# Upotreba *Simulink*-a za rešavanje inženjerskih problema na primeru termičkog modela električne mašine

Pripremljeno kao pomoćni material kurseva OG4EV, kao i *Digitalno upravljanje* pretvaračima i pogonima

Kontakt: ddc@etf.bg.ac.yu

#### 1. Uvod

Onog trenutka kada su računari postali dovoljno «moćni» da mogu relativno verodostojno da prikažu ponašanje realnih, fizičkih sistema, simulacije procesa postale su nezaobilazan stepen u projektovanju bilo kakvih sistema. Jedan od danas najrasprostranjenijih programa za računarsku simulaciju je *Simulink* iz programskog paketa *MatLab* čije će osnovne primene biti opisane u ovoj vežbi.

Kao primer sistema koji će biti simuliran uzet je jednostavan model prvog reda, povezan za termičke procese u električnoj mašini. Na ovom primeru biće prikazan način na koji se formira *Simulink* model procesa, kao i pokretanje simulacije u rad i interpretacija rezultata simulacije.

2

#### 2. Termički procesi u električnoj mašini

Pri radu električne mašine, usled postojanja otpornosti namotaja u kojima postoji struja dolazi do pojave Džulovih gubitaka tj. stvaranja toplote. Ovi gubici srazmerni su kvadratu struje, pri čemu je koeficijent proporcionalnosti zapravo otpornost samog namotaja.

Ova toplotna energija se «troši» na dva načina: jedan deo energije se konvekcijom disipira u okolinu dok preostali deo energije uvećava temperaturu motora. Očigledno je da je zagrevanje motora neophodno svesti na minimum jer porast temperature iznad izvesne granice (oko 150°C) izaziva uništavanje izolacije namotaja tj. dovodi do trajnog oštećenja mašine.

Maksimalna struja koja se može imati u trajnom radu je nominalna struja. Pri trajnom radu na većim strujama zagrevanje mašine je preveliko tj. nedovoljna količina Džulovih gubitaka biva konvekcijom prenesena na ambijent i dolazi do preteranog porasta temperature i trajnog oštećenja mašine.

Dakle, pri projektovanju električne mašine jedan od najvažnijih faktora koji se mora uzeti u razmatranje je upravo zagrevanje mašine. U cilju analize ovog fenomena formira se termički model mašine čiji ćemo osnovni oblik opisati i testirati u ovoj laboratorijskoj vežbi.

#### 3. Model termički homogenog tela

Termički model elektične mašine zasnovan je na modelu termički homogenog tela. Ovaj model baziran je na dva parametra: termičkom otporu i termičkoj kapacitativnosti.

Termički otpor je mera osobine materijala da se opire protoku toplote - u našem slučaju odavanju toplote u spoljnu okolinu mašine. To je zapravo količnik temperaturne razlike tela i ambijenta (nadtemperature) i snage koja biva disipirana u okolinu:

$$R_{ih} = \frac{\Delta\theta}{P_{dis}} \left[\frac{K}{W}\right].....(1)$$

Termička kapacitativnost definiše se kao odnos toplotne energije dW koju je potrebno dodati telu da bi se njegova tempertura promenila za iznos  $d\theta$ .

$$C_{th} = \frac{dW}{d\theta} \left[\frac{J}{K}\right]....(2)$$

Šematski prikaz ovog modela dat je na slici 1.



Slika 1: Šematski prikaz motora kao termički homogenog tela

Odredimo sada izraz po kome se menja temperatura tela tj. motora u zavisnosti od snage Džulovih gubitaka. U tom cilju definišimo sledeće oznake:

 $P_{\gamma}$  - snaga Džulovih gubitaka

 $P_{dis}$  - snaga koja se konvekcijom disipira u spoljnu okolinu

 $P_{mot}$  - snaga koja se troši na zagrevanje motora

 $\theta_{mot}$  - temperatura motora

 $\theta_{amb}$  - temperatura ambijenta

 $\Delta \theta = \theta_{\rm mot} - \theta_{\rm amb}$  - nadtemperatura

 $R_{th}$  - termički otpor motora

 $C_{th}$  - termička kapacitativnost motora

Pođimo od definicionog izraza za termičku kapacitativnost za slučaj motora datog jednačinom 3:

$$C_{th} = \frac{dW_{mot}}{d\theta_{mot}} \dots (3)$$

Količina energije koja se u infinitezimalnom vremenskom periodu iskoristi na zagrevanje motora data je sledećom relacijom:

$$dW_{mot} = P_{mot}dt \dots (4)$$

pri čemu se sa slike 1 može videti da je snaga  $P_{mot}$  jednaka razlici snage Džulovih gubitaka i snage disipirane konvekcijom u spoljnu sredinu:

