ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Катедра за енергетске претвараче и погоне

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

Колоквијум траје максимално 150 минута 9. 1. 2017.
Предметни наставник: Проф. др Зоран Радаковић

1. Написати температурну диференцијалну једначину за ребро за које су познати сви конструктивни подаци и карактеристике материјала ребра, за два случаја: а) да се ребро хлади принудним струјањем ваздуха, када се коефицијент преласка топлоте не мења дуж ребра и износи α_f и б) да се ребро хлади природним струјањем ваздуха, када је коефицијент преласка топлоте дуж ребра променљив: $\alpha_n = C_n(\vartheta - \vartheta_a)^n$, где је ϑ температура на позицији x дуж ребра, а ϑ_a температура амбијента (ваздуха). (2 п)
Који је додатни разлог (поред опадања температуре) да у случају природног хлађења површинска густина снаге преноса топлоте струјањем по омотачу ребра опада дуж ребра за хлађење? (1п)

2. Полазећи од познатог дијаграма расподеле температуре уља по висини трансформатора са ODAF хлађењем када се он хлади помоћу 5 хладњака (укључене пумпе и вентилатори на 5 хладњака, када <u>укупни проток уља</u> износи 150 m^3/h), нацртати дијаграм расподеле температура уља када се укључи још један (шести) хладњак (са својим пумпама и вентилаторима). Сматрати да су губици при радном режиму са 5 и са 6 хладњака исти. Усвојити следеће апроксимације и претпоставке: а) да при раду 5 хладњака од укупног притиска који произведе пумпа 80 % "отпадне" на пад притиска у хладњаку, а 20 % на пад притиска у активном делу трансформатора, б) да пад притиска на хладњаку и пад притиска у активном делу трансформатора расту линеарно са порастом протока, при чему се константе пропорционалности пада притиска разликују, в) да је снага преноса топлоте преко хладњака при константном протоку сразмерна порасту средње температуре уља у односу на амбијент, г) да се физичке карактеристике уља занемарљиво мало мењају у радном режиму хлађења са 5 и са 6 хладњака. Зависност произведеног притиска пумпе (у Pa) у функцији протока уља у m^3/h (Q) гласи $p_p = 530.2 - 0.903 \cdot Q - 0.1895Q^2 - 0.00071164Q^3$. (4 п)

3. Колико износи дозвољено струјно оптерећење трофазног самоносивог кабловског снопа (СКС), пресека електропроводног дела фазног проводника 50 mm^2, подужног отпора на 90 °C r_m = 0.365 Ω/km, који се налази у ваздуху температуре ϑ_a = 24 °C, брзине струјања (брзина ветра) v_v = 1 m/s, изложен је дејству зрачења сунца, укупне површинске густине снаге зрачења q_s = 600 W/m^2? Може се сматрати да је спољашња површ СКС преко које се топлота размењује са околином круг пречника D = 58 mm, а коефицијент сивоће ε = 0.8. Параметри ваздуха: $\lambda = 0.02424 + 7.208 \cdot 10^{-5}\vartheta_a$, $\upsilon = 1.337 \cdot 10^{-5} + 8.641 \cdot 10^{-8}\vartheta_a + 1.071 \cdot 10^{-10}\vartheta_a^2$, $\beta = 0.003628 - 9.866 \cdot 10^{-6}\vartheta_a$, $c_p = 1007 + 2\,(\vartheta_a + 273 - 300)/50$, $\varrho = 1.292 \cdot 273.2\,/(273.2 + \vartheta_a)$, $a = \lambda\,/\,(\varrho\, c_p)$, $Pr = \upsilon/a$.
Коефицијент преласка топлоте принудним струјањем са хоризонталног цилиндра на ваздух се може израчунати из израза $Nu_D = 0.3 + \left(\left(0.62 \cdot Re_D^{1/2} Pr^{1/3}\right)/(1 + (0.4/Pr)^{2/3})^{1/4}\right)\left(1 + (Re_D/282000)^{5/8}\right)^{4/5}$, где је *Reynolds*-ов број једнак $Re_D = (V \cdot D)/\upsilon$
Параметри ваздуха се одређују за средњу вредност температуре површи и ваздуха, за коју се приближно може сматрати да има константну вредност од 24 °C.
Усвојити апроксимацију да је читава спољна површ СКС изложена дејству сунчаног зрачења. У прорачуну уважити и размену топлоте зрачењем између спољне површи СКС и амбијента.
Вредност струје при којој се при стандардним условима (температура ваздуха 40°C, температура проводника (дефинисана класом изолације) 90°C, температуре спољне површи СКС 80°C, брзина ветра V = 0 m/s, зрачење Сунца 900 W/m^2) износи 176A.
Подаци преузети из техничке препоруке Електродистрибуције: вредност струје при којој се при стандардним условима (температура ваздуха 40°C, температура проводника (дефинисана класом изолације) 90°C, температуре спољне површи СКС 80°C, брзина ветра V = 0 m/s, зрачење Сунца 900 W/m^2) износи 176A. Из наведених података из техничке препоруке одредити отпор преносу топлоте провођењем кроз слој изолације. (4 п)

Решења задатака:

<u>1. задатак</u>

<u>2. задатак</u>

Порасти температура уља у односу на амбијент при раду 5 хладњака:

