



# ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

## Катедра за енергетске претвараче и погоне

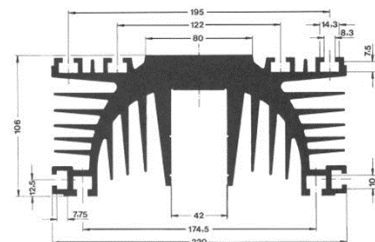
### Испит из предмета Термички процеси у електроенергетици (19Е014ТПЕ)

Максимално трајање 180 минута

Предметни наставник: Проф. др Зоран Радаковић

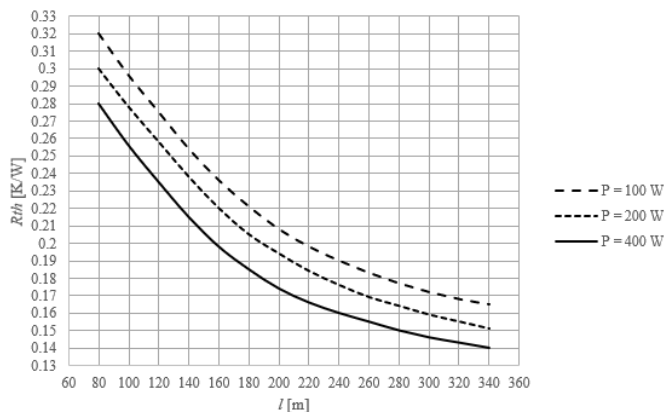
11. 01. 2024.

1. Хладњак приказан на слици 1 се користи за хлађење једног транзистора тако да у устаљеном стању, при природном струјању ваздуха, његова температура буде испод задате вредности од  $150^{\circ}\text{C}$ . Одредити потребну дужину хладњака у два случаја: 1) 1 хладњак је ослоњен на површину транзистора; 2) 2 идентична хладњака су ослоњена на површину транзистора. Снага генерисања губитака у транзистору је  $200\text{ W}$ . Отпор провођењу топлоте кроз транзистор је  $R^T_i = 0,4\text{ K/W}$ . Еквивалентни отпор провођењу топлоте кроз хладњак и преласку топлоте природним струјањем са хладњака на околни ваздух је дат на слици 2. Температура амбијента је  $40^{\circ}\text{C}$ . (2п)



Слика 1 - Изглед хладњака

2. Огледом загревања у кратком споју потребно је проверити температуре сваке од фаза трофазног трансформатора. Нацртати шему веза током загревања наизменичном струјом за трансформатор спреге  $Yy$ , као и шему мерне спреге примењене за одређивање отпора једносмерној струји сваке од фаза ниженпонске стране трансформатора. Због чега је неопходно применити поступак екстраполације криве хлађења намотаја и како се он врши? (2п)

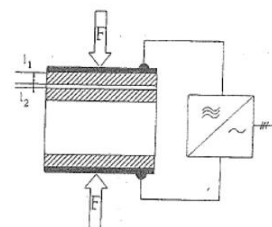


3. Модул базиран на примени Пелтијеове електромоторне силе димензија  $60 \times 48\text{ mm}$ , има  $N = 126\text{ pn}$  спојева. Однос пресека кроз који протиче струја и дебљине елемента је  $S/L = 1,5\text{ mm}$ . Топлотни отпора провођењу топлоте кроз електроизолациони слој (керамику) и контактни топлотни отпор могу се описати еквивалентним коефицијентом преноса топлоте  $k_p = 0,33\text{ W}/(\text{cm}^2\text{K})$ . Модул ради у режиму

генератора. Одредити степен искоришћења генератора, дефинисан као однос генерисане електричне енергије и топлоте која се одузима топлој страни. Снага генерисања електричне енергије износи  $7\text{ W}$ . Познате су температуре топле и хладне стране  $\text{pn}$  спојева  $100^{\circ}\text{C}$  и  $0^{\circ}\text{C}$ . При решавању користити упрошћени модел. Температурна зависност карактеристика материјала од којих су направљени  $\text{pn}$  спојеви је ( $T$  (K) представља апсолутну температуру):  $a[\text{V/K}] = 2\alpha = 2 \cdot (22224 + 930,6 \cdot T - 0,9905 \cdot T^2) \cdot 10^{-9}$ ,  $\rho[\Omega \cdot \text{cm}] = (5112 + 163,4 \cdot T + 0,6279 \cdot T^2) \cdot 10^{-8}$ ,  $\lambda[\text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K})] = (62605 - 277,7 \cdot T + 0,4131 \cdot T^2) \cdot 10^{-6}$ . Карактеристике  $\rho$  и  $\lambda$  се приближно могу одредити на средњој вредности температуре топле и хладне стране  $\text{pn}$  спојева. (2,5п)

