

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

PROGRAM FEMM – PODKLADY PRO VÝUKU V ELEKTRONICKÉ FORMĚ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

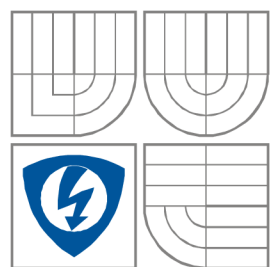
Michal Pešek

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

PROGRAM FEMM – PODKLADY PRO VÝUKU V ELEKTRONICKÉ FORMĚ

PROGRAM FEMM – SOURCE MATERIALS FOR EDUCATION IN ELECTRONIC FORM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

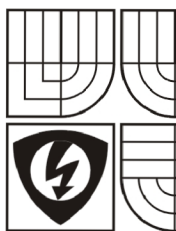
MICHAL PEŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ VÍTEK, Ph.D.

BRNO, 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Nováček Petr

Ročník: 3

ID: 11111

Akademický rok: 2008/09

Program FEMM - podklady pro výuku v elektronické formě

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Nastudujte problematiku modelování magnetických obvodů pomocí metody konečných prvků v programu FEMM.
2. Vypracujte manuál k programu FEMM včetně vzorového řešení několika zadaných úloh.
3. Z připravených podkladů (text, obrázky, animace) vytvořte webové stránky.
4. Zhodnoťte výsledky, navrhnete další postup.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Termín zadání: 01.10.2008

Termín odevzdání: 29.05.2009

Vedoucí projektu: Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

Práce je zaměřena na seznámení uživatelů s prací v programu FEMM. Ten slouží k řešení dvou rozměrných, nízkofrekvenčních elektromagnetických úloh. Měla by umožnit i studentům, kteří nejsou zblhlí s prací v programech v anglickém jazyce, sestavit si model a nastavit parametry, potřebné pro úspěšné vyřešení požadovaného zadání. Je zde popsáno nastavení a umístění důležitých prvků programu a uživatelé by tedy měli rychle pochopit, jak se v programu pracuje. FEMM sice pracuje ve dvojrozměrném režimu a je tedy omezenější a jednodušší než drahé 3D nástroje, zato jeho použití pro komerční i nekomerční využití je zdarma. To činí tento program velice zajímavým i pro domácí použití studenty. Licence autora se vztahuje pouze na samotný kód programu a jeho prodej.

Abstract

The manual is supposed to introduce to users the program FEMM. It is designed for solving low frequency electromagnetics problems. It should allow students, who are not experienced with work in english interface programs, make a model and set parameters needed for successful solution of required problem. There is description of setting and location of important program elements. Users have to quickly understand, how to work in program. FEMM work indeed in two dimensional mode and it is simpler, than expensive 3D programs, on the other hand, he is free for commercial and noncommercial use. It makes this program very interesting for home using by students. Licence restriction is related with program code itself and selling only.

Klíčová slova

FEMM; manuál; metoda konečných prvků; podklady pro výuku; lua skript

Keywords

basis for education; FEMM; finite element method; lua script; manual

Bibliografická citace

PEŠEK, M. *Program FEMM - podklady pro výuku v elektronické formě*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2009. 54 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Program FEMM – podklady pro výuku v elektronické formě jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřej Vítek, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

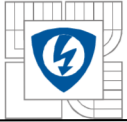
V Brně dne

Podpis autora



OBSAH

1. ÚVOD	9
2. METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP)	9
3. UŽIVATELSKÉ ROZHRANÍ	10
3.1 TVORBA GEOMETRIE (PRE-PROCESSOR)	11
3.2 ZMĚNA POHLEDU	12
3.3 MŘÍŽKA – PŘICHYTÁVÁNÍ BODŮ	12
4. DEFINOVÁNÍ VLASTNOSTÍ	12
4.1 GLOBÁLNÍ PARAMETRY	12
4.2 NASTAVENÍ VLASTNOSTÍ PLOCH (ZELENÝCH BODŮ)	13
4.2.1 MATERIÁLY	13
4.2.2 CÍVKY	15
4.2.3 PŘÍŘAZENÍ VLASTNOSTÍ OBLASTEM	15
4.3 OKRAJOVÉ PODMÍNKY	16
4.3.1 NASTAVENÍ OKRAJOVÝCH PODMÍNEK	17
4.3.2 PŘÍŘAZENÍ OKRAJOVÝCH PODMÍNEK	18
4.4 NASTAVÍ PODMÍNEK BODŮ	19
5. VÝPOČET	19
5.1 PŘÍPRAVA	19
5.2. VÝSTUPNÍ DATA (POSTPROCESSOR) – ZOBRAZENÍ	19
5.2.1 VOLBA REŽIMU	21
5.2.2 GRAFY	21
5.2.3 HODNOTY INTEGRÁLŮ	22
6. LUA SKRIPT	23
6.1 POPIS	23
6.2 OBECNÉ PŘÍKAZY	23
6.3 PŘÍKAZY PREPROCESSORU	24
6.3.1 OBJEKTY PŘIDAT/ODEBRAT	24
6.3.2 OZNAČENÍ GEOMETRIE	25
6.3.3 VLASTNOSTI OBJEKTŮ	25
6.3.4 VÝPOČTOVÉ PŘÍKAZY	26
6.3.5 VÝPOČET SÍTĚ	26
6.3.6 EDITACE GEOMETRIE	26
6.3.7 ZOOMOVÁNÍ	27
6.3.8 ZOBRAZENÍ	28
6.3.9 VLASTNOSTI OBJEKTŮ	28
6.3.10 RŮZNÉ	31
6.4 PŘÍKAZY PO VÝPOČTU MODELU (POST PROCESORU)	32
6.4.1 ZÍSKÁNÍ VÝSTUPNÍCH HODNOT	32
6.4.2 PŘÍKAZY VÝBĚRU	35
6.4.3 ZOOMOVÁNÍ	35
6.4.4 ZOBRAZOVÁNÍ	35



6.4.5 RŮZNÉ.....	37
7. PŘÍKLADY POUŽITÍ.....	38
7.1 ŘEŠENÍ ELEKTROMAGNETU S POSUVNÝM JÁDREM	38
7.1.1 VYTVOŘENÍ.....	38
6.1.2 NASTAVENÍ VLASTNOSTÍ.....	40
6.1.3 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ	42
7.2 PRINCIPIÁLNÍ MODEL STEJNOSMĚRNÉHO MOTORU	44
7.2.1 GEOMETRIE MODELU	44
7.2.2 NASTAVENÍ PARAMETRŮ	45
7.2.3 LUA SKRIPT A NASTAVENÍ SÉRIE VÝPOČTŮ	47
8. ZÁVĚR.....	51
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	52
LITERATURA	53
PŘÍLOHY	54

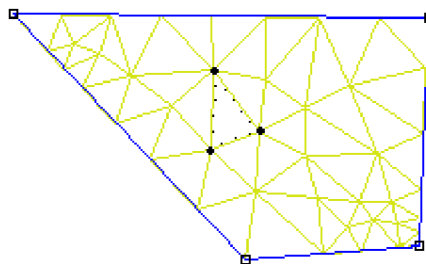
1. ÚVOD

Program FEMM slouží k řešení nízkofrekvenčních, elektromagnetických úloh, pomocí dvourozměrných modelů, metodou konečných prvků. Nejprve se stručně seznámíme s metodou konečných prvků. Následuje seznámení se základy ovládání programu, tvorbou modelu a zadáváním hodnot. Popíšeme si, co je třeba nastavit pro úspěšné vyřešení úlohy a jak lze zobrazit výsledek. Nakonec jsou zařazeny ukázky práce s programem, na kterých si ukážeme postup při práci a tím si vyzkoušíme, co jsme si osvojili v manuálu teoreticky.

2. METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP)

[1] Metoda konečných prvků je účinná metoda k řešení všech okrajových úloh inženýrské praxe, popsaných diferenciálními rovnicemi. Metoda byla vyvinuta s nástupem digitálních počítačů ke konci padesátých let k řešení úloh z pružnosti a pevnosti v leteckém průmyslu. V krátké době byla zavedena v řadě oblastí ve strojírenství, stavebnictví a v elektrotechnice, Zavádějí se oblasti kde se počítá pole, uzly a uzlové potenciály. Uzly však mohou být rozloženy v oblasti nerovnoměrně a mohou tak sledovat tvar hraničních ploch. V místech, kde se očekává prudká změna pole, se zavede větší hustota sítě.

Sestaví se soustava rovnic pro neznámé uzlové hodnoty. Koeficienty matice soustavy a pravých stran se nepočítají z diferencí, nahrazujících derivace, ale jako jistě integrály přes elementární plošky nebo objemy, v jejich vrcholech jsou uzly. Tyto elementární útvary jsou nazývány *konečné prvky*.



Obr. 2.1

V Obr.2.1 je naznačen konečný prvek tvaru trojúhelníku. V rovině se nepoužívají složitější prvky než čtyřúhelníky.

Postup při aplikaci MKP sestává z těchto kroků:

1. generace sítě prvků s uzly.
2. Aproximace potenciálu na jednotlivých prvcích z uzlových hodnot.

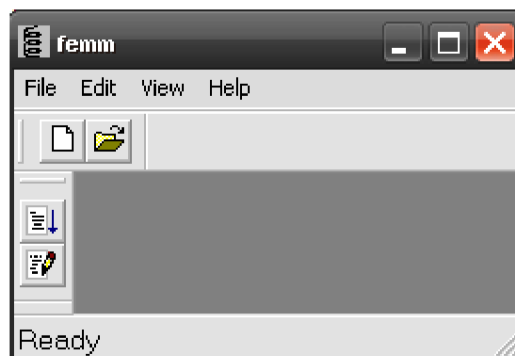


3. Dosazení zvolené aproximace do diferenciální rovnice nebo jejího ekvivalentu a sestavení soustavy rovnic pro neznámé uzlové hodnoty.
4. Vyřešení soustavy.
5. Zpracování dodatečných požadavků – výpočet dalších veličin a zobrazení výsledků.

Metoda konečných prvků je založena na myšlence využít co nejnižší stupeň aproximačního polynomu. Co nejnižší znamená vybrat takový stupeň polynomu, který po dosazení do příslušné diferenciální rovnice představuje ještě netriviální řešení. Např. Aproximace stupňovitou po částech konstantní funkcí nelze použít pro řešení diferenciálních rovnic vůbec, neboť po dosazení konstantních hodnot jsou derivace nulové. Zdálo by se, že rovnice 2. řádu budou vyžadovat alespoň kvadratickou aproximaci. Víme však, že integrací per partes lze snížit řád rovnice o jeden. Tento princip platí i pro parciální diferenciální rovnice. Proto vystačíme pro rovnici 2. řádu s lineární aproximací. MKP tedy nevyužívají aproximaci polynomy vyšších řádů na dlouhém polynomu, ale naopak na mnoha malých intervalech lineární nebo nejvýše kvadratickou aproximaci.

3. UŽIVATELSKÉ ROZHŘANÍ

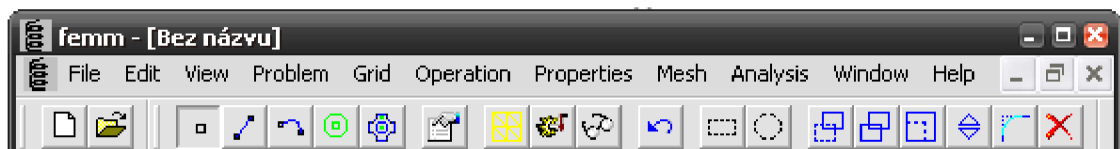
Okno programu po spuštění:



Obr.3.1

Máme na výběr 4 tlačítka, nahoře nový dokument a otevřít dokument, níže otevřít Lua skript a zobrazit konzoli Lua skriptu. Zvolíme nový dokument, dostaneme na výběr typ úlohy, ponecháme na „*Magnetics Problem*“ a klikneme na OK, elektrostatický ani tepelný model, který je také v nabídce, nepracuje s elektromagnetizmem a tudíž ho volit nebudeme.

Nyní máme před sebou nachystanou prázdnou pracovní plochu, na hlavním panelu přibýly tlačítka pro práci na projektu.







Obr.3.2

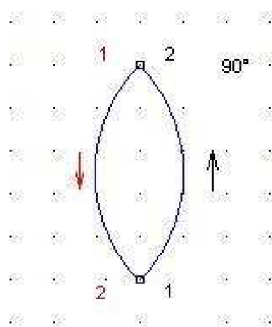
3.1 Tvorba geometrie (pre-processor)



V programu se vytváří model pomocí bodů, které se následně propojí úsečkami, nebo oblouky (kruhovou výsečí) (Obr.3.3). Rozměry jsou dány souřadnicemi bodů, souřadnice kurzoru se neustále zobrazují ve spodním levém rohu. Vytvoříme-li třeba dva body kliknutím na souřadnicích (0;10) a (0;20), můžeme mezi nimi vytvořit úsečku dlouhou 10 jednotek, které si nastavíme (mm, cm, m, atd.) později.

Vysvětlivky: (lmb - levé tlačítko myši, rmb - pravé tlačítko myši)



- Tlačítko 1:  lmb - vytvoří bod, rmb - označí (zčervená), podruhé označí bod.
- Tlačítko 2:  lmb - kliknutím na dva existující body tyto 2 propojí úsečkou, rmb - označí úsečku(y).
- Tlačítko 3:  lmb - tvorba částí kružnic, od bodu 1 do bodu 2 udělá část kružnice 1° - 180°, okno pro výběr úhlu se objeví po kliknutí na 2 body, pořadí výběru bodů je důležité neboť program nakreslí pravou výseč při pohledu od bližšího bodu 1 k od nás vzdálenějšímu bodu 2, rmb - označení kružnice.
- Tlačítko 4:  V každé uzavřené oblasti musí být jeden tento zelený bod, protože se později jeho nastavením přiřadí celé této uzavřené oblasti materiálové vlastnosti, proudy atd.



Obr.3.3





Obr.3.4

- Tlačítko 5:  práce se skupinami objektů, jako např. posouvání kopírování atd.
- Tlačítko 6:  otevře okno s vlastnostmi právě zvolené entity (kl. zkratka mezerník).


Chceme-li vybrat body, musí být aktivní právě tvorba bodů (tlačítko 1), totéž platí pro úsečky, nebo kružnice, klikání na entity, které nejsou aktivního typu, program ignoruje. Ze začátku to může činit potíže.



3.2 Změna pohledu



K dispozici jsou základní možnosti jako zoom   (klávesová zkratka Page Up, Page Down).


Vycentrování modelu na celé okno  (klávesa Home).

Výběr pohledu táhnutím myši do rámečku .

Posouvání pohledu, (klávesy šipky) .

3.3 Mřížka – přichytávání bodů

Mřížka  je užitečná při kreslení modelů, pokud je aktivní, uvidíme mřížku tvořenou modrými body, rozestupy mezi body se dají nastavit tlačítkem grid size .

Pokud zmáčkne tlačítko se šipkou , bude možné tvořit nové body pouze na mřížce a dosáhneme bezchybné geometrie a přesných rozestupů bodů, jaké si mřížkou nastavíme. Stávající body mimo mřížku nebudou ovlivněny.

Tlačítko „Grid size“ slouží k nastavení rozestupů bodů. Po stisknutí se zobrazí okno a v kolonce „Grid Size“ nastavíme rozestupy. Pod ním máme na výběr kartézské, nebo polární souřadnice - kolonka „Coordinates“.

Pokud necháme kartézské, body jsou specifikovány svými (x,y) souřadnicemi. U polárních souřadnic je bod definován úhlem a vzdáleností od počátku (r,z), pro osově symetrické úlohy. Souřadnice kurzoru se vždy zobrazují v levém spodním rohu okna.

