Iztok
BRINOVAR

Dalibor
IGREC

Tehnološko modeliranje energetskih procesov

Zbirka laboratorijskih vaj

Univerzitetna založba
Univerze v Mariboru

Univerza v Mariboru

Fakulteta za energetiko

Tehnološko modeliranje energetskih procesov

Zbirka laboratorijskih vaj

Avtorja
Iztok Brinovar
Dalibor Igrec

April 2022

Naslov **Tehnološko modeliranje energetskih procesov**
Title *Technological Modelling of Power Processes*

Podnaslov **Zbirka laboratorijskih vaj**
Subtitle *Collection of Laboratory Exercises*

Avtorja Iztok Brinovar
Authors (Univerza v Mariboru, Fakulteta za energetiko)

Dalibor Igrec
(Univerza v Mariboru, Fakulteta za energetiko)

Jezikovni pregled *Language edeting* Slavica Božič

Tehnični urednik Jan Perša
Technical editor (Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)

Oblikovanje ovitka Jan Perša
Cover designer (Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)

Grafične priloge *Graphic material* Avtorja

Grafika na ovitku *Cover graphics* power-4892237, Pixabay.com, CC0, 2022

Založnik **Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba**
Published by Slomškov trg 15, 2000 Maribor, Slovenija
https://press.um.si, zalozba@um.si

Izdajatelj **Univerza v Mariboru, Fakulteta za energetiko**
Issued by Hočevarjev trg 1, 8270 Krško, Slovenija
https://www.fe.um.si, fe@um.si

Izdaja *Edition* Prva izdaja

Izdano *Published at* Maribor, april 2022

Vrsta publikacije *Publication type* E-knjiga

Dostopno na *Available at* https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/14

CIP - Kataložni zapis o publikaciji
Univerzitetna knjižnica Maribor

620.9:519.876.2(076.5)(0.034.2)

BRINOVAR, Iztok
Tehnološko modeliranje energetskih procesov [Elektronski vir] : zbirka laboratorijskih vaj / avtorja Iztok Brinovar, Dalibor Igrec. - 1. izd. - E-knjiga. - Maribor : Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba, 2022

Način dostopa (URL):
https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/14
ISBN 978-961-286-555-9 (PDF)
doi: 10.18690/um.fe.2.2022
COBISS.SI-ID 104319747

ISBN 978-961-286-555-9 (pdf)

DOI https://doi.org/10.18690/um.fe.2.2022

Cena *Price* Brezplačni izvod

Odgovorna oseba založnika *For publisher* prof. dr. Zdravko Kačič, rektor Univerze v Mariboru

Citiranje *Attribution* Brinovar, I. in Igrec, D. (2022). *Tehnološko modeliranje energetskih procesov: zbirka laboratorijskih vaj.* Maribor: Univerzitetna založba. doi: 10.18690/um.fe.2.2022

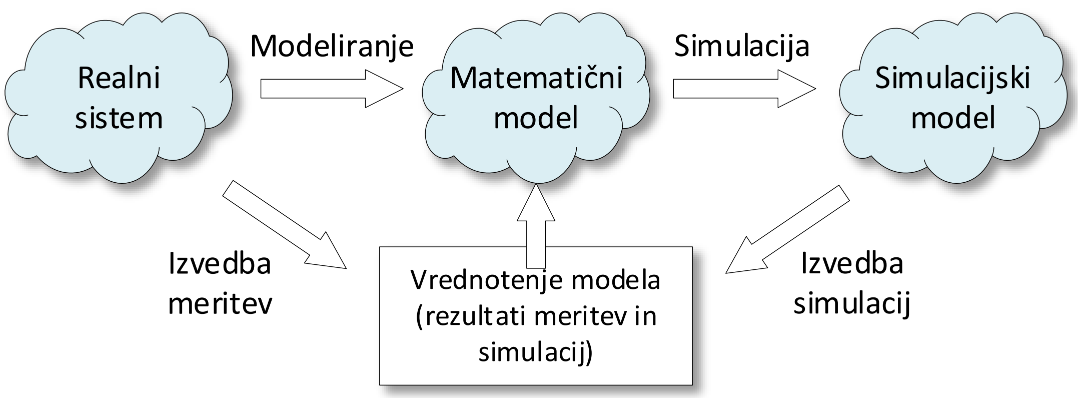
Kazalo

Teoretične osnove

Modeliranje, izvedba simulacij in meritev [1]

Modeliranje in simulacija sta dva neločljiva postopka, ki vsebujeta kompleksne aktivnosti v zvezi s konstrukcijo modelov in eksperimentiranje z modeli v smislu pridobivanja podatkov o obnašanju modeliranega procesa.

Pri tem je modeliranje vezano predvsem na relacije med realnim procesom in njegovimi modeli, simulacija pa se ukvarja s povezavo med matematičnim in simulacijskim modelom (računalniškim programom) – slika 1. S slednjim je mogoče zelo fleksibilno eksperimentirati. Pridobljene časovne odzive izmerjenih in simulacijskih rezultatov vsaj v začetni fazi uporabljamo zlasti za vrednotenje modela.



Slika 1: Modeliranje, izvedba simulacij in meritev.

Konvencionalni zapis matematičnih modelov temelji na diferencialno-algebrajskih enačbah. V procesu modeliranja pridemo običajno do nelinearnih sistemov, ki jih največkrat rešujemo z numerično simulacijo. Izhajamo iz enačb, v katerih upoštevamo fizikalne zakone (enačbe masnega in energijskega ravnotežja, enačbe ravnotežja sil in gibalnih količin, Kirchofovi zakoni ...). Pomembno je tudi, da pravilno izberemo vhode in izhode sistema, t.j. kaj so vplivne veličine in kaj želimo opazovati.

Simulacijska shema (blokovni diagram) [2]

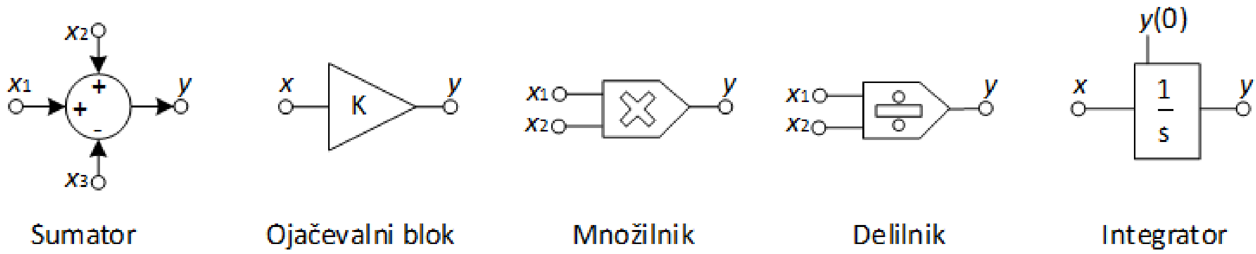
Osnova za zvezno simulacijo nekega modela je posebna grafična predstavitev, ki jo običajno imenujemo simulacijska shema. Le-ta ima veliko skupnega z bločnimi diagrami, ki jih uporabljamo zlasti pri zapisu sistemov vodenja. Zato bomo tudi osnovne gradnike simulacijskih shem imenovali bloki. Bločna predstavitev preurejenih enačb (simulacijska shema) torej vsebuje funkcionalne bloke integratorje. Ostale enačbe preoblikujemo sproti med risanjem, ko nazorno vidimo, katere spremenljivke nam simulacijska shema že ponuja in katere spremenljivke je potrebno izraziti iz preostalih enačb.

Simulacijske sheme in bločni diagrami predstavljajo grafično predstavitev enačb, ki jih dobimo v postopku matematičnega modeliranja. Inženirjem so simulacijske sheme in bločni diagrami bolj nazorni kot kakršne koli sheme, ki so sicer bliže fizikalnemu sistemu, iz njih pa je razvidna sama zgradba modela.

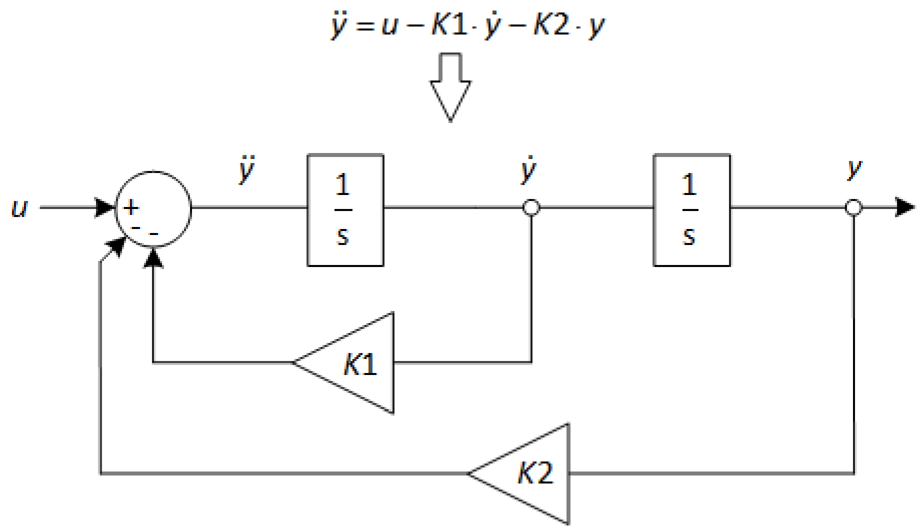
Ker so matematični modeli dinamičnih sistemov običajno opisani s sistemom diferencialnih enačb, predstavlja indirektna metoda za reševanje diferencialnih enačb osnovni simulacijski pristop.

Po tej metodi je potrebno najvišji odvod integrirati tolikokrat, kolikor je njegov red. Indirektna metoda je uporabna, če je možno iz diferencialne enačbe izraziti najvišji odvod in če diferencialna enačba ne vsebuje višjih odvodov vhodnega signala (če pa le-ti nastopajo, je v primeru linearnih sistemov bolj smiselno sistem simulirati po konceptu prenosnih funkcij). V postopku modeliranja in kreiranja simulacijskega modela (simulacijske sheme) je potrebno preurediti diferencialno enačbo tako, da ostane na levi strani najvišji odvod, vse ostalo pa prenesemo na desno stran enačbe.

Osnovne bloke, ki jih uporabljamo v simulacijski shemi, prikazuje slika 2:



Slika 2: Pogosto uporabljeni bloki v simulacijski shemi.



Slika 3: Primer simulacijske sheme.

Univerza v Mariboru

Fakulteta za energetiko

Tehnološko modeliranje energetskih procesov

Zbirka laboratorijskih vaj

Ime in priimek: ______________________________

Vpisna številka: ______________________________

Študijsko leto: ______________________________

Kraj študija: **Krško** **Velenje**

Datum opravljanja va:j

1. ______________________________

2 ______________________________

3. ______________________________

Pregledal: ______________________________

Ocena: ______________________________

Datum: ______________________________

Univerzitetna založba
Univerze v Mariboru

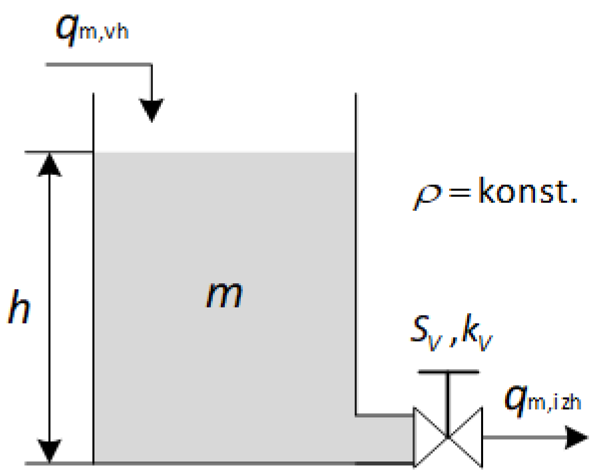
1. vaja

Hidravlični sistem – shranjevalniki tekočin

1.1 Opis vaje [3]

Shranjevalniki fluidov predstavljajo standardne dele najrazličnejših energetskih in procesnih obratov. Energetski procesi lahko v splošnem vsebujejo tudi podsklope, sestavljene iz shranjevalnikov tekočin in plinov, ki so med seboj povezani s cevovodi. Črpalke, kompresorji in ventili pa skrbijo za ustrezne pretoke. V sklopu laboratorijske vaje si bomo pogledali primer shranjevanja in gibanja tekočine (vode) ter postopek modeliranja enostavnega hidravličnega sistema.