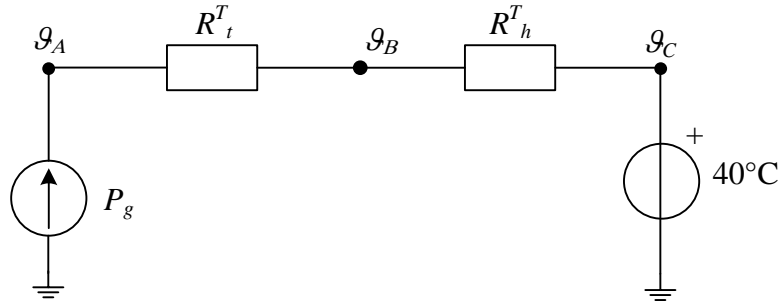
4. На једну округлу електроотпорну грејну плочу пречника  $D = 0,1\text{ m}$ , инсталисане електричне снаге  $P_{inst} = 1000\text{ W}$ , топлотног капацитета  $C_p^T = 1200\text{ J/K}$  и топлотног отпора преносу топлоте провођењем кроз ослонац, према окоolini,  $R_p^T = 0,5\text{ K/W}$ , постављена је посуда у којој се загрева  $0,5$  литар воде. Прелаз топлоте провођењем са плоче на посуду, истог пречника и равнoг дна, је добар ( $R_{\lambda}^T \approx 0$ ), а такође се може занемарити и топлотни отпор преласку топлоте струјањем са посуде на воду ( $R_{2\alpha}^T \approx 0$ ). Топлотни капацитет посуде износи  $C_l^T = 100\text{ J/K}$ , а топлотни отпор преносу топлоте струјањем са посуде на околни ваздух  $R_{1\alpha}^T = 1\text{ K/W}$ . Специфични запремински топлотни капацитет воде износи  $c_v = 4100\text{ kJ}/\text{m}^3\text{K}$ . Одредити степен искоришћења електротермичког процеса загревања воде у посуду, од температуре  $20^{\circ}\text{C}$  до тренутка кључања, и то када се посуда са водом ставља на: а) грејну плочу температуре  $20^{\circ}\text{C}$ , б) претходно загрејану грејну плочу чија је температура  $100^{\circ}\text{C}$ . Почетна температура посуде једнака је температури воде, односно температури амбијента од  $20^{\circ}\text{C}$ . (2,5п)

5. У производњи шпер плоча се користи диелектрично загревање на следећи начин. Између две металне плоче пресе, површине  $S = 3\text{ m}^2$ , постави се  $n = 6$  слојева фурнира ( $\epsilon_{r1} = 4$ ,  $\text{tg } \delta_{e1} = 0,4$ ), сваки дебљине  $l_1 = 10^{-3}\text{ m}$  и  $n - 1$  слој лепка ( $\epsilon_{r2} = 5$ ,  $\text{tg } \delta_{e2} = 0,5$ ), сваки дебљине  $l_2 = 10^{-4}\text{ m}$ . Овако формиран сендвич се изложи притиску преко металних плоча. Металне плоче се прикључују на крај еве извора електричне енергије брзопроменљивог напона, ефективне вредности  $U = 1000\text{ V}$  и учестаности  $f = 5\text{ MHz}$ , као што је приказано на слици. Израчунати привидну снагу на излазу извора енергије (претварача учестаности), као и фактор снаге његовог оптерећења. Изрази за израчунавање запреминске густине активне и реактивне снаге загревања су:  $p = \omega \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \text{tg } \delta \cdot E^2$  и  $q = \omega \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot E^2$ .  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}\text{ F/m}$ . (2п)



## 1. Задатак

Еквивалентна топлотна шема је приказана на слици 1.1.



Слика 1.1 – Топлотна шема

Тачка В представља спој хладњака и транзистора. Са једне стране тачке В налази се отпор провођењу топлоте кроз транзистор а са друге еквивалентни отпор провођењу топлоте кроз хладњак и преносу топлоте струјањем са хладњака на околни ваздух. Тачка С представља околину. У тачку А се инјектира снага губитака  $P_g$  и њен потенцијал, односно температура представља температуру транзистора.

