

Универзитет у Београду  
Електротехнички факултет  
Лабораторија за дигитално управљање електричним погонима

Анализа електромеханичког претварања енергије услед  
линеарног кретања феромагнетског материјала у спољашњем  
магнетском пољу помоћу методе коначних елемената

семинарски рад

студент  
Игор Стаменковић

ментор  
проф др Слободан Вукосавић

Београд, септембар 2006.

## Садржај

<i>1. Увод</i>	2
<i>2. Постављање проблема</i>	2
<i>3. Софтверски пакет Maxwell 2D SV</i>	4
<i>Типови решавања и цртања</i>	7
<i>2D Modeler – цртање геометријског модела</i>	9
<i>Material Manager – додељивање магнетних карактеристика објектима</i>	10
<i>2D Boundary/Source Manager – дефинисање граничних услова и извора</i>	14
<i>Прорачун изведених величина</i>	16
<i>Solve Setup – критеријуми решавања</i>	16
<i>2D Post Processor – приказивање резултата прорачуна</i>	18
<i>4. Практична решавање проблема</i>	21
<i>Дефинисање параметара симулатора</i>	21
<i>Резултати</i>	23
<i>Закључак</i>	30
<i>Литература</i>	30

## 1. Увод

Електромеханичко претварање енергије почива на природним појавама које повезују, са једне стране, магнетско или електрично поље и, са друге стране, механичку силу и кретање. Велики број савремених направа које се користе у различитим гранама индустрије, као и у свакодневним кућним апликацијама, заснива свој рад на линеарном или обртном кретању које утиче или настаје као производ електромеханичког претварања енергије. Отуда прецизно проучавање самог процеса претварања енергије омогућава конструкцију енергетски ефикаснијих електричних машина.

Савремене методе проучавања електромеханичких конвертора обухватају коришћење нумеричких симулација које омогућавају много бољи увид у понашање електричних машина током рада. Основни прорачуни и резултати се најчешће добијају упрошћавањем магнетског кола које се сматра линеарним. На овај начин могуће је једноставно извршити симулацију рада електричне машине, на основу чега се добијају резултати од интереса за различите геометријске и електромагнетске карактеристике саме машине. Ипак, прецизније одређивање њених перформанси захтева узимање у обзир нелинеарност феромагнетског материјала који се налази у оквиру магнетског кола машине. Ово је могуће остварити методом коначних елемената.

Метод коначних елемената (енг. Finite Element Method – FEM, или Finite Element Analysis – FEA) се заснива на решавању Максвелових једначина на површини која је представљена великим бројем троуглова. Троуглови представљају основне елементе мреже коначних елемената (енг. Mesh). На овај начин се вредности електричног или магнетског поља, у зависности од једначина које се користе, прецизно рачунају у тачкама које представљају темена троуглова. Вредности поља у осталим тачкама од интереса се рачуна интерполацијом вредности суседних темена. Остале величине, попут индуктивности, силе или момента, се изводе на основу израчунатих вредности поља. Употреба ове методе је могућа за површине које обухватају дводимензионе или тродимензионе моделе. Први од два наведена се користи у случају структура чије је поље униформно дуж једне осе, тако да се модел приказује попречним пресеком у одговарајућем координатном систему.

На тржишту је присутан значајан број интерактивних софтверских пакета који омогућавају анализу електричног и магнетног поља методом коначних елемената. Један од најранијих је фамилија софтверских пакета Maxwell, који производи компанија Ansoft [1].

Друга глава овог рада представља проблем који се анализира. Трећа глава нуди анализу софтверског пакета Maxwell 2D SV, који користи дводимензиону методу коначних елемената. У четвртој глави дат је детаљан опис практичне употребе овог софтвера на примеру електромеханичког претварања енергије услед линеарног кретања. Рад се завршава закључком.

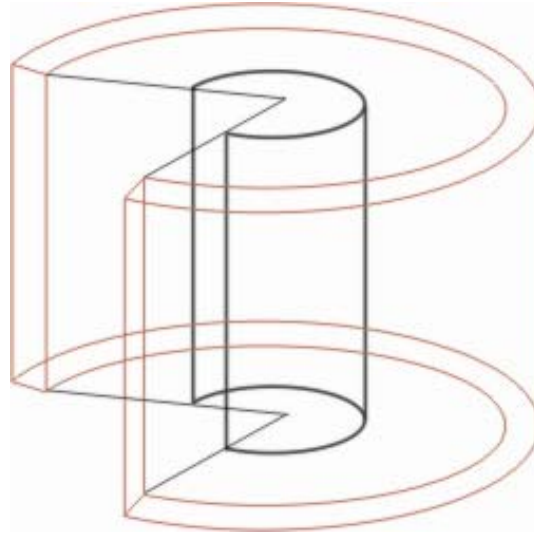
## 2. Постављање проблема

Постоји већи број природних појава на којима се заснива електромеханичко претварање енергије [2]. Једна од најзначајнијих појава омогућава линеарно кретање феромагнетског материјала који се налази у спољашњем магнетском пољу. Наиме, деловањем спољашњег магнетског поља ствара се механичка сила која тежи да постави феромагнетски материјал у правцу линија сила магнетског поља или на место где су линије сила најгушће. Такав положај феромагнетског материјала је енергетски стабилан будући да је тада магнетска енергија феромагнетског материјала минимална.

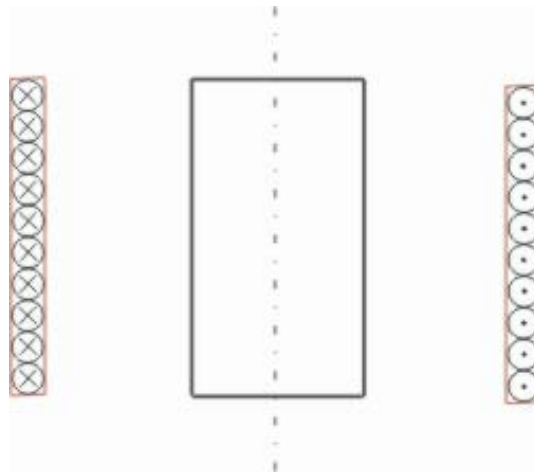
Примарни проблем који ће бити анализиран методом коначних елемената представља квантитативно одређивање механичке силе која делује на феромагнетски материјал који се

налази унутар соленоида. Проучавање кретања феромагнетског материјала ће бити потврђено у три позиције у односу на соленоид: (1) када се предњи део феромагнетског материјала налази у соленоиду; (2) када се цео феромагнетски материјал налази у соленоиду; (3) када се задњи део феромагнетског материјала налази у соленоиду. У оквиру све три позиције провераваће се да ли је нелинерани феромагнетски материјал ушао у засићење.

Међусобни положај феромагнетског материјала и соленоида приказан је у три и две димензије, на сликама 1 и 2, респективно. Будући да је попречни пресек инваријантан радијално у односу на  $z$ -осу као осу симетрије, проблем ће се решавати дводимезионо у оквиру радијалног ( $R$ - $Z$ ) координатног система.



Слика 1: Тродимензиони приказ соленоида (светла боја) и феромагнетског материјала (тамна боја)



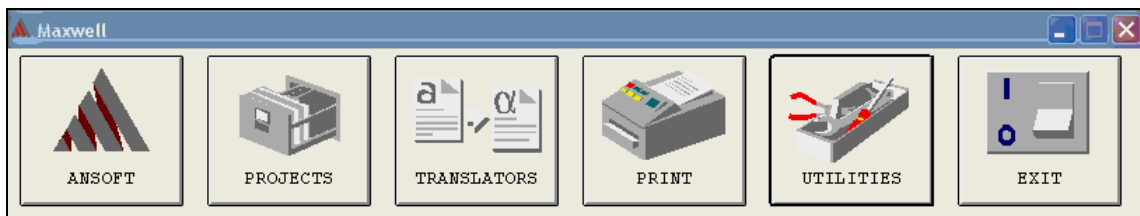
Слика 2: Дводимензиони приказ соленоида (светла боја) и феромагнетског материјала (тамна боја)

Да би остварили жељени циљ неопходно је нацртати феромагнетски материјал и соленоид, адекватно дефинисати материјале, дефинисати граничне услове и магнетске или електричне изворе, дефинисати механичку силу коју желимо да кватитивно израчунамо и

дефинисати критеријум решавања. У трећој глави дате су основе рада са софтвером, док је практично решавање проблема приказано у четвртој глави.

### 3. Софтверски пакет Maxwell 2D SV

Софтверски пакет Maxwell 2D SV представља студентску верзију, чији је инсталациони извршни програмски код бесплатно доступан на електронском сајту компаније [1]. Када се инсталација и стартовање програма успешно изврше, на екрану се појављује Maxwell контролна листа која је приказана на слици 3.

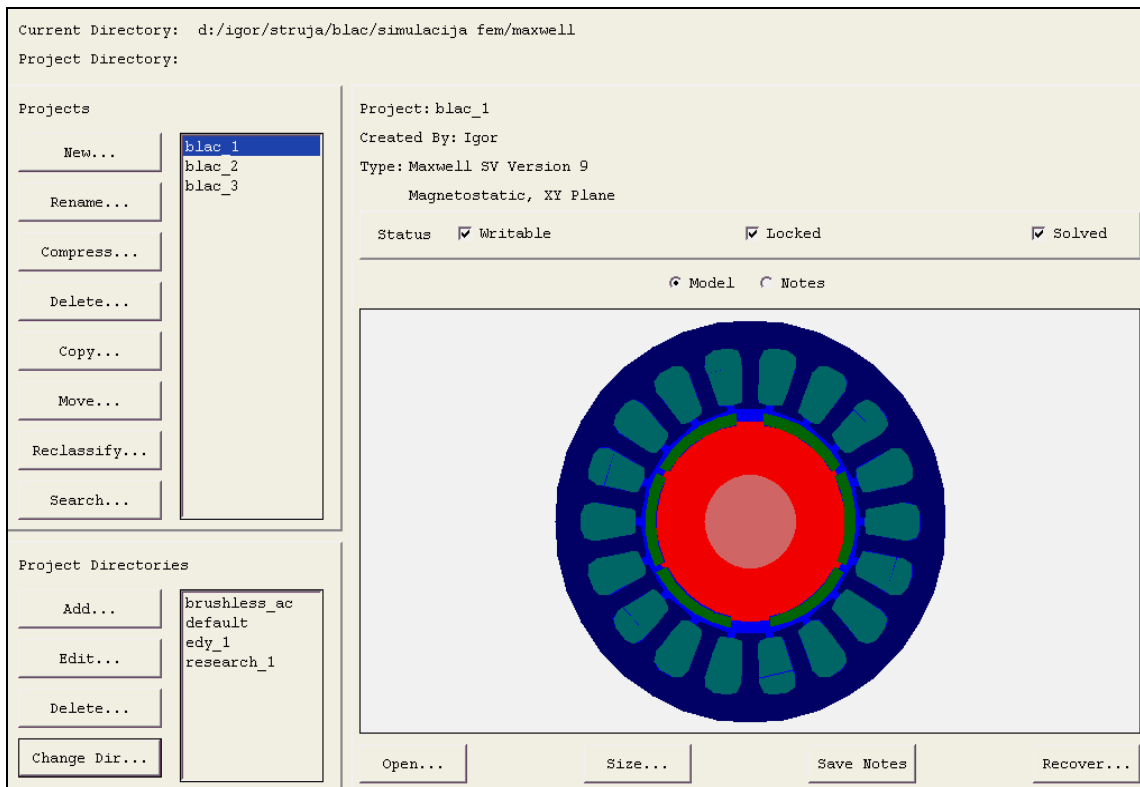


Слика 3: Maxwell контролна листа

Активноси и информације које се остварују двоструким притиском миша на одговарајуће дугме омогућавају:

