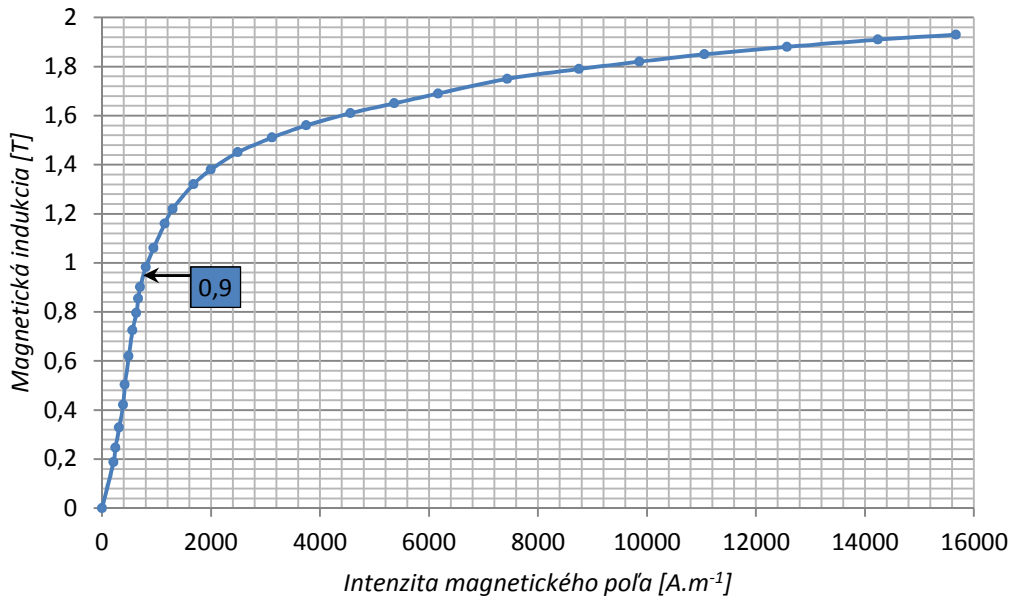
**Obr. 6.16** Graf reálne nameraných a MKP vypočítaných magnetických indukcií pri rôznej veľkosti elementov

Na grafe obr. 6.16 vidno, že keď použijeme model s veľkosťou elementu MR medzery 2 mm, tak sa približuje reálne nameraným výsledkom najviac (rovnako ako je uvedené v úlohe Prílohy III). Preto na odľahčenie použijeme *Hrubý* model s 2 mm veľkosťou elementu MR medzery. Vzhľadom na výpočtový čas prípadne pamäť (tab. 6.1) a na rozdiel vypočítaných a nameraných hodnôt sa javí ako najpriateľnejší a dostatočný.

## 6.6 Odľahčenie statorovej časti

Doteraz sme pracovali s *Hrubým* modelom mriežky, kde je veľkosť elementu statora 6 mm (tab. 6.1). Pretože skúmame magnetickú indukciu v statorovej časti, tak rozmery elementov statora zmenšíme na 3 mm. Tým vznikne mriežka s 450 650 elementmi, ktorú za čas 2 873 sekúnd a s potrebnou operačnou pamäťou 1 145 MB MKP program vypočítal.

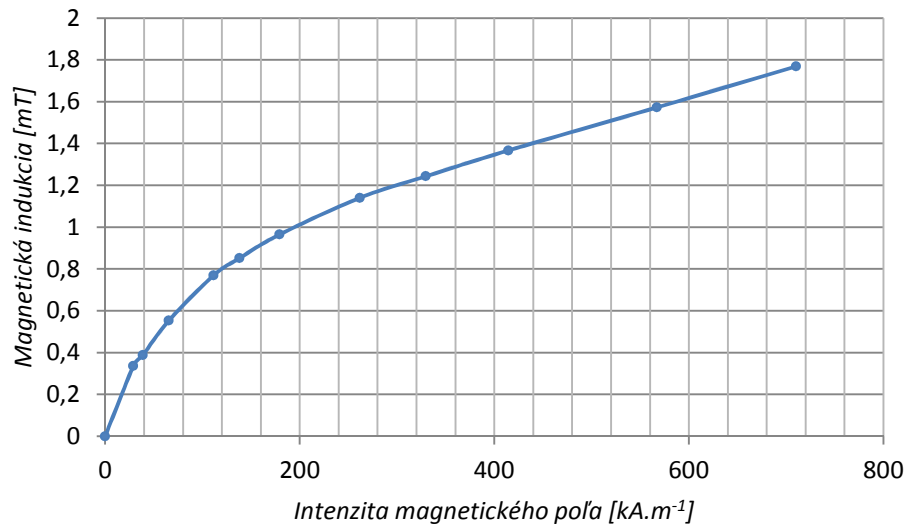
Z B-H krivky materiálu odľahčovanej ľavej a pravej časti statoru (obr. 6.17) je zrejmé, že magnetická indukcia narastá s najväčším stúpaním do hodnoty 0,9 T. Tzn., že v prípade zvýšenia magnetickej indukcie o rovnakú hodnotu v oblasti do 0,9 T na to potrebujeme menej energie, ktorú charakterizuje intenzita magnetického poľa, ako keď sa nachádzame v oblasti nad 0,9 T.



Obr. 6.17 B-H krivka magneticky nelineárneho materiálu Steel 1018 90.5 HRB [20]

Keďže MR spojka v prevádzkovom stave obsahuje v MR medzere MR kvapalinu LORD 140 CG aj v MKP modeli zadefinujeme magnetické vlastnosti materiálu, ktorý bude túto MR kvapalinu reprezentovať (spôsob zadávania vid'. Príloha IV). B-H krivka používanej MR kvapaliny je na obr. 6.18.

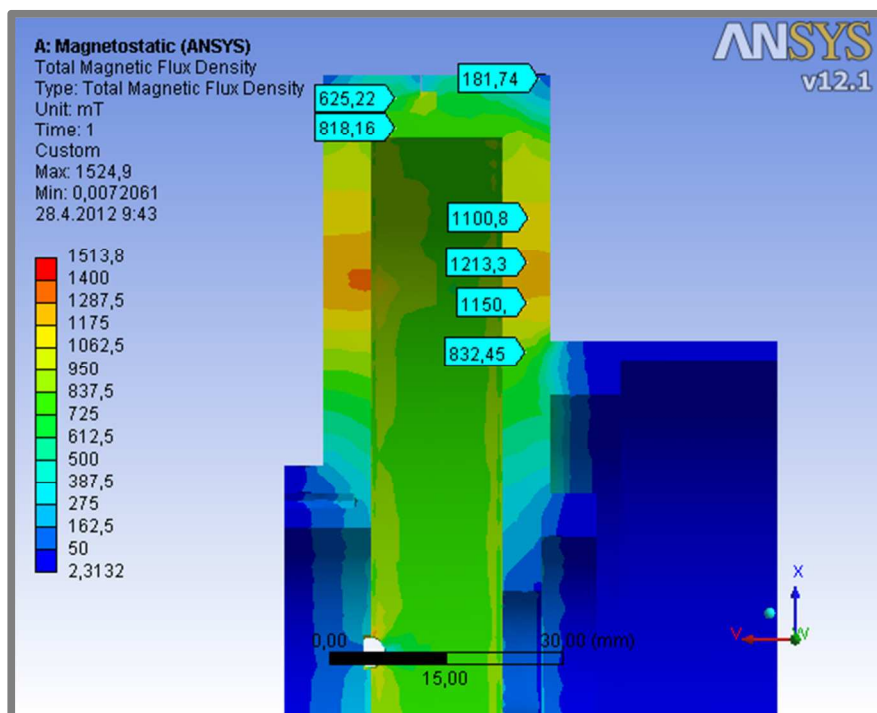
Hlavný dôvod, prečo predpokladáme zmenu hodnôt magnetickej indukcie pri spojke s MR kvapalinou, je v magnetickom odpore, ktorý kladie vzduchom vyplnená MR medzera. MR kvapalina má permeabilitu približne 7 až 9 podľa nasýtenia, čiže odpor celého obvodu spojky sa zníži, zvýši sa magnetický indukčný tok a tým aj magnetická indukcia. Vzduchom vyplnená MR medzera má význam pre overenie MKP analýzy, pretože Hallovou sondou sa nedá merať spojka s MR kvapalinou.



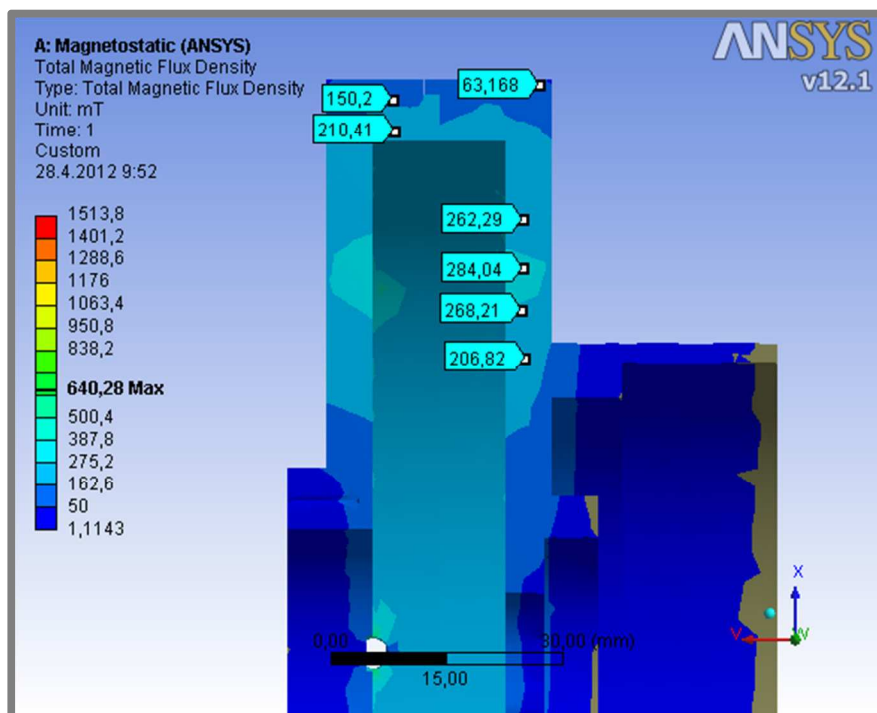
Obr. 6.18 B-H krivka MR kvapaliny LORD 140CG [21]

Magnetická indukcia v statorovej časti spojky s použitím modelu s MR kvapalinou je zobrazená na obr. 6.19. V porovnaní so vzduchom vyplnenou MR medzerou (obr.

6.20) je zrejmé, že dochádza k nasycovaniu feromagnetického materiálu v čelných oblastiach. Vtedy el. prúd prechádzajúci cievkou, ktorý funguje ako vstupná energia, je využitý menej efektívne. Odľahčenie čelných plôch z hľadiska dosiahnutia magnetickej indukcie do 0,9 T nie je možné. Na obvode statoru je magnetická indukcia menšia ako 0,9 T; a preto navrhne odber materiálu statoru po obvode spojky.

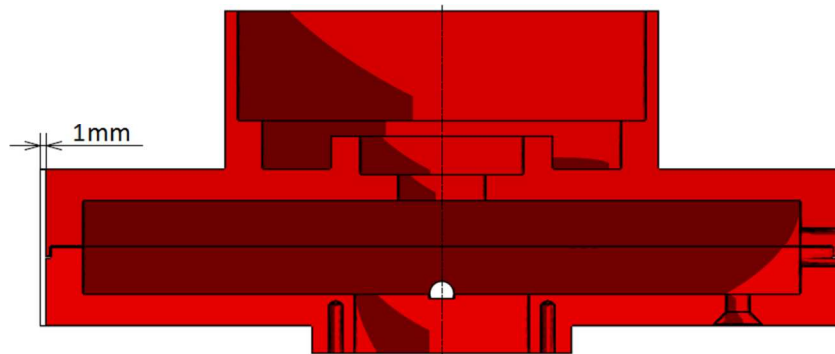


Obr. 6.19 Magnetická indukcia v statore MKP modelu s MR kvapalinou



Obr. 6.20 Magnetická indukcia v statore MKP modelu so vzduchom vyplnenou MR medzerou

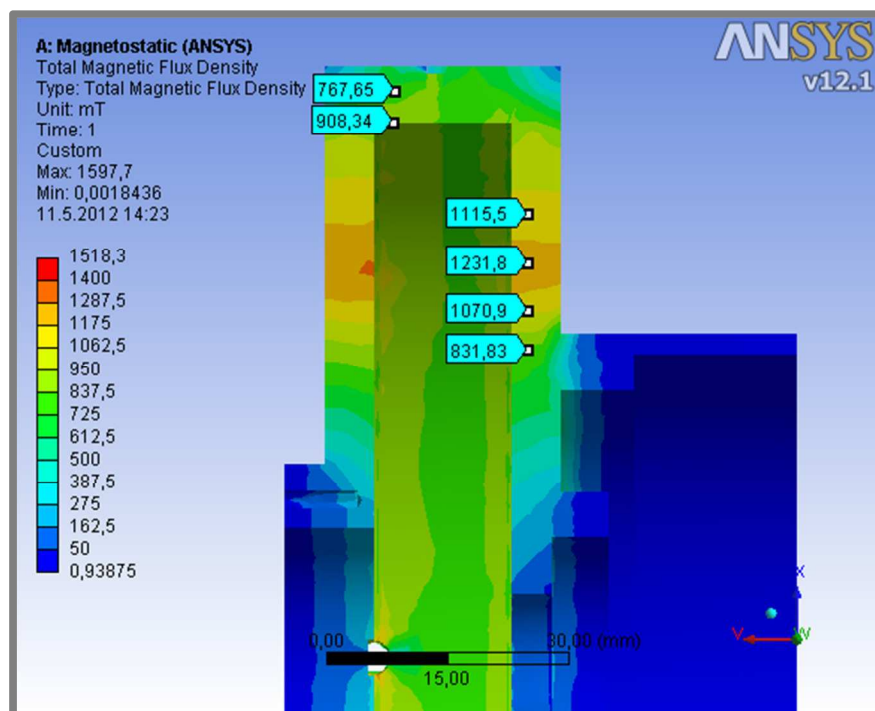
Vonkajší priemer statoru (Ľavá a Pravá časť) zmenšíme o 2 mm, tzn. z priemeru 148 mm docielime priemer 146 mm (obr. 6.21). Týmto odberom materiálu znížime hmotnosť o hodnotu podľa tab. 6.2.



Obr. 6.21 Stator odľahčený po obvode

Tab. 6.2 Hmotnostné porovnanie spojky s odľahčeným statorom po obvode

	<i>Pôvodné</i>	<i>Odľahčené</i>
Hmotnosť Ľavej a Pravej časti [kg]	2,284	2,181
Rozdiel hmotností [kg]	0,103	
Percentuálny rozdiel hmotností [%]	4,5	
Percentuálne celkové zníženie hmotnosti spojky [%]	3	

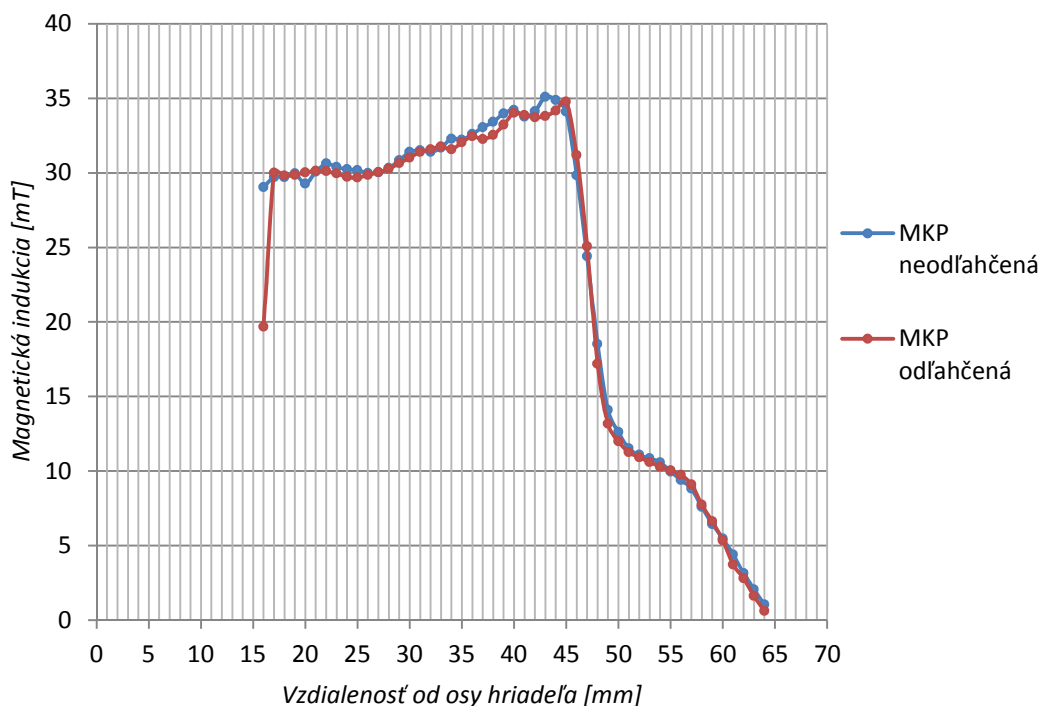


Obr. 6.22 Magnetická indukcia v odľahčenom statore MKP modelu s MR kvapalinou



Na obr. 6.22 vidno, že na obvode statoru dochádza len k nepatrnému prekročeniu hodnoty magnetickej indukcie 0,9 T. Preto môžeme prehlásiť, že sme odľahčili statorovú časť po obvode tak, aby nedochádzalo k neefektívnemu využívaniu el. prúdu cievky v tejto oblasti.