Pod pretpostavkom da je promena temperature ambijenta usled disipacije snage sa motora zanemarljivo mala, promena temperature motora  $d\theta$  biće jednaka promeni nadtemperature  $d\Delta\theta$ :

$$d\theta_{mot} = d\Delta\theta + d\theta_{amb} = d\Delta\theta \dots (6)$$

Sada se jednačina 3 svodi na:

Iz izraza za termički otpor (jednačina 1) sledi jednačina 8:

Zamenom jednačine 8 u jednačinu 7 i sređivanjem tog izraza dobija se diferencijalna jednačina koja opisuje promenu nadtemperature u vremenu izazvane Džulovim gubicima:

$$C_{th} \frac{d\Delta\theta}{dt} = P_{\gamma} - \frac{\Delta\theta}{R_{th}} \dots (9)$$

## 4. Električni dual termičkog modela motora

U cilju boljeg razumevanja termičkog modela mašine, razmatranje ćemo nastaviti na električnom dualu ovog sistema. Naime, ukoliko pronađemo električno kolo koje ima identičnu prenosnu funkciju kao i termički model motora, tada će to kolo moći da se koristi kao električna prezentacija termičkih procesa koji se u mašini odvijaju.

Posmatrajmo paralelno RC kolo napajano strujnim izvorom (slika 2).



Slika 2: Paralelno RC kolo napajano strujnim izvorom

Iz teorije kola poznato je da je ovo kolo opisano diferencijalnom jednačinom datom jednačinom *10*:

Upoređivanjem jednačine 9 i jednačine 10 vidimo da one imaju identičan oblik. Dakle, očigledno je da postoji potpuni dualizam između termičkog i električnog modela pri čemu su dualni elementi dati tabelom 1:

Termički model	Električni model
Termicki otpor ( $R_{th}$ )	Električni otpor (R)
Termička kapacitativnost ( $C_{th}$ )	Električni kapacitet (C)
Džulovi gubici (P <sub>y</sub> )	Strujni izvor (I)
Nadtemperatura ( $\Delta \theta$ )	Električni napon (u)

Tabela 1: Dualizam termičkog i električnog modela

### 5. Simulink model

Posmatrajući jednačinu 10 možemo definisati prenosnu funkciju paralelnog *RC* kola. U kompleksnom tj. *s*-domenu ova jednačina ima sledeći oblik:

Odavde se dobija prenosna funkcija sistema od ulaza (strujnog izvora - I(s)) do izlaza (napona na paralelnom *RC* kolu – U(s)):

$$\frac{U(s)}{I(s)} = \frac{R}{1+sRC}\dots\dots(12)$$

Ova prenosna funkcija predstavlja direktni model paralelnog *RC* kola napajanog strujnim izvorom, ali obzirom na dualziam opisan u prethodnom poglavlju, i termički model električne mašine biće opisan prenosnom funkcijom istog oblika samo što će u njoj umesto električnog otpora i kapacitivnosti figurisati termički otpor i kapacitativnost.

Simulirajmo sada ovaj model u *Simulink*-u. Simulink se pokreće startovanjem komande *simulink* u komandnom prozoru (*Comand Window*) MatLab-a (Slika 3):



Slika 3: Pokretanje Simulink-a

Ovime je učitana *Simulink* biblioteka. Sada je potrebno pokrenuti novi model. Ovo se vrši izborom komande *New-Model* u *File* padajućem meniju prozora *Simulink Library Browser* (Slika 4).



Slika 4: Pokretanje novog modela



Slika 5: Generator impulsa – Pulse generator

Prvi elemenat koji ćemo uneti u model jeste generator impulsa (*Pulse Generator*) – on će nam predstavljati ulaz modela (u slučaju *RC* kola to je strujni generator a u slučaju termičkog modela to su Džulovi gubici u motoru). Ovaj elemenat nalazi se u biblioteci *Simulink - Sources* (slika 5). Elementi se iz biblioteka u model unose prevlačenjem (drag and drop) željenog bloka na prozor modela (slika 6).



