ЛАБОРАТОРИЈСКА ВЕЖБА IV

СИМУЛАЦИЈА ИНДУКЦИОНОГ ЗАГРЕВАЊА

У ПРОГРАМСКОМ ПАКЕТУ COMSOL

Вежбу припремили:

асистент Александапор Таталовић и истраживач сарадник Урош Радоман

1. УВОД

Циљ лабораторијске вежбе је да се студенти упознају са применом софтвера базираног на методи коначних елемената у анализи индукционог загревања. Електромагнетске и топлотне појаве су спрегнуте кроз зависност расподеле топлотних извора од расподеле индукованих струја и кроз температурну зависност електричних и магнетских особина материјала. Ове системе је немогуће у потпуности анализирати аналитички због сложености система парцијалних диференцијалних једначина који их описују и њихове нелинеарности, чак и у случају елементарних геометрија које карактерише висок степен симетрије. У новије време се за ове потребе интензивно користи нумеричка метода коначних елемената и софтвери засновани на њој. Ови софтвери омогућавају да се у одређеном броју тачака унутар посматраног домена израчунају величине посматраног физичког поља (вектор магнетног поља, вектор густине струје и температура) и тиме одреди њихова расподела. Подела посматраног домена на делове назива се *Mesh* и од њене финоће (тј. броја тачака у којима се рачунају вредности посматраног физичког поља) зависи тачност добијених резултата, али и захтеване рачунарске перформансе и трајање симулације.

Предмет вежбе је примена програмског пакета COMSOL на анализу загревања цилиндричне гвоздене шарже која је постављена унутар цилиндричног индуктора, са циљем добијања расподеле температуре и електричних карактеристика (еквивалентне импедансе) уређаја за индукционо загревање који се прикључује на мрежу. Индуктор се напаја простопериодичном струјом високе учестаности (10 kHz), услед чега је и унутар самог намотаја индуктора изражен скин ефекат.

2. ДЕФИНИСАЊЕ ГЕОМЕТРИЈЕ И КАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРИЈАЛА

При покретању COMSOL-а, отвара се низ дијалога у оквиру којих корисник бира број димензија модела, жељену физичку појаву или поље и врсту студије-симулације (симулација устаљеног стања или симулација прелазног процеса у временском или фреквентном домену, анализа сопствених учестаности, анализа малих сигнала, итд.) што је приказано на слици 1.

Select Space Dimension	Select Physics		Select Study
Image: Space of the symmetric space of the symmetris space of the symmetric space of the symmetric space o	Image: Second System Image: Second System <td>Search</td> <td> ✓ General Studies Stationary M Time Dependent ✓ Preset Studies for Selected Physics Interfaces ✓ Magnetic Fields ✓ Preset Studies for Selected Multiphysics M Frequency-Stationary M Frequency-Stationary A Frequency-Transient M Frequency-Transient ✓ More Studies ✓ More Studies ✓ Preset Studies for Some Physics Interfaces ✓ Preset Studies for Some Physics Interfaces ✓ Empty Study </td>	Search	 ✓ General Studies Stationary M Time Dependent ✓ Preset Studies for Selected Physics Interfaces ✓ Magnetic Fields ✓ Preset Studies for Selected Multiphysics M Frequency-Stationary M Frequency-Stationary A Frequency-Transient M Frequency-Transient ✓ More Studies ✓ More Studies ✓ Preset Studies for Some Physics Interfaces ✓ Preset Studies for Some Physics Interfaces ✓ Empty Study
			Added study:
		Add	🖄 Frequency-Transient
	Added physics interfaces:	Remove	Added physics interfaces: Magnetic Fields (mf) He Heat Transfer in Solids (ht) Multiphysics Electromagnetic Heating (emh1)
	C Space Dimension	Study	C Physics
7 Help 🗴 Cancel 🗹 Done	PHelp Cancel Done		Philip & Cancel

Слика 1 – Прозори у оквиру којих корисник бира број димензија модела, физичку појаву / поље коју анализира и врсту симулације

На самом почетку, бира се геометрија модела. Корисник при креирању модела бира број димензија модела (3D, 2D, 2D *axisymmetric* итд.). Како модел који је предмет ове вежбе поседује аксијалну симетрију, користи се 2D *axisymmetric* модел, чиме модел постаје једноставнији и омогућава се финија подела средине на делове и боља тачност са истим рачунарским ресурсима у односу на 3D модел.