Za boljše razumevanje si kot osnovni primer vzemimo shranjevalnik tekočine s konstantnim dotokom, ki ga zagotavlja črpalka. Odtok tekočine se uravnava z ventilom na dnu shranjevalnika. Shranjevalnik je pravokotne oblike in konstantnega preseka (A). Stisljivost tekočine lahko zanemarimo, pri čemer je njena gostota konstantna. Razviti želimo matematični model spreminjanja višine tekočine h v shranjevalniku na sliki.



Slika 4: Shranjevalnik tekočine s konstantnim dotokom.

Glede na zastavljeni problem model temelji na ravnotežni enačbi masnih pretokov (1) oz. ravnotežni enačbi volumenskih pretokov (2):

$$\frac{dm}{dt} = \rho\frac{dV}{dt} = \rho A\frac{dh}{dt} = q_{m,vh} - q_{m,izh} \tag{1}$$

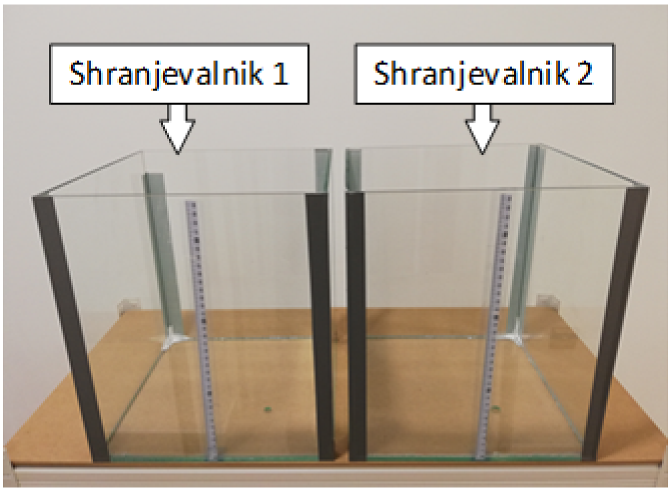
$$\frac{dV}{dt} = A\frac{dh}{dt} = q_{V,vh} - q_{V,izh} \tag{2}$$

Opazimo lahko, da smo v zgornjo enačbo (1) s pomočjo relacije volumna (V) in mase (m) uvedli eno od veličin, ki nas zanima, in sicer h. Drugo veličino, ki jo predstavlja površina prereza odprtine ventila (S_V) na sliki 4, pa uvedemo s pomočjo nelinearne (kvadratične) relacije med pretokom skozi cevi/odprtine/ventile in padcem tlaka. Pri tem je potrebno upoštevati tudi konstanto ventila (K_V), ki je karakteristični podatek ventila in jo podaja proizvajalec, saj je pomembna tudi pri dimenzioniranju in izbiri ventilov. [3]

Na podoben način, kot smo ga prikazali, lahko modeliramo tudi bolj kompleksne strukture povezav shranjevalnikov tekočin.

1.2 Besedilo naloge

V laboratoriju opravite meritve dveh shranjevalnikov tekočin, ki sta prikazana na sliki 5. Shranjevalnika tekočine imata enake dimenzije, vendar različno iztočno odprtino na dnu, zaradi česar bo volumenski pretok $q_{V,izh1} < q_{V,izh2}$. V sklopu vaje izmerite dimenzije obeh shranjevalnikov, ki jih potrebujete za izpeljavo matematičnega modela ter izmerite funkcijsko odvisnost nivoja vode v shranjevalnikih – $h = f(q_{V,vh}, q_{V,izh})$. Pri tem naj bo začetni nivo vode v obeh shranjevalnikih $h(0) = 30$ cm.



Slika 5: Shranjevalnik tekočine.

Laboratorijska vaja je razdeljena na dva dela. V prvem delu se izvajajo ločene meritve na posameznem shranjevalniku (slika 6. a), medtem ko se v drugem delu vaje izvajajo meritve na sistemu dveh povezanih shranjevalnikov (slika 6. b). V okviru vaje:

a) izmerite dimenzije obeh shranjevalnikov tekočine za potrebo izpeljave matematičnega modela.

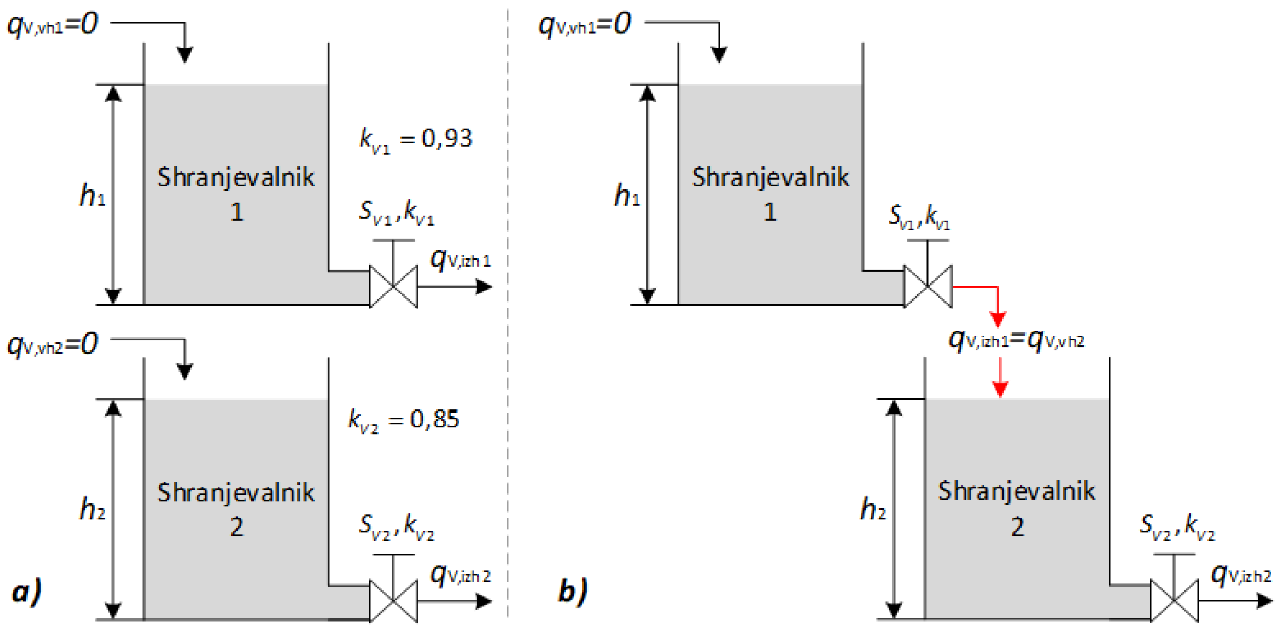
b) izmerite funkcijsko odvisnost $h_1 = f(q_{V,izh1})$ in $h_2 = f(q_{V,izh2})$ - ločena obravnava shranjevalnikov tekočine (slika 6. a), pri čemer je $q_{V,vh1} = 0$ in $q_{V,vh2} = 0$.

c) izmerite funkcijsko odvisnost $h_1 = f(q_{V,izh1})$ in $h_2 = f(q_{V,vh2}, q_{V,izh2})$ sistema dveh povezanih shranjevalnikov tekočin (slika 6. b), pri čemer je $q_{V,vh1} = 0$.

d) izpeljite matematični model za primer enega shranjevalnika tekočine (ločena obravnava) ter narišite pripadajočo simulacijsko shemo.

e) izpeljite matematični model za sistem dveh povezanih shranjevalnikov tekočin.

f) v sklopu računalniških vaj v Matlab/Simulink programu simulirajte dinamično obnašanje sistema za oba obravnavana primera ter primerjajte rezultate z meritvami.



Slika 6: a) Ločena obravnava. b) Sistem dveh povezanih shranjevalnikov tekočin.

1.3 Rezultati

a) Meritev dimenzij shranjevalnika

a = ______________________ - dolžina shranjevalnika

b = ______________________ - širina shranjevalnika

D_1 = ______________________ - premer iztočne odprtine v shranjevalniku 1

$h_1(0)$ = ______________________ - začetni nivo vode v shranjevalniku 1

D_2 = ______________________ - premer iztočne odprtine shranjevalnika 2

$h_2(0)$ = ______________________ - začetni nivo vode v shranjevalniku 2

b) Meritev funkcijske odvisnosti $h_1 = f(q_{V,izh1})$ in $h_2 = f(q_{V,izh2})$ - ločena obravnava

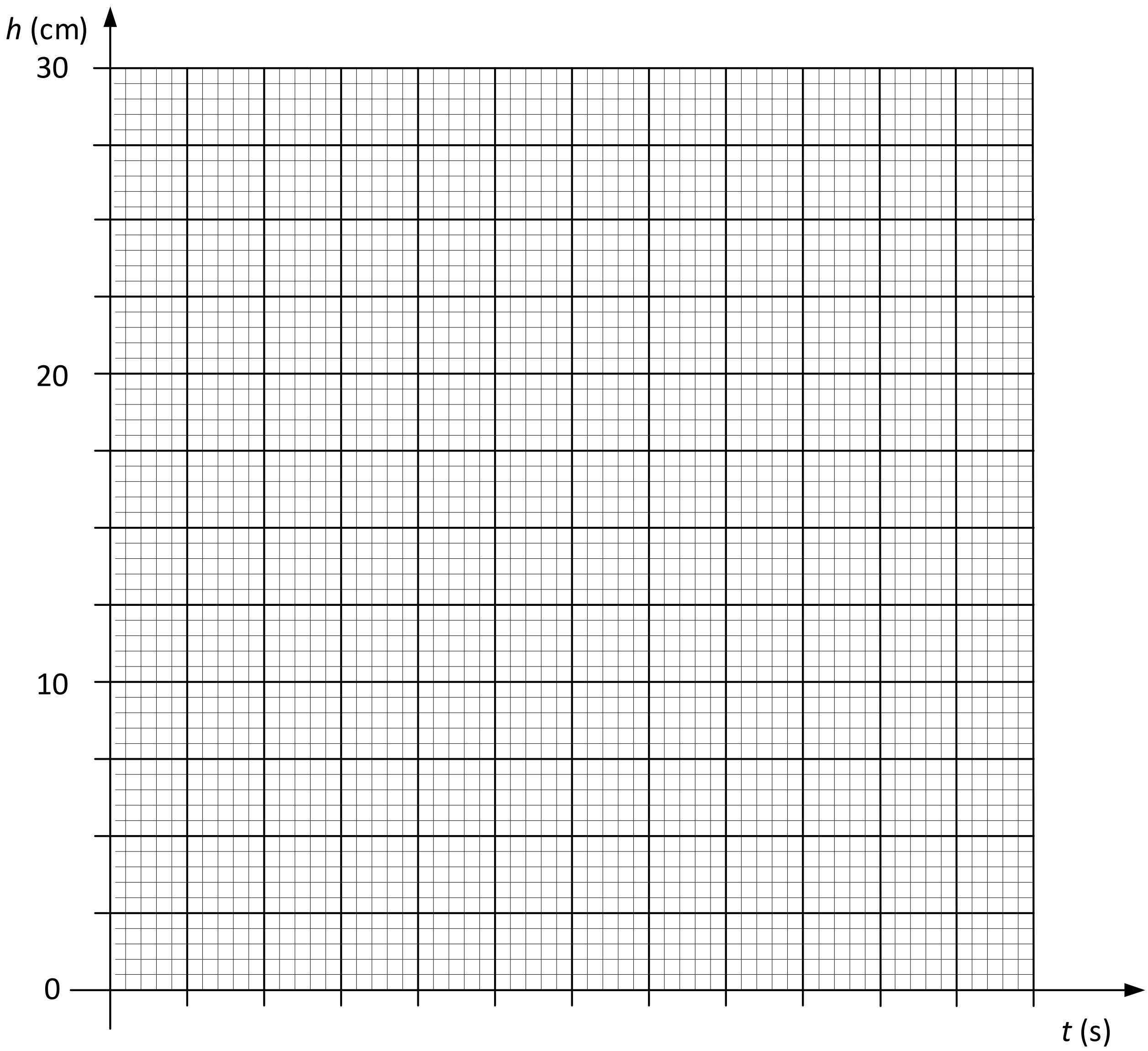
Tabela 1: Rezultati meritev – shranjevalnik 1

