



ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Катедра за енергетске претвараче и погоне

Први колоквијум (први термин) из предмета Термички процеси у електроенергетици (19Е014ТПЕ)

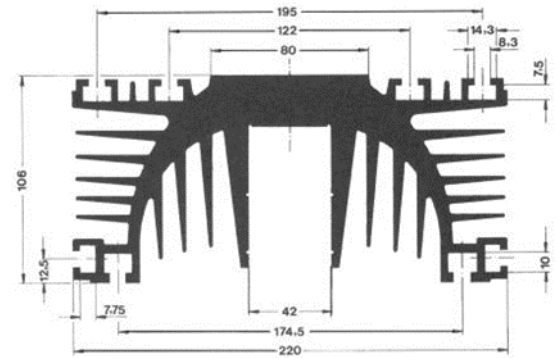
Испит траје максимално 120 минута

Укупан број поена износи 11

Предметни наставник: Проф. др Зоран Радаковић

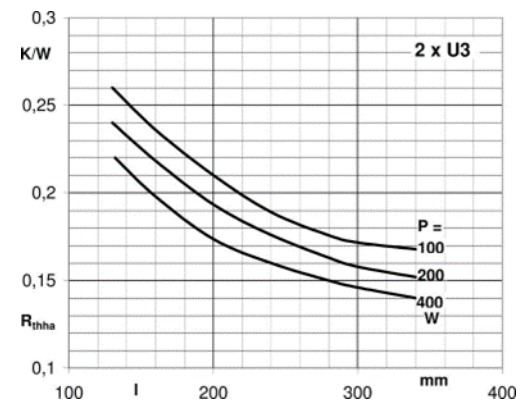
09. 12. 2023.

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 100°C . Одредити температуру транзистора у случају принудног струјања ваздуха брзином од 10 m/s . Снага генерисања губитака у транзистору је 100 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, а за случај принудног струјања на слици 3, као зависност $R_{thha}(l, P)$. Температура амбијента је 40°C . (3п)



Слика 1 - Изглед и димензије хладњака

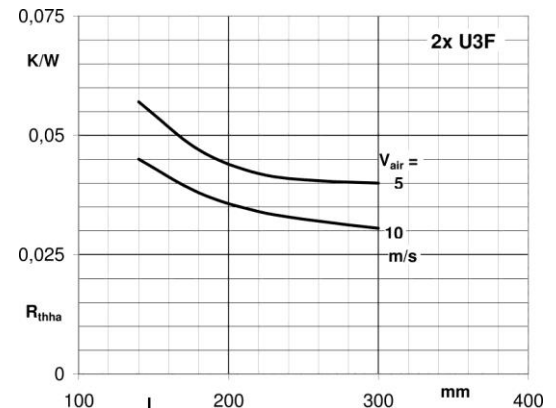
2. Посматра се хлађење суда енергетског уљног трансформатора у два случаја: 1) температура ваздуха 30°C , површинска густини снаге сунчевог зрачења која пада на површ суда 800 W/m^2 ; 2) температура ваздуха 0°C , без додатног загревања услед сунчевог зрачења. Одредити температуру уља у случају 2) за коју је снага која се преноси са уља једнака снази у случају 1) при температури уља од 80°C . Коefицијент размене топлоте струјањем између површи суда и ваздуха је $7\text{ W/(m}^2\text{K)}$. Коefицијент сивоће површи суда износи $0,8$. Отпор преносу топлоте струјањем са унутрашње површи зида, као и отпори преносу топлоте провођењем кроз зид (добре топлотне проводности λ) и танке слојеве заштитних премаза на унутрашњој (δ_{pi}) и спољашњој (δ_{ps}) страни могу се занемарити. Загревање зида услед расутог флукса се може занемарити. (3п)



Слика 2 - Еквивалентни топлотни отпор у случају природног струјања

3. Објаснити поступак извођења фабричког огледа загревања енергетских уљних трансформатора. Приказати шему веза током периода загревања, као и шему мерења температуре намотаја након искључења трансформатора. (2,5п)

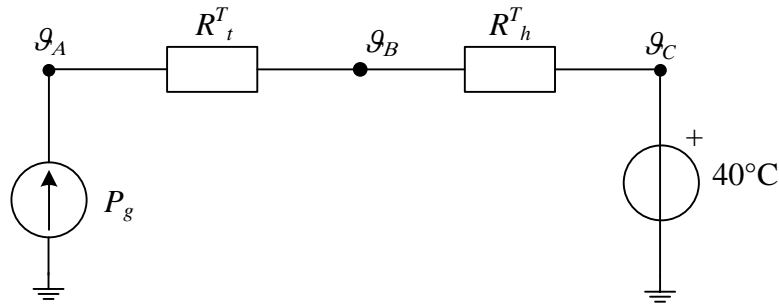
4. Колико износи максимално дозвољена вредност једносмерне струје која протиче кроз кабл чије су карактеристике дате у наставку, а који је директно положен у тло специфичне топлотне отпорности: 1) $\rho_z = 1\text{ (mK)/W}$ и 2) $\rho_z = 2,5\text{ (mK)/W}$. Једножилни кабл пресека $S_{Cu} = 95\text{ mm}^2$ је сачињен од бакра (специфична електрична проводност на 20°C $\sigma_{20\text{ Cu}} = 56 \cdot 10^6\text{ S/m}$ и коefицијент линеарног пораста специфичне електричне отпорности са температуром $\alpha_{Cu20} = 4,29 \cdot 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). Кабл је изолован PVC изолацијом дебљине изолације $d_{iz} = 1\text{ mm}$ (топлотне специфичне проводности $\lambda_i = 0,16\text{ W/(mK)}$). Максимална дозвољена температура PVC изолације износи $\vartheta_{doz} = 70^{\circ}\text{C}$. Сматрати да се као "удаљено референтну тло", на коме је температура једнака $\vartheta_z = 20^{\circ}\text{C}$, може узети цилиндар пречника $D_{ref} = 1000\text{ mm}$. (2,5п)



Слика 3 - Еквивалентни топлотни отпор у случају принудног струјања

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 тражену температуру.

У устаљеном стању целокупна снага генерисана у транзистору се са хладњака одводи у околину. У случају када је струјање природно, температура тачке А мора бити мања од 150°C тј. максимална вредност укупног топлотног отпора је

$$R_{uk, prirodno}^T = R_t^T + R_{h, prirodno}^T = \frac{\vartheta_{A, prirodno} - \vartheta_C}{P_g} = \frac{100^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}}{100\text{ W}} = 0,6\text{ K/W}. \quad (1.1)$$

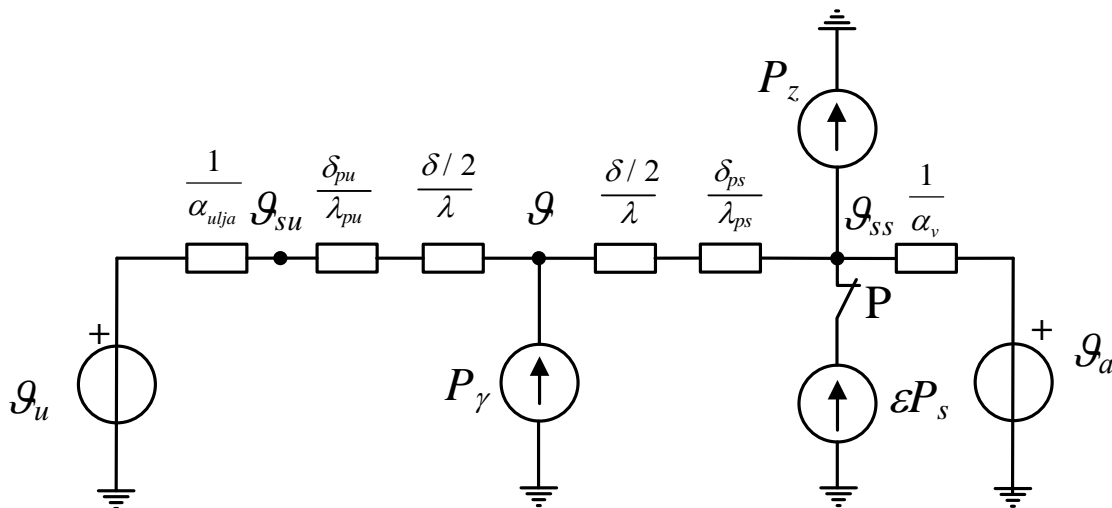
Пошто је вредност отпора R_t^T дата у тексту задатка, вредност отпора $R_{h, prirodno}^T$ износи $0,6\text{ K/W} - 0,4\text{ K/W} = 0,2\text{ K/W}$. На основу познате вредности отпора ($0,2\text{ K/W}$) и снаге губитака (100 W) са графика $R_h^T(l, P)$ са слике 2 се одређује минимална дужина хладњака од 220 mm .

У случају принудног струјања ваздуха, вредност еквивалентног топлотног отпора хладњака $R_{h, prinudno}^T$ одређена на основу дијаграма са слике 3, је $0,035\text{ K/W}$. Температура транзистора у овом случају је

$$\vartheta_{A, prinudno} = P_g (R_t^T + R_{h, prinudno}^T) + \vartheta_C = 100\text{ W} \cdot (0,4\text{ K/W} + 0,035\text{ K/W}) + 40^\circ\text{C} = 83,5^\circ\text{C}. \quad (1.2)$$

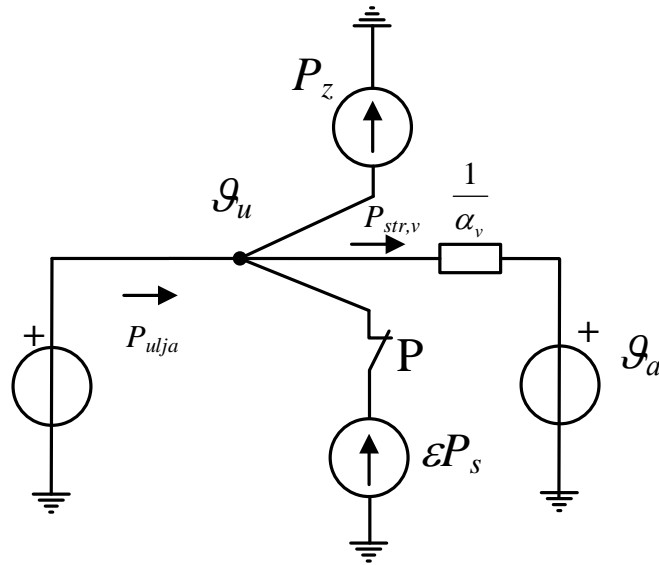
2. Задатак

На слици 2.1 је приказана заменска шема са концентрисаним параметрима која описује топлотни процес загревања. Када је прекидач P затворен, шема моделује загревање трансформаторског суда у првом случају, док је за загревање другом случају прекидач P отворен.



Слика 2.1

По тексту задатка, могуће је занемарити топлотне отпоре услед струјања уља, као и услед провођења топлоте кроз зид суда и танке заштитне премазе на унутрашњој и спољашњој страни зида тј. може се сматрати да је $\vartheta_u = \vartheta_{su} = \vartheta = \vartheta_{ss}$. Тиме се шема са слике 2.1 своди на шему приказану на слици 2.2.



Слика 2.2

У првом случају температура уља је 80°C , док је једначина биланса снаге за чвор ϑ_u на слици 2.2 је

$$P_{ulja,1} + \varepsilon P_s = P_{z,1} + P_{str,v,1}, \quad (2.1)$$

$$P_{ulja,1} = \varepsilon \cdot \sigma_c \left((273,15 + \vartheta_{u,1})^4 - (273,15 + \vartheta_{a,1})^4 \right) + \frac{\vartheta_{u,1} - \vartheta_{a,1}}{\frac{1}{\alpha_v}} - \varepsilon P_s. \quad (2.2)$$

$$P_{ulja,1} = 322,43 \text{ W} + 350 \text{ W} - 640 \text{ W} = 32,43 \text{ W}. \quad (2.3)$$

У другом случају нема додатног загревања услед сунчевог зрачења, па је једначина биланса снага

$$P_{ulja,2} = P_{z,2} + P_{str,v,2}. \quad (2.4)$$

По услову задатка треба да важи

$$P_{ulja,2} = P_{z,2} + P_{str,v,2} = P_{ulja,1}. \quad (2.5)$$

$$\varepsilon \cdot \sigma_c \left((273,15 + \vartheta_{u,2})^4 - (273,15 + \vartheta_{a,2})^4 \right) + \alpha_v (\vartheta_{u,2} - \vartheta_{a,2}) = 32,43 \text{ W}. \quad (2.6)$$

Решавањем једначине (2.6) добија се вредност температуре зида у другом случају $\vartheta_{u2} = 3,01^\circ\text{C}$.

3. Задатак

Часови предавања 6 до 9, поглавља 4.2 и 4.9.2.

4. Задатак

Укупна топлотна отпорност је:

$$R_l^T = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_i} \cdot \ln\left(\frac{D_s}{D_u}\right) + \frac{\rho_z}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{D_{ref}}{D_s}\right) \quad (4.1)$$

Пречници проводника и проводника са изолацијом једнаки су:

$$D_u = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 95}{\pi}} = 10,998\text{mm} \approx 11\text{mm} \quad (4.2)$$

$$D_s = D_u + 2\delta_{iz} = 11\text{mm} + 2\text{mm} = 13\text{mm} \quad (4.3)$$

Па је топлотна отпорност:

- У првом случају:

$$R_{l,1}^T = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 0,16 \frac{W}{m \cdot K}} \cdot \ln\left(\frac{13\text{mm}}{11\text{mm}}\right) + \frac{1 \frac{m \cdot K}{W}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{1000\text{mm}}{13\text{mm}}\right) = 0,86 \frac{Km}{W} \quad (4.4)$$

- У другом случају:

$$R_{l,2}^T = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 0,16 \frac{W}{m \cdot K}} \cdot \ln\left(\frac{13\text{mm}}{11\text{mm}}\right) + \frac{2,5 \frac{m \cdot K}{W}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{1000\text{mm}}{13\text{mm}}\right) = 1,89 \frac{Km}{W} \quad (4.5)$$

Електрична отпорност проводника једнака је:

$$R_{Cu}^{70^\circ\text{C}} = \frac{1}{\sigma \cdot S} (1 + \alpha(70^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})) = \frac{1}{56 \cdot 95} (1 + 4,29 \cdot 10^{-3} \cdot 50) = 2,28 \cdot 10^{-4} \Omega m \quad (4.6)$$

Једначина енергетског биланса гласи:

$$R_{Cu} I^2 = \frac{\vartheta_{doz} - \vartheta_z}{R_l^T} \quad (4.7)$$

Одавде добијамо израз за дозвољену струју:

$$I = \sqrt{\frac{\vartheta_{doz} - \vartheta_z}{R_{Cu} R_l^T}} \quad (4.8)$$

- У првом случају:

$$I_1 = \sqrt{\frac{70 - 20}{2,28 \cdot 10^{-4} \Omega m \cdot 0,86 \frac{Km}{W}}} = 505,74 \text{ A} \quad (4.9)$$

- У другом случају:

$$I_2 = \sqrt{\frac{70 - 20}{2,28 \cdot 10^{-4} \Omega m \cdot 1,89 \frac{Km}{W}}} = 340,25 \text{ A} \quad (4.10)$$



ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Катедра за енергетске претвараче и погоне

Други колоквијум (први термин) из предмета Термички процеси у електроенергетици (19Е014ТПЕ)

Максимално трајање 120 минута

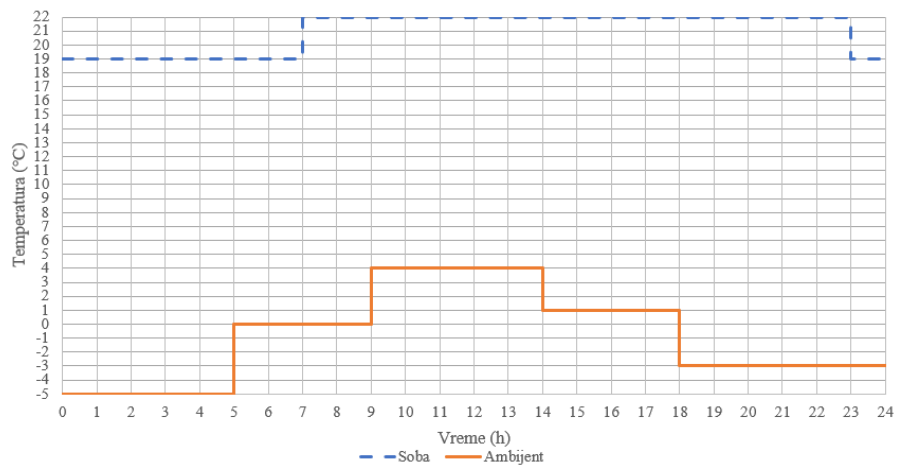
28. 12. 2023.