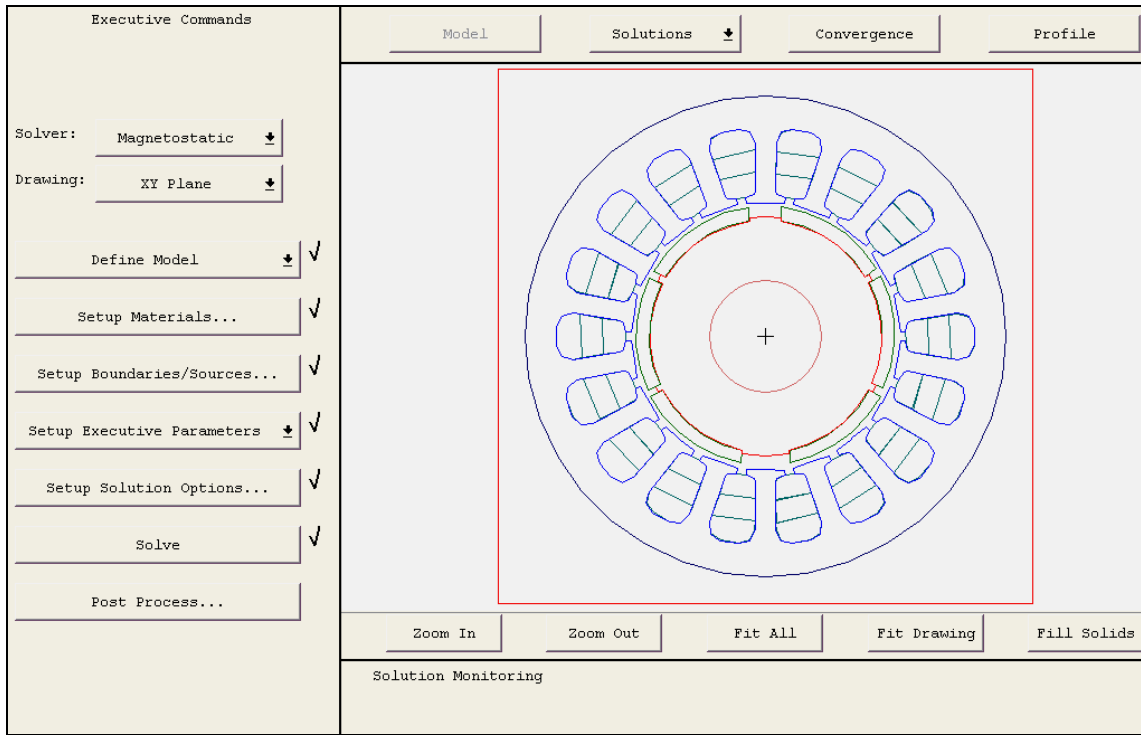
- основне информације о компанији и софтверу – Ansoft;
- отварање Maxwell 2D SV и креирање путање у оквиру којих се чувају сва документа у вези са моделовањем и решавањем одговарајуће структуре – Projects;
- конвертовање различитих формата докумената који су подесни за коришћење у оквиру овог софтверског пакета – Translators;
- дефинисање подешавања штампача – Print;
- приступање различитим деловима пакета – Utilities:
  - 2D Modeler омогућава цртање дводимензионих геометријских модела који представљају попречни пресек структуре која се решава;
  - Color Manager дефинише боје које се користе у софтверу;
  - PlotData генерише дијаграме једначина и експерименталних података;
  - Expression Evaluator омогућава процену алгебарског израза;
  - Material Manager дефинише нове материјале који се користе у моделу;

Двоструки клик миша на дугмићу Projects, приказаном на слици 3, отвара прозор Maxwell Project који омогућава дефинисање путања и поддиректоријума у оквиру којих ће се чувати сва документа у вези са тренутним моделом. Овај прозор је дат сликом 4.



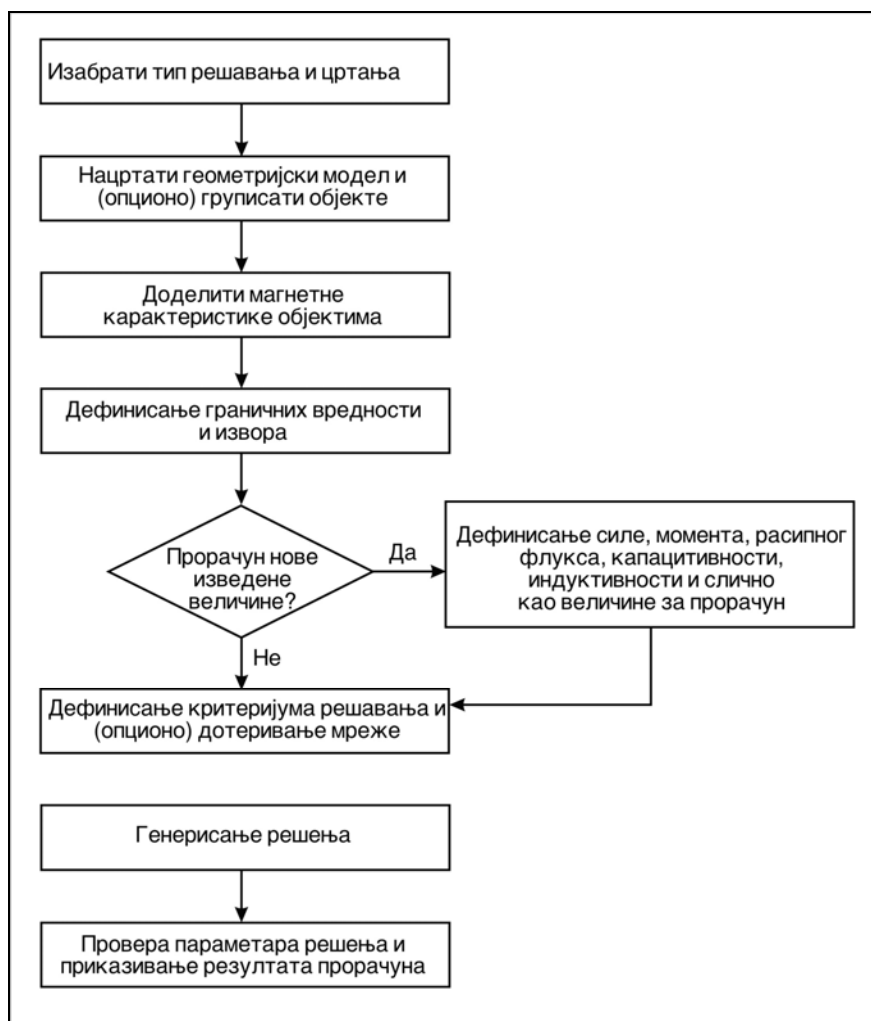
Слика 4: Прозор Maxwell Projects

По дефинисању и означавању пројекта, Maxwell 2D се отвара притиском дугмића Open. Командни прозор Maxwell 2D је приказан на слици 5. Овај прозор представља основу целог пројекта из кога се касније позивају различити програмски модули које корак по корак моделују и прорачунавају поље одређене структуре. Сви међурезултати, као и крајњи резултати су читљиви из овог прозора.



Слика 5: Командни прозор Maxwell 2D одговарајућег пројекта

Генерална процедура креирања и решавања модела димензионе структуре за коју се анализира електрично или магнетно поље је сумирана алгоритмом чија је шема приказана на слици 6.



Слика 6: Алгоритам генералне процедуре креирања и решавања модела

У редовима који следе активности приказане у блоковима алгоритма са слике 4 ће бити објашњене на примерима коришћења одговарајућих модула пакета Maxwell 2D, који су иначе веома добро и сликовито представљени у помоћним документима овог софтвера [3].

### Типови решавања и цртања

У зависности од врсте поља које се прорачунава, електрично или магнетно, програмски пакет Maxwell 2D подржава неколико типова решавања. Ови типови се у ствари разликују по Максвеловим једначинама које третирају методом коначних елемената, односно по основним величинама које прорачунавају. У табели 1 је дат преглед ових типова решавања и врсте резултата које оне нуде.

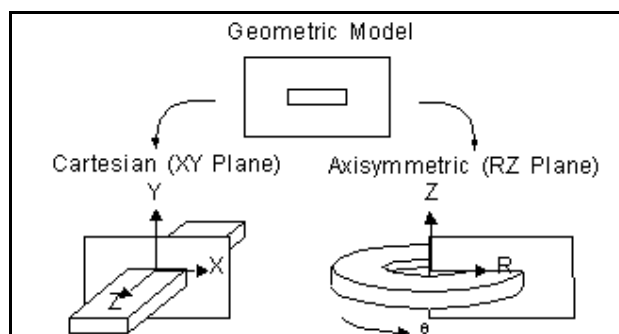


Тип поља који се решава	Тип решавања	Величине које се прорачунавају	Величине које су израчунате
Електрично поље	Electrostatic	$\phi$ (једносмерни електрични потенцијал)	<b>E, D</b>
	AC Conduction	$\phi(j\omega)$ (наизменични електрични потенцијал)	<b>E(j<math>\omega</math>), D(j<math>\omega</math>), J(j<math>\omega</math>)</b>
	DC Conduction	$\phi$ (једносмерни електрични потенцијал)	<b>E, J</b>
Једносмерно магнетно поље	Magnetostatic	$A_z$ или $A_\phi$ (једносмерни магнетни потенцијал)	<b>H, B</b>
Наизменично магнетно поље	Eddy current	$A_z(j\omega)$ или $A_\phi(j\omega)$ (једносмерни магнетни потенцијал) и $\phi(j\omega)$ (наизменични електрични потенцијал)	<b>H(j<math>\omega</math>), B(j<math>\omega</math>), J(j<math>\omega</math>)</b>
	Eddy axial	$H_z(j\omega)$ (наизменично магнетно поље)	<b>E(j<math>\omega</math>), D(j<math>\omega</math>), J(j<math>\omega</math>)</b>

Табела 1: *Различити типови решавања поља које подржава пакет Maxwell 2D SV*

У зависности од изабраног типа решавања, као и самог проблема, постоје два координатна система (видети слику 7) која могу да се примене:

1. Правоугаони (X-Y) координатни систем ефикасно моделује проблеме чији је попречни пресек инваријантан дуж z-осе;
2. Радијални (R-Z) координатни систем ефикасно моделује проблеме чији је попречни пресек инваријантан радијално у односу на z-осу као осу симетрије;



