

Садржај:

10. ИСПИТИВАЊЕ ЗАГРЕВАЊА ТРАНСФОРМАТОРА МЕТОДОМ РЕКУПЕРАЦИЈЕ 1

10.1. ТЕОРИЈСКИ ДЕО 1

10.2. ЛАБОРАТОРИЈСКА БЕЖБА 3

Задатак вежбе 3

Примењена метода и опис вежбе

Спецификација опреме и прибора за вежбу 4

Електрична шема 6

Поступак извођења вежбе

Резултати мерења 7

10. ИСПИТИВАЊЕ ЗАГРЕВАЊА ТРАНСФОРМАТОРА МЕТОДОМ РЕКУПЕРАЦИЈЕ

10.1. ТЕОРИЈСКИ ДЕО

При извођењу диференцијалне једначине простирања топлоте трансформатора овде се пошло од следећих претпоставки:

- трансформатор је термички хомогено тело
- примарни напон и струја се стални
- фактор прелаза топлоте k је сталан (не зависи од температуре)
- температура амбијента је стална

Диференцијална једначина за наведене услове има следећи облик:

$$P_{\gamma} dt = m \cdot c \cdot d(\theta - \theta_a) + k \cdot S \cdot (\theta - \theta_a) dt$$

при чему су:

$$P_{\gamma} = P_{\gamma Cu} + P_{\gamma Fe} = q \cdot R_{Cu(\theta)} \cdot I^2 + q \cdot G_0 \cdot U^2 = q \cdot R_{Cu} (1 + \alpha \cdot (\theta - \theta_1) \cdot I^2) + q \cdot G_0 \cdot U^2$$

$P_{\gamma} dt$ - топлотна енергија која се развија у трансформатору,

$m \cdot c \cdot d(\theta - \theta_a)$ - акумулисана топлотна енергија трансформатора,

$k \cdot S \cdot (\theta - \theta_a) dt$ - топлотна енергија предата амбијенту у времену dt .

Замењујући вредност $P_{\gamma} dt$, добија се диференцијална једначина:

$$q \cdot R_{Cu} (1 + \alpha \cdot (\theta - \theta_1) \cdot I^2) + q \cdot G_0 \cdot U^2 = m \cdot c \cdot d(\theta - \theta_a) + k \cdot S \cdot (\theta - \theta_a) dt - m \cdot c \cdot d(\theta - \theta_a) \\ = ((\theta - \theta_a)(k \cdot S - q \cdot R_{Cu} \cdot \alpha \cdot I^2) - (q \cdot R_{Cu} \cdot I^2 + q \cdot G_0 \cdot U^2)) dt$$

чије решење је добро позната експоненцијална једначина која описује процес загревања хомогеног тела (са једном временском константом):

$$\theta - \theta_a = (\theta_m - \theta_a) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \text{ где је:}$$

θ - температура на спољашњој површини трансформаторског навоја,

τ - временска констаната загревања трансформатора,

θ_m - максимална температура навоја трансформатора,

θ_a - температура околина која током мерења мора бити константна.

$$\tau = \frac{C}{K}; \quad C = m \cdot c; \quad K = k \cdot S - q \cdot R_{Cu} \cdot \alpha \cdot I^2$$

Увођењем смене $\Theta = \theta - \theta_a$ и $\Theta_m = \theta_m - \theta_a$, и знајући да је температура θ у тренуцима $t = i \cdot \Delta t \Leftrightarrow \Delta t = \text{const.}$, добија се:

$$\Theta = \Theta_m \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) = \Theta_m \left(1 - e^{-i \frac{\Delta t}{\tau}} \right)$$

Ако се формира количник прираштаја температура у два узастопна мерења може се показати да је он константне вредности:

$$\frac{\Theta_{i+1} - \Theta_i}{\Theta_{i+2} - \Theta_{i+1}} = \dots = e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} = E = \text{const.}$$