4. DEFINOVÁNÍ VLASTNOSTÍ

4.1 Globální parametry

Na horní liště klikneme na tlačítko „Problem“ a zobrazí se nám okno s nastavením (Obr.4.1). Volba „Problem Type“ určuje, jak vypadá náš 2D model ve 3D prostoru a tomu se musíme přizpůsobit při tvorbě. Pokud ponecháme „Planar“, model získá pomyslný objem protažením do hloubky o hodnotu v kolonce „Depth“, např. nakreslený kruh se stane válcem.

Při volbě „axysymeric“ nakreslený model rotuje kolem vertikální osy r a tím získá objem (o zrcadlí sepomysleně ve 2D), nakreslený kruh dostane tvar toroidu, se středem v $r = 0$, vidíme jeho polovinu, kterou jsme vytvořili na straně od $r = 0$ a výsledek se počítá, jako by byl celý. Proto v tomto případě stačí nakreslit jen polovinu modelu.

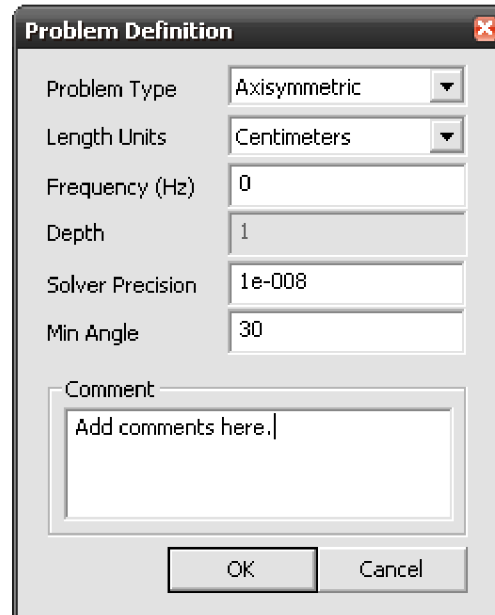
Druhá možnost „Lenght Units“ udává délkové jednotky, ve kterých model kreslíme (metry, centimetry, milimetry atd.). V nastavených jednotkách je definovaná i hloubka modelu „Depth“ a rozestupy bodů v nastavení „grid size“.

Třetí kolonka „Frequency (Hz)“ umožňuje nastavit frekvenci, je-li nenulová, program provede harmonickou analýzu na dané frekvenci.



Volba „*Solver Precision*“ udává počet desetinných míst řešení.

Poslední parametr „*Min Angle*“ je minimální povolený úhel ve stupních pro trojúhelníky, při generování sítě trojúhelníků pro výpočet metodou konečných prvků.



Obr.4.1

4.2 Nastavení vlastností ploch (zelených bodů)

4.2.1 Materiály

FEMM obsahuje mnoho materiálů ve své knihovně, lze je upravovat i přidávat nové. Materiál z knihovny lze použít po přetažení materiálů do projektu. To se provede volbou *Properties* → *Material Library*. Otevřela se knihovna materiálů, nyní stačí najít požadovaný materiál a myší ho přetáhnout do kolonky napravo.

Není-li potřebný materiál k dispozici, lze si definovat vlastní. V okně knihovny klikněte pravým tlačítkem a z menu vyberte „*Add New Material*“. Přibude nová ikona materiálu v knihovně. Poklikáním se otevře okno s nastavením vlastností. Obr.4.2.

Nejprve si materiál pojmenujeme v kolonce „*Name*“. Ponecháme-li aktivní volbu „*Linear B-H Relationship*“, umožní nám program nastavit relativní permeabilitu v ose x „*Relative μ_x* “, můžeme nastavit odlišné hodnoty ve vertikálním a horizontálním směru, (x- horizontální, y- vertikální). Pod nimi lze nastavit zpožďovací úhel hystereze „ *ϕ_{hx} , deg*“, model pro hysterezní harmonické případy předpokládá, že hystereze vytváří konstantní fázové zpoždění mezi B a H nezávisle na frekvenci.

Zvolíme-li „*Nonlinear B-H curve*“, namísto lineárních parametrů, budeme moci nastavit kolonku „*Nonlinear Material Properties*“ a tlačítkem „*Edit B-H curve*“ zadat vlastní hysterezní křivku. Nelineární materiál musí tvořit minimálně 3 hodnoty, ale vhodnější je zadat nejméně 10-15 hodnot. Po zadání hodnot je vhodné se podívat na výsledný průběh tlačítkem „*Plot B-H curve*“. FEMM interpoluje hodnoty mezi body kubickým splinem. Hodnoty jdoucí až za zadané

hodnoty, se extrapolují lineárně. Proto je vhodné při vysokých saturacích materiálu mít zadané dostatečně velké hodnoty, aby nedocházelo ke zbytečnému zkreslení.

Obr.4.2

Kolonka „ ϕ_{hmax} “ udává pro nelineární hodnoty hysterezní zpoždění, je proporcionální efektivní permeabilitě. Na nejvyšší efektivní permeabilitě se předpokládá, že úhel hysterze dosáhne maximální hodnoty ϕ_{hmax} .

Další vstupní hodnota je „ H_c “. Je-li materiál permanentní magnet, zadá se jeho koercivita v A/m. Následuje kolonka „ $J, MA/m^2$ “. Hodnota udává DC proudovou hustotu v bloku. Při nenulové frekvenci se v oblasti s nenulovou konduktivitou materiálu indukují vířivé proudy, které změň celkovou proudovou hustotu v bloku.

Kolonka „ $\sigma MS/m$ “ slouží k zadání konduktivity materiálu. Tato hodnota se používá jen při harmonických úlohách s vířivými proudy.

V posledním rámečku se nachází nastavení „*laminated*“ které o materiálu říká, že je složen z plechů. To nám ušetří složitou práci z tvořením a definováním jednotlivých plechů.

- *Laminated in plane* – plochou k pozorovateli.
- *Laminated parallel to Y* – plochou vlevo (vpravo).
- *Laminated parallel to X* – plochou nahoru (dolů).

V kolonce „*Lam thickness, mm*“ se zadá tloušťka „železa“ bez izolace. To se respektuje druhou kolonkou „*Lam fill factor*“, neboli faktor zaplnění. Je-li tloušťka železa 8 mm a izolace mezi plechy je silná 2 mm je faktor zaplnění $8/(8+2) = 0,8$.



Pokud zvolíme jednu z možností „*wire*“ - vodič, kolonka „*Strand dia*“ se aktivuje a zadá se do ní průměr drátu. Pro „*Magnet wire*“ drát vinutí a „*Square wire*“ čtvercový drát, je to jediné další nastavení.

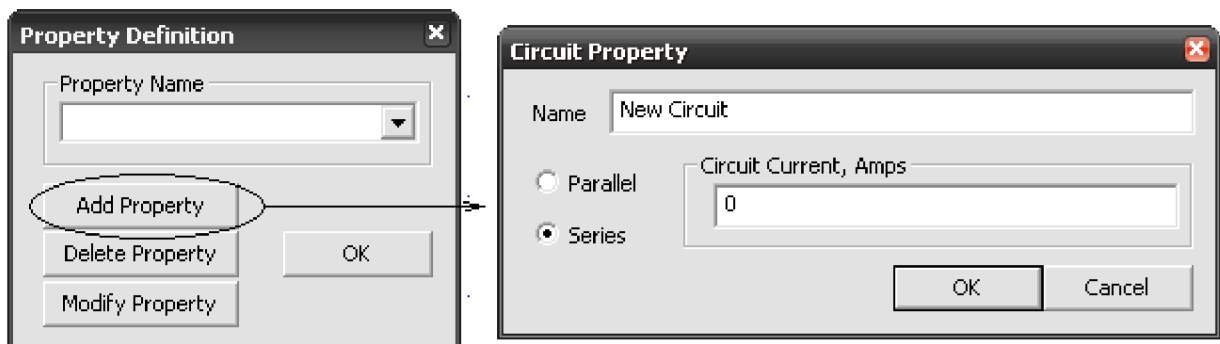
Pouze pro „*Litz wire*“ - vf lanko a „*Plain stranded wire*“ - plochý drát, se aktivuje i druhá možnost „*Number of strands*“ - počet žil z kterých je např. vf lanko tvořeno pro snížení skinefektu.

4.2.2 Cívky

Pokud má cívka velké množství závitů, je nepraktické kreslit každý závit zvlášť, ale místo toho jako jeden blok, výsledný vliv na okolí bude stejný.

Pro nastavení cívky potřebujeme znát proud cívkou, (může to být komplexní hodnota).

V horní nabídce zvolíme *Properties* → *Circuits*. Ukáže se okno, ve kterém bude seznam všech vytvořených cívek, pokud nějaké jsou. Cívky lze vytvářet „*Add Property*“, mazat „*Delete Property*“ a upravovat „*Modify Property*“ (Obr.4.3). Přidáme tedy novou cívku, v novém okně nastavíme proud, můžeme si ji přejmenovat. Bude-li mít cívka víc závitů, ponecháme aktivní volbu „*Series*“ a zadaný proud poteče každým závitem. Po přepnutí na „*Parallel*“ teče daný proud celou plochou jako jedním závitem, závity nelze v tomto případě nastavit.




Obr.4.3

Řešíme-li „*Planar Problem*“, tak má cívka pravděpodobně 2 bloky (poloviny), vybereme zelený bod uvnitř prvního bloku a mezerníkem otevřeme jeho nastavení, v kolonce „*In Circuit*“ vybereme z nabídky požadovanou cívku, v další kolonce „*Number of turns*“ zvolíme počet závitů.

U druhého bloku provedeme stejné nastavení, kromě závitů, které budou mít **opačné** znaménko. Důvod je ten, že polovina závitů směřuje od nás a druhá polovina se zase vrací zpět.

4.2.3 Přiřazení vlastností oblastem

Když jsou vlastnosti definované, přiřadíme je jednotlivým oblastem v modelu.

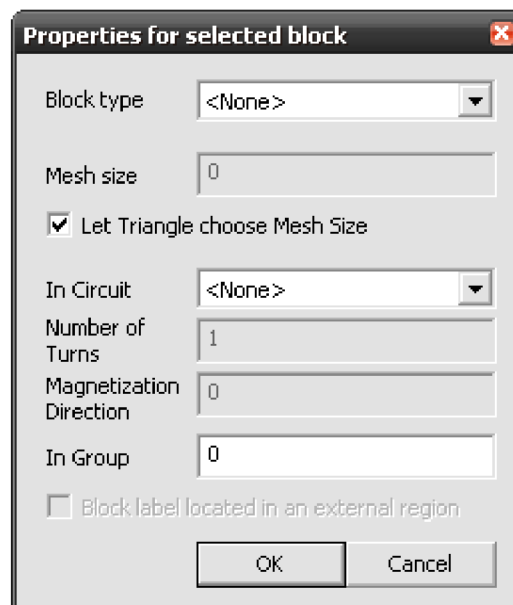
Přepneme režim zadávání bodů tlačítkem , kliknutím pravým tlačítkem se bod označí (zčervená).

Stisknutím mezerníku se vyvolá dialog nastavení (Obr.4.4). V kolonce „*Block type*“ se vybere materiál, v seznamu budou jen ty přetažené z knihovny. Je-li materiál magnet, zpřístupní

se volba „*Magnetization Direction*“, kde se zadá orientace magnetu v rozsahu 0-360 °.

Pro manuální zadání hustoty bodů pro generátor konečných prvků, je potřeba zrušit zatržení u „*Let Triangle choose Mesh Size*“. To nám umožní zadat hodnotu „*Mesh size*“, zadaná velikost je v jednotkách které se definovaly v kapitole 4.1. Tato hodnota je průměr kružnice, která se zobrazuje kolem bodu a vejde se do ní právě 1 trojúhelník při generování sítě konečných prvků.

V kolonce „*In Circuit*“ oblast přiřadí cívce, což nám následně umožní v kolonce „*Number of Turns*“ zadat počet závitů cívky.



Obr.4.4

4.3 Okrajové podmínky

Vytvořený model musíme uzavřít do konečného prostoru libovolného tvaru, který musí mít nějaké parametry – okrajové podmínky, aby byla úloha řešitelná.

V programu FEMM se nachází 5 typů okrajových podmínek.

Dirichlet. Hodnota potenciálu A nebo V je přímo definována na hranici, např. $A=0$ pro zabránění průtoku magnetického toku skrz hranici.

Neumann. Je derivace potenciálu podél definované hranice a magnetický tok vstupuje do hranice pod úhlem 90° (vysoká permeabilita).

Robin. Je kompromis mezi předchozími mezními stavy a vyjadřuje hraniční podmínku která vyjadřuje nedokonalou permeabilitu hranic.

Periodic. Spojuje dvě hraniční podmínky dohromady, hodnoty na souhlasných bodech jsou nastaveny na stejnou hodnotu.

Antiperiodic. Také spojuje dvě hranice, hraniční hodnoty mají stejnou amplitudu, ale opačné znaménko.

Pokud žádné hraniční podmínky nenastavíme, použije se **Neumann**. Nederivovaná



hraniční podmínka ale musí někde být definována, aby měl problém jednoznačné řešení. Pro

osově symetrické úlohy, $A=0$ je vynucen na $r = 0$. V tomto případě má problém řešení i bez definování hraničních podmínek, pokud máme hranici na $r = 0$.

4.3.1 Nastavení okrajových podmínek

Okrajové podmínky se nastavují v menu *Properties* → *Boundary*, v dialogovém okně si zvolíme „Add property“ pro přidání nové podmínky a nebo „Modify Property“ pro úpravu existující podmínky. V obou případech se ukáže stejné okno s nastavením parametrů. (obr.4.5)

V kolonce „Name“ si novou podmínku pojmenujeme pro lepší orientaci v podmínkách.

V menu „BC Type“ si zvolíme jednu z následujících podmínek:

„Prescribed A“ Vektorový potenciál A je nastaven na hodnotu vepsanou do kolonek A_0 , A_1 , A_2 , Φ a je dán vztahem u planárních úloh

$$A = (A_0 + A_1x + A_2y)e^{j\Phi}$$

a u osově symetrických úloh

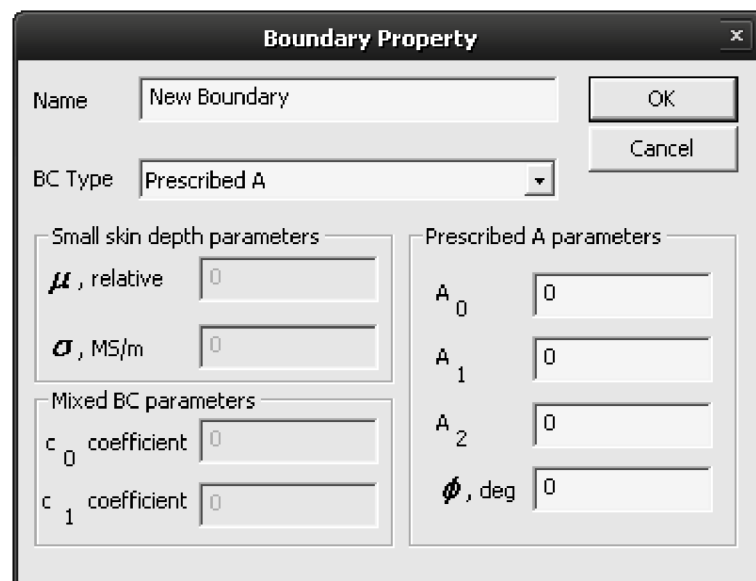
$$A = (A_0 + A_1r + A_2z)e^{j\Phi}$$

V těchto případech se hranice stane zdrojem magnetického pole.

„Small Skin Depth“ Tato hraniční podmínka značí materiál vystavený vířivým proudům na vysoké frekvenci, takže hloubka vniku je velmi malá.