У устаљеном стању целокупна снага генерисана у транзистору се са хладњака одводи у околину. Температура тачке А мора бити мања од  $150^\circ\text{C}$  тј. максимална вредност укупног топлотног отпора је

$$R_{uk, prirodno}^T = R_t^T + R_h^T = \frac{\vartheta_A - \vartheta_C}{P_g} = \frac{150^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}}{200\text{ W}} = 0,55\text{ K/W}. \quad (1.1)$$

Пошто је вредност отпора  $R_t^T$  дата у тексту задатка, вредност отпора  $R_h^T$  износи  $0,55\text{ K/W} - 0,4\text{ K/W} = 0,15\text{ K/W}$ .

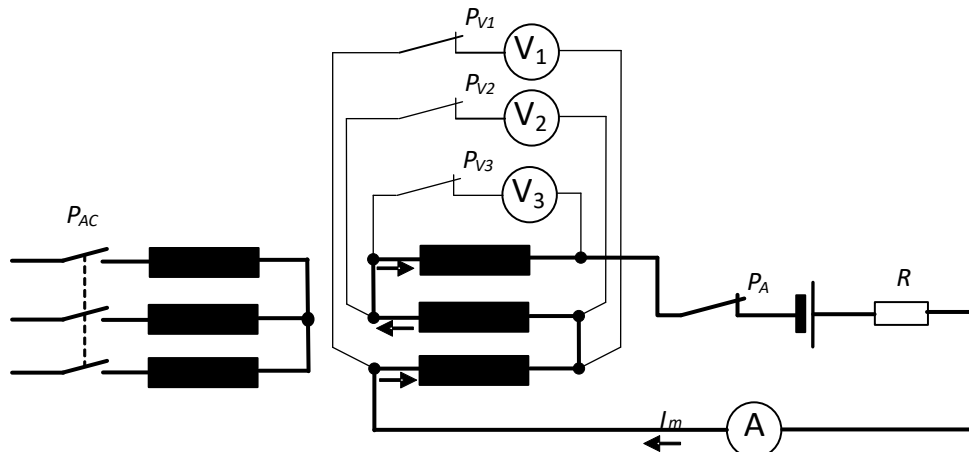
У првом случају, када се користи један хладњак, на основу познате вредности отпора ( $0,15\text{ K/W}$ ) и снаге губитака ( $200\text{ W}$ ) са графика  $R_h^T(l, P)$  са слике 2 се одређује минимална дужина хладњака од  $340\text{ mm}$ .

У случају када се користе два хладњака топлотни отпор  $R_h^T$  представља паралелну везу топлотних отпора појединачних хладњака, односно важи  $R_{1h}^T = 2R_h^T = 0,3\text{ K/W}$ , при чему се кроз сваки хладњак одводи по  $100\text{ W}$ , па се на основу графика са слике 2 може одредити дужина хладњака која износи  $100\text{ mm}$ .

## 2. Задатак

Материјали за предавања: „Часови 6 - 9“, поглавље 4.9.3.

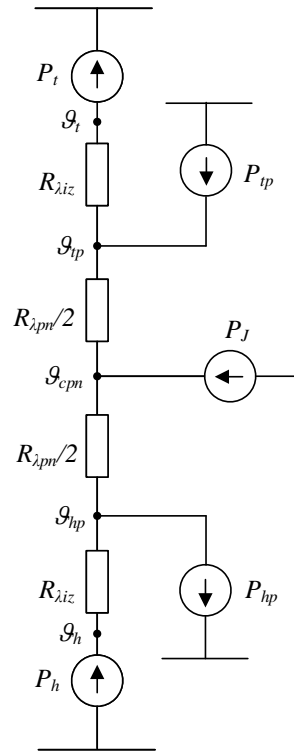
Шема мерне спреге за одређивање отпора једносмерној струји сваке од фаза ниженапонске стране трансформатора:



Слика 2.1

### 3. Задатак

Упрошћена топлотна шема за модул у режиму топлотне пумпе приказана је на слици 3.1.



Слика 3.1 – Топлотна шема

$$N := 126$$

$$SL := 0.15$$

$$Sp := 28.8$$

$$kp := 0.33$$

$$a(T) := 2 \cdot (22224 + 930.6 \cdot T - 0.9905 \cdot T \cdot T) \cdot 10^{-9}$$

$$\rho(T) := (5112 + 163.4 \cdot T + 0.6279 \cdot T \cdot T) \cdot 10^{-8}$$

$$\lambda(T) := (62605 - 277.7 \cdot T + 0.4131 \cdot T \cdot T) \cdot 10^{-6}$$

$$ttp := 100$$

$$thp := 0$$

$$Pg := 7$$

$$tp := \frac{ttp + thp}{2} = 50$$

$$E := N \cdot a(tp + 273.16) \cdot (ttp + 273.16) - N \cdot a(thp + 273.16) \cdot (thp + 273.16) = 7.834$$