Из написаног израза се може изразити Θ_i :

$$\begin{aligned} \Theta_{i+1} - \Theta_i &= E(\Theta_{i+2} - \Theta_{i+1}) = \dots = (E^{-1} - 1)(\Theta_i - \Theta_m) \\ \Rightarrow \Theta_i &= \Theta_m - \frac{1}{1 - E^{-1}}(\Theta_{i+1} - \Theta_i) \end{aligned}$$

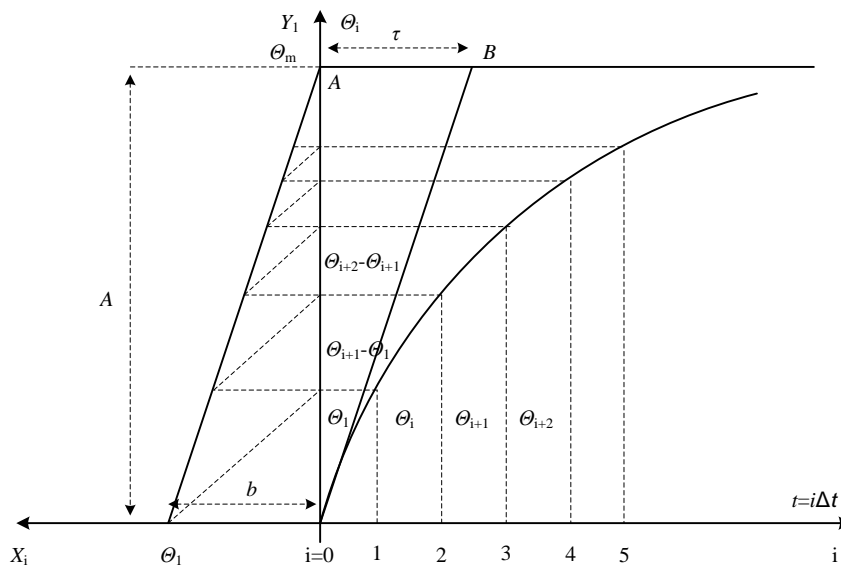
Ова линеарна зависност се може приказати изазом:

$$Y_i = A - b \cdot X_i$$

где су:

$$Y_i = \Theta_i; \quad A = \Theta_m; \quad b = \frac{1}{1 - E^{-1}} \quad \text{и} \quad X_i = (\Theta_{i+1} - \Theta_i) \quad (*)$$

Може се запазити да је функција $Y_i = f(X_i)$ једначина праве, па се вредност температура Θ_m (A) може одредити и графички према следећој слици:



Временска константа τ може се одредити повлачењем тангенте на експоненцијалну криву из почетка и добијањем пресечне тачке B на правој $\Theta = \Theta_m$. Дуж \overline{AB} одговара временској константи τ . Размере за t и τ су једнаке.

10.2. ЛАБОРАТОРИЈСКА БЕЖБА

Задатак вежбе:

Одредити термичку константу и нацртати криву загревања оптерећивањем трансформатора методом рекуперације.

Примењена метода и опис вежбе:

За извођење вежбе трансформатор се оптерећује снагом по принципу рекуперације (враћањем већег дела енергије у мрежу). Суштина је да се два трансформатора повежу паралелно, а онда једном од њих поремете радни услови, тако да се други оптерети номиналном привидном снагом помоћу струје изједначења. Због губитака снаге у гвожђу и бакру трансформатора (при $U_i = \text{const.}$, и $I_i = \text{const.}$) температура ће расти по приближно експоненцијалном закону:

$$\theta - \theta_a = (\theta_m - \theta_a) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

При мерењу температуре трансформатора добија се такав дијаграм да крива више или мање одступа од експоненцијалног облика (трансформатор није термички хомогено тело).

Ову криву загревања неке тачке трансформатора ($\theta = f(t)$) искористићемо за налажење криве загревања хомогеног тела са једном термичком временском константом која ће најмање одступати од криве загревања трансформатора.

Усвојимо да су термичке временске константе и трансформатора и тог хомогеног тела једнаке а исто тако и њихове максималне температуре.