„Mixed“ Nastavuje se v části okna „Mixed BC parameters“. A používá se hlavně na:

- Neohraničené oblasti, lze toho přibližně dosáhnout aplikací na vnější hranici řešení odpovídající vhodně nastaveným c_0 a $c_1=0$.
- Nebo lze nastavit intenzita H , tekoucí paralelně k hranici, dosáhne se toho nastavením $c_0=0$ a c_1 na požadovanou hodnotu H v jednotkách [A/m].



Obr.4.5

- „Strategic Dual Image“ Autorova experimentální hranice. Výpočet se provádí dvakrát

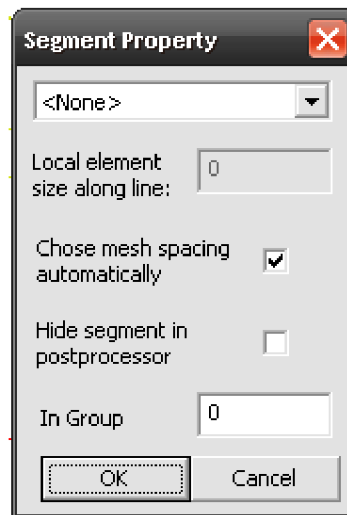
(Dirichlet, Neumann) a výsledek je průměrná hodnota a slouží na výpočet otevřené vzduchové hranice.

- „*Periodic*“ Aplikuje se na 2 periodicky se opakující úsečky, nebo oblouky a nutí magnetické pole být identické podél obou hranic. Je to užitečné při symetrických úlohách, aby se snížila velikost zařízení která se musí modelovat.

- „*Antiperiodic*“ Funguje stejně jako *Periodic*, avšak jedna hranice je negativem druhé, pak lze nakreslit dvoupólové zařízení jen s jedním pólem.

4.3.2 Přiřazení okrajových podmínek

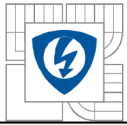
V režimu tvorby úseček klikneme pravým tlačítkem poblíž úsečky a ta se zbarví červeně. Je-li to požadovaná úsečka, stiskneme mezerník a objeví se okno nastavení Obr.4.6.



Obr.4.6

V horním rozbalovacím menu si zvolíme vytvořenou okrajovou podmínku.

- „*Local element size along line*“ rozdělí úsečku na segmenty o zvolené délce a na každý element se pak navážou trojúhelníky sítě konečných prvků, pokud byly méně husté na dané ploše. Volba se zpřístupní zrušením zatržítka *Chose mesh spacing automaticly*.
- „*Hide segment in postprocessor*“ úsečka nebude viditelná při zobrazení výsledného magnetického pole.
- „*In group*“ přiřazení segmentu do větší skupiny prvků. U oblouku se nastaví parametry obdobně.
- „*Max. Segment, Degrees*“ oblouk je rozdělen na drobné úsečky po stupních, také lze použít pro zhuštění sítě konečných prvků na dané ploše.
- „*Boundary cond.*“ přiřazení okrajové podmínky.
- „*Hide arc in postprocessor*“ oblouk nebude viditelný při zobrazení výsledného magnetického pole.



- „*In group*“ přiřazení segmentu do větší skupiny prvků.

4.4 Nastavení podmínek bodů

Nastavení vlastností bodů nalezneme v menu *Properties* → *Point* v dialogovém okně si zvolíme „*Add property*“ pro přidání nové vlastnosti nebo „*Delete Property*“ pro smazání existující vlastnosti, nebo „*Modify Property*“ pro úpravu existující vlastnosti.

Pokud vytváříme novou nebo upravujeme existující vlastnost, můžeme upravovat parametry:


- „*Name*“ název nové vlastnosti
- „*Specified Potential Property*“ umožní zadat potenciál magnetického pole [Wb/m]
- „*Point Current Property*“ umožní zadat proud [A]


Chceme-li podmínku přiřadit bodu, označíme si ho, stiskneme mezerník a v kolonce „*Nodal Property*“ si ji najdeme.


5. VÝPOČET



5.1 Příprava

Žlutým tlačítkem  vygenerujeme síť trojúhelníků v modelu pro kontrolu, jestli je síť dostatečně hustá, hlavně u přechodů mezi prostředími, kde bývají změny největší. Pokud nám hustota nevyhovuje, můžeme ji změnit, viz. Kap. 4.2.3. Síť se také automaticky generuje při výpočtu a tudíž ji není nutné generovat pokud neprovádíme vizuální kontrolu nastavení hustoty.

Prostřední tlačítko  provede samotný výpočet, zobrazí se okno s postupem výpočtu, které zmizí po dokončení, jestliže se ale průběh zastaví, je možné že se vyskytla chyba při generování sítě na ostrých hrotech, uvnitř kterých se síť generuje, nebo kružnic příliš blízko u sebe. V tom případě je potřeba změnit v nabídce *Problem* → *Min Angle nastavit* úhel na nižší hodnotu, aby se mohla síť vygenerovat v těchto prostorech. Přesnost je nižší kvůli větší deformaci trojúhelníkové sítě.

Pak je třeba kliknout na tlačítko z brýlemi  a výsledek se zobrazí.

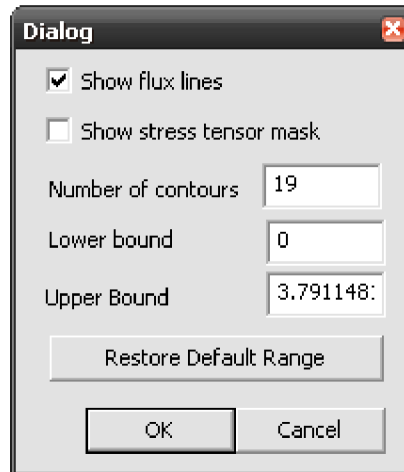
5.2. Výstupní data (postprocessor) – zobrazení




Výsledek lze zobrazit mnoha způsoby. Po stisknutí brýlí nebo otevření souboru s příponou *.ans, kam se výsledek ukládá, se zobrazí vypočítaný model. Černě pruhované tlačítko nastavuje zobrazení siločár magnetického pole (Obr.5.1), můžeme je zakázat zrušením zaškrtnutí u „*Show*

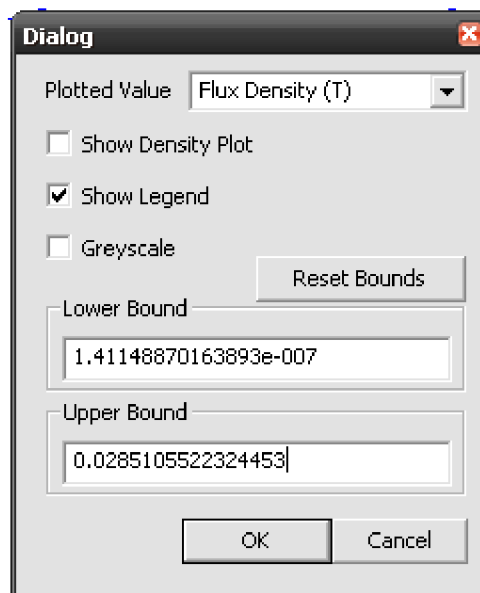


flux lines“. Možnost „*Show stress tensor mask*“ zobrazí linky, patřící poslednímu výpočtu integrálu „*weighted stress tensor*“, standardně jako oranžové „*indukční čáry*“. Počet siločár se nastaví v kolonce „*Number of contours*“ a rozsah intenzity magnetického pole v jakém se mají siločáry zobrazit. „*Lower bound*“,spodní hranice, „*Upper bound*“, horní hranice. Standardně zobrazují celý vypočtený rozsah, který se lineárně rozloží v barevném spektru které program používá.




Obr.5.1

Tlačítko  umožňuje zobrazit názorně hustotu B, intenzitu H a proud I, Obr.5.2, vybere se z nabídky „*Plotted value*“. Barevné zobrazení se aktivuje zatržítkem „*Show Density Plot*“. Zobrazení legendy je již zatrhnuté a pokud preferujeme odstíny šedi, zaškrtneme navíc „*Greyscale*“. V případě, že nás zajímá konkrétní oblast hodnot, můžeme si v posledních dvou kolonkách zvolit spodní a horní hranici a celý barevný přechod se zobrazí jen v daném pásmu.



Obr.5.2



Tlačítko s šipkou  slouží k zobrazení vektorů. První kolonka „*Vector Plot Type*“ nám nabídne veličinu (B,H) a druhá, „*Scaling Factor*“, pokud jsou šipky příliš malé, nebo velké, umožňuje poměrné zvětšení-zmenšení, pro zlepšení přehlednosti.

5.2.1 Volba režimu



Výstupní část také pracuje v jednom ze tří režimů, v závislosti na tom, co požadujeme. Při zmáčknutém tlačítku s bodem, lze klikat na různá místa modelu a parametry v místě kliknutí se zobrazí v malém okně.

Druhé tlačítko (lmb) propojí body modelu úsečkou, (rmb) propojí místa kliknutí úsečkou a v místě trasy úsečky lze zobrazovat grafy průběhu veličin a lze spočítat různé integrály. Stisknutím **shift** poté, co byla zvolena úsečka, se objeví okno, ve kterém lze u volby „*Arc Angle*“ napsat úhel a úsečka se změní na kruhovou výseč jako u kreslení modelu.

Zelené tlačítko umožňuje kliknutím vybírat plochy a z nich počítat různé plošné integrály, včetně uložené energie, indukčnosti, ztráty, celkový proud v oblasti a tak dále.

5.2.2 Grafy

Po nakreslení úsečky, tlačítko grafu obrazí graf veličiny na zvolené úsečce, nejdříve se



zobrazí okno, ve kterém se zvolí typ grafu a počet bodů v grafu.

Lze zvolit:

- - - Vektorový potenciál podél zvolené úsečky.
- $|B|$ - Absolutní hodnota mag. indukce podél zvolené úsečky.
- $B \cdot n$ - Normálová složka indukce ke zvolené úsečce.
- $B \cdot t$ - Složka indukce ve směru úsečky.
- $|H|$ - Absolutní hodnota Intenzity mag. pole podél úsečky.
- $H \cdot n$ - Normálová část intenzity k úsečce.
- $H \cdot t$ - Část intenzity ve směru úsečky.

Pokud zaškrtneme „*Write data to text file*“, místo grafu se potom zobrazí okno s nabídkou uložení hodnot do txt souboru. Ve spodní nabídce „*File Formatting*“ lze zvolit odlišný způsob zapsání hodnot do souboru.



5.2.3 Hodnoty Integrálů



Podél zvolené úsečky lze spočítat integrály, kliknutím na ikonu integrálu se objeví okno s výběrem integrálů.

Lze zvolit:

- **B . n** – Tento integrál vypočte celkový magnetický tok procházející normálou úsečky. Je užitečný pro určení celkového toku v objemu cesty toku.
- **H . t** – Integrál vypočte pokles magnetomotorického napětí mezi konci úsečky.
- **Contour Length** – Vypočítá délku úsečky v metrech.
- **Force from stress tensor** – Vypočítá sílu působící na těleso magnetickým polem.
- **Torque from stress tensor** - Vypočítá kroutící moment kolem bodu (0,0). Musí následovat několik pomocných čar abychom dostali přesné výsledky.
- **B.n²** – Vypočítá čtverec normálového magnetického toku podél úsečky. Tento integrál se běžně nepoužívá, ale v minulosti byl užitečný k některým specializovaným účelům.

Zelené tlačítko umožňuje kliknutím do modelu vybírat uzavřené plochy, které se obarví



nazeleno a kliknutím na integrál zvolit integrál.

Lze zvolit:

- **A . J** - Vypočte. $\int A \cdot J dV$ jenž se u stejnosměrných úloh používá pro zjištění indukčnosti cívky $L = (\int A \cdot J dV) / i^2$ kde „i“ je proud cívkou.
- **A** - Vypočte $\int A dV$, dá se použít pro výpočet vzájemné indukčnosti.
- **Magnetic field energy** – Vypočítá energii uloženou v magnetickém poli v určené oblasti.
- **Hysteresis , laminated eddy, or Proximity effect** – Typicky se používá na výpočty ztrát v železe při harmonických průbězích.
- **Resistive loses** – Vypočte $i^2 R$ ztráty proudem tekoucím ve směru „z“, nebo θ při osově symetrické úloze.
- **Block cross-section area** – Velikost zvolené plochy.
- **Total loses** – Vypočítá ztráty ze všech možných ztrátových mechanismů, které se dají aplikovat přes zadanou oblast. To je zvláště užitečné pro hledání ztrát v oblastech které obklopuje několik různých druhů materiálů s různými ztrátovými mechanismy.
- **Total current** – Celkový proud v oblasti.
- **Integral of B over block** – Tento integrál může být užitečný při počítání Lorentzovy síly, protože Lorentzova síla je $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$, vyprodukovaná síla, pokud bude cívka umístěna v určité oblasti řešené plochy, může interferovat integrováním B.
- **Block volume** - Objem.
- **Lorentz force (J x B)** – Lorentzova síla, je způsobována magnetickým polem, na které





působí proud.

- **Lorentz torque ($\mathbf{r} \times \mathbf{J} \times \mathbf{B}$)** – Kroučící moment kolem bodu (0,0) způsobený Lorenzovou silou.
- **Magnetic field coenergy** – Pro lineární úlohy stejné jako energie magnetického pole. U nelineárních úloh se dá použít jako alternativní metoda pro výpočty síly a kroučícího momentu. Je to energie daná plochou pod B-H hřívkou (v 1. kvadrantu).
- **Force via Weighted Stress Tensor** – Objemový integrál pro výpočet síly \mathbf{N} , je jednodušší a přesnější na výpočet než tenzor napětí, výsledky bývají přesnější s jemnějším mřížkováním kolem počítaného prostoru, musí být ale obklopen vzduchem nebo být na hranici.
- **Torque via Weighted Stress Tensor** – Tento integrál vypočítá kroučící moment kolem bodu (0,0), používá stejný funkční přístup jako předchozí položka..
- **R^2 (i.e. Moment of Inertia/density)**- Používá se k určení momentu setrvačnosti vybraných bloků.

6. LUA SKRIPT

6.1 Popis

Jazyk Lua se používal pro dávkové zpracování ve FEMMu. Tím nám může ušetřit mnoho času při počítání většího množství hodnot, jako třeba různé natočení rotoru motoru, pomocí jednoduchého skriptu. Otevře se tlačítkem . A nebo se může zadávat přímo do Lua konzole . Všechny hodnoty, které jsme si popsali doposud se dají zadat bez klikání, právě pomocí Lua skriptu. Lua je open source skriptovací jazyk. Skripty jsou textové soubory a lze je editovat v jakémkoliv textovém editoru. FEMM obsahuje Lua 4.0. Jako přídavek ke standartním příkazům byly přidány příkazy pro manipulaci se soubory v pre a post-procesoru. Tyto příkazy jsou popsány dále. Detailní dokumentace k programování v Lua je na domovských stránkách Lua <http://www.lua.org>.

6.2 Obecné příkazy

- *clearconsole()* Vyprázdní Lua konzoli.
- *newdocument(doctype)* Vytvoří nový dokument a otevře okno pro tvorbu modelu. Doctype se nahradí pro magnetickou úlohu 0, elektrostatickou 1, tepelný tok 2, proudový tok 3.
- *hideconsole()* Skryje okno Lua konzole.
- *hidepointprops()* Skryje okno s vlastnostmi.
- *messagebox(„zpráva“)* Zobrazí informační okno se zprávou.
- *open(„název souboru“)* Otevře daný soubor.
- *pause()* Zobrazí informační okno a čeká dokud se nestiskne OK, dobré při hledání



problémů.