Укупан број поена износи 11

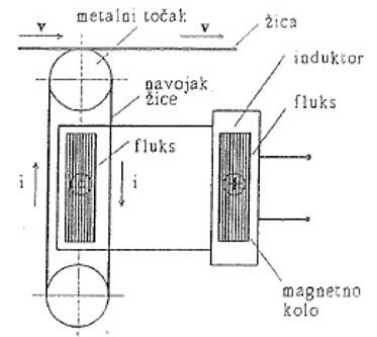
Предметни наставник: Проф. др Зоран Радаковић

1. Модул базиран на примени Пелтјеове 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 топлотне пумпе. Одредити снагу којом се топлоте одузима хладном флуиду и снагу којом се она предаје топлом флуиду, ако су температуре топле и хладне стране pn спојева 62°C и 11°C , а напон на прикључцима модула је 15 V . При решавању користити упрошћени модел. Температурна зависност карактеристика материјала од којих су направљени pn спојеви је (T (K) представља апсолутну температуру): $a[\text{V}/\text{K}] = 2\alpha = 2 \cdot (22224 + 930,6 \cdot T - 0,9905 \cdot T^2) \cdot 10^{-9}$, $\rho[\Omega \cdot \text{cm}] = (5112 + 163,4 \cdot T + 0,6279 \cdot T^2) \cdot 10^{-8}$, $\lambda[\text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K})] = (62605 - 277,7 \cdot T + 0,4131 \cdot T^2) \cdot 10^{-6}$. Карактеристике ρ и λ се приближно могу одредити на средњој вредности температуре топле и хладне стране pn спојева. (3п)

2. Термоакумулациона (ТА) пећ, инсталисане снаге $P_n = 4,5 \text{ kW}$, користи се за загревање једне просторије димензија $a \times b = 5 \text{ m} \times 4 \text{ m}$, висине $h = 2,5 \text{ m}$. Одредити потребан топлотни капацитет изотермичког језгра пећи C^T који омогућава, током периода ниже тарифе (0:00h – 8:00h), акумулацију довољне количине топлоте за загревање просторије током преосталог дела дана (без додатног укључивања грејача). Колико дуго ће грејач бити укључен у овом периоду? Дневни профил температуре у просторији и амбијенталне температуре приказан је на слици. Може се сматрати да еквивалентни коефицијент преноса топлоте од ваздуха у просторији ка амбијенталном ваздуху има вредност $k_{p,plus} = 0,45 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ током периода када је температура амбијента већа или једнака 0°C , а вредност $k_{p,minus} = 0,55 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ када је мања. Изнад и испод просторије, као и поред једног од два дужа зида се налазе загревани простори чија је температура једнака температури у посматраној просторији. Максимална дозвољена температура изотермичког језгра пећи је 700°C , а минимална потребна за ефикасно загревање просторије је 100°C . (3п)



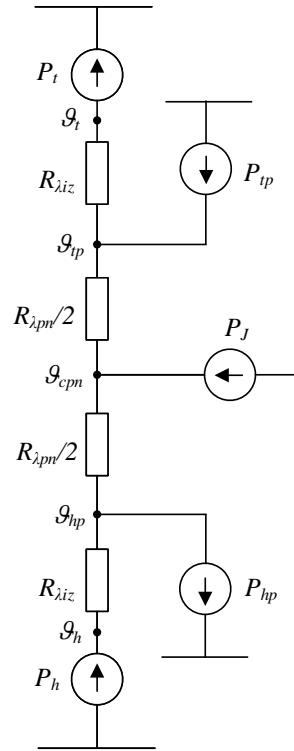
3. Загревање бакарних проводника пре наношења изолације врши се као на слици. Одредити јачину струје кроз проводник пресека $S_{Cu} = 1,5 \text{ mm}^2$, који се загрева од 20°C до 80°C . Брзина проводника је $v = 1 \text{ m/s}$. Дужина навојка у секундару је $L = 2 \text{ m}$. Одредити и број навојака у примару за прикључак на напон 230 V , 50 Hz . За бакар је познато: специфична топлотна проводност $\lambda_{Cu} = 900 \text{ W}/(\text{mK})$, специфични запремински топлотни капацитет $C_{Cu} = 3,46 \cdot 10^3 \text{ kJ}/(\text{m}^3\text{K})$ и специфична електрична проводност $\sigma_{Cu} = 57 \cdot 10^6 \text{ S/m}$. Може се сматрати да су ове величине константне у посматраном температурном опсегу. Сматрати да је загревање проводника адијабатско. (2,5п)



4. На једној слици нацртати напонску карактеристику извора напајања за три различита броја ампернавојака на примару трансформатора за напајање уређаја за електролучно заваривање, заједно са карактеристиком лука, за две различите дужине лука (l_1 и l_2). Цртеж треба да илуструје сва три случаја пресека карактеристика: да нема пресечних тачака, да постоји једна пресечна и да постоје две пресечне тачке. Означити тачке стабилног горења лука. (2,5п)

1. Задатак

Упрошћена топлотна шема за модул у режиму топлотне пумпе приказана је на слици 1.1.



Слика 1.1 – Топлотна шема

$$\underline{N} := 126 \quad SL := 0.15 \quad Sp := 28.8 \quad k\rho := 0.33$$

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

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

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

$$t_{tp} := 62 \quad t_{hp} := 11 \quad U := 15$$

$$t_p := \frac{t_{tp} + t_{hp}}{2} = 36.5$$

$$E := N \cdot a(t_{tp} + 273.16) \cdot (t_{tp} + 273.16) - N \cdot a(t_{hp} + 273.16) \cdot (t_{hp} + 273.16) = 4.022$$

$$Re_{pn} := 2 \cdot N \cdot \rho(t_p + 273.16) \cdot \frac{1}{SL} \quad R_{tpn} := \frac{1}{\lambda(t_p + 273)} \cdot \frac{1}{SL} \cdot \frac{1}{2 \cdot N} = 1.63$$

$$I := \frac{U - E}{Re_{pn}} = 5.637 \quad P_{pn} := Re_{pn} \cdot I^2 = 61.879$$

$$P_{tp} := N \cdot a(t_{tp} + 273.16) \cdot (t_{tp} + 273.16) \cdot I = 106.102$$

$$P_{hp} := N \cdot a(t_{hp} + 273.16) \cdot (t_{hp} + 273.16) \cdot I = 83.427$$

$$t_{cpn} := \frac{\left(P_{pn} \cdot \frac{R_{tpn}}{2} + t_{tp} + t_{hp} \right)}{2} = 61.719$$

$$P_{kagore} := \frac{t_{cpn} - t_{tp}}{\frac{R_{tpn}}{2}} = -0.344$$

$$P_{kadole} := \frac{t_{cpn} - t_{hp}}{\frac{R_{tpn}}{2}} = 62.224$$

$$P_t := P_{tp} + P_{kagore} = 105.757$$

$$P_h := P_{hp} - P_{kadole} = 21.204$$

2. Задатак

Укупна површина зидова који се хладе (у додиру са амбијенталним ваздухом) је

$$S = 2ah + bh = 32,5 \text{ m}^2 \quad (2.1)$$

На основу дијаграма промене температуре амбијенталног ваздуха и ваздуха у просторији могуће је одредити средњу вредност снаге губитака за сваки од интервала (слика 2.1):

$$P_{0h-5h} = k_{p,minus} S (19^\circ\text{C} - (-5^\circ\text{C})) = 429 \text{ W} \quad (2.2)$$

$$P_{5h-7h} = k_{p,plus} S (19^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) = 277,87 \text{ W} \quad (2.3)$$

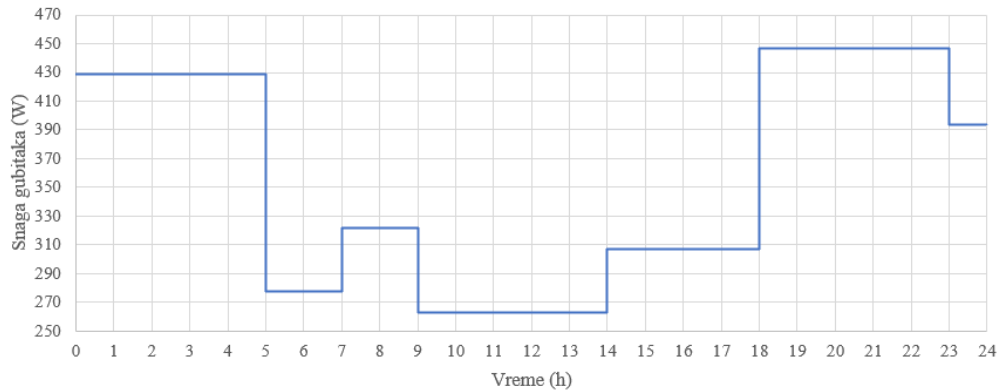
$$P_{7h-9h} = k_{p,plus} S (22^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) = 321,75 \text{ W} \quad (2.4)$$

$$P_{9h-14h} = k_{p,plus} S (22^\circ\text{C} - 4^\circ\text{C}) = 263,25 \text{ W} \quad (2.5)$$

$$P_{14h-18h} = k_{p,plus} S (22^\circ\text{C} - 1^\circ\text{C}) = 307,12 \text{ W} \quad (2.6)$$

$$P_{18h-23h} = k_{p,minus} S (22^\circ\text{C} - (-3^\circ\text{C})) = 446,87 \text{ W} \quad (2.7)$$

$$P_{23h-24h} = k_{p,minus} S (19^\circ\text{C} - (-3^\circ\text{C})) = 393,25 \text{ W} \quad (2.8)$$



Слика 2.1

Топлотни капацитет изотермичког језгра пећи треба да буде довољно велики да би акумулисао сву енергију потребну за загревање просторије у периоду од 8:00h до 24:00h:

$$C^T (\vartheta_{max} - \vartheta_{min}) = \sum_{i=1}^6 P_i t_i \quad (2.9)$$

$$C^T = \frac{P_{7h-9h} \cdot 1h + P_{9h-14h} \cdot 5h + P_{14h-18h} \cdot 4h + P_{18h-23h} \cdot 5h + P_{23h-24h} \cdot 1h}{700^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}} = \frac{19,78 \text{ MJ}}{600\text{K}} = 32,96 \frac{\text{kJ}}{\text{K}} \quad (2.10)$$

Током периода од 0:00h до 8:00h из електроенергетског система потребно је преузети енергију којом би се обезбедило „пуњење“ пећи, као и надокнадили губици ка амбијенту:

$$C^T (\vartheta_{max} - \vartheta_{min}) = P_g t_g - P_{0h-5h} \cdot 5h - P_{5h-7h} \cdot 2h - P_{7h-9h} \cdot 1h \quad (2.11)$$

па је време рада грејача

$$t_g = \frac{C^T (\vartheta_{max} - \vartheta_{min}) + P_{0h-5h} \cdot 5h + P_{5h-7h} \cdot 2h + P_{7h-9h} \cdot 1h}{P_g} = \frac{19,78 \text{ MJ} + 10,88 \text{ MJ}}{4500 \text{ W}} = 1,9 \text{ h} \quad (2.12)$$

На основу релативно кратког времена рада грејача може се закључити да је номинална снага пећи непотребно велика за загревање оваквог простора тј. није било потрено потребно трошити додатни новац за куповину пећи ове снаге. Бољи избор би била пећ номиналне снаге нпр. 2 kW, чији грејач би био укључен 4,3h.

3. Задатак

Снага акумулације топлоте у проводнику је

$$P_{akum} = \frac{VC_{cu} \Delta\theta}{\Delta t} = \frac{S_{cu} v \Delta t C_{cu} \Delta\theta}{\Delta t} = S_{cu} v C_{cu} \Delta\theta \quad (3.1)$$

Пошто се процес загревања може посматрати као адијабатски, једначина биланса снага своди се на једнакост снаге акумулисања (3.10) и снаге Џулових губитака у проводнику:

$$\frac{1}{\sigma_{cu}} \frac{L}{S_{cu}} I^2 = S_{cu} v C_{cu} \Delta\theta \quad (3.2)$$

Сада је могуће одредити струју кроз бакарни проводник

$$I = \sqrt{S_{Cu} v C_{Cu} \Delta \theta \frac{\sigma_{Cu} S_{Cu}}{L}} = 115,4 \text{ A} \quad (3.3)$$

Напон на секундару, који чини један навојак у кратком споју, је

$$U = RI = \sqrt{v C_{Cu} \Delta \theta \frac{L}{\sigma_{Cu}}} = 2,7 \text{ V} \quad (3.4)$$

па је број навојака на примару $N = 230/2,7 \approx 85$.

4. Задатак

Часови предавања 19 до 22, слајдови 23 до 25.



ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Катедра за енергетске претвараче и погоне

Први колоквијум (други термин) из предмета Термички процеси у електроенергетици (19E014ТПЕ)

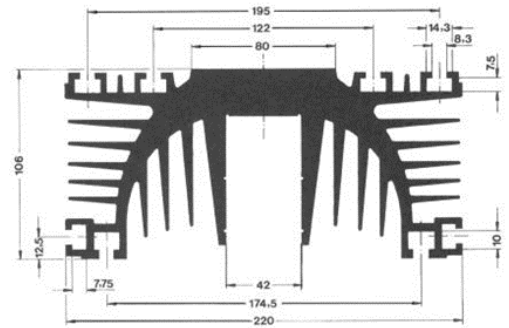
Испит траје максимално 120 минута

Укупан број поена износи 11

Предметни наставник: Проф. др Зоран Радаковић

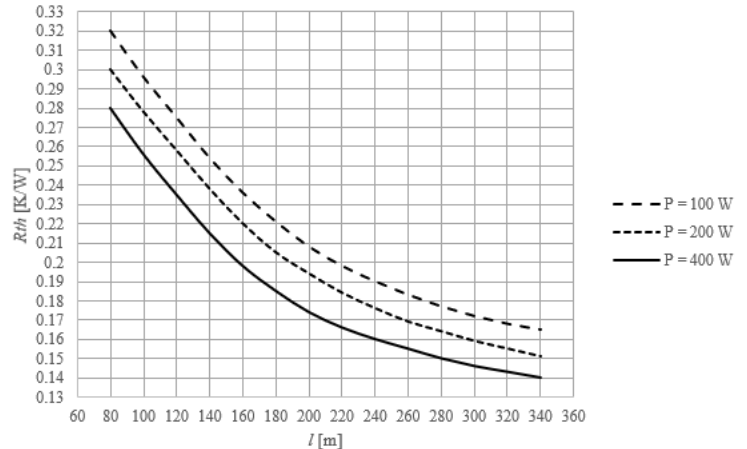
11. 01. 2024.