горње уље - θ_{gu5}, средње уље - θ_{su5}, доње уље - θ_{du5}

Снага губитака у трансформатору: P_g

Снага хлађења по једном хладњаку када ради 5 хладњака: Ph = Pg / 5

Снага хлађења по једном хладњаку када ради 6 хладњака: Ph = Pg / 6

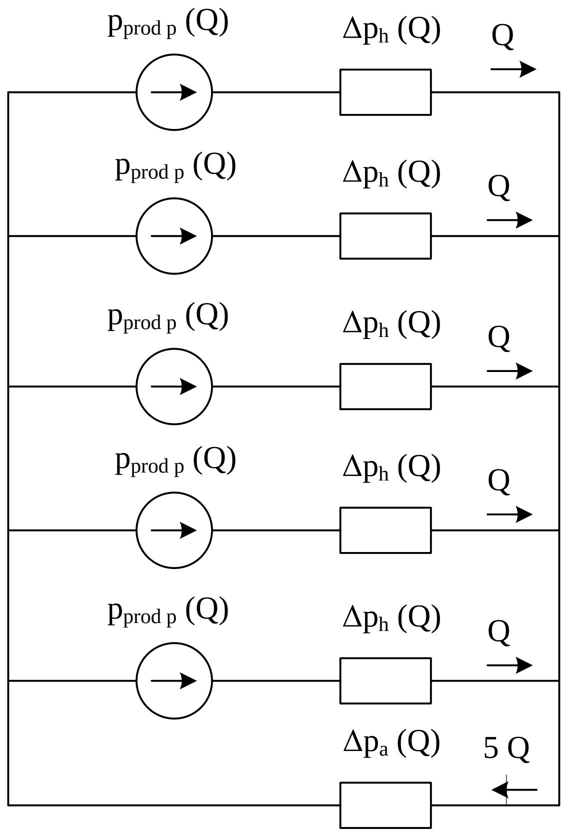
$\theta_{su5} = c \cdot Pg / 5 \Rightarrow c = \theta_{su5} / (Pg / 5)$

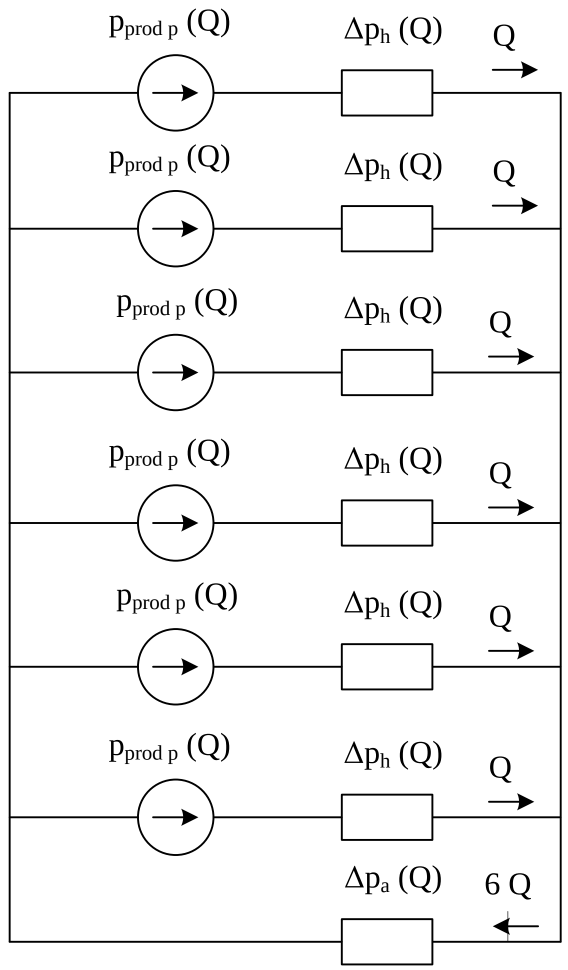
$\theta_{su6} = c \cdot Pg / 6 = (\theta_{su5} / (Pg / 5)) \cdot (Pg / 6) = 5 / 6\ \theta_{su5}$

$\theta_{gu6} = \theta_{su6} + \Delta\theta_{u6} / 2$

$\theta_{du6} = \theta_{su6} - \Delta\theta_{u6} / 2$

$\Delta\theta_{u6} = ?$





$$P\_Pumpa(Q) := 530.2 - 0.903Q - 0.1895Q \cdot Q - 0.00071164Q \cdot Q \cdot Q$$

$$P\_Pumpa\left(\frac{150}{5}\right) = 313.346$$

$$dP\_Hladnjak\_ref := 0.8 P\_Pumpa\left(\frac{150}{5}\right)$$

$$dP\_AktivniDeo\_ref := 0.2 P\_Pumpa\left(\frac{150}{5}\right)$$

$$C\_dP\_Hladnjak := \frac{dP\_Hladnjak\_ref}{\frac{150}{5}}$$

$$C\_dP\_AktivniDeo := \frac{dP\_AktivniDeo\_ref}{150}$$

$Qh\_6p := 1000$ Poč etna vrednost

Given

$$P\_Pumpa(Qh\_6p) = C\_dP\_Hladnjak \cdot Qh\_6p + C\_dP\_AktivniDeo \cdot 6 \cdot Qh\_6p$$