Zmena MKP vypočítanej magnetickej indukcie pri spojke odľahčenej po obvode statoru oproti spojke neodľahčenej je zobrazená na grafe obr. 6.23. Dochádza k veľmi malým rozdielom. Preto aj pri reálnom meraní magnetickej indukcie odľahčenej spojky Hallovou sondou očakávame podobné hodnoty aké sme namerali pri spojke neodľahčenej.



Obr. 6.23 MKP magnetickej indukcia v strede meracej drážky pri neodľahčenom a odľahčenom statore MR spojky so vzduchom vyplnenou MR medzerou

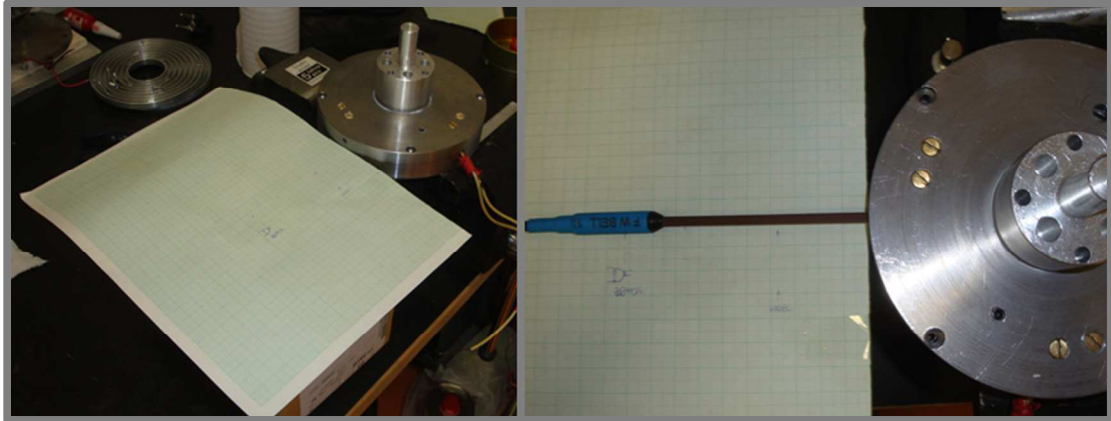
## 6.7 Experimentálne overenie odľahčenia statorovej časti

6.7

Vyššie navrhované odľahčenie statoru po obvode (2 mm na priemere) bolo zrealizované na existujúcej MR spojke pomocou hrotového sústruhu v dielňach ÚK. Teraz sme schopní namerať magnetickej indukciu v meracej drážke odľahčenej MR spojky pomocou Hallovej sondy a porovnať ju s MKP vypočítanou.

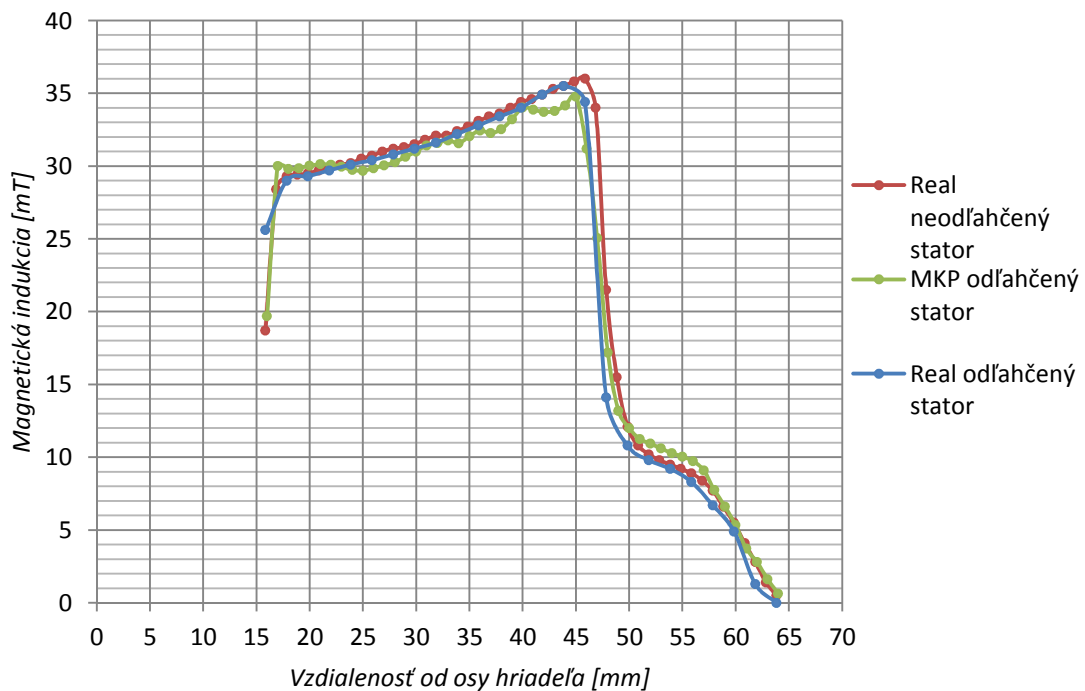
Pri meraní magnetickej indukcie bolo nutné najprv Hallovu sondu s označením *STD18-0404* podľa návodu výrobcu skalibrovať, pričom sme pracovali s magnetometrom *5180 Gauss/Tesla meter* od výrobcu *F. W. BELL*.

Ako ďalšia nutná príprava na meranie je odmagnetizovanie spojky. To sme uskutočnili metódou prepólovania, ktorá spočíva v niekoľkonásobnej zmene smeru a znižovaní veľkosti el. prúdu cievky. Cievku napájame z jednosmerného laboratórneho zdroja *Manson SDP2603*. Hĺbka zasunutia sondy v spojke je určovaná pomocou milimetrového papiera vid'. obr. 6.24.



Obr. 6.24 Príprava pracoviska na meranie Hallovou sondou

Graf nameraných hodnôt magnetickej indukcie je zobrazený na obr. 6.25. Pre porovnanie sú v ňom uvedené aj hodnoty MKP vypočítané pri odľahčenom a reálne namerané pri neodľahčenom statore. Relatívne malý posuv reálne nameraných hodnôt odľahčenej spojky v smere vodorovnej osy je spôsobený chybou merania pri určovaní hĺbky zasunutia sondy. Vyššie uvedený predpoklad malej zmeny magnetickej indukcie pri neodľahčenom a odľahčenom statore po obvode (obr. 6.23) je potvrdený. Takisto aj MKP vypočítané hodnoty pri odľahčenom statore sa zhodujú s reálne nameranými.



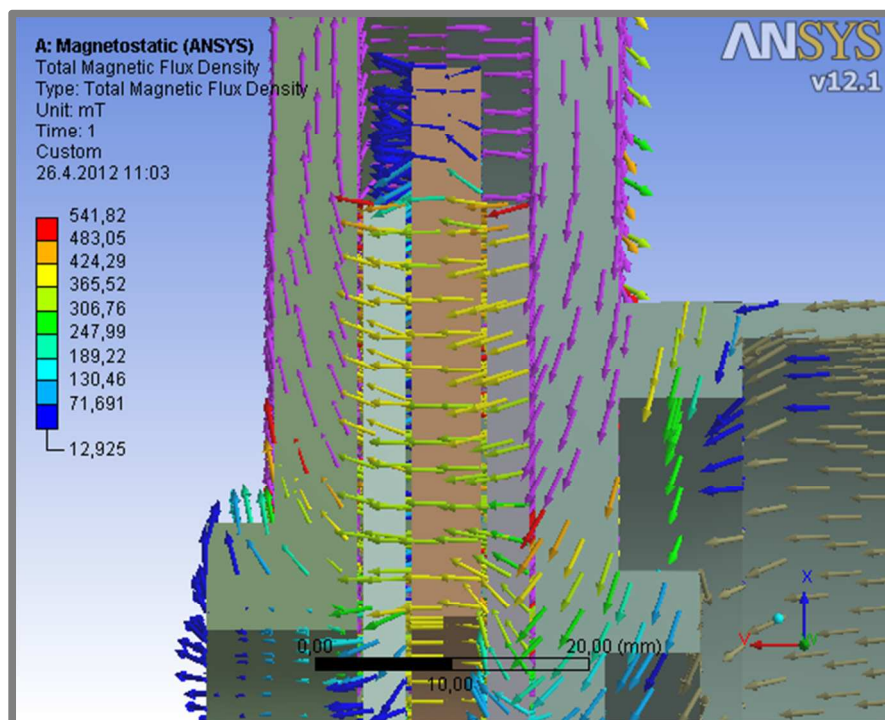
Obr. 6.25 Magnetická indukcia v meracej drážke neodľahčenej, MKP a reálne odľahčenej spojky



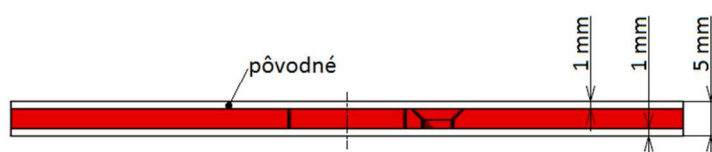
## 6.8 Odľahčenie lamiel

Smer toku magnetickej indukcie v lamelách je takmer kolmý na ich čelnú plochu (obr. 6.26), ktorej obsah sa ztenšovaním hrúbky lamiel nemení. Preto dosadením do vzorca (2) by sme mali dostať rovnakú hodnotu magnetickej indukcie, keďže magnetický indukčný tok zostáva konštantný. Preto nepredpokladáme veľkú zmenu magnetickej indukcie v lamelách po ich axiálnom odľahčení.

Výpočtovo overíme tento predpoklad. Odľahčujeme rotorové lamely z hrúbky 5 mm na 3 mm (obr. 6.27). Zníženie hmotnosti takto odľahčenej geometrie je uvedené v tab. 6.3. Lamely sú z rovnakej ocele ako stator (obr. 6.17).



Obr. 6.26 Smer toku magnetickej indukcie odľahčeného MKP modelu s MR kvapalinou



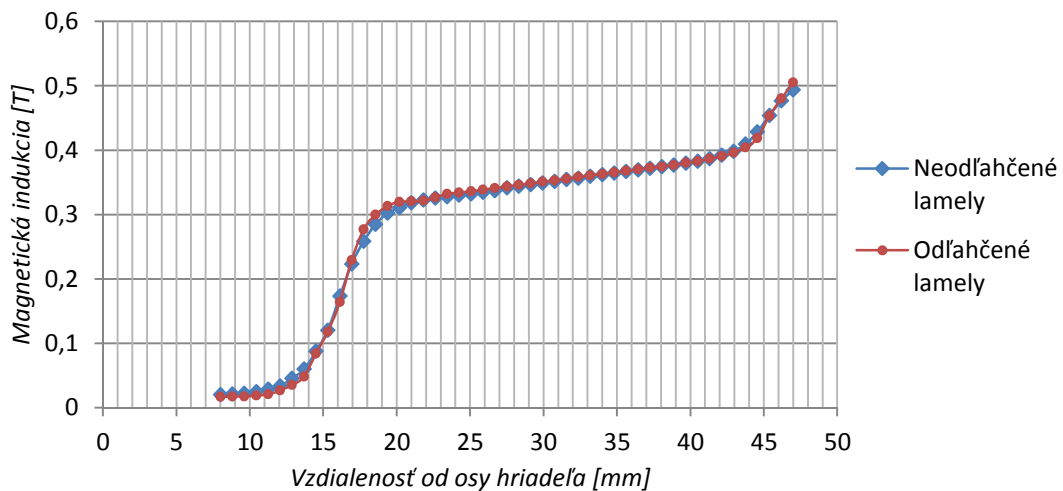
Obr. 6.27 Odľahčená rotorová lamela

Tab. 6.3 Hmotnostné porovnanie spojky s odľahčenými rotorovými lamelami

	<i>Pôvodné</i>	<i>Odľahčené</i>
Hmotnosť dvoch rotorových lamiel [kg]	0,522	0,314
Rozdiel hmotností [kg]	0,208	
Percentuálny rozdiel hmotností [%]	40	
Percentuálne celkové zníženie hmotnosti spojky [%]	6,1	

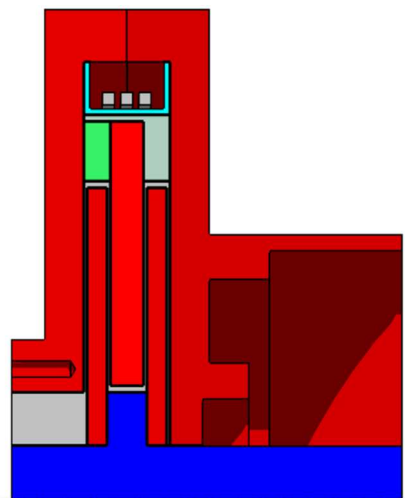
V MKP analýze odľahčujeme iba dve rotorové lamely a to z dôvodu jednoduchšieho výpočtu. Statorová lamela sa vzhľadom k smeru toku magnetickej indukcie správa rovnako, a preto je možné ju takisto rovnakým spôsobom odľahčiť. Pri odľahčení všetkých troch lamiel na hrúbku 3 mm by sme ušetrili 0,353 kg čo predstavuje 10,3% z celkovej hmotnosti spojky.

Na obr. 6.28 je graf MKP vypočítaných magnetických indukcií (počítané v strede lamiel, model s MR medzerou vyplnenou MR kvapalinou). Dochádza len k malému rozdielu hodnôt, čím sme potvrdili predpoklad z úvodu tejto kapitoly. Môžeme prehlásiť, že veľkosť hrúbky lamiel je závislá hlavne na pevnosti materiálu a očakávanej hodnote prenášaného točiaceho momentu.



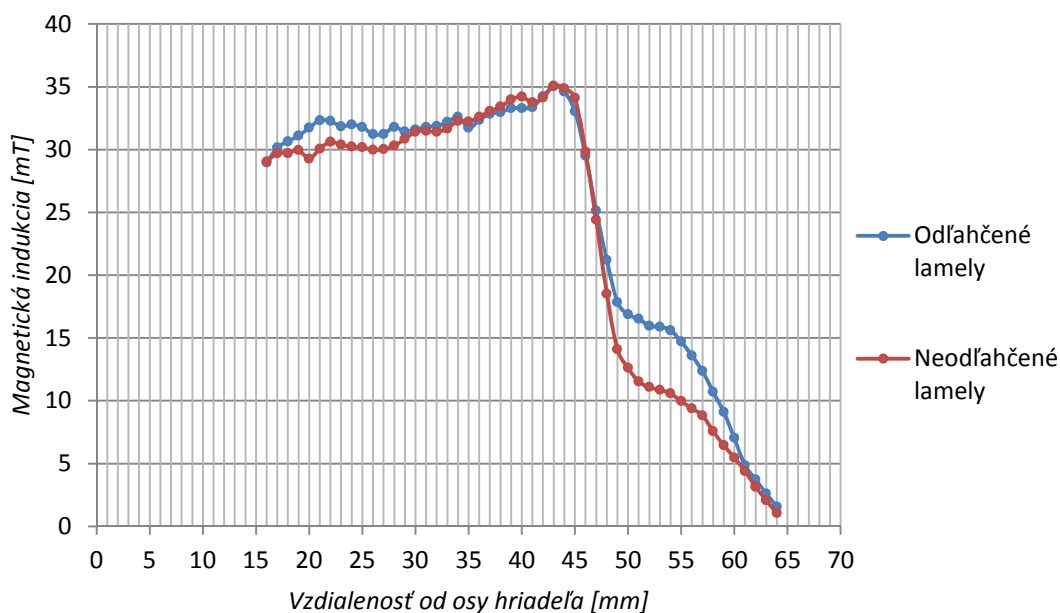
Obr. 6.28 Magnetická indukcia v rotorových lamelách odľahčeného a neodľahčeného MKP modelu s MR kvapalinou

Experimentálne overenie odľahčenia lamiel ovplyvňuje väčšinu súčiastok MR spojky. Je potrebné navinúť novú cievku; upraviť geometriu statoru, príložky, rámčeku a lamiel; vyrobiť nový obal cievky (obr. 6.29). Po konzultácii s vedúcim práce k realizácii tohto odľahčenia do uzavretia bakalárskej práce nedošlo, kvôli vyššie spomínanému prílišnému zásahu do konštrukcie spojky.