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°C . Одредити потребну дужину хладњака у два случаја: 1) један хладњак је ослоњен на површину транзистора; 2) 2 идентична хладњака су ослоњена на површину транзистора. Снага генерисања губитака у транзистору је 200 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°C . (3п)



Слика 4 - Изглед и димензије хладњака

2. Израчунати најтоплију тачку намотаја сувог електроенергетског трансформатора који се хлади ваздухом температуре 20°C , симетрично на унутрашњој и спољној површи, при чему коефицијент преласка топлоте струјањем са површи на ваздух износи $\alpha_k = 6\text{ W/m}^2\text{K}$. Висина намотаја је $H = 0,75\text{ m}$, а унутрашњи пречник $D_u = 363\text{ mm}$. Намотај је фолијског типа и има $N = 119$ навојака, сваки висине једнаке висини намотаја; дебљина изолације између навојака износи $\delta_i = 0,046\text{ mm}$, специфична топлотна проводност изолације $\lambda_i = 0,15\text{ W/mK}$, ширина проводника (алуминијум) $\delta_{Al} = 0,2\text{ mm}$. Губици у једном навојку износе $P_g = 10\text{ W}$. При решавању задатка сматрати да је отпор преносу топлоте провођењем кроз слојеве изолације исти, односно израчунавати га као отпор провођењу топлоте кроз раван зид површине $(\pi \cdot (D_u + N \cdot \delta_{Al} + (N + 1) \cdot \delta_i)) \cdot H$ и дебљине δ . Сматрати и да су отпори преласку топлоте струјањем на унутрашњој и спољашњој површи намотаја исти. Слој изолације постоји и на унутрашњој страни крајњег унутрашњег навојка и на спољној страни крајњег спољашњег навојка. Збир првих n чланова аритметичког реда (први елемент реда a_1 , разлика два суседна члана реда d) износи $n a_1 + (n(n - 1))/2 d$. (3п)



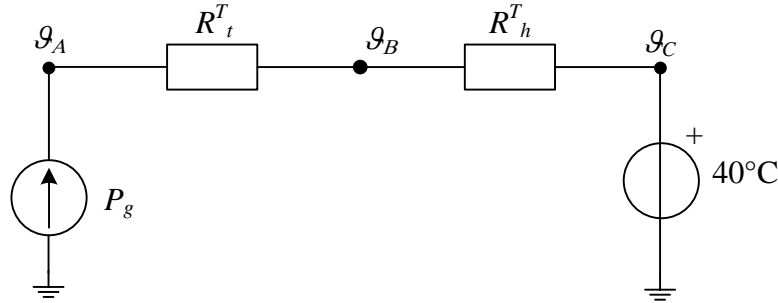
Слика 5 - Еквивалентни топлотни отпор

3. Огледом загревања у кратком споју потребно је проверити температуре сваке од фаза трофазног трансформатора. Нацртати шему веза током загревања наизменичном струјом за трансформатор спреге Y_u , као и шему мерне спреге примењене за одређивање отпора једносмерној струји сваке од фаза ниженапонске стране трансформатора. Због чега је неопходно применити поступак екстраполације криве хлађења намотаја и како се он врши? (2,5п)

4. Одредити дозвољену једносекундну једносмерну струју кратког споја ($I_{1s,doz}$) проводника од бакра, површине кружног попречног пресека 95 mm^2 . Проводник има PVC изолацију дебљине $d_{iz} = 1\text{ mm}$ (топлотне специфичне проводности $\lambda_i = 0,16\text{ W/(mK)}$). Максимална дозвољена температура изолације је 180°C , а кратак спој настаје при номиналном оптерећењу (температура 70°C). Температура амбијента износи 30°C . Коефицијент преласка топлоте струјањем је константан и износи $\alpha = 10\text{ W/(m}^2\text{K)}$. Познате су карактеристике бакра: $c_{Cu} = 385\text{ J/(kg}^{\circ}\text{C)}$, $\rho_{Cu} = 8933\text{ kg/m}^3$, специфична електрична проводност на 20°C $\sigma_{20\text{ Cu}} = 56 \cdot 10^6\text{ S/m}$ и коефицијент линеарног пораста специфичне електричне отпорности са температуром $\alpha_{Cu20} = 4,29 \cdot 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. При прорачуну снаге генерисања топлоте узети у обзир температурну промену електричне проводности; може се сматрати да струја кратког споја има константну вредност. Одредити укупну генерисану топлотну енергију, као и топлотну енергију која се кроз изолацију предаје амбијенту током трајања кратког споја. Снагу одвођења ка амбијенту одредити користећи средњу температуру проводника током кратког споја. (2,5п)

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°C тј. максимална вредност укупног топлотног отпора је

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

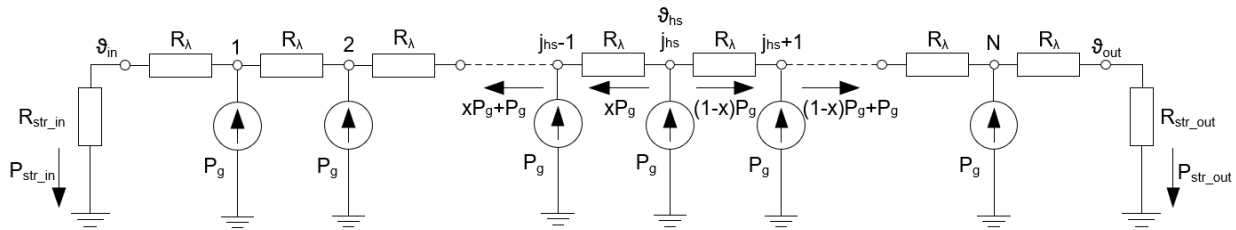
Пошто је вредност отпора R_t^T дата у тексту задатка, вредност отпора R_h^T износи $0,55\text{ K/W} - 0,4\text{ K/W} = 0,15\text{ K/W}$.

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

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

2. Задатак

Општа шема, која важи за несиметричне услове хлађења приказана је на слици 2.1:



Слика 2.1

У условима симетричног хлађења важи: $\vartheta_{in} = \vartheta_{out}$ и $j_{hs} = 60$.

Кроз сваку од граничних површи енергија се преноси према ваздуху снагом:

$$P_\alpha = P_{str,in} = P_{str,out} = 59,5 \cdot 10\text{ W} = 595\text{ W} \quad (2.1)$$

Површ меродавна за израчунавање топлотних отпора преносу топлоте провођењем и струјањем износи:

$$S = \pi \cdot D_{sr} \cdot H = \pi \cdot (D_u + N \cdot \delta_{Al} + (N + 1) \cdot \delta_i) \cdot H = 0,9244\text{ m}^2 \quad (2.2)$$

Топлотни отпор преносу топлоте провођењем кроз један слој изолације износи:

$$R_\lambda = \frac{1}{\lambda_i} \frac{\delta_i}{S} = \frac{1}{0,15} \cdot \frac{0,046}{0,9241} = 0,33175 \cdot 10^{-3} \frac{\text{K}}{\text{W}} \quad (2.3)$$

Топлотни отпор преносу топлоте струјањем износи:

$$R_\alpha = R_{str,in} = R_{str,out} = \frac{1}{\alpha S} = \frac{1}{6 \cdot 0,9244} = 180,3 \cdot 10^{-3} \frac{\text{K}}{\text{W}} \quad (2.4)$$

Температура граничних површи износи:

$$\vartheta_{in} = \vartheta_{out} = 20^\circ\text{C} + P_\alpha \cdot R_\alpha = 20^\circ\text{C} + 595 \cdot 180,3 \cdot 10^{-3} = 127,3^\circ\text{C} \quad (2.5)$$

На основу топлотне шеме, и узимајући у обзир симетрију (најтоплији је 60-ти навојак и половина снаге губитака у њему се преноси ка унутрашњој, а половина ка спољашњој површи намотаја; коефицијент x који се појављује у наредним изразима има вредност 0,5) могу се написати следећи изрази:

$$\vartheta_{hs} - \vartheta_{in} = \sum_{i=1}^{j_{hs}} R_{\lambda} P_i \quad (2.6)$$

На основу еквивалентне шеме се могу дефинисати снаге преноса топлоте на свакој од деоница (P_i), после чега претходни израз постаје:

$$\vartheta_{hs} - \vartheta_{in} = R_{\lambda} (xP_g + (xP_g + P_g) + (xP_g + 2P_g) + \dots + (xP_g + (j_{hs} - 1)P_g)) \quad (2.7)$$

Односно

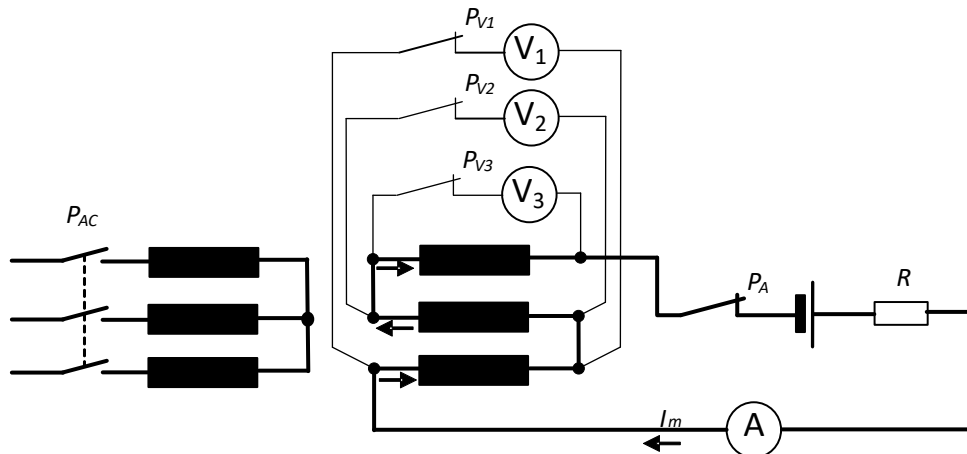
$$\vartheta_{hs} = \vartheta_{in} + R_{\lambda} \left(xj_{hs}P_g + P_g \sum_{i=1}^{j_{hs}-1} i \right) \quad (2.8)$$

$$\vartheta_{hs} = \vartheta_{in} + R_{\lambda} P_g \left(xj_{hs} + \frac{j_{hs}(j_{hs} - 1)}{2} \right) = 127,3 + 0,33175 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot \left(0,5 \cdot 60 + \frac{59 \cdot 60}{2} \right) = 133,3^{\circ}\text{C} \quad (2.9)$$

3. 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 3.1

4. Задатак

У општем случају важи следећа једначина биланса снага:

$$P_{gen} = P_{akum} + P_{prenosa} \quad (4.1)$$

Подужна снага којом се топлотна енергија генерише у проводнику дата је изразом:

$$P_{gen} = \frac{1}{\sigma_{20}} \left(1 + \alpha_{20} (\vartheta_{prov} - 20) \right) \frac{I_{1s, doz}^2}{S_{prov}} \quad (4.2)$$

Подужна снага којом се енергија акумулише у проводнику дата је изразом:

$$P_{akum} = C^T \frac{d\vartheta_{prov}}{dt} \quad (4.3)$$

где је подужни топлотни капацитет једнак:

$$C^T = \rho_{prov} \cdot S_{prov} \cdot c_{p, prov} \quad (4.4)$$

Подужна снага којом се топлотна енергија одводи са проводника ка амбијенту дата је изразом:

$$P_{prenosa} = \frac{\vartheta_{prov} - \vartheta_{amb}}{\frac{1}{2\pi\lambda_{iz}} \ln \frac{D_s}{D_u} + \frac{1}{\alpha \cdot O_{prov}}} \quad (4.5)$$

где је:

$$D_u = \sqrt{\frac{4S_{prov}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 95}{\pi}} = 10,998 \approx 11mm, \quad (4.6)$$

$$D_s = D_u + 2\delta_{iz} = 11 + 2 = 13mm, \quad (4.7)$$

$$O_{prov} = D_u \cdot \pi = 0,03455 m. \quad (4.8)$$

Уколико се усвоји претпоставка да је термички процес по настанку кратког споја адијабатски, занемарује се снага којом се топлота у току кратког споја одводи у околину ($P_{prenosa} = 0$) и сматра да се целокупна топлотна енергија генерисана у том периоду акумулира у проводнику. Оваква претпоставка је при проверама загревања у току кратког споја на страни сигурности, тј. пораст температуре проводника у току кратког споја је мало мањи од тако израчунатог. Израз (4.1) тада постаје:

$$P_{gen} = P_{akum}. \quad (4.9)$$

Заменом израза (4.2) и (4.3) у (4.9) добија се следећа диференцијална једначина која описује промену температуре проводника. То је уједно и температура најтоплијих тачака изолације (тачке на унутрашњој површи изолације уз сам проводник

$$C^T \frac{d\vartheta_{prov}}{dt} = \frac{1}{\sigma_{20}} (1 + \alpha_{20}(\vartheta_{prov} - 20)) \frac{I_{1s,doz}^2}{S_{prov}}, \quad (4.10)$$

$$\frac{d\vartheta_{prov}}{(1 + \alpha_{20}(\vartheta_{prov} - 20))} = \frac{1}{C^T \sigma_{20} S_{prov}} I_{1s,doz}^2 dt, \quad (4.11)$$

$$\int_{\vartheta_{prov}=70}^{\vartheta_{max}=180} \frac{d\vartheta_{prov}}{(1 + \alpha_{20}(\vartheta_{prov} - 20))} = \int_{t=0}^{t_{ks}} \frac{1}{C^T \sigma_{20} S_{prov}} I_{1s,doz}^2 dt, \quad (4.12)$$

$$\frac{1}{\alpha_{20}} \ln \frac{1 + \alpha_{20}(180 - 20)}{1 + \alpha_{20}(70 - 20)} = \frac{1}{C^T \sigma_{20} S_{prov}} I_{1s,doz}^2 t_{ks}, \quad (4.13)$$

$$I_{1s,doz} = \sqrt{\frac{C^T \sigma_{20} S_{prov}}{\alpha_{20} t_{ks}} \ln \frac{1 + \alpha_{20} \cdot 160}{1 + \alpha_{20} \cdot 50}}. \quad (4.14)$$

У случају проводника од бакра подужни топлотни капацитет има вредност $C^T_{Cu} = \rho_{Cu} \cdot S_{prov} \cdot c_{p,Cu} = 326,7245 J/(mK)$, специфична електрична проводност на $20^\circ C$ $\sigma_{20,Cu} = 56 \cdot 10^6 S/m$ и коефицијент линеарног пораста специфичне електричне отпорности са температуром $\alpha_{Cu,20} = 4,29 \cdot 10^{-3} C^{-1}$. Заменом ових вредности у израз (4.14) добија се вредност дозвољене једносекундне једносмерне струје кратког споја

$$I_{1s,doz} = 11533A. \quad (4.14)$$

Топлотна енергија која се генерише током кратког споја, под претпоставком адијабатског процеса, у потпуности се „трошни“ на акумулацију у проводнику. На основу тога она се може одредити као

$$E_{gen} = C^T (\vartheta_{max} - \vartheta_{poc}) = 35,9 \frac{kJ}{m}, \quad (4.15)$$

Енергија која се током трајања кратког споја пренесе ка амбијенту може се приближно одредити као

$$E_{prenosa} = P_{prenosa} t_{ks} = \frac{140^\circ C - 30^\circ C}{\frac{1}{2\pi\lambda_{iz}} \ln \frac{D_s}{D_u} + \frac{1}{\alpha \cdot O_{prov}}} t_{ks} = 40,85 \frac{W}{m} \cdot 1s = 40,85 \frac{J}{m}, \quad (4.16)$$



ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Катедра за енергетске претвараче и погоне

Други колоквијум (други термин) из предмета Термички процеси у електроенергетици (19Е014ТПЕ)

Максимално трајање 120 минута

11. 01. 2024.

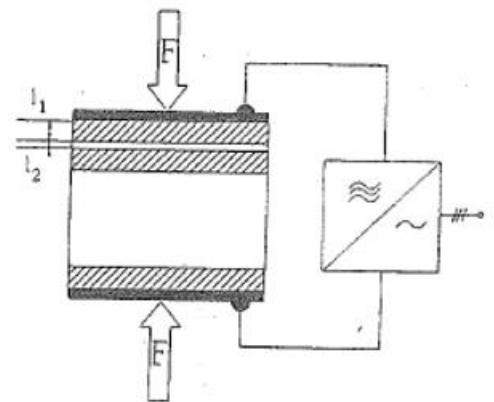
Укупан број поена износи 11

Предметни наставник: Проф. др Зоран Радаковић

1. 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 W . Познате су температуре топле и хладне стране pn спојева 100°C и 0°C . При решавању користити упрошћени модел. Температурна зависност карактеристика материјала од којих су направљени pn спојеви је (T (K) представља апсолутну температуру):
 $\alpha[\text{V}/\text{K}] = 2\alpha = 2 \cdot (22224 + 930,6 \cdot T - 0,9905 \cdot T^2) \cdot 10^{-9}$, $\rho[\Omega \cdot \text{cm}] = (5112 + 163,4 \cdot T + 0,6279 \cdot T^2) \cdot 10^{-8}$,
 $\lambda[\text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K})] = (62605 - 277,7 \cdot T + 0,4131 \cdot T^2) \cdot 10^{-6}$. Карактеристике ρ и λ се приближно могу одредити на средњој вредности температуре топле и хладне стране pn спојева. (3п)

2. На једну округлу електроотпорну грејну плочу пречника $D = 0,1 \text{ m}$, инсталисане електричне снаге $P_{\text{inst}} = 1000 \text{ W}$, топлотног капацитета $C_p^T = 1200 \text{ J/K}$ и топлотног отпора преносу топлоте провођењем кроз ослонац, према околини, $R_p^T = 0,5 \text{ K/W}$, 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 ($R_l^T \approx 0$), а такође се може занемарити и топлотни отпор преласку топлоте струјањем са посуде на воду ($R_{2a}^T \approx 0$). Топлотни капацитет посуде износи $C_l^T = 100 \text{ J/K}$, а топлотни отпор преносу топлоте струјањем са посуде на околни ваздух $R_{1a}^T = 1 \text{ K/W}$. 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°C до тренутка кључања, и то када се посуда са водом ставља на: а) грејну плочу температуре 20°C , б) претходно загрејану грејну плочу чија је температура 100°C . Почетна температура посуде једнака је температури воде, односно температури амбијента од 20°C . (3п)

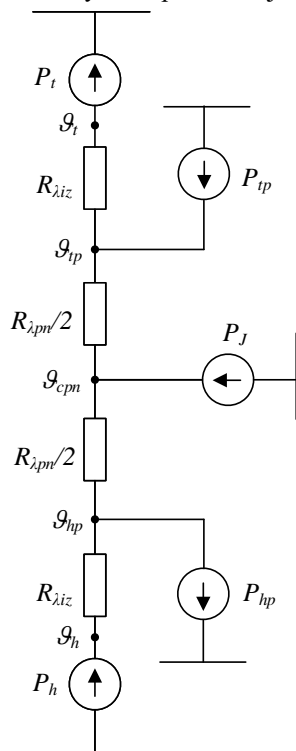
3. У производњи шпер плоча се користи диелектрично загревање на следећи начин. Између две металне плоче пресе, површине $S = 3 \text{ m}^2$, постави се $n = 6$ слојева фурнира ($\epsilon_{r1} = 4$, $\text{tg } \delta_{e1} = 0,4$), сваки дебљине $l_1 = 10^{-3} \text{ m}$ и $n - 1$ слој лепка ($\epsilon_{r2} = 5$, $\text{tg } \delta_{e2} = 0,5$), сваки дебљине $l_2 = 10^{-4} \text{ m}$. Овако формиран сендвич се изложи притиску преко металних плоча. Металне плоче се прикључују на крајеве 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 $q = \omega \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot E^2$.
 $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ (2,5п)



4. Скицирати електротермички уређај за тачкасто електроотпорно заваривање. Која три регулациона дејства се користе да би се остварио квалитетан спој, оптимизовао утрошак енергије и брзина технолошког процеса? (2,5п)

1. Задатак

Упрошћена топлотна шема за модул у режиму топлотне пумпе приказана је на слици 1.1.