a)	t [s]	h_1 [cm]	b)	t [s]	h_1 [cm]
	0	______		0	______
	20	______		20	______
	40	______		40	______
	60	______		60	______
	80	______		80	______
	100	______		100	______
	120	______		120	______
	140	______		140	______

a)	t [s]	h_1 [cm]	b)	t [s]	h_1 [cm]
	160			160	
	180			180	
	200			200	
	220			220	
	240			240	
	260			260	
	280			280	
	300			300	
	320			320	
	340			340	
	360			360	
	370			370	
	380			380	
	390			390	
	400			400	
	410			410	
	420			420	

Tabela 2: Rezultati – shranjevalnik tekočine 2

a)	t [s]	h_2 [cm]	b)	t [s]	h_2 [cm]
	0			0	
	20			20	
	40			40	
	60			60	
	80			80	
	100			100	
	120			120	
	140			140	
	160			160	
	180			180	
	200			200	
	220			220	
	230			230	



Graf 1: Shranjevalnik 1 – graf_____. Shranjevalnik 2 – graf___.

c) Meritev funkcijske odvisnosti $h_1 = f(q_{V,izh1})$ in $h_2 = f(q_{V,vh2}, q_{V,izh2})$ - sistem dveh povezanih shranjevalnikov tekočin.

Tabela 3: Rezultati meritev – shranjevalnik tekočine 1 in 2

a)	t [s]	h_1 [cm]	h_2 [cm]	b)	t [s]	h_1 [cm]	h_2 [cm]
	0	________	________		0	________	________
	20	________	________		20	________	________
	40	________	________		40	________	________
	60	________	________		60	________	________
	80	________	________		80	________	________
	100	________	________		100	________	________
	120	________	________		120	________	________
	140	________	________		140	________	________
	160	________	________		160	________	________
	180	________	________		180	________	________
	200	________	________		200	________	________
	220	________	________		220	________	________
	240	________	________		240	________	________
	260	________	________		260	________	________
	280	________	________		280	________	________

a)	t [s]	h_1 [cm]	h_2 [cm]	b)	t [s]	h_1 [cm]	h_2 [cm]
	300				300		
	320				320		
	340				340		
	360				360		
	370				370		
	380				380		
	390				390		
	400				400		
	410				410		
	420				420		

d) Izpeljava matematičnega modela za primer enega shranjevalnika tekočine (ločena obravnava) in pripadajoča simulacijska shema.

e) Izpeljava matematičnega modela za sistem dveh povezanih shranjevalnikov tekočin.

1.4 Komentar

(kratek komentar vaje, povzetek, temeljne ugotovitve …)

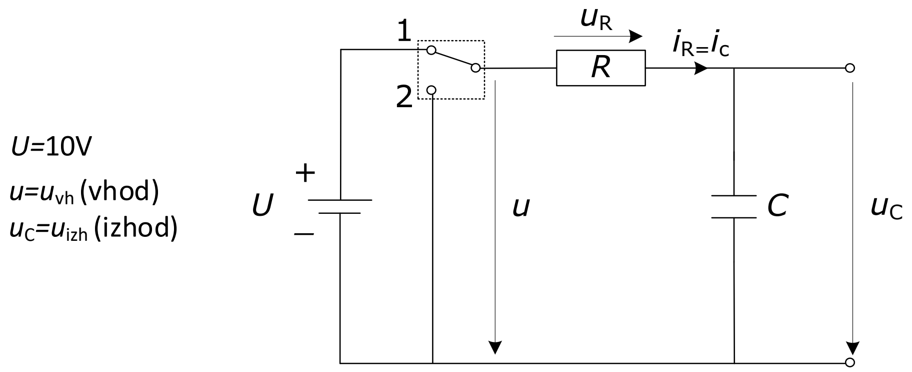
Univerzitetna založba
Univerze v Mariboru

2. vaja

RC vezje

(polnjenje in praznjenje kondenzatorja)

2.1 Vezalna shema



Slika 7: Vezalna shema RC vezja.

2.2 Besedilo naloge

Na osciloskopu izmerite časovne poteke električne napetosti u, u_R, u_c in toka i_c pri polnjenju in praznjenju kondenzatorja (prehodni pojav). V sklopu vaje:

a) na osnovi izmerjenih časovnih potekov določite časovno konstanto prehodnega pojava (τ) ter določite čas trajanja prehodnega pojava t_{PP}, pri tem rezultate primerjajte z izračunanimi vrednostmi. Opazujte časovni potek napetosti u_c v odvisnosti od velikosti R in C elementov za naslednje primere:

- primer 1: R = 1 kΩ, C = 1000 μF.
- primer 2: R = 270 Ω, C = 100 μF.

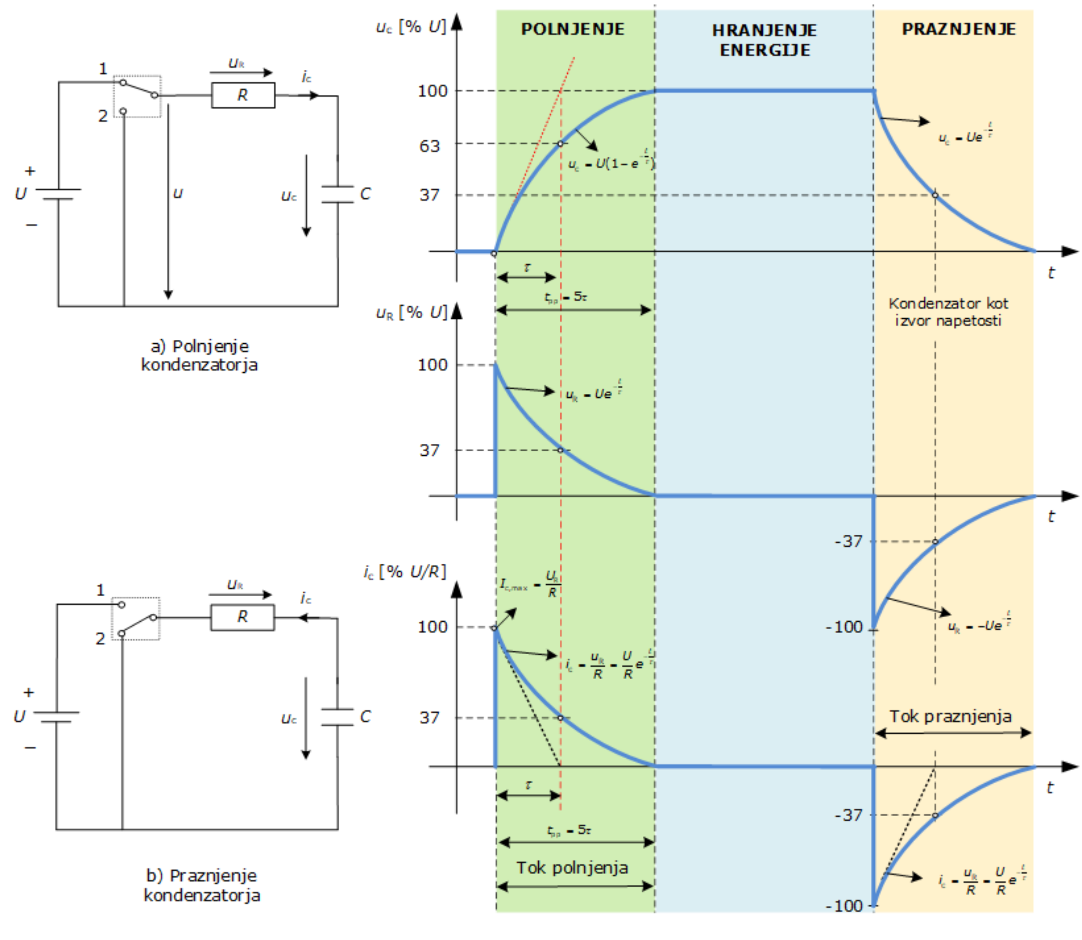
b) izpeljite matematični model RC vezja in v Matlab/Simulink-u izdelajte simulacijski model. Rezultate meritev primerjajte s simulacijskim izračunom.

2.3 Opis vaje

Če opravimo v električnem vezju stikalno operacijo, bodo s časom vse električne veličine prešle iz enega stacionarnega stanja v drugo stacionarno stanje. Prehode iz enega v drugo stacionarno stanje imenujemo prehodni pojavi. V sklopu vaje bomo tako analizirali prehodni pojav v primeru polnjenja in praznjenja kondenzatorja. Na naslednji sliki so prikazani časovni potek toka (i_c) in napetosti (u_c) na kondenzatorju med njegovim polnjenjem in praznjenjem ter napetost na uporu (u_R). [4]

Ko kondenzator priključimo na enosmerno napetost U, se kondenzator ne naelektri takoj, ampak traja nekaj časa preden se na ploščah kondenzatorja nabere dovolj naboja, da ustvari električno polje v kondenzatorju, ki nato ustavi pritok novega naboja. Napetost na ploščah kondenzatorja u_c je namreč odvisna od naboja Q na ploščah, ki pa ga takoj ob vklopu napetostnega izvora ni. [4]

V trenutku vklopa (stikalo je v položaju 1) enosmernega električnega tokokroga s praznim kondenzatorjem je začetni tok polnjenja ($I_{c,max}$) določen z upornostjo upora R ($I = U/R$), saj na kondenzatorju ni nobene napetosti, ki bi nasprotovala napetosti izvora (celotna napetost izvora je na ohmskem uporu). Prazen kondenzator pomeni torej v trenutku priključitve na enosmerno napetost kratek stik. Po določenem času se kondenzator naelektri z elektrino $Q = C \cdot U$, napetost na kondenzatorju narašča in vedno bolj nasprotuje napetosti izvora, kar zmanjšuje tok polnjenja (i_c). Ko se obe napetosti izenačita, imamo v električnem tokokrogu dve enaki, nasprotni napetosti, zato tok preneha teči. Naelektren oz. "poln" kondenzator predstavlja v enosmernem električnem tokokrogu neskončno upornost. Naelektren kondenzator hkrati predstavlja tudi izvor napetosti, posledično je takšno stanje na sliki predstavljeno kot stanje hranjenja energije. [4]