$$pom := Find(Qh\_6p)$$

$$Qh\_6 := pom$$

$Qh\_6 = 29.497$ Protok kroz svaku od 6 pumpi

$Ph = \rho\ Q\ c_p\ \Delta\theta_u$

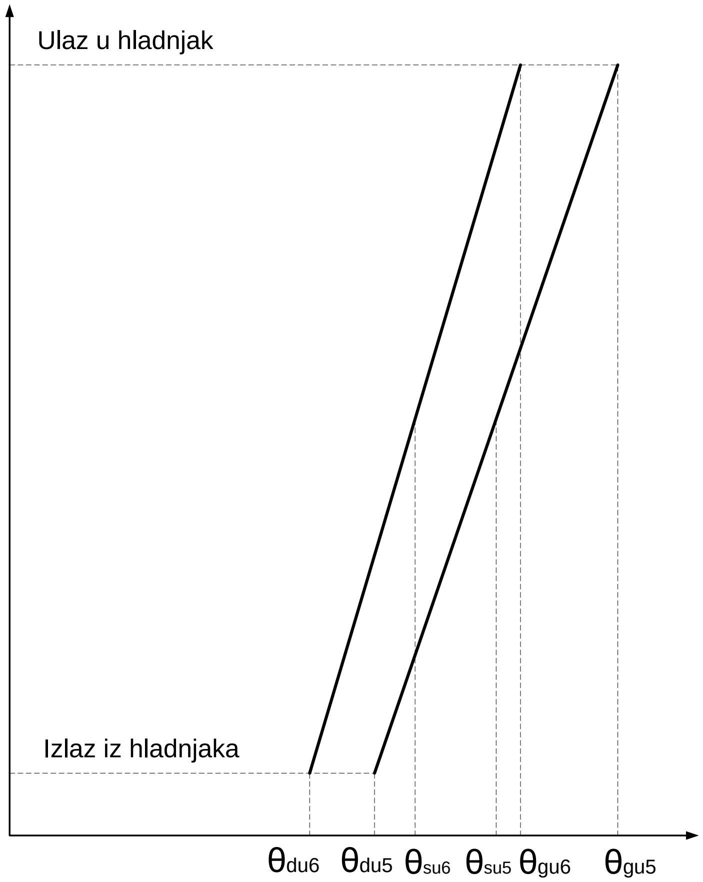
Ради 5 хладњака: $Pg / 5 = \rho\ Q_{h5}\ c_p\ \Delta\theta_{u5}$

Ради 6 хладњака: $Pg / 6 = \rho\ Q_{h6}\ c_p\ \Delta\theta_{u6}$

$\Delta\theta_{u6} = (5 / 6)\ (Q_{h5} / Q_{h6})\ \Delta\theta_{u5} = (5 / 6)\ (30 / 29.5)\ \Delta\theta_{u5} = 0.847\ \Delta\theta_{u5} = 0.847\ (\theta_{gu5} - \theta_{du5})$

$\theta_{gu6} = (5 / 6\ (\theta_{gu5} + \theta_{du5}) / 2) + (0.847\ (\theta_{gu5} - \theta_{du5})) / 2$

$\theta_{du6} = (5 / 6\ (\theta_{gu5} + \theta_{du5}) / 2) - (0.847\ (\theta_{gu5} - \theta_{du5})) / 2$


Ulaz u hladnjak
Izlaz iz hladnjaka
θ_{du6} θ_{du5} θ_{su6} θ_{su5} θ_{gu6} θ_{gu5}

3.Задатак

Одређивање отпора провођењу топлоте кроз изолацију на основу вредности температура проводника и спољашње површи СКС-а које су дате у Техничкој препоруци 8 б.

Познате вредности $\upsilon p := 90$ $\upsilon spks := 80$ $Is := 176$ $rm := 0.00036$

$$R\lambda := \frac{(\upsilon p - \upsilon spks)}{rm\cdot(Is)^2} = 0.884$$

Одређивање коефицијента преласка топлоте код принудног струјања, за услове дате у задатку

Познате вредности $Vv := 1$ $Dspk := 0.05$ $\upsilon a := 24$

Параметри ваздуха

$$\lambda(x) := 0.02424 + 7.208\cdot10^{-5}\cdot x$$

$$\nu(x) := 1.337\cdot10^{-5} + 8.641\cdot10^{-8}\cdot x + 1.071\cdot10^{-10}\cdot x^2$$

$$\beta(x) := 0.003628 - 9.866\cdot10^{-6}\cdot x$$

$$cp(x) := 1007 + 2\cdot\frac{(x + 273 - 300)}{50}$$

$$\rho(x) := 1.292\cdot\frac{273.2}{(273.2 + x)}$$

$$a(x) := \frac{\lambda(x)}{cp(x)\cdot\rho(x)}$$

$$Pr(x) := \frac{\nu(x)}{a(x)}$$

Reynolds-ов број

$$ReF(x) := Vv\cdot\frac{Dspk}{\nu(x)}$$

Nusselt-ов број

$$NuF(x) := 0.3 + \left[\frac{\left(0.62 \cdot ReF(x)^{\frac{1}{2}} \cdot Pr(x)^{\frac{1}{3}}\right)}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr(x)}\right)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}} \right] \cdot \left[1 + \left(\frac{ReF(x)}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}}$$

$$\alpha F(x) := NuF(x) \cdot \frac{\lambda(x)}{Dspk}$$

$$\alpha F(\upsilon a) = 14.175$$

Коефицијент преласка топлоте код принудног струјања се одређује на основу параметара ваздуха добијених за температуру ваздуха од 24 степена Целзијусове скале.

Одређивање површине СКС-а на којој се врши размена топлоте

Познате вредности $Dspk = 0.058$ $Su := 1.1 \cdot 16 \cdot 10^{-6}$

Вредност површине попречног пресека носећег ужета је коригована због слоја изолације за 10%

$$S\_spoljasnjeg\_omotaca := \pi \cdot Dspk = 0.182$$

$$Dp := \frac{\frac{Dspk}{2}}{\left(\frac{\sqrt{3}}{3}\right) + 0.5}$$

Пречник једног проводника са изолацијом (добијен из једнакостраничног троугла странице Dp)