Slika 6: Generator impulsa uveden u simulink model

Dalje ćemo u model uvesti blok prenosne funkcije (*Transfer Fcn*). Ovaj blok nalazi se u biblioteci *Simulink - Continous* (slika 7).

Sada je potrebno definisati parametre ova dva bloka. Dvostrukim klikom na blok u modelu otvara se prozor koji omogućuje podešavanje parametara za dati blok. Pri vrhu ovog prozora nalazi se i kratak opis funkcije bloka.

U slučaju bloka *Pulse Generator* mogu se podešavati period impulsa – *Period*; ispuna impulsa tj. procentualni iznos unutar impulsne periode za vreme kog je vrednost na izlazu jednaka amplitudi impulsa (različita od nule) – *Duty cycle*; amplituda impulsa – *Amplitude* i trenutak simulacije u kome će generator početi da radi – *Start time*. U našem slučaju postavićemo period impulsa na 1,25 sekundi, ispunu na 50% a amplitudu impulsa na 1 (Slika 8). Podešeni parametri čuvaju se klikom na OK. Amplituda impulsa u našem modelu zapravo predstavlja vrednost Džulovih gubitaka u motoru.



Slika 7: Blok prenosne funkcije – Transfer Fcn



Slika 8: Podešavanje parametara bloka Pulse Generator

🚸 MATLAB	
File Edit View Web Window Help	
🗅 🚅 🔏 🛍 🗠 🖙 🎁 ? Current Directory: C:Documents and	Settings\Boban\MyDocuments\WWWETFWEB\Nastava\EG4EV\seminarski\termicki 💌
>> >> >> >> >> >> >> >> >> >>	A
📣 MATLAB	🖃 🖬 🔁
File Edit View Web Window Help	
🗅 🗃 🕺 🛍 🛍 🕫 🕫 🎁 ? Current Directory: C:Documents and	Settings\Boban\MyDocuments\WWWETF WEBWastava\EG4EV\seminarski\termicki 🗾 🛄
>>	<u> ۸</u>
Simulink Library Browser         File       Edit. View Help         Image: Simulink       Image: Simulink         Image: Simulink       Image:	iviput es File Edk View Smdaton Format Tools Help File Edk View Smdaton Format Tools Help Ster form
>>     →     Signals & Systems     are for descending power       >>     →     Sources     Parameters       >>     →     Sources     Immetaion       >>     ⊕     Control System Toolbox     Immetaion       >>     ⊕     Control System Toolbox     Immetaion       >>     ⊕     Dof Biodset     Immetaion       >>     ⊕     Toolbox     Immetaion       >>     ⊕     Motorola DSP Biodset     Immetaion       >>     ⊕     Motorola DSP Biodset     Immetaion	ancel Help Apply

Slika 9: Podešavanje parametara bloka Transfer Fcn

U slučaju bloka *Transfer Fcn* mogu se podešavati koeficijenti polinoma u brojiocu (*Numerator*) i imeniocu (*Denominator*) funkcije prenosa. Oni se unose u odgovarajuća polja kao nizovi pri čemu je prvi član niza koeficijent uz član najvišeg stepena u polinomu. Podesićemo brojilac na 1 a imenilac na polinom 2s+1 (slika 9). U našem sistemu ovo će značiti da je vrednost termičkog otpora jednaka  $R_{th} = 1\frac{K}{W}$  a vrednost termičke kapacitativnosti  $C_{th} = 2\frac{J}{K}$ .

Sada ćemo u model uneti izlaz – blok *Scope*. Ovaj blok nalazi se u biblioteci *Simulink - Sinks* (slika 10). Ovaj blok omogućuje iscrtavanje grafika signala koji se nalaze na njegovom ulazu. Mi ćemo na ovom grafiku prikazati signale ulaza u blok penosne funkcije (u našem slučaju to su Džulovi gubici – izlaz bloka *Pulse Generator*) kao i signal izlaza iz bloka prenosne funkcije (signal nadtemperature).