Слика 1.1 – Топлотна шема

$$N := 126$$

$$SL := 0.15$$

$$Sp := 28.8$$

$$kp := 0.33$$

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

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

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

$$ttp := 100$$

$$thp := 0$$

$$Pg := 7$$

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

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

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

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

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

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

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

+

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

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

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

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

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

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

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

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

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

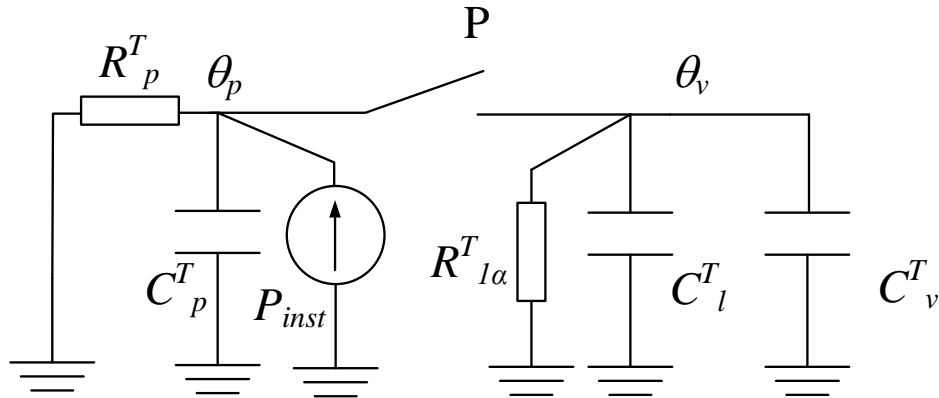
Provera energetskog bilansa

$$P_t - P_g = 82.916$$

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

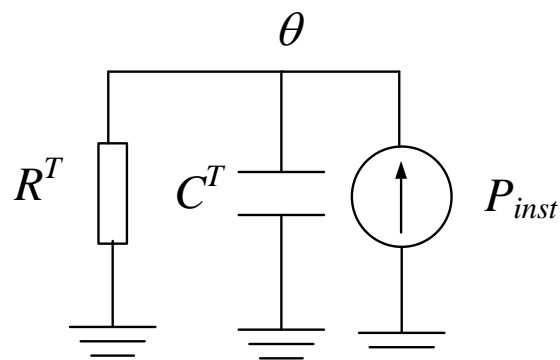
2. Задатак

Топлотна шема којом се моделује загревање приказана је на слици:



Слика 2.1

Након што се посуда са водом постави на грејну плочу, прекидач P се затвара, после чега се шема са слике 2.1 своди на



Слика 2.2

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 2.2 добија се познати израз за временску зависност температуре плоче, посуде и воде у односу на околину:

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-t/\tau} + \theta_\infty (1 - e^{-t/\tau}), \quad (2.1)$$

где је $\theta_\infty = P_{inst} R^T$ и $\tau = C^T R^T$. На основу једначине (2.1) могуће је одредити време загревања воде до кључања ($\theta = 80 \text{ K}$)

$$t = \tau \cdot \ln \frac{\theta_0 - \theta_\infty}{\theta - \theta_\infty} = 1240,1 \text{ s} \quad (2.2)$$

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

$$t = 1116,67 \text{ s} \cdot \ln \frac{0 - 333,33 \text{ K}}{80 \text{ K} - 333,33 \text{ K}} = 306,5 \text{ s}, \quad (2.3)$$

а степен искоришћења процеса загревања воде до кључања је

$$\eta = \frac{C_v^T \theta}{P_{inst} t} = 0,535 \quad (2.4)$$

У случају под б), пре затварања прекидача P температура грејне плоче је 100°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

$$\theta_0 = \frac{\theta_p C_p^T}{C_p^T + C_l^T + C_v^T} = 28,66 \text{ K}. \quad (2.5)$$

Потребно време загревања је

$$t = 1116,67 \text{ s} \cdot \ln \frac{28,66 - 333,33 \text{ K}}{80 \text{ K} - 333,33 \text{ K}} = 206,1 \text{ s}, \quad (2.3)$$

а степен искоришћења процеса загревања воде до кључања је

$$\eta = \frac{C_v^T \theta}{P_{inst} t} = 0,796 \quad (2.4)$$

3. 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:

$$C_1 = \varepsilon_1 \frac{S}{nl_1}, \quad (3.1)$$

за n слојева дрвета и

$$C_2 = \varepsilon_2 \frac{S}{(n-1)l_2}, \quad (3.2)$$

за $n-1$ слој лепка.

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

$$U_1 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} U, \quad (3.3)$$

$$U_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U. \quad (3.4)$$

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

$$E_1 = \frac{U_1}{nl_1} = \frac{U}{nl_1 + \frac{\varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r2}}(n-1)l_2} = \frac{10^6 V}{6,4 m}, \quad (3.5)$$

$$E_2 = \frac{U_2}{(n-1)l_2} = \frac{U}{(n-1)l_2 + \frac{\varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1}}nl_1} = \frac{10^6 V}{8 m}. \quad (3.6)$$

Укупна снага диелектричног загревања у слојевима дрвета и лепка је

$$P = \omega \cdot \varepsilon_{r1} \cdot \varepsilon_0 \cdot \operatorname{tg} \delta_{e1} \cdot E_1^2 \cdot S \cdot n \cdot l_1 + \omega \cdot \varepsilon_{r2} \cdot \varepsilon_0 \cdot \operatorname{tg} \delta_{e2} \cdot E_2^2 \cdot S \cdot (n-1) \cdot l_2 = 195,5 + 16,29 = 211,79 kW. \quad (3.7)$$

Реактивна снага која се узима из мреже се одређује као

$$Q = \omega \cdot \varepsilon_{r1} \cdot \varepsilon_0 \cdot E_1^2 \cdot S \cdot n \cdot l_1 + \omega \cdot \varepsilon_{r2} \cdot \varepsilon_0 \cdot E_2^2 \cdot S \cdot (n-1) \cdot l_2 = 488,75 + 32,58 = 521,33 kVAr. \quad (3.8)$$

Привидна снага на излазу извора (претварача учестаности) је

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 562,7 kVA. \quad (3.9)$$

Фактор снаге оптерећења је

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = 0,376 (kap.). \quad (3.10)$$

4. Задатак

Часови предавања 19 до 22, слајдови 23 до 25.



ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Катедра за енергетске претвараче и погоне

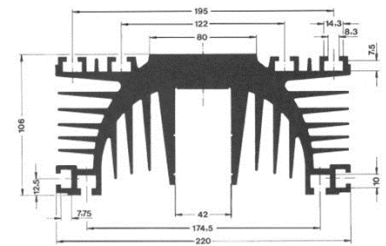
Испит из предмета Термички процеси у електроенергетици (19E014ТПЕ)

Максимално трајање 180 минута

Предметни наставник: Проф. др Зоран Радаковић

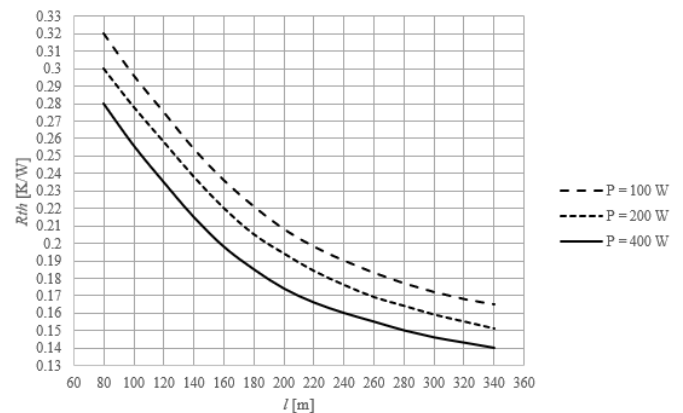
11. 01. 2024.

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°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 W . Отпор провођењу топлоте кроз транзистор је $R_{T_i}^T = 0,4\text{ K/W}$. 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°C . (2п)



Слика б - 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 ниженапонске стране трансформатора. Због чега је неопходно применити поступак екстраполације криве хлађења намотаја и како се он врши? (2п)

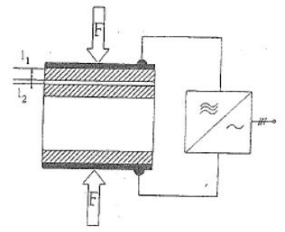


3. Модул базиран на примени Пелтијеове електромоторне силе димензија $60 \times 48\text{ mm}$, има $N = 126\text{ pn}$ спојева. Однос пресека кроз који протиче струја и дебљине елемента је $S/L = 1,5\text{ mm}$. Топлотни отпора провођењу топлоте кроз електроизолациони слој (керамику) и контактни топлотни 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 W . Познате су температуре топле и хладне стране pn спојева 100°C и 0°C . При решавању користити упрошћени модел. Температурна зависност карактеристика материјала од којих су направљени pn спојеви је (T (K) представља апсолутну температуру): $a[\text{V/K}] = 2a = 2 \cdot (22224 + 930,6 \cdot T - 0,9905 \cdot T^2) \cdot 10^{-9}$, $\rho[\Omega \cdot \text{cm}] = (5112 + 163,4 \cdot T + 0,6279 \cdot T^2) \cdot 10^{-8}$, $\lambda[\text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K})] = (62605 - 277,7 \cdot T + 0,4131 \cdot T^2) \cdot 10^{-6}$. Карактеристике ρ и λ се приближно могу одредити на средњој вредности температуре топле и хладне стране pn спојева. (2,5п)

Слика 7 - Еквивалентни топлотни отпор

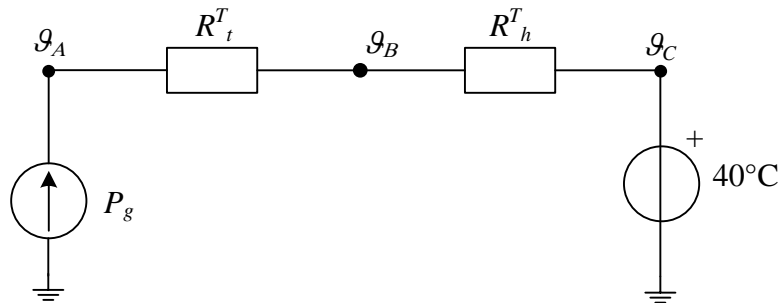
4. На једну округлу електроотпорну грејну плочу пречника $D = 0,1\text{ m}$, инсталисане електричне снаге $P_{inst} = 1000\text{ W}$, топлотног капацитета $C_p^T = 1200\text{ J/K}$ и топлотног отпора преносу топлоте провођењем кроз ослонац, према околини, $R_p^T = 0,5\text{ K/W}$, постављена је посуда у којој се загрева $0,5$ литар воде. Прелаз топлоте провођењем са плоче на посуду, истог пречника и равног дна, је добар ($R_{i_a}^T \approx 0$), а такође се може занемарити и топлотни отпор преласку топлоте струјањем са посуде на воду ($R_{2a}^T \approx 0$). Топлотни капацитет посуде износи $C_l^T = 100\text{ J/K}$, а топлотни отпор преносу топлоте струјањем са посуде на околни ваздух $R_{l_a}^T = 1\text{ K/W}$. Специфични запремински топлотни капацитет воде износи $c_v = 4100\text{ kJ/m}^3\text{K}$. Одредити степен искоришћења електротермичког процеса загревања воде у посуди, од температуре 20°C до тренутка кључања, и то када се посуда са водом ставља на: а) грејну плочу температуре 20°C , б) претходно загрејану грејну плочу чија је температура 100°C . Почетна температура посуде једнака је температури воде, односно температури амбијента од 20°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°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 $0,55 \text{ K/W} - 0,4 \text{ K/W} = 0,15 \text{ K/W}$.

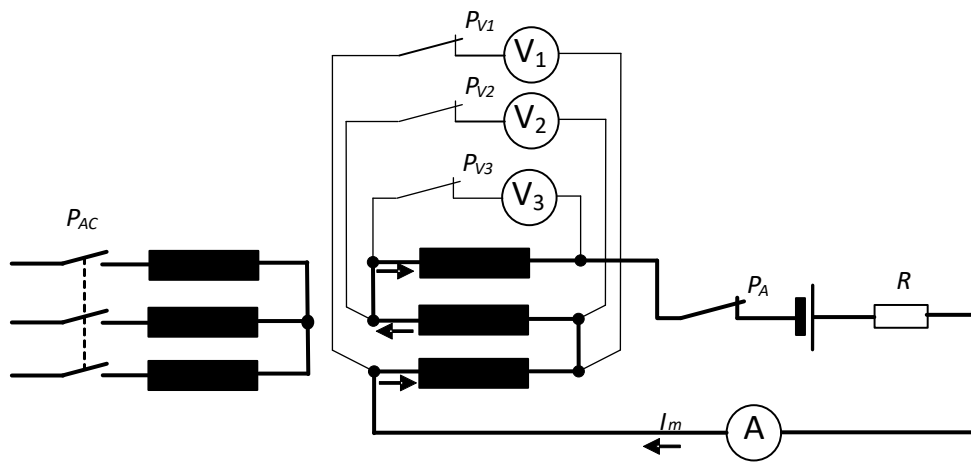
У првом случају, када се користи један хладњак, на основу познате вредности отпора ($0,15 \text{ K/W}$) и снаге губитака (200 W) са графика $R_h^T(l, P)$ са слике 2 се одређује минимална дужина хладњака од 340 mm .

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

2. Задатак

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

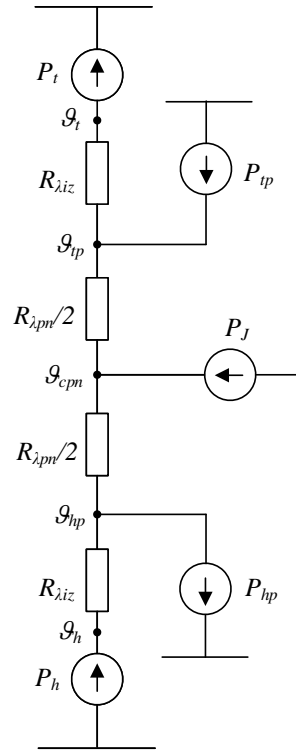
Шема мерне спреге за одређивање отпора једносмерној струји сваке од фаза ниженaponsке стране трансформатора:



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

$$N := 126 \quad SL := 0.15 \quad Sp := 28.8 \quad kp := 0.33$$

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

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

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

$$ttp := 100 \quad thp := 0 \quad Pg := 7$$

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

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

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

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

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

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

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

+

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

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

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

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

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

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

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

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

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

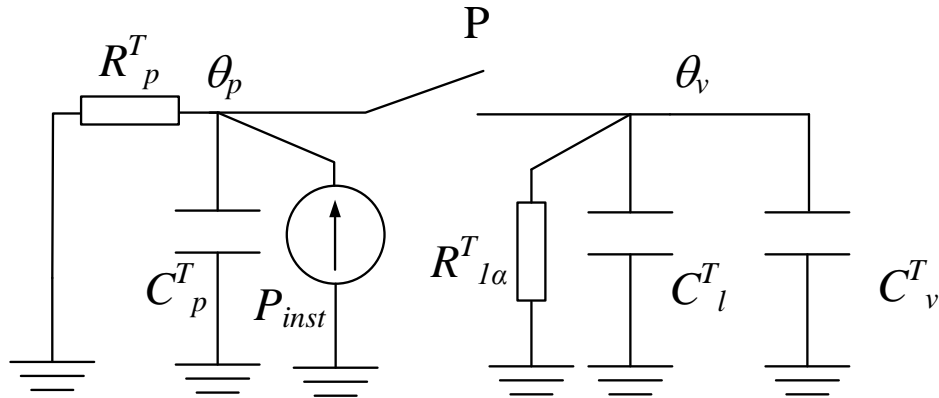
Provera energetskog bilansa

$$P_t - P_g = 82.916$$

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

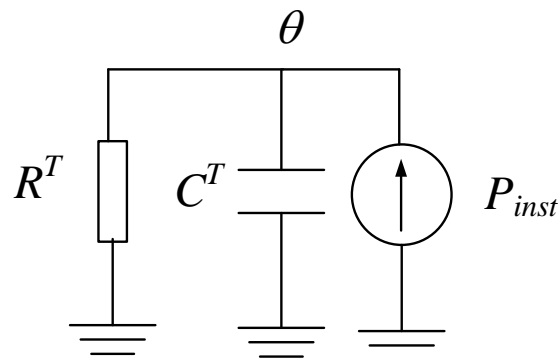
4. Задатак

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°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:

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

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

Укупна снага диелектричног загревања у слојевима дрвета и лепка је

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

Реактивна снага која се узима из мреже се одређује као

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

Привидна снага на излазу извора (претварача учестаности) је

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

Фактор снаге оптерећења је

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



ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Катедра за енергетске претвараче и погоне

Испит/други колоквијум из предмета Термички процеси у електроенергетици (19Е014ТПЕ)

Максимално трајање 180 / 150 минута

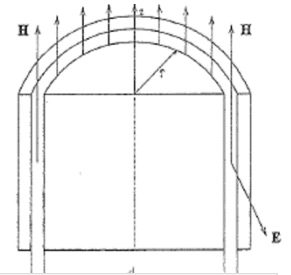
1. 2. 2024.