Obr. 6.29 Rezný výkres MR spojky s odľahčenými rotorovými lamelami

Obr. 6.30 ukazuje porovnanie MKP vypočítaných magnetických indukcií vo vzduchom vyplnenej meracej drážke pri neodľahčených a odľahčených rotorových lamelách. Najväčšie rozdiely sú v dvoch oblastiach upravených súčiastok. Prvá oblasť je vo vzdialenosti od osy hriadeľa 16 – 30 mm. Druhá je v okolí príložky a rámčeku, čo predstavuje vzdialenosť od osy hriadeľa 47 – 60 mm vid' obr. 6.2. Rozdiel v hodnotách je nevýrazný. Aj napriek tomu by bolo prínosné porovnať priebehy nameraných hodnôt magnetickej indukcie Hallovou sondou odľahčenej MR spojky s MKP vypočítanými.

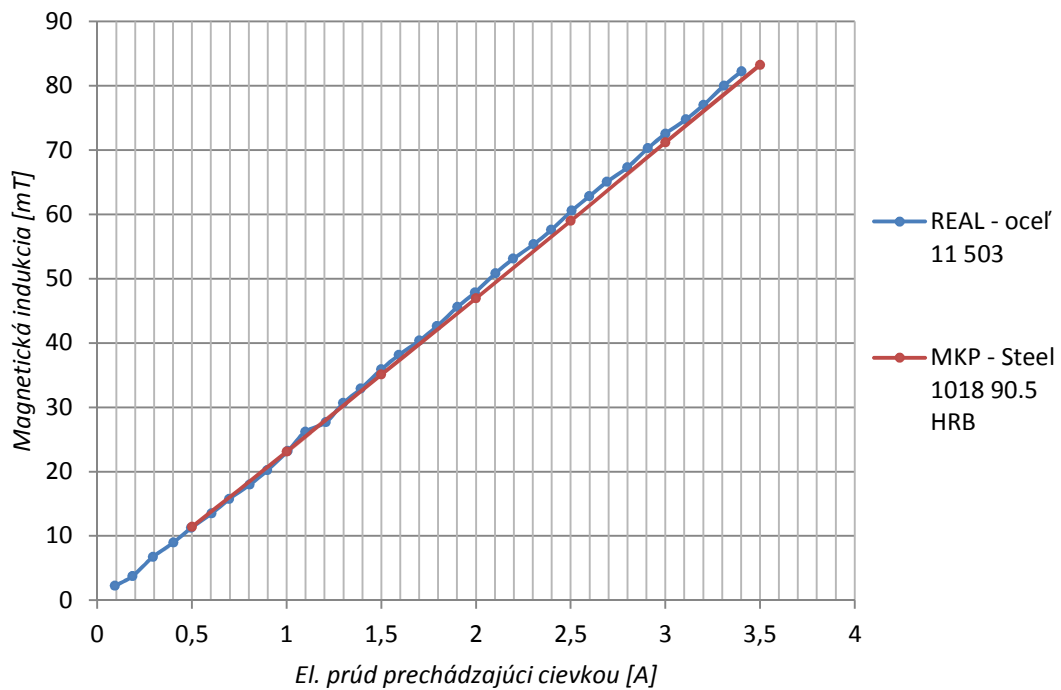


Obr. 6.30 MKP vypočítané magnetické indukcie v meracej drážke modelu s odľahčenými a neodľahčenými rotorovými lamelami

## 6.9 Overenie materiálu statoru a lamiel

6.9

V MKP modeli pracujeme s materiálom statoru a lamiel Steel 1018 90.5 HRB. V skutočnosti je v spojke použitý materiál ocel' 11 503 (S355J2G3). Preto je potrebné overiť či sa magnetické vlastnosti (B-H krivka) týchto dvoch materiálov zhodujú alebo sú aspoň veľmi podobné. Pri meraní magnetickej indukcie Hallovou sondou skonštruovanej MR spojky, sa zo zvyšujúcim sa el. prúdom cievky, lineárne zvyšuje magnetická indukcia [14]. To isté sme potvrdili aj MKP výpočtom vid' obr. 6.31 (do grafu sme vynášali maximálne hodnoty nameranej a vypočítanej magnetickej indukcie, počítané pri vzduchom vyplnenej MR medzere). K lineárnej závislosti dochádza z dôvodu konštantnej permeability materiálu statoru a lamiel, pretože sa nachádzame v oblasti do 0,9 T (obr. 6.17, obr. 6.20).



Obr. 6.31 B-I krivka ocele 11 503 a Steel 1018 90.5 HRB [13]

Tento pokus nepotvrdzuje, a ani nevyvracia, podobnosť materiálu 11 503 a Steel 1018 90.5 HRB, pretože sme nenašli bod, v ktorom by sa lineárna závislosť menila na inú. Preto je vhodné v budúcom vývoji MR spojky zistiť pomocou inej špeciálne zameranej analýzy skutočné magnetické vlastnosti ocele 11 503.

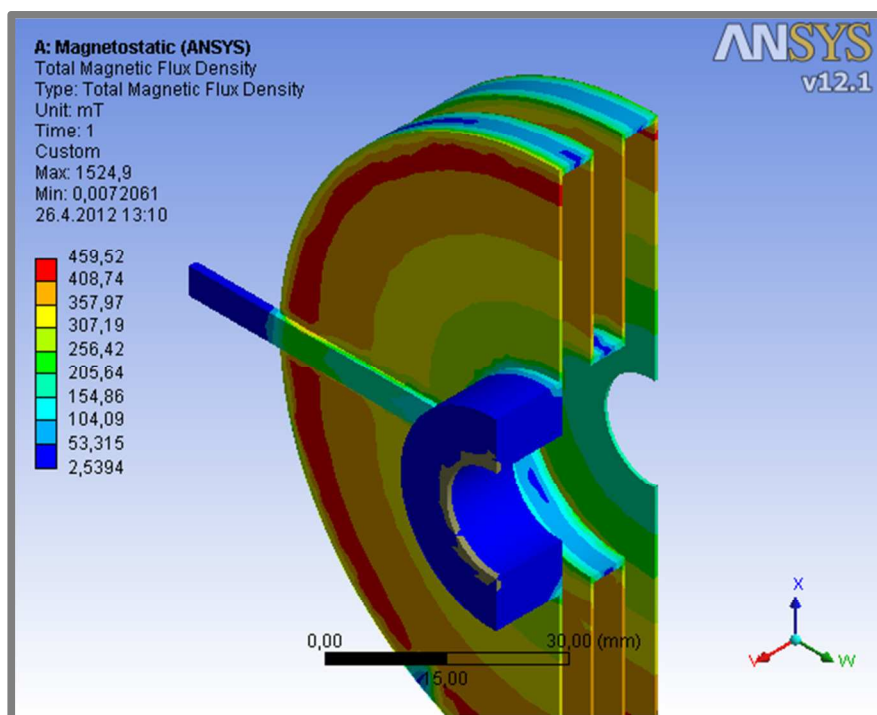
## 7 ZÁVER

Doteraz sme mali výsledky magnetickej indukcie iba v meracej drážke MR spojky zmerané Halloovou sondou pri vzduchom vyplnenej MR medzere. Preto sme nevedeli, ako sa magnetické pole správa v spojke, ktorá je naplnená MR kvapalinou.

Prínosy:

- Vytvorenie veľmi presného modelu magnetického poľa skonštruovanej MR spojky (obr. 16, obr. 24). Zistenie dôležitých prvkov spojky – meracia drážka a nepriechodzie diery na hriadeli – ktoré najviac ovplyvňujú priblíženie sa reálne nameraným hodnotám magnetickej indukcie.
- Vieme ako vyzerá magnetické pole vo vnútri jednotlivých komponentov MR spojky. Doposiaľ sme nenašli metódu, ako toto magnetické pole reálne zmerať.
- Je možná modifikácia MR spojky ako napr. zmena tvaru jednotlivých komponentov s ohľadom na zmenu magnetického poľa v spojke.
- Vieme aká je magnetická indukcia v MR spojke naplnenej MR kvapalinou, ktorá priamo ovplyvňuje prenášaný točivý moment (obr. 8.1).
- Zistenie, že pri súčasných rozmeroch statoru pri MR spojke s MR kvapalinou dochádza k jeho nasycovaniu, pričom hrúbka lamiel výrazne neovplyvní magnetickú indukciu, nimi pretekajúcu.

Ako ďalšia práca, ktorá by overila príp. zlepšila MKP model magnetického poľa MR spojky, je zistenie magnetickej vlastností ocele 11 503, z ktorej je vyrobený stator a lamely. Jedná sa hlavne o B-H krivku prvotného magnetizovania tohto materiálu.



Obr. 8.1 Magnetická indukcia MR kvapaliny LORD 140 CG v MR spojke pri budiacom el. prúde 1,5A



## ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

---

- [1] *OS Giken – STR SERIES* [online]. Dostupné z URL: <<http://www.osgiken.net>> [cit. 2012-02-05].
- [2] JOLLY, M. R., BENDER, J. W., CARLSON, J. D. Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids, 15 March 1998, 18 s.
- [3] ROUPEC, J. *Mezní a degradační procesy magnetoreologických tlumičů odpružení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 140 s. Vedúci dizertačnej práce Doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc
- [4] PRADEEP PHULÉ, P. Magnetorheological (MR) fluids: Principles and applications. *Smart Materials Bulletin*, February 2001, iss. 2, p. 7-10.
- [5] JEONG-HOI, K. *Using Magnetorheological Dampers in Semiactive Tuned Vibration Absorbers to Control Structural Vibrations*. Virginia-Blacksburg, 2003. 160 s. Dizertačná práca na Faculty of the Virginia Polytechnic Institute. Vedúci dizertačnej práce Dr. Mehdi Ahmadian.
- [6] ULB, Department of Mechanical Engineering and Robotics. Active Structures Laboratory. *What are magnetorheological fluids?* [online]. Dostupné z URL: <[scmero.ulb.ac.be](http://scmero.ulb.ac.be)> [cit. 2012-02-28].
- [7] CARLSON, J. D., JOLLY, M. R.. MR fluid, foam and elastomer devices. *Mechatronics*, June-August 2000, vol. 10, p. 555-569.
- [8] KASEMI, B., MUTHALIF, A. G. A., RASHID, M. M., RAHMAN, M. Optimizing Dynamic Range of Magnetorheological Fluid Dampers: Modeling and Simulation. In *4th International Conference on Mechatronics (ICOM)*. Kuala Lumpur, Malaysia, 17-19 May 2011. 4 s.
- [9] GONCALVES, F. D. *Characterizing the Behavior of Magnetorheological Fluids at High Velocities and High Shear Rates*. Virginia-Blacksburg, 2005, 103 s. Dizertačná práca na Faculty of the Virginia Polytechnic Institute. Vedúci dizertačnej práce Dr. Mehdi Ahmadian.
- [10] OUELLETTE, J. Smart Fluids Move into the Marketplace. *The Industrial Physicist*, December 2003/January 2004, s. 14-17.
- [11] HALLIDAY, David, RESNICK, Robert, WALKER, Jearl. *FYZIKA: Vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. 6. vyd. Brno: VUTIUM, 2001. ISBN 80-214-1869-9.
- [12] *ANSYS Help*, URL: <<http://www.kxcad.net/ansys/>> [cit. 2012-03-01].

- [13] LAMPE, D., THESS, A., DOTZAUER, C. *MRF-Clutch – Design Considerations and Performance* [online]. Dostupné z URL: <[http://www.donnerflug.de/publikationen/Lampe\\_Actuator1998\\_Bremen\\_p81.pdf](http://www.donnerflug.de/publikationen/Lampe_Actuator1998_Bremen_p81.pdf)> [cit. 2012-03-13].
- [14] NOVÁČEK, V. *Konstrukce MR spojky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 91 s. Vedúci diplomovej práce Ing. Jakub Roupec.
- [15] AMARDEEP *Domestic Hydropower Plant*. Belgium, 2011-2012. 43 s. Semestrálna práca na Visvesvaraya Technological University, Belgium. Vedúci semestrálnej práce Mr. Venkate Gowda.T.
- [16] KAVLICOGLU, V. M., et al. A multi-plate magneto-rheological fluid limited slip diferenciál clutch. *Smart structures and materials*. 2003, 5054, s. 341-349.
- [17] Wayne Storr. Electronics-Tutorials.ws. *Magnetic Hysteresis* [online]. Dostupné z URL: <<http://www.electronics-tutorials.ws>> [cit. 2012-03-14].
- [18] *Permeability (electromagnetism) – Wikipedia, The Free Encyklopedia*, URL: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Permeability\\_\(electromagnetism\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Permeability_(electromagnetism))> [cit. 2012-03-14].
- [19] BEDŘICH, M. *Úprava stávající konstrukce magnetoreologické spojky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 74 s. Vedúci diplomovej práce Ing. Jakub Roupec.
- [20] SAS IP, Inc. ANSYS Workbench 12.0. *Magnetic B-H Curves*. 2009. All rights reserved.
- [21] *LORD Corporation – MRF-140CG Magneto-Rheological Fluid* [online]. Dostupné z URL: <<http://www.lord.com>> [cit. 2012-04-07].



## ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

---

$B$	T	magnetická indukcia
$H$	$A.m^{-1}$	intenzita magnetického poľa
$I$	A	elektrický prúd prechádzajúci cievkou
$L$	mm	dĺžka MR medzery
$r$	mm	aktuálny polomer spojky
$R_i$	mm	vnútorný polomer spojky
$R_o$	mm	vonkajší polomer spojky
$s$	mm	hrúbka MR medzery
$S$	$m^2$	plocha, ktorou prechádza magnetický indukčný tok
$U_m$	A.závit	elektromotorické napätie
$z$	-	počet závitov cievky
$\emptyset$	Wb	magnetický indukčný tok
$\mu_0$	$H.m^{-1}$	permeabilita vákua
$\mu_r$	-	relatívna permeabilita
CAD	<i>Computer Aided Design</i>	
ER	elektroreologická	
Fe	železo	
FEM	<i>Finite Element Method</i>	
MR	magnetoreologická	

**ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV**

<b>Obr. 1.1</b> Konvenčná dvojlamelová závodná spojka OS Giken .....	15
<b>Obr. 2.1</b> Železné častice pod elektrónovým mikroskopom .....	16
<b>Obr. 2.2</b> Schéma orientácie kovových častíc MR kvapaliny .....	17
<b>Obr. 2.3</b> Snímky vonkajšieho vzhľadu MR kvapaliny .....	17
<b>Obr. 2.4</b> Zaťažovacie módy MR kvapalín .....	18
<b>Obr. 2.5</b> Seizmický tlmič od firmy Lord .....	19
<b>Obr. 2.6</b> Schéma MR spojky s axiálnou medzerou .....	21
<b>Obr. 2.7</b> Schéma MR spojky s radiálnou medzerou .....	22
<b>Obr. 2.8</b> Dvojdisková MR spojka .....	22
<b>Obr. 2.9</b> Multidiskový MR diferenciál .....	23
<b>Obr. 2.10</b> Zjednodušený model zostrojenej MR spojky .....	24
<b>Obr. 2.11</b> B-H krivky ocele, železa a vzduchu .....	25
<b>Obr. 2.12</b> B-H krivka feromagnetického, paramagnetického a diamagnetického materiálu .....	26
<b>Obr. 4.1</b> Rozpad existujúcej MR spojky na jednotlivé komponenty .....	27
<b>Obr. 6.1</b> Graf reálne nameraných hodnôt magnetickej indukcie Halloovou sondou .....	29
<b>Obr. 6.2</b> Rozmery MR spojky v radiálnom smere .....	30
<b>Obr. 6.3</b> Zjednodušený model verzia 1 .....	30
<b>Obr. 6.4</b> Dráha vypočítavanej magnetickej indukcie v strede MR medzery .....	31
<b>Obr. 6.5</b> Graf reálne nameraných a MKP vypočítaných magnetických indukcii Zjednodušeného modelu verzia 1 .....	31
<b>Obr. 6.6</b> Lavá časť statoru s meracou drážkou .....	32
<b>Obr. 6.7</b> Graf reálne nameraných a MKP vypočítaných magnetických indukcii Zjednodušeného modelu verzia 2 s lineárnym a nelineárnym materiálom .....	33
<b>Obr. 6.8</b> Vplyv meracej drážky na mag. indukciu MR medzery pri použití nelineárneho materiálu .....	33
<b>Obr. 6.9</b> Skutočný model verzia 1 .....	34
<b>Obr. 6.10</b> Graf reálne nameraných a MKP vypočítaných magnetických indukcii Skutočného modelu verzia 1 s lineárnym a nelineárnym materiálom šróbov .....	35
<b>Obr. 6.11</b> Hriadeľ s nepriechodzími otvormi .....	35
<b>Obr. 6.12</b> Graf reálne nameraných a MKP vypočítaných magnetických indukcii Skutočného modelu verzia 2 s lineárnym a nelineárnym materiálom šróbov .....	36
<b>Obr. 6.13</b> Dráha toku magnetickej indukcie v Skutočnom modeli verzia 1 .....	37
<b>Obr. 6.14</b> Dráha toku magnetickej indukcie v Skutočnom modeli verzia 2 .....	37
<b>Obr. 6.15</b> Porovnania mag. indukcii skúmaných modelov s reálne nameranými hodnotami .....	38
<b>Obr. 6.16</b> Graf reálne nameraných a MKP vypočítaných magnetických indukcii pri rôznej veľkosti elementov .....	39
<b>Obr. 6.17</b> B-H krivka magneticky nelineárneho materiálu Steel 1018 90.5 HRB .....	40
<b>Obr. 6.18</b> B-H krivka MR kvapaliny LORD 140 CG .....	40
<b>Obr. 6.19</b> Magnetická indukcia v statore MKP modelu s MR kvapalinou .....	41
<b>Obr. 6.20</b> Magnetická indukcia v statore MKP modelu so vzduchom vyplnenou MR medzerou .....	41
<b>Obr. 6.21</b> Stator odľahčený po obvode .....	42
<b>Obr. 6.22</b> Magnetická indukcia v odľahčenom statore MKP modelu s MR kvapalinou .....	42
<b>Obr. 6.23</b> Magnetická indukcia v strede meracej drážky pri neodľahčenom a odľahčenom statore MR spojky so vzduchom vyplnenou medzerou .....	43
<b>Obr. 6.24</b> Príprava pracoviska na meranie Halloovou sondou .....	44
<b>Obr. 6.25</b> Magnetická indukcia v meracej drážke neodľahčenej, MKP a reálne odľahčenej spojky .....	44
<b>Obr. 6.26</b> Smer toku magnetickej indukcie odľahčeného MKP modelu s MR kvapalinou .....	45
<b>Obr. 6.27</b> Odľahčená rotorová lamela .....	45
<b>Obr. 6.28</b> Magnetická indukcia v rotorových lamelách odľahčeného a neodľahčeného MKP modelu s MR kvapalinou .....	46
<b>Obr. 6.29</b> Rez MR spojkou s odľahčenými rotorovými lamelami .....	46
<b>Obr. 6.30</b> MKP vypočítané magnetické indukcie v meracej drážke modelu s odľahčenými a neodľahčenými rotorovými lamelami .....	47
<b>Obr. 6.31</b> B-I krivka ocele 11 503 a Steel 1018 90.5 HRB .....	48
<b>Obr. 8.1</b> Magnetická indukcia MR kvapaliny LORD 140 CG v MR spojkke pri budiacom el. prúde 1,5 A .....	49

## **ZOZNAM TABULIEK**

---

<b>Tab. 2.1</b> Hmotnosti jednotlivých súčiastok zostrojenej MR spojky .....	23
<b>Tab. 6.1</b> Veľkosti elementov a iné vlastnosti troch modelov mriežky.....	38
<b>Tab. 6.2</b> Hmotnostné porovnanie spojky s odľahčeným statorom po obvode .....	42
<b>Tab. 6.3</b> Hmotnostné porovnanie spojky s odľahčenými vnútornými lamelami .....	45

---

## **ZOZNAM PRÍLOH**

**Príloha I** – Postup pri výpočte magnetického poľa v ANSYS Workbench

**Príloha II** –Vhodnosť riešičov v Magnetostatic analysis

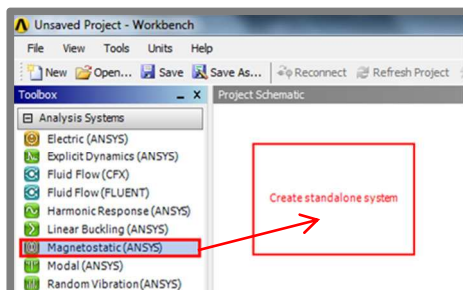
**Príloha III** – Vplyv veľkosti elementov v MR medzere na vypočítanú magnetickú indukciu

**Príloha IV** – Definovanie vlastného magneticky nelineárneho materiálu do ANSYS Workbench

## PRÍLOHA I – POSTUP PRI VÝPOČTE MAGNETICKÉHO POĽA V ANSYS WORKBENCH

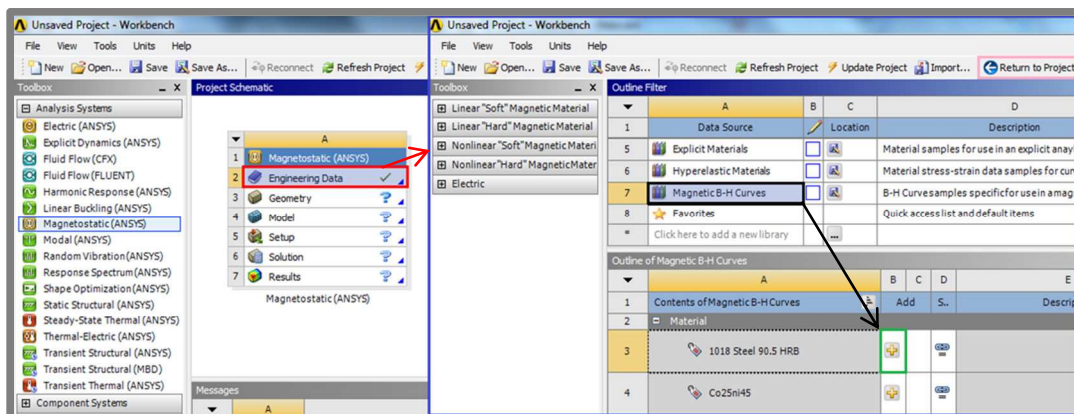
### Založenie nového projektu

Položku *Magnetostatic* (□) pretiahneme do okna *Project Schematic* alebo na ňu klikneme dva krát.



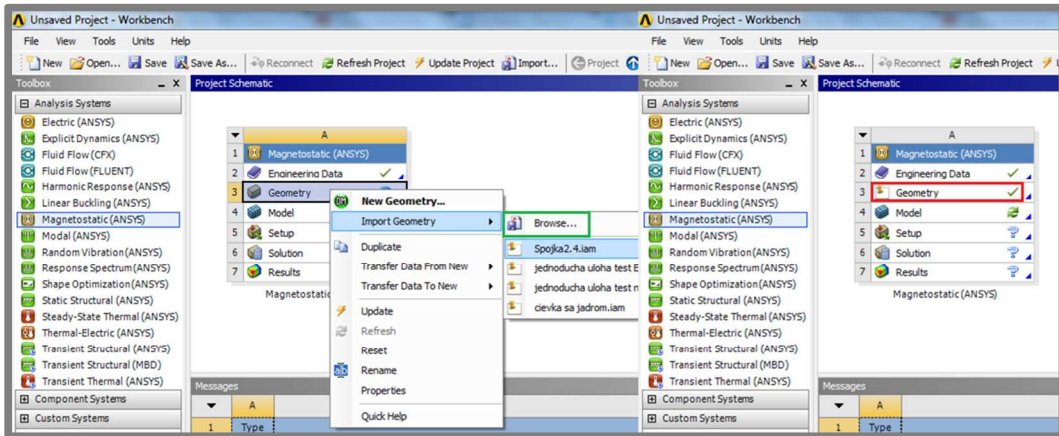
### Výber používaných materiálov

Po vytvorení *Magnetostatic* analýzy, dva krát klikneme na položku *Engineering Data* (□). Otvorí sa okno s knižnicami materiálov (□). Tu vyberieme typ materiálov (□) a pre konkrétny materiál klikneme na tlačítko *Add* (□). Pre vrátenie sa do projektu klikneme na *Return to Project* (□).



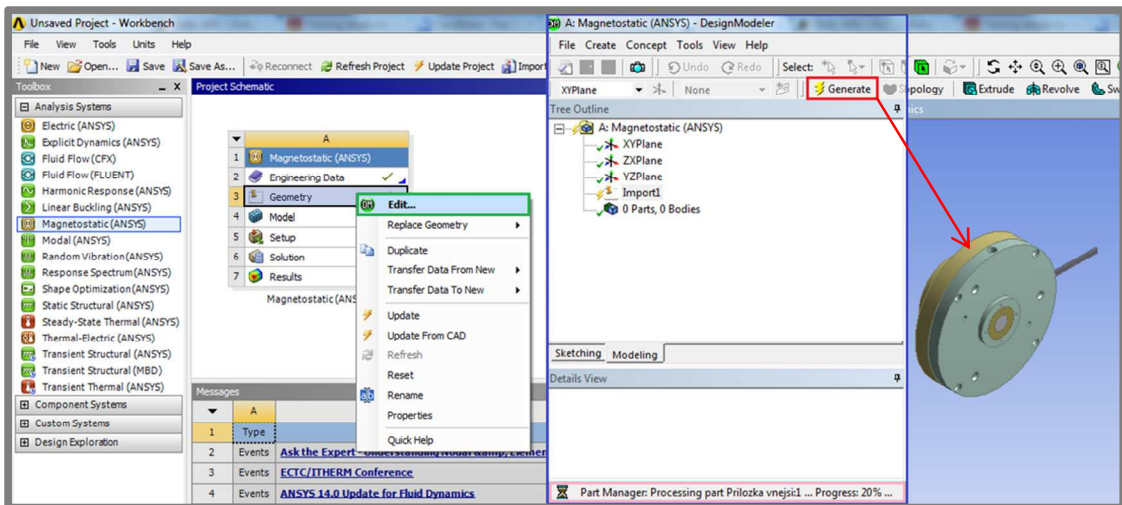
## Vloženie pripraveného modelu

Klikneme pravým tlačidlom na *Geometry* → *Import Geometry* → *Browse...* (□). Po správnom načítaní modelu sa vedľa položky *Geometry* objaví zelená fajka (□).



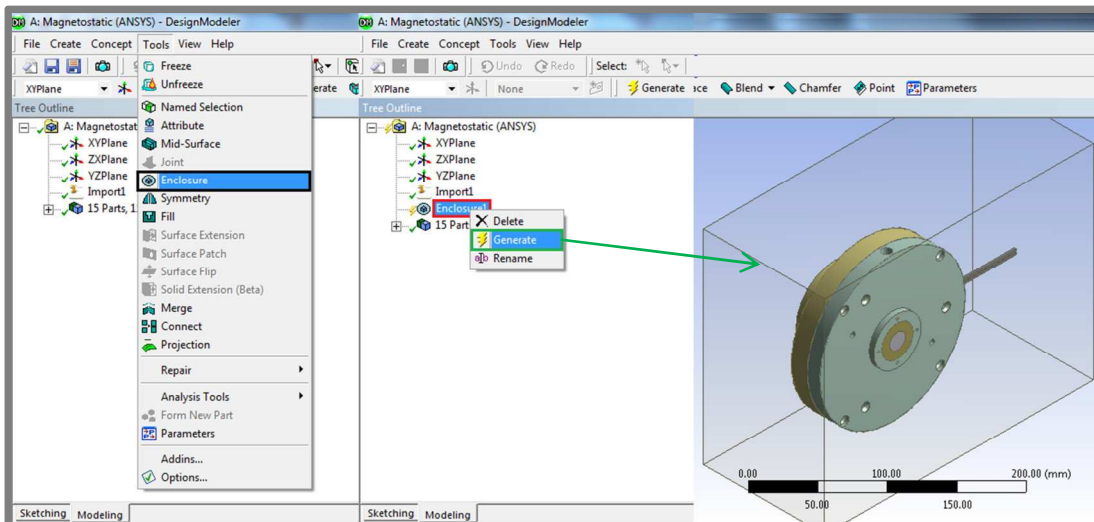
## Úprava geometrie modelu

Dvojitým klikom na ikonu *Geometry* alebo pravým tlačidlom → *Edit...* (□) otvoríme nové okno *DesignModeler* (□). Pre vygenerovanie importovanej geometrie klikneme na tlačidlo *Generate* (□). Priebeh načítavania môžeme pozorovať v *Progress* lište (□).



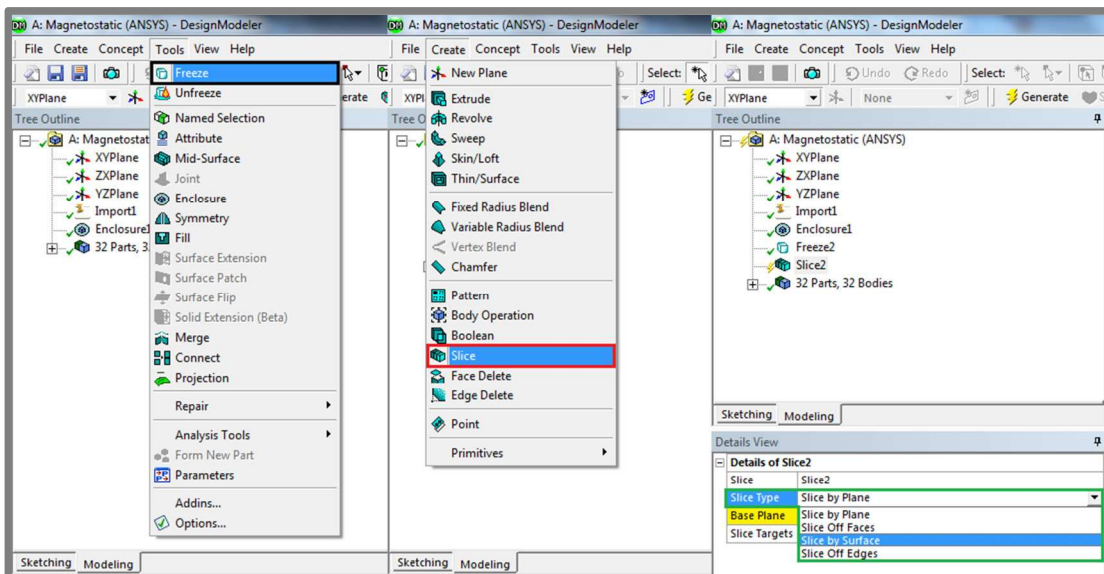
## Vytvorenie vzduchového okolia

Na to využijeme príkaz *Tools* → *Enclosure* (□). Ten nám v strome príkazov vytvorí položku *Enclosure* (□). Na ňu klikneme pravým tlačidlom a potvrdíme príkaz *Generate* (□), ktorý vygeneruje vzduchové okolie.