Slika 8: Polnjenje in praznjenje kondenzatorja

Če v električni tokokrog s polnim kondenzatorjem stikalo sklenemo v položaj 2, kot prikazuje slika 8. b, se bo kondenzator začel prazniti z začetnim tokom, ki je določen po Ohmovem zakonu. Zaradi praznjenja kondenzatorja napetost na njem pada, z njo pa tudi tok, ki ga poganja napetost kondenzatorja, vse dokler se kondenzator ne izprazni. Na prikazanih časovnih potekih napetosti in toka temelji delovanje npr. časovnih stikal, generatorjev signalov … [4]

Zakonitost spreminjanja napetosti na kondenzatorju in ostalih električnih veličin kroga med obema stacionarnima stanjema dobimo iz enačbe napetostne zanke [4]:

$$U = u_R + u_c = iR + u_c \quad \rightarrow \quad i = i_R = i_c$$

Z upoštevanjem izraza za tok kondenzatorja $i_c = C \cdot du_c/dt$ in nadaljnjim razvijanjem enačbe, pridemo do rešitve za napetost na uporu ter napetost in tok na kondenzatorju [4]:

$$u_R = Ue^{-\frac{t}{\tau}} \quad , \quad u_c = U(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad , \quad i_c = \frac{u_R}{R} = \frac{U}{R}e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \rightarrow \quad \text{kjer je } \tau = RC$$

Časovna konstanta prehodnega pojava (τ) je karakteristični čas, ki je odvisen od upora *R* in kapacitete kondenzatorja *C*. Po času $t = \tau$ vrednost veličin v prehodnem pojavu naraste na 63 % končne vrednosti ali pade na 37 % začetne vrednosti. Čeprav prehodni pojav izzveni šele po času $t \rightarrow \infty$, pa računsko in tudi z merjenjem lahko ugotovimo, da se prehodni pojav konča po času $t_{pp} \approx 5\tau$, ko vrednost veličine v prehodnem pojavu naraste na praktično 99,5 % končne ali pade na 0,5 % začetne vrednosti. Trajanje prehodnih pojavov v *RC* krogih je praktično premo sorazmerno z vrednostmi *R* in *C* elementov. [4]

V sklopu vaje na osciloskopu opazujte časovne poteke napetosti in toka pri polnjenju in praznjenju kondenzatorja. *RC* vezje skladno s sliko priključimo na enosmerni vir napetosti, nastavimo napetost 10 V ter opazujemo časovne poteke pri različnih vrednostih *R* in *C* elementov. Ko je stikalo v položaju 1 (glej sliko), se bo kondenzator polnil preko upora. S preklopom stikala iz položaja 1 v položaj 2, pa se začne kondenzator preko upora prazniti.

2.4 Seznam merilnih instrumentov in naprav

Enosmerni vir napetosti: ____________________

Osciloskop: ____________________

Tokovna sonda: ____________________

Napetostna sonda: ____________________

2.4 Rezultati

a) Primer 1: R = 1 kΩ, C = 1000 μF

U(100%)= ____________ ; U(63%)= ____________

Slika – osciloskop

Slika: Časovni poteki napetosti u, u_c, u_R in toka i_c (R = 1kΩ, C = 1000μF).

Slika – osciloskop

Slika: Časovni potek napetosti u, uc ter določitev časovne konstante (*R* = 1kΩ, C = 1000µF).

Slika – osciloskop

Slika: Določitev časa trajanja prehodnega pojava tpp (*R* = 1kΩ, C = 1000µF).

Izmerjene in izračunane vrednosti pri R = 1k**Ω**, C = 1000μF.

I_c,max (izračunani) = ______________________ I_c,max (izmerjeni) = ______________________

τ_{izr} = ______________________ τ_{izm} = ______________________

$t_{pp,izr}$ = ______________________ $t_{pp,izm}$ = ______________________

a) Primer 2: R = 270 **Ω**, C = 100 μF

Slika – osciloskop

Slika: Časovni poteki napetosti u, u_c, u_R in toka i_c (R = 270Ω, C = 100μF).

Slika – osciloskop

Slika: Časovni potek napetosti u, uc ter določitev časovne konstante (*R* = 270Ω, C = 100μF).

Slika – osciloskop

Slika: Določitev časa trajanja prehodnega pojava tpp (*R* = 270Ω, C = 100μF).

Izmerjene in izračunane vrednosti pri R = 270**Ω**, C= 100μF.

τ_{izr} = ______________ τ_{izm} = ______________

$t_{\text{pp,izr}}$ = ______________ $t_{\text{pp,izm}}$ = ______________

b) Izpeljava matematičnega modela:

Indirektna metoda:

Slika – Matlab Simulink

Slika: Simulacijski model (blokovna shema) – Matlab/Simulink.

Primer 1: R = 1kΩ, C = 1000μF

Slika – graf/plot (Matlab)

Slika: Rezultati simulacije – časovni potek napetosti u, u_c ter u_R in toka skozi kondenzator i_c (R = 1kΩ, C = 1000μF).

Slika – graf/plot (Matlab)

Slika: Rezultati simulacije – časovni potek napetosti u in u_c ter določitev časovne konstante τ_{sim} ter časa trajanja preh. pojava $t_{pp,sim}$ (R = 1kΩ, C = 1000μF).

Določitev časovne konstante τ ter časa t_{pp} in primerjava rezultatov simulacije z izmerjeno vrednostjo τ:

τ_{izm} = ____________________ τ_{sim} = ____________________

$t_{pp,izm}$ = ____________________ $t_{pp,sim}$ = ____________________

Izračun relativne vrednosti pogreška v %:

Za časovno konstanto τ:

$$e_{r,1} = \frac{\tau_{sim} - \tau_{izm}}{\tau_{izm}} \cdot 100 \ [\%]$$

Za čas trajanja preh. pojava t_{pp}:

$$e_{r,2} = \frac{t_{pp,sim} - t_{pp,izm}}{t_{pp,izm}} \cdot 100 \ [\%]$$

$e_{r,1}$ = ____________________ $e_{r,2}$ = ____________________

Primer 2: R = 270Ω, C = 100μF

Slika – graf/plot (Matlab)

Slika: Rezultati simulacije – časovni potek napetosti u, u_c ter u_R in toka skozi kondenzator i_c (R = 270Ω, C = 100μF).

Slika – graf/plot (Matlab)

Slika: Rezultati simulacije – časovni potek napetosti u in u_c ter določitev časovne konstante τ_{sim} ter časa trajanja preh. pojava $t_{pp,sim}$ (R = 270Ω, C = 100μF).

Določitev časovne konstante τ ter časa t_{pp} in primerjava rezultatov simulacije z izmerjeno vrednostjo τ:

τ_{izm} = ____________________ τ_{sim} = ____________________

$t_{pp,izm}$ = ____________________ $t_{pp,sim}$ = ____________________

Izračun relativne vrednosti pogreška v %:

Za časovno konstanto τ:

$$e_{r,1} = \frac{\tau_{sim} - \tau_{izm}}{\tau_{izm}} \cdot 100 \ [\%]$$

Za čas trajanja preh. pojava t_{pp}:

$$e_{r,2} = \frac{t_{pp,sim} - t_{pp,izm}}{t_{pp,izm}} \cdot 100 \ [\%]$$

$e_{r,1}$ = ________________ $e_{r,2}$ = ________________

2.4 Komentar

(kratek komentar vaje, povzetek, temeljne ugotovitve …)

Zapišite v obliki komentarja odgovore na naslednja vprašanja:

Kako je definiran prehodni pojav?

Kaj predstavlja prazen kondenzator v trenutku priključitve na enosmerno napetost?

Kaj predstavlja naelektren oz. "poln" kondenzator v enosmernem električnem tokokrogu?

S čim je definiran začetni tok polnjenja kondenzatorja – $I_{c,max}$?

Kako je definiran čas trajanja prehodnega pojava?

Definicija časovne konstante prehodnega pojava ( )?

Komentirajte rezultate meritev z rezultati izračunov/simulacij.

3. vaja

Enostavna dušilka

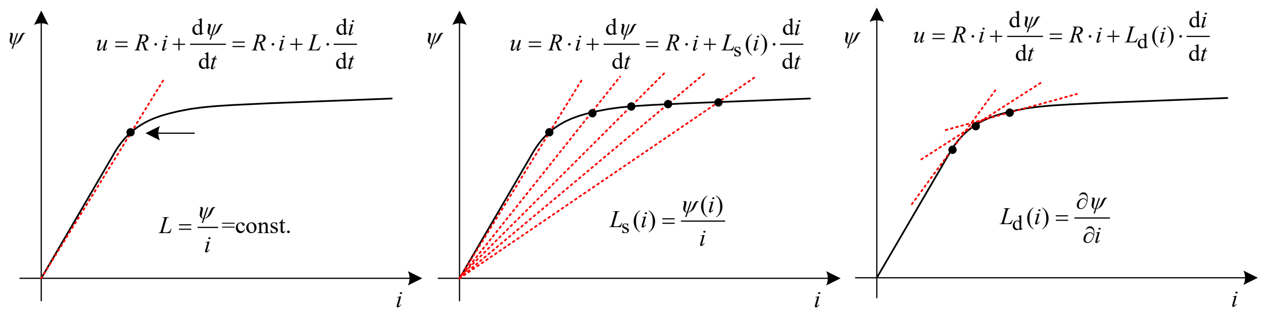
3.1 Opis vaje

Tuljava je elektronski element z dvema priključkoma, katerega glavna značilnost je induktivnost. Induktivnost (*L*) je elektrotehniška in fizikalna veličina, ki podaja razmerje med magnetnim pretokom (ϕ) skozi sklenjeno zanko in električnim tokom (*i*), ki je vzrok tega magnetnega pretoka. Induktivnost je snovno-geometrijska značilnost, sposobnost vodnikov, magnetov in tuljav, da s pomočjo električnega toka ustvarijo magnetni sklep (ψ). Tuljava je element v električnih vezjih, ki se upira hitrim spremembam toka, ki teče skozi tuljavo, zato te elemente imenujemo dušilke. Ločimo zračne dušilke in dušilke s feromagnetnim jedrom. [4] [5]

Modeliranje enostavne dušilke

Dinamični matematični modeli električnih strojev in naprav nam prikazujejo povezavo med njihovimi vhodi in izhodi ter opisujejo dinamiko njihovega obratovanja. S pomočjo modelov lahko opravimo analizo njihovih dinamičnih in statičnih lastnosti ter načrtujemo vodenje (el. stroj). Od modela pričakujemo, da se bo na spremembo vzbujanj odzival čim bolj podobno kot realni stroj oz. naprava. [6]

Do matematičnega modela pridemo s pomočjo teoretičnega in eksperimentalnega modeliranja, pri čemer se obe metodi dopolnjujeta. Pri modeliranju električnih naprav in strojev pogosto upoštevamo dve poenostavitvi, ki zajemata izgube v železu in nelinearne magnetne lastnosti železa. Glede na te poenostavitve dobimo poenostavljene modele, ki so robustnejši, vendar manj natančni. Modeli, ki upoštevajo magnetne nelinearnosti, so kompleksnejši in natančnejši, vendar je področje njihove uporabe odvisno od natančnosti določenih karakteristik magnetnih sklepov, v katerih so zajete magnetne nelinearnosti magnetnega kroga. V splošnem so dinamični modeli električnih strojev in naprav nelinearni, vendar jih lahko v okolici delovne točke lineariziramo ter tako dobimo linearni model. Induktivnost linearnega modela predstavlja naklon premice, ki poteka iz izhodišča skozi določeno delovno točko (slika 9. a). Za širše področje opazovanja potrebujemo nelinearne modele, pri čemer potrebujemo ustrezen način za modeliranje magnetnih nelinearnosti železa. Za magnetno nelinearne modele je značilno, da induktivnost ni več konstantna in jo lahko izpeljemo z uvedbo statičnih in dinamičnih induktivnosti, predstavljenih na sliki 9. b in 9. c. [6]



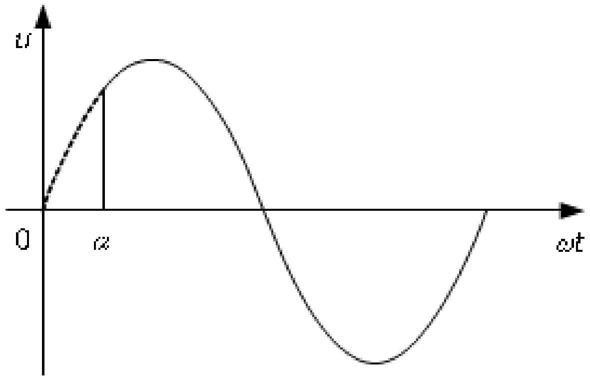
Slika 9: a) Določitev induktivnosti za linearni model b) Določitev statične induktivnosti $L_s = \psi / i$ in c) Določitev dinamične induktivnosti $L_d = \partial\psi / \partial i$ za nelinearni model.