Слика 7: *Различити координатни системи цртања модела*

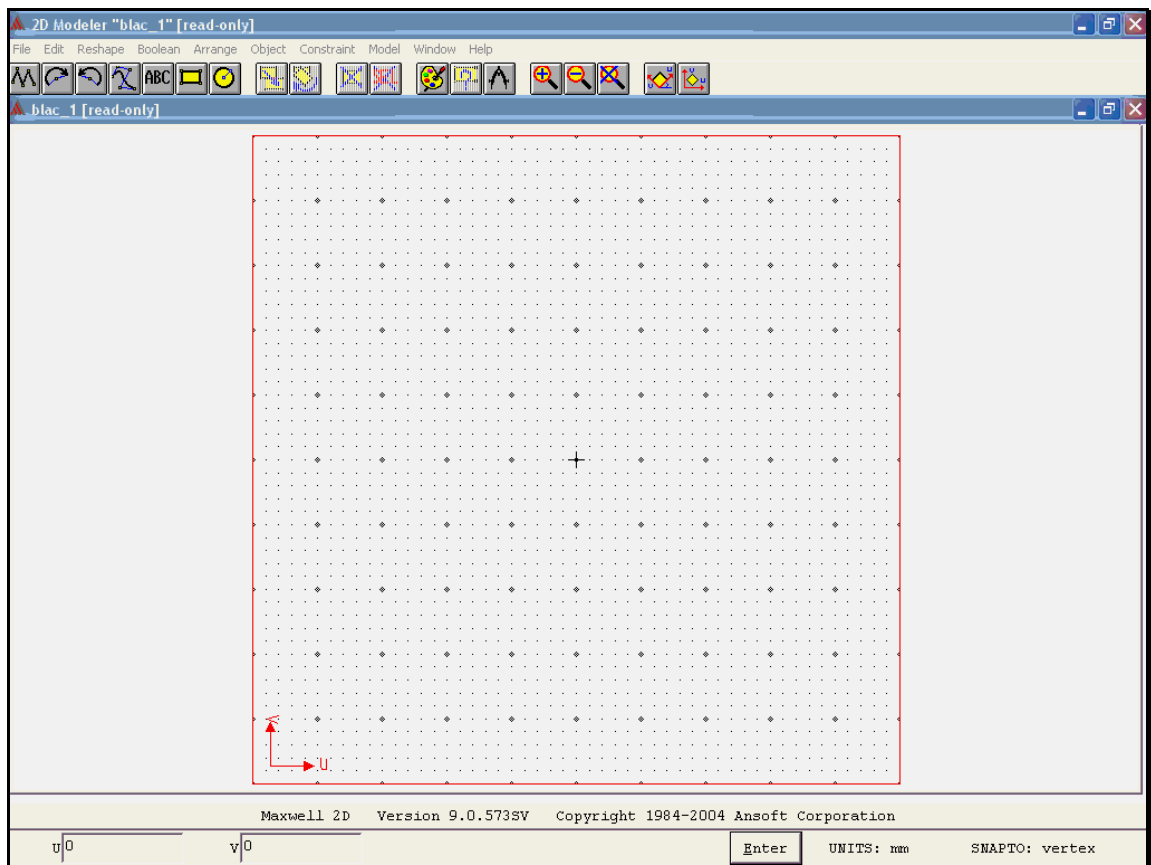
Типови решавања и одговарајућег координатног система се бирају преко прва два дугмића са леве стране командног прозора Maxwell 2D приказаног на слици 5. Будући да је

проблем јасно дефинисан у другој глави, интуитивно је јасно да ће је задовољавајући тип магнетостатички, а координатни систем радијални. У даљем раду када дође до разлика између другачијих типова решавања, описиваће се само магнетостатички.

## 2D Modeler – цртање геометријског модела

Цртање и модификовање геометријских модела попречних пресека система који се решавају је омогућено у оквиру 2D Modeler програмског модула. Овај модул представља интерактивно окружење које подржава велики број команди и палета које су типичне за Windows апликације. Као резултат његовог коришћења настају фајлови са екстензијом: \*.sm2. Такође је могуће нацртати модел у оквиру много моћнијег AutoCAD софтверског пакета, а потом конвертовати документ помоћу Translator функције Maxwell контролне листе (видети слику 3).

Пакет 2D Modeler се отвара притиском на наредбу Draw која се налази у оквиру Define Model падајућег менија командног прозора Maxwell 2D (видети слику 5). Прозор који се том приликом отвара је приказан на слици 8.



Слика 8: Прозор програмског пакета 2D Modeler

Команде које се налазе у оквиру командне линије 2D Modeler-а, а нису типичне за Windows апликације значе:

Reshape            мења облик геометријских модела

Boolean	уједињује или пресеца објекте који се преклапају
Arrange	помера, ротира и пресликава објекте и текст
Object	креирање посебних врста објеката (попут круга, правоугаоника, кружног лука и слично)
Constraint	модификује величине које могу да мењају облик објекта
Model	дефинисање начина на који ради миш, мери раздаљину између тачака и објекта
Window	креира подпрозоре који омогућавају да се исти модел увелича или види из другог угла, бира и манипулише са активним прозором; дефинише радно окружење (попут координатног система, метричког система, лењира, величине прозора и слично)

Крајњи модел се састоји из већег броја објеката који су представљени затвореном линијом. Ове линије могу да се уносе тачку по тачку, унесећи координате сваке тачке у оквиру статусне линије која је приказана на дну слике 6, или директно цртајући одређене геометријске облике користећи наредбу Object. Када се линија затвори програм аутоматски проглашава нови објекат и тражи да се унесе име и боја којом ће исти бити дефинисан (видети слику 9).



Слика 9: Дефинисање имена и боје новог објекта

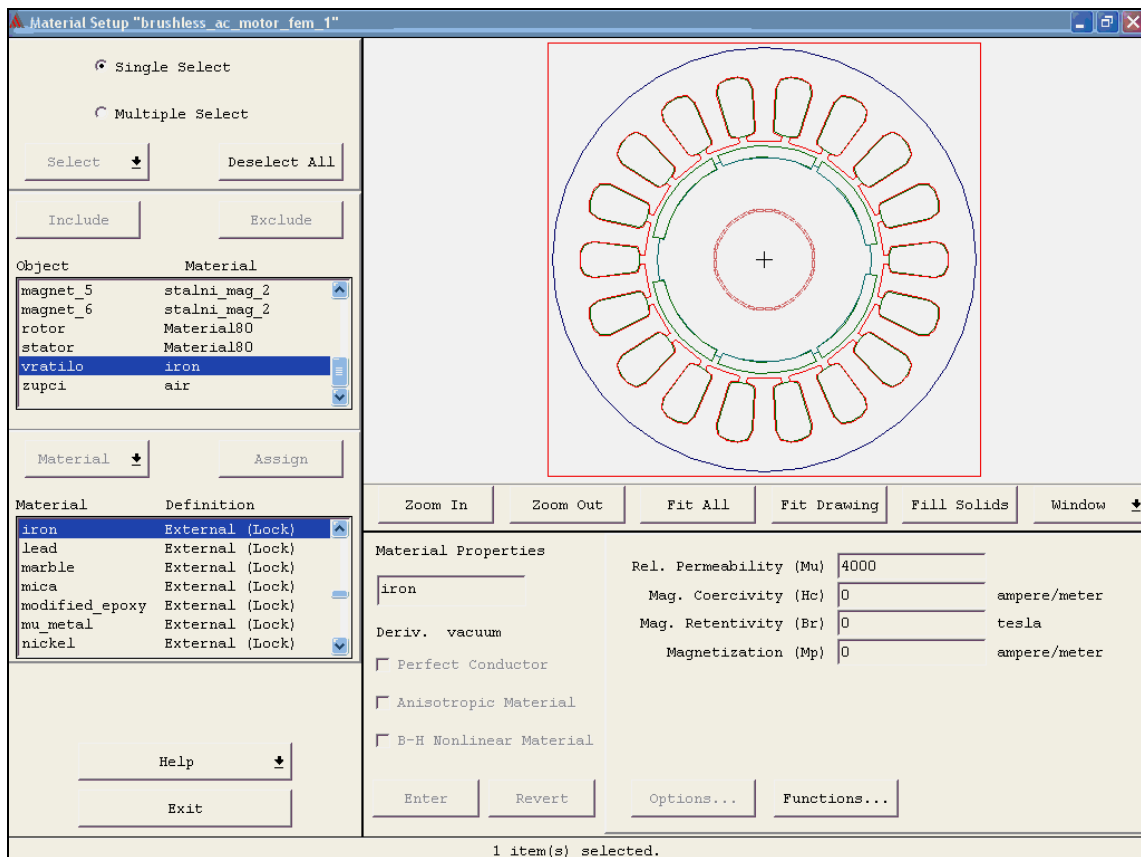
Неки основни принципи којих се треба држати су да геометрија треба да буде прецизна, али једноставна тако да се највећа и најмања димензија не разликују за више од три реда величине. Треба водити рачуна да програм сам уноси објекат који представља позадину, односно околину нацртаног модела. Ова околина касније се дефинише као електромагнетно неутралан систем, или под утицајем екстерног поља. При одабирању објеката треба водити рачуна о граничним вредностима које ће се уносити касније. Уколико се један објекат налази у потпуности унутар другог, магнетни материјал који ће се касније доделити спољашњем објекту се простире до граница унутрашњег објекта. Такође треба водити рачуна да не дође до самопресецања, нити до преклапања између два или више објеката.

Опционо је могуће груписати већи број објеката који су електрично или магнетно идентични, што омогућава да касније активности у вези са овим објектима буду једноставније будући да им се обраћа као једном објекту.

## **Material Manager – додељивање магнетних карактеристика објектима**

Програмски модул Material manager омогућава додељивање карактеристика материјала објектима модела. Прозор овог модула, који се стартује двоструким кликом дугмића Setup Material командног прозора Maxwell 2D, је приказан на слици 10.

Овај програмски пакет садржи базу унапред дефинисаних материјала чије се карактеристике могу доделити објектима модела. У оквиру ње се разликује глобална база, која садржи такозване екстерне материјале који се могу користити у свим Maxwell програмима, и локална база која у почетку представља копирану глобалну базу материјала за потребе Maxwell 2D програма. У оквиру се ње се могу додавати потпуно нови материјали или модификовати тек постојећи. Посебно је zgodna могућност модификације постојећих материјала зато што је могуће у том случају дефинисати групу сличних материјала који се разликују у малим нијансама, тако да каснија крупна промена карактеристика се одражава на целу групу ових материјала.



Слика 10: Прозор програмског пакета Material Manager

Додавање или модификација материјала је могућа отварањем падајућег менија Material, те кликом на дугмић Add или Derive, респективно. Тада је могуће изабрати један од типова материјала: идеалан проводник, анизотропни или нелинеаран материјал.

Магнетне карактеристике идеалног проводника у оквиру магнетостатичког типа решавања, који у ствари представља магнетно линеарни материјал, се изражавају преко релативне пермеабилности  $\mu_r$ , коерцитивног магнетног поља  $H_c$ , реманентне магнетне индукције  $B_r$ , и сталне магнетизације  $M_p$ . Будући да је међусобна зависност ових величина дата формулом:

$$B = \mu_0 \cdot (\mu_r \cdot H + M_p) \quad (1)$$

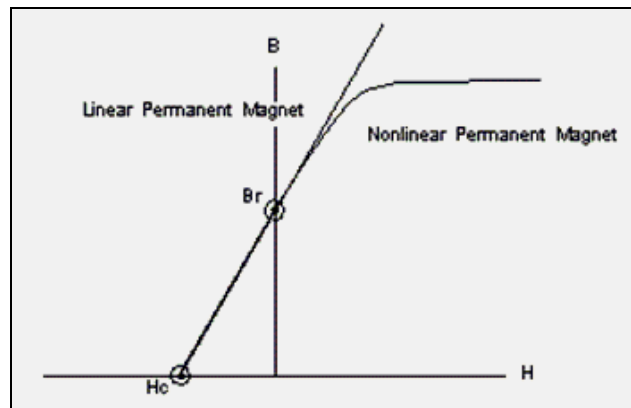
јасно је да је довољно доделити вредност за две произвољне величине да би проводник био магнетно дефинисан.

Стални магнет има оперативну карактеристику у другом квадранту В-Н координатног система, и она може да се представи нелинеарном хистерезисном кривом, или линеаризацијом у том оперативном делу. Овакав случај је приказан на слици 11.

Полазећи од једначине (1), за познате дефиниције реманенте магнетне индукције и коерцитивног магнетног поља, једначина која потпуно дефинише линеаризовану карактеристику сталног магнета у његовом оперативном делу је дата једначином (2):

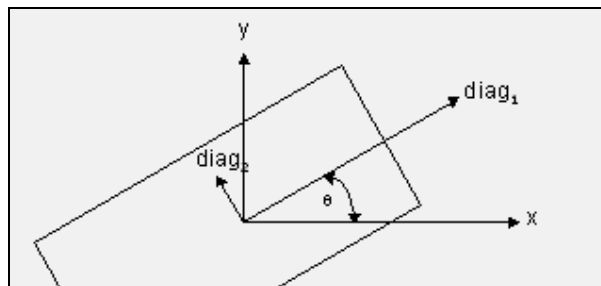
$$B_r = \mu_0 \cdot M_p = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H_c \quad (2)$$

На овај начин је јасно да, као и у случају идеалног проводника, магнетна карактеристика сталног магнета је потпуно дефинисана додељивањем вредности било које две величине.