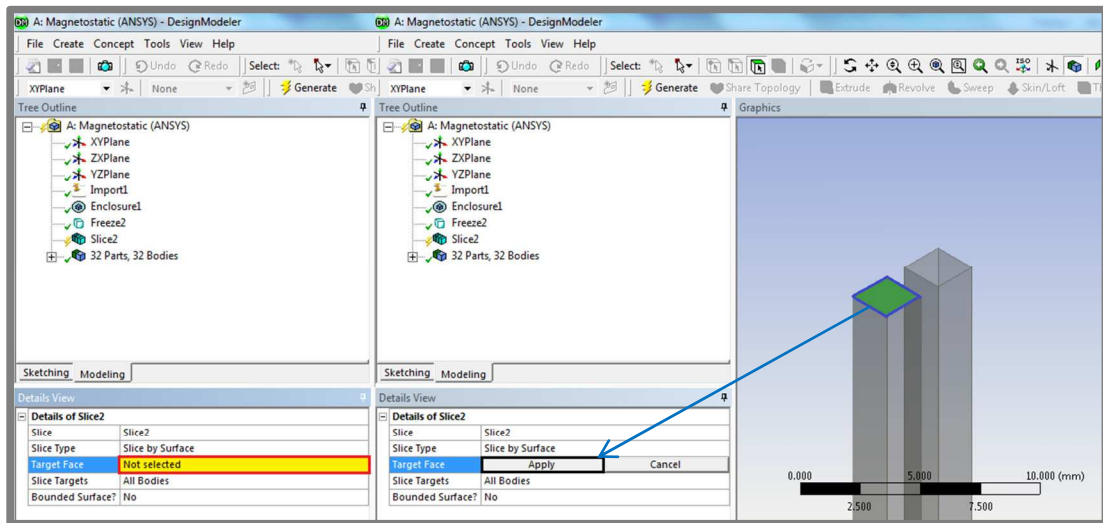
## Vytvorenie rezu prebytočného vzduchu

Konca cievky sa musia nachádzať na povrchu okolia, preto jeho časť musíme odstrániť. Ako prvé zmrazíme geometriu príkazom *Tools* → *Freeze* (□), aby sme sprístupnili príkaz *Create* → *Slice* (□). Následne vyberieme, v ponuke čím chceme rezať, *Slice by Surface* (□), pretože chceme vytvoriť rez povrchom konca cievky.

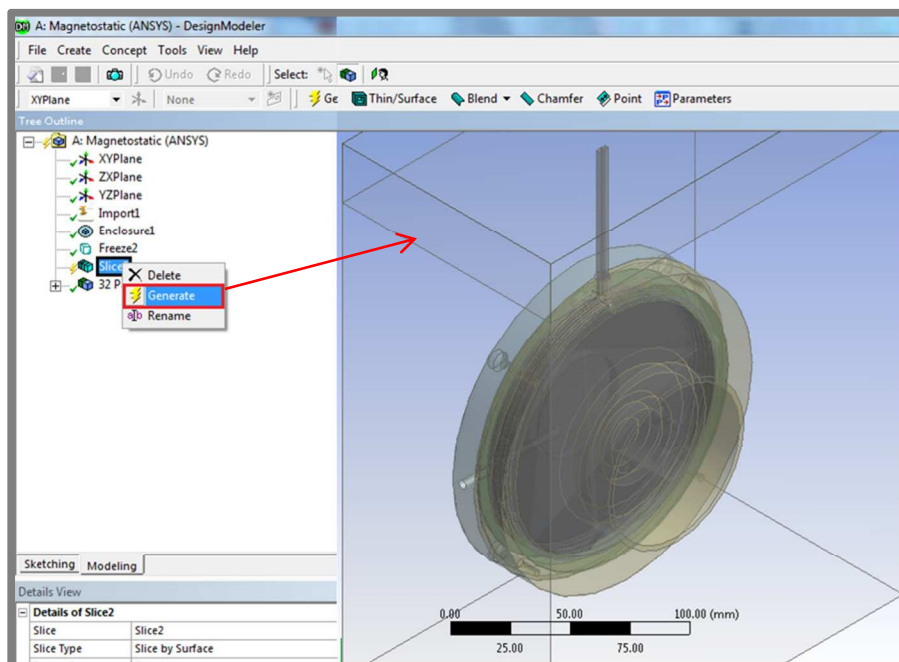




Pre výber povrchu, ktorým budeme rezať, klikneme na tlačidlo *Not selected*, ktoré svieti na žltu (□). Ľavým tlačidlom vyberieme plochu cievky, tá sa označí na zeleno (□) a výber potvrdíme tlačidlom *Apply* (□).



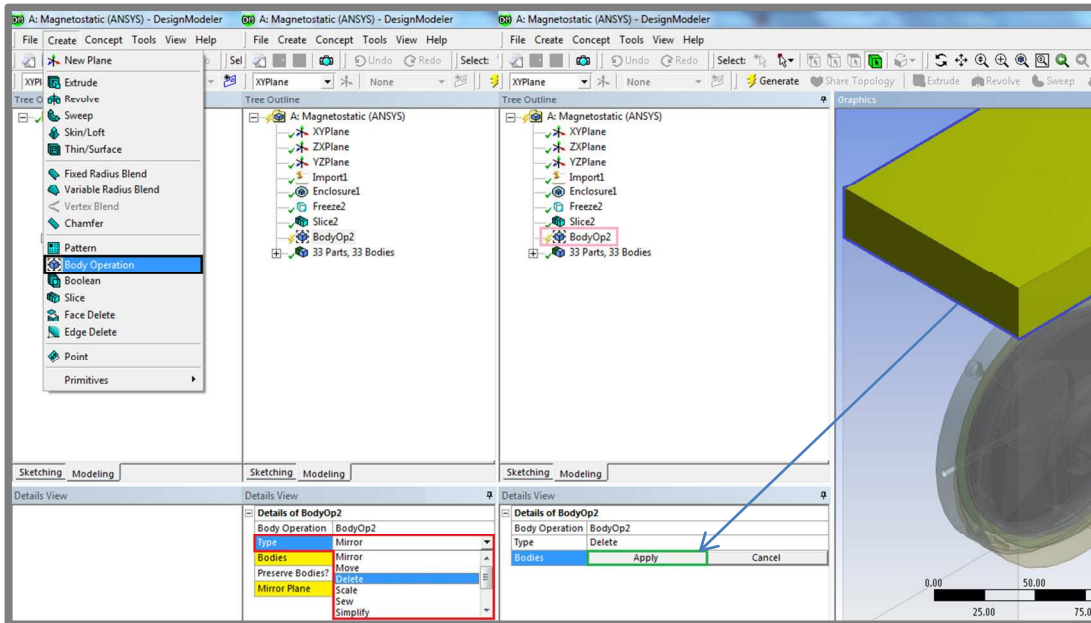
Podobne ako pri príkaze *Enclosure* klikneme pravým tlačidlom na *Slice* (□) a potom *Generate* (□).





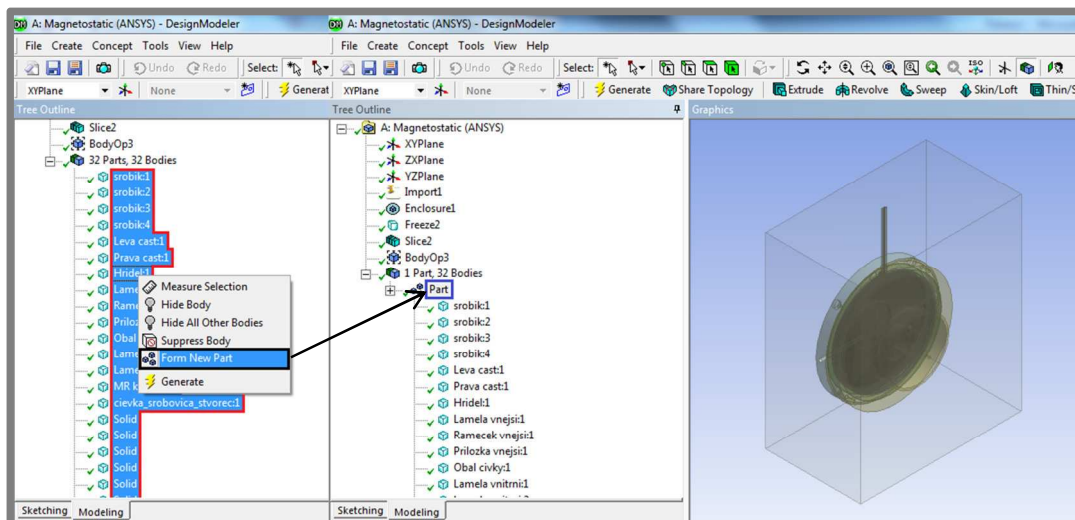
## Odstránenie prebytočného vzduchu

V predchádzajúcom kroku sme vytvorili rezom nové teleso, ktoré teraz chceme odstrániť. Na to nám posluží príkaz *Create* → *Body Operation* (□). Ako typ operácie vyberieme vymazanie *Delete* (□) a teleso odrezanú časť vzduchového okolia (□).



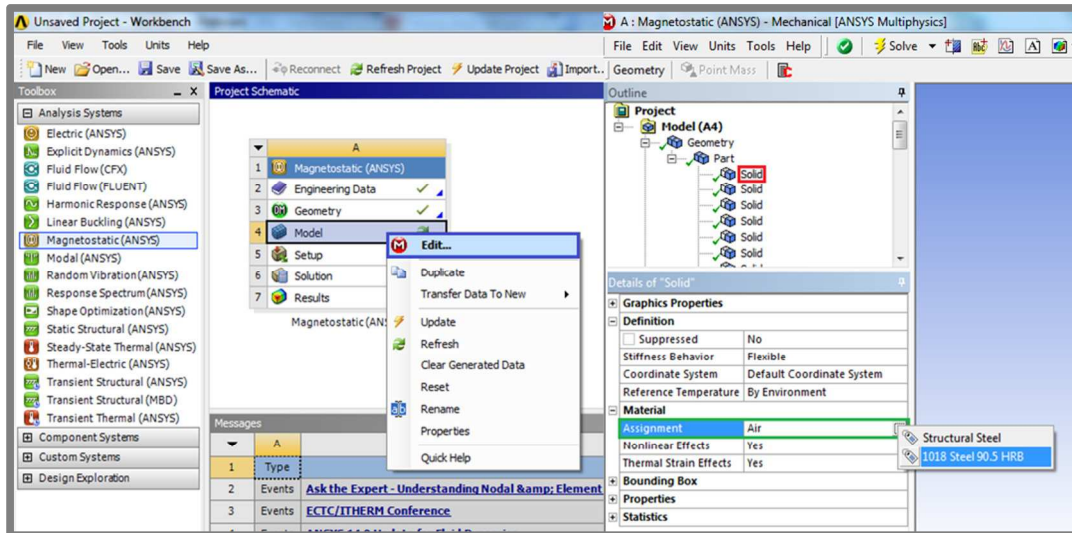
## Vytvorenie *Multibody part*

V kap. 2.2 je uvedená podmienka *Magnetostatic* analýzy a to, že ak sa model skladá z viacerých častí musí byť spojený do jednej, pretože takáto analýza nepodporuje kontaktné elementy. Preto označíme všetky časti spojky (□), klikneme pravým tlačidlom a vyberieme možnosť *Form New Part* (□). Vytvorí sa jediné teleso, ktoré sa skladá z častí (□). Tým sme dokončili prácu v *DesignModeler* a môžeme ho zavrieť.



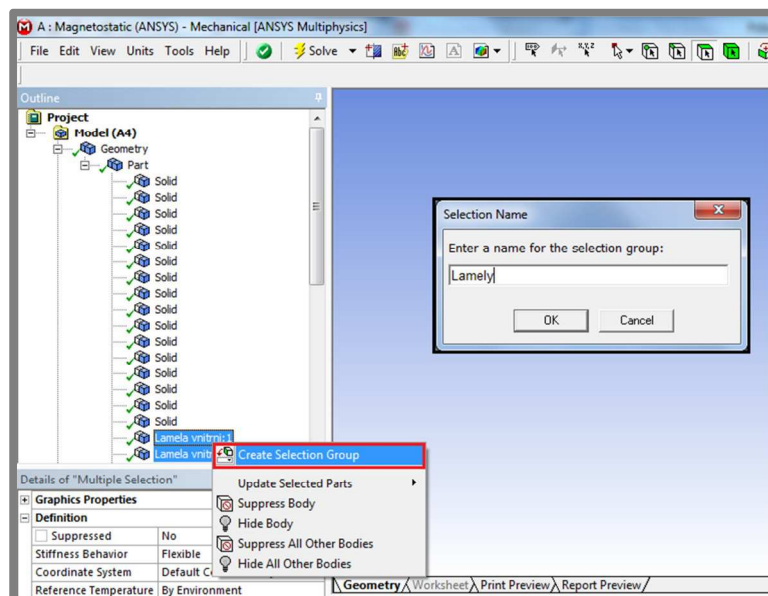
## Priradenie materiálu

V okne *Project Schematic* dva krát klikneme na položku *Model* alebo pravým tlačidlom → *Edit...* (□). Materiál priradzujeme každej časti a to tak, že na ňu v okne *Outline* klikneme ľavým tlačidlom (□) a v položke *Assignment* (□) vyberieme materiál, ktorý sme načítali do knižnice (viď. **Výber používaných materiálov**).



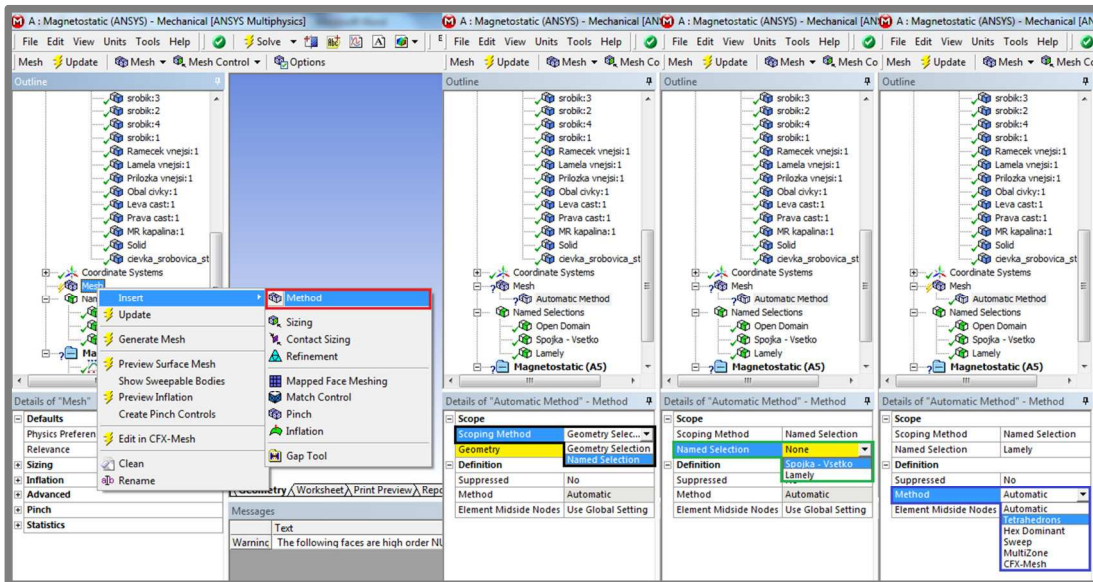
## Vytvorenie skupín súčiastok:

Pre zjednodušenie manipulácie s mriežkovaním je výhodné využiť vlastnosti *Named Selections* grupy. Označíme súčiastky, ktoré chceme v skupine mať a klikneme pravým tlačidlom, kde vyberieme príkaz *Create Selection Group* (□). Po jeho odkliknutí, vyskočí tabuľka zisťujúca meno novovytvorenej skupiny (□).