$$Repn := 2 \cdot N \cdot \rho(tp + 273.16) \cdot \frac{1}{SL}$$

$$Rtpn := \frac{1}{\lambda(tp + 273)} \cdot \frac{1}{SL} \cdot \frac{1}{2 \cdot N} = 1.653$$

$$\text{Snaga } P = E \cdot I - \text{Repn} \cdot I^2$$

$$\text{Kvadratna jednačina: } -\text{Repn} \cdot I^2 + E \cdot I - P = 0$$

$$I_1 := \frac{-E + \sqrt{E^2 - 4 \cdot \text{Repn} \cdot P_g}}{-2 \cdot \text{Repn}} = 1.451$$

+

$$U := \frac{P_g}{I_1} = 4.824$$

$$P_{pn} := \text{Repn} \cdot I_1^2 = 4.368$$

$$P_{tp} := N \cdot a \cdot (t_{tp} + 273.16) \cdot (t_{tp} + 273.16) \cdot I_1 = 31.597$$

Hlađenje na toplim pn spojevima

$$P_{hp} := N \cdot a \cdot (t_{hp} + 273.16) \cdot (t_{hp} + 273.16) \cdot I_1 = 20.228$$

Grejanje na hladnim pn spojevima

$$t_{cpn} := \frac{\left( P_{pn} \cdot \frac{R_{tpn}}{2} + t_{tp} + t_{hp} \right)}{2} = 51.805$$

$$P_{kagore} := \frac{t_{cpn} - t_{tp}}{\frac{R_{tpn}}{2}} = -58.319$$

$$P_{kadole} := \frac{t_{cpn} - t_{hp}}{\frac{R_{tpn}}{2}} = 62.688$$

$$P_t := P_{tp} - P_{kagore} = 89.916$$

$$P_h := P_{hp} + P_{kadole} = 82.916$$

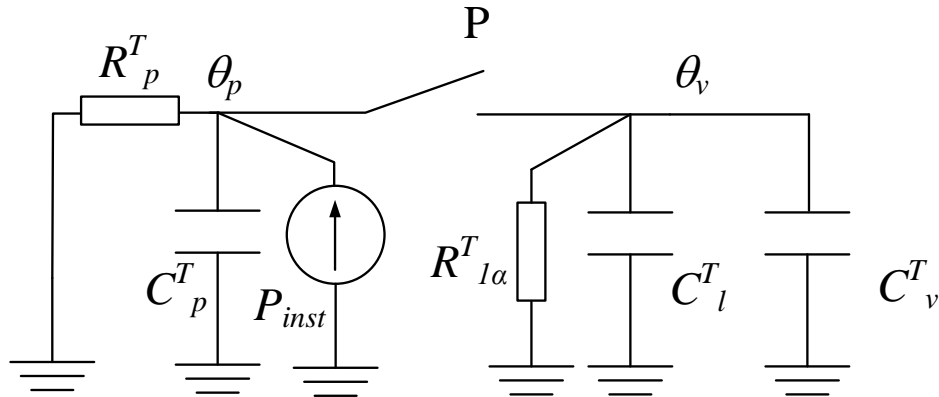
Provera energetskog bilansa

$$P_t - P_g = 82.916$$

$$\eta := 100 \cdot \frac{U \cdot I_1}{P_t} = 7.785$$

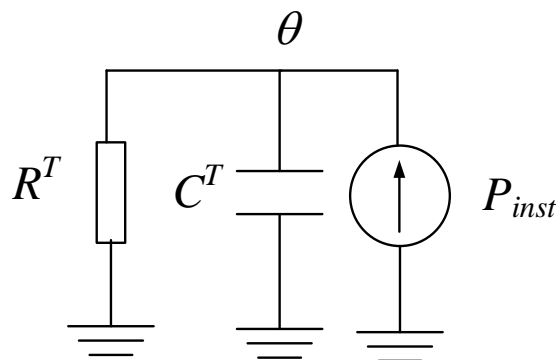
#### 4. Задатак

Топлотна шема којом се моделује загревање приказана је на слици:



Слика 4.1

Након што се посуда са водом постави на грејну плочу, прекидач  $P$  се затвара, после чега се шема са слике 4.1 своди на



Слика 4.2

где је  $R^T = 0,33 \text{ K/W}$  и  $C^T = 4550 \text{ J/K}$ .