- *print()* Standardní příkaz k tisku, libovolný počet věcí oddělených čárkou lze vytisknout současně.
- *prompt(„zpráva“)* Slouží pro zadání vstupní hodnoty, zobrazí okno s popiskem „zpráva“ a polem pro zadání hodnot.
- *quit()* Zavře všechny dokumenty a program po dokončení skriptu.
- *setcompatibilitymode(hodnota)* Pokud se hodnota nastaví na 1, různé příkazy s komplexními argumenty se změní na své definované hodnoty s verze FEMM 4.1. Pokud je hodnota 0, je použita definice verze FEMM 4.2. Standardní hodnota kompatibility je 0. Ovlivněné funkce jsou:
 - *mi addmaterial*
 - *mi modifymaterial*
 - *mi addpointprop*
 - *mi modifypointprop*
 - *mi addcircprop*
 - *mi modifycircprop*
 - *mo getpointvalues*
 - *mo lineintegral*
 - *mo blockintegral*
 - *mo getcircuitproperties*
 - *showconsole()* Zobrazí okno Lua skriptu.
 - *showpointprops()* Zobrazí okno vlastnosti ve FEMM.

6.3 Příkazy preprocesoru

6.3.1 Objekty přidat/odebrat

- *mi_addnode(x,y)* Přidá bod na souřadnice x,y.
- *mi_addsegment(x1,y1,x2,y2)* Přidá úsečku od bodu který je nejbliž od hodnoty (x1,y1) do hodnoty (x2,y2)
- *mi_addblocklabel(x,y)* Přidá zelený materiálový bod na souřadnice x,y.
- *mi_addarc(x1,y1,x2,y2,uhel,seg)* Vytvoří oblouk od nejbližšího bodu (x1,y1) do nejbližšího bodu (x2,y2) s úhlem „uhel“oblouku a rozdělen na počet „seg“mentů.
- *mi_deleteselected* Smaže zvolené objekty.



- *mi_deleteselectednodes* Smaže označené body.
- *mi_deleteselectedlabels* Smaže označené zelené materiálové body.
- *mi_deleteselectedsegments* Smaže označenou úsečku.
- *mi_deleteselectedarcsegments* Smaže označené oblouky.

6.3.2 Označení geometrie

- *mi_clearselected()* Smaže všechny zvolené body, úsečky, oblouky a zelené body.
- *mi_selectsegment(x,y)* Zvolit úsečku nejbliž hodnotě (x,y).
- *mi_selectnode(x,y)* Zvolit bod nejbliž souřadnicím (x,y).
- *mi_selectlabel(x,y)* Zvolit zelený bod nejbliž (x,y).
- *mi_selectarcsegment(x,y)* Zvolit oblouk nejbliž souřadnicím (x,y).
- *mi_selectgroup(n)* Zvolí n-tou skupinu bodů, úseček, oblouků a zelených bodů. Zruší předchozí zvolené objekty a nechá editační mód na 4 (skupiny).

6.3.3 Vlastnosti objektů

- *mi_setnodeprop(„jméno“, číslo zk.)* Nastaví zvoleným bodům „jméno“ a číslo skupiny.
- *mi_setblockprop(„jméno“, automesh, meshsize, „incircuit“, magdirection, group, turns)*
Nastaví zvoleným bodům následující vlastnosti:
 - *jméno* Název bodu
 - *automesh* Volba 0=síť bude mít hustotu nastavenou v *meshsize*, 1=automatická volba hustoty sítě.
 - *meshsize* Hodnota hustoty sítě.
 - „*incircuit*“ Blok má přiřazenu vlastnost cívky pojmenované „*incircuit*“.
 - *magdirection* Úhel magnetizace ve stupních..
 - *group* Přiřazení do skupiny.
 - *turns* Počet závitů.
- *mi_setsegmentprop(„jméno“, element size, automesh, hide, group)* Nastaví úsečku:
 - „*jméno*“ Název úsečky.
 - *element size* Hustota sítě.
 - *automesh* 0=hodnota nastavená v *element size*, 1=automatická hodnota.
 - *Hide* 0=není skryto při výpočtu, 1=skryto při výpočtu.
 - *group* Zařazení do skupiny.
- *mi_setarcsegmentprop(maxsetdeg, „propname“, hide, group)* Nastavení parametrů



oblouku:

- *maxsetdeg* Síť MKP se na oblouk připojí v rozestupech udaných ve stupních.
- *propname* Název oblouku.
- *hide* 2 módy 0=zobrazený, 1=ukrytý v postprocesoru (neviditelný).
- *group* Přiřazení ke skupině objektů.

6.3.4 Výpočtové příkazy

- *mi_probdef(frequency,units,type,precision,(depth),(minangle))* Mění globální parametry (obr.4.1).
 - *frequency* Hodnota frekvence v Hz.
 - *Units* Délkové jednotky ve kterých se měří, lze použít „inches“ - palce, “millimeters“ - milimetry, “centimeters“- centimetry, “mils“ - míle, “meters“ - metry, “micrometers“ - mikrometry.
 - *type* „planar“ Planární (hloubkový), „axi“ osově symetrický (rotační).
 - *precision* Přesnost řešení, např 1E-8 udává přesnost na 8 desetinných míst.
 - *depth* Udává hloubku u planární úlohy.
 - *minangle* Omezení minimálního úhlu pro generátor sítě.
- *mi_analyze(flag)* Spustí výpočet, (*flag*) slouží pro minimalizaci výpočtového okna *flag*=1, nebo viditelné okno *flag*=0.
- *mi_loadsolution()* Načte a zobrazí řešení k spuštěné úloze.
- *mi_setfocus(„documentname“)* Přepíná mezi jednotlivými otevřenými soubory, tímto způsobem se dá pracovat s více soubory současně.
- *mi_saveas(„filename“)* Uloží soubor pod názvem „filename“, pokud zadáváte cestu k souboru je potřeba použít 2 lomítka např. "c:\\dokumenty\\motor.fem".

6.3.5 Výpočet sítě

- *mi_createmesh()* Vytvoří síť, stejně jako používání přes tlačítka není nutné používat, při výpočtu *mi_analyze* se síť aktualizuje automaticky před výpočtem.
- *mi_showmesh()* Zobrazí síť.
- *mi_purgemesh()* Smaže síť z obrazovky a paměti.

6.3.6 Editace geometrie

- *mi_copyrotate(bx,by,angle,copies,(editaction))* Kopírování rotací zvolených objektů.
 - *bx,by* Osa rotace.
 - *angle* Úhel rotace ve stupních mezi jednotlivými kopiemi.



- *copies* Počet kopií.
- *editaction* 0-body, 1-úsečky, 2-zelené body, 3-oblouky, 4-skupiny.
- *mi_copytranslate(dx,dy,copies,(editaction))* Kopírování posunem.
 - *dx,dy* Vzdálenost jedné kopie (posun).
 - *copies* Počet kopií, vzdálenosti se přičítají ke každé kopii.
 - *editaction* 0-body, 1-úsečky, 2-zelené body, 3-oblouky, 4-skupiny.
- *mi_createradius(x,y,r)* Zaoblí roh na souřadnicích x,y na část kružnice o poloměru r .
- *mi_moverotate(bx,by,shiftangle (editaction))* Rotace.
 - *bx,by* Střed rotace.
 - *shiftangle* Úhel rotace ve stupních.
 - *editaction* 0-body, 1-úsečky, 2-zelené body, 3-oblouky, 4-skupiny.
- *mi_movetranslate(dx,dy,(editaction))* Posun.
 - *dx,dy* Vzdálenost posunu zvolených objektů.
 - *editaction* 0-body, 1-úsečky, 2-zelené body, 3-oblouky, 4-skupiny.
- *mi_scale(bx,by,scalefactor,(editaction))* Zvětšení, zmenšení.
 - *bx,by* Základna zvětšení.
 - *scalefactor* Násobič zvětšení (zmenšení <1) zvolených objektů.
 - *editaction* 0-body, 1-úsečky, 2-zelené body, 3-oblouky, 4-skupiny.
- *mi_mirror(x1,y1,x2,y2,(editaction))* Zrcadlení.
 - *x1,y1, x2,y2* Body určující přímkou kolem které se zvolený objekt ozrcadlí.
 - *editaction* 0-body, 1-úsečky, 2-zelené body, 3-oblouky, 4-skupiny.
- *mi_seteditmode(editmode)* Nastaví editační mód (*editmode*) na:
 - *nodes* Body.
 - *segments* Úsečky.
 - *arcsegments* Oblouky.
 - *blocks* Zelené body.
 - *group* Zvolenou skupinu.
- Příkaz ovlivní všechna použití dalších editačních příkazů, pokud jsou použity bez *editaction* parametru.

6.3.7 Zoomování

- *mi_zoomnatural()* Nakreslené bude přiblíženo přes celé okno.



- *mi_zoomout()* Oddálí pohled na 50%.
- *mi_zoomin()* Přiblíží ohled na 200%.
- *mi_zoom(x1,y1,x2,y2)* Nastaví pohled na oblast danou obdélníkem kde $x1,y1$ je levý spodní roh a $x2,y2$ je pravý horní roh.

6.3.8 Zobrazení

- *mi_showgrid()* Zobrazí mřížku bodů na pracovní ploše.
- *mi_hidegrid()* Zkryje mřížku bodů na pracovní ploše.
- *mi_grid_snap(„x“)* X nahradit *on* – zapne přichytávání k mřížce, *off* – vypne přichytávání k mřížce.
- *mi_setgrid(density, „type“)* Změna mezer mezi body.
 - *density* Velikost mezery mezi jednotlivými body.
 - *type* Nahradit „*cart*“ pro kartézské souřadnice nebo „*polar*“ pro polární souřadnice.
- *mi_refreshview()* Znovu vykreslí současný pohled.
- *mi_minimize()* Minimalizuje současný pohled (záložku).
- *mi_maximize()* Maximalizuje aktivní okno (záložku) přes celé okno programu.
- *mi_restore()* Obnoví okno z maximalizovaného nebo minimalizovaného pohledu.
- *mi_resize(šířka,výška)* Nastaví velikost okna na dané hodnoty.

6.3.9 Vlastnosti objektů

- *mi_addmaterial(„jméno“, μ_x , μ_y , H_c , J , C_{duct} , Lam_d , Φ_{hmax} , lam_{fill} , $Lamtype$, Φ_{hx} , Φ_{hy} , $NStrands$, $WireD$)* Přidání nového materiálu.
 - *jméno* Název materiálu.
 - μ_x Relativní permeabilita ve směru x nebo r.
 - μ_y Relativní permeabilita ve směru y nebo z.
 - H_c Koercitivní síla magnetu [A/m].
 - J Zdroj reálné proudové hustoty [A/mm^2].
 - C_{duct} Vodivost materiálu [MS/m].
 - Lam_d Tloušťka plechů [mm].
 - Φ_{hmax} Úhel zpoždění hystereze ve stupních, pro nelineární B-H křivku.
 - lam_{fill} Činitel zaplnění plechů (standardně na hodnotě 1 v dialogovém okně preprocesoru, protože se počítá s úplným zaplněním železem).
 - $Lamtype$ Nastavuje se na hodnoty:



- 0 Není z plechů, nebo jsou plechy plochou k pozorovateli.
- 1 Plechy ve směru x nebo r.
- 2 Plechy ve směru y nebo z.
- 3 Drát vinutí.
- 4 Plochý drát.
- 5 Vf lanko.
- 6 Čtvercový drát.
- *Phy_hx*, *Phy_hy* Zpoždění hysterze ve stupních ve směru x, y pro lineární materiál.
- *NStrands* Množství žilek v drátu, může být 1 pro drát vinutí nebo čtvercový drát.
- *WireD* Průměr celého drátu.

Hodnoty které nedefinujete je nastaví na výchozí hodnoty.

- *mi_addbpoint*(„jméno“,*b*,*h*) Přidá bod do B-H křivky.
 - *jméno* Přidá bod do materiálu tohoto jména.
 - *b* Hodnota mag. indukce [T].
 - *h* Intenzita el. pole [A/m].
- *mi_clearbpoints*(„jméno“) Odstraní všechny body z B-H křivky z materiálu „jméno“.
- *mi_addpointprop*(„název“,*a*,*j*) Vytvoří novou vlastnost bodu, nastaví se *a* **nebo** *j*, zbývající se nastaví na 0.
 - *název* Pojmenování vlastnosti.
 - *a* Intenzita indukčního toku ve weberech / metr.
 - *j* Proud [A].
- *mi_addboundprop*(„název“,*A0*,*A1*,*A2*,*Phi*,*Mu*,*Sig*,*c0*,*c1*,*BrdyFormat*) Vytvoření nové hraniční podmínky.
 - *název* Jméno podmínky.
 - Pro nastavení parametrů „*Prescribed A*“ nastavte parametry *A0*, *A1*, *A2*, *Phi* na požadované hodnoty a zbytek na 0.
 - Pro „*Small Skin Depth*“ nastavte *Mu* - relativní permeabilita a *Sig* – vodivost (konduktivita) [MS/m], *BrdyFormat* nastavit na 1, ostatní parametry na 0.
 - Pro „*Mixed*“ nastavte *c0*, *c1* na požadované hodnoty, *BrdyFormat* nastavit na 2, ostatní parametry na 0.
 - Pro „*Strategic Dual Image*“ nastavte *BrdyFormat* na 3, ostatní parametry 0.
 - Pro „*periodic*“ nastavte *BrdyFormat* na hodnotu 4, ostatní parametry na 0.



- Pro „Anti-Periodic“ nastavte *BrdyFormat* na hodnotu 5, ostatní parametry na 0.
- *mi_addcircprop(„název“,i,typ)* Vytvoření nové vlastnosti cívky.
 - *název* Pojmenování nové vlastnosti.
 - *i* Proud cívky [A].
 - *typ* Pro závity spojené paralelně nastavit 0, pro sériové spojení závitů parametr 1.
- *mi_deletematerial(„název“)* Smaže materiál zadaného názvu (ne z knihovny).
- *mi_deleteboundprop(„název“)* Smaže hraniční podmínku zadaného názvu.
- *mi_deletecircuit(„název“)* Smaže vlastnosti cívky daného názvu.
- *mi_deletepointprop(„název“)* Smaže vytvořené vlastnosti bodu daného názvu.
- *mi_modifymaterial(„název“,propnum,value)* Modifikace parametrů vlastností materiálu bez potřeby ho definovat celý znovu.
 - *Název* jméno materiálu který se bude upravovat.
 - *propnum* Číselné označení měněné veličiny možnosti:
 - 0 Název vlastnosti.
 - 1 μ_x Relativní permeabilita ve směru x nebo r.
 - 2 μ_y Relativní permeabilita ve směru y nebo z.
 - 3 H_c Koercitivita [A/m].
 - 4 J_r Zdroj proudové hustoty [MA/m²].
 - 5 Konduktivita [MS/m].
 - 6 d_{lam} Tloušťka plechů [mm].
 - 7 ϕ_{hmax} Úhel zpoždění hystereze ve stupních pro nelineární mtr.
 - 8 LammFill Faktor zaplnění železem.
 - 9 LamType Plechy 0=žádné,souběžné s plochou, 1=paralelně k x, 2=paralelně k y.
 - 10 ϕ_{hx} Úhel zpoždění hystereze ve stupních pro lineární mtr., směr x.
 - 11 ϕ_{hy} Úhel zpoždění hystereze ve stupních pro lineární mtr., směr y.
 - *value* Nová hodnota zvolené veličiny.
- *mi_modifyboundprop(„BdryName“,propnum,value)* Úpravy zvoleného parametru vlastnosti hraniční podmínky.
 - *BrdyName* Název hraniční podmínky kterou chceme změnit
 - *propnum* Číslo parametru který chceme změnit, hodnoty:
 - 0 Název vlastnosti.