Da bismo mogli na istom grafiku da prikažemo oba ova signala neophodan nam je blok koji će multipleksirati oba ova signala na jedan ulaz bloka *Scope*. Blok koji vrši ovu funkciju zove se *Mux* i nalazi se u biblioteci *Simulink – Signals & Systems* (slika 11). Kontakt: ddc@etf.bg.ac.yu 13 OG4EV, MPU\_EMP

*	MATLAB	
File	Edit View Web Window Help	
D	😂 🕺 🐘 😋 🖙 🎁 ? Current Directory: C:Documents and Settings	s/Boban/WyDocuments/////WWETF WEBWastava/EG4EV/seminarski/termicki 💌 📖
>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>		X
*	MATLAB	🗾 🗗 🗾
File	Edit View Web Window Help	
D	😂 🕺 🖻 💼 🗠 🖙 🛔 📍 Current Directory: C:Documents and Settings	s'BobanWyDocuments™WWWETF WEBWastava¥EG4EV\seminarski/termicki 🛫 🛄
>>		
~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~	Simulink Library Browser  File Edit Vew Help  Gate 4a red  Scope: simulink_J/Sinkt/Scope  Simulink  Simul	Image: Second secon
	All Mathieum     All Signals & Systems     All Sinks	Pulpe Cenerator Cenerator

Slika 10: Blok Scope



Slika 11: Blok Mux

Sada je potrebno međusobno povezati sve blokove u modelu. Povezivanje blokova vrši se jednostavnim povlačanjam linije od izlaza jednog bloka do ulaza drugog bloka (slično drag&drop principu). Način na koji je potrebno povezati elemente u modelu prikazan je na slici 12.



Slika 12: Povezivanje blokova unutar modela

Ovime je formiran *Simulink* model termičkog modela motora. Sada je potrebno podesiti parametre simulacije pre nego što se simulacija pusti u rad. Ova podešavanja vrše se u prozoru koji se dobija biranjem opcije *Simulation parameters...* iz padajućeg menija *Simulation*.

U ovom meniju mogu se podesiti trenutak početka simulacije – *Start time*; trenutak kraja simulacija – *Stop time*; kao i neka podešavanja vezana za metod proračuna koji će simulacija koristiti. Mi ćemo početni trenutak simulacije podesiti na 0, a vreme kraja simulacije na 5 sekundi. U polju *Type* unutar sekcije *Solver options* odabraćemo *Fixed-step* i Ojlerov metod proračuna – *ode1 (Euler)*. Podesićemo vrednost koraka simulacije na 0,001 sekundi i mod simulacije na *Single-tasking*.

Sada je simulacija u potpunosti spremna. Klikom na dugme za start simulacije koje se nalazi na gornjem toolbar-u prozora modela pokreće se simulacija. Kraj simulacije signaliziran je zvučnim signalom, dok se u slučaju dugačkih simulacija vreme do kog je proračun simulacije stigao prikazuje u dnu ekrana. Kontakt: ddc@etf.bg.ac.yu 15 OG4EV, MPU\_EMP