$$Du := \sqrt{\frac{4 \cdot Su}{\pi}}$$

Пречник носећег ужета са изолацијом

$$\gamma := \frac{180}{\pi} \cdot acos\left(\frac{Dp}{Dp + Du}\right)$$

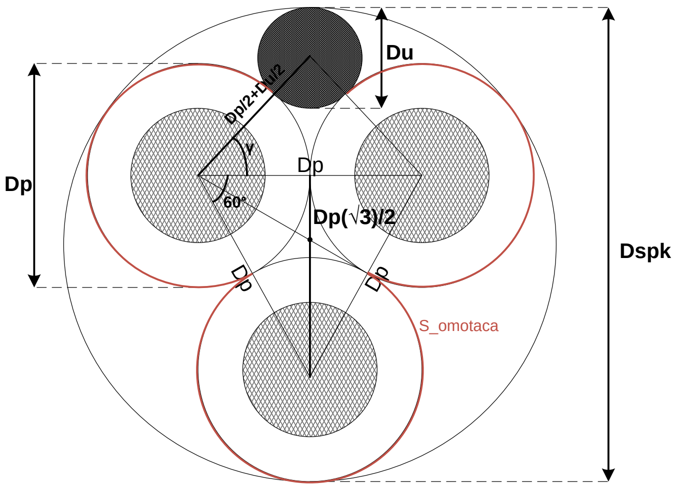
Угао који носеће уже затвара за размену топлоте са околином

$$\gamma = 31.74$$

$$S\_omotaca := \frac{3\cdot 360 - 3\cdot 60 - 2\cdot\gamma}{3\cdot 360}\cdot 3\cdot\pi\cdot Dp$$

Површина СКС-а на којој се размењује топлота

$$S\_omotaca = 0.197$$



Слика 3.1-Попречни пресек СКС-а

Одређивање температуре спољашње површине СКС-а и дозвољеног струјног оптерећења проводника из система једначина

Познате вредности $qs := 600$ $\sigma := 5.67\cdot 10^{-8}$ $\varepsilon spk := 0.8$

Почетне вредности непознатих величина $\upsilon k := 70$ $I := 200$

Решавање система две једначине

Given

(1) Једначина биланса снага, при чему се СКС хлади струјањем и зрачењем, а повећању температуре спољашње површи СКС-а доприносе губици у проводнику и снага зрачења сунца

$$(\upsilon k - \upsilon a)\cdot\alpha F(\upsilon a)\cdot S\_omotaca + \varepsilon spk\cdot\sigma\cdot S\_omotaca\left[(\upsilon k + 273.16)^4 - (\upsilon a + 273.16)^4\right] = 3\cdot rm\cdot I^2 + \frac{S\_omotaca}{2}\cdot\varepsilon spk\cdot qs$$

(2) Снага провођења топлоте од проводника кроз изолацију до спољашње површи СКС-а

$$rm \cdot I^2 = \frac{(\upsilon p - \upsilon k)}{R\lambda}$$

$$prom := Find(\upsilon k, I)$$

$$prom = \begin{pmatrix} 61.11 \\ 299.146 \end{pmatrix}$$

Решење система једначина $\upsilon k := prom_0 = 61.11$ $I := prom_1 = 299.146$

Провера вредности температуре спољашње површи СКС-а наведене у препоруци Електродистрибуције за референтну дату тачку (стандардне амбијенталне услове)

Познате вредности $\upsilon as := 40$ $qss := 900$ $ge := 9.81$

Одређивање коефицијента преласка топлоте код природног струјања

Rayleigh-ев број

$$RaN(x) := \frac{ge \cdot \beta\left(\frac{x + \upsilon as}{2}\right) \cdot (x - \upsilon as) \cdot Dspk^3}{\nu\left(\frac{x + \upsilon as}{2}\right) \cdot a\left(\frac{x + \upsilon as}{2}\right)}$$

Nusselt-ов број

$$NuN(x) := \left[0.6 + \frac{0.387 \cdot RaN(x)^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.559}{Pr\left(\frac{x + \upsilon as}{2}\right)}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{8}{27}}} \right]^2$$

$$\alpha N(x) := NuN(x)\cdot\frac{\lambda\left(\frac{x+\upsilon as}{2}\right)}{Dspk}$$

Коефицијент преласка топлоте код природног струјања се одређује са параметрима ваздуха за средњу вредност температуре површи и ваздуха.

Решавање система две једначине

Почетне вредности непознатих величина $\upsilon k := 80$ $I := 176$

Given

(1) Једначина биланса снага, при чему се СКС хлади струјањем и зрачењем, а повећању температуре спољашње површи СКС-а доприносе губици у проводнику и снага зрачења сунца

$$(\upsilon k - \upsilon as)\cdot\alpha N(\upsilon k)\cdot S\_omotaca + \varepsilon spk\cdot\sigma\cdot S\_omotaca\left[(\upsilon k + 273.16)^4 - (\upsilon as + 273.16)^4\right] = 3\cdot rm\cdot I^2 + \frac{S\_omotaca}{2}\cdot\varepsilon spk\cdot qss$$

(2) Снага провођења топлоте од проводника кроз изолацију до спољашње површи СКС-а

$$rm\cdot I^2 = \frac{(\upsilon p - \upsilon k)}{R\lambda}$$

$$prom := Find(\upsilon k, I)$$

$$prom = \begin{pmatrix} 81.006 \\ 166.912 \end{pmatrix}$$

Решење система једначина $\upsilon k := prom_0 = 81.006$ $I := prom_1 = 166.912$

При максимално дозвољеној температури проводника од 90°C, одступање струје од стандардом дате вредности (176 A) је -9.088 A, док је одступање температуре спољашње површи СКС-а 1.006 степени.

ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Катедра за енергетске претвараче и погоне

Испит из предмета Термички процеси у електроенергетици

Испит траје максимално 180 минута 9. 1. 2017.
Предметни наставник: Проф. др Зоран Радаковић

1. Једна коцка познатих димензија, направљена од хомогеног материјала познатих топлотних карактеристика, загрева се равномерно по запремини познатом запреминском густином снаге (q_v). Десна вертикална површ је идеално изолована од околине. Коефицијенти преласка топлоте струјањем са горње површи (α_g), доње површи (α_d) и остале три вертикалне површи (α_z) на околни флуид температуре ϑ_f су познати. Запремина је подељена на 11^3 делова, насталих поделом коцке по свакој од оса на 11 делова (9 идентичних делова и 2 дела уз граничне површи чија је ширина једнака половини осталих 9 делова). Написати једначину по експлицитној методи коначних елемената за део коцке који се налази у угаоном елементу (тачка 11, 1, 1) – суседни делови овом делу су: по x оси, (10, 1, 1), по y оси (11, 2, 1) и по z оси (11, 1, 2). Једначину написати за нестационарни топлотни процес. Тачке које репрезентују делове усвојити тако да буду еквидистантне, при чему се прва и последња (11-та) тачка по свакој од оса налазе на граничним површима. Једначину није потребно сређивати у смислу увођења Fourier-овог и Biot-овог број (2 п)

2. Написати температурну диференцијалну једначину за ребро за које су познати сви конструктивни подаци и карактеристике материјала ребра, за два случаја: а) да се ребро хлади принудним струјањем ваздуха, када се коефицијент преласка топлоте не мења дуж ребра и износи α_f и б) да се ребро хлади природним струјањем ваздуха, када је коефицијент преласка топлоте дуж ребра променљив: $\alpha_n = C_n(\vartheta - \vartheta_a)^n$, где је ϑ температура на позицији x дуж ребра, а ϑ_a температура амбијента (ваздуха). (2 п)

3. Полазећи од познатог дијаграма расподеле температуре уља по висини трансформатора са ODAF хлађењем када се он хлади помоћу 5 хладњака (укључене пумпе и вентилатори на 5 хладњака, када укупни проток уља износи 150 m^3/h), нацртати дијаграм расподеле температура уља када се укључи још један (шести) хладњак (са својим пумпама и вентилаторима). Сматрати да су губици при радном режиму са 5 и са 6 хладњака исти. Усвојити следеће апроксимације и претпоставке: а) да при раду 5 хладњака од укупног притиска који произведе пумпа 80 % "отпадне" на пад притиска у хладњаку, а 20 % на пад притиска у активном делу трансформатора, б) да пад притиска на хладњаку и пад притиска у активном делу трансформатора расту линеарно са порастом протока, при чему се константе пропорционалности пада притиска разликују, в) да је снага преноса топлоте преко хладњака при константном протоку сразмерна порасту средње температуре уља у односу на амбијент, г) да се физичке карактеристике уља занемарљиво мало мењају у радном режиму хлађења са 5 и са 6 хладњака. Зависност произведеног притиска пумпе (у Pa) у функцији протока уља у m^3/h (Q) гласи $p_p = 530.2 - 0.903 \cdot Q - 0.1895Q^2 - 0.00071164Q^3$. (3 п)

4. Колико износи дозвољено струјно оптерећење трофазног самоносивог кабловског снопа (СКС), пресека електропроводног дела фазног проводника 50 mm^2, подужног отпора на 90 °C r_m = 0.365 Ω/km, који се налази у ваздуху температуре ϑ_a = 24 °C, брзине струјања (брзина ветра) v_v = 1 m/s, изложен је дејству зрачења сунца, укупне површинске густине снаге зрачења q_s = 600 W/m^2? Коефицијент сивоће спољашње површи СКС износи ε = 0.8. При одређивању коефицијента преласка топлоте струјањем се може сматрати да је спољашња површ СКС омотач цилиндра пречника D = 58 mm. Пресек носећег ужета СКС износи 16 mm^2, увећан 10 % због постојања изолације. Параметри ваздуха: $\lambda = 0.02424 + 7.208 \cdot 10^{-5}\vartheta_a$, $\upsilon = 1.337 \cdot 10^{-5} + 8.641 \cdot 10^{-8}\vartheta_a + 1.071 \cdot 10^{-10}\vartheta_a^2$, $\beta = 0.003628 - 9.866 \cdot 10^{-6}\vartheta_a$, $c_p = 1007 + 2\,(\vartheta_a + 273 - 300)/50$, $\varrho = 1.292 \cdot 273.2/(273.2 + \vartheta_a)$, $a = \lambda/(\varrho\, c_p)$, $Pr = \upsilon/a$.

Коефицијент преласка топлоте принудним струјањем са хоризонталног цилиндра на ваздух се може израчунати из израза $Nu_D = 0.3 + \left(\left(0.62 \cdot Re_D^{1/2} Pr^{1/3}\right)/\left(1 + (0.4/Pr)^{2/3}\right)^{1/4}\right)\left(1 + (Re_D/282000)^{5/8}\right)^{4/5}$, где је *Reynolds*-ов број једнак $Re_D = (V \cdot D)/\upsilon$

Параметри ваздуха се одређују за средњу вредност температуре површи и ваздуха, за коју се приближно може сматрати да има константну вредност од 24 °C.

Усвојити апроксимацију да је читава спољна површ СКС изложена дејству сунчаног зрачења. У прорачуну уважити и размену топлоте зрачењем између спољне површи СКС и амбијента.

Вредност струје при којој се при стандардним условима (температура ваздуха 40°C, температура проводника (дефинисана класом изолације) 90°C, температуре спољне површи СКС 80°C, брзина ветра V = 0 m/s, зрачење Сунца 900 W/m^2) износи 176A.