- 1 A0
- 2 A1
- 3 A2
- 4 ϕ fáze A
- 5 μ Relativní permeabilita *Small skin depth*.
- 6 σ Vodivost parametru *small skin depth*.
- 7 c0 Parametr mixed BC.
- 8 c1 Parametr mixed BC.
- 9 typ hraniční podmínky:
 - 0 = Prescribed A
 - 1 = Small skin depth
 - 2 = Mixed
 - 3 = Strategic Dual Image
 - 4 = Periodic
 - 5 = Antiperiodic
- *value* Nová hodnota zvoleného parametru.
- *mi_modifypointprop*(„název“,*propnum*,*value*) Změna vlastnosti bodu.
 - *název* Název vlastnosti.
 - *propnum* Číslo měněného parametru.
 - 0 Název.
 - 1 A potenciál Weber/metr.
 - 2 J proud [A].
 - *value* Nová hodnota parametru.
- *mi_modifycircprop*(„název“,*propnum*,*value*) Změna parametru vlastnosti cívky.
 - *název* Změna názvu vlastnosti.
 - *propnum* Číslo parametru:
 - 0 Název vlastnosti.
 - 1 I celkový proud.
 - 2 Typ cívky 0=paralelní, 1=sériová .
 - *Value* Nová hodnota.

6.3.10 Různé

- *mi_savebitmap*(„název“) Uloží bitmapový screenshot aktuálního pohledu do souboru pod zadaným názvem.
- *mi_savemetafile*(„název“) Uloží metafile screenshot současného pohledu.



- *mi_refreshwiev()* Znovu vykreslí současný pohled.
- *mi_close()* Zavře dokument preprocesoru (okno tvorby).
- *mi_shownames(flag)* Zobrazí nebo skryje popisky prvků v modelu, 0=skrýt, 1=zobrazit.
- *mi_readdfx(„název“)* Import dfx souboru daného názvu.
- *mi_defineouterspace(Zo,Ro,Ri)* Definuje osově symetrickou oblast, která se používá společně s Kelvinovou transformací při modelování neohraničených úloh.
 - *Zo* Umístění z, vnější oblasti.
 - *Ro* Poloměr vnější oblasti.
 - *Ri* Poloměr vnitřní oblasti.
- Permeabilita vnější oblasti se mění jako funkce vzdálenosti od umístění *Zo*. Tyto parametry jsou nezbytné pro definování změny permeability vnější oblasti.
- *mi_attachouterspace()* Označí všechny zvolené zelené body jako členy vnější oblasti, používané při modelování neohraničené osově symetrické úlohy, za použití Kelvinovy transformace.
- *mi_detachouterspace()* Zruší označení zelených bodů jako členů vnější oblasti.

6.4 Příkazy po výpočtu modelu (post procesoru)

6.4.1 Získání výstupních hodnot

- *mo_lineintegral(typ)* Vypočítá zvolený integrál po trajektorii typu:

typ	název	hodnota 1	hodnota 2	hodnota 3	hodnota 4
0	B.n	celk. B.n	prům. B.n	-	-
1	H.t	celk H.t	prům. H.t	-	-
2	contour lenght	plocha	-	-	-
3	síla	DC r/x	DC y/z	2x r/x	2x y/z
4	kroučící moment	DC	2x	-	-
5	(B.n) ²	celk. (B.n) ²	prům. (B.n) ²	-	-

Poskytuje většinou 2 výsledky (eventuálně komplexní). Pro sílu a kroučící moment je 2x hodnota relevantní pro úlohy kde $\omega \neq 0$.

- *mo_blockintegral(typ)* Vypočítá plošný integrál pro zvolenou plochu typu:
 - 0 Indukční odpor.
 - 1 Vzájemná indukčnost cívek.
 - 2 Energie mag. Pole.



- 3 Hysterezní ztráty.
- 4 Odporové ztráty.
- 5 Plocha průřezu.
- 6 Celkové ztráty.
- 7 Celkový proud.
- 8 Integrál B_x (nebo B_r).
- 9 Integrál B_y (nebo B_z).
- 10 Objem.
- 11 x nebo r část ustálené Lorentzovy síly.
- 12 y nebo z část ustálené Lorentzovy síly.
- 13 x nebo r část $2x$ Lorentzovy síly.
- 14 y nebo z část $2x$ Lorentzovy síly.
- 15 Ustálený Lorenzův kroutící moment.
- 16 $2x$ část Lorentzova kroutícího momentu.
- 17 Energie pod B-H křivkou.
- 18 x nebo r část ustáleného váženého tenzoru napětí.
- 19 y nebo z část ustáleného váženého tenzoru napětí.
- 20 x nebo r část $2x$ váženého tenzoru napětí.
- 21 y nebo z část $2x$ váženého tenzoru napětí.
- 22 Ustálený vážený tenzor kroutícího momentu.
- 23 $2x$ část váženého tenzoru kroutícího momentu.
- 24 Moment setrvačnosti/hustoty.

Objem = $mo_blockintegral(10)$. Tato funkce dává jednu hodnotu(může být komplexní), např.

- $mo_getpoinvalues(x,y)$ Získá hodnoty na bodu o souřadnicích x,y v pořadí:

- A Vektorový potenciál A nebo tok ϕ .
- B1 Hustota toku B_x nebo B_r .
- B2 Hustota toku B_y nebo B_z .
- Sig El. Vodivost.
- E Uložená hustota energie.
- H1 Intenzita pole H_x nebo H_r .
- H2 Intenzita pole H_y nebo H_z .



- Je Hustota vířivých proudů.
- Js Proudová hustota zdroje.
- Mu1 Relativní permeabilita μ_x nebo μ_r .
- Mu2 Relativní permeabilita μ_y nebo μ_z .
- Pe Hustota energie uvolněná odporovými ztrátami.
- Ph Hustota energie uvolněná hysterezními ztrátami.

Např. Pro zjištění všech hodnot na souřadnici (2.7,1) použijeme
A, B1, B2, Sig, E, H1, H2, Je, Js, Mu1, Mu2, Pe, Ph = mo
_getpointvalues(2.7,1).

- *mo_makeplot(typ,body,název,formát)* Tvorba grafu. Pokud zadáte pouze *typ* a *body*, vykreslí se graf na obrazovku. Pokud přidáte i parametr *název*, graf se místo toho uloží na disk jako rozšířený metafile. Pokud se přidá parametr *formát*, soubor se uloží pod zadaným názvem jako data.

- *Typ* typ grafu:
 - 0 Potenciál
 - 1 $|B|$
 - 2 $B \cdot n$
 - 3 $B \cdot t$
 - 4 $|H|$
 - 5 $H \cdot n$
 - 6 $H \cdot t$
 - 7 $J_{vířivé}$
 - 8 $J_{zdroj} + J_{vířivé}$

- *body* Počet bodů v grafu.

- *název* Název souboru.

- *formát* Formát souboru:

- 0 Mnohořádkový text s legendou.
- 1 Mnohořádkový text bez legendy.
- 2 Matematický styl.

Pokud chcete zobrazit graf na obrazovku tak např. napíšete *mo_makeplot(2,200)*.

Pokud ho chceme uložit tak *mo_makeplot(2,200, "c:\temp\myfile.emf")*.

Pro uložení dat místo grafu *mo_makeplot(2,200, "c:\temp\myfile.txt",0)*.

- *mo_getprobleminfo()* Vrací informace o popisu úlohy.
 - 1 Typ úlohy.
 - 2 Frekvence Hz.
 - 3 Hloubka planární úlohy.



- *mo_getcircuitproperties(„cívka“)* Vlastnosti jsou vráceny pro vlastnosti cívky nazvané „cívka“. Tři hodnoty jsou vráceny v pořadí proud cívky, napětí, tok.

6.4.2 Příkazy výběru

- *mo_seteditmode(mode)* Nastaví mód postprocesoru.
 - *mode* „point“ Bod .
 - „contour“ Čára.
 - „area“ Plocha.
- *mo_selectblok(x,y)* Vybere blok obsahující bod x,y.
- *mo_groupselectblok(n)* Vybere všechny bloky, které jsou ve skupině n. Pokud zůstane závorka prázdná, vyberou se všechny bloky.
- *mo_addcontour(x,y)* Přidá bod do křivky pro tvorbu grafu, pokud je to bod první, křivka se kreslit začne a prodlužuje se s postupným přidáváním bodů od bodu k bodu následujícímu.
- *mo_bedcontour(angle,anglestep)* Nahradí úsečku mezi posledními dvěma definovanými body obloukem. Je-li definován jen jeden bod, tak je funkce ignorována. Úhel může být v rozmezí -180° až $+180^\circ$.
 - *Angle* Celkový úhel oblouku.
 - *anglestep* Oblouk je tvořen velkým množstvím krátkých úseček a tento parametr udává úhel mezi jednotlivými úsečkami, musí být větší než nula.
- *mo_selectpoint(x,y)* Přidá bod pro tvorbu grafu, který bude umístěn na bod modelu nejbližší zadaným souřadnicím..
- *mo_clearcontour()* Zruší definovanou čáru.
- *mo_clearblock()* Zruší výběr bloku.

6.4.3 Zoomování

- *mo_zoomnatural* Nastaví pohled na celý model.
- *mo_zoomin()* Přiblíží o jednu úroveň.
- *mo_zoomout()* Oddálí pohled o jednu úroveň.
- *mo_zoom(x1,y1,x2,y2)* Pohled se nastaví definovaným oknem.
 - *x1,y1* Levý spodní roh.
 - *x2,y2* Pravý horní roh.

6.4.4 Zobrazování

- *mo_showmesh()* Zobrazí síť trojúhelníků.
- *mo_hidemesh()* Skryje síť trojúhelníků.



- *mo_showpoints()* Zobrazí body ze vstupní geometrie.
 - *mo_hidepoints()* Skryje body ze vstupní geometrie.
 - *mo_smooth(„flag“)* Funkce na vyhlazování B a H, které jsou přirozeně po částech spojitě přez každý element.
 - *flag* „on“- zapnuto, „off“- vypnuto.
 - *mo_showgrid()* Zobrazí síť bodů.
 - *mo_hidegrid()* Ukryje síť bodů.
 - *mo_grid_snap(„snap“)* Přichytávání.
 - *snap* „on“- zapnuto, „off“- vypnuto.
 - *mo_setgrid(density, „type“)* změna hustoty přichytávacích bodů.
 - *density* Rozestupy bodů.
 - *type* Dosadit „cart“ pro kartézské souřadnice a „polar“ pro polární souřadnice .
 - *mo_hidedensityplot()* Zruší barevné zobrazení hustoty.
 - *mo_showvectorplot(type, scale)* Zobrazení vektorů veličin.
 - *type* 1 = B, 2 = H
 - *scale* Zvětšení vektoru.
 - *mo_showdensityplot(legend, gscale, upper_B, lower_B, „type“)* Zapne zobrazení hustoty pole.
 - *legend* 0=nezobrazit legendu, 1=zobrazit legendu.
 - *gscale* 0=barevné zobrazení, 1=odstíny šedi.
 - *upper_B* Horní limit rozsahu zobrazeného pole.
 - *lower_B* Spodní limit rozsahu zobrazeného pole.
 - *type* Typ zobrazeného pole, vybere se jeden z následujících:
 - *bmag* nebo *hmag* nebo *jmag* pro amplitudu B,H,J.
 - *breal* nebo *hreal* nebo *jreal* pro reálnou část B,H,J.
 - *bimag* nebo *himag* nebo *jimag* pro imaginární část B,H,J.
- Pokud zadáte *mo_showdensityplot(-1)* použijí se výchozí hodnoty.
- *mo_hidecontourplot()* Ukryje siločáry.
 - *mo_showcountorplot(numcontours, lowerA, upperA, type)* Zobrazí siločáry s parametry.
 - *numcontours* Počet zobrazených siločár.
 - *upperA* Horní limit siločár.
 - *lowerA* Spodní limit siločár.



- *type* Typ se nastaví na „*real*“ - reálné, „*imag*“ - imaginární nebo „*both*“ obojí, reálnou a imaginární část.

mo_showcontourplot(-1) Použijí se standardní hodnoty.

- *mo_minimize* Minimalizuje aktivní výstupní okno.
- *mo_maximize* Maximalizuje aktivní výstupní okno.
- *mo_restore* Obnoví okno z minimalizovaného nebo maximalizovaného stavu.
- *mo_resize(sirka, vyska)* Změní velikost okna na zadanou hodnotu.

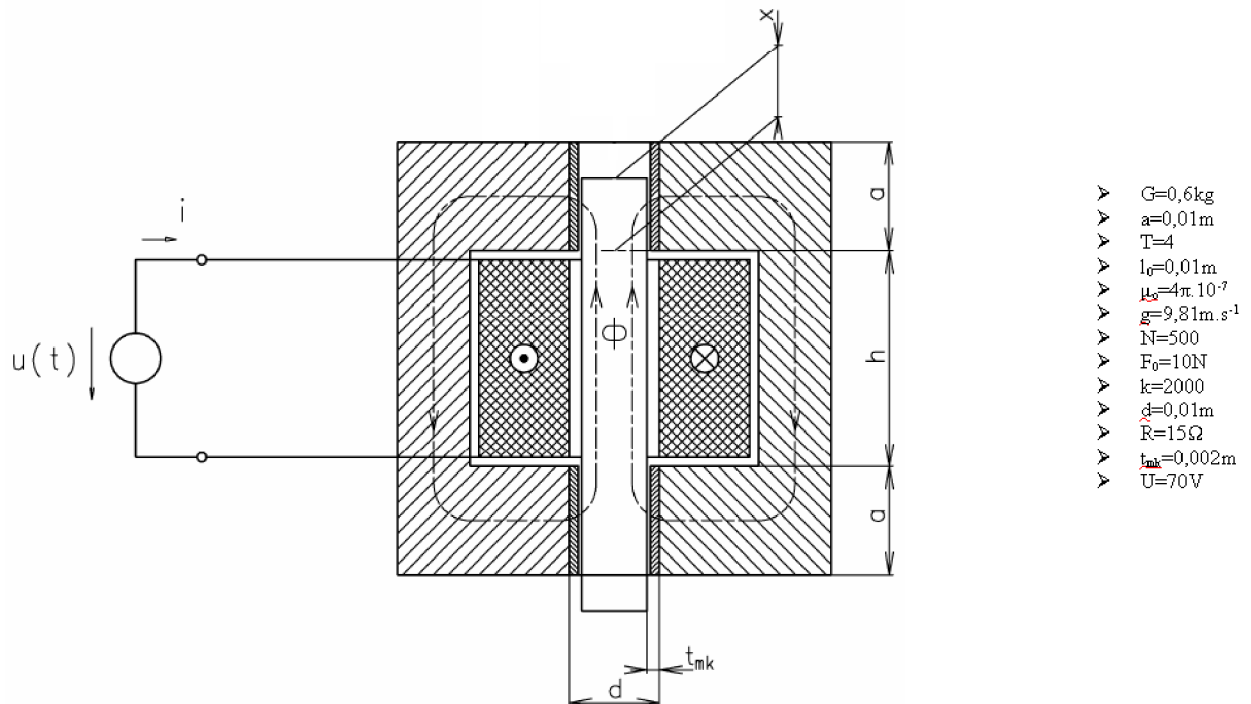
6.4.5 Různé

- *mo_close()* Zavře okno.
- *mo_refreshview()* Znovu vykreslí pohled.
- *mo_reload()* Znovu načte řešení z disku.
- *mo_savebitmap(„nazevsouboru“)* Uloží printscreen současného pohledu, při zadání cesty souboru je potřeba použít 2 lomítka např. "c:\\temp\\myfemmfile.fem", pokud jsou v názvu nějaké mezery, je potřeba použít extra uvozovky "\"c:\\temp\\screenshot.bmp\"".
- *mo_savemetatile(„název“)* Uloží metafile screenshot současného pohledu.
- *mo_shownames(flag)* Zobrazí =1 nebo skryje =0 popisky na obrazovce.