Image: Set Vew Web Wrodow Help         Image: Set Vew Web         Image: Set Vew Help         Image: Set Vew Web Vertor, or matrix         Solver copions         Image: Set Vew Help         Image: Set Vew Vertor, Image: Set Vertor,	🧼 II	IATL.	AB		Wales -																7)
Current Directory: C:Documents and Settings/BobanMyDocuments/WWV/ETF WEBNestava/EC4EV/seminarsk/termicki  MATLAB  MATLAB  MATLAB  Continues  Control Biologic Continues  Structure Directory: C:Documents and Settings/BobanMyDocuments/WWV/ETF WEBNestava/EC4EV/seminarsk/termicki  Control Biologic Continues  Structure Directory: C:Documents and Settings/BobanMyDocuments/WWV/ETF WEBNestava/EC4EV/seminarsk/termicki  Structure Directory: Structure Directory: C:Documents and Settings/BobanMyDocuments/WWV/ETF WEBNestava/EC4EV/seminarsk/termicki  Structure Directory: Structure Directory: C:Documents and Settings/BobanMyDocuments/WWV/ETF WEBNestava/EC4EV/seminarsk/termicki Structure Directory: Structure Directory: C:Documents BobanMyDocuments/WWV/ETF	File	Edit	View	Web	Windo	w He	р														1
A MATLAB		1	X		1	C2	1	?	Current Directory:	C:\Docum	ents and	Settings\Bobs	an/MyDocum	entsWW	VETF WEE	Wastava	EG4EV\se	minarskiten	nicki 💌		
ANTLAB       Image: Contract Directory:       Current Directory:       C: Documents and Settings: Ecolem/MyDocuments SWWW ETF WEEWlasteweEc4EV/seminars/sitemicki image: Contract Directory:       Image: Contract Directory:       C: Documents and Settings: Ecolem/MyDocuments SWWW ETF WEEWlasteweEc4EV/seminars/sitemicki image: Contract Directory:       Image: Contract Directory:       C: Documents and Settings: Ecolem/MyDocuments SWWW ETF WEEWlasteweEc4EV/seminars/sitemicki image: Contract Directory:       Image: Contract Directory:       C: Documents and Settings: Ecolem/MyDocuments SWWW ETF WEEWlasteweEc4EV/seminars/sitemicki image: Contract Directory:         File:       Ecol:       Yew:       Help       Image: Contract Directory:       C: Documents and Settings: Ecolem/MyDocuments SWWW ETF WEEWlasteweEc4EV/seminars/sitemicki image: Contract Directory:         File:       Ecol:       Yew:       Help       Image: Contract Directory:       C: Documents Contract Directory:       C: Docutory:       C: Documents Contract Directory:	>>																				Contraction of the second seco
Image: Simulation Biology     Simulation Parameters; untilled       Image: Simulation Biology     Simulation Biology       Image: Simulation Biology     Simulat	4	ITA	AB																		516
Image: Second States       Image: Second States         Image: Simulation Library Browser       Image: Simulation Parameters; untilled         Image: Simulation Parameters; untilled       Image: Simulation Parameters; untilled         Image: Simulation Parame	en 11	T Ja	RD		III ada																
Image: Simulation Systems     Simulation Parameters: untilled       Image: Simulation Parameters: Untilled		i de la concentra de la concen	- X		100 100	~ III	ti	?	Current Directory:	C:\Docum	ents and	Settings\Bobr	anWyDocum	entsWWV	V ETF WEE	)Wastava'	EG4EV\se	minarskiiteri	nicki 💌 🛄		
Simularik Library Browser He Edit View Help He Edit View Help Simulation Parameters; untilled Workspace I/D Diagnostics Advanced Real-Time Workshop Simulation time Solver options Simulation ine Simulation ine Solver options Type: Faced step : ode1 (Euler) Fixed step size: 0.001 Mode: Adda Mubil asking Uput options Fixed step size: 0.001 Mode: Adda Mubil asking Displate to Stope time: 0 Sinks Sources Sources Displate to Stope time: 0 Sources Sources Sources Displate to Stope time: 0 Sources S	>>	100					Contract I		<u></u>												_
Simulific Library Browser         File Edit Vew Help         File Edit Vew Help         Mus: Multiples scalar, vector, or matrix         Simulation Parameters: untilled         Mus: Multiples scalar, vector, or matrix         Simulation Inter         Solver Workspace I/D Diagnostics Advanced Real-Time Workshop         Simulation Inter         Solver options         Type: Flead step inter         Solver options         Type: Flead step inter         Solver options         Type: Flead step inter         Dutput options         Peline output         Real-Real-Time Vorkshop         MultiPashing         Dutput options         Peline output         Real-Real-Time Vorkshop         Peline output         Peline output         Peline output         Real-Real-Time Vorkshop         Peline output         Peline output         Real-Real-Time Vorkshop         Peline output         Peline output         Peline output         Peline output         Peline output         Peline blockset         Peline blockset         Peline blockset         Peline blockset	>>	_																			