Предметни наставник: Проф. др Зоран Радаковић

1. Израчунати најтоплију тачку намотаја сувог електроенергетског трансформатора који се хлади ваздухом температуре 20°C , симетрично на унутрашњој и спољној површи, при чему коефицијент преласка топлоте струјањем са површи на ваздух износи $\alpha_k = 6 \text{ W/m}^2\text{K}$. Висина намотаја је $H = 0,75 \text{ m}$, а унутрашњи пречник $D_u = 363 \text{ mm}$. Намотај је фолијског типа и има $N = 119$ навојака, сваки висине једнаке висини намотаја; дебљина изолације између навојака износи $\delta_i = 0,046 \text{ mm}$, специфична топлотна проводност изолације $\lambda_i = 0,15 \text{ W/mK}$, ширина проводника (алуминијум) $\delta_{Al} = 0,2 \text{ mm}$. Губици у једном навојку износе $P_g = 10 \text{ W}$. При решавању задатка сматрати да је отпор преносу топлоте провођењем кроз слојеве изолације исти, односно израчунавати га као отпор провођењу топлоте кроз раван зид површине $(\pi \cdot (D_u + N \cdot \delta_{Al} + (N + 1) \cdot \delta_i)) \cdot H$ и дебљине δ . Сматрати и да су отпори преласку топлоте струјањем на унутрашњој и спољашњој површи намотаја исти. Слој изолације постоји и на унутрашњој страни крајњег унутрашњег навојка и на спољној страни крајњег спољашњег навојка. Збир првих n чланова аритметичког реда (први елемент реда a_1 , разлика два суседна члана реда d) износи $n a_1 + (n(n - 1))/2 d$. (2п / 0п)

2. 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 $k_p = 0,33 \text{ W/(cm}^2\text{K)}$. Модул ради у режиму топлотне пумпе. Написати систем једначина чијим се решавањем може одредити напон који треба довести на модул како би се остварило да се хладно тело температуре 5°C хлади снагом 30 W , при чему је познато да је температура тог тела на које је ослоњен модул 35°C . При решавању користити упрошћени модел. Температурна зависност карактеристика материјала од којих су направљени pn спојеви је $(T \text{ (K) представља апсолутну температуру):}$
 $\alpha[\text{V/K}] = 2\alpha = 2 \cdot (22224 + 930,6 \cdot T - 0,9905 \cdot T^2) \cdot 10^{-9}$,
 $\rho[\Omega \cdot \text{cm}] = (5112 + 163,4 \cdot T + 0,6279 \cdot T^2) \cdot 10^{-8}$,
 $\lambda[\text{W/(cm} \cdot \text{K)}] = (62605 - 277,7 \cdot T + 0,4131 \cdot T^2) \cdot 10^{-6}$. Карактеристике ρ и λ се приближно могу одредити користећи температури на средини полупроводника. (2,5п / 3п)

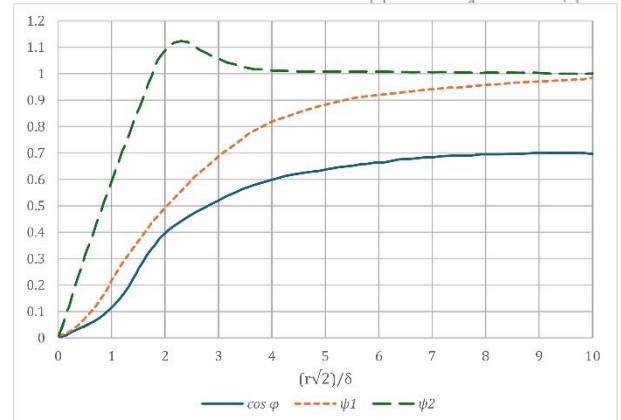
3. На једну округлу електроотпорну грејну плочу пречника $D = 0,1 \text{ m}$, инсталисане електричне снаге $P_{inst} = 1000 \text{ W}$, топлотног капацитета $C_p^T = 1200 \text{ J/K}$ и топлотног отпора преносу топлоте провођењем кроз ослонац, према околини, $R_p^T = 0,5 \text{ K/W}$, постављена је посуда запремине 1 литар. Прелаз топлоте провођењем са плоче на посуду, истог пречника и равног 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 $c_v = 4100 \text{ kJ/m}^3\text{K}$. Након што је вода прокључала, она је наставила да кључа и испарава из шерпе. Након што је испарило 30 % воде, до врха шерпе је доливена вода температуре 15°C . После ког времена ће вода поново да прокључа? Температури амбијента износи 20°C . (2,5п / 3п)



4. Одредити однос активних и реактивних снага које се предају цилиндричном бакарном индукту

електротермичког електроиндукционог уређаја (слика), чији је пречник:
а) $d = 4,7 \text{ cm}$ и б) $d = 10 \text{ cm}$. Однос снаге одредити за случајеве индукционог загревања при учестаности електричних величина $f_1 = 50 \text{ Hz}$ и $f_2 = 3 \text{ kHz}$. Специфична електрична проводност бакра износи $\sigma = 57 \cdot 10^6 \text{ S/m}$. Зависност фактора који фигуришу у изразима за површинске густине активне и реактивне снаге (изрази дати на крају текста задатка), као и фактора снаге оптерећења, од вредности односа полупречника цилиндра и дубине продирања, приказана је на слици. Вредности упоредити за исте јачине магнетног поља на површи индукта и исте температуре индукта, при којима специфична електрична отпорност има наведену вредност. (2п / 2,5п) $P_{s0} =$

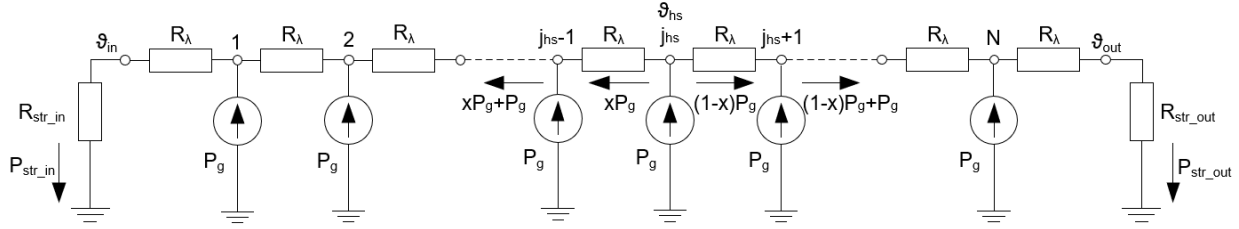
$$\frac{H_0^2}{2\sigma\delta} \psi_1 \left(\frac{\Delta}{\delta}\right) \text{ и } Q_{s0} = \frac{H_0^2}{2\sigma\delta} \psi_2 \left(\frac{\Delta}{\delta}\right)$$



5. Навести механизме регулације снаге загревања у трофазним електролучним пећима за топљење метала. (2п / 2,5п)

1. Задатак

Општа шема, која важи за несиметричне услове хлађења приказана је на слици 1.1:



Слика 1.1

У условима симетричног хлађења важи: $\vartheta_{in} = \vartheta_{out}$ и $j_{hs} = 60$.

Кроз сваку од граничних површи енергија се преноси према ваздуху снагом:

$$P_{\alpha} = P_{str,in} = P_{str,out} = 59,5 \cdot 10 \text{ W} = 595 \text{ W} \quad (1.1)$$

Површ меродавна за израчунавање топлотних отпора преносу топлоте провођењем и струјањем износи:

$$S = \pi \cdot D_{sr} \cdot H = \pi \cdot (D_u + N \cdot \delta_{Al} + (N + 1) \cdot \delta_i) \cdot H = 0,9244 \text{ m}^2 \quad (1.2)$$

Топлотни отпор преносу топлоте провођењем кроз један слој изолације износи:

$$R_{\lambda} = \frac{1 \delta_i}{\lambda_i S} = \frac{1}{0,15} \cdot \frac{0,046}{0,9241} = 0,33175 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W} \quad (1.3)$$

Топлотни отпор преносу топлоте струјањем износи:

$$R_{\alpha} = R_{str,in} = R_{str,out} = \frac{1}{\alpha S} = \frac{1}{6 \cdot 0,9244} = 180,3 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W} \quad (1.4)$$

Температура граничних површи износи:

$$\vartheta_{in} = \vartheta_{out} = 20^{\circ}\text{C} + P_{\alpha} \cdot R_{\alpha} = 20^{\circ}\text{C} + 595 \cdot 180,3 \cdot 10^{-3} = 127,3^{\circ}\text{C} \quad (1.5)$$

На основу топлотне шеме, и узимајући у обзир симетрију (најтоплији је 60-ти навојак и половина снаге губитака у њему се преноси ка унутрашњој, а половина ка спољашњој површи намотаја; коефицијент x који се појављује у наредним изразима има вредност 0,5) могу се написати следећи изрази:

$$\vartheta_{hs} - \vartheta_{in} = \sum_{i=1}^{j_{hs}} R_{\lambda} P_i \quad (1.6)$$

На основу еквивалентне шеме се могу дефинисати снаге преноса топлоте на свакој од деоница (P_i), после чега претходни израз постаје:

$$\vartheta_{hs} - \vartheta_{in} = R_{\lambda} (xP_g + (xP_g + P_g) + (xP_g + 2P_g) + \dots + (xP_g + (j_{hs} - 1)P_g)) \quad (1.7)$$

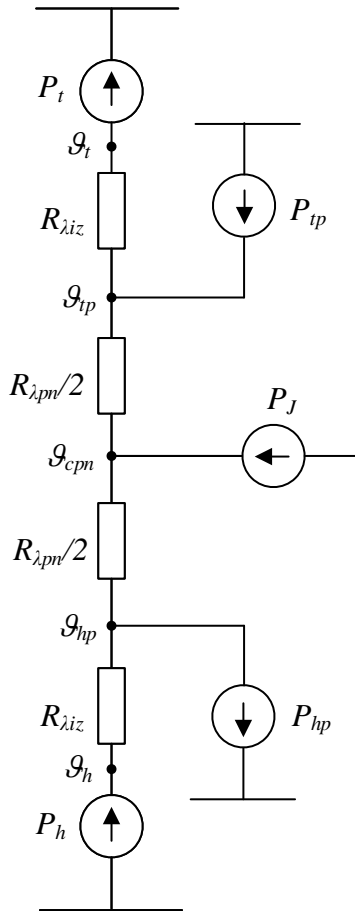
Односно

$$\vartheta_{hs} = \vartheta_{in} + R_{\lambda} \left(xj_{hs}P_g + P_g \sum_{i=1}^{j_{hs}-1} i \right) \quad (1.8)$$

$$\vartheta_{hs} = \vartheta_{in} + R_{\lambda} P_g \left(xj_{hs} + \frac{j_{hs}(j_{hs} - 1)}{2} \right) = 127,3 + 0,33175 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot \left(0,5 \cdot 60 + \frac{59 \cdot 60}{2} \right) = 133,3^{\circ}\text{C} \quad (1.9)$$

2. Задатак

Упрошћена топлотна шема за модул у режиму топлотне пумпе приказана је на слици 2.1.



$$\underline{N} := 126 \quad SL := 0.15 \quad Sp := 28.8 \quad kp := 0.33$$

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

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

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

$$tt := 35 \quad th := 5 \quad Ph := 30$$

Pocetna vrednost za iteriranje

$$Pt := 100$$

$$ttp := 40 \quad thp := 2 \quad tcpn := 30$$

$$U := 10 \quad I := 2$$

$$E(ttp, thp) := [N \cdot a(ttp + 273.16) \cdot (ttp + 273.16) - N \cdot a(thp + 273.16) \cdot (thp + 273.16)]$$

$$Rel(ttp, thp) := 2 \cdot N \cdot \rho\left(\frac{ttp + thp}{2} + 273.16\right) \cdot \frac{1}{SL}$$

Given

$$2 \cdot N \cdot p \left(\frac{ttp + thp}{2} + 273.16 \right) \cdot \frac{I^2}{SL} = \frac{1}{2} \cdot \lambda \left(\frac{ttp + thp}{2} + 273.16 \right) \cdot 2 \cdot N \cdot SL \cdot (tcpn - ttp) + \frac{1}{2} \cdot \lambda \left(\frac{ttp + thp}{2} + 273.16 \right) \cdot 2 \cdot N \cdot SL \cdot (tcpn - thp)$$

$$\frac{1}{2} \cdot \lambda \left(\frac{ttp + thp}{2} + 273.16 \right) \cdot 2 \cdot N \cdot SL \cdot (tcpn - ttp) = Pt - N \cdot a(ttp + 273.16) \cdot (ttp + 273.16) \cdot I$$

$$Pt = kp \cdot Sp \cdot (ttp - tt)$$

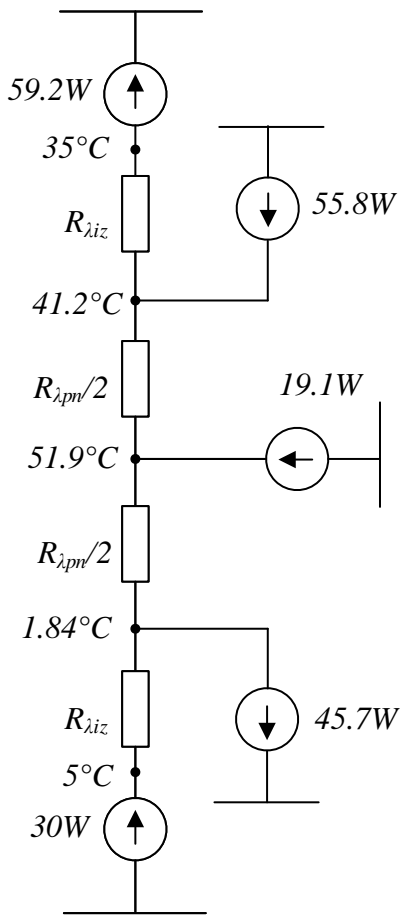
$$\frac{1}{2} \cdot \lambda \left(\frac{ttp + thp}{2} + 273.16 \right) \cdot 2 \cdot N \cdot SL \cdot (tcpn - thp) + Ph = N \cdot a(thp + 273.16) \cdot (thp + 273.16) \cdot I$$

$$Ph = kp \cdot Sp \cdot (th - thp)$$

$$I = \frac{U - E(ttp, thp)}{Rel(ttp, thp)}$$

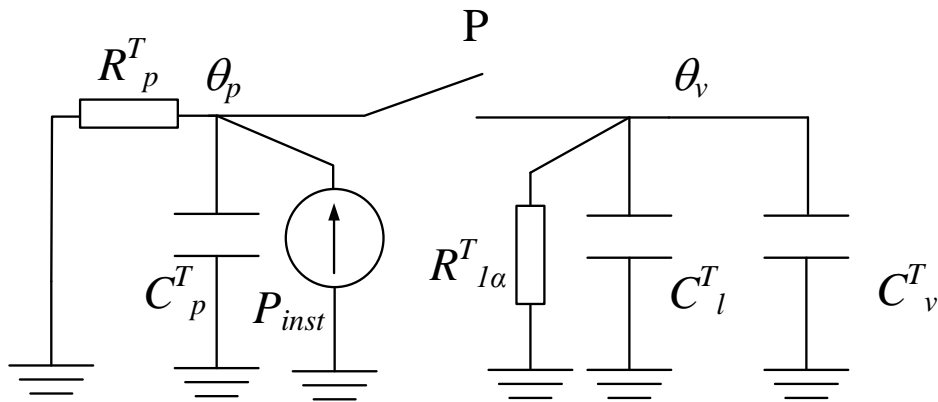
$$Resenje = \text{find}(Pt, ttp, thp, tcpn, U, I)$$

$$\text{Resenje} = \begin{pmatrix} 59.172 \\ 41.226 \\ 1.843 \\ 51.903 \\ 8.981 \\ 3.248 \end{pmatrix}$$



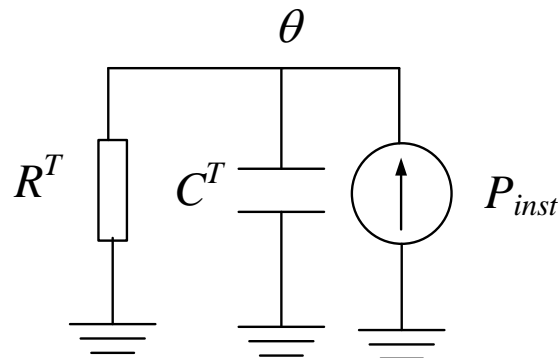
3. Задатак

Топлотна шема којом се моделује загревање приказана је на слици:



Слика 3.1

Након што се посуда са водом постави на грејну плочу, прекидач P се затвара, после чега се шема са слике 3.1 своди на



Слика 3.2

где је $R^T = 0,33 \text{ K/W}$ и $C^T = 5400 \text{ J/K}$.