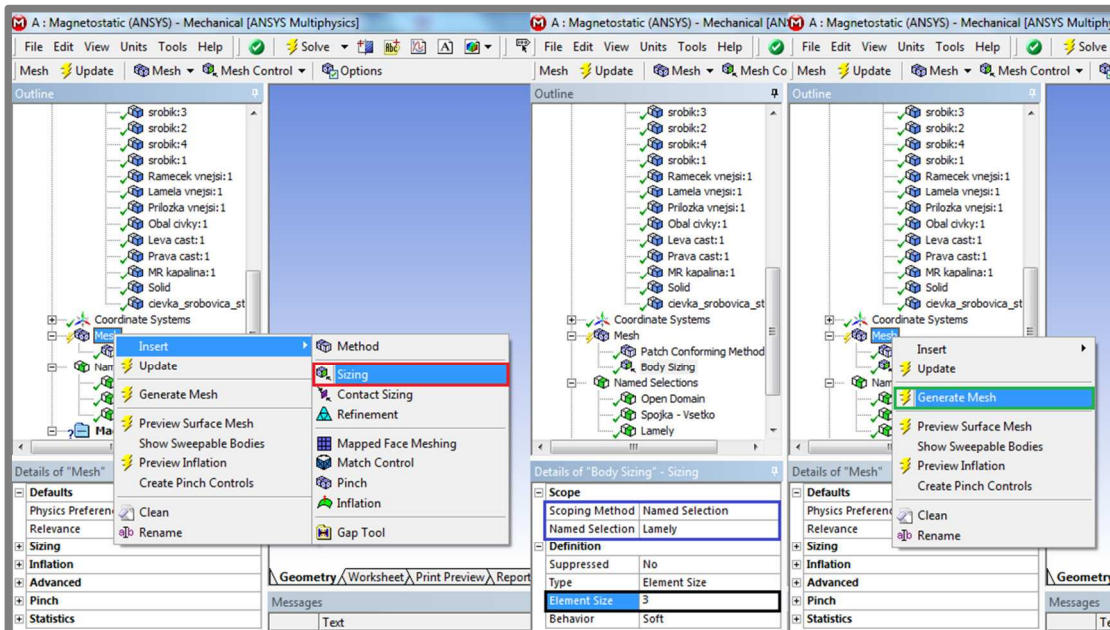
### Nastavenie mriežky – tvar elementov

V *Outline* okne klikneme pravým tlačidlom na položku *Mesh* → *Insert Method* (□). V detailoch môžeme vybrať selekciu telies, na ktoré bude mriežka aplikovaná, kde nastavíme *Named Selection* (□). Tu vyberieme skupinu súčastok *Spojka – všetko*, kde sa nachádza celá spojka (□). Typ elementov nastavíme v záložke *Method* a to konkrétne *Tetrahedrons* (□). Dôvod, prečo práve tetrahedrony je uvedený v kap. 2.2.



### Nastavenie mriežky – veľkosť elementov

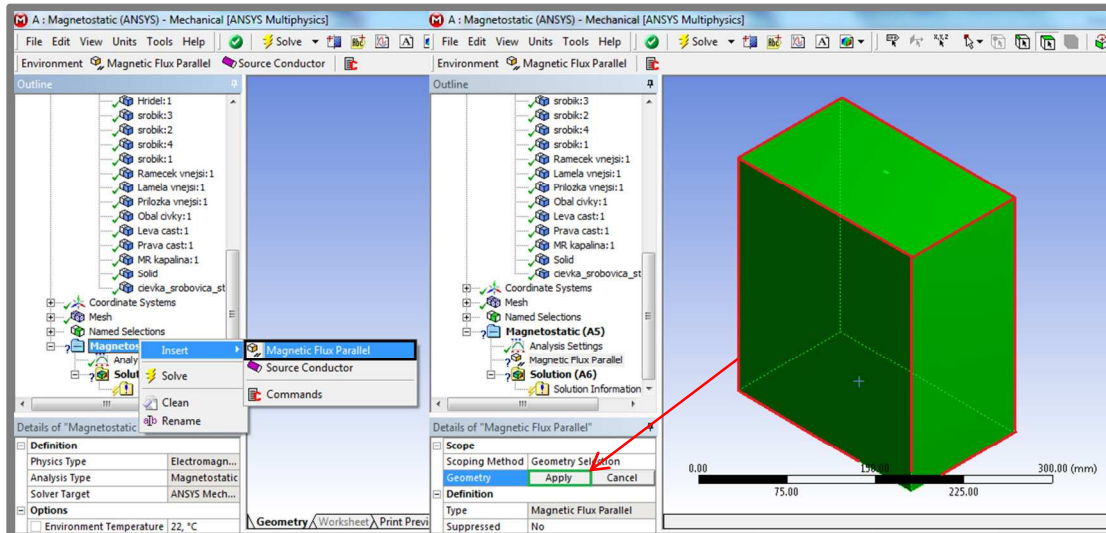
Podobne ako s výberom metódy mriežkovania vložíme veľkosť elementov (□, □). V položke *Element Size* zadáme požadovanú veľkosť elementov (□). Pre vygenerovanie mriežky klikneme pravým tlačidlom na *Mesh* → *Generate Mesh* (□) alebo ju necháme vytvoriť automaticky pri riešení *Solve*.





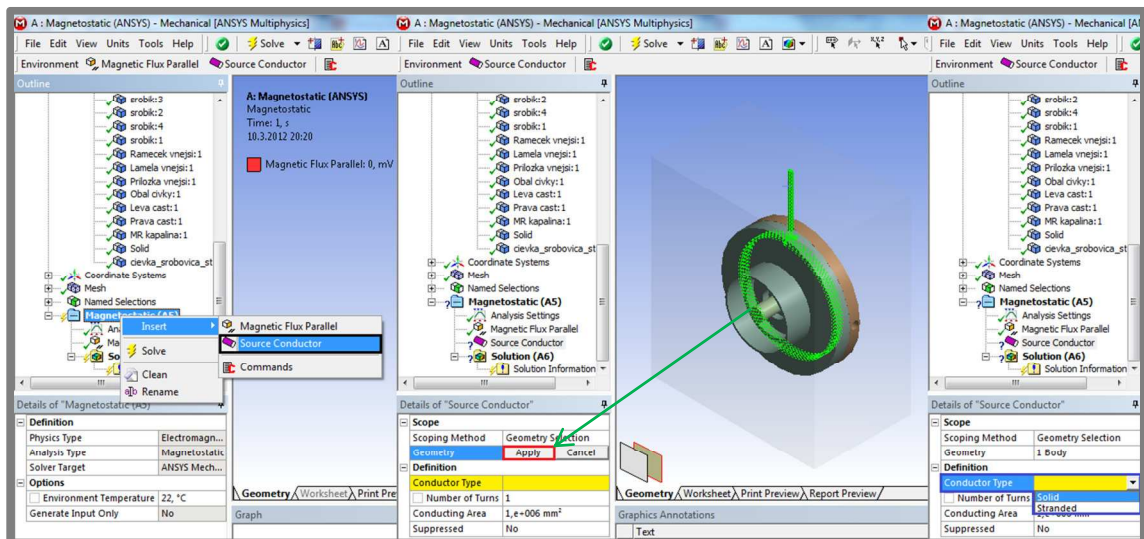
### Zadanie okrajovej podmienky

Pravým tlačidlom klikneme na *Magnetostatic* → *Insert* → *Magnetic Flux Parallel* (□) a vyberieme 6 rovín vzduchového okolia, ktoré sa po označení sfarbia na zeleno (□). Výber potvrdíme tlačidlom *Apply* (□).

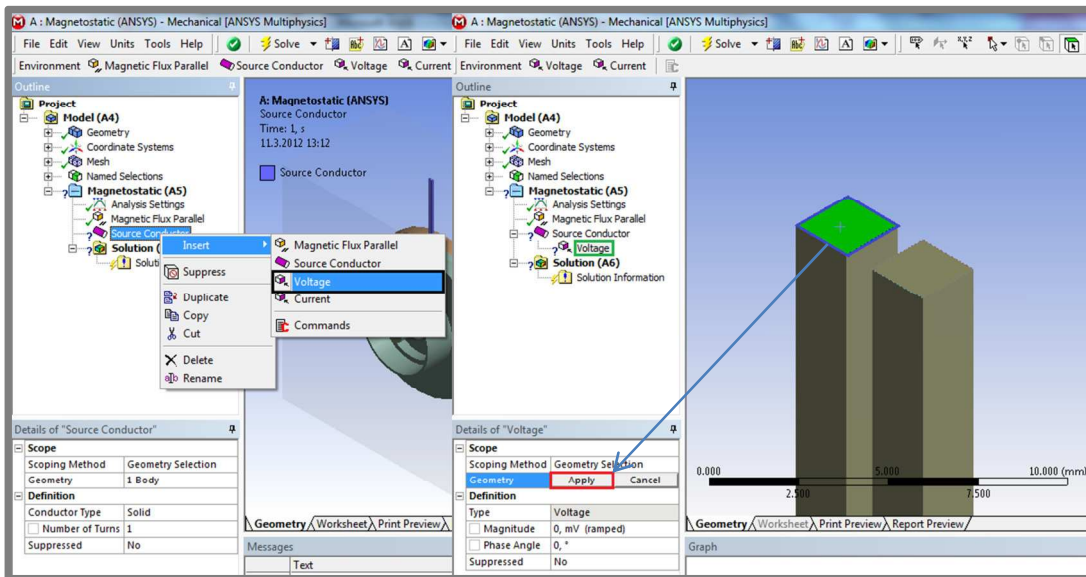


### Vloženie budenia

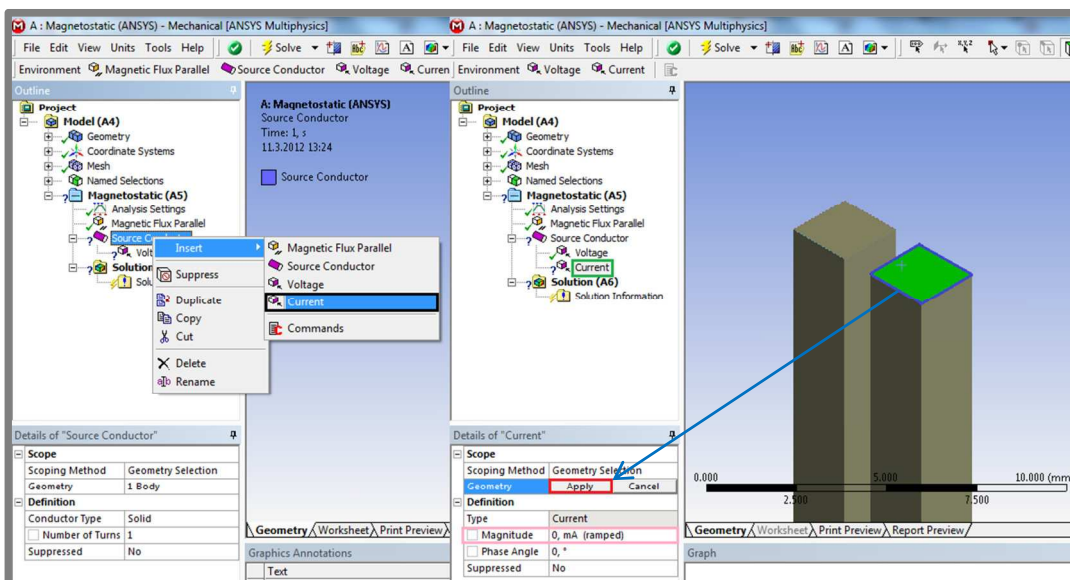
To zadáme podobne ako okrajové podmienky s tým rozdielom, že vložíme *Source conductor* (□) a ako geometriu vyberieme zjednodušenú cievku, ktorú potvrdíme tlačidlom *Apply* (□). V položke *Conductor Type* volíme *Solid* (□), pretože naša cievka má geometricky vytvarované závit.



Pravým tlačidlom klikneme na *Source Conductor* → *Insert* → *Voltage* (□). Tým do *Source Conductor* položky vložíme *Voltage* (□). Vyberieme plochu jedného konca cievky (□) a potvrdíme výber tlačidlom *Apply* (□).

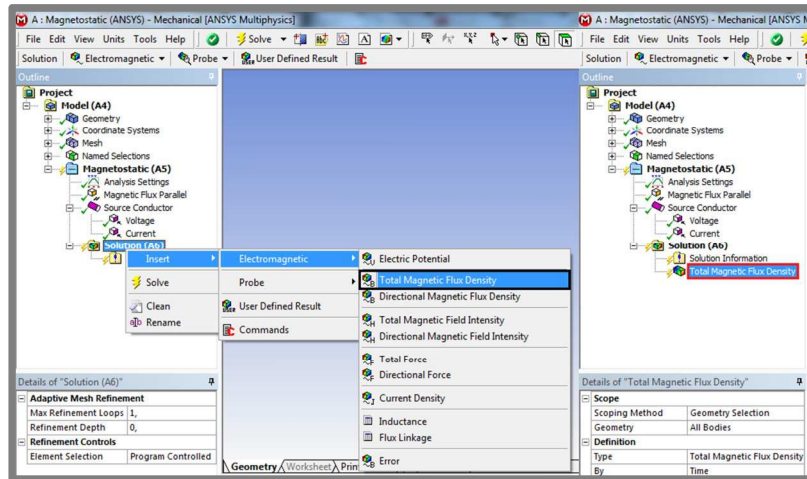


Podobne ako *Voltage* vložíme *Current* (□), ktorý sa nám v zobrazí v okne *Outline* (□). Vyberieme plochu druhého konca cievky (□) ako sme vyberali pri zadávaní *Voltage* (viz. krok vyššie) a klikneme na tlačidlo *Apply* (□). Prúd prechádzajúci cievkou bude nenulový a preto jeho hodnotu zadáme do kolonky *Magnitude* (□). Vypočítame ju zo vzťahu  $U_m = I \cdot z$  pričom:  $U_m$  je elektromotorické napätie a je to konštanta,  $I$  je prúd prechádzajúci cievkou a  $z$  je počet závitov cievky.



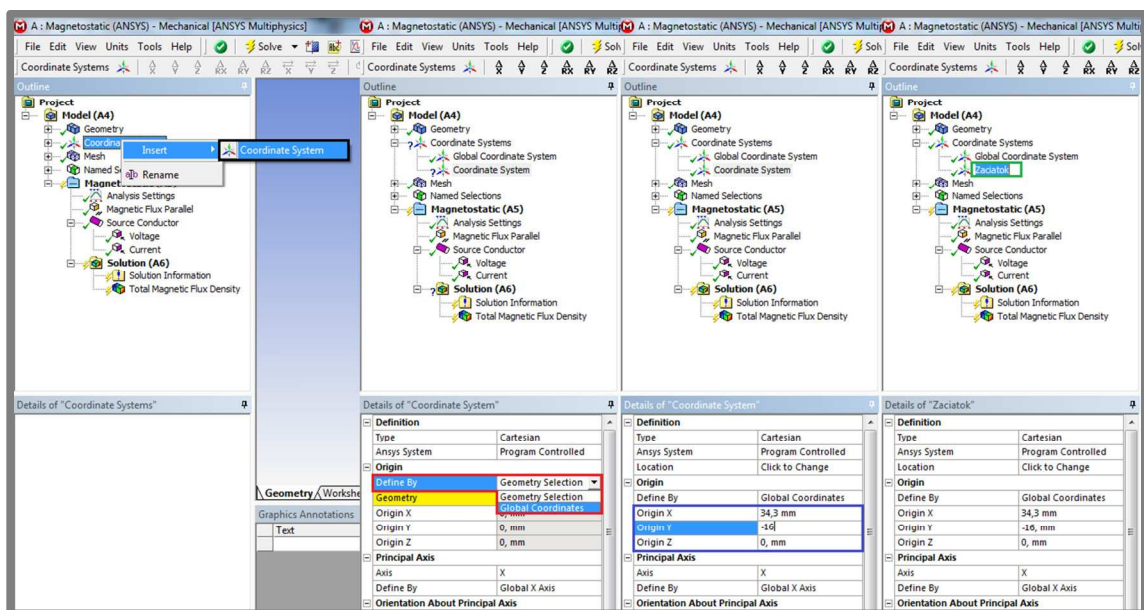
### Zadanie výstupu riešenia – *Total Magnetic Flux Density*

Na vykreslenie celkového rozloženia magnetickej indukcie slúži *Total Magnetic Flux Density* (z angl. celková magnetická indukcia) a zadáme ju pravým tlačidlom na *Solution* → *Insert* → *Electromagnetic* → *Total Magnetic Flux Density* (□). Po odkliknutí sa objaví položka výsledkov magnetickej indukcie (□).