PHe       Edt: View Help         Image: April med       Simulation Parameters; untilled         Image: Advanced       Image: Advanced         Image: Advanced       Real-Time Workshop         Imag	~	🖬 s										X									
Image: Autor Transfer F con         Image: Autor Multiplex scalar, vector, or matrix         Image: Multiplex scalar, vector, or matrix         Image: Simulation Parameters; untilled         Image: Multiplex scalar, vector, or matrix         Image: Simulation Parameters; untilled         Image: Simulation Parameters; untille	5	File	Edit	View	Help			_													
Image: A find       Simulation Parameters: untitled         Image: A find       Solver options         Type: Find tables       Find tables         Image: A find       Image: A find tables         Image: A find       Image: A find tables         Image: A find tables       Image: A find tables         Image: A find tables       Image: A find tables         Image: A find tables       Image: A find tables	>	-	~		1			_													
Mux: Multiplex scalar, vector, or metrix       Solver       Workspace 1/0       Diagnostics       Advanced       Real-Time Workshop         Simularik       Simularik       Solver options       Solver options       Solver options         Solver options       Type: Fixed-step = ode1 (Euler)       Solver options       Solver options         Solver options       Type: Fixed-step = ode1 (Euler)       Solver options         Solver options       Type: Fixed-step = ode1 (Euler)       Solver options         Solver options       Type: Fixed-step = ode1 (Euler)       Solver options         Solver options       Solver options       Solver options         Solver options	2	U		(a) Fin				4	Simulation Para	meters:	untitleo	i)									
Solver       Workspace I/O       Diagnostics       Advanced       Real-Time Workshop         Simulation time       Solver options       Solver options       Ime Workshop         Solver options       Type: Fixed step I ode! [Euler]       Ime Solver options         Solver options       Type: Fixed step I ode! [Euler]       Ime Solver options         Solver options       Fixed step I ode! [Euler]       Ime Solver options         Solver options       Solver options       Ime Solver options         Solver options       Fixed step ize: 0.001       Mode: Auto         Solver Solver options       Ime COM Reference Bioloset       Ime Communications Bioloset         Bit COMA Reference Bioloset       Refine factor: 1       Ime Communications Bioloset         Bit Dials Gauges Bioloset       Ime Communications Bioloset       Ime Communications Bioloset         Bit Freeze Logic Toolbox       Ime Selector       Ime Communications Bioloset         Bit Freeze Logic Toolbox       Ime Selector       Ime Selector	Ś	Mu	a: Mul	iplex s	alar, vec	tor, or	natrix s		1	1	1	1		1	1						
Simulation time         Sind time stime	>							Se	Iver Workspace I	0 Diagn	ostics A	dvanced R	eal-Time Wo	rkshop							
Start time: 0.0 Stop time: 5 Solver options Solver options	>								Simulation time												
Simulark       Salar time 100       Suppling 15         Simulark       Solver options         Type: Fixed step ions       Type: Fixed step ions         Type: Fixed step ions       Fixed step ions         Simulark       Solver options         Simulark       Solver options         Simulark       Fixed step ions         Type: Fixed step ions       Fixed step ions         Simulark       Solver options         Solver options       Solver options         Solver optioptions       Solver optioptions <td>&gt;</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Start lines: 0.0</td> <td></td> <td>Eten time:</td> <td>5</td> <td>-</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td>	>								Start lines: 0.0		Eten time:	5	-								
Solver options       Application	2		Sin	ulink					stati une poro		stop ante.	12			Non For	mat Too	de Mala				-