Karakteristika magnetnega sklepa $\psi = f(i)$ je karakteristika celotnega magnetnega kroga. Podobno kot pri karakteristiki snovi (B/H karakteristika) lahko sedaj pri karakteristiki naprave uvedemo statične in dinamične induktivnosti, prikazane na sliki 9.b. Dinamična induktivnost nam torej podaja naklon tangente na karakteristiko magnetnega sklepa.

V sklopu laboratorijskih in računalniških vaj si bomo tako pogledali eksperimentalno določitev karakteristike magnetnih sklepov $\psi(i)$ enostavne dušilke ter določitev dinamičnih induktivnosti $L_d = \partial\psi / \partial i$ (magnetno-nelinearnih parametrov), katere uporabimo pri izpeljavi dinamičnega modela enostavne dušilke. [6]

Za ovrednotenje dinamičnega modela enostavne dušilke bomo v sklopu vaje izmerili tudi prehodni pojav pri vklopu dušilke na omrežno napetost ter rezultate meritev primerjali s simulacijskimi izračuni. V dinamični model bo kot vhodna neodvisna veličina vstavljena izmerjena električna napetost, medtem ko izhod predstavlja časovni odziv električnega toka skozi dušilko. V kolikor želimo ustrezno analizirati dinamično obnašanje enostavne dušilke, pa je potrebno poznavanje vpliva kota vklopa in remanentnega magnetizma na časovni potek vklopnega toka, kar pa je predstavljeno v nadaljevanju.

Prehodni pojav pri vklopu enostavne dušilke na omrežno napetost



Slika 10: Vklopni kot α.

Slika 11: Elektronsko stikalo.

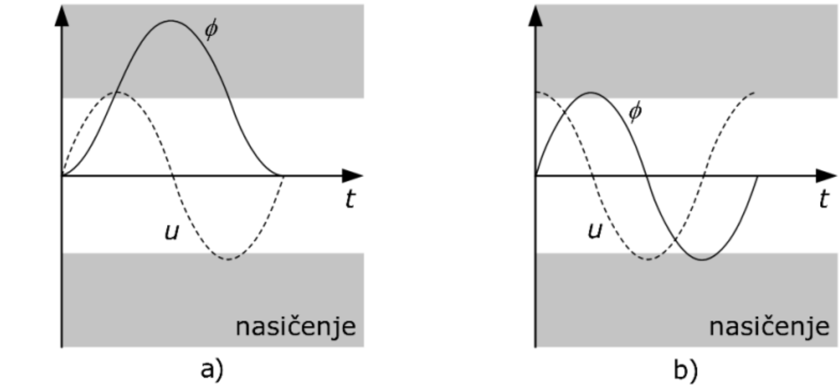
Do prehodnih pojavov pride pri vsaki spremembi obratovalnega stanja: pri priključitvi električnega stroja ali naprave na mrežo, pri spremembi obremenitve, v primeru kratkega stika na primarni ali sekundarni strani, itd. Pri vklopu dušilke na omrežno napetost bomo opazovali časovni potek toka in napetosti pri različnih trenutkih (kotih) vklopa. Želeni vklopni kot a ($\omega t = \alpha$) v resnici predstavlja časovni interval med pozitivnim prehodom napetosti skozi nič in trenutkom vklopa (slika 10). V ta namen bomo uporabili elektronsko stikalo (slika 11), ki poskrbi ravno za ta časovni zamik pri vklopu dušilke na omrežno napetost. Elektronsko stikalo uporabimo tako, da z nastavljivim gumbom določimo želeni vklopni kot ter s pritiskom tipke izvedemo vklop. Vklopni kot nastavljamo na območju od 0 do 360°, tako da vklope v negativni polperiodi napetosti izvedemo s koti nad 180°. [7]

V stacionarnem stanju je tok prostega teka skoraj enak magnetilnemu in po navadi znaša le nekaj odstotkov nazivnega toka. V času prehodnega pojava ob vklopu dušilke na omrežje pa lahko magnetilni tok zelo naraste in celo nekajkrat preseže vrednost nazivnega. V nadaljevanju je tako predstavljen vpliv kota vklopa in remanentnega magnetizma na vklopni pojav. [7]

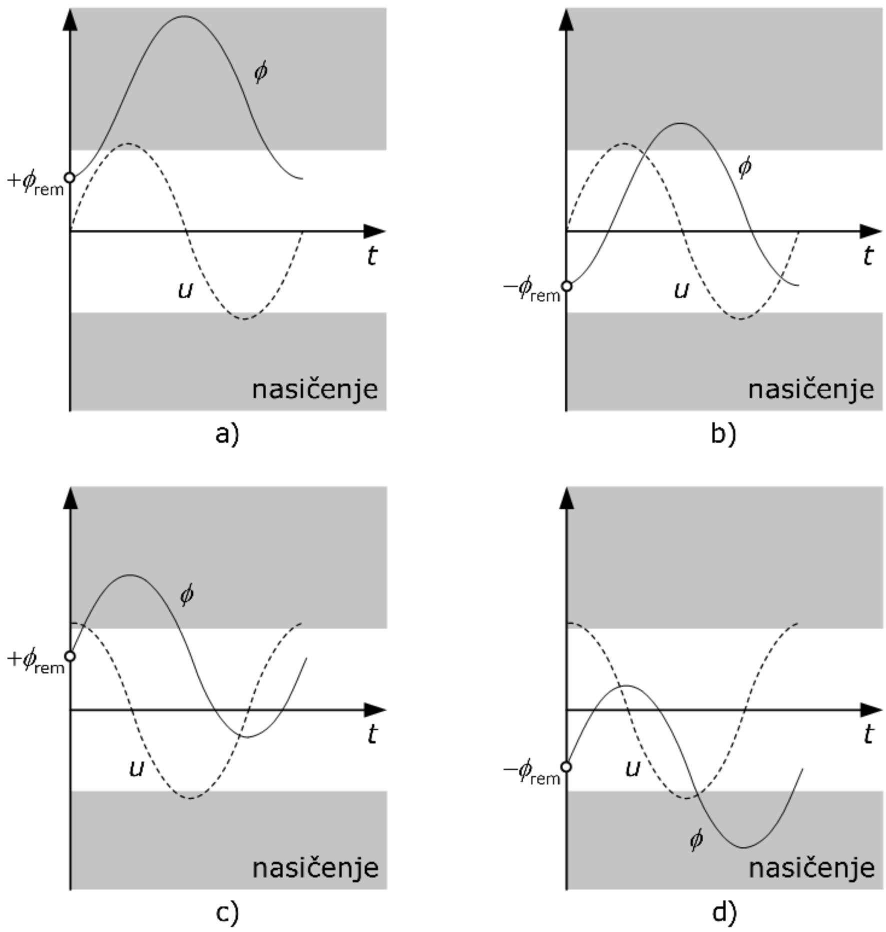
Vpliv kota vklopa in remanentnega magnetizma na vklopni tok

Ker je časovni potek napetosti običajno sinusni, lahko rešitev hitro poiščemo in tudi grafično predstavimo. Oglejmo si primere, ko v jedru ni remanentnega magnetnega polja, vklopni kot pa je enkrat 0°, drugič pa 90° (slika 12).

V kolikor je v železnem jedru prisotno remanentno magnetno polje, še vedno velja, da je časovni potek magnetnega pretoka integral napetosti, le začetna vrednost je v tem primeru premaknjena na vrednost remanenčnega magnetnega pretoka (ϕ_{rem}). Na sliki 12 so prikazani poteki magnetnih pretokov pri različnih kotih vklopa in pri različnih smereh remanentnega magnetnega pretoka ($-\phi_{rem}$, $+\phi_{rem}$). [7]



Slika 12: Magnetni pretok pri vklopnem toku (a) 0° in (b) 90° brez remanentnega magnetnega pretoka.



Slika 13: Magnetni pretok pri vklopnem kotu 0°, (a) s pozitivno in (b) negativno remanenco ter pri vklopnem kotu 90°, (c) s pozitvno in (d) negativno remanenco.

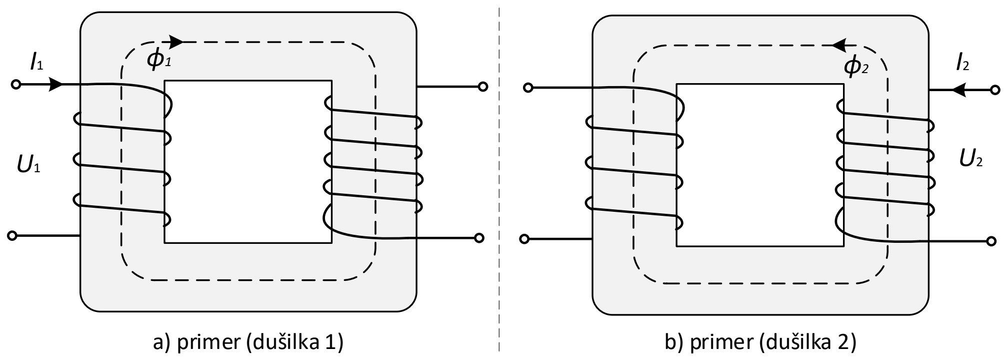
Iz prikazanih potekov magnetnih pretokov vidimo, da na potek vklopnega toka ne vpliva le vklopni kot, temveč tudi magnetne razmere v jedru v trenutku vklopa. [7]

Na vseh diagramih desno so sicer prikazani le magnetni pretoki. Tok, potreben, da ustvari tako magnetno polje, pa je odvisen od magnetilne krivulje železnega jedra, ki pa je v večini primerov nelinearna, z značilnim magnetnim nasičenjem pri večjih vrednostih magnetnega polja. [7]

To pomeni, da so vrednosti tokov, ki morajo ustvariti magnetni pretok, ki leži že globoko v nasičenju, zelo veliki in v najneugodnejših primerih (npr. slika 13) lahko dosežejo tudi nekaj desetkratno vrednost nazivnega toka. [7]

3.2 Besedilo naloge

V sklopu vaje izvedite meritve na enofaznem transformatorju, ki ga lahko v prostem teku obravnavamo kot enostavno dušilko z navitjem okoli železnega jedra. Meritve opravite v primeru napajanja primarnega navitja (Slika 14: primer a – dušilka 1) ter v primeru napajanja sekundarnega navitja (Slika 14: primer b – dušilka 2). Meritve opravite pri različnih amplitudah napajalne napetosti ($f = 50$Hz), in sicer tako, da boste lahko v sklopu računalniških vaj določili enolično magnetno nelinearno karakteristiko magnetnih sklepov $\psi(i)$ za oba primera.