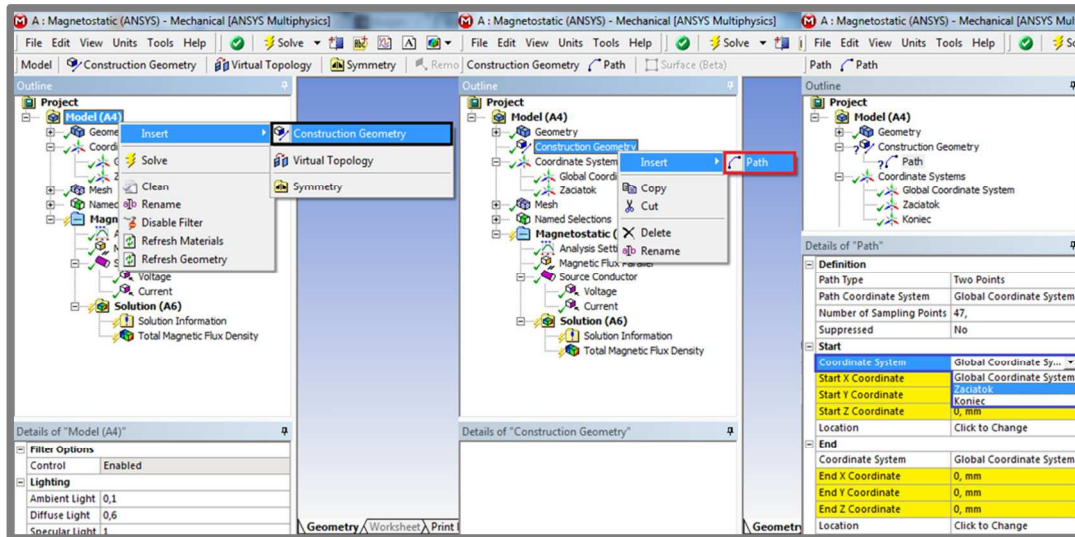
### Zadanie výstupu riešenia – *Directional Magnetic Flux Density*

Pre zistenie presne vypočítaných hodnôt magnetickej indukcie v jednom smere využijeme nasledujúci postup. Najprv vytvoríme cestu, na ktorej budeme magnetickú indukciu vyšetrovať. Vložíme lokálny súradnicový systém pravým kliknutím na *Coordinate Systems* → *Insert* → *Coordinate System* (□). V detailoch vyberieme *Define By* → *Global Coordinates* (□), pretože chceme zadávať počiatok súradnicového systému konkrétnymi súradnicami (□). Novo vytvorený lokálny súradnicový systém reprezentuje začiatkový bod skúmanej dráhy spojky a môžeme ho premenovať (□). Rovnako vytvoríme aj koncový bod.

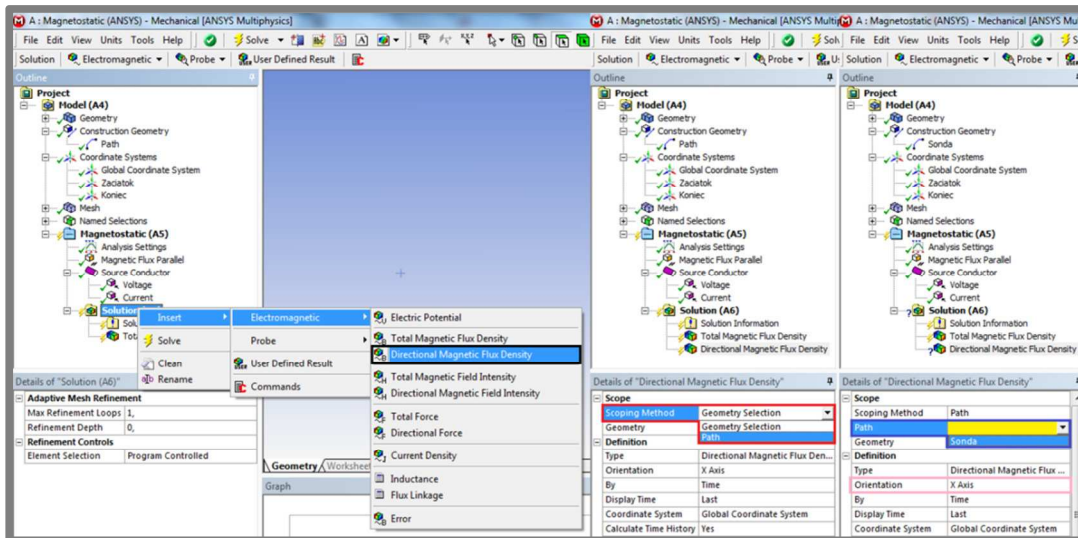




Keď klikneme pravým tlačidlom na *Model* → *Insert* → *Construction Geometry* (□), vytvorí sa nová sekcia, kde je možné príkazom *Construction Geometry* → *Insert* → *Path* (□) vložiť skúmanú dráhu na spojke. Tú treba definovať začiatočným a koncovým bodom, ktoré sme v predchádzajúcom kroku vytvorili (□) a cestu premenujeme napr. na „Sonda.“

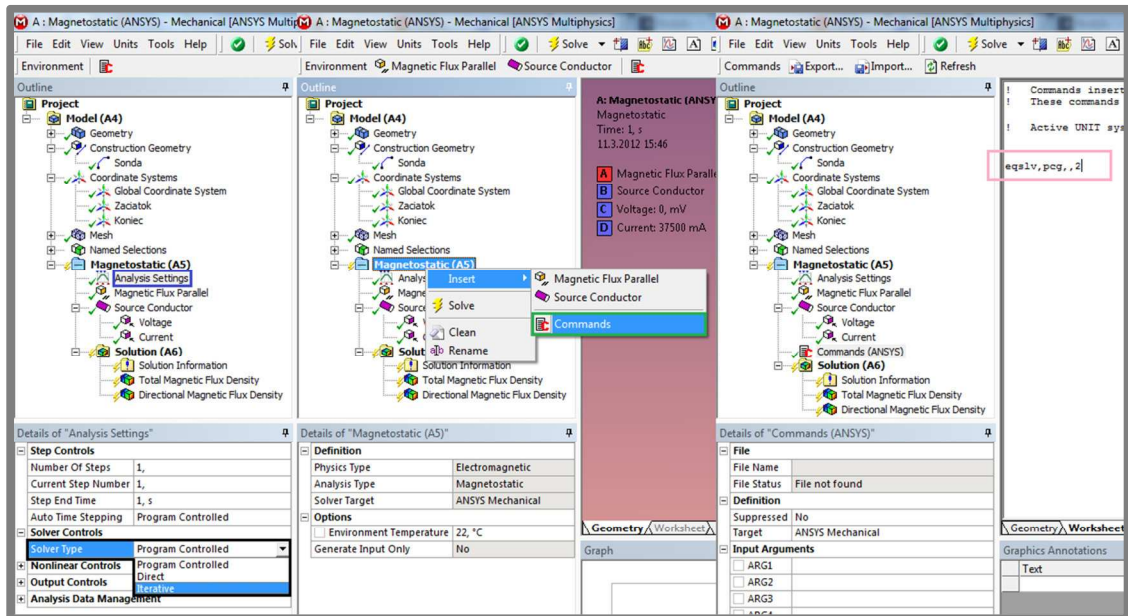


Pravým tlačidlom klikneme na *Solution* → *Insert* → *Electromagnetic Directional Magnetic Flux Density* (□). Zadáme *Scoping Method* → *Path* (□) a v kolónke *Path* vyberieme predom vytvorenú cestu *Sonda* (□). Nastavenie smeru magnetickej indukcie je v položke *Orientation* (□).



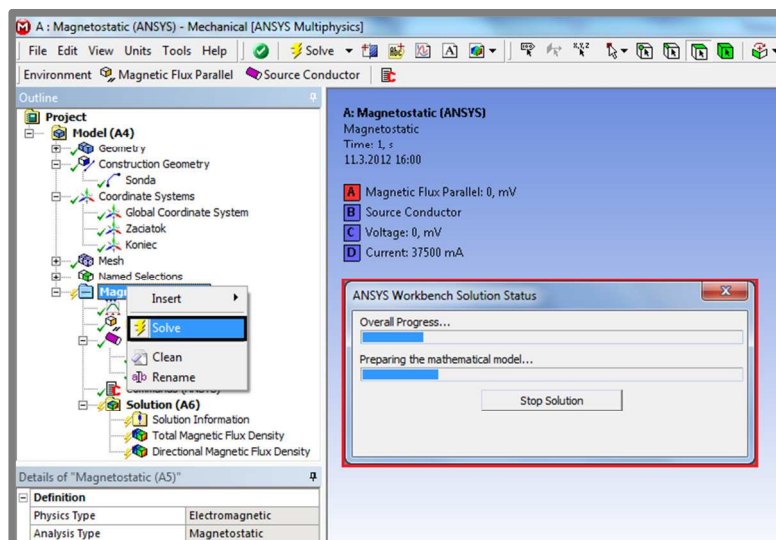
### Typ riešenia a výber riešiča

Typ riešenia môžeme vybrať v kolónke *Solver type* (□) položky *Analysis Settings* (□). Pre zadanie konkrétneho požadovaného riešiča (viz. kap. 2.2.1) slúži príkaz *Commands* (□), ktorý sa zadáva do samostatného okna (□) a jeho štruktúra je popísaná v Helse [11].



### Spustenie výpočtu

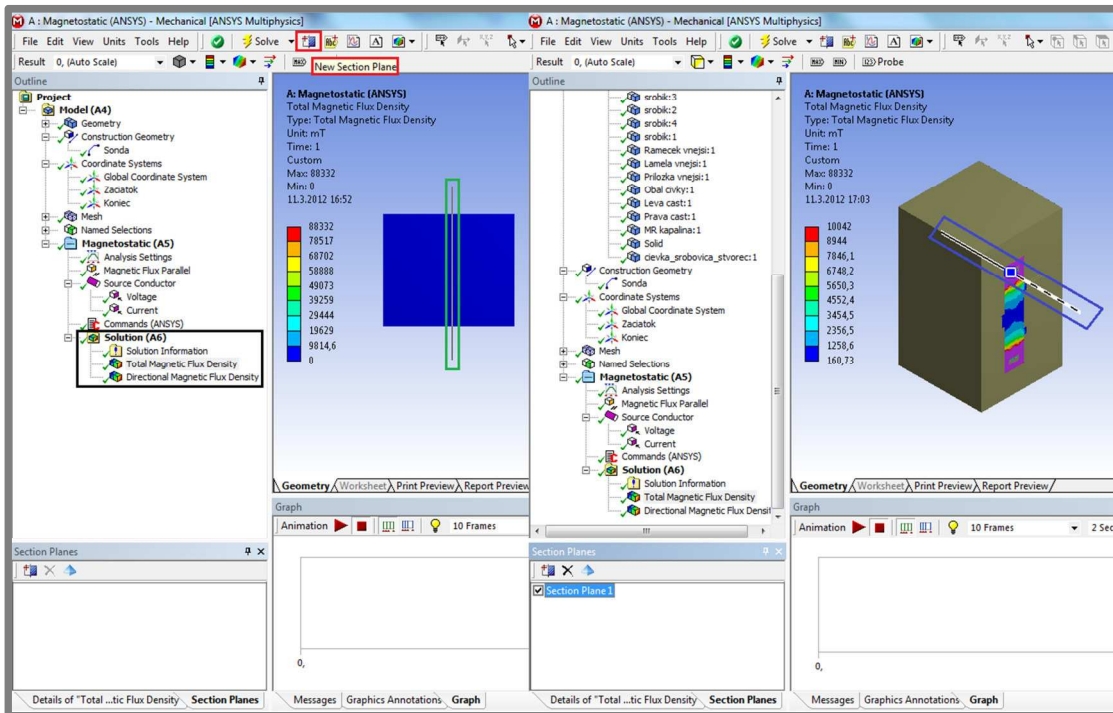
Výpočet spustíme pravým kliknutím na *Magnetostatic* → *Solve* (□). Objaví sa okno, ktoré ukazuje priebeh riešenia (□).



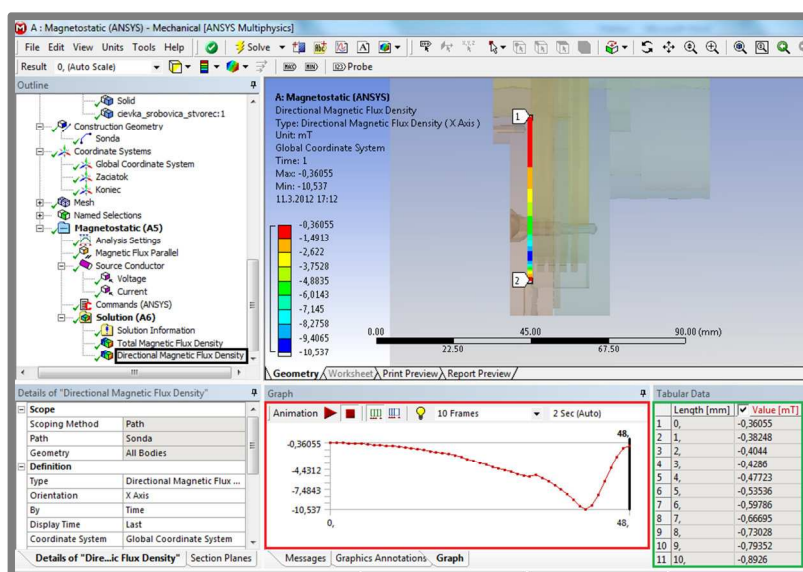


## Zobrazenie výsledkov

Po úspešnom výpočte budú v *Solution* všade zelené fajky (□). *Total Magnetic Flux Density* zobrazíme vytvorením pomyselného rezu a to tak, že najprv klikneme na ikonu *New Section Plane* (□) a potom vytvoríme rovinu držaním ľavého tlačidla myši (□). Manipulovať s reznou rovinou môžeme posúvaním priamky, ktorú zobrazuje (□).

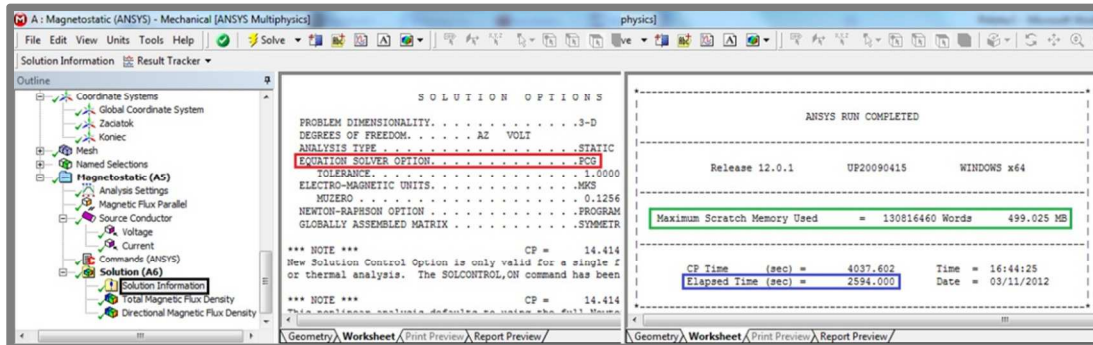


V prípade výsledkov *Directional Magnetic Flux Density* po kliknutí na toto okno (□) *Workbench* zobrazí graf (□) a tabuľku (□), ktorú môžeme exportovať do iného dátového programu.



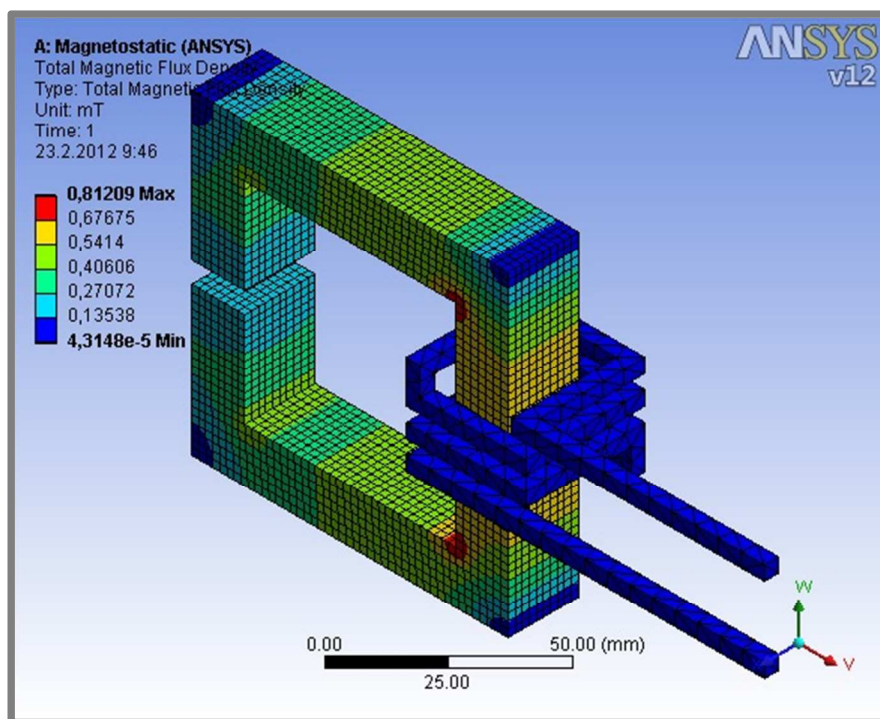
## Výpočtová správa

Zápis a priebeh výpočtu je možné sledovať v *Solution Information* (□) aj počas výpočtu. Nachádzajú sa tu informácie ohľadom riešiča (□), čas (□) a operačná pamäť potrebná na riešenie (□) ako aj rady pre zlepšenie výpočtu.