При одабиру жељене физичке појаве (*Physics*) у овом случају бира се *Heat transfer* / *Electromagnetic heating* / *Induction heating*. Избором *Induction heating* аутоматски се у модел додају

node-ови (node је име једног елемента/гране у tree дијаграму који се налази у прозору Model Builder (слика 3), који омогућава преглед модела и омогућава лаку навигацију) Magnetic Fields и Heat Transfer in Solids, намењени моделовању магнетског поља и индукованих струја, односно преноса топлоте у чврстим телима. При томе се дефинише и одговарајући Multiphysics, који практично представља везу између две или више физичких појава и врши њихово упаривање (Coupling).

Приликом избора врсте студије, потребно је одабрати студију *Frequency-Transient* која расподелу магнетског поља и индукованих струја израчунава у фреквентном домену у одређеном низу временских тренутака у којима се израчунава и расподела температура.

Приликом дефинисања геометрије модела, постоји могућност уноса података помоћу неког од стандардних САD програма (постоји опција *import* која препознаје већину стандардних типова САD фајлова). Међутим, COMSOL ставља кориснику на располагање велики број сопствених елемената и алата за уношење геометрије. Ти алати могу се добити из палете *Geometry* или десним кликом на истоимену грану *tree* дијаграма. Поред једноставних линија, фигура и тела, могу се дефинисати и сложеније геометрије применом аналитичког задавања линија и површи, скуповних операција, ротације и транслације, заобљавањем ивица, итд. При додавању неког елемента, он се појављује у грани *tree* дијаграма *Geometry* и у графичком прозору (након притиска на дугме *build*). Његовим селектовањем отвара се прозор унутар кога је потребно унети податке о елементу (нпр. за правоугаоник је потребно дефинисати дужину, ширину, оријентацију и координате једне референтне тачке – нпр. доњег левог темена).

Геометрија уређаја (слика 2.) унета је у модел (на слици 3.). Осим правоугаоника који представљају шаржу (у поглављу 5. ће бити објашњено зашто модел шарже садржи два дела) и намотај индуктора, неопходно је дефинисати и домен (испуњен ваздухом) који их окружује. Линије магнетног поља се затварају кроз ваздух и, теоретски, шире се у бесконачност. Иако је енергија магнетског поља које потиче од струја намотаја практично у целости сконцентрисана у непосредној близини намотаја и шарже, због тачности прорачуна, димензије околног медијума требале би бити неколико пута веће од намотаја и шарже. У исто време, треба водити рачуна да домен буде што мањи због рационалније употребе рачунарских ресурса. Из ова два разлога, цео домен је окружен полупрстеном који чине тзв. "бесконачни коначни елементи" (слика 4.). На овај начин се релативно малим бројем елемената практично симулира бесконачан простор.



Слика 2 – Геометрија модела – ортогонална пројекција цилиндричног намотаја и шарже са димензијама датим у милиметрима (цртеж није у размери)



Слика 3 – Геометрија модела унета у COMSOL – GUI, пример уношења полукружног домена који представља околну средину (ваздух) индуктора и индукта



Слика 4 – Област у којој су дефинисани бесконачни коначни елементи (плава боја)

Након дефинисања геометрије модела, сваком домену (у овом конкретном случају, свакој 2D површини) неопходно је дефинисати материјал, тј. карактеристике материјала од интереса за посматрани физички феномен (или више њих, што ће бити случај са шаржом). У посматраном моделу потребно је дефинисати топлотне и електромагнетске параметре гвожђа (шаржа), и електромагнетске параметре бакра (намотај) и околног ваздуха. COMSOL поседује библиотеку са великим бројем већ предефинисаних материјала.

Међутим, стандардне библиотеке најчешће не уважавају нелинеарност карактеристика материјала. Због тога понекад, као што је случај при моделовању разматраног индукционог загревања феромагнетне шарже, потребно самостално дефинисати карактеристике материјала уместо узимања података из стандардне библиотеке. Како би ово учинио, корисник на располагању има бројне могућности за задавање карактеристика материјала у функцији једне или више улазних променљивих.

У овом конкретном случају, потребно је размотрити и задати следеће физичке карактеристике материјала:

- В-Н карактеристику гвожђа,
- Зависност топлотне проводности гвожђа од температуре,

- Зависност електричне проводности гвожђа од температуре,
- Зависност топлотног капацитета гвожђа од температуре, и
- Утицај промене магнетске карактеристике гвожђа када њена температура пређе Киријеву

За В-Н карактеристику гвожђа преузета је већ постојећа карактеристика из COMSOL библиотеке за меко гвожђе. Ова карактеристика је дата у облику парова вредности магнетске индукције и магнетског поља (слика 5). Вредности између задатих тачака се рачунају линеарном интерполацијом. У поступку реализације модела из задате В-Н карактеристике се формира аналитичка функција релативне магнетске пермеабилности,

$$\mu_{r} = \frac{\sqrt{B_{a}^{2} + B_{r}^{2}}}{\mu_{0} \cdot invBH\left(\sqrt{B_{a}^{2} + B_{r}^{2}}\right)}$$

где су B_a и B_r аксијална и радијална компонента магнетске индукције, а *invBH* предефинисана функција која из B-H карактеристике за дату вредност модула магнетске индукције рачуна магнетско поље (*H*). Овако израчуната вредност пермеабилности се користи као карактеристика материјала.