Биће приказана два начина одређивања термичке временске константе:

И начин:

Из једначине (*) изрази се временска константа:

$$b = \frac{1}{1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}} \Rightarrow \tau = \frac{\Delta t}{\ln\left(\frac{b}{b-1}\right)}$$

Вредност b се одређује методом најмањих квадрата:

$$Y_i = A - b \cdot X_i \Rightarrow \Gamma^2 = \sum (Y_i - (A - b \cdot X_i))^2$$

Из једначина $\frac{\partial(\Gamma^2)}{\partial A} = 0$ и $\frac{\partial(\Gamma^2)}{\partial b} = 0$ се добијају вредности A и b :

$$A = \frac{(\sum Y_i)(\sum X_i^2) - (\sum Y_i X_i)(\sum X_i)}{(\sum X_i^0)(\sum X_i^2) - (\sum X_i)^2} = \Theta_m$$

$$b = \frac{(\sum Y_i)(\sum X_i) - (\sum Y_i X_i)(\sum X_i^0)}{(\sum X_i^0)(\sum X_i^2) - (\sum X_i)^2}$$

II начин:

То је графички начин одређивања термичке временске константе. Поступак је исти као што је већ приказано у теоријском делу. Разлика је у томе што све тачке конструисане у другом квадранту се неће налазити на једној правој:

$$Y_i = A - b \cdot X_i$$

У том случају се врши провлачење праве између добијених тачака тако да све тачке буду што ближе повученој правој. Затим се из дијаграма прочитају вредности за A и b па се временска константа τ као и I начину.

III начин:

Користити написану Matlab функцију **zagrevanjeTR.m** која одређује коефицијенте a , b и c .

Коефицијент a : надтемпература

Коефицијент b : реципрочна вредност термичке временске константе $\tau = 1/b$

Коефицијент c : температура околине

Спецификација опреме и прибора за вежбу:

Аутотрансформатор:



*произвођач
врста
напонски опсег
максимална струја*

Трансформатори:



*снага
 U_{1n}/U_{2n}
 I_{1n}/I_{2n}*

Волтметар:



*произвођач
врста
класа тачности
мерни опсег
унутрашња отпорност*

Амперметар:



*произвођач
врста
класа тачности
мерни опсег
унутрашња отпорност*

Двоканални писач:

*произвођач
опсег напонског сигнала
брзина извлачења папирне траке*

Термопар:

карактеристика термопара CHROMEL-ALUMEL:

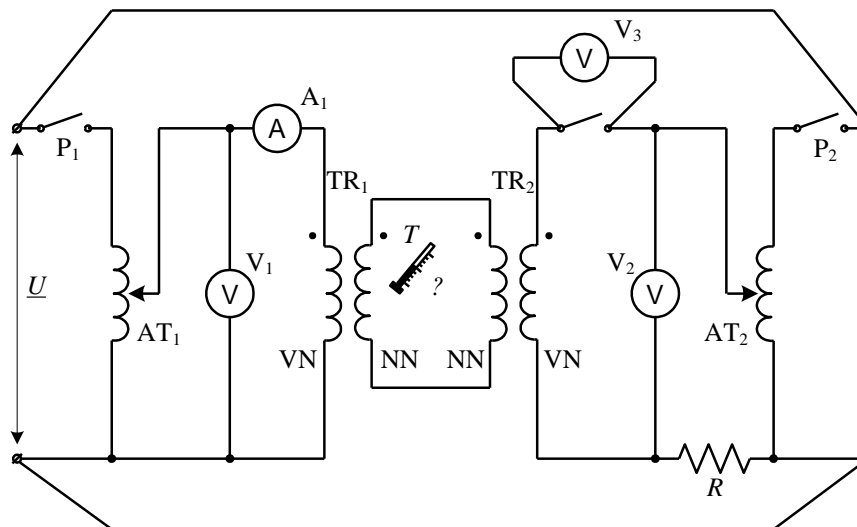
$\theta [^{\circ}\text{C}]$	$U [\text{mV}]$	$\theta [^{\circ}\text{C}]$	$U [\text{mV}]$	$\theta [^{\circ}\text{C}]$	$U [\text{mV}]$	$\theta [^{\circ}\text{C}]$	$U [\text{mV}]$	$\theta [^{\circ}\text{C}]$	$U [\text{mV}]$
0	0,00	20	0,80	40	1,61	60	2,43	80	3,26
2	0,08	22	0,88	42	1,69	62	2,51	82	3,35
4	0,16	24	0,96	44	1,77	64	2,60	84	3,43
6	0,24	26	1,04	46	1,85	66	2,68	86	3,51
8	0,32	28	1,12	48	1,94	68	2,76	88	3,60
10	0,40	30	1,20	50	2,02	70	2,85	90	3,68
12	0,48	32	1,28	52	2,10	72	2,93	92	3,76
14	0,56	34	1,36	54	2,18	74	3,01	94	3,85
16	0,64	36	1,44	56	2,27	76	3,10	96	3,93
18	0,72	38	1,53	58	2,35	78	3,18	98	4,01