Слика 11: Линеаризација магнетне карактеристике сталног магнета у његовом оперативном делу

Код неких објеката је потребно додатно дефинисати векторске карактеристике поларизације или магнетизације, као у случају сталних магнета, или функционалне карактеристике, као у случају анизотропних материјала који мењају своје карактеристике дуж одређене осе. У таквим случајевима се користи локални координатни систем који је везан за сам објекат, и паралелан са глобалним x-y координатним системом. Дефинисање правца и смера вектора или функције се остварује додељивањем вредности угла  $\theta$  између одговарајућих тензора, која су дата као  $\text{diag}_1$  и  $\text{diag}_2$  на слици 12, и оса локалног координатног система објекта. Величине које се могу дефинисати као анизотропне за случај магнетостатичког типа решавања су пермеабилност и магнетизација.

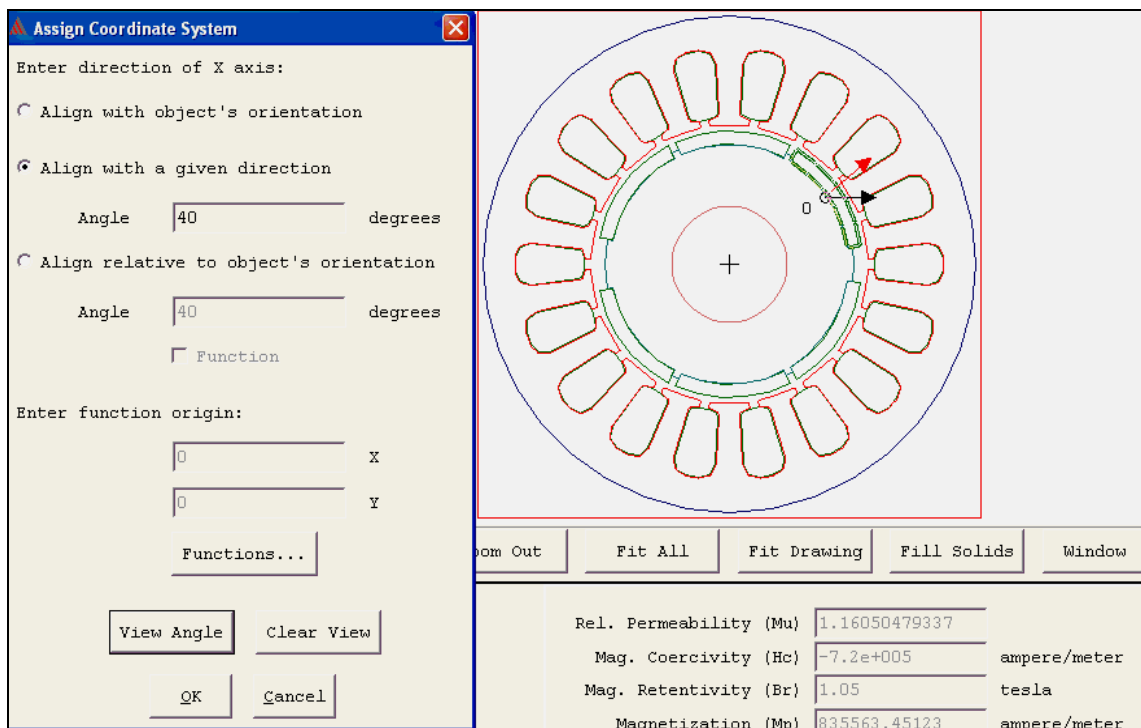


Слика 12: Дефинисање тензора у локалном координатном систему објекта

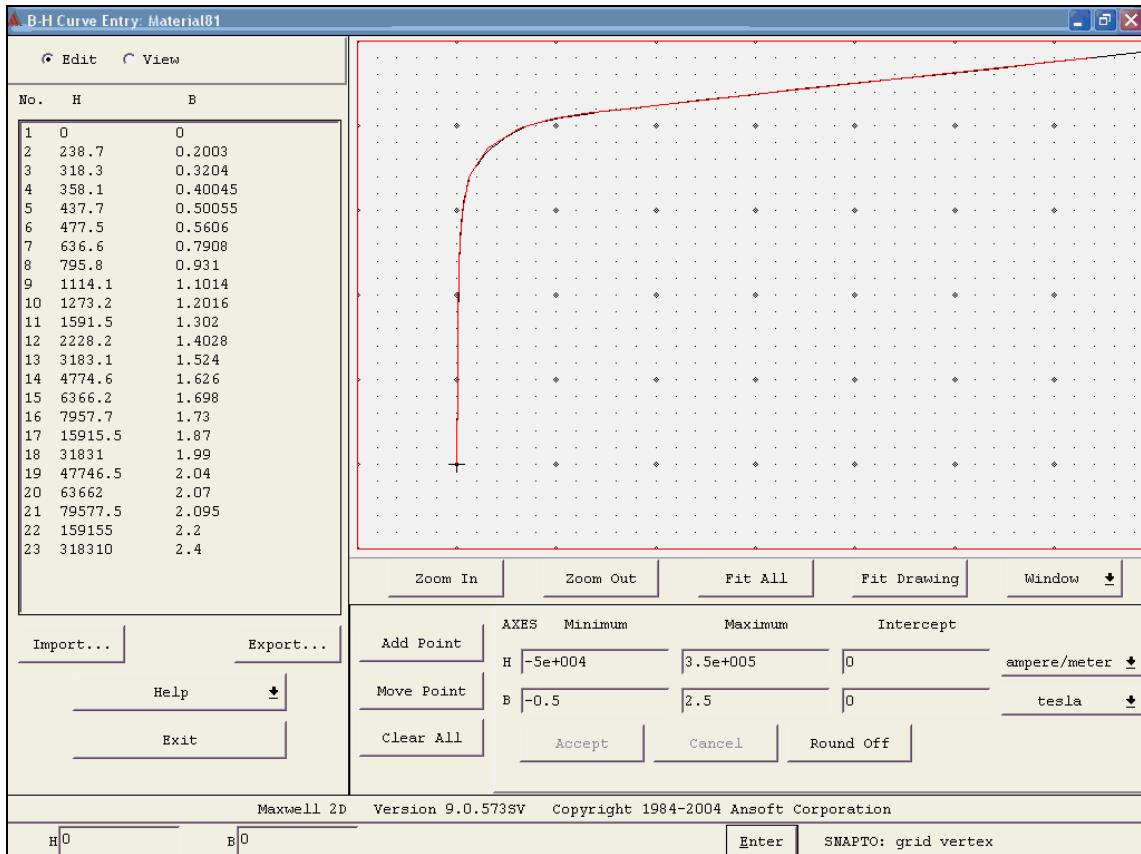
Пример дефинисања вектора магнетизације за случај једног сталног магнета PMSM-а је приказан на слици 12. Црном стрелицом је приказана x-оса локалног координатног система објекта, док је црвеном бојом дат смер самог вектора који је дефинисан уносом угла  $\theta$  у оквиру прозора Assign Coordinate System. Приказ обе стрелице се остварује кликом миша на дугмић означен са View Angle, који је приказан на слици 13.

Уношење новог нелинеарног материјала захтева цртање његове B-H карактеристике магнетнећа. Дефинисање ове карактеристике се остварује директним уношењем B и H координата, или директним цртањем тачака у B-H координатном систему, који је приказан на слици 14.

Пошто је одговарајући материјал изабран или креиран, преостаје да се притском на дугмић Assign, који је се налази у оквиру прозора програмског пакета Material Manager приказаног на слици 10, селектованом објекту доделе управо дефинисане карактеристике.



Слика 12: Дефинисање правца вектора магнетизације сталног магнета

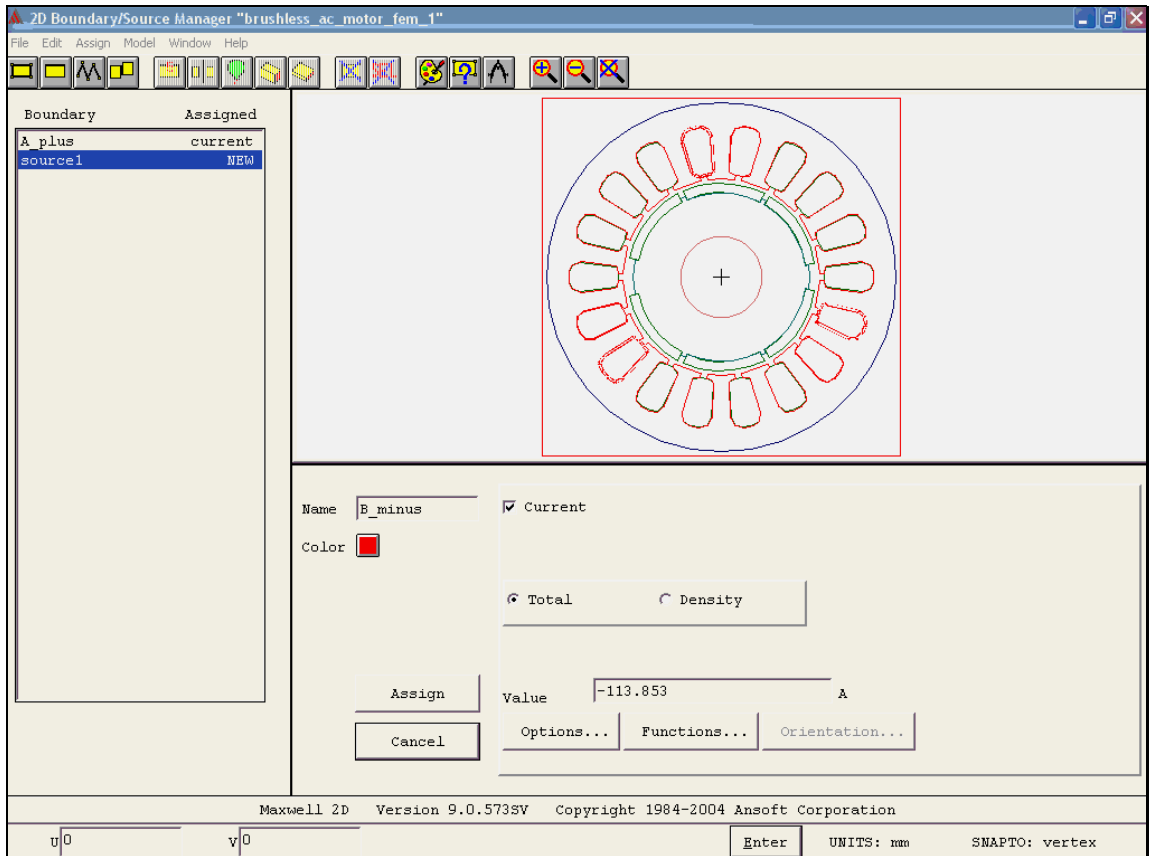


Слика 14: Дефинисање карактеристике магнетног материјала

## 2D Boundary/Source Manager – дефинисање граничних услова и извора

Програмски модул 2D Boundary/Source Manager, који је приказан на слици 15, омогућава дефинисање електромагнетних извора и граничних услова.

За магнетостатички тип решавања електромагнетских појава извор се дефинише као једносмерна струја кроз проводник, која може бити дата као укупна вредност када се сматра да јој је густина константна током целог проводника, или као густина струје када се иста може дефинисати и као функција позиције. Као извор могуће је дефинисати и екстерно статичко магнетно поље, и перманентне магнете.