Решавањем диференцијалне једначине којом се описује шема на слици 3.2 добија се познати израз за временску зависност температуре плоче, посуде и воде у односу на околину:

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-t/\tau} + \theta_\infty (1 - e^{-t/\tau}), \quad (3.1)$$

где је $\theta_\infty = P_{inst} R^T = 333,33 \text{ K}$ и $\tau = C^T R^T = 1800 \text{ s}$.

Вода, након што прокључа, полако почиње да испарава, при чему је њена температура константа. Са испаравањем воде, смањује се вредност укупног топлотног капацитета C^T . Када испари 30% воде, вредност топлотног капацитета је $C^T_{isp} = C^T_p + C^T_l + 0,7C^T_v = 4170 \text{ J/K}$. Након што се у посуду долије 0,3 l хладне воде ($C^T_{15^\circ\text{C}} = 0,3C^T_v = 1230 \text{ J/K}$), нова температура воде (као и рингле и посуде) је

$$\vartheta_0 = \frac{100^\circ\text{C} \cdot C^T_{isp} + 15^\circ\text{C} \cdot C^T_{15^\circ\text{C}}}{C^T} = 80,64^\circ\text{C}, \quad (3.2)$$

односно почетни пораст температуре за загревање које следи је $\theta_0 = 80,64 - 20 = 60,64 \text{ K}$.

На основу једначине (3.1) могуће је одредити време загревања воде од θ_0 до кључања ($\theta = 80 \text{ K}$)

$$t = \tau \cdot \ln \frac{\theta_0 - \theta_\infty}{\theta - \theta_\infty} = 1800 \text{ s} \cdot \ln \frac{60,64 \text{ K} - 333,33 \text{ K}}{80 \text{ K} - 333,33 \text{ K}} = 132,56 \text{ s} \quad (3.2)$$

4. Задатак

Дубина продирања електромагнетног поља, при учестаности $f_1 = 50 \text{ Hz}$, износи

$$\delta_1 = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot (57 \cdot 10^6) \cdot (4\pi \cdot 10^7) \cdot 50}} = 9,43 \text{ mm}, \quad (4.1)$$

а при учестаности $f_2 = 3 \text{ kHz}$

$$\delta_2 = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot (57 \cdot 10^6) \cdot (4\pi \cdot 10^7) \cdot 3000}} = 1,22 \text{ mm}. \quad (4.2)$$

а) Вредности фактора који фигуришу у изразима за активну и реактивну снагу одређују се на основу дијаграма датог у тексту задатака. При учестаности 50 Hz вредност независно променљиве за коју се одређују вредности фактора износи

$$\frac{r\sqrt{2}}{\delta_1} = \frac{47}{2} \sqrt{2} = 3,52, \quad (4.3)$$

а при учестаности 3 kHz

$$\frac{r\sqrt{2}}{\delta_2} = \frac{47}{2} \sqrt{2} = 27,24. \quad (4.4)$$

За случај 50 Hz са дијаграма су очитане вредности $\psi_{11} = 0,757$ и $\psi_{21} = 1,026$, а при учестаности 3 kHz вредности $\psi_{12} = 1$ и $\psi_{22} = 1$. Однос активних снага, при загревању учестаношћу 3 kHz (P_{s02}) и 50 Hz (P_{s01}), одређен је изразом

$$\frac{P_{s02}}{P_{s01}} = \frac{\frac{H_0^2}{2\sigma\delta_2} \psi_{12} \left(\frac{r\sqrt{2}}{\delta_2}\right)}{\frac{H_0^2}{2\sigma\delta_1} \psi_{11} \left(\frac{r\sqrt{2}}{\delta_1}\right)} = \frac{\psi_{12} \left(\frac{r\sqrt{2}}{\delta_2}\right) \delta_1}{\psi_{11} \left(\frac{r\sqrt{2}}{\delta_1}\right) \delta_2} = 10,21. \quad (4.5)$$

Однос реактивних снага, при загревању учестаношћу 3 kHz (Q_{s02}) и 50 Hz (Q_{s01}), одређен је изразом

$$\frac{Q_{s02}}{Q_{s01}} = \frac{\frac{H_0^2}{2\sigma\delta_2} \psi_{22} \left(\frac{r\sqrt{2}}{\delta_2}\right)}{\frac{H_0^2}{2\sigma\delta_1} \psi_{21} \left(\frac{r\sqrt{2}}{\delta_1}\right)} = \frac{\psi_{22} \left(\frac{r\sqrt{2}}{\delta_2}\right) \delta_1}{\psi_{21} \left(\frac{r\sqrt{2}}{\delta_1}\right) \delta_2} = 7,534. \quad (4.6)$$

б) Вредност независно променљиве за коју се одређују вредности фактора, при учестаности 50 Hz износи

$$\frac{r\sqrt{2}}{\delta_1} = \frac{100}{2} \sqrt{2} = 7,5, \quad (4.7)$$

а при учестаности 3 kHz

$$\frac{r\sqrt{2}}{\delta_2} = \frac{100}{2} \sqrt{2} = 57,96. \quad (4.8)$$

За случај 50 Hz са дијаграма су очитане вредности $\psi_{11} = 0,9526$ и $\psi_{21} = 1,007$, а при учестаности 3 kHz вредности $\psi_{12} = 1$ и $\psi_{22} = 1$. Однос активних снага, при загревању учестаношћу 3 kHz (P_{s02}) и 50 Hz (P_{s01}), одређен је изразом

$$\frac{P_{s02}}{P_{s01}} = \frac{\psi_{12} \left(\frac{r\sqrt{2}}{\delta_2} \right) \delta_1}{\psi_{11} \left(\frac{r\sqrt{2}}{\delta_1} \right) \delta_2} = 8,114. \quad (4.9)$$

Однос реактивних снага, при загревању учестаношћу 3 kHz (P_{s02}) и 50 Hz (P_{s01}), одређен је изразом

$$\frac{Q_{s02}}{Q_{s01}} = \frac{\psi_{22} \left(\frac{r\sqrt{2}}{\delta_2} \right) \delta_1}{\psi_{21} \left(\frac{r\sqrt{2}}{\delta_1} \right) \delta_2} = 7,676. \quad (4.6)$$

5. Задатак

Материјали са предавања „ТРЕ09_Casovi_19do22“ слајд 35.



ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Катедра за енергетске претвараче и погоне

Испит из предмета Термички процеси у електроенергетици (19Е014ТПЕ)

Максимално трајање 180 минута

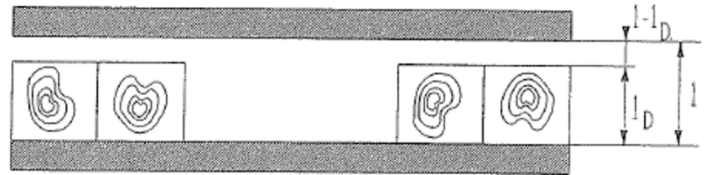
01. 07. 2024.

Предметни наставник: Проф. др Зоран Радаковић

1. Посматра се проводника од бакра површине попречног пресека 95 mm^2 и максималне дозвољене температуре изолације 180°C . Кратак спој на проводнику настаје при номиналном оптерећењу (температура 100°C). Познате су карактеристике бакра: $c_{Cu} = 385 \text{ J}/(\text{kg}^\circ\text{C})$, $\rho_{Cu} = 8933 \text{ kg}/\text{m}^3$, специфична електрична проводност на 20°C $\sigma_{20 \text{ Cu}} = 56 \cdot 10^6 \text{ S}/\text{m}$ и коефицијент линеарног пораста специфичне електричне отпорности са температуром $\alpha_{Cu20} = 4,29 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Одредити температуру изолације проводника која се достиже у тренутку искључења кратког споја у случају да је заштита реаговала након $1,2\text{s}$ при струји од $I_{ks2} = 7600 \text{ A}$. При прорачуну сматрати да је термички процес по настанку кратког споја адијабатски. При прорачуну снаге генерисања топлоте узети у обзир температурну промену електричне проводности; може се сматрати да струја током кратког споја има константну вредност. (2п)

2. На једну округлу електроотпорну грејну плочу пречника $D = 0,1 \text{ m}$, инсталисане електричне снаге P_{inst} , топлотног капацитета $C_p^T = 1200 \text{ J}/\text{K}$ и топлотног отпора преносу топлоте провођењем кроз ослонац, према околина, $R_p^T = 0,5 \text{ K}/\text{W}$, постављена је посуда у којој се загрева $0,5$ литара воде. Прелаз топлоте провођењем са плоче на посуду, истог пречника и равног дна, је добар ($R_{\lambda}^T \approx 0$), а такође се може занемарити и топлотни отпор преласку топлоте струјањем са посуде на воду ($R_{2a}^T \approx 0$). Топлотни капацитет посуде износи $C_v^T = 100 \text{ J}/\text{K}$, а топлотни отпор преносу топлоте струјањем са посуде на околни ваздух $R_{1a}^T = 1 \text{ K}/\text{W}$. Специфични запремински топлотни капацитет воде износи $c_v = 4100 \text{ kJ}/\text{m}^3\text{K}$. Нацртати дијаграм промене снаге грејне плоче P_{inst} од времена потребног да вода почетне температуре 20°C прокључа (дијаграм нацртати на основу 5 еквидистантних времена кључања $1 - 5$ минута). Почетна температура посуде једнака је температури воде, односно температури амбијента од 20°C . (2п)

3. Електротермички уређај за диелектрично загревање користи се за сушење 20 хрстових гредица димензије $0,05 \text{ m} \times 0,05 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, сложених у једна слој на електропроводну плочу димензија $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ (слика). На почетку сушења дрво садржи око 40% влаге. Статичка релативна пермитивност и тангенс угла губитака мокрог дрвета износе $\epsilon_{r,m} = 55$ и $\text{tg } \delta_{e,m} = 0,4$. Ове вредности опадају са смањењем влажности. На крају процеса сушења, када проценат влаге опадне на свега неколико процената, оне износе $\epsilon_{r,s} = 3$ и $\text{tg } \delta_{e,m} = 0,05$. Изнад слоја гредица, на растојању $0,06 \text{ m}$ од доње плоче, налази се друга електропроводна плоча истих димензија. Те две плоче су електроде једног плочастог кондензатора. Претварач учестаности, из кога се напаја овај кондензатор, генерише променљив излани напон у опсегу $3000\text{-}6000 \text{ V}$, учестаности 50 Hz . Израчунати снагу загревања на почетку процеса сушења, када је напон 6000 V и на крају процеса, када је напон 3000 V . Изрази за израчунавање запреминске густине активне снаге загревања је $p = \omega \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \text{tg } \delta \cdot E^2$ (2п)



4. Колики износе максимални степен искоришћења и максимална корисна снага електричног лука, према еквивалентном линеарном колу, за који су познати подаци из огледа кратког споја: струја $I_{ks} = 15 \text{ A}$ и снага $P_{ks} = 600 \text{ W}$, при напону $U_{ks} = 220 \text{ V}$? Познато је да је минимална струја горења лука $I_g = 6,5 \text{ A}$. Користити тривијалну представу електричног лука преко променљивог електричног отпора. Мрежа са елементима за прикључење на њу се може еквивалентирати редном везом отпорности и индуктивности, односно може се занемарити струја празног хода трансформатора. (2п)

5. Навести предности и мане индукционог електроотпорног загревања у односу на електроотпорно загревање са директном галванском везом са извором електричне енергије. (2п)

1. Задатак

Пошто се термички процес по настанку кратког споја сматра адијабатским, занемарује се снага којом се топлота размењује са околином у току кратког споја и сматра да се целокупна топлотна енергија генерисана у том периоду акумулира у проводнику. Оваква претпоставка је при проверама загревања у току кратког споја на страни сигурности тј. стварно загревање проводника у току кратког споја је мало мање од тако израчунатог.

Снага којом се топлотна енергија акумулира у бакру једнака је снази којом се топлота генерише услед Џулових губитака.

$$P_{gen} = P_{akum} \quad (1.1)$$

Подужна снага којом се топлотна енергија генерише у проводнику дата је изразом

$$P_{gen} = \frac{1}{\sigma_{Cu20}} (1 + \alpha_{Cu20}(\vartheta_{Cu} - 20^\circ\text{C})) \frac{I_{ks}^2}{S_{Cu}} \quad (1.2)$$

Подужна снага којом се енергија акумулише у проводнику дата је изразом

$$P_{akum} = C_{Cu}^T \frac{d\vartheta_{Cu}}{dt} \quad (1.3)$$

Подужни топлотни капацитет проводника је једнак

$$C_{Cu}^T = \rho_{Cu} S_{Cu} c_{pCu} = 326,724 \frac{J}{mK} \quad (1.4)$$

Из претходник израза се добија диференцијална једначина која описује промену температуре бакарног проводника. То је уједно и температура најтоплијих тачака изолације (унутрашња површ изолације, уз сам проводник).

$$C_{Cu}^T \frac{d\vartheta_{Cu}}{dt} = \frac{1}{\sigma_{Cu20}} (1 + \alpha_{Cu20}(\vartheta_{Cu} - 20^\circ\text{C})) \frac{I_{ks}^2}{S_{Cu}} \quad (1.5)$$

$$\frac{d\vartheta_{Cu}}{(1 + \alpha_{Cu20}(\vartheta_{Cu} - 20^\circ\text{C}))} = \frac{1}{C_{Cu}^T \sigma_{Cu20} S_{Cu}} I_{ks}^2 dt \quad (1.6)$$

Решавањем диференцијалне једначине добија се температура проводника у тренутку прекида струје кратког споја (ϑ_p):

$$\int_{\vartheta_{Cu}=100^\circ\text{C}}^{\vartheta_p} \frac{d\vartheta_{Cu}}{(1 + \alpha_{Cu20}(\vartheta_{Cu} - 20))} = \int_{t=0}^{t_{ks}} \frac{1}{C_{Cu}^T \sigma_{Cu20} S_{Cu}} I_{ks}^2 dt = \frac{1}{C_{Cu}^T \sigma_{Cu20} S_{Cu}} I_{ks}^2 t_{ks} \quad (1.7)$$

$$\frac{1}{\alpha_{Cu20}} \ln \frac{1 + \alpha_{Cu20}(\vartheta_p - 20^\circ\text{C})}{1 + \alpha_{Cu20}(100^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})} = \frac{I_{ks}^2 t_{ks}}{C_{Cu}^T \sigma_{Cu20} S_{Cu}} \quad (1.8)$$

$$\ln \frac{1 + \alpha_{Cu20}(\vartheta_p - 20^\circ\text{C})}{1 + \alpha_{Cu20}(100^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})} = \frac{\alpha_{Cu20} I_{ks}^2 t_{ks}}{C_{Cu}^T \sigma_{Cu20} S_{Cu}} \quad (1.9)$$