Ова зависност се може претставити линеарном функцијом:

$$\theta [^{\circ}\text{C}] = \frac{100}{4,01} u [\text{mV}]$$



Електрична шема:



Поступак извођења вежбе:

1. повезати елементе кола према шеми,
2. проверити везе при чему посебно обратити пажњу на прекидач P_3 који мора бити обавезно отворен, као и да су оба аутотрансформатора у почетном положају,
3. измерити температуру амбијента θ_a и омску отпорност R_{Cu} испитиваног трансформатора на тој температури,
4. ставити елементе кола под напон (у присуству асистента),

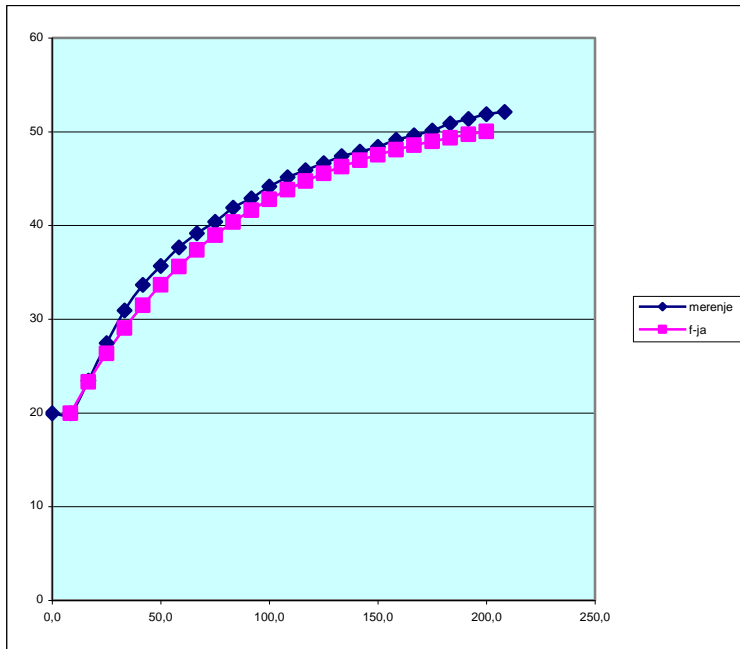
5. подићи напон на аутотрансформатору AT_1 на номиналну вредност испитиваног трансформатора T_{r1} ,
6. повећавати напон на аутотрансформатору AT_2 док се не успостави нулти напон на прекидачу P_3 . Ради прецизнијег мерења напона на прекидачу P_3 , смањивати опсег на волтметру V_3 , и када напон на P_3 буде приближно једнак нули, укључити прекидач P_3 ,
7. мерење температуре θ се врши помоћу термопара бакар-константан при чему се напонски сигнал са одвојених крајева термопара доводи на писач који црта криву $u = f(t)$,
8. све време трајања огледа контролисати номинални напон U_1 помоћу AT_1 и номиналну струју I_1 помоћу AT_2 ,
9. по завршеном огледу очитати вредности за U са графика писача и помоћу карактеристике термопара прерачунати вредност напонског сигнала у термопару $(\theta - \theta_a)$,
10. нацртати график $\Theta = f(t)$ и помоћу I и II описаног поступка одредити термичку временску константу.