7. PŘÍKLADY POUŽITÍ

7.1 Řešení elektromagnetu s posuvným jádrem

Cílem úlohy je zjistit sílu, kterou působí elektromagnetické pole na, ze středu vychýlené, železné jádro a tím ho vtahuje. K dispozici máme náčrtek Obr. 7.1. a tak můžeme začít.



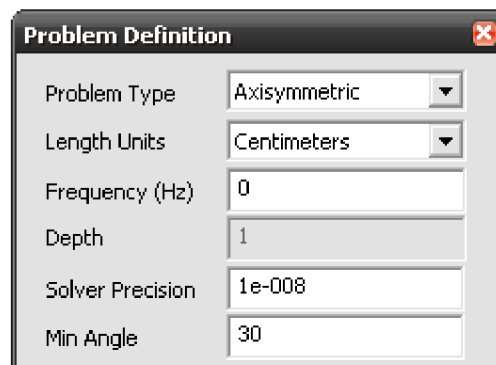
Obr.7.1

Další rozměry k Obr.7.1: $h=1,8\text{cm}$, šířka 1 bloku cívky $0,7\text{ cm}$, výška $1,4\text{ cm}$, šířka pravé poloviny plechů $1,4\text{ cm}$, izolační mezera $0,2\text{ cm}$, $x = 0,6\text{ cm}$.

7.1.1 Vytvoření

Zvolíme nový „magnetics problem“. Definujeme základní vlastnosti, kliknutím v horní liště na „Problem“ se otevře okno s nastavením (Obr.7.2), kde změníme první 2 položky. *Problem type* → *Axisymmetric*, protože jde o válcovou cívku, osově symetrický mód je to, co potřebujeme.


Poté změníme v kolonce „Lenght units“ jednotky na „Centimetres“, protože to nejlépe odpovídá rozměrům cívky.



Obr.7.2

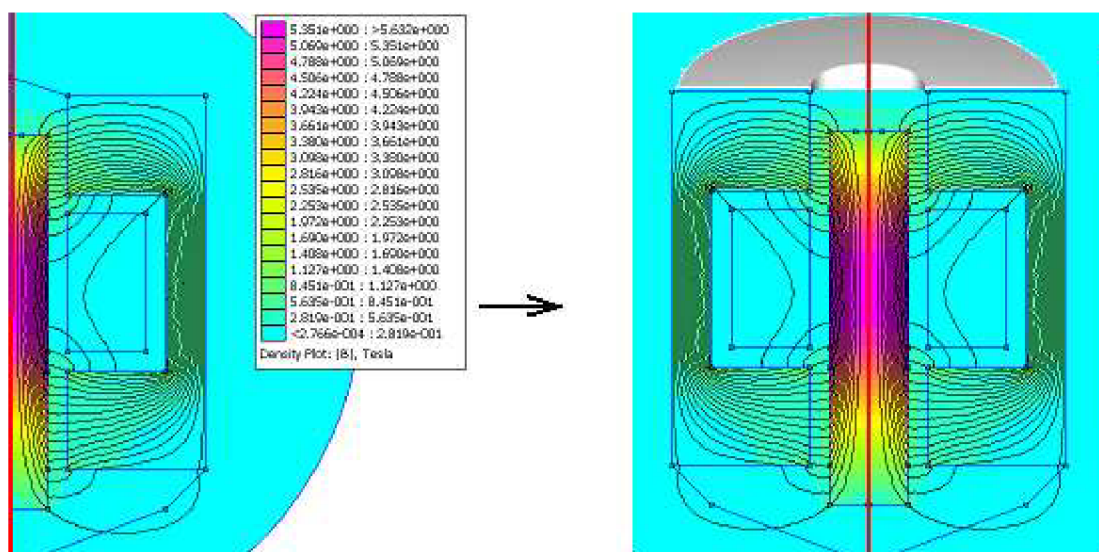
Je-li k dispozici soubor *.dxf z CAD programu, lze ho importovat v nabídce *File* → *Import DXF*. V opačném případě si model vytvoříme v FEMMu.

Tlačítkem si v kolonce „grid size“  nastavíme rozestupy bodů pomocné mřížky na 0.1 z původních 0.25 a potvrdíme.

Zapneme přichytávání bodů , abychom mohli kreslit po 0.1 cm.

Na začátku je třeba si uvědomit, že se jedná o osově symetrickou úlohu, a proto je vhodné si v ose $r = 0$ umístit body a mezi ně úsečky, protože právě kolem této osy, se pomyslně zrcadlí druhá polovina modelu, viz. Ukázka na Obr.7.3.

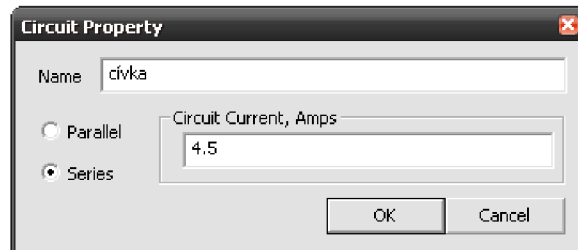
V levém dolním rohu se zobrazují souřadnice kurzoru, pomocí nich se orientujeme po ploše. Všechny body umístíme v daných rozestupech. Nakreslíme úsečky. Umístíme zelené body do všech uzavřených oblastí. Výsledek by měl vypadat jako na Obr.7.6.



Obr.7.3

6.1.2 Nastavení vlastností

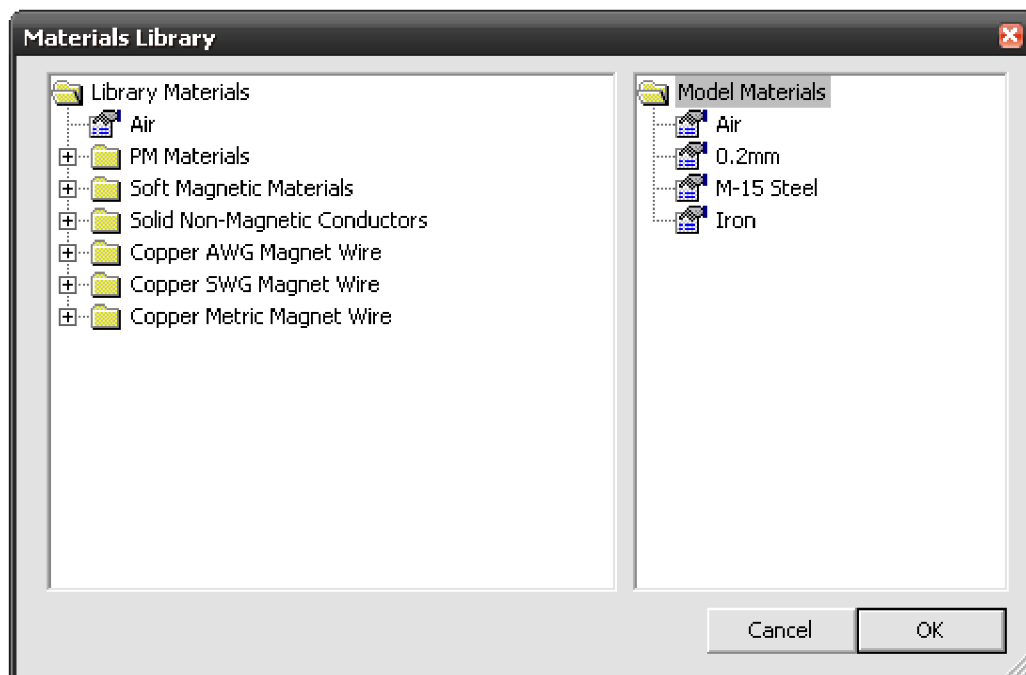
Nyní nastavíme materiály, nejprve volba *Properties* → *Materials Library*. Táhnutím myši přetáhneme potřebné materiály z knihovny v levém okně do pravého (Obr.7.4). Nebo pravým tlačítkem myši klikneme do pravé části oka a volbou „*Import Materials*“ vložíme materiály z předešlého projektu.




Obr.7.4

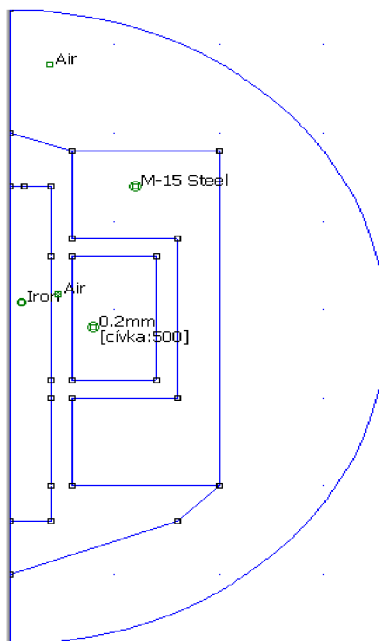
- Použitý materiál
- a) „*Iron*“ má relativní permitivitu 2500 a je lineární.
 - b) „*M-15 Steel*“ je nelineární a dojde k nasycení.

Proud cívky definujeme v nabídce horní lišty *Properties* → *Circuit* → *Add Property*. Zde si cívku pojmenujeme a nastavíme hodnotu proudu v ampérech. Komplexní hodnotu proudu lze zadat způsobem: př. $8+I*8.88$. Zvolíme si 4,5 A, tudíž dojde k výraznému přesycení materiálu a značně odlišným výsledkům (Obr.7.9a, 7.9b, 7.11a, 7.11b) kvůli různým použitým materiálům jádra. Záporná hodnota je směr proudu „z monitoru k nám“ a kladná hodnota směr „do monitoru“. Necháme aktivní možnost „*Series*“ (Obr.7.5), což značí, že závity cívky jsou spojené v sérii a daný proud poteče každým závitem. V případě možnosti „*Parallel*“, se zadaný proud rovnoměrně rozdělí do celé definované uzavřené oblasti a neumožňuje nastavit závity.

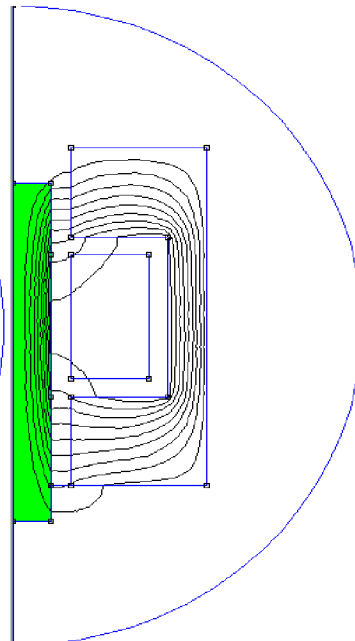


Obr.7.5

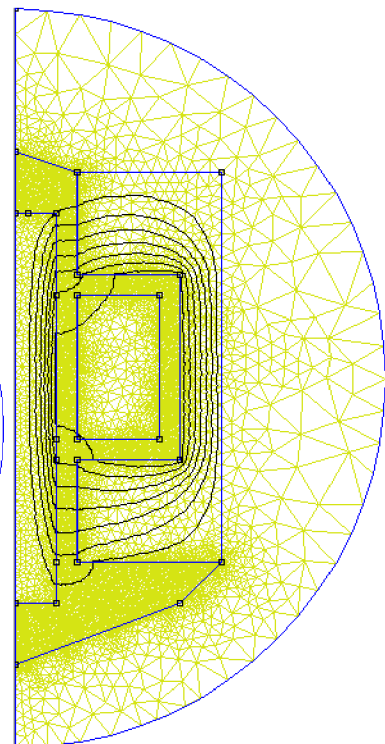
Nyní přiřadíme jednotlivým blokům požadované vlastnosti. Začneme přepnutím do režimu práce s těmito body , pravým tlačítkem myši si označíme zelený bod v bloku budoucí cívky a stisknutím mezerníku se otevře okno s jeho vlastnostmi, kde nastavíme, v kolonce „Block type“, materiál. V seznamu jsou pouze materiály, jenž jsme si přetáhli v předchozím kroku z knihovny, nebo vytvořili. Volbou „In Circuit“ přiřadíme bloku cívku a v kolonce „Number of Turns“ nastavíme počet závitů 500.



Obr.7.6



Obr.7.7







Obr.7.8

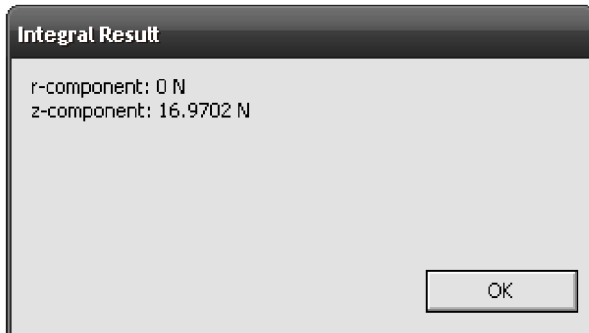
Ostatním blokům v našem modelu reprezentujícím vzduch a plechy přiřadíme pouze materiál v kolonce „Block Type“. Nastavíme „Mesh Size“ - velikost trojúhelníků konečných prvků na 0.1, nebo menší, čímž dosáhneme přesnějších výsledků. Příklad různých hodnot „Mesh Size“ pro každou oblast je na Obr.7.8. Naše hodnota „Mesh Size“ vzduchové mezery nastavena na 0.02 cm, železo v jádře 0.06 cm, cívka 0.1 cm, plechy 0.1 cm a vzduch v okolí zůstal na automatické velikosti.

Výsledek může vypadat jako na Obr.7.8. Protože budeme počítat sílu, která působí na železné jádro, je **nutné** aby kolem něj byl pouze vzduch. Na levém okraji není přímo, ale po otáčení kolem jádra pomyslně je pouze vzduch. Také hustotu sítě trojúhelníků ve vzduchové mezeře je důležité mít vysokou, kvůli značným změnám intenzity magnetického pole.

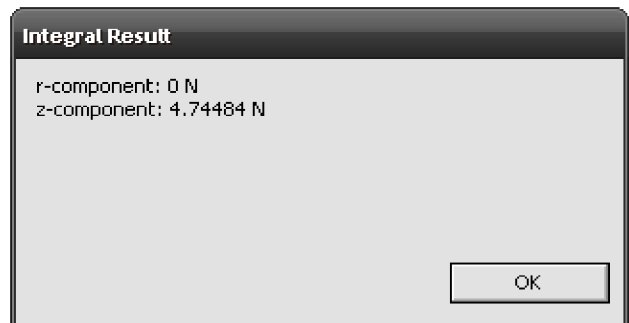
6.1.3 Zpracování výsledků

Provedeme výpočet  a zobrazíme výsledek . Označíme plochu jádra  jako na Obr.7.7 a provedeme výpočet integrálu  „Force via Weighted Stress“ Tensor.



Zobrazí se hodnota ve směru r a z, které jsou na sebe kolmé. Obr.7.9. Kladná hodnota síly v ose z značí kladný směr, ve vertikálním směru (nahoru).