Slika 14: Enofazni transformator obravnavan kot enostavna dušilka.

Zapišite napetostno ravnotežno enačbo enostavne dušilke. Z uporabo definicije dinamične induktivnosti napetostno ravnotežno enačbo ustrezno preoblikujte. Izpeljana diferencialna enačba predstavlja magnetno-nelinearni dinamični model enostavne dušilke:

Vezalni načrt:

Nazivni podatki transformatorja ter izmerjene upornosti hladnega navitja:

Seznam instrumentov in naprav:

1. del vaje: V okviru vaje izvedite meritve, potrebne za določitev karakteristik magnetnih sklepov $\psi(i)$ enostavne dušilke ter določitev dinamičnih induktivnosti $L_{\mathrm{d}} = \partial\psi / \partial i$:

a) Z merilnim sistemom dSpace 1104 posnemite časovne poteke napetosti in tokov v primeru napajanja primarnega navitja (dušilka 1). Meritve opravite pri različnih amplitudah napajalne napetosti.

b) Z merilnim sistemom dSpace 1104 posnemite časovne poteke napetosti in tokov v primeru napajanja sekundarnega navitja (dušilka 2). Meritve opravite pri različnih amplitudah napajalne napetosti.

2. del vaje: V okviru vaje posnemite prehodni pojav pri vklopu transformatorja na omrežno napetost v primeru napajanja primarnega in sekundarnega navitja. Vklop neobremenjenega transformatorja izvedite za dva skrajna primera. To sta vklop neobremenjenega transformatorja v trenutku,

1. ko je napetost maksimalna - $u = \hat{U} = \sqrt{2}U$ oziroma pri vklopnem kotu $\omega t = \alpha = 90^\circ$.
2. ko je napetost enaka nič - $u = 0$ oziroma pri vklopnem kotu $\omega t = \alpha = 0^\circ$ napetosti.

Razmagnetenje in namagnetenje transformatorskega jedra:

Vklopne pojave bomo opazovali pri različnih vklopnih kotih in pri različnih stanjih remanenčnega magnetnega polja v transformatorskem jedru, in sicer za primer:

a) razmagnetenega jedra (počasno zmanjševanje amplitude napajalne napetosti proti 0),
b) namagnetenega jedra (nenadni izklop sinusne napajalne/omrežne napetosti efektivne vrednosti 230 V),
c) namagnetenega jedra na pozitivno vrednost gostote remanentnega magnetnega pretoka $+B_r$ (navitje prikopimo na enosmerni vir napajanja ter po namagnetenju jedra prekinemo tokokrog),
d) namagnetenega jedra na negativno vrednost gostote remanentnega magnetnega pretoka $-B_r$ (navitje prikopimo na enosmerni vir napajanja obratne polaritete ter po namagnetenju jedra prekinemo tokokrog).

3.3 Rezultati – 1. del vaje

a) Primarno navitje – dušilka 1

Tabela 4: Rezultati meritev – primarno navitje

$U_{1,\check{z}el}$ [V]	U_1 [V]	I_1 [A]	Ime shranjene datoteke (dSpace)
440	________	________	________________________
420	________	________	________________________
400	________	________	________________________

$U_{1,\check{z}el}$ [V]	U_1 [V]	I_1 [A]	Ime shranjene datoteke (dSpace)
380			
360			
340			
320			
300			
280			
260			
240			
220			
200			
180			
160			
140			
120			
100			
80			
60			
40			

$U_{1,\check{z}el}$ [V]	U_1 [V]	I_1 [A]	Ime shranjene datoteke (dSpace)
20			
0			

b) Sekundarno navitje – dušilka 2

Tabela 5: Rezultati meritev – sekundarno navitje

$U_{2,\check{z}el}$ [V]	U_2 [V]	I_2 [A]	Ime shranjene datoteke (dSpace)
320			
300			
280			

$U_{1,\check{z}el}$ [V]	U_1 [V]	I_1 [A]	Ime shranjene datoteke (dSpace)
260			
240			
220			
200			
180			
160			
140			
120			
100			
80			
60			
40			
20			
0			

3.4 Rezultati – 2. del vaje

Primarno navitje – dušilka 1

1. Vklopni pojav v primeru, ko je napetost maksimalna - $u_1 = \hat{U}_1 = \sqrt{2}U_1$ oziroma pri vklopnem kotu $\omega t = \alpha = 90^\circ$.

Tabela 6: Rezultati meritev – primarno navitje – vklopni pojav – $u_1 = \hat{U}_1 = \sqrt{2}U_1$

Stanje feromagnetnega jedra	Št. meritve	Temenska vrednost toka $\hat{I}_1$ [A]	Ime shranjene datoteke (dSpace)
a) razmagneteno jedro	1.		
	2.		
b) namagneteno jedro (nenadni izklop)	1.		
	2.		
c) namagneteno jedro (+B_r)	1.		
	2.		
d) namagneteno jedro (- B_r)	1.		
	2.		

2. Vklopni pojav v primeru, ko je napetost enaka nič - $u_1 = 0$ oziroma pri vklopnem kotu $\omega t = \alpha = 0^\circ$ napetosti.

Tabela 7: Rezultati meritev – primarno navitje – vklopni pojav – $u_1 = 0$

Stanje feromagnetnega jedra	Št. meritve	Temenska vrednost toka $\hat{i}_1$ [A]	Ime shranjene datoteke (dSpace)
a) razmagneteno jedro	1.		
	2.		
b) namagneteno jedro (nenadni izklop)	1.		
	2.		
c) namagneteno jedro (+B_r)	1.		
	2.		
d) namagneteno jedro (- B_r)	1.		
	2.		

Sekundarno navitje – dušilka 2

1. Vklopni pojav v primeru, ko je napetost maksimalna - $u_2 = \hat{U}_2 = \sqrt{2}U_2$ oziroma pri vklopnem kotu $\omega t = \alpha = 90^\circ$

Tabela 8: Rezultati meritev – sekundarno navitje – vklopni pojav – $u_2 = \hat{U}_2 = \sqrt{2}U_2$

Stanje feromagnetnega jedra	Št. meritve	Temenska vrednost toka $\hat{I}_2$ [A]	Ime shranjene datoteke (dSpace)
a) razmagneteno jedro	1.		
	2.		
b) namagneteno jedro (nenadni izklop)	1.		
	2.		
c) namagneteno jedro (+B_r)	1.		
	2.		
d) namagneteno jedro (- B_r)	1.		
	2.		

2. Vklopni pojav v primeru, ko je napetost enaka nič - $u_2 = 0$ oziroma pri vklopnem kotu $\omega t = \alpha = 0^\circ$ napetosti.

Tabela 9: Rezultati meritev – sekundarno navitje – vklopni pojav – $u_2 = 0$

Stanje feromagnetnega jedra	Št. meritve	Temenska vrednost toka $\hat{I}_2$ [A]	Ime shranjene datoteke (dSpace)
a) razmagneteno jedro	1.		

Stanje feromagnetnega jedra	Št. meritve	Temenska vrednost toka $\hat{I}_2$ [A]	Ime shranjene datoteke (dSpace)
	2.		
b) namagneteno jedro (nenadni izklop)	1.		
	2.		
c) namagneteno jedro (+B_r)	1.		
	2.		
d) namagneteno jedro (- B_r)	1.		
	2.		

3.5 Komentar

(kratek komentar vaje, povzetek, temeljne ugotovitve …)

Zapišite v obliki komentarja odgovore na naslednja vprašanja:

Opišite postopek (po korakih) določitve magnetno-nelinearnih parametrov (dinamičnih induktivnosti) dinamičnega modela enostavne dušilke na osnovi izmerjenih časovnih potekov napetosti in tokov.

Kateri dinamični model je po vašem mnenju najbolj fizikalno utemeljen in bi se nekako najbolj ujemal z rezultati meritev v prehodnih pojavih in v stacionarnem stanju: model s statičnimi induktivnostmi ali model z dinamičnimi induktivnostmi?

V sklopu računalniških vaj izdelajte poročilo izvedenih meritev ter preverite, kako se odziv dinamičnega modela enostavne dušilke ujema z rezultati meritev.

4. vaja

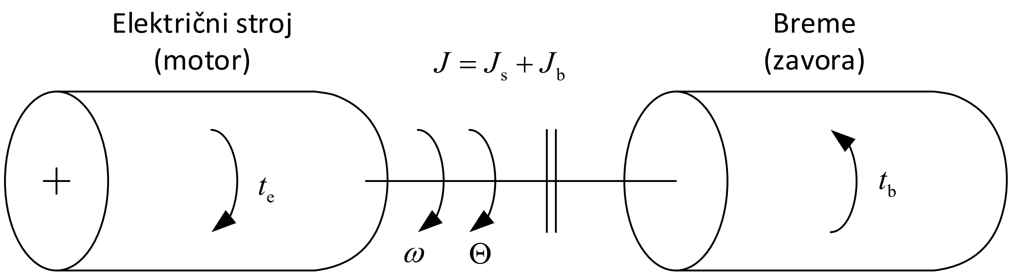
Eksperimentalna določitev parametrov mehanskega podsistema električnega stroja

4.1 Opis vaje in merilnih metod

Motor in breme sta običajno povezana z reduktorjem, ki ga karakterizira ustrezna prestava hitrosti, elastičnost in mrtvi hod. Pri izvedbi standardnih meritev električnih motorjev pa sta motor in breme povezana s togo sklopko, skupen vztrajnostni moment obeh pa je skladno s sliko 13 enak $J = J_s + J_b$, pri čemer je J_s vztrajnostni moment el. stroja (motorja) ter J_b vztrajnostni moment bremena (aktivne zavore). Dinamične razmere na sliki 15 opiše diferencialna enačba gibanja (enačba mehanskega ravnotežja rotirajočih mas na gredi) [8]:

$$J\frac{d\omega}{dt} = t_e - t_b \quad \Leftrightarrow \quad \omega = \frac{d\Theta}{dt} \tag{1}$$

t_e je trenutna vrednost električnega navora, t_b je trenutna vrednost mehanskega navora (bremena), Θ in ω in pa sta kot zavrtitve gredi in trenutna hitrost. Enačba upošteva dejstvo, da je vsota vseh navorov na gredi enaka nič. [8]

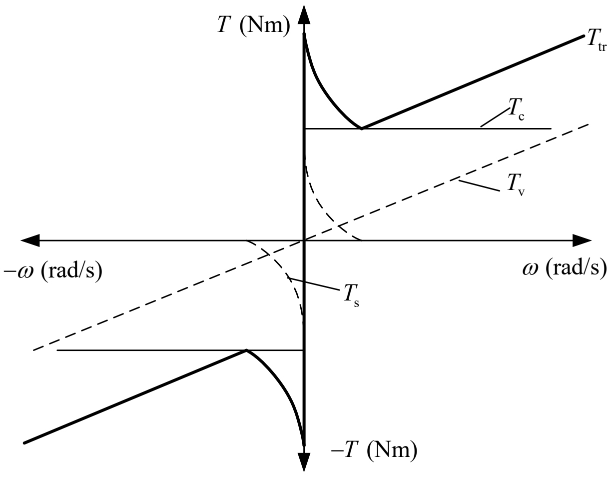


Slika 15: Električni pogon s togo sklopko in pripadajoči navori na gredi.