## PRÍLOHA II – VHODNOSŤ RIEŠIČOV V MAGNETOSTATIC ANALYSIS

Obr. II.1 zobrazuje jednoduchú úlohu, v ktorej cievkou prechádza el. prúd a ten evokuje magnetické pole v kovovom jadre (mag. lineárny materiál). Na tomto príklade demonštrujeme vhodnosť jednotlivých riešičov uvedených v kap. 2.2.1. Počet elementov mriežky je 72 143.



Obr. II.1 Jednoduchá úloha cievky s kovovým jadrom

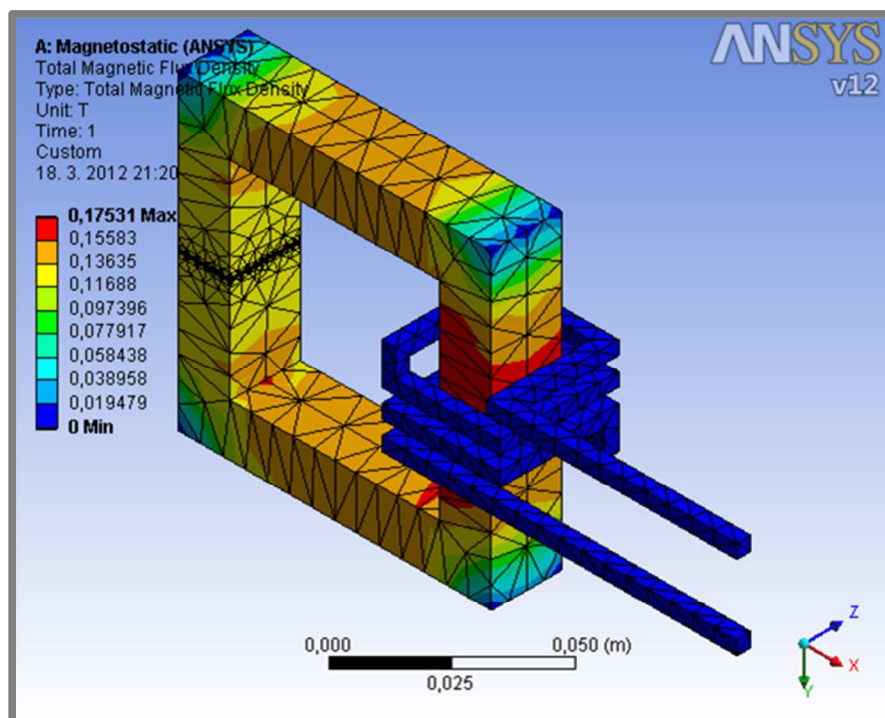
Pri pohľade na tab. II.1 sa ako najvýhodnejší iteračný riešič zdá QMR, ktorý je nasledovaný ICCG a JCG. Výsledné magnetické pole, ktoré vypočítal QMR, je nulové, a preto je tento riešič v našom prípade nevyhovujúci. V prípade použitia PCG riešiča s automatickým nastavením, sa ku konvergencii nedopracoval. Každopádne samotný program Workbench odporúča zmenu parametru *MULT* na hodnotu od 1 do 2,5 a preto, so spresnením  $MULT = 2$ , aj riešič PCG vyriešil danú úlohu. *Iterative* typ riešenia použil ako riešič ICCG a rozdiel vo výpočtovom čase je spôsobený hľadaním tohto vhodného riešiča. Z hľadiska potrebnej operačnej pamäte sa priame riešiče vo všeobecnosti správajú ako náročnejšie oproti iteračným, čo potvrdzuje ich charakteristiku z kap. 2.2.1.

Tab. II.1 Hmotnosti jednotlivých súčiastok zostrojenej MR spojky

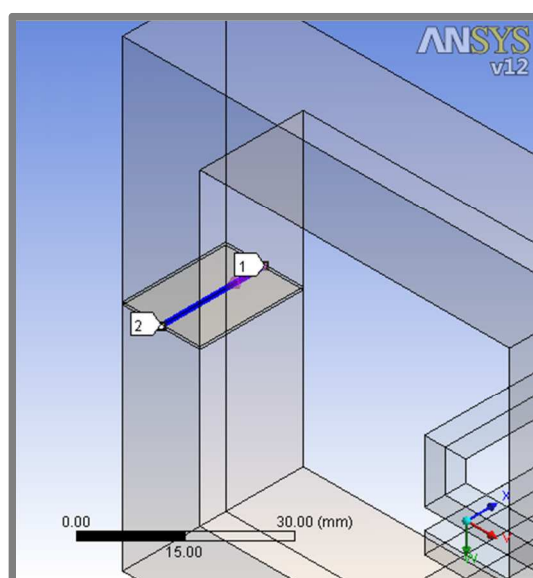
<i>Typ riešiča</i>	<i>Čas riešenia [s]</i>	<i>Potrebná operačná pamäť [MB]</i>
<i>SPARSE</i>	<i>71,6</i>	<i>541</i>
<i>PCG</i>	<i>1 453 (error)</i>	<i>300</i>
<i>PCG, MULT = 2</i>	<i>530</i>	<i>298</i>
<i>JCG</i>	<i>155</i>	<i>227</i>
<i>ICCG</i>	<i>137</i>	<i>227</i>
<i>ITER</i>	<i>144 (SPARSE)</i>	<i>541</i>
<i>QMR</i>	<i>103</i>	<i>227</i>
<i>AMG</i>	<i>3 660</i>	<i>447</i>
<i>Program Controlled</i>	<i>134</i>	<i>541</i>
<i>Direct</i>	<i>106</i>	<i>541</i>
<i>Iterative</i>	<i>184 (ICCG)</i>	<i>227</i>

### PRÍLOHA III – VPLYV VEĽKOSTI ELEMENTOV V MR MEDZERE NA VYPOČÍTANÚ MAGNETICKÚ INDUKCIU

Aby sme zistili ako veľkosť elementu MR medzery ovplyvňuje výsledné magnetické pole, vytvoríme elektromagnet (obr. III.1), ktorého medzera je samostatne vymodelované teleso o hrúbke 0,5 mm. Dôvod prečo tento vplyv pozorujeme na jednoduchej úlohe je technická nenáročnosť oproti riešení konkrétnej MR spojky. Porovnáваме výsledky *Directional Magnetic Flux* dráhy v strede MR medzery (obr. III.2).

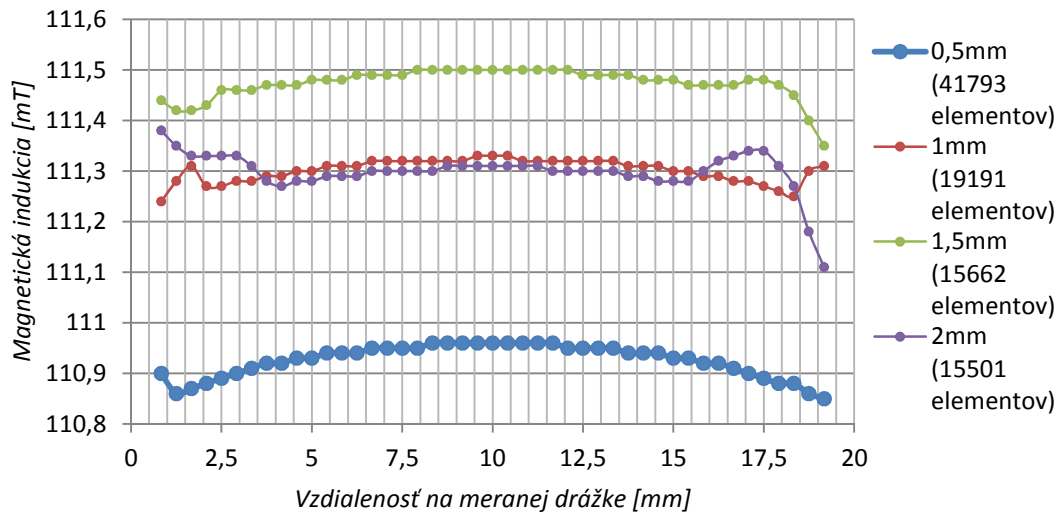


Obr. III.1 Elektromagnet s elementom MR medzery 0,5 mm



Obr. III.2 Dráha Directional Magnetic Flux v strede MR medzery

Z grafu na obr. III.3 vidno rozdiely v magnetickej indukcii drážky v strede MR medzery. Ak vezmeme ako najpresnejšie riešenie hodnoty pri veľkosti elementu MR medzery 0,5 mm; tak sa od nej najviac odlišuje 1,5 mm element; pri ktorom je najväčšia relatívna chyba veľká 0,532%. Vzhľadom na rýchlosť výpočtu a počet elementov to považujeme za zanedbateľný rozdiel.



Obr. III.3

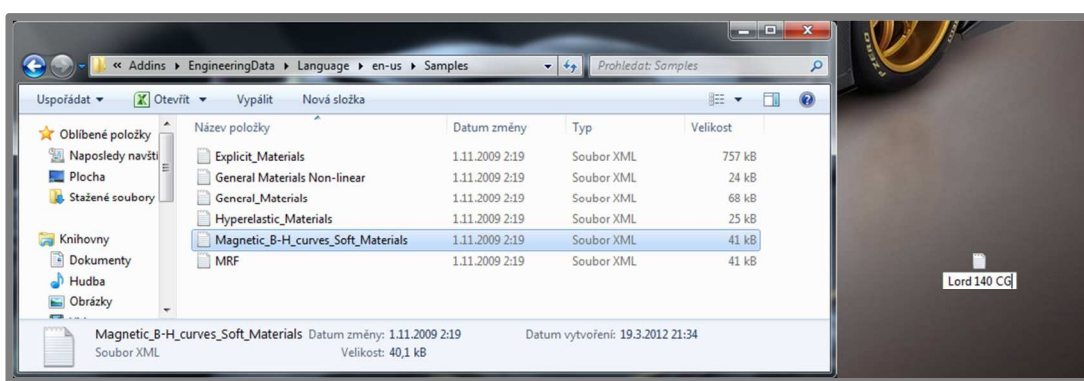
## PRÍLOHA IV – DEFINOVANIE VLASTNÉHO MAGNETICKY NELINEÁRNEHO MATERIÁLU DO ANSYS WORKBENCH

### Inštalácia .xml programu:

Dáta, ktoré charakterizujú vlastnosti materiálov v *Engineering Data*, sú v ANSYS Workbench uložené v súbore s koncovkou .xml. Preto potrebujeme ako prvé nainštalovať program, ktorý dokáže takéto súbory editovať (Microsoft Excel podporuje len ich otváranie a nie editáciu). Takýchto programov je viacero aj v neplatených verziách a my využijeme *EditX 2010*.

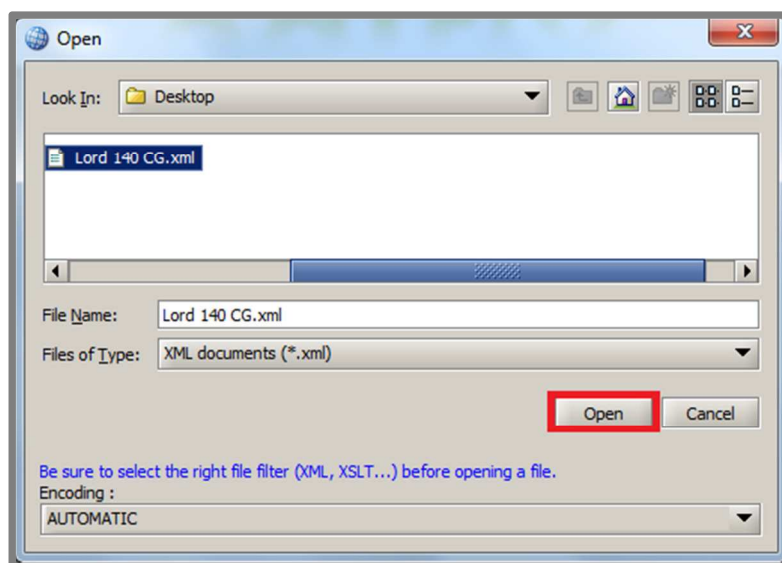
### Vytvorenie novej galérie materiálov

Súbor s cestou `ANSYInc/v121/Addins/EngineeringData/Language/en-us/Samples/Magnetic_B-H_curves_Soft_Materials` skopírujeme na plochu a premenujeme.



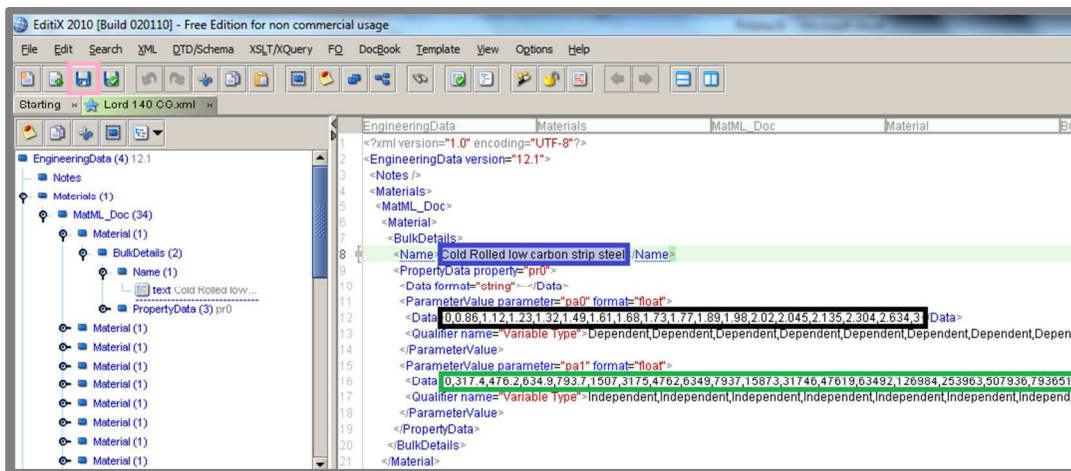
### Úprava dát v EditX 2010

Po spustení editačného programu otvoríme skopírovaný súbor dát materiálov .xml (□).



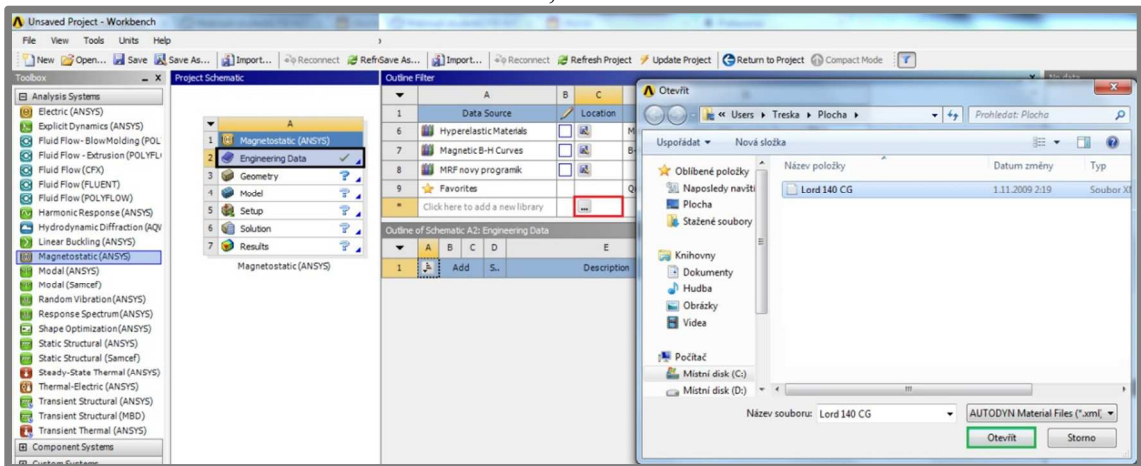


Následne sa otvorí zdrojový kód. Tu prepíšeme názov materiálu (□) a zmeníme súradnice B-H krivky (□,□) a uložíme (□).



### Načítanie upravenej galérie do ANSYS Workbench

Dvojitým kliknutím na *Engineering Data* (□), sa otvorí okno kde klikneme na pridanie novej knižnice (□) a otvoríme (□).





## Výsledný vytvorený materiál

Načítala sa upravená galéria materiálov, kde máme aj nami zadanú MR kvapalinu Lord 140 CG.