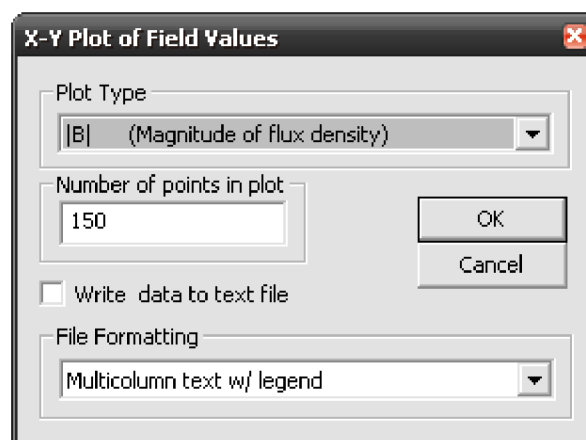


Obr.7.9a

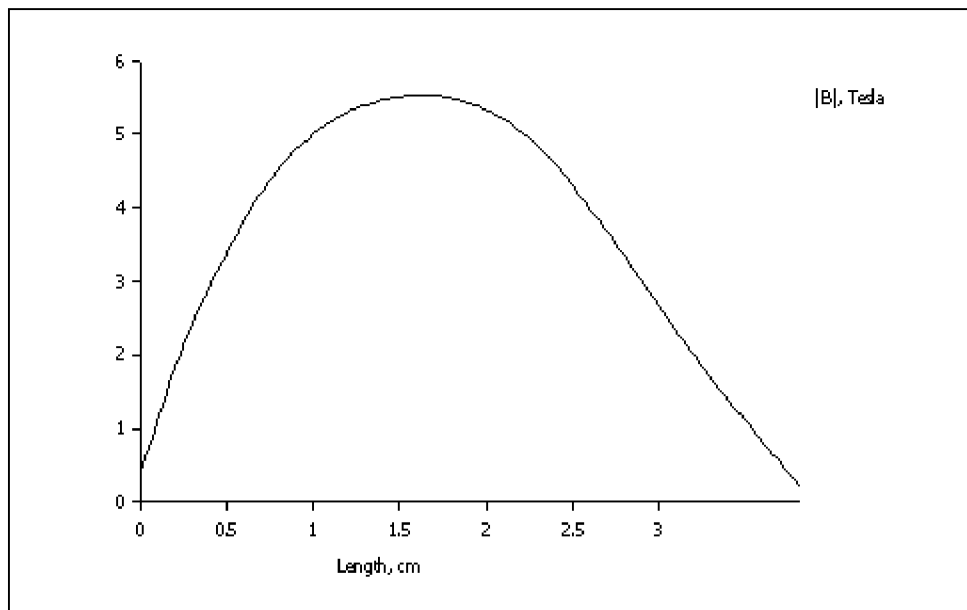


Obr.7.9b

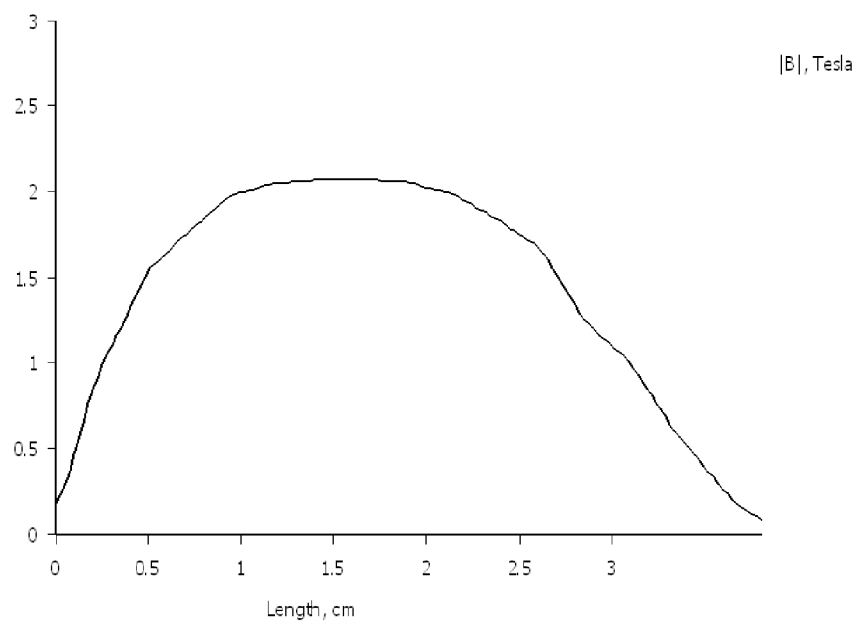
Pokud nás zajímá průběh magnetického pole v železném jádře stiskneme tlačítko  a kliknutím na horní a spodní bod středu jádra se spojí červenou linkou, klikneme na tlačítko  grafu a uvidíme nastavení Obr.7.10. „Plot type“ ponecháme na absolutní hodnotě B, „Numer of points in plot“ je počet bodů tvořících graf. Není třeba měnit. Možnost „Write data to file“ místo grafu nabídne uložení souboru, který bude obsahovat nastavený počet hodnot, poslední kolonka se týká nastavení formátu souboru. Ponecháme hodnoty beze změny, potvrdíme a zobrazí se graf, (Obr.7.11). Poté změním materiál jádra, znovu vypočítáme řešení a provedeme znovu výpočty pro nelineární ocel.



Obr.7.10



Obr.7.11a



Obr.7.11b

Z grafů plyne, že magnetický tok jádrem se výrazně omezí (Obr.7.11b) a tím i síla působící na jádro. Chyba lineárních výpočtů je zde umocněna značným proudem cívky. Při jeho výrazném snížení by se rozdíl téměř neprojevil, např. při $I = 0,5\text{A}$ jsou síly 0,208 N a 0,212 N.

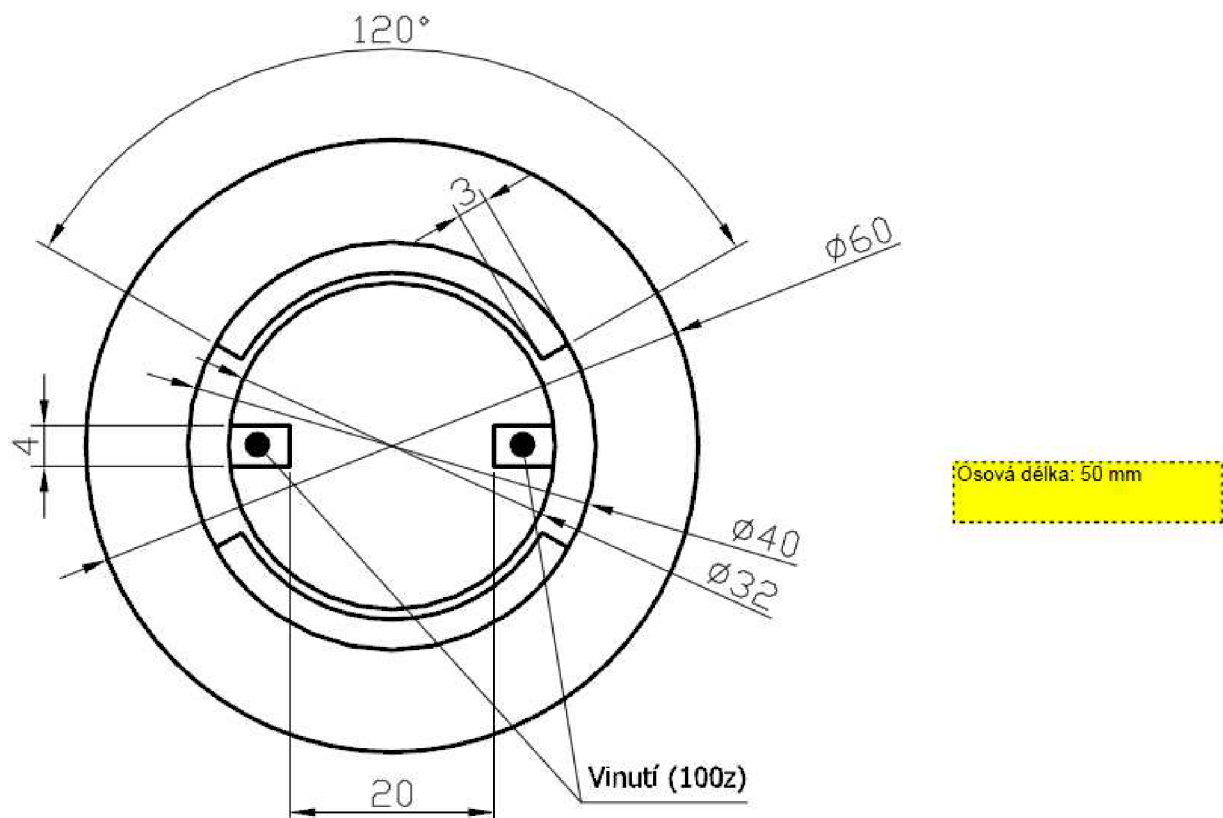
7.2 Principiální model stejnosměrného motoru

V tomto příkladu si namodelujeme jednoduchý stejnosměrný motor a pomocí LUA skriptu ho roztočíme.



7.2.1 Geometrie modelu

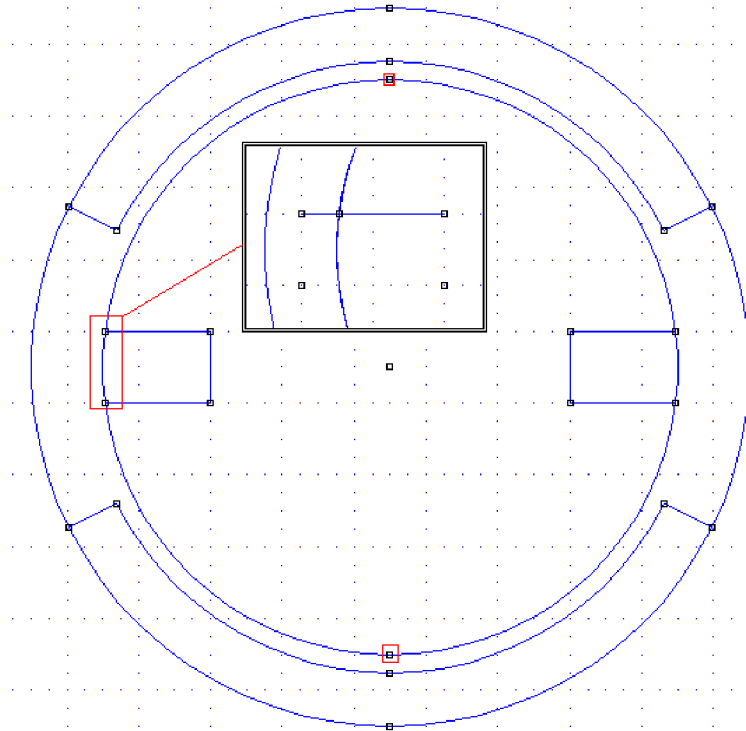
Na začátek je třeba si uvědomit, že se kroutící moment počítá kolem bodu (0,0), zde bude ležet střed rotoru, který musí být celý obklopen vzduchem. Motor je zjednodušený pro bezproblémové vytvoření v FEMMu. Je tvořen sedmi soustřednými kružnicemi, do kterých jsou poté vloženy úsečky které kružnice rozdělí v místě protnutí. Rozměry v centimetrech jsou na Obr.7.12.

Volbou *Problem* → okno *Problem Definition* byl změněn parametr hloubka „Depth“ na hodnotu 50.



Obr.7.12

Pro pohodlnější tvorbu motorku si nastavíme „grid size“  na hodnotu 1 a zapneme přichytávání bodů . Samotná tvorba probíhá následovně. Od bodu (0,0) si uděláme body vzdálené o poloměr rotoru v obou směrech jak je naznačeno na Obr.7.13, dvěma vertikálními červenými body, dále je zde ukázáno, jak je možné udělat drážky do vytvořené kružnice. Označeno červeným rámečkem. Tak, že vytvoříme úsečku, která protíná existující kružnici. Body v levé části výřezu v černém rámečku patří drážce. Pomocné body zasahující za rotor smažeme po vytvoření úseček. Stejně lze postupovat i u vytváření magnetů.



Obr.7.13

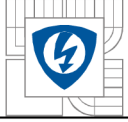
7.2.2 Nastavení parametrů

Motor má vnější hranici definovanou pláštěm statoru a předpokládáme, že za ním se nachází vzduch. Proto je potřeba nastavit okrajovou podmínku, aby magnetické pole statoru neprocházel kolmo pláštěm ven, což je předdefinované nastavení. V nabídce *Properties* → *Boundary* → *Add Property* → kolonka *BC Type* → *Prescribed A* hodnoty ponecháme nulové a potvrdíme. V režimu kreslení oblouků si označíme vnější kružnici pravým tlačítkem myši, stiskneme mezerník a v okně vlastností v kolonce *Boundary cond.* vybereme v předchozím kroku vytvořenou podmínku „New Boundary“ a potvrdíme. Nyní skrz okraj nebude procházet žádný tok magnetického pole. Magnetický tok se bude uzavírat vodivým obalem statoru.

Zelené body umístíme do všech uzavřených oblastí. Vlastnosti jim přiřadíme hned, jak si je definujeme.

Materiály si vybereme z knihovny v nabídce *Properties* → *Materials Library* a přetáhneme do pravé části okna. Budeme potřebovat následující:

- vzduch pro vzduchovou mezeru - *Air*





- magnet statoru složka – *PM Materials* → *NdFeB Magnets* → *NdFeB 32 MGOe*
- magneticky měkká křemíková ocel – *Soft Magnetic Materials* → *Silicon Iron* → *M-27 Steel*
- drát vinutí rotoru – *Copper Metric Magnet Wire* → *0.4mm*

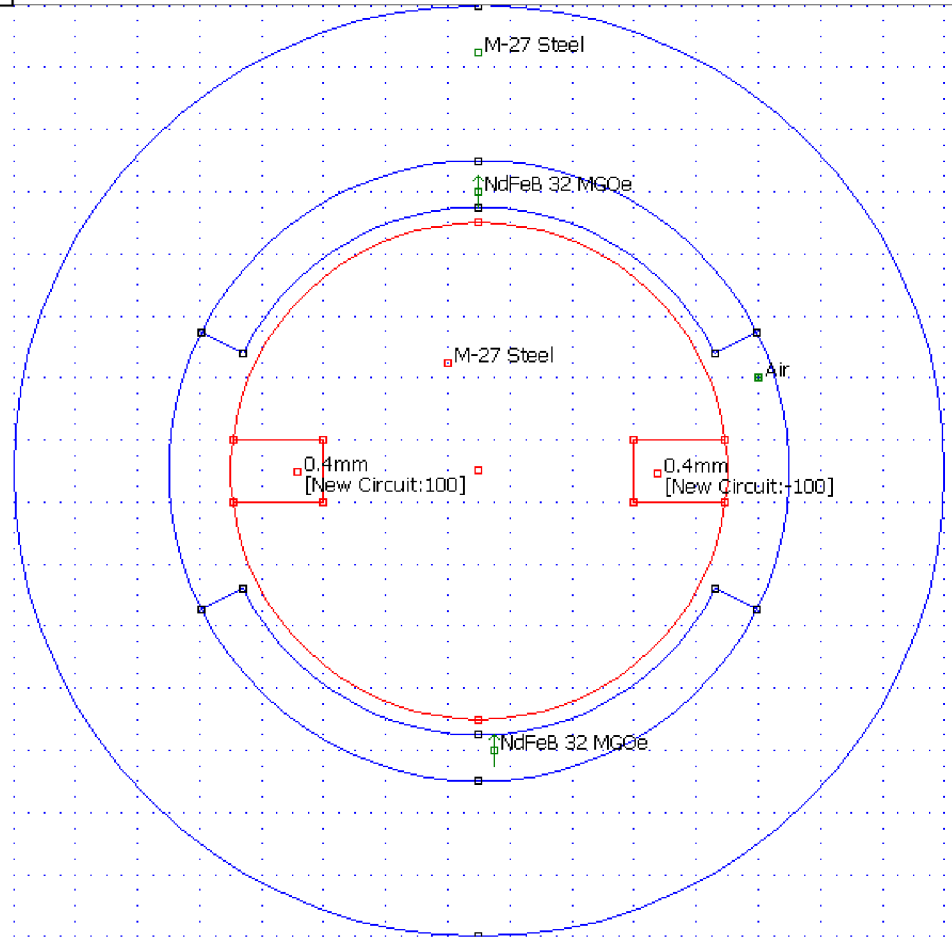
Proud cívkou nastavíme v nabídce *Properties* → *circuits* → *Add property* přidáme cívku „Add Property“ a nastavíme 1 ampér.