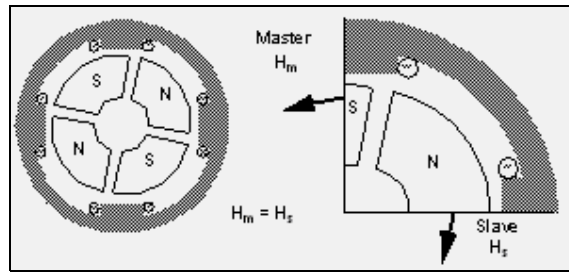


Слика 15: Прозор програмског пакета 2D Boundary/Source Manager

За случај магнетостатичког типа решавања могући су следећи гранични услови:

- Default (Neumann and Natural), је иницијално дефинисан; на овај начин дефинисан гранични услов значи нормална компонента магнетне индукције остаје константна;
- Value омогућава да се вредност магнетног потенцијала дуж z-осе,  $A_z$ , дефинише као константна вредност или функција позиције на граници; овај случај се користи најчешће за случај проводника, или када се између два објекта налази веома танак проводник;
- Balloon представља део изван модела који је на тај начин дефинисан као ефикасно изолован од електромагнетног зрачења спољашњих извора;
- Symmetry омогућава значајне уштеде у коришћењу компјутерских ресурса тиме што се геометријски и електрично симетричне структуре не цртају;
- Matching (Master and Slave) користи периодичност у структури модела; наиме, на слици 16 је приказан цео модел попречног пресека мотора са леве стране, и једна четвртина истог која се периодично понавља; гранични део са једне стране (који се дефинише као Assign/Boundary/Slave) у свакој тачки је једнака по интензитету, не обавезно и по смеру, са другом страном (који се дефинише као Assign/Boundary/Master); на овај начин се, као и у прошлом случају, ефикасније користе компјутерски ресурси;





Слика 16: Ефикасно коришћење периодичности структуре модела

На истој слици се може приметити да ниједан други тип граничне вредности се не може применити зато што за приказани положај ротора магнетно поље има и тангенцијалну компоненту.

### Прорачун изведених величина

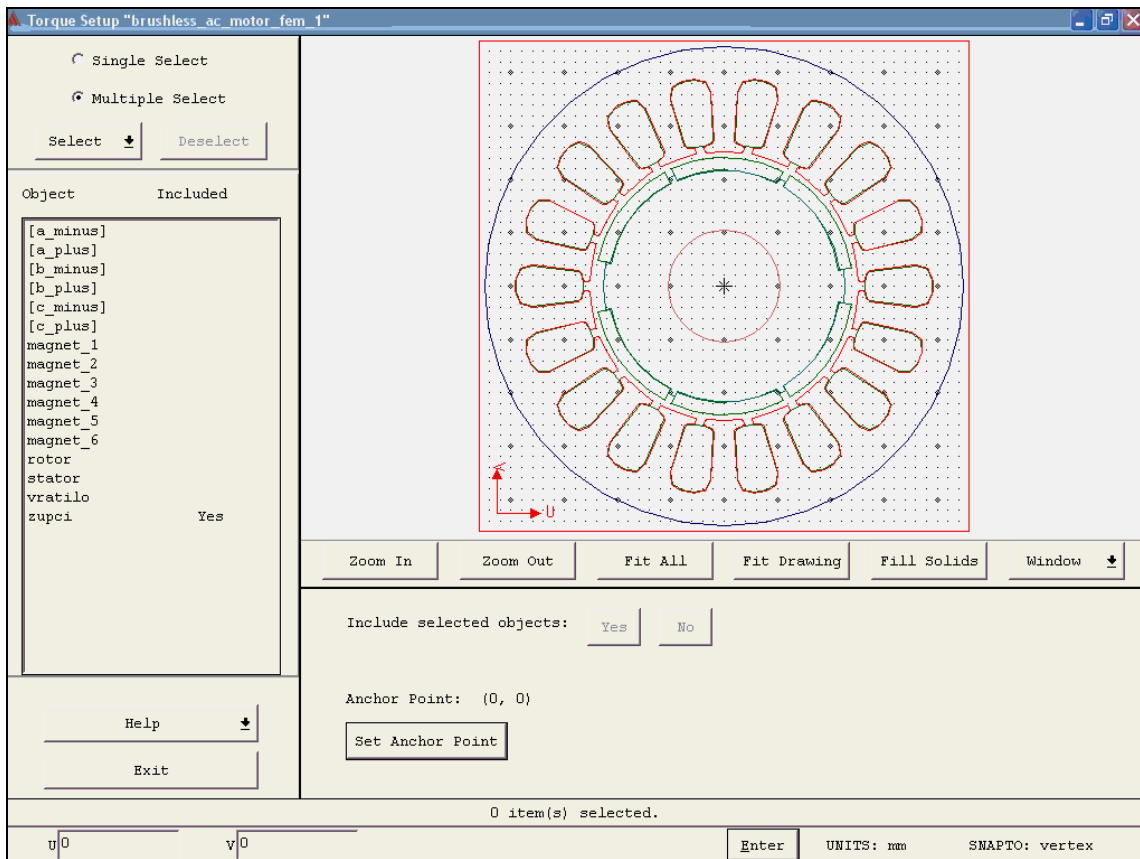
Притиском на Setup Executive Parameters који се налази са леве стране командног прозора Maxwell 2D (видети слику 5), отвара се падајући мени који омогућава прорачун следећих изведених величина: капацитивност, индуктивност, импедансу, адмитансу или кондуктансу проводника (избором наредбе Matrix); механичку силу која делује на одређени објекат (избором Force); електромагнетни моменат (избором Torque), када се дефинише и тачка у односу на коју се моменат рачуна; губици у баку (избором Core Loss), односно линија флукса (избором Flux Lines). На слици 15 је приказан прозор у оквиру кога је могуће дефинисати прорачун електромагнетног момента који делује на одређени објекат модела у односу на тачку ротације (означену као Anchor point).

### Solve Setup – критеријуми решавања

Пошто је до овога тренутка цео модел дефинисан, преостало је да се одреде критеријуми на основу којих ће се мерити успех решавања. Прозор који ово омогућава је приказан на слици 18, а активира се притиском на дугме Setup Solutions Options које се налази у оквиру командног прозора Maxwell 2D. У оквиру овог прозора могуће је дефинисати мрежу, изабрати да ли се као решења очекује само поље или и одређене величине, те одредити критеријум на основу кога ће се даљи адаптивни поступак решавања завршити као успешан.

Раније је речено да је решавање поља методом коначних елемената остварено приказивањем површине модела великим бројем троуглова. Квалитет мреже, а самим тим и оствареног решења, је директно одређен бројем њених елемената. На другу страну, претерано велика мрежа може прилично да исцрпи процесорске ресурсе. Оптимална величина мреже се најчешће добија у неколико итерација, почев од иницијалне која најчешће не даје довољно тачан резултат. Могућност да се као почетна мрежа узме нова, иницијална (Initial Mesh), она која се последња користила (Current Mesh), или да се од почетка ручно прави (Manual Mesh), се одређује у оквиру поља Starting Mesh које је приказано на слици 18.

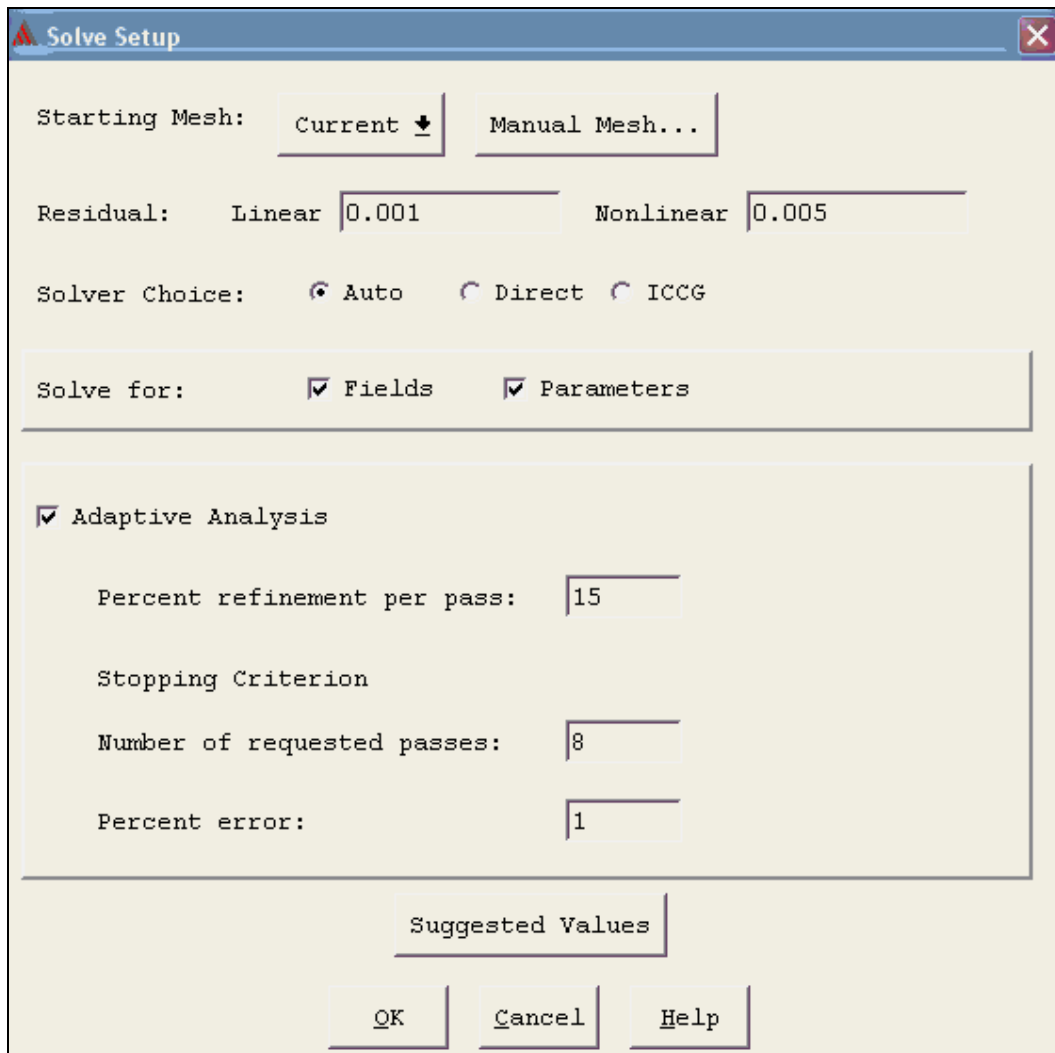
Наредни део на истој слици, Solver Residual, одређује колико близу крајње решење поља у односу на форму Максвелове једначине треба да буде да би задовољило. Сама резидуална вредност представља нормализовану меру квалитета решења. Наиме, решење сваке итерације се враћа у Максвелову једначину и уколико се поклопе, резидуал је једнак нули. У супротном, ако је резидуал различит од нуле, мала корекција у решењу се додаје пред почетак нове итерације. Итеративни поступак се примењује докле код резидуал не буде мањи од специфициране вредности. Важно је уочити да вредност која се унесе у поље резидуала не утиче на мрежу коначних елемената, односно систем итерацијама покушава да смањи резидуал користећи исту мрежу.



Слика 17: Дефинисање електромагнетног момента који делује на објекат зупци за прорачун као изведена величина

Следећа могућност дефинисања критеријума решавања омогућава избор типа матричног решавања поља. У случају коришћења ICCG (incomplete conjugate gradient) могуће је веома брзо решити велике матрице, али у одређеним ситуацијама је могуће да решење неће конвергирати. Директни приступ (direct) сигурно обезбеђује конвергирање решења али знатно спорије. Опција аутоматског избора (auto) дозвољава самом софтверу да процени величину матрице те на основу тога изабере један од два поменута типа решавања матрице.