Решавањем диференцијалне једначине којом се описује шема на слици 4.2 добија се познати израз за временску зависност температуре плоче, посуде и воде у односу на околину:

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-t/\tau} + \theta_\infty (1 - e^{-t/\tau}), \quad (4.1)$$

где је  $\theta_\infty = P_{inst} R^T$  и  $\tau = C^T R^T$ . На основу једначине (4.1) могуће је одредити време загревања воде до кључања ( $\theta = 80 \text{ K}$ )

$$t = \tau \cdot \ln \frac{\theta_0 - \theta_\infty}{\theta - \theta_\infty} = 1240,1 \text{ s} \quad (4.2)$$

У случају под а) у почетном тренутку плоча, посуда и вода налазе се на температури амбијента, односно  $\theta_0 = 0$ , па је потребно време загревања

$$t = 1116,67 \text{ s} \cdot \ln \frac{0 - 333,33 \text{ K}}{80 \text{ K} - 333,33 \text{ K}} = 306,5 \text{ s}, \quad (4.3)$$

а степен искоришћења процеса загревања воде до кључања је

$$\eta = \frac{C_v^T \theta}{P_{inst} t} = 0,535 \quad (4.4)$$

У случају под б), пре затварања прекидача  $P$  температура грејне плоче је  $100^\circ\text{C}$ , односно  $\theta_p = 100 - 20 = 80 \text{ K}$ , а температура посуде са водом је  $\theta_v = 20 - 20 = 0$ . Након затварања прекидача долази до прерасподеле акумулисане топлоте тако да температура плоче, посуде и воде постане једнака

$$\theta_0 = \frac{\theta_p C_p^T}{C_p^T + C_l^T + C_v^T} = 28,66 \text{ K}. \quad (4.5)$$

Потребно време загревања је

$$t = 1116,67 \text{ s} \cdot \ln \frac{28,66 - 333,33 \text{ K}}{80 \text{ K} - 333,33 \text{ K}} = 206,1 \text{ s}, \quad (4.6)$$

а степен искоришћења процеса загревања воде до кључања је

$$\eta = \frac{C_v^T \theta}{P_{inst} t} = 0,796 \quad (4.7)$$

## 5. Задатак

Јачина електричног поља се може одредити тако што се сви слојеви дрвета, односно лепка, представе са два еквивалентна редно везана кондензатора чији су капацитети:

$$C_1 = \varepsilon_1 \frac{S}{nl_1}, \quad (5.1)$$

за  $n$  слојева дрвета и

$$C_2 = \varepsilon_2 \frac{S}{(n-1)l_2}, \quad (5.2)$$

за  $n-1$  слој лепка.

Из једнакости наелектрисања на граничним површима кондензатора, могуће је одредити вредност напона на свакоме од њих

$$U_1 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} U, \quad (5.3)$$

$$U_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U. \quad (5.4)$$

Сада је могуће одредити и јачину електричног поља у слојевима дрвета и лепка:

$$E_1 = \frac{U_1}{nl_1} = \frac{U}{nl_1 + \frac{\varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r2}}(n-1)l_2} = \frac{10^6 V}{6,4 m}, \quad (5.5)$$

$$E_2 = \frac{U_2}{(n-1)l_2} = \frac{U}{(n-1)l_2 + \frac{\varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1}}nl_1} = \frac{10^6 V}{8 m}. \quad (5.6)$$

Укупна снага диелектричног загревања у слојевима дрвета и лепка је

$$P = \omega \cdot \varepsilon_{r1} \cdot \varepsilon_0 \cdot \operatorname{tg} \delta_{e1} \cdot E_1^2 \cdot S \cdot n \cdot l_1 + \omega \cdot \varepsilon_{r2} \cdot \varepsilon_0 \cdot \operatorname{tg} \delta_{e2} \cdot E_2^2 \cdot S \cdot (n-1) \cdot l_2 = 195,5 + 16,29 = 211,79 kW. \quad (5.7)$$

Реактивна снага која се узима из мреже се одређује као

$$Q = \omega \cdot \varepsilon_{r1} \cdot \varepsilon_0 \cdot E_1^2 \cdot S \cdot n \cdot l_1 + \omega \cdot \varepsilon_{r2} \cdot \varepsilon_0 \cdot E_2^2 \cdot S \cdot (n-1) \cdot l_2 = 488,75 + 32,58 = 521,33 kVar. \quad (5.8)$$

Привидна снага на излазу извора (претварача учестаности) је

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 562,7 kVA. \quad (5.9)$$

Фактор снаге оптерећења је

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = 0,376 (kap.). \quad (5.10)$$