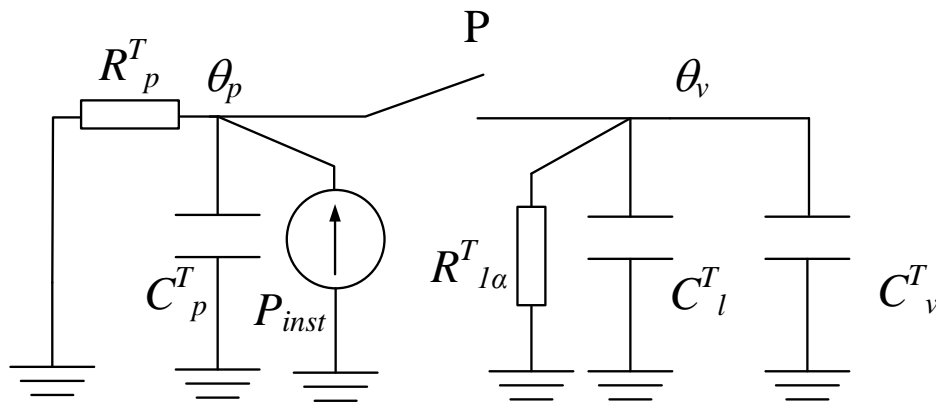
$$\frac{1 + \alpha_{Cu20}(\vartheta_p - 20^\circ\text{C})}{1 + \alpha_{Cu20}(100^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})} = e^{\frac{\alpha_{Cu20} I_{ks}^2 t_{ks}}{C_{Cu}^T \sigma_{Cu20} S_{Cu}}} \quad (1.10)$$

$$1 + \alpha_{Cu20}(\vartheta_p - 20^\circ\text{C}) = (1 + \alpha_{Cu20} \cdot 80^\circ\text{C}) e^{\frac{\alpha_{Cu20} I_{ks}^2 t_{ks}}{C_{Cu}^T \sigma_{Cu20} S_{Cu}}} \quad (1.11)$$

$$\vartheta_p = 20^\circ\text{C} + \frac{(1 + \alpha_{Cu20} \cdot 80^\circ\text{C}) e^{\frac{\alpha_{Cu20} I_{ks}^2 t_{ks}}{C_{Cu}^T \sigma_{Cu20} S_{Cu}}} - 1}{\alpha_{Cu20}} = 158,42^\circ\text{C} \quad (1.12)$$

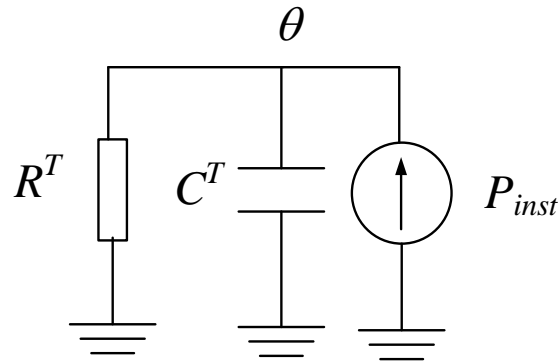
2. Задатак

Топлотна шема којом се моделује загревање приказана је на слици:



Слика 2.1

Након што се посуда са водом постави на грејну плочу, прекидач P се затвара, после чега се шема са слике 2.1 своди на



Слика 2.2

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 2.2 добија се познати израз за временску зависност температуре плоче, посуде и воде у односу на околину (детаљно извођење дато у задатку 2 из материјала са рачунских вежби за други колоквијум):

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-t/\tau} + \theta_\infty (1 - e^{-t/\tau}), \quad (2.1)$$

где је $\theta_\infty = P_{inst} R^T$ и $\tau = C^T R^T$.

Процес загревања почиње при температури воде, шерпе и грејне плоче једнакој температури амбијента тј. $\theta_0 = 0$, а завршава се кључањем воде $\theta = 80 \text{ K}$. Из једначине (2.1) може се изразити пораст температуре у стационарном стању:

$$\theta_\infty = \frac{\theta}{1 - e^{-t/\tau}}, \quad (2.2)$$

Односно важи:

$$P_{inst} R^T = \frac{\theta}{1 - e^{-t/\tau}}, \quad (2.3)$$

$$P_{inst} = \frac{\theta}{(1 - e^{-t/\tau}) R^T}, \quad (2.4)$$

Заменом времена загревања добијају се одговарајуће снаге загревања:

$$P_{inst,1 \text{ min}} = \frac{80 \text{ K}}{(1 - e^{-60s/1116,67s}) \cdot 0,33} = 4587,74 \text{ W}, \quad (2.5)$$

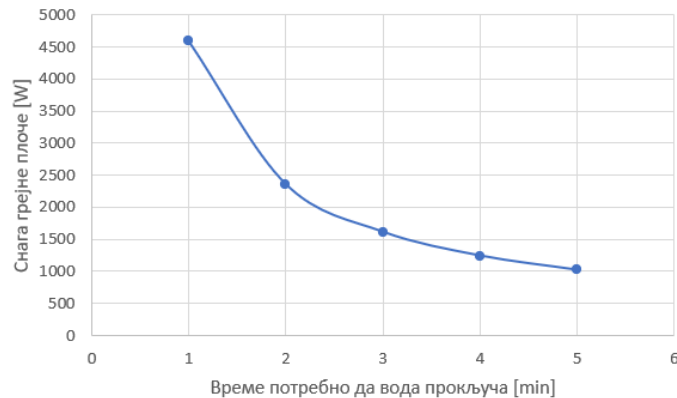
$$P_{inst,2 \text{ min}} = \frac{80 \text{ K}}{(1 - e^{-120s/1116,67s}) \cdot 0,33} = 2355,48 \text{ W}, \quad (2.6)$$

$$P_{inst,3 \text{ min}} = \frac{80 \text{ K}}{(1 - e^{-180s/1116,67s}) \cdot 0,33} = 1612,11 \text{ W}, \quad (2.7)$$

$$P_{inst,4 \text{ min}} = \frac{80 \text{ K}}{(1 - e^{-240s/1116,67s}) \cdot 0,33} = 1240,96 \text{ W}, \quad (2.8)$$

$$P_{inst,5 \text{ min}} = \frac{80 \text{ K}}{(1 - e^{-300s/1116,67s}) \cdot 0,33} = 1018,70 \text{ W}, \quad (2.9)$$

Дијаграм зависности снаге грејне плоче од времена потребног да вода прокључа са почетне температуре 20°C приказан је на слици 2.3.

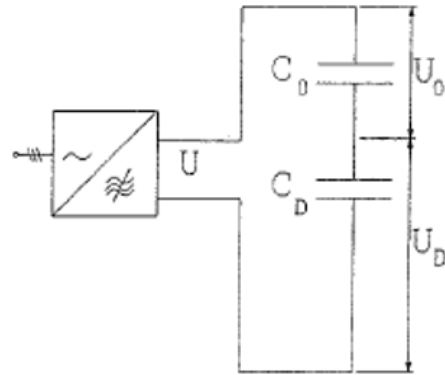


Слика 2.3

3. Задатак

Да би се одредиле снаге загревања на почетку и на крају процеса сушења, потребно је израчунати одговарајуће вредности електричног поља у дрвету. Јачина електричног поља у дрвету, одређена помоћу упрошћене еквивалентне шеме (слика 3.1), може се израчунати помоћу израза:

$$E_D = \frac{U}{l_D + \varepsilon_r(l - l_D)}. \quad (3.1)$$



Слика 3.1

Слој од 20 дрвених гредица димензије 5 cm x 5 cm и дужине 1 m у потпуности покрива површ електропроводне плоче (1 m x 1 m). Ако се у израз (3.1) уврсте бројне вредности ($l = 0,06$ m, $l_D = 0,05$ m) добија се вредност јачине поља:

- На почетку сушења ($\varepsilon_{r,m} = 55$, $U = 6000$ V): $E_D = 10$ kV/m,
- На крају сушења ($\varepsilon_{r,s} = 3$, $U = 3000$ V): $E_D = 37,5$ kV/m.

Запреминска густина снаге загревања се израчунава према изразу

$$p = \omega \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot E_D^2. \quad (3.2)$$

Заменом бројних вредности добијају се одговарајуће запреминске густине снаге:

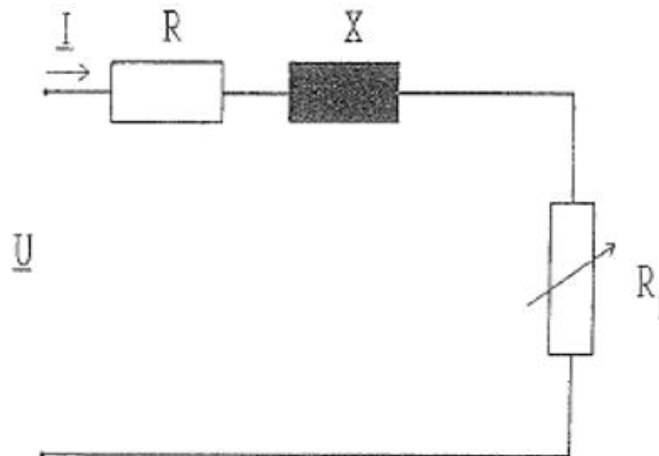
- На почетку сушења $p_m = 6,12 \cdot 10^4$ W/m³,
- На крају сушења $p_s = 0,59 \cdot 10^4$ W/m³.

Укупна снага загревања у запремини дрвета $V = 0,05 \cdot 0,05 \cdot 1 \cdot 20 = 0,05$ m³ износи:

- На почетку сушења $P_m = 3,05$ kW,
- На крају сушења $P_s = 0,295$ kW.

4. Задатак

Еквивалентна шема лука приказана је на слици 4.1.



Слика 4.1

Степен искоришћења лука одређује се као

$$\eta = \frac{P_k}{P}, \quad (4.1)$$

где P_k корисна снага електричног лука, која се израчунава као

$$P_k = R_l I^2, \quad (4.2)$$

а P укупна активна снага, која се израчунава као

$$P = (R + R_l) I^2. \quad (4.3)$$

Уврштавањем израза (4.2) и (4.3) у (4.1) добија се

$$\eta = \frac{R_l I^2}{(R + R_l) I^2} = \frac{1}{1 + \frac{R}{R_l}}. \quad (4.4)$$

Струја лука одређује се као

$$I = \frac{U}{\sqrt{(R + R_l)^2 + X^2}}. \quad (4.5)$$

Заменом (4.5) у (4.2) добија се

$$P_k = \frac{U^2 R_l}{(R + R_l)^2 + X^2}. \quad (4.6)$$

Функција степена искоришћења лука од отпора $\eta(R_l)$ је растућа, па се њен максимум достиже за максималну вредност независно променљиве R_l . Максимална вредност отпора лука ($R_{l,max}$), која се има при највећем растојању између електрода лука, се одређује на основу познате минималне струје горења лука. Веза између минималне струје горења лука и максималног отпора лука, према изразу (4.5) је

$$I_g = \frac{U}{\sqrt{(R + R_{l,max})^2 + X^2}}. \quad (4.7)$$

Из претходног израза се добија максимална вредност отпора лука, изражена преко минималне струје горења лука:

$$R_{l,max} = \sqrt{\left(\frac{U}{I_g}\right)^2 - X^2} - R. \quad (4.8)$$

Импеданса Z , односно отпор R и реактанса X електричног кола од врхова електрода до места прикључка на крут напон се одређују на основу података из огледа кратког споја (када се сматра да је мрежа круга):

$$Z = \frac{U}{I_{ks}} = 14,67 \Omega, \quad (4.9)$$

$$R = \frac{P_{ks}}{I_{ks}^2} = 2,67 \Omega, \quad (4.10)$$

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} = 14,42 \Omega. \quad (4.11)$$

Заменом бројних вредности у израз (4.8) добија се максимална вредност отпора лука $R_{l,max} = 27,95 \Omega$. Па је максимални степен искоришћења лука $\eta_{max} = \eta(R_{l,max}) = 91,28\%$.

Максимум корисне снаге постиже се за вредност отпора лука која је једнака импеданси мреже ($R_l^* = Z$). Дакле, максимална корисна снага се одређује као

$$P_{k,max} = P_k(R_l = Z) = \frac{U^2 Z}{(R + Z)^2 + X^2} = 1396 W. \quad (4.12)$$

Степен искоришћења при максималној снази износи $\eta = \eta(R_l = Z) = 84,6\%$.

5. Задатак

Предавања, ТРЕ09_Casovi_19do22, први слајд



ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Катедра за енергетске претвараче и погоне

Испит из предмета Термички процеси у електроенергетици (19Е014ТПЕ)

Максимално трајање 180 минута

02. 09. 2024.

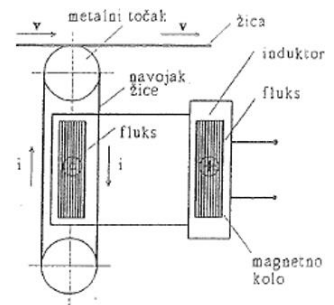
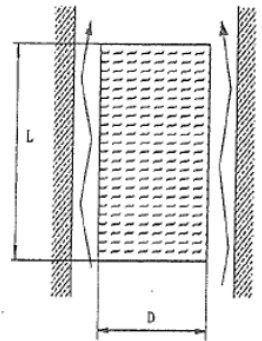
Предметни наставник: Проф. др Зоран Радаковић

1. Израчунати температуру најтоплије тачке намотаја сувог електроенергетског трансформатора, ако је познато да се она налази у 49. навојку (бројећи од унутрашњег навојка). Трансформатор се хлади ваздухом температуре 20°C , при чему коефицијент преласка топлоте струјањем са унутрашње стране површи на ваздух износи $\alpha_u = 6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, а са спољашње стране површи на ваздух износи $\alpha_s = 8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Висина намотаја је $H = 0,75 \text{ m}$, а унутрашњи пречник $D_u = 363 \text{ mm}$. Намотај је фолијског типа и има $N = 119$ навојака, сваки висине једнаке висини намотаја; дебљина изолације између навојака износи $\delta_i = 0,046 \text{ mm}$, специфична топлотна проводност изолације $\lambda_i = 0,15 \text{ W}/(\text{mK})$, ширина проводника (алуминијум) $\delta_{Al} = 0,2 \text{ mm}$. Губици у једном навојку износе $P_{\text{л}} = 10 \text{ W}$. При решавању задатка сматрати да је отпор преносу топлоте провођењем кроз слојеве изолације исти, односно израчунавати га као отпор провођењу топлоте кроз раван зид површине $(\pi (D_u + N \delta_{Al} + (N + 1) \delta_i)) H$ и дебљине δ_i . Отпоре преласку топлоте струјањем на унутрашњој и спољашњој површи намотаја рачунати на основу њихове стварне површине. Слој изолације постоји и на унутрашњој страни кроз унутрашњег навојка и на спољној страни кроз спољашњег навојка. Збир првих n чланова аритметичког реда (први елемент реда a_1 , разлика два суседна члана реда d) износи $n a_1 + (n(n - 1))/2 d$. (2п)

2. Потребно је поставити једножилни кабл од бакра (специфична електрична проводност на 20°C $\sigma_{20 \text{ Cu}} = 56 \cdot 10^6 \text{ S}/\text{m}$ и коефицијент линеарног пораста специфичне електричне отпорности са температуром $\alpha_{\text{Cu}20} = 4,29 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), са PVC изолацијом дебљине изолације $d_{iz} = 1 \text{ mm}$ (топлотне специфичне проводности $\lambda_i = 0,16 \text{ W}/(\text{mK})$). Максимална једносмерна струја кроз кабл је 300 A . Максимална дозвољена температура PVC изолације износи $\vartheta_{\text{доз}} = 70^{\circ}\text{C}$. Да ли је са становишта потребне количине бакра тј. попречног пресека, исплативије кабл поставити: а) директно у тло (специфична топлотна отпорност $\rho_z = 2,5 \text{ (mK)}/\text{W}$, као "удаљено референтно тло", температуре $\vartheta_z = 20^{\circ}\text{C}$, узети цилиндар пречника $D_{ref} = 1000 \text{ mm}$), или б) у ваздух, при чему се посматра критичан случај када је дан топао, сунчан и без ветра (коефицијент преласка топлоте струјањем са површине кабла на ваздух је $\alpha = 7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, температура амбијента $\vartheta_{a,d} = 40^{\circ}\text{C}$, кабл је на половини свог обим изложен сунчевом зрачењу површинске густине $q_s = 700 \text{ W}/\text{m}^2$, коефицијент сивоће кабла износи $\varepsilon = 0,8$). Одговор образложити помоћу одговарајућег прорачуна (није потребно решавати једначине). (2п)

3. У једну цев од светлог материјала слабе топлотне проводности, добро топлотно изоловану од околине, постављен је цилиндрични електроотпорни извор топлоте мањег пречника (слика). Снага овог извора топлоте је $P = 1000 \text{ W}$. Димензије цилиндра су $D = 0,15 \text{ m}$ и $L = 0,45 \text{ m}$. Кроз слободан простор између извора топлоте и зидова цеви струји ваздух протоком $Q = 0,02 \text{ m}^3/\text{s}$. Специфични запремински топлотни капацитет ваздуха је $c_v = 1040 \text{ J}/(\text{m}^3\text{K})$. Температура улазног ваздуха је $\vartheta_0 = 20^{\circ}\text{C}$. Сматрати да је коефицијент преласка топлоте струјањем са извора на ваздух константан и износи $\alpha_s = 20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Због мале топлотне проводности материјала од кога је сачињено тело грејача, може се сматрати да је површинска густина снаге којом се енергија предаје ваздуху константна по висини омотача цилиндра. Прелазак топлоте са базиса цилиндричног грејача се може занемарити. Одредити израз за расподелу температуре по омотачу грејача. Колико износи температура излазног ваздуха, а колико грејача на његовом почетку и крају. (2п)