Navor bremena t_b je sestavljen iz navora trenja t_{tr}, navora zračnega upora t_z in čistega navora bremena t_L, torej velja $t_b = t_L + t_{tr} + t_z$. [8]

Navor trenja t_{tr} je prisoten na motorski in bremenski strani in je v skladu s sliko 16 sestavljen iz naslednjih delov [8]:

- navora statičnega trenja t_s, ki je od nič različen le v okolici stanja,
- navora Coulombovega trenja t_C, ki je konstanten in odvisen samo od smeri vrtenja,
- navora viskoznega trenja t_v, ki je linearno odvisen od hitrosti.



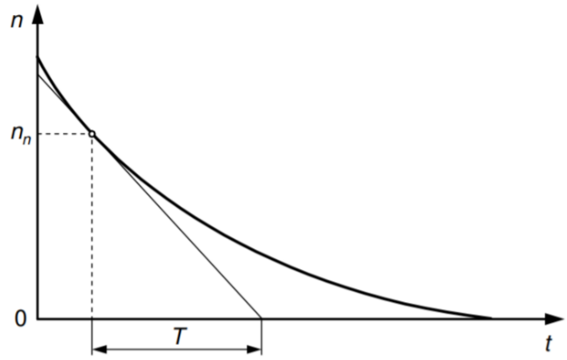
Slika 16: Navori trenja.

Na sliki 16 so narisane stacionarne vrednosti navorov, zato so označene z velikimi črkami. Navor statičnega trenja t_s je težko izmeriti, pojavi pa se samo pri hitrosti nič. Celoten navor bremena je potem enak vsoti posameznih prispevkov: $t_b = t_L + t_v + t_C + t_z$. Pri natančnem modeliranju bi morali upoštevati vse naštete prispevke navorov, vendar pogosto naredimo zanemaritve in s tem izračune dodatno poenostavimo. V obravnavi bomo tako poleg mehanskega navora bremena t_L upoštevali le navor viskoznega trenja $t_v = f \cdot d\Theta/dt$ ter navor Coulombovega trenja t_C, s čimer dobi enačba (1) naslednjo obliko [7]:

$$J\frac{d^2\Theta}{dt^2} = t_e - t_L - t_C - f\frac{d\Theta}{dt} \tag{2}$$

Določitev parametrov mehanskega podsistema zajema meritev karakteristike navora trenja, na osnovi katere določimo Coulombovo trenje T_C in koeficient viskoznega trenja f ter izvedbo iztečnega preizkusa, na osnovi katerega lahko določimo vztrajnostni moment pogona J. Za določitev Coulombovega trenja in koeficienta viskoznega trenja je potrebno ločeno izmeriti karakteristiko trenja testnega motorja in bremena (zavore). Karakteristiko trenja testnega motorja izmerimo tako, da izmerimo vrtilni moment na gredi, pri čemer nastavljamo vrtljaje z zavoro, karakteristiko trenja zavore pa določimo tako, da nastavljamo vrtljaje z motorjem. Iz dobljenih karakteristik lahko določimo in izračunamo Coulombovo trenje in koeficient viskoznega trenja celotnega pogona. Naklon karakteristike trenja je koeficient viskoznega trenja $f = \Delta T_{tr}/\Delta\omega = (60 \cdot \Delta T_{tr})/(2\pi \cdot \Delta n)$, odsek na ordinati pa Coulombovo trenje T_c. [7]

Vztrajnostni moment J se najpogosteje določa eksperimentalno. Merilnih metod je več, v sklopu vaje pa bo vztrajnostni moment določen na osnovi iztečnega preizkusa. Iztek stroja je prehodni pojav, ki traja od izklopa napajanja do ustavitve. Iztečna krivulja pa podaja odvisnost vrtljajev od časa $n = f(t)$ – slika 17. Izmerimo jo tako, da motorju, ki se vrti z vrtilno hitrostjo, ki je približno 15 % nad nazivnimi vrtljaji, izključimo napajanje. Stroj se začne ustavljati, časovni potek vrtljajev pri izteku pa posnamemo. [7]



Slika 17: Iztečna krivulja.

Pri določevanju vztrajnostnega momenta na osnovi iztečnega preizkusa je potrebno upoštevati, da pri iztekanju nasprotuje vztrajnosti rotirajoče mase samo vrtilni moment trenja t_{tr} (imenovan tudi zavorni navor, saj vključuje predvsem izgube trenja in ventilacije ter izgube v železu), zato lahko glede na (1) zapišemo [7]:

$$J\frac{d\omega}{dt} = J\cdot\frac{2\pi}{60}\cdot\frac{dn}{dt} = t_{tr} \qquad (3)$$

Diferencialni kvocient dn/dt v enačbi (3) lahko pri grafičnem določevanju kotnega pojemka (slika 16) nadomestimo z diferenčnim in zapišemo [7]:

$$T_{tr} = J\cdot\frac{2\pi}{60}\cdot\frac{\Delta n}{\Delta t} = J\cdot\frac{2\pi}{60}\cdot\frac{n_n}{T} \qquad (4)$$

pri čemer je T namišljen iztečni čas, v katerem bi se stroj ustavil, če bi bil zavorni navor ves čas konstanten. Ta čas je enak subtangenti na krivuljo izteka v opazovani točki n_n in ga lahko grafično določimo. Na podlagi izračunanega zavornega navora oziroma navora trenja T_{tr} in krivulje izteka lahko na podlagi enačbe (4) izračunamo še vztrajnostni moment pogona J. V kolikor poznamo kataloški podatek o vztrajnostnem momentu bremena J_b

oziroma zavore, lahko skladno s sliko 13 določimo tudi vztrajnostni moment testnega motorja J_s. [7]

4.2 Besedilo naloge

V sklopu vaje izmerite karakteristiko navora trenja testnega motorja in zavore (bremena) ter na osnovi iztečnega preizkusa določite skupni vztrajnostmi moment pogona J. Pri tem določite vse potrebne parametre mehanskega podsistema električnega pogona. Določene parametre uporabite za izvedbo dinamičnega modela v sklopu računalniških vaj. V okviru vaje izmerite:

a) karakteristiko navora trenja testnega motorja.
b) karakteristiko navora trenja testnega zavore.
c) grafično določite Coulombovo trenje T_C in koeficient viskoznega trenja f.
d) na osnovi iztečnega preizkusa določite vztrajnostni moment pogona J (motor + zavora) in izračunajte vztrajnostni moment testnega motorja J_s.

Vezalni načrt:

Popis merilne opreme:

Nazivni podatki testnega motorja:

Nazivni podatki aktivne zavore:

4.3 Rezultati

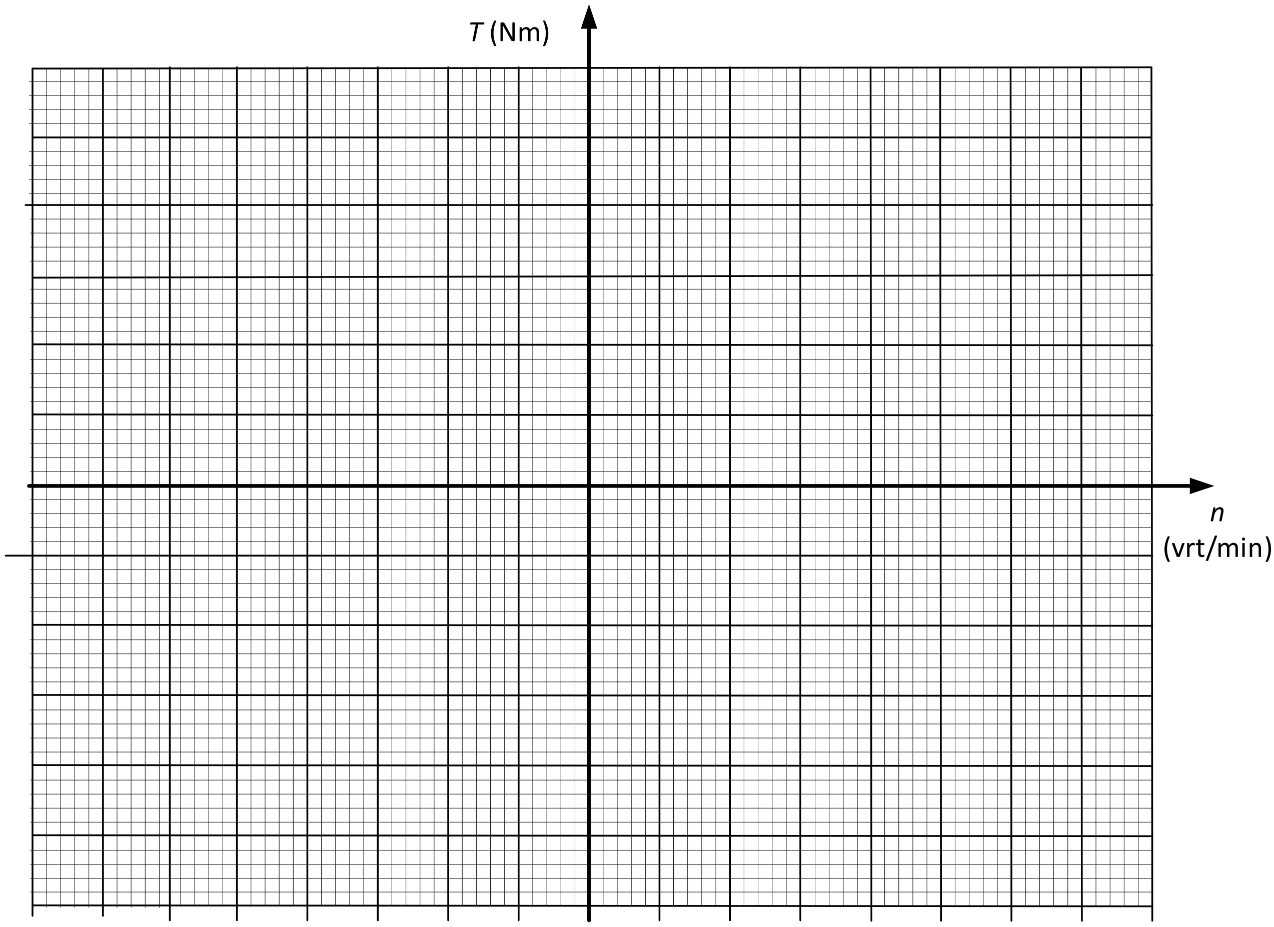
a) Karakteristika navora trenja testnega motorja:

Tabela 101: Rezultati meritev – testni motor

$n_{žel}$ [vrt/min] smer desno	n [vrt/min]	T [Nm]	$n_{žel}$ [vrt/min] smer levo	n [vrt/min]	T [Nm]
4000			-4000		
3800			-3800		
3600			-3600		
3400			-3400		
3200			-3200		
3000			-3000		
2800			-2800		
2600			-2600		
2400			-2400		
2200			-2200		

2000			-2000		
1800			-1800		
1600			-1600		
1400			-1400		
1200			-1200		

$n_{žel}$ [vrt/min] smer desno	n [vrt/min]	T [Nm]	$n_{žel}$ [vrt/min] smer levo	n [vrt/min]	T [Nm]
1000			-1000		
800			-800		
600			-600		
400			-400		
300			-300		
200			-200		
150			-150		
100			-100		
50			-50		