Подаци преузети из техничке препоруке Електродистрибуције: вредност струје при којој се при стандардним условима (температура ваздуха 40°C, температура проводника (дефинисана класом изолације) 90°C, температуре спољне површи СКС 80°C, брзина ветра V = 0 m/s, зрачење Сунца 900 W/m^2) износи 176A. Из наведених података из техничке препоруке одредити отпор преносу топлоте провођењем кроз слој изолације. (3 п)

Решења задатака:

1. задатак

Једначина по методи коначних елемената за посматрани елемент изводи се из једначине биланса снага за тај елемент, која гласи:

$$P_{gen} = P_{akum} + P_{prenosa}$$

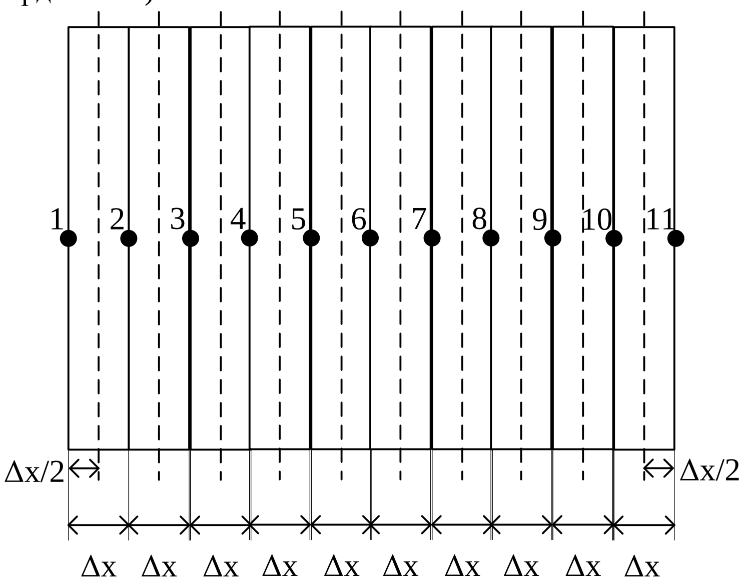
P_{gen} - снага којом се топлотна енергија генерише у посматраном елементу
P_{akum} – снага којом се топлотна енергија акумулише у посматраном елементу
$P_{prenosa}$ – снага којом се топлотна енергија преноси од посматраног елемента ка околини

Снага којом се топлотна енергија преноси од посматраног елемента ка околини једнака је суми снага којима се енергија преноси ка сваком од суседних елемената коцке (P_{p1}- P_{p3}); десна страна коцке је идеално топлотно изолована, према њој нема преноса топлоте, због чега се топлота између посматраног дела коцке и амбијенталног ваздуха размењује преко доње и предње површи (P_{sd}- P_{sp}):

$$P_{prenosa} = P_{p1} + P_{p2} + P_{p3} + P_{sd} + P_{sp}$$

$i = 11, j = 1, k = 1$

Подела топлопроводне и дефинисања тачака у којима се израчунавају температуре (приказ на поделу по координати x):



Снаге којима се топлотна енергија преноси ка суседном делу са истим y и z координатама:

$$P_{p1} = \frac{\vartheta^p_{i,j,k} - \vartheta^p_{i-1,j,k}}{\dfrac{1}{\lambda}\dfrac{\Delta x}{(\Delta y/2)(\Delta z/2)}}$$

Снаге којима се топлотна енергија преноси ка суседном делу са истим x и z координатама:

$$P_{p2} = \frac{\vartheta^p_{i,j,k} - \vartheta^p_{i,j+1,k}}{\dfrac{1}{\lambda}\dfrac{\Delta y}{(\Delta x/2)(\Delta z/2)}}$$

Снаге којима се топлотна енергија преноси ка суседном делу са истим x и y координатама:

$$P_{p3} = \frac{\vartheta^p_{i,j,k} - \vartheta^p_{i,j,k+1}}{\dfrac{1}{\lambda}\dfrac{\Delta z}{(\Delta x/2)(\Delta y/2)}}$$

Снаге којима се топлотна енергија преноси ка околном флуиду преко доње стране коцке:

$$P_{sd} = \alpha_d \frac{\Delta x}{2}\frac{\Delta y}{2}\left(\vartheta^p_{i,j,k} - \vartheta_f\right)$$

Снаге којима се топлотна енергија преноси ка околном флуиду преко предње стране коцке:

$$P_{sp} = \alpha_z \frac{\Delta x}{2} \frac{\Delta z}{2} \left(\vartheta_{i,j,k}^{p} - \vartheta_f \right)$$

Снаге којима се топлота генерише (по услову задатка q_V=0) и акумулише у посматраном елементу износе:

$$P_{gen} = q_V \cdot V_{i,j,k} = q_V \cdot \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{\Delta y}{2} \cdot \frac{\Delta z}{2}$$

$$P_{akum} = C_{i,j,k}^{T} \cdot \frac{\partial \vartheta_{m,n}}{\partial t} \approx C_{i,j,k}^{T} \cdot \frac{\vartheta_{i,j,k}^{p+1} - \vartheta_{i,j,k}^{p}}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{\Delta y}{2} \cdot \frac{\Delta z}{2} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{\vartheta_{i,j,k}^{p+1} - \vartheta_{i,j,k}^{p}}{\Delta t}$$

3. задатак

Видети решење 2. задатка са колоквијума одржаног 9.01.2017.

4. задатак

Видети решење 3. задатка са колоквијума одржаног 9.01.2017.

ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Катедра за енергетске претвараче и погоне

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

Колоквијум траје максимално 150 минута 23. 1. 2017.
Предметни наставник: Проф. др Зоран Радаковић

1. Написати температурну диференцијалну једначину за ребро за које су познати површ попречног пресека и његов обим и карактеристике материјала ребра, које се хлади природним струјањем ваздуха, када је коефицијент преласка топлоте дуж ребра променљив: $\alpha_n = C_n(\vartheta - \vartheta_a)^n$, где је ϑ температура на позицији x дуж ребра, а ϑ_a температура амбијента (ваздуха). Уважити и компоненту хлађења ребра зрачењем, која се такође мења дуж ребра. (2.5 п)

2. Једна велика електроенергетска машина се хлади преко хладњака преко кога расхладно средство (флуид) којим се хладе делови машине предаје топлоту води, као спољашњем расхладном флуиду. Снага одвођења топлота са машине је константна (P_g), као и улазна температура расхладне воде (ϑ_{vu}). Написати скуп једначина који повезују проток флуида и проток воде, температуре флуида на уласку и на изласку из хладњака и температуре воде на изласку из хладњака. Написати и израз за коефицијент проласка топлоте кроз хладњак и навести који параметри у њему зависе од којих горе наведених протока и температура. Да ли се коефицијент проласка топлоте током времена мења у зависности од још неке појаве и како се та промена квантификује? (2.5п)

3. За један енергетски уљни трансформатор су познате следеће позиције (у односу на дно суда) и висине намотаја и хладњака: дно оба намотаја H_{dn}, дно хладњака H_{dh} ($H_{dh} > H_{dn}$), висина намотаја H_{n1} (<) H_{n2}, дужина (висина) хладњака H_h (>H_{n1}). Посматрају се два огледа загревања у кратком споју, оба са истим губицима у намотајима: ONAF и ODAF, при којима је проток уља кроз сваки од намотаја (Q_{n1}, Q_{n2}) и кроз хладњак (Q_h) у ODAF режиму 4 пута већи него у ONAF режиму. Познати су порасти температура уља по висини сваког од намотаја и хладњака ($\Delta\theta_{n1}$ = 24K, $\Delta\theta_{n2}$ = 21K и $\Delta\theta_h$ = 22K и пораст температуре доњег уља у односу на амбијент (θ_{du} = 30K) у ONAF режиму. Може се сматрати да су порасти температура уља по висини сваког од намотаја и хладњака сразмерни са губицима (у намотајима), односно снагом хлађења (у хладњаку) и обрнуто сразмерни са протоком кроз њих. Порасти средњих температура намотаја у односу на средње температуре уља у намотају у ONAF режиму износе: g_{n1} = 19K, g_{n2} = 20.5K, при чему је пад температуре услед провођења топлоте g_{np1} = 3K, g_{np2} = 6K. Коефицијент преласка топлоте струјањем са површи изолације на уље је сразмеран брзини струјања уља на степен 0.46. Фактори најтоплије тачке намотаја, дефинисани према температури уља у намотају, износе: у ONAF режиму H_{n1ON} = 1.2 и H_{n2ON} = 1.15, а у ODAF режиму H_{n1OD} = 1.18 и H_{n2OD} = 1.1. Нацртати дијаграме промене температуре уља и намотаја у оба огледа загревања. Снага хлађења је сразмерна разлици средње температуре уља у хладњаку и температуре амбијента. (3п)

4. Једножилни кабл пресека бакра (специфична електрична проводност на 20°C $\sigma_{20\,Cu}$ =56×10^{6} S/m и коефицијент линеарног пораста специфичне електричне отпорности са температуром α_{Cu20} =4.29×10^{-3}°C^{-1}) S_{Cu} = 95 mm^2, са PVC изолацијом дебљине изолације δ_{iz} = 1 mm (топлотне специфичне проводности λ_{PVC} = 0.16 W/(m K)) положена је у тло специфичне топлотне отпорности ρ_z=2.5 (m K)/W. Максимална дозвољена температура PVC изолације износи ϑ_{doz}=70°C, а температура земље удаљене од кабла ϑ_z=20°C. Одредити максимално дозвољену вредност једносмерне струје која протиче кроз кабл за два случаја: а) да је кабл положен директно у тло, б) да је постављен у кошуљицу сачињену од материјала специфичне топлотне отпорности ρ_{zk}=1 (m K)/W - сматрати да је спољашња површ кошуљице цилиндар ваљка пречника D_k=200 mm. При израчунавању сматрати да се као "удаљено референтну тло", на коме је температура једнака ϑ_z=20°C, може узети цилиндар ваљка пречника D_{ref}=1000 mm. (3п)

Решења задатака:

1. задатак

$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2} = \frac{O}{\lambda\, S}\left(C_n\,(\vartheta - \vartheta_a)^{n+1} + \varepsilon\,\sigma_c\,((\vartheta + 273)^4 - (\vartheta_a + 273)^4)\right)$$

S - површ попречног пресека

O - обим попречног пресека

ϑ - температура на позицији x од почетка ребра

2. задатак

3. задатак

' ONAF

" ODAF

$$\theta_{du}' = \vartheta_{du}' - \vartheta_a = 30K$$

$$\theta'_{gun1} = \theta'_{du} + \Delta\theta'_{n1} = 30K + 24K = 54K$$
$$\theta'_{gun2} = \theta'_{du} + \Delta\theta'_{n2} = 30K + 21K = 51K$$
$$\theta'_{guh} = \theta'_{du} + \Delta\theta'_{h} = 30K + 22K = 52K$$

$$\theta_{suh}' = \theta_{du}' + \frac{\Delta\theta_h'}{2} = 30K + \frac{22}{2} = 41K$$

Вредност пораста средње температуре уља у хладњаку остаје иста (иста је у ODAF и ONAF режиму).