<ul> <li>Discrete</li> <li>Discrete</li> <li>Fixed step vide1 (Euler)</li> <li>Fixed step vide1 (Euler)</li> <li>Sinks</li> <li>Sinks</li> <li>Sinks</li> <li>Communicatores Blocket</li> <li>Communicatores Blocket</li> <li>Communicatores Blocket</li> <li>Communicatores Blocket</li> <li>Discrete</li> <li>Discrete</li> <li>Discrete</li> <li>Discrete</li> <li>Selector</li> <li>Fixed step size: 0.001</li> <li>Mode: Auto</li> <li>Auto</li> <li>Communicatores Blocket</li> <li>Communicatores Blocket</li> <li>Fixed step size: 0.001</li> <li>Mode: Auto</li> <li>Multi asking</li> <li>Communicatores Blocket</li> <li>Fixed step size: 0.001</li> <li>Mode: Auto</li> <li>Size Control System Toolbox</li> <li>Fixed step size: 0.001</li> <li>Fixed step size: 0.001</li> <li>Mode: Auto</li> <li>Size Control System Toolbox</li> <li>Fixed step size: 0.001</li> <li>Fixed step size: 0.001</li> <li>Fixed step size: 0.001</li> <li>Mode: Auto</li> <li>Fixed step size: 0.001</li> <li></li></ul>	5	T	-	Conti	nuous				Solver options						duri Pue	mac ruc	vis meih				
A Functions & Tables     Fixed step size:     0.001     Mode:     Auto       Auto     Auto     Auto     Auto       Auto     Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto     Auto       Auto	>		-	Discre	te				Type: Fixed-step	-	ode1 (Eu	ler)		-	, en <b>f</b>	10	으 🕻 🐌	🖬 🦫 🍕	👂 🕨 = No	rmal 👤	
Add     Add	>		3	Funct	ions & Ta	bles															-
23       Nonlinear         23       Signals & Systems         23       Signals & Systems         23       Signals & Systems         24       Signals & Systems         25       Sources         26       Contructors Blockset         26       Contruct System Toobox         27       Contruct System Toobox         28       Contruct System Toobox         29       File Food System Toobox         20       File Food System Toobox	>		h-	Math					Fixed step size: 0.0	01	Mo	de: Auto	•								
Signals & Systems       Signa	2		2	Nonlin	ear							Auto	_								
Sinks     Sinks       Sinks	5		1	Signa	s & Syste	ems						SingleTa	asking						_		
Image: Sources     Output options       Image: Communications Blockset     Image: Refine output       Image: Communications Blockset     Image: Refine factor: 1       Image: Communications Blockset     <	>		*	Sinks								MultiTas	sking					-			
Bit Curlan Reference Blockset     Dutput options       Bit Curlan Reference Blockset     Refine curput       Bit Curlan Reference Blockset     Refine curput       Bit Curlan Reference Blockset     Transfer Fon       Bit Disk & Gauges Blockset     DK       Bit Finde-Punk Blockset     Seecor       Bit Finde-Punk Blockset     Seecor	>		2	Source	ec.																
Bit Communications Blockset     Refine output     Refine factor     1     2z+1     Scope       Bit Communications Blockset     Disk & Gauges Blockset     Disk & Gauges Blockset     0K     Cancel     Help     Apply       Bit First Functions Plockset     Disk & Gauges Blockset     Selector     Selector     Selector	>		= <u> </u>	MA Rel	erence F	lockset			Jutput options								1				
Image: Control System Toolbox     Transfer F on     Scope       Image: Control System Toolbox     DK     Cancel     Help     Apply       Image: Control System Toolbox     DK     Cancel     Help     Apply       Image: Control System Toolbox     Image: Control System Toolbox     Image: Control System Toolbox     Scope	2		Co	nnunic	ations Bl	nckset			Refine output		Ŧ	Refine fact	oc 1				2s+1		-		
Bit Core     Dick Scauge Stocket       Bit With Core     Dick Scauge Stocket       Bit With Core     Selector       Bit With Core     Selector	5	1		ntrol Sy	stem To	hox					and the second se		0.550		1.0	Tra	nsfer Fon		Scope		
B: Dials & Gauges Blockset     Original Stress       B: B: Dials & Gauges Blockset     Selector       B: B: Fixed-Point Blockset     Selector       B: B: Fixed-Point Blockset     Selector	-	4		Block	aet						пк	Cancel	Help	Annly	or						
Green Brockset     Selector       Brockset     Selector	>		Dia	Is & Ga	unes Blo	kset					<u> </u>			. 1999							
> 0 → Fuzzy Logic Toolbox	>>		Eix	ed-Poir	t Blockse	ł			S S	elector					89 80						
	2	1	Eur	21100	r Toolho	Ŷ			<b></b>												
A NIX Blocks	2		MP	C Block	c	<u>^</u>					Cartan										
The second secon	5	_		torola I	SD Plack	cot			L Mert Si	gnál Specif	lication										