Слика 5 – В-Н карактеристика меког гвожђа

Температурна зависност топлотне проводности (слика 6.), електричне проводности и топлотног капацитета задате су на исти начин као и В-Н карактеристика – као парови вредности улазног аргумента (у овом случај температуре) и вредности карактеристика материјала. Вредности између задатих тачака добијају се линеарном интерполацијом. Вредности ових карактеристика преузете су из рада (Matúš OCILKA, Dobroslav KOVÁČ, SIMULATION MODEL OF INDUCTION HEATING IN COMSOL MULTIPHYSICS, Acta Electrotechnica et Informatica, Vol. 15, No. 1, 2015, 29–33, DOI: 10.15546/aeei-2015-0005)



Слика 6 – Топлотна проводност у функцији од апсолутне температуре

У процесу електроиндукционог загревања феромагнетских материјала, при веома високим температурама материјал нагло губи своја феромагнетска својстава. До ове појаве долази на тзв. Киријевој температури, која за гвожђе износи 770°С. На слици 7. приказана је поједностављена функција наглог смањења релативне пермеабилности у околини Киријеве температуре.



Слика 7 – Утицај високе температуре на феромагнетна својства гвоздене шарже – помоћна функција помоћу које ће се дефинисати промена релативне пермеабилности у функцији апсолутне температуре

3. ДЕФИНИСАЊЕ ЕЛЕКТРОМАГНЕТСКОГ МОДЕЛА

За потребе моделовања индукционог загревања, аутоматски је у модел укључен node Magnetic Fields (који подразумева да је истоимени интерфејс додат у модел). Овај интерфејс омогућава израчунавање расподеле магнетског поља у простору и индукованих струја у проводним срединама. Омогућено је моделовање намотаја коришћењем елемента (node-a) Coil, приказаног на слици 8. Након додавања елемента, потребно је селектовати део простора у коме се налази намотај и унети податке о броју навојака и начину побуђивања. Намотај се може побуђивати напоном или струјом или из посебног модела електричног кола. У посматраном случају коришћено је побуђивање струјом, при чему се уноси њена вредност.

■115瞬日図トちさ歯喧闹日	原 簡 尾 -	Lab 4.mph - COMSOL Multiphysics	- a ×
File V Home Definitions Geometry	Sketch Materials Physics Mesh Study Results Developer		2
Application Builder Application Application Application Model	Pi sv Variables - sunders Pi Parameter Case Definitions - Definitions - Definitations - Definitions - Def	And Add Magnetic Flux Density Norm, Add Flux 1 Study	
Model Builder • ■ ← → ↑ ↓ ■ Ⅲ Ⅲ Ⅲ •	Settings Properties Coll	8 Graphics Function Plot >> Q. Q. Q. + + 注: ↓ → ■ + 通 + 編 + 限 版 => 2, ■ + □ 16, Ø + Q + Ø 등	Add Study × Add Material × - # Add to Global Materials +
	Label: Coil 1	^ 0.4 ^{-m}	+ Add to Component + Search
		0.35 0.37 0.37 0.25 0.27 0.15 0.37 0.05	P 20 Recent Materials P 20 20.11% P 20 20.11%
	Matorial type Sold • • Coordinate System Selection	0 -0.05 -0.1	-
 Image Heat Transfer in Solids (ht) Multiphysics Multiphysics Mesh 1 ∞ Study 1 image Study 1 image Results 	Coordinate system: Global coordinate system Coli	0.15	-
Coltanee 1 Conductor model Single conductor Col ex citation Col ex citation Col ex citation Col ex citation Col exerent I col Necond*Icond	Colhame 1 Conductor model: Single conductor Coll on cutation:	0.25 0.37 0.35 0.4	-
	Current • Colicurrent:	-0.3 -0.2 -0.1 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 Messages × Progress Log Evaluation Group 1	**
	Conduction model [Entrial calculation] [Entrial calculation] ↓ = 0 € [Entrial calculation]		
		1.03 GB 1.25 GB	

Слика 8 – Моделовање намотаја индуктора помоћу опције Coil

Осим подразумеваних елемената (*default*) и *Coil*-а потребно је дефинисати још један додатни node Ampère's law (један node Ampère's law већ постоји, као подразумевани). Једном од ова два node-а доделиће се домени намотаја и ваздуха, при чему ће једначине у обзир узети карактеристике материјала дефинисане на основу података из библиотеке материјала. У другом node-у, за шаржу (слика 9), подаци о карактеристикама задати су помоћу функција дефинисаних у претходном поглављу.