Адаптивна анализа омогућава итеративну промену мреже, почев од стартне ка оптималној. Одлуку од потреби адаптације мреже софтвер остварује на основу критеријума краја (Stopping Criteria). У случају да овај критеријум није остварен, број троуглова се повећава у пределу где решење није довољно тачно. Овакав приступ омогућава да крајња, оптимална мрежа буде неуниформна, односно значајно гушћа у пределу где се поље значајно мења. Дефинисање начина адаптације почиње уносом броја нових троуглова који се могу унеги у свакој наредној итерацији. Ово је омогућено у оквиру поља Percent Refinement Per Pass. Даљи рад омогућава избор максималног броја адаптивних покушаја (Number of Requested Passes), односно процентну грешку која представља процентуални допринос резидуала на вредност добијеног решења (Percent Error). Адаптивни процес се прекида када је један од два поменута критеријума испуњен.

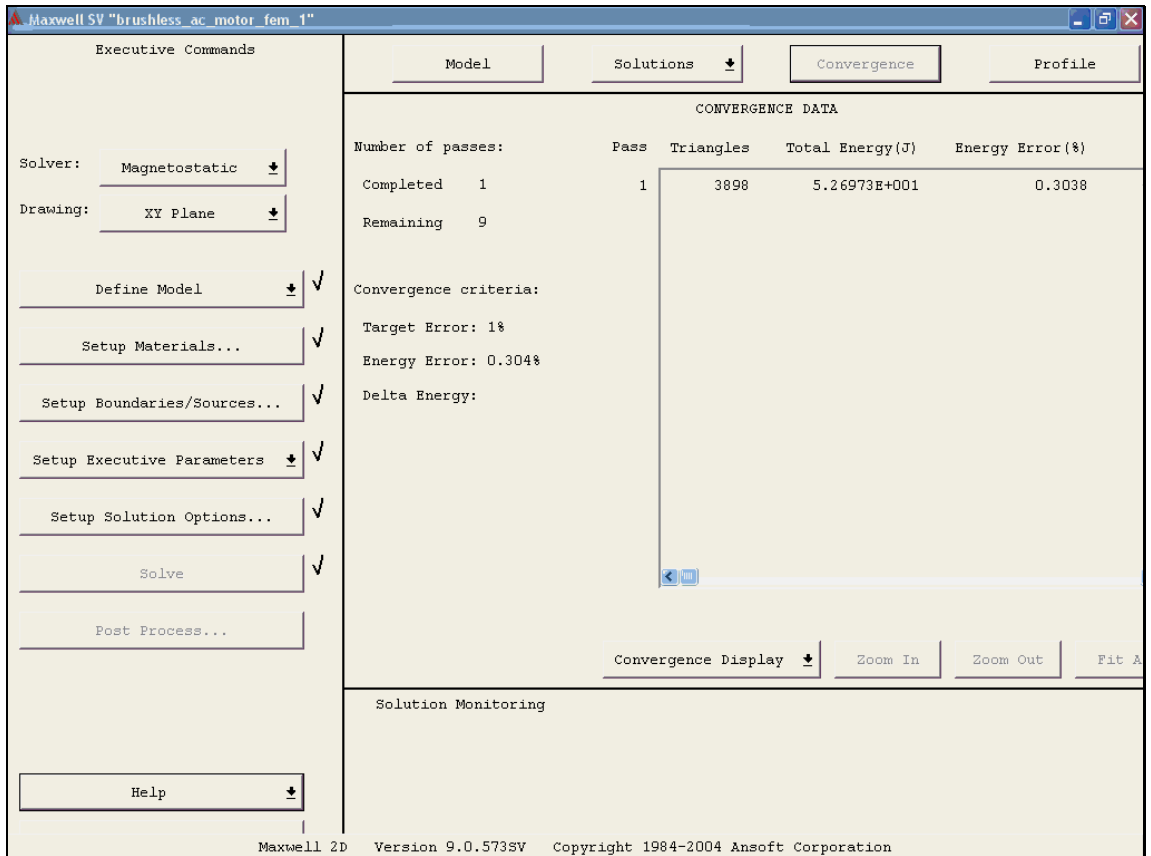


Слика 18: Прозор софтверског дефинисања критеријума решавања

## 2D Post Processor – приказивање резултата прорачуна

По завршетку прорачуна у оквиру командног прозора Maxwell-a, који је приказан на слици 3, могуће је видети широк дијапазон резултата: почев од вредности изведених величина раније дефинисаних (видети слику 15), информације о конвергенцији (видети слику 19), о целом профилу прорачуну, као и извршити инспекцију већ дефинисаних ствари, попут карактеристика материјала, граничних услова и слично.

Стартовање командног прозора који омогућава различито приказивање резултата је могуће притиском дугмића Post Process који се налази у доњем левом углу на слици 19. Прозор који се том приликом отвара је приказан на слици 20.

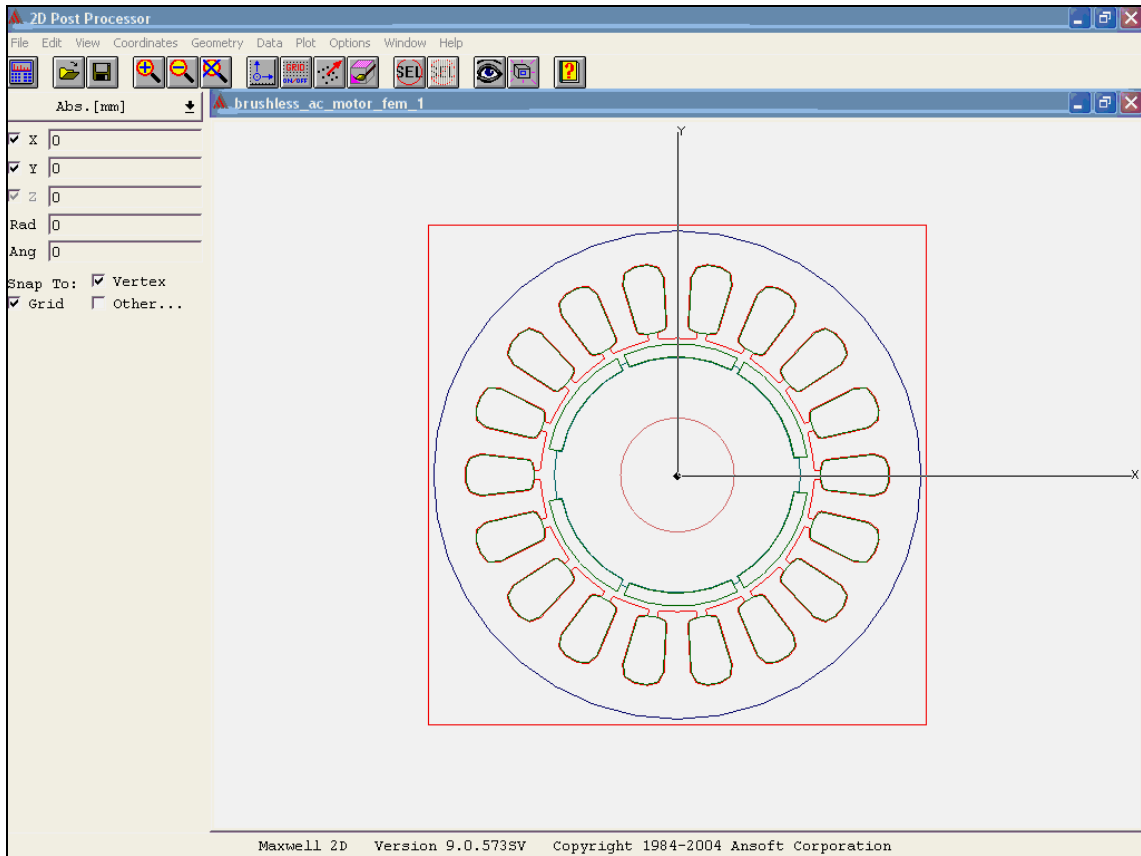


Слика 19: Информације о конвергенцији резултата

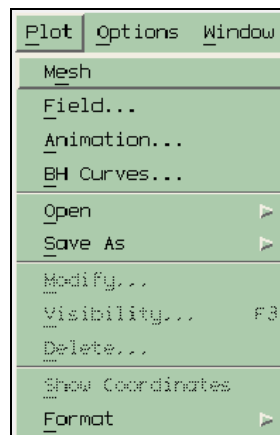
Овај модул софтверског пакета Maxwell 2D омогућава адекватно приказивање прорачунатих величина на основу раније дефинисаног модела и његових карактеристика. Координатни систем и мерне величине дефинисане у оквиру раније описаног 2D Modeler-а остају да важе и овде, док су све величине приказане у SI систему јединица.

Притиском на поље Plot отвара се падајући мени који је приказан на слици 21. Активности које је могуће оставити су: приказивање беле или обојене мреже коначних елемената (Mesh), односно анимираних, обојених или векторски приказаних прорачунатих величина (Animation, Field респективно), подешавање величине, боје, опсега и других атрибута приказа (Visibility, Modify, Format респективно), учитавање ранијих и снимање нових приказа у фајлове (Open, Save респективно), те цртање В-Н карактеристике нелинеарних магнетних материјала са могућношћу приказивања различитих нивоа zasiћености (В-Н Curves). Такође је омогућено да упитом на произвољну тачку координатног система се прикажу прорачунате вредности поља у њој (Show Coordinates).

Величине које је могуће приказати у оквиру магнетостатичког типа решавања су: амплитуду вектора магнетног потенцијала  $A_z$ , амплитуду вектора магнетне индукције  $B(x,y,z)$ , амплитуду вектора магнетног поља  $H(x,y,z)$ , густину струје  $J_z$ , векторе магнетског потенцијала, индукције, поља и густине струје, те густину енергије и коенергије магнетског поља. Геометријске функције у односу на које се приказују ове величине могу да буду тачка, линија или површина које корисник сам дефинише користећи Geometry/Create опцију (видети слику 21), или изабере једну од већ дефинисаних. Наиме, по учињеном прорачуну, 2D Fields Post Processor аутоматски креира површине и листу објеката над којима је поље прорачунато. Кориснику је остављена могућност да одабере једну или више од већ дефинисаних површина или објеката.



Слика 20: Прозор програмског модула 2D Post Processor



Слика 21: Plot падајући мени

Све до сада поменуте приказе прорачунатих величина или мреже је могуће поређати у кадровима једне иза друге са циљем креирања анимације. Прозор који омогућава једноставно повезивање оваквих кадрова се отвара притиском на наредбу Animation која се налази у оквиру Plot падајућег менија приказаног на слици 21.

Приказивање нелинеарне В-Н карактеристике меких феромагнетних материјала је могуће приказати користећи наредбу ВН Curves. Употребом наредбе Show Coordinates, која се

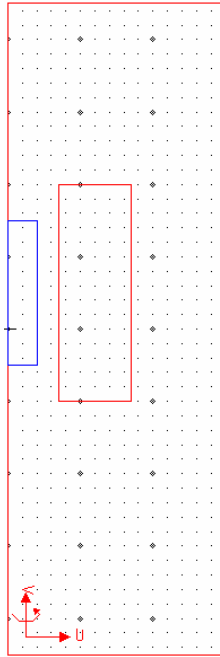
налази у оквиру истог падајућег менија, могу се одредити нивои засићености у тачкама од интереса на В-Н карактеристици.

#### 4. Практично решавање проблема

Практично решавање проблема описаног у глави 2 приказано је најпре поступним описом цртања и дефинисања соленоида и феромагнетског материјала, а потом и приказом резултата. Као што је описано у глави 2, биће посматране три позиције феромагнетског материјала и соленоида. Све три позиције су реализоване у оквиру различитих пројаката (под називима `solenoid_position1.pjt`, `solenoid_position2.pjt`, `solenoid_position3.pjt`, респективно) како би у евентуалном каснијем раду свака позиција могла понаособ да буде реализована.