Natavení vlastností oblastí je následující: Klikneme pravým tlačítkem na příslušný zelený bod a stiskneme mezerník.

- vnější mezikruží *Block type* → *M-27 Steel* *Mesh size* → *0.4*
- magnety statoru *Block type* → *NdFeB 32 MGOe* *Mesh size* → *0.4*
 Magnetization Direction → *90*
- rotor *Block type* → *M-27 Steel* *Mesh size* → *0.4*
- cívky rotoru *Block type* → *0.4mm* *In Circuit* → *New circuit* (
nebo dle názvu jaký jsme jí přiřadili)
- vzduchová mezera *Block type* → *Air* *Mesh size* → *0.2*
- pravá část cívky *Number of Turns* → *-100*
- levá část cívky *Number of Turns* → *100*

Nyní přiřadíme rotor do skupiny 1 abychom s ním mohli otáčet samostatně bez statoru jedním příkazem. Přepneme do režimu volby skupin objektů  a vybereme možnost výběru objektů do kruhu , kliknutím a držením myši od středu táhneme kružnici až do vzduchové mezery a pak pustíme, měla by být červená celá rotorová část a bez statoru (Obr.7.13). Pak stiskneme mezerník a v nabídce skupiny změníme nulu na jedničku.

Práci si uložíme pod názvem *Ssmotor.fem* a můžeme si nechat vypočítat motor pro kontrolu, jestli je vše nastaveno jak má.



Obr.7.13

7.2.3 Lua skript a nastavení série výpočtů

Nyní si textovém editoru třeba v notepadu napíšeme příkazy skriptu a uložíme s příponou *.lua na místo kde máme uložený motor. Lua stojí na jazyku C, uvidíte známé příkazy. Nejprve si ukážeme řešení bez komutace, s trvalým napětím na cívce rotoru.

```
open ("Ssmotor.fem")           --otevře požadovaný soubor
showconsole ()                 --zobrazí konzoli
clearconsole ()                --vyčistí konzoli
print ("natočení rotoru ve stupních| kroučící moment") --vypíše v konzoli
mi_saveas ("temp.fem")         --bude pracovat z kopií originálu
a = {}                          --vytvoří tabulku s hodnotou
k = "x"                          --tabulku přiřadí x
a[k] = 0                         --nastaví hodnotu na 0
for n=0,35,1 do                 --smýčka konající od 0 po 35 s krokem 1
    mi_analyze ()                --vypočítá motor
```



```
mi_loadsolution()      --zobrazí řešení

mo_showdensityplot(1,0,2,0,"bmag") --zobrazí barevně mag. pole

mo_showvectorplot(1,2) --zobrazí vektor B

mo_savebitmap((a["x"])) --uloží obrázek řešení

a["x"] = a["x"] + 10    --název souboru dle natočení rotoru

mo_groupselectblock(1) --vybere rotor

f=mo_blockintegral(15) --vypočítá kroutící moment

print(10*n,f)          --zobrazí v konzoli hodnoty momentu


mo_close()             --zavře řešení

mi_seteditmode("group") --přepne na editaci skupin

mi_selectgroup(1)      --vybere skupinu 1 rotoru

mi_moverotate(0,0,10,4) --pootočí rotor o 10 stupňů

end                    --konec smyčky
```

Soubor se skriptem otevřeme v programu FEMM tlačítkem  nebo *File* → *Open lua script*. Model může být zavřený, otevře si ho skript. Začnou okamžitě výpočty, printscreeny se ukládají do složky s modelem a skriptem, stačí jim přidat příponu .bmp. Hodnoty kroutícího momentu a natočení se vypisují do konzole. Odtud si je můžeme zkopírovat zabráním myši kam potřebujeme. Průběh magnetické indukce je na Obr.7.14.

Nyní si ukážeme, jak lze nastavit komutaci - změny proudu cívkou v závislosti na natočení rotoru.

```
open("SSmotor.fem")    --otevře požadovaný soubor

showconsole()          --zobrazí konzoli

clearconsole()         --vyčistí konzoli

print("natočení rotoru ve stupních| kroutící moment") --vypíše v konzoli

mi_saveas("temp.fem")  --bude pracovat z kopií originálu

a = {}                 --vytvoří tabulku s hodnotou

k = "x"                --tabulku přiřadí x

a[k] = 0               --nastaví hodnotu na 0

for n=0,35,1 do        --smyčka konající od 0 po 35 s krokem 1

    if n<2 then        --pokud je natočení rotoru pod 20°

        mi_modifycircprop("New Circuit",1,0) --nastaví se cívce proud 0A

    elseif n<17 then   --pokud je natočení rotoru pod 170°

        mi_modifycircprop("New Circuit",1,1) --cívce se nastaví proud 1A

    elseif n<20 then

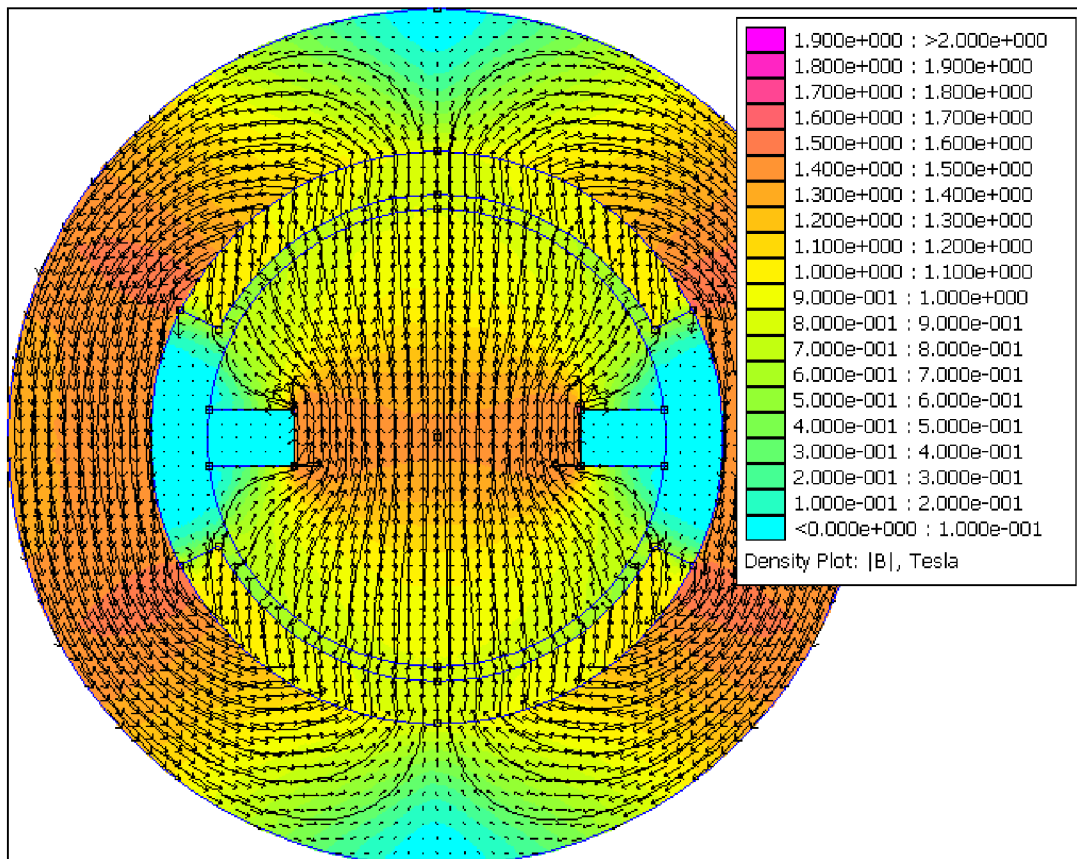
        mi_modifycircprop("New Circuit",1,0)

    elseif n<35 then   --od 200° je proud opačný
```

```
mi_modifycircprop("New Circuit",1,-1)

elseif n>34 then --je-li natočení rotoru nad 340° nastaví se 0A
    mi_modifycircprop("New Circuit",1,0)
end

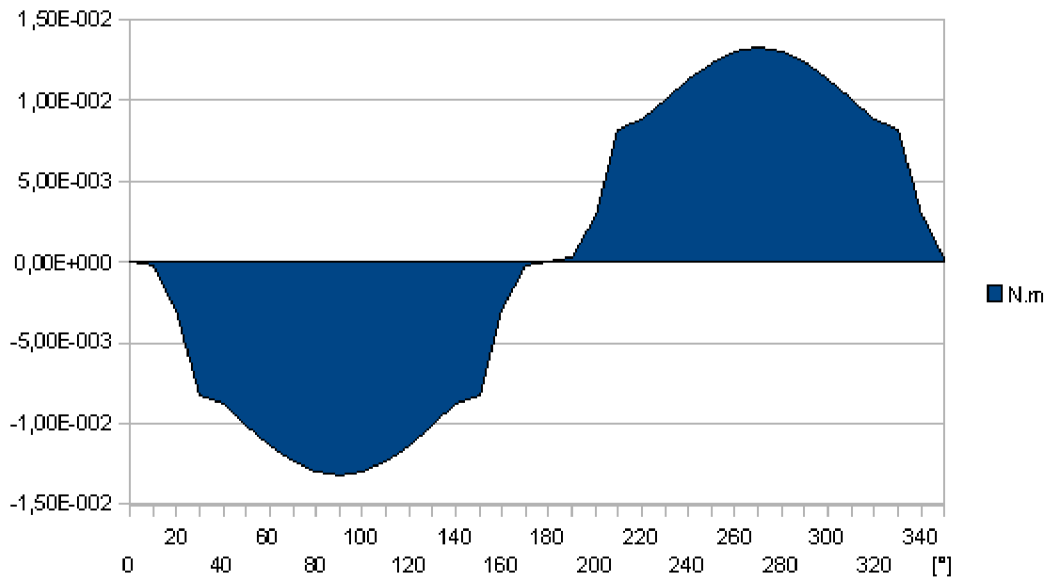
mi_analyze() --vypočítá motor
mi_loadsolution() --zobrazí řešení
mo_showdensityplot(1,0,2,0,"bmag") --zobrazí barevně mag. pole
mo_showvectorplot(1,2) --zobrazí vektor B
mo_savebitmap((a["x"])) --uloží obrázek řešení
a["x"] = a["x"] + 10 --dynamický název souboru dle natočení rotoru
mo_groupselectblock(1) --vybere rotor
f=mo_blockintegral(15) --vypočítá kroučící moment
print(10*n,f) --zobrazí v konzoli hodnoty momentu
mo_close() --zavře řešení
mi_seteditmode("group") --přepne na editaci skupin
mi_selectgroup(1) --vybere skupinu 1 rotoru
mi_moverotate(0,0,10,4) --pootočí rotor o 10 stupňů
end
```



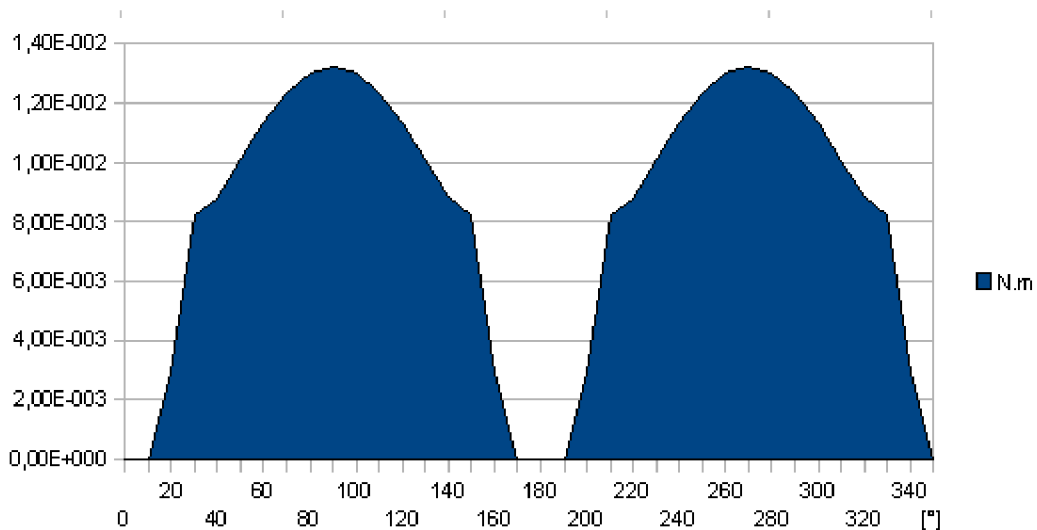
Obr.7.14

Skript můžeme použít, jak je zde napsaný, komentáře oddělené -- budou programem ignorovány. Vložíme skript do okna konzole a stiskneme „Evaluate“. Teď počkáme než se výpočty provedou.

Na Obr.7.15 je průběh momentu bez komutace a na Obr.7.16 průběh s komutací.



Obr.7.15



Obr.7.16

Hodnoty pro každý úhel se vypisovaly do konzole, odkud je lze zkopírovat a použít. Při kopírování hodnot do tabulkového editoru je třeba si dát pozor na to, že FEMM používá desetinou tečku, tu si musíme nahradit čárkou.

Principiální motor má jen 2 póly a proto je průběh momentu tak nevyrovnaný.



8. ZÁVĚR

Tento manuál výrazně usnadní seznamování tímto programem a osvojování postupu při práci s ním. Omezí se tím zbytečné tápání nad zapomenutými, nebo chybně vyplněnými hodnotami, protože program sám na chyby neupozorňuje a spočítá to, co se mu nastaví. V manuálu jsem popsal postupně celý postup, od počáteční tvorby modelu, nastavení důležitých parametrů, jako třeba vytvoření a nastavení cívek, materiálů, nebo hraničních podmínek, až po získání výstupních dat. Taktéž je zde ukázána práce s lua skriptem na konkrétním příkladu, což značně usnadní pochopení fungování této neocenitelné funkce, při větším počtu počítaných hodnot. Manuál je k dispozici také formou webových stránek, které jsem vytvořil včetně grafické podoby. Program FEMM toho umí ještě víc a manuál by se mohl rozšířit o další části, jako elektrostatika, tepelné toky a proudy. Nebo prohloubit probranou problematiku využitím programu při navrhování skutečného zařízení.



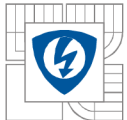
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Popis	Jednotka
A	vektor magnetického pole	[A/m]
B	magnetická indukce	[T]
B.n	celkový magnetický tok normálou úsečky	[T]
H	intenzita magnetického pole	[A.m ⁻¹]
H.t	pokles magnetomotorického napětí	[A/m]
H _c	koercivní síla	[A/m]
J	stejnoseměrná proudová hustota	[A/mm ²]
σ	konduktivita	[MS/m]
φ _{max}	úhel magnetického indukčního toku	[°]



LITERATURA

- [1] Dědek, L., Dědková, J.: Elektromagnetismus. Skripta VUT, Nakladatelství VUTIUM, Brno, 1998, ISBN 80-214-1106-6
- [2] Meeker, D., Finite Element Method Madnetics Version 4.2, User's Manual, 2008
- [3] femm [počítačový program]. Ver. 4.2, 2008 [citováno 2008-12-12]. Dostupné z <http://femm.foster-miller.net/Archives/bin/femm42bin.exe>. A Windows finite element solver.
- [4] Sergey E. Lyshevski, Electromechanical systems, electric machines and applied mechatronics, CRC Press, New York, 1999, ISBN 0-8493-2275-8
- [5] Programming in Lua (first edition) [on-line]. Roberto Ierusalimschy Lua.org, December 2003 [citováno 2009-04-19] Dostupný na www: <http://www.lua.org/pil/index.html> ISBN 85-903798-1-7



PŘÍLOHY

Webové stránky na disku CD.