🔍 🗅 🖕 🔒 🔍 🕨 ちさ 簡 伯 優 (] 辰 丽 民 •	Lab 4.mph - COMSOL Multiphysics — 🗗 🗙
File V Home Definitions Geometry	Sketch Materials Physics Mesh Study Results Developer	
A Application Builder Application Application Model Model Participation Add 1 - Component - Model	Pi av Variables Rof Enctions ameter P prasmater Case Definitions Geometry Definitions Geometry Definitions Geometry Definitions Geometry Definitions Geometry Definitions Geometry Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definitions Definito Definitions Definitions Definitions Defi	NOB NOB Image: Constraint of the constrai
Model Builder	Settings Properties ×	Graphics Function Plot × Add Study × Add Material × • II
	Ampàrais I au	
 A Gobal Definitions 	Label: Ampère's Law 1	0.4 ^{-m} + Add to Component *
Pi Parameters 1	▼ Domain Selection	0.35 D State Control State Sta
P. Parameters 1 Idaptic 1 (mer) Idaptic 2 (mer) Idaptic 1 (mer) Idaptic 2 (mer) Idaptic 2 (mer) Idaptic 2 (mer) <t< td=""><td> Domain Selection Inventidani In</td><td>0.35 0.37 0.37 0.37 0.15 0.15 0.47 0.47 0.45 0.37 0.45 0.37 0.47 0.45 0.37 0.45 0.37 0.45 0.37 0.45 0.4 0.40 Markov 0.40 Marko</td></t<>	 Domain Selection Inventidani In	0.35 0.37 0.37 0.37 0.15 0.15 0.47 0.47 0.45 0.37 0.45 0.37 0.47 0.45 0.37 0.45 0.37 0.45 0.37 0.45 0.4 0.40 Markov 0.40 Marko
	Conduction model:	-0.4 m
	Electrical conductivity •	· ·0.3 ·0.2 ·0.1 ·0 ·0.1 ·0.2 ·0.3 ·0.4 ·0.5 ·0.6
	$J_c = \sigma E$	Messages × Progress Log Evaluation Group 1 ×
	Electrical conductivity:	
	σ User defined •	
	ec2(T) S/m	
	Isotropic	
	> Constitutive Relation D-E	
		1.04 68 1.25 68

Слика 9 – Моделовање нелинеарних електромагнетских карактеристика шарже

4. ДЕФИНИСАЊЕ ТЕРМИЧКОГ МОДЕЛА

Пренос топлоте моделован је помоћу интерфејса *Heat Transfer in Solids*. COMSOL кориснику омогућава да ограничи део комплетног модела за који ће бити посматрана одређена физичка појава. Део модела унутар кога ће бити примењена "физика" *Heat Transfer in Solids* је приказан на слици 10. У оквиру лабораторијске вежбе, моделован је само пренос топлоте унутар шарже.

Термички параметри материјала, дефинисани у поглављу 2. додељени су (слика 10) на сличан начин као што су електрични параметри задати у поглављу 3.



Слика 10 – Селектовање дела модела унутар кога ће бити моделован пренос топлоте

Комплетан топлотни модел, који би обухватио и индуктор, морао би да буде проширен и на струјање ваздуха у ваздушном зазору између индуктора и индукта, размену енергије зрачењем између наспрамних површи индуктора и индукта, као и проширивањем термичког модела на индуктор. COMSOL омогућава прављење оваквих модела, али би то захтевало примену додатних интерфејса и знатно би усложнило модел, повећало хардверске захтеве симулације као и трајање симулације. Дакле, модел који је реализован кроз ову лабораторијску вежбу треба схватити као илустрацију, док би за одређивање расподеле температуре стверног уређаја било неопходно проширити термички модел. Поред тога, било би потребно применити и комплексније моделовање од примењене претпоставке равномерне расподеле струје по површи индуктора да би се одредили губици у намотају индуктора. Разлог је што у навојцима намотаја примара долази до потискивања струје, поготову при учестаностима које су доста више од мрежне (у посматраном случају 10 kHz).