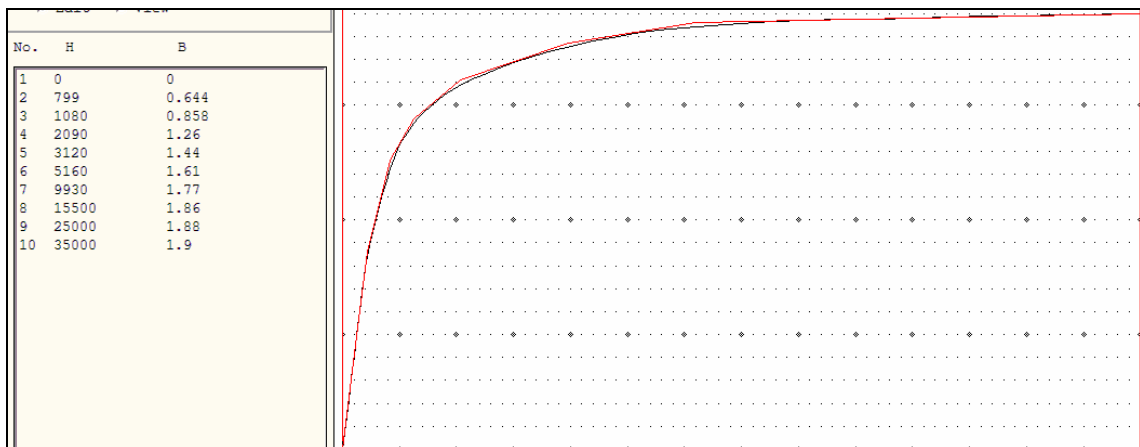
#### Дефинисање параметара симулатора

- ✓ Дефинисан пројекат: `solenoid_position1.pjt` у оквиру одговарајућег поддиректоријума
- ✓ Solver: Magnetostatic, Drawing: RZ Plane
- ✓ Цртање модела:
  - Window/Grid Settings – правоугаони приказ (Grid: Cartesian),  $dU=0.1$ ,  $dV=0.1$
  - Н А П О М Е Н А: приметити да се притиском на десни тастер миша прекида започета команда, а да се упутства у вези са тренутном активношћу се могу прочитати у оквиру текстуалног дела који се налази на дну прозора
  - Model/Drawing Size – Minima  $R=0$ ,  $Z=-4.5$ ; Maxima  $R=3$ ,  $Z=4.5$
  - Цртање једноставног модела се остварује цртањем два правоугаоника притиском на одговарајућу икону и дефинисањем наизменичних темена
  - Н А П О М Е Н А: када се два или више објекта преклопе, или један објекат самопреклопи, софтвер одмах упозорава и не дозвољава снимање даљих активности
  - Овим је цртеж модела готов, и налази се на слици 22



Слика 22: Изглед нацртаног модела: соленоид (црвена боја) и феромагнетски материјал (плава боја)

- ✓ Груписање објеката модела:
  - На основу слике 22 очигледно је да груписање објеката није потребно
  
- ✓ Додељивање карактеристика објектима
  - Карактеристика магнећења феромагнетског материјала и одговарајућа нелинарна В-Н карактеристика приказана је на слици 23
  - Соленоид: бакар
  - Околина: ваздух



Слика 23: Карактеристика магнећења феромагнетског материјала

- ✓ Дефинисање граничних вредности и извора
  - Јачина тренутне вредности струје соленоида једнака је 10000А; Дефинисање се остварује следећим редоследом: Edit/Select/Object/By clicking, обележи се соленоид, Assign/Source/Solid, да се име и јачина струје, након чега се притисне дугмић Assign.
  - Дефинисана околина као balloon, то јест електромагнетно изолован систем;
  
- ✓ Дефинисање величина прорачуна
  - Дефинише се механичка сила која делује на феромагнетски материјал
  
- ✓ Дефинисање критеријума решавања: узете препоручене вредности;

## Резултати

Добијени резултати са коментарима приказани су на сликама од 24 до 38.

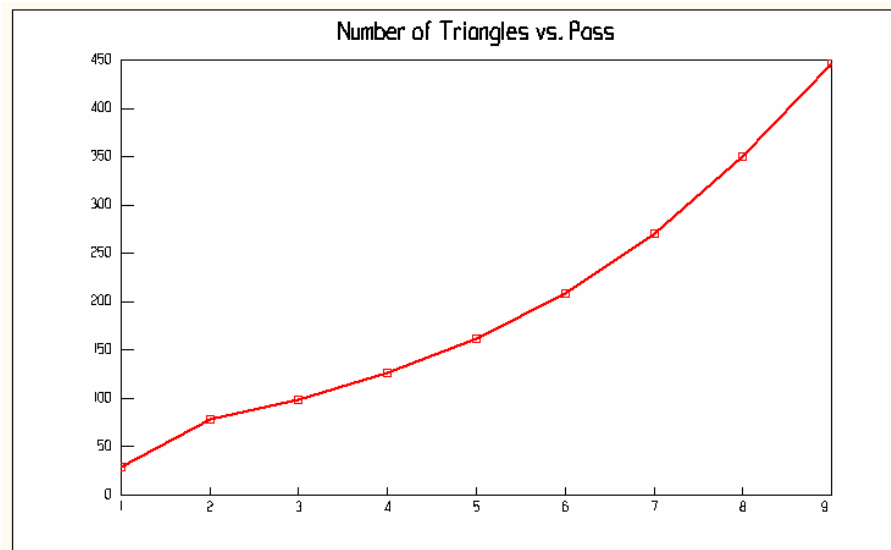
FORCE SOLUTION	
Force Setup Objects	Force Value (newtons)
fero_mat	F(z): 17.8277

Слика 24: Интензитет механичке силе која делује на феромагнетски материјал у спољашњем магнетском пољу када се налази у позицији 1

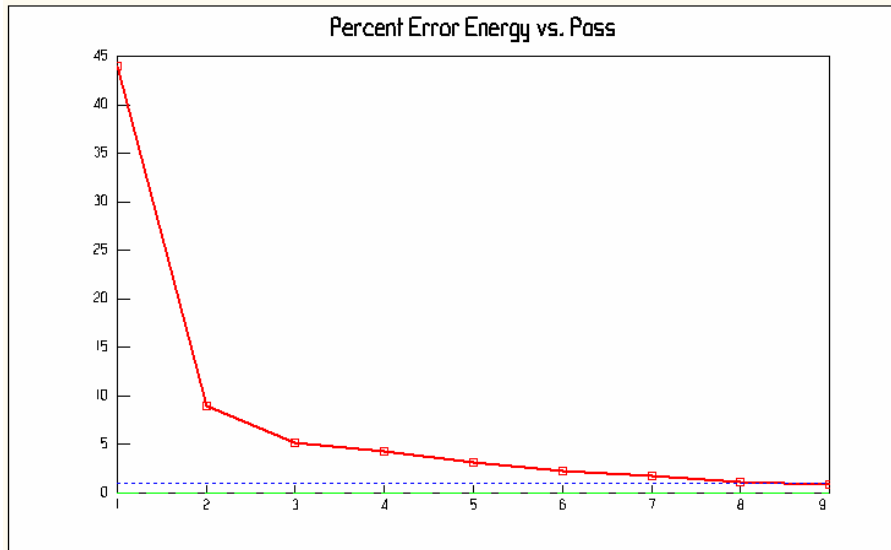


CONVERGENCE DATA						
Number of passes:	Pass	Triangles	Total Energy(J)	Energy Error(%)	Mag Force(N)	
Completed	9	1	29	1.58093E+000	44.0131	1.08982E+001
Remaining	1	2	78	1.55688E+000	8.9246	1.11304E+001
		3	99	1.56901E+000	5.2052	1.19594E+001
		4	127	1.56985E+000	4.2463	1.44015E+001
Convergence criteria:		5	162	1.58220E+000	3.2158	1.58116E+001
Target Error: 1%		6	209	1.59008E+000	2.2521	1.52860E+001
Energy Error: 0.908%		7	270	1.60353E+000	1.7117	1.80935E+001
Delta Energy: 0.229%		8	350	1.60414E+000	1.1555	1.76237E+001
		9	446	1.60048E+000	0.9084	1.78277E+001

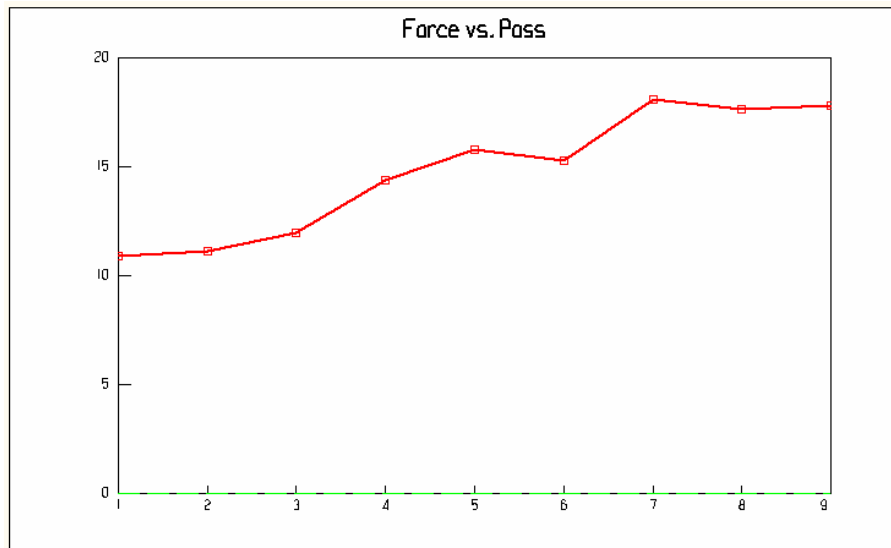
Слика 25: Кораци конвергенције у случају када се феромагнетски материјал у спољашњем магнетском пољу када се налази у позицији 1



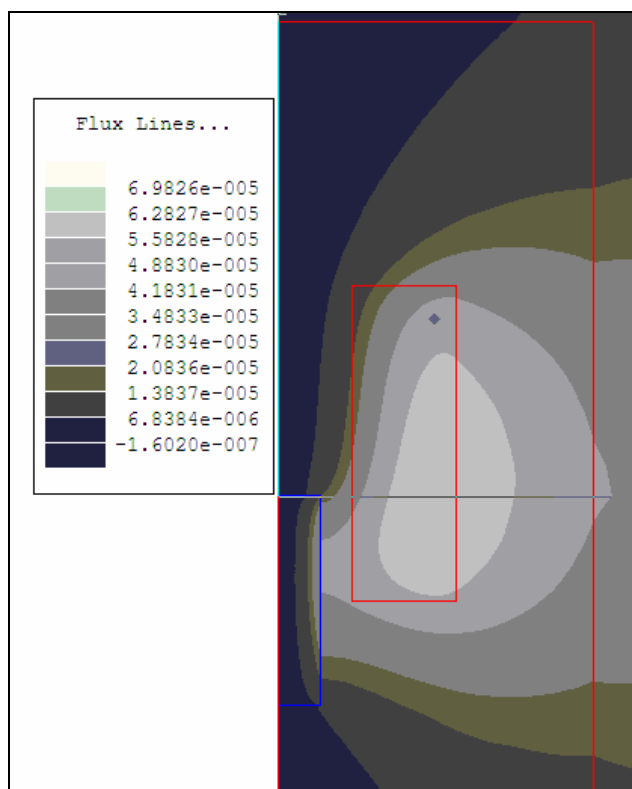
Слика 26: Број троуглова мреже у функцији корака конвергенције у случају када се феромагнетски материјал у спољашњем магнетском пољу када се налази у позицији 1