Резултати мерења:

I начин

ocitano	Brzina izvlačenja trake 0,01 mm/s		ocitano	ynapon=yпод 2/100	Temp= y napon*100/4.01
x [mm]	vreme [min]		y podeoci	y napon [mV]	temperatura [0C]
0	0,0		40	0,8	19,9496
5	8,3		40	0,8	19,9496
10	16,7		47	0,94	23,44078
15	25,0		55	1,1	27,4307
20	33,3		62	1,24	30,92188
25	41,7		67,5	1,35	33,66495
30	50,0		71,5	1,43	35,65991
35	58,3		75,5	1,51	37,65487
40	66,7		78,5	1,57	39,15109
45	75,0		81	1,62	40,39794
50	83,3		84	1,68	41,89416
55	91,7		86	1,72	42,89164
60	100,0		88,5	1,77	44,13849
65	108,3		90,5	1,81	45,13597
70	116,7		92	1,84	45,88408
75	125,0		93,5	1,87	46,63219
80	133,3		95	1,9	47,3803
85	141,7		96	1,92	47,87904
90	150,0		97	1,94	48,37778
95	158,3		98,5	1,97	49,12589
100	166,7		99,5	1,99	49,62463
105	175,0		100,5	2,01	50,12337
110	183,3		102	2,04	50,87148
115	191,7		103	2,06	51,37022
120	200,0		104	2,08	51,86896
125	208,3		104,5	2,09	52,11833

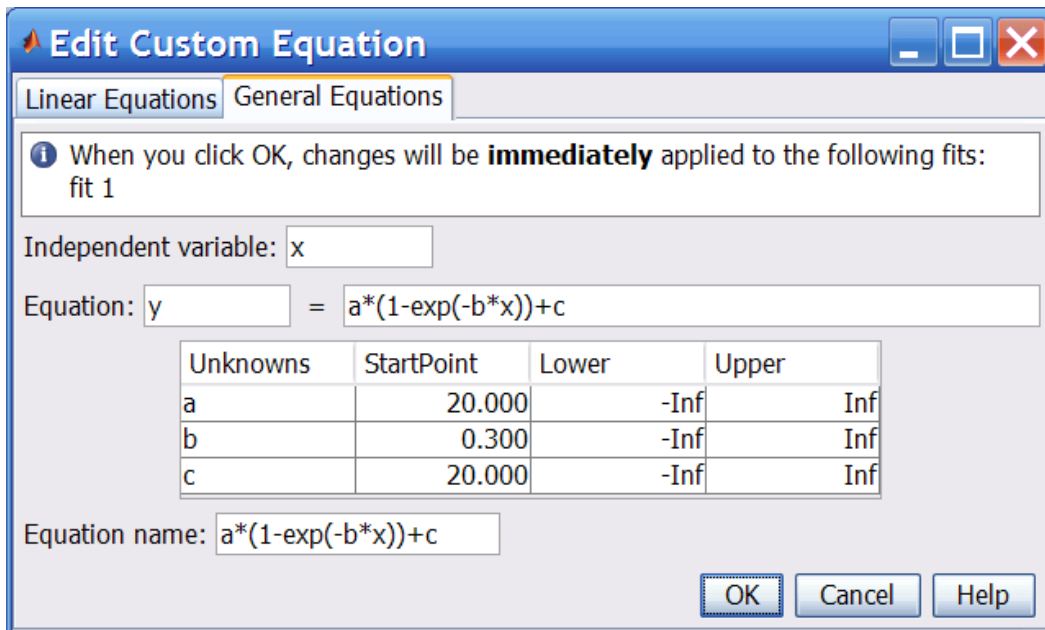
$X_i = (\Theta_{i+1} - \Theta_i)$	X_i^0	X_i^2	Y_i	$X_i * Y_i$
3,5	1,0	12,18833779	19,9496	69,64764453
4,0	1,0	15,91946161	23,44078	93,52683694
3,5	1,0	12,18833779	27,4307	95,76551123
2,7	1,0	7,524433025	30,92188	84,82088137
2,0	1,0	3,979865402	33,66495	67,16022865
2,0	1,0	3,979865402	35,65991	71,14009405
1,5	1,0	2,238674288	37,65487	56,33996959
1,2	1,0	1,554634923	39,15109	48,81553657
1,5	1,0	2,238674288	40,39794	60,44420579
1,0	1,0	0,99496635	41,89416	41,78858672
1,2	1,0	1,554634923	42,89164	53,47944133
1,0	1,0	0,99496635	44,13849	44,02726101
0,7	1,0	0,559668572	45,13597	33,76667052
0,7	1,0	0,559668572	45,88408	34,32633909
0,7	1,0	0,559668572	46,63219	34,88600766
0,5	1,0	0,248741588	47,3803	23,63045082
0,5	1,0	0,248741588	47,87904	23,87919241
0,7	1,0	0,559668572	48,37778	36,191901
0,5	1,0	0,248741588	49,12589	24,50104638
0,5	1,0	0,248741588	49,62463	24,74978797
0,7	1,0	0,559668572	50,12337	37,49779433
0,5	1,0	0,248741588	50,87148	25,37164194
0,5	1,0	0,248741588	51,37022	25,62038352
0,2	1,0	0,062185397	51,86896	12,93456256
$\Sigma(X_i)$	$\Sigma(X_i)^0$	$\Sigma(X_i)^2$	$\Sigma(Y_i)$	$\Sigma(X_i * Y_i)$
32,2	24,0	69,7	1001,5	1124,3
		A	b	τ
		52,72	8,20	76,8793585