На спољашњим површима шарже (област на коју је примењен интерфејс *Heat Transfer in Solids*) неопходно је поставити граничне услове, што је учињено на следећи начин:

На свим граничним површима је уважен пренос топлоте струјањем ваздуха додавањем node-a *Heat Flux* (један од елемената понуђених у оквиру *Heat Transfer in Solids*). Након додавања node-a, појављује се прозор (слика 11) у оквиру кога су приказани листа површи за које се поставља гранични услов и додатна подешавања. Површи (тачније линије у 2D моделу) које се налазе на

листи означене су плавом бојом. У оквиру подешавања одабрана је опција *Convective Heat Flux* и унета константа вредност коефицијента преноса топлоте струјањем.



Слика 11 – Додавање node-а којим се моделује пренос топлоте струјањем са шарже на ваздух

Да би се уважио пренос топлоте зрачењем са горњег и доњег базиса шарже, додат је и *node Surface-to-Ambient Radiation*, приказан на слици 12.



Слика 12 – Додавање node-а којим се моделује пренос топлоте зрачењем са шарже на амбијент

5. ПОДЕЛА СРЕДИНЕ НА ДЕЛОВЕ

Поделу средине на делове (*Mesh*) COMSOL може извршити аутоматски (водећи се геометријом модела и неким правилима физичке појаве која се посматра), при чему корисник бира само финоћу те поделе. Овакав начин задавања *Mesh*-а је добар за прелиминарне и једноставне прорачуне. Код сложених модела, као и у случајевима када је потребна висока тачност прорачуна често је потребно један део модела поделити на мање делове (нпр. због тога што се у том делу налази неки специфичан детаљ или због тога што је градијент поља у том делу модела посебно велики), а остатак модела на крупније делове (што се јасно види на слици 13). Шаржа је представљена са 2 правоугаоника, како би се омогућила различита финоћа подела средине при њеној површи (због прецизнијег моделовања скин ефекта) и у унутрашњости. За површински слој шарже и намотај индуктора користи се финија подела (слика 14), док се за ваздух и унутрашњост шарже користи грубља подела средине. Посебан тип *Mesh*-а (*mapped*) коришћен је за област бесконачних коначних елемената.

Mesh се креира селектовањем истоименог *node*-а и одабиром неког од бројних типова елемената на које ће се средина делити (нпр. четвороугаони или троугаони елементи). Након тога обележава се део модела у коме ће се користити дати mesh и подешава опција *Size*, као што је

приказано на слици 13. Након подешавања опције *Size*, притиском на дугме *Build* креира се *Mesh* у складу са унетим подешавањима.







Слика 14 – Увеличан детаљ из области најгушћег Mesh-а

6. РЕЗУЛТАТИ

Симулација се покреће одабиром опције *Compute* у оквиру *node-*а *Study*. Кориснику су (зависно од посматране физичке појаве, врсте модела итд.) омогућена бројна подешавања солвера, која су овом приликом остављена на подразумеваним вредностима.

За *Frequency-Transient* студију потребно је задати фреквенцију и временске тренутке у којима ће резултати симулације бити сачувани – задају се почетни и крајњи тренутак, као и корак (постоји могућност и другачијег начина задавања, што може бити од интереса када корисник жели да уштеди меморију, на пример). У конкретном примеру, посматра се временски интервал од 60 минута.

Након извршења симулације, кориснику су доступне бројне могућности приказивања и обраде резултата (такозвани *post-processing*).

На слици 15. дата је промена температуре у тачки на површини шарже (у средишту, гледано по аксијалној координати z=0).



Слика 15 – Промена температуре шарже у времену, на површини, на средњој висини z=0

На слици 16. дата је расподела температуре шарже у тренутку t=60min.



Слика 16 – Расподела температуре шарже у тренутку t=60min

На слици 17. приказана је запреминска густина снаге загревања (губитака) у тренутку t=60min. Снага је сконцентрисана при површини шарже, због чега је на слици дат увећан детаљ (на радијалној координати 0,04m је граница шарже).



Слика 17 – Запреминска густина снаге загревања (губитака) у тренутку t=60min

На слици 18 приказан је утицај нелинеарне промене релативне пермеабилности гвожђа са променом температуре (вредност на температурама нижим од Киријеве је 1200).



Слика 18 – Релативна пермеабилност у тренутку t=60min

На слици 19. приказана је промена вредности снаге и индуктивности електроиндукционог калема.



Слика 19- Промена вредности снаге и индуктивности калема