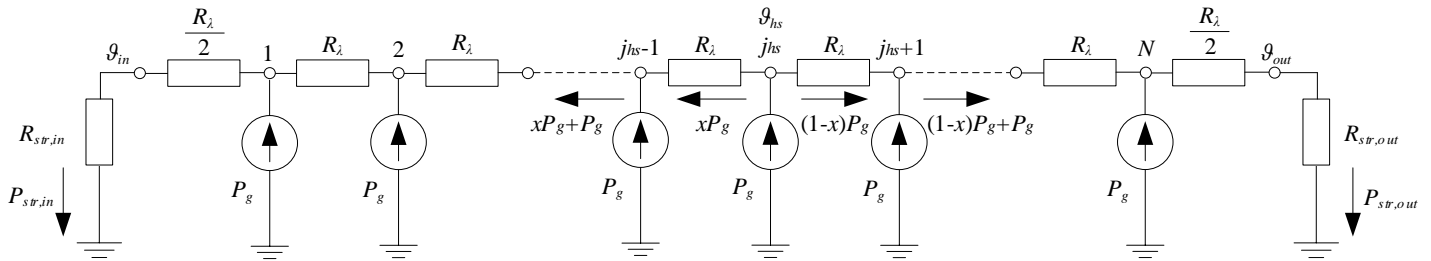
4. Загревање бакарних проводника пре наносења изолације врши се као на слици. Одредити јачину струје кроз проводник пресека $S_{\text{Cu}} = 2,5 \text{ mm}^2$, који се загрева од 7°C до 80°C . Брзина проводника је $v = 1 \text{ m}/\text{s}$. Дужина навојка у секундару је $L = 2 \text{ m}$. Одредити и број навојака у примару за прикључак на напон 230 V , 50 Hz . За бакар је познато: специфична топлотна проводност $\lambda_{\text{Cu}} = 900 \text{ W}/(\text{mK})$, специфични запремински топлотни капацитет $C_{\text{Cu}} = 3,46 \cdot 10^3 \text{ kJ}/(\text{m}^3\text{K})$ и специфична електрична проводност $\sigma_{\text{Cu}} = 57 \cdot 10^6 \text{ S}/\text{m}$. Може се сматрати да су ове величине константне у посматраном температурном опсегу. Сматрати да је загревање проводника адијабатско. (2п)



5. Навести предности и мане индукционог електроотпорног загревања у односу на електроотпорно загревање са директним галванском везом са извором електричне енергије. (2п)

1. Задатак

На слици 1.1 приказана је топлотна шема којом се моделује загревање сувог трансформатора.



Слика 1.1

Како услови хлађења спољашње и унутрашње површи намотаја нису симетрични, разликоваће се и снаге којима се топлота кроз ове површи струјањем предаје амбијенту:

$$P_{str,in} = xP_g + (j_{hs} - 1)P_g = (j_{hs} + x - 1)P_g, \quad (1.1)$$

$$P_{str,out} = (1 - x)P_g + (N - j_{hs})P_g = (N - j_{hs} - x + 1)P_g. \quad (1.2)$$

Површине површи потребне за израчунавање топлотних отпорности су:

$$S = \pi(D_u + N\delta_{Al} + (N + 1)\delta_i)H = 0,9244 \text{ m}^2, \quad (1.3)$$

$$S_{in} = \pi D_u H = 0,8553 \text{ m}^2, \quad (1.4)$$

$$S_{out} = \pi(D_u + 2N\delta_{Al} + 2(N + 1)\delta_i)H = 0,9935 \text{ m}^2. \quad (1.5)$$

Топлотни отпор преносу топлоте провођењем кроз слој изолације је:

$$R_\lambda = \frac{1}{\lambda} \frac{\delta_i}{S} = 3,3175 \cdot 10^{-4} \frac{K}{W}. \quad (1.6)$$

Топлотни отпор преносу топлоте струјањем са граничних површи намотаја је:

$$R_{str,in} = \frac{1}{\alpha_u S_{in}} = 0,1949 \frac{K}{W}, \quad (1.7)$$

$$R_{str,out} = \frac{1}{\alpha_s S_{out}} = 0,1258 \frac{K}{W}. \quad (1.8)$$

Температуре граничних површи једнаке су:

$$\vartheta_{in} = \vartheta_a + P_{str,in} \cdot R_{str,in}, \quad (1.9)$$

$$\vartheta_{out} = \vartheta_a + P_{str,out} \cdot R_{str,out}. \quad (1.10)$$

Сада је могуће написати изразе за температуру најтоплије тачке и то на два начина, крећући се од спољашње граничне површи ка најтоплијој тачки и крећући се од унутрашње граничне површи ка најтоплијој тачки:

$$\vartheta_{hs} = \vartheta_{in} + \sum_{j=1}^{j_{hs}} R_j P_j, \quad (1.11)$$

$$\vartheta_{hs} = \vartheta_{out} + \sum_{j=j_{hs}}^N R_j P_j. \quad (1.12)$$

Изједначавањем израза (1.11) и (1.12) уз уважавање израза (1.9) и (1.10) добијамо:

$$\vartheta_a + P_{str,in} \cdot R_{str,in} + \sum_{j=1}^{j_{hs}} R_j P_j = \vartheta_a + P_{str,out} \cdot R_{str,out} + \sum_{j=j_{hs}}^N R_j P_j, \quad (1.13)$$

$$P_{str,in} \cdot R_{str,in} - P_{str,out} \cdot R_{str,out} = \left[\sum_{j=j_{hs}}^N R_j P_j - \sum_{j=1}^{j_{hs}} R_j P_j \right], \quad (1.14)$$

$$\begin{aligned} & (j_{hs} + x - 1)P_\gamma \cdot R_{str,in} - (N - j_{hs} - x + 1)P_\gamma \cdot R_{str,out} \\ &= R_\lambda \left[\left[(1-x)P_\gamma + ((1-x)P_\gamma + P_\gamma) + ((1-x)P_\gamma + 2P_\gamma) + \dots + \frac{1}{2}((1-x)P_\gamma + (N - j_{hs})P_\gamma) \right] \right. \\ & \left. - \left[xP_\gamma + (xP_\gamma + P_\gamma) + (xP_\gamma + 2P_\gamma) + \dots + \frac{1}{2}(xP_\gamma + (j_{hs} - 1)P_\gamma) \right] \right], \end{aligned} \quad (1.15)$$

$$\begin{aligned} & (j_{hs} + x - 1)R_{str,in} - (N - j_{hs} - x + 1)R_{str,out} \\ &= R_\lambda \left[\left[(1-x) \left(N - j_{hs} + \frac{1}{2} \right) + \frac{(N - j_{hs} - 1)(N - j_{hs})}{2} + \frac{1}{2}(N - j_{hs}) \right] \right. \\ & \left. - \left[\left(j_{hs} - \frac{1}{2} \right) x + \frac{(j_{hs} - 2)(j_{hs} - 1)}{2} + \frac{1}{2}(j_{hs} - 1) \right] \right]. \end{aligned} \quad (1.16)$$

Заменом $j_{hs} = 49$ у једначину (1.16) и њеним решавањем добија се вредност $x = 0,085$.

Сада заменом ове вредности у изразе (1.9), (1.10) и (1.11) добијамо вредности температура граничних површи и најтоплије тачке:

$$\vartheta_{in} = 113,72^\circ\text{C} \quad (1.17)$$

$$\vartheta_{out} = 109,21^\circ\text{C} \quad (1.18)$$

$$\vartheta_{hs} = 117,55^\circ\text{C} \quad (1.19)$$

2. Задатак

Напомена: На испиту није било потребно решавати једначине, већ само поставити систем једначина.

У граничном случају, при дозвољеној једносмерној струји, температура бакарног проводника једнака је 70°C , па вредност подужне електричне отпорности бабра износи:

$$R_{Cu}^{70^\circ\text{C}} = \frac{1}{\sigma \cdot S} (1 + \alpha(70^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})) = \frac{4}{\sigma \cdot D_u^2 \pi} (1 + \alpha \cdot 50^\circ\text{C}) \quad (2.1)$$

где је D_u пречник бакарног проводника.

У стационарном топлотном стању сва топлота која настаје као последица Џулових губитака у бакарном проводнику одводи се у околину, преко PVC изолације (провођењем кроз околну земљу, односно струјањем ка околном ваздуху и зрачењем (кабл се у току дана додатно загрева услед сунчевог зрачења)).

Џулови губици једнаки су:

$$P_\gamma = R_{Cu}^{70^\circ\text{C}} \cdot I^2 \quad (2.2)$$

У случају када је кабл положен у земљу тј. када се топлота преноси само провођењем, једначина биланса снаге гласи

$$P_\gamma = \frac{\vartheta_{doz} - \vartheta_z}{R_{tot}^T} \quad (2.3)$$

$$R_{Cu}^{70^\circ\text{C}} \cdot I^2 = \frac{\vartheta_{doz} - \vartheta_z}{R_{tot}^T} \quad (2.4)$$

Укупна подужна топлотна отпорност провођењу се одређује као

$$R_{tot}^T = R_{iz}^T + R_z^T = \frac{1}{2\pi\lambda_i} \cdot \ln\left(\frac{D_u + 2\delta_{iz}}{D_u}\right) + \frac{1}{2\pi\lambda_z} \cdot \ln\left(\frac{D_{ref}}{D_u + 2\delta_{iz}}\right) \quad (2.5)$$

Заменом (2.1) и (2.5) у (2.4) добија се

$$\frac{4}{\sigma \cdot D_u^2 \pi} (1 + \alpha \cdot 50^\circ\text{C}) \cdot \left(\frac{1}{2\pi\lambda_i} \cdot \ln\left(\frac{D_u + 2\delta_{iz}}{D_u}\right) + \frac{1}{2\pi\lambda_z} \cdot \ln\left(\frac{D_{ref}}{D_u + 2\delta_{iz}}\right) \right) = \frac{\vartheta_{doz} - \vartheta_z}{I^2} \quad (2.6)$$

Решавањем једначине (2.6) добија се да је у случају полагања кабла у земљу потребан пречник проводника $D_u = 9,8 \text{ mm}$ тј. попречни пресек од $76,1 \text{ mm}^2$.

У случају када се кабл налази у ваздуху, топлота генерисана услед Џулових губитака се преноси прво провођењем кроз изолацију проводника, а након тога струјањем и зрачењем са површини проводника ка амбијенту.

Температуру површине изолације кабла могуће је одредити из једначине

$$P_\gamma = \frac{\vartheta_{doz} - \vartheta_p}{R_{iz}^T}. \quad (2.7)$$

Из једначина (2.7), након замене израза за топлотну отпорност изолације, добија се

$$\vartheta_p = \vartheta_{doz} - R_{Cu}^{70^\circ\text{C}} \cdot R_{iz}^T \cdot I^2. \quad (2.8)$$

Једначина биланса снага за случај кабла у ваздуху гласи:

$$P_\gamma + P_s = P_{zr} + P_{str}. \quad (2.9)$$

Снага додатног загревања кабла услед сунчевог зрачења једнака је

$$P_s = \varepsilon \sigma_c q_s \frac{(D_u + 2\delta_{iz})\pi}{2}. \quad (2.10)$$

Снага којом се топлота одводи зрачењем ка амбијенту је

$$P_{zr} = \varepsilon \sigma_c (D_u + 2\delta_{iz})\pi \left((\vartheta_p + 273.15)^4 - (\vartheta_a + 273.15)^4 \right). \quad (2.11)$$

Снага којом се топлота одводи струјањем ка амбијенту је

$$P_{str} = \alpha (D_u + 2\delta_{iz})\pi (\vartheta_p - \vartheta_a). \quad (2.12)$$

Заменом (2.2), (2.10), (2.11) и (2.12) у (4.9) добија се

$$R_{Cu}^{70^\circ\text{C}} \cdot I^2 + \varepsilon \sigma_c q_s \frac{(D_u + 2\delta_{iz})\pi}{2} = \sigma_c (D_u + 2\delta_{iz})\pi \left((\vartheta_p + 273.15)^4 - (\vartheta_a + 273.15)^4 \right) + \alpha (D_u + 2\delta_{iz})\pi (\vartheta_p - \vartheta_a) \quad (2.13)$$

Заменом (2.1) и (2.8) у (2.13) добија се коначна једначина чијим се решавањем може одредити тражени пречник проводника

$$\begin{aligned} \frac{4}{\sigma D_u^2 \pi} (1 + \alpha \cdot 50^\circ\text{C}) \cdot I^2 + \varepsilon \sigma_c q_s \frac{(D_u + 2\delta_{iz})\pi}{2} \\ = \sigma_c (D_u + 2\delta_{iz})\pi \left(\left(\vartheta_{doz} - \frac{4}{\sigma D_u^2 \pi} (1 + \alpha \cdot 50^\circ\text{C}) \cdot \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln\left(\frac{D_u + 2\delta_{iz}}{D_u}\right) \cdot I^2 + 273.15 \right)^4 - (\vartheta_a + 273.15)^4 \right) \\ + \alpha (D_u + 2\delta_{iz})\pi \left(\vartheta_{doz} - \frac{4}{\sigma D_u^2 \pi} (1 + \alpha \cdot 50^\circ\text{C}) \cdot \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln\left(\frac{D_u + 2\delta_{iz}}{D_u}\right) \cdot I^2 - \vartheta_a \right) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Решавањем једначине (2.14) добија се тражени пречник бакра $D_u = 11,4 \text{ mm}$ тј. попречни пресек од $102,5 \text{ mm}^2$. Дакле, полагањем проводника у тло остварује се уштеда од $34,7\%$ у количини употребљеног бакра.

3. Задатак

Усвојене апроксимације: занемарена је размена топлоте зрачењем између извора топлоте и спољашње цеви; температура ваздуха по попречном пресеку је константна.

За део цилиндричног пресека дужине dx , на растојању x од базиса цилиндричног грејача на који долази хладан ваздух, може се написати једначина енергетског биланса:

$$q_s \cdot D\pi \cdot dx = c_v \cdot Q \cdot d\vartheta_v, \quad (3.1)$$

где је q_s константна површинска густина снаге која се преноси струјањем са површи грејача на ваздух, која износи

$$q_s = \frac{P}{D\pi \cdot L} = 4,72 \frac{kW}{m^2}. \quad (3.2)$$

Решење једначине (3.1), за гранични услов $\vartheta_v(x=0) = \vartheta_0$ гласи

$$\vartheta_v(x) = \vartheta_0 + \frac{q_s D \pi}{c_v Q} x, \quad (3.3)$$

односно, за растојање x израчунато у метрима:

$$\vartheta_v(x) = 20 + 106,9x \text{ [}^\circ\text{C]}, \quad (3.4)$$

Температура ваздуха на крају грејача износи $\vartheta_{v,kr}(x=L) = 68,1^\circ\text{C}$.

Температура површи грејача се одређује из закона преласка топлоте струјањем и услова да је површинска густина снаге која се одводи са омотача грејача константа:

$$\alpha (\vartheta_{gr}(x) - \vartheta_v(x)) = q_s, \quad (3.5)$$

$$\vartheta_{gr}(x) = \vartheta_v(x) + \frac{q_s}{\alpha}, \quad (3.6)$$

$$\vartheta_{gr}(x) = 256 + 106,9x \text{ [}^\circ\text{C]}. \quad (3.7)$$

Температура на почетку грејача једнака је $\vartheta_{gr,poc}(x=0) = 256^\circ\text{C}$, а на крају $\vartheta_{gr,kr}(x=L) = 304,1^\circ\text{C}$.

4. Задатак

Снага акумулације топлоте у проводнику је

$$P_{akum} = \frac{VC_{Cu}\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{S_{Cu}v\Delta t C_{Cu}\Delta\theta}{\Delta t} = S_{Cu}vC_{Cu}\Delta\theta \quad (4.1)$$

Пошто се процес загревања може посматрати као адијабатски, једначина биланса снага своди се на једнакост снаге акумулисања (3.10) и снаге Џулових губитака у проводнику:

$$\frac{1}{\sigma_{Cu}} \frac{L}{S_{Cu}} I^2 = S_{Cu}vC_{Cu}\Delta\theta \quad (4.2)$$

Сада је могуће одредити струју кроз бакарни проводник

$$I = \sqrt{S_{Cu}vC_{Cu}\Delta\theta \frac{\sigma_{Cu}S_{Cu}}{L}} = 212,11 \text{ A} \quad (4.3)$$

Напон на секундару, који чини један навојак у кратком споју, је

$$U = RI = \sqrt{vC_{Cu}\Delta\theta \frac{L}{\sigma_{Cu}}} = 2,98 \text{ V} \quad (4.4)$$

па је број навојака на примару $N = 230/2,98 \approx 77$.

5. Задатак

Предавања, TPE09_Casovi_19do22, први слајд