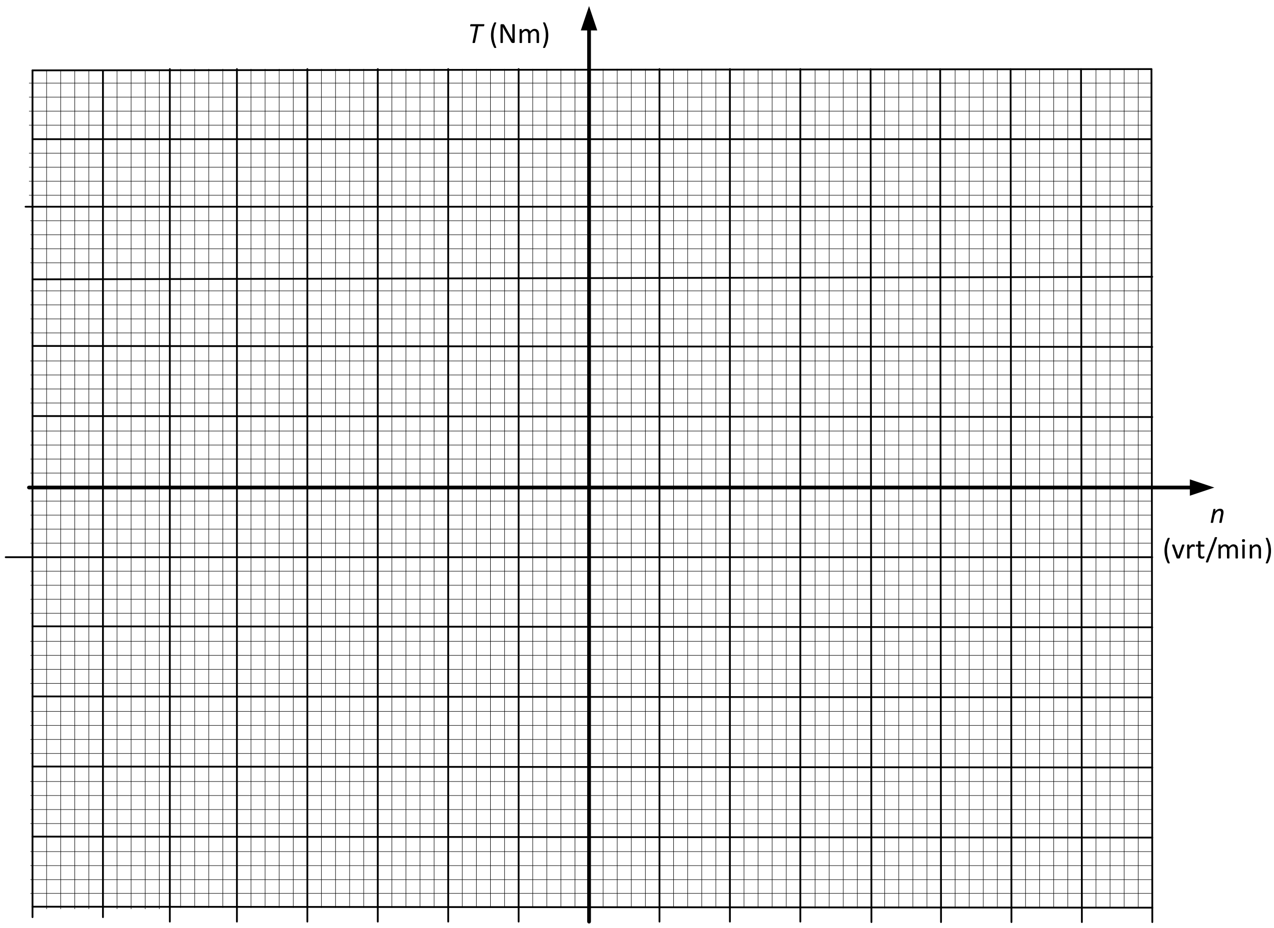
Graf 2: Karakteristika navora trenja – testni motor.

b) Karakteristika navora trenja zavore:

Tabela 2: Rezultati meritev – zavora

$n_{žel}$ [vrt/min] smer desno	n [vrt/min]	T [Nm]	$n_{žel}$ [vrt/min] smer levo	n [vrt/min]	T [Nm]
4000			-4000		
3800			-3800		
3600			-3600		
3400			-3400		
3200			-3200		
3000			-3000		
2800			-2800		
2600			-2600		
2400			-2400		
2200			-2200		
2000			-2000		
1800			-1800		
1600			-1600		
1400			-1400		
1200			-1200		

$n_{žel}$ [vrt/min] smer desno	n [vrt/min]	T [Nm]	$n_{žel}$ [vrt/min] smer levo	n [vrt/min]	T [Nm]
1000			-1000		
800			-800		
600			-600		
400			-400		
300			-300		
200			-200		
150			-150		
100			-100		
50			-50		



Graf 3: Karakteristika navora trenja – zavora.

c) Določitev Coulombovega trenja T_C in koeficient viskoznega trenja f.

Testni motor ($T_{C,m}$, f_m):

Zavora ($T_{C,z}$, f_z):

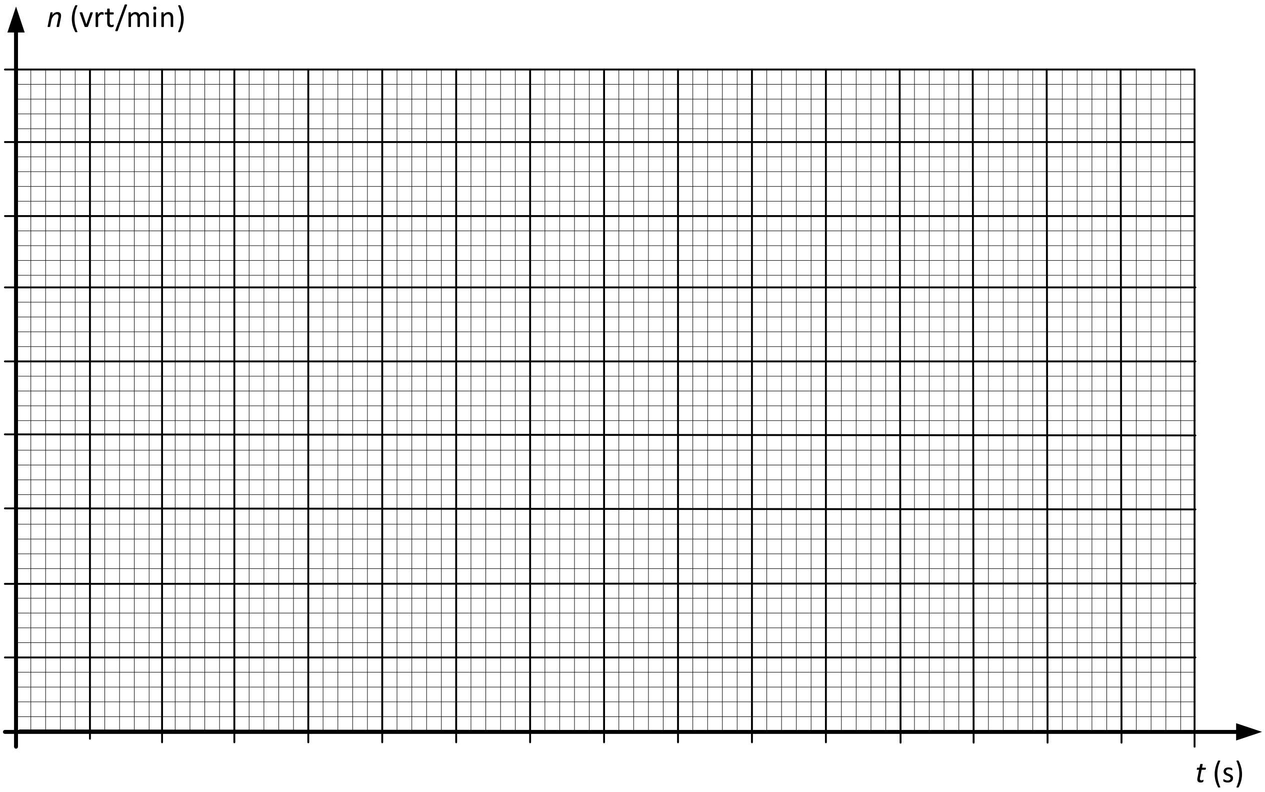
Določitev T_C in f celotnega pogona:

d) Iztečni preizkus:

Tabela 12: Rezultati meritev – zavora

t [s]	*n* [vrt/min]	*t* [s]	*n* [vrt/min]	*t* [s]	*n* [vrt/min]

t [s]	*n* [vrt/min]	*t* [s]	*n* [vrt/min]	*t* [s]	*n* [vrt/min]



Graf 4: Iztečni preizkus.

Določitev vztrajnostnega momenta pogona J (motor + zavora) ter izračun vztrajnostnega momenta testnega motorja J_s:

4.5 Komentar

(kratek komentar vaje, povzetek, temeljne ugotovitve …)

Zapišite v obliki komentarja odgovore na naslednja vprašanja:

Na kratko pojasnite določitev vztrajnostnega momenta testnega motorja.

V sklopu računalniških vaj izdelajte poročilo izvedenih meritev ter preverite, kako se odziv dinamičnega modela ujema z rezultati meritev (iztečni preizkus).

Literatura

[1] B. Zupančič, *Modeliranje in obdelava signalov*, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 2011.

[2] B. Zupančič, *Vodenje sistemov*, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana.

[3] R. Karba, *Modeliranje procesov*, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 1999.

[4] I. Humar, S. Simović, A. R. Sinigoj, Z. Žalar, R. Logonder, B. Vučko, E. Bulić, *E-učbenik eELEplus*, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 2018. ISBN 978-961-6999-08-3. Dostopno na: http://eele.fe.uni-lj.si/

[5] Spletno gradivo dostopno na: http://lmse.fe.uni-lj.si/amon/literatura/EK/EK5-Tuljave.pdf [5.4.2022].

[6] M. Blaznik, *Magnetno nelinearni dinamični model enosmernega motorja s serijskim vzbujanjem: Diplomsko delo.* Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko. Maribor, 2010.

[7] D. Makuc, *Splošna teorija električnih strojev s preizkušanjem: Laboratorijske vaje*, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko. Ljubljana, 2011.

[8] D. Dolinar, G. Štumberger, *Modeliranje in vodenje elektromehanskih sistemov*, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko. Maribor, 2006.

TEHNOLOŠKO MODELIRANJE ENERGETSKIH PROCESOV: ZBIRKA LABORATORIJSKIH VAJ

IZTOK BRINOVAR, DALIBOR IGREC
Univerza v Mariboru, Fakulteta za energetiko, Krško, Slovenija
iztok.brinovar@um.si, dalibor.igrec@guest.um.si

Povzetek Zbirka laboratorijskih vaj je primarno namenjena študentom 1.letnika magistrskega študijskega programa na Fakulteti za energetiko Univerze v Mariboru, in sicer kot dodatno učno gradivo pri izvajanju laboratorijskih vaj v okviru učne enote Tehnološko modeliranje energetskih procesov. Kot taka se tudi direktno vsebinsko navezuje na pripadajoče računalniške vaje. Vaje so namenjene eksperimentiranju z različnimi sistemi oz. procesi, modeliranju in vrednotenju matematičnih modelov. Študentje na takšen način izboljšajo poznavanje in razumevanje mehanizmov delovanja obravnavanih procesov ter skozi praktično delo spoznajo celoten cikličen postopek modeliranja, ki vključuje izvedbo meritev, kot tudi izdelavo in uporabo matematičnih modelov. Zbirka laboratorijskih vaj v povezavi z računalniškimi vajami in predavanji povezuje obravnavano tematiko v zaključeno celoto.

Ključne besede:
laboratory exercises,
measurements,
modelling,
dynamic systems,
electromechanical systems

Univerzitetna založba Univerze v Mariboru
DOI https://doi.org/10.18690/um.fe.2.2022
ISBN 978-961-286-555-9

Univerza v Mariboru

Fakulteta za energetiko