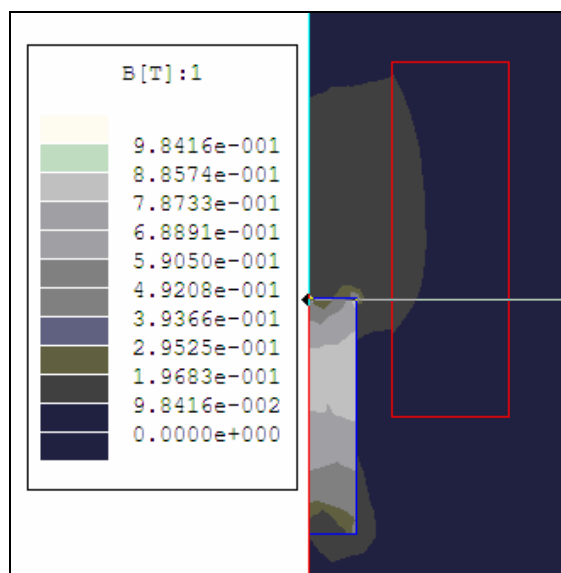
Слика 27: Енергетска грешка изражена у процентима у функцији корака конвергенције у случају када се феромагнетски материјал у спољашњем магнетском пољу када се налази у позицији 1



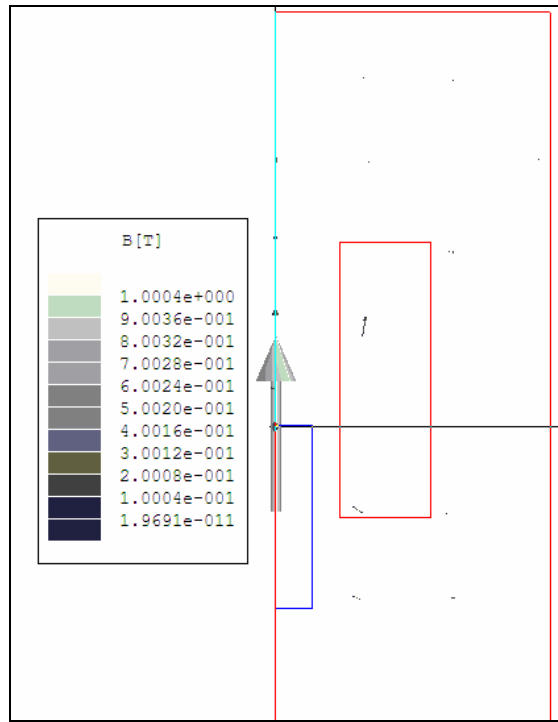
Слика 28: Интензитет механичке силе у функцији корака конвергенције у случају када се феромагнетски материјал у спољашњем магнетском пољу када се налази у позицији 1



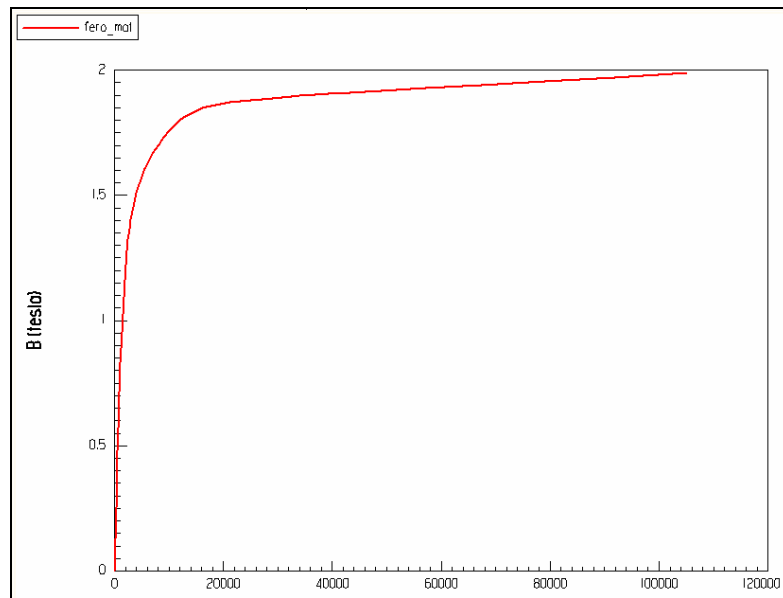
Слика 29: Интензитет магнетског флуksа у случају када се феромагнетски материјал у спољашњем магнетском пољу када се налази у позицији 1



Слика 30: Интензитет магнетске индукције у случају када се феромагнетски материјал у спољашњем магнетском пољу када се налази у позицији 1



Слика 31: Вектор магнетског флуksа у случају када се феромагнетски материјал у спољашњем магнетском пољу када се налази у позицији 1



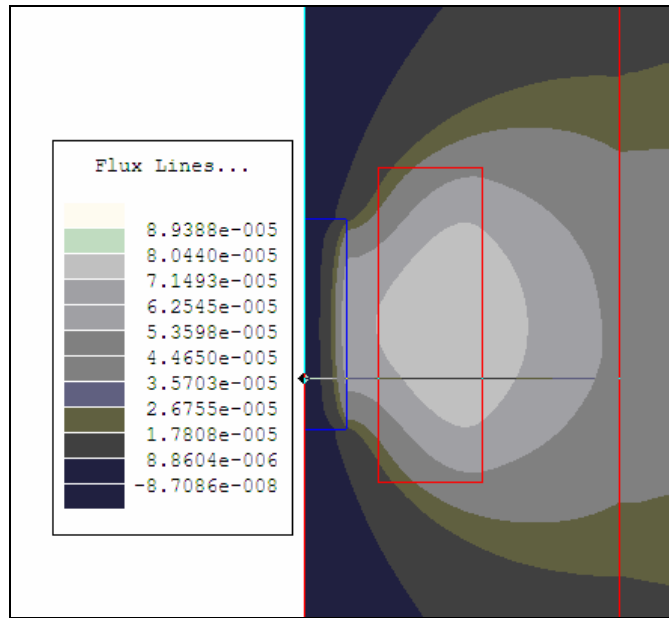
Слика 32: Карактеристика магњења феромагнетског материјала у случају када се феромагнетски материјал у спољашњем магнетском пољу када се налази у позицији 1 – на основу слике може се уочити да феромагнетски материјал није ушао у засићење

FORCE SOLUTION	
Force Setup Objects	Force Value (newtons)
fer_mat	F(z): 0.703091

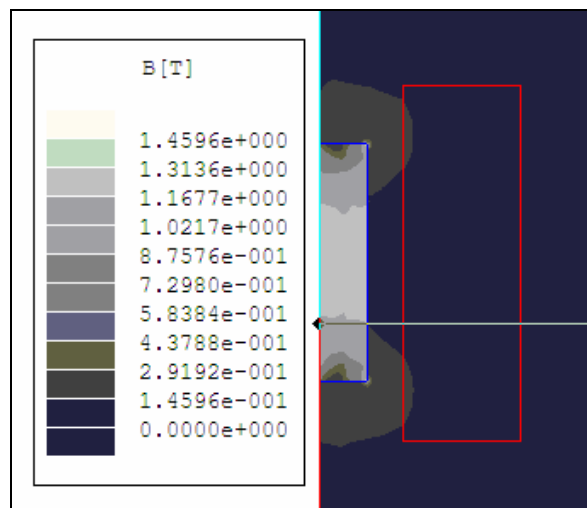
Слика 33: Интензитет механичке силе која делује на феромагнетски материјал у спољашњем магнетском пољу када се налази у позицији 2

CONVERGENCE DATA						
Number of passes:		Pass	Triangles	Total Energy(J)	Energy Error(%)	Mag Force(N)
Completed	10	1	32	2.07470E+000	45.2045	1.67990E+000
Remaining	0	2	84	2.11169E+000	18.0682	7.13675E+000
		3	107	2.07378E+000	8.5680	3.98444E-001
Convergence criteria:		4	137	2.02496E+000	7.2888	4.44640E-001
		5	177	2.09634E+000	4.6743	3.53393E+000
Target Error:	1%	6	229	2.13103E+000	2.8764	1.38344E+000
Energy Error:	0.848%	7	295	2.13398E+000	1.7851	5.39001E-001
Delta Energy:	0.0179%	8	381	2.12956E+000	1.3966	5.59457E-003
		9	487	2.12786E+000	1.0182	2.04548E-001
		10	628	2.12748E+000	0.8481	7.03091E-001

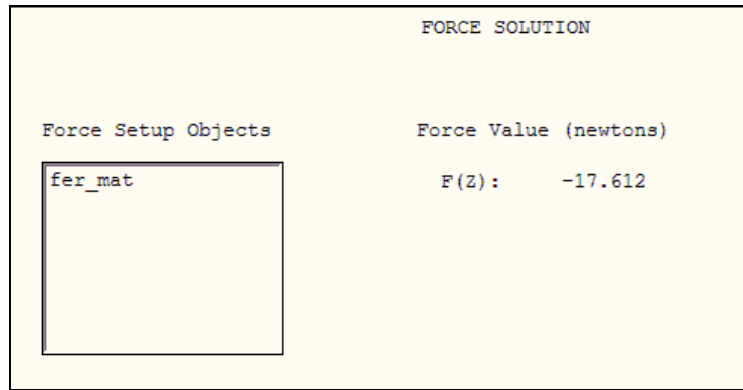
Слика 34: Кораци конвергенције у случају када се феромагнетски материјал у спољашњем магнетском пољу када се налази у позицији 2



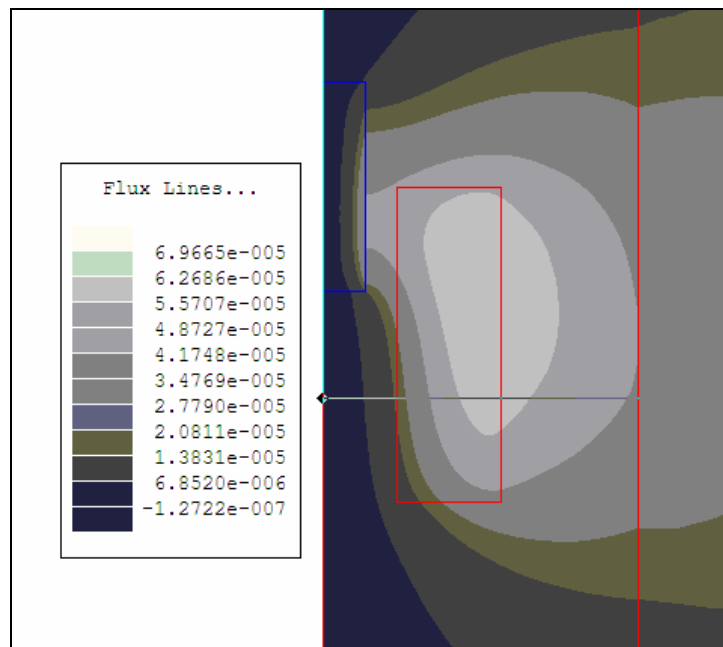
Слика 35: Интензитет магнетског флукса у случају када се феромагнетски материјал у спољашњем магнетском пољу када се налази у позицији 2



Слика 36: Интензитет магнетске индукције у случају када се феромагнетски материјал у спољашњем магнетском пољу када се налази у позицији 2



Слика 37: Интензитет механичке силе која делује на феромагнетски материјал у спољашњем магнетском пољу када се налази у позицији 3



Слика 38: Интензитет магнетског флукса у случају када се феромагнетски материјал у спољашњем магнетском пољу када се налази у позицији 3

### Закључак

Тема овог рада је употреба методе коначних елемената за симулацију електромеханичког претварања енергије проузроковане кретањем феромагнетског материјала у спољашњем магнетском пољу. Најпре је представљен софтверски пакет Maxwell 2D, производ америчке компаније Ansoft, а потом је исти искоришћен за анализу дефинисаног проблема. Софтвер је веома једноставан за употребу и омогућава брзо добијање валидних резултата.

### Литература

- [1] Компанија Ansoft, [www.ansoft.com](http://www.ansoft.com)
- [2] Милош Петровић, Електромеханичко претварање енергије, Београд 1994.
- [3] Maxwell 2D help