Slika 13: Podešavanja parametara simulacije



Slika 14: Prikaz rezultata simulacije

Dvostrukim klikom na blok *Scope* dobijaju se grafici koji predstavljaju rezultate simulacije (slika 14). Prozor u kome su prikazani ovi rezultati može se uvećati (slika 15) kao što je moguće i uvećati detalj grafika (slika16).



Slika 15: Uvećan prozor grafika iz bloka Scope



Slika 16: Uvećan detalj grafika sa prethodne slike

7. Primeri

Zadatak 1:

BLDC motor poseduje sledeće parametre:

 $R_{th}=37,8K/W$ ,  $C_{th}=15,7J/K$ ,  $\theta_{max}=130$  °C. Ako je spoljna temperatura 23 °C a otpornost statorskog namotaja ovog motora  $R=7,75\Omega$  koliko vremena će motor biti u stanju da podnese rad sa strujom od 1A?

Na osnovu podatka o otpornosti statorskog namotaja i sruje koja kroz njega protiče zaključujemo da će snaga Džulovih gubitaka u motoru biti:

$$P_{I} = RI^{2} = 7,75W$$

Dakle ovu vrednost treba postaviti za amplitudu impulsnog generatora u *Simulink* modelu. Na osnovu termičkih parametara motora, možemo odrediti prenosnu funkciju njegovog modela kao:

$$\frac{37,8}{37,8\cdot 15.7s+1}K_{W} = \frac{37,8}{593,46s+1}K_{W}$$

Podesimo još periodu impulsnog generatora u modelu na 1000s i vreme trajanja simulacije na 500s. Pustimo sada model u rad. Kada po završetku simulacije pogledamo grafike dvostrukim klikom na blok *Scope*, videćemo da se na ovom grafiku vidi samo poslednjih nekoliko sekundi simulacije. Ovo je iz razloga što je po default-u blok *Scope* podešen tako da prikazuje samo poslednjih 5000 odbiraka na graficima (ovo je iz razloga bržeg rada kompleksnih modela). Da bismo mogli da vidimo gafike celokupne simulacje potrebno je da izvršimo kratko podešavanje bloka *Scope*.

Kada otvorimo prozor bloka *Scope*, u njegovom gornjem delu nalazi se toolbar. Druga ikonica sa leve strane u ovom toolbar-u je ikonica *Parameters* (slika17). Kada kliknemo na ovu ikonu dobićemo prozor koji nam omogućava neka podešavanja bloka *Scope*. U delu *Data history* ovog prozora, nalazi se parametar: *Limit data points to last:* koji je po defaultu namešten na 5000 odbiraka. Menjanjem ovog broja može se dakle povećati ili smanjiti broj odbiraka koji će biti prikazani na grafiku unutar bloka *Scope*. Međutim takođe je moguće ovo ograničenje i potpuno ukinuti. Sa leve strane ovog parametra nalazi se kućica (*checkbox*). Ukoliko ova

kućica nije selektovana, tada neće biti ograničenja u pogledu maksimalnog broja odbiraka koji će biti prikazani na grafiku (slika 17).



Slika 17: Podešavanje parametara bloka Scope



Slika 18: Izgled grafika dobijenih simulacijom

Kada smo izvršili ovo podešavanje, pustimo simulaciju ponovo i fdobićemo grafik sa slike 18. Na ovim graficima ljubičastom bojom prikazana je nadtemperatra motora u odnosu na temperaturu sredine (u našem slučaju  $23 \,^{\circ}C$ ). Dakle ako je kritična temperatura rada za motor  $130 \,^{\circ}C$ , a temperatura sredine u kojoj se motor nalazi  $23 \,^{\circ}C$ , tada je očigledno da je maksimalna nadtemperatura koju je motor u stanju da «istrpi»  $107 \,^{\circ}C$ . Dakle, da bismo utvrdili koliko vremena će motor moći da radi u gore opisanim uslovima moramo utvrditi trenutak u kome je nadtemperatura motora porasla iznad granice od  $107 \,^{\circ}C$ .

Ovo je najlakše utvrditi zumiranjem grafika oko ove kritične vrednosti (na primer zumiranjem po Y-osi). Korišćenjem opcija iz toolbox-a dobijen je grafik na slici 19 sa koga se zaključuje da će do pregrevanja motora doći nakon približno 270s tj. 4,5 minuta.



Slika 19: Detalj grafika sa slike 18 – jasno se vidi da do pregrevanja dolazi nakon 270s

Zadatak 2:

Naka BLDC motor poseduje sledeće parametre:  $R_{th}=29K/W$ , termičku vremensku konstantu  $\tau=11,3$ min i maksimalnu radnu temperaturu  $\theta_{max}=130$  °C. Ukoliko je otpornost statorskog namotaja  $R=4,19\Omega$ , simulacijama utvrditi približnu vrednost maksimalne struje koju je motor u stanju da podenese u trajnom radu (smatrati da je temperatura ambijenta 0°C).

Zadatak 3:

Za BLDC motor parametara:  $R_{th}=22,3K/W$ ,  $C_{th}=35,25J/K$ ,  $\theta_{max}=130$  °C, odrediti maksimalno vreme rada sa stujom od 0,5A. Temperatura ambijenta je 35 °C, a statorska otpornost motora iznosi  $R=2,15\Omega$ .