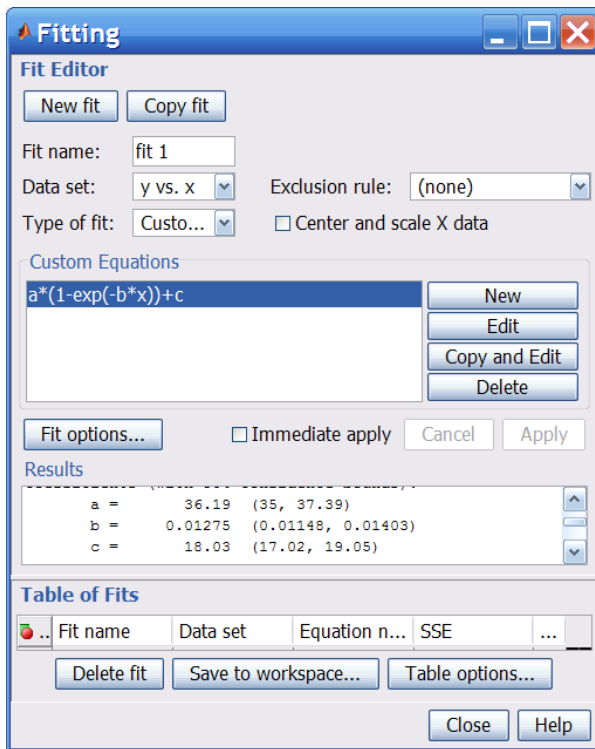


II начин

Коришћењем програмског пакета Matlab и алата **cftool** може се дефинисати жењена интерполациона функција. Дефинисање функције и резултат фитовања се може видети на следећим сликама.

Као резултат фитовања направљена је m функција **zagrevanjeTR.m** коју је потребно стартовати наредбом **zagrevanjeTR(x,y)** при чему је потребно претходно дефинисати матрице x (време t) и y (надтемпература θ), коју прерачунава excel фајл **termicka vremenska konstanta.xls**





Овим поступком је добијена термичка временска константа:

$$\tau = 1/0,01275=78,43 \text{ min,}$$

a максимална постигнута температура је

$$\theta_m = 36,19+18,03= 54,22$$

Овакав поступак даје реалније вредности од методе најмањих квадрата што се може закључити поредећи графички приказ решења оба поступка