$$\theta''_{suh} = \theta'_{suh} = 41\text{К}$$

$$\frac{\Delta\theta_{n1}''}{\Delta\theta_{n1}'} = \frac{\Delta\theta_{n2}''}{\Delta\theta_{n2}'} = \frac{\Delta\theta_{h}''}{\Delta\theta_{h}'} = \frac{Q'}{Q''} = \frac{1}{4}$$

$$\Delta\theta_{n1}'' = 6K$$

$$\Delta\theta_{n2}'' = 5.25K$$

$$\Delta\theta_{h}'' = 5.5K$$

$$\theta_{du}'' = \theta''_{suh} - \frac{\Delta\theta_h''}{2} = 41K - \frac{5.5\text{ К}}{2} = 38.25\text{ К}$$
$$\theta''_{gun1} = \theta''_{du} + \Delta\theta''_{n1} = 38.25K + 6K = 44.25K$$
$$\theta''_{gun2} = \theta''_{du} + \Delta\theta''_{n2} = 38.25K + 5.25K = 43.5K$$
$$\theta''_{guh} = \theta''_{du} + \Delta\theta''_{h} = 38.25K + 5.5K = 43.75K$$

$$g_{ns1}' = g_{n1}' - g_{np1}' = 19K - 3K = 16K$$
$$g_{ns2}' = g_2' - g_{np2}' = 20.5K - 6K = 14.5K$$

$$g_{ns1}'' = g_{ns1}'\left(\frac{\alpha_{n1}'}{\alpha_{n1}''}\right) = g_{ns1}'\left(\frac{Q_{n1}'}{Q_{n1}''}\right)^{0.46} = 16K\left(\frac{1}{4}\right)^{0.46} = 8.46K$$

$$g_{ns2}'' = g_{ns2}'\left(\frac{\alpha_{n2}'}{\alpha_{n2}''}\right) = g_{ns2}'\left(\frac{Q_{n2}'}{Q_{n2}''}\right)^{0.46} = 14.5K\left(\frac{1}{4}\right)^{0.46} = 7.66K$$

$$g_{n1}'' = g_{np1}'' + g_{ns1}'' = 8.46K + 3K = 11.46K$$

$$g_{n2}'' = g_{np2}'' + g_{ns2}'' = 7.66K + 6K = 13.66K$$

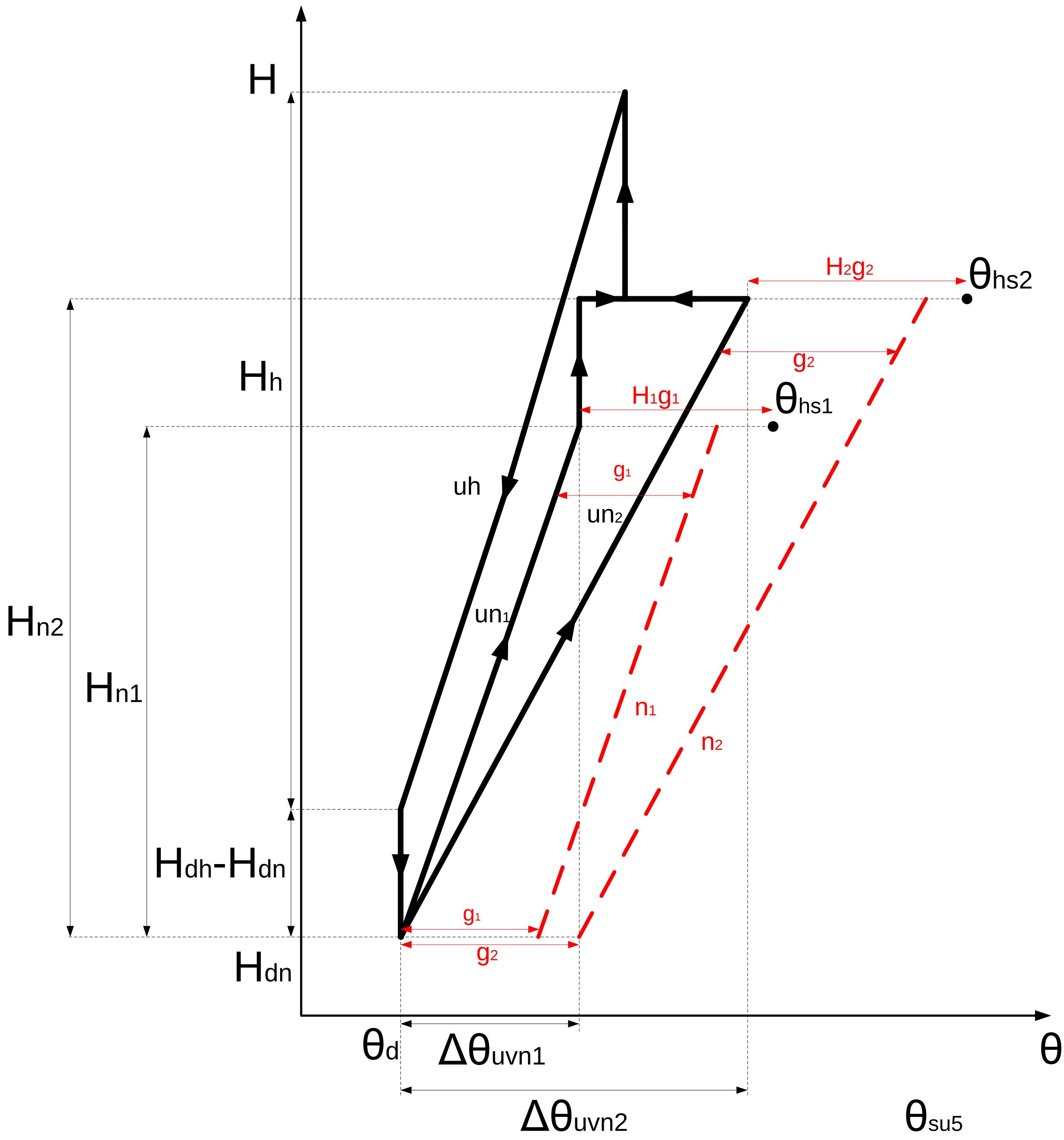
Порасти температура најтоплије тачке у односу на земпературу амбијента:

$$\theta'_{hs1} = \theta'_{gun1} + H_{n1ON}\ g'_{n1} = 54K + 1.2 \cdot 19K = 76.8K$$

$$\theta'_{hs2} = \theta'_{gun2} + H_{n2ON}\ g'_{n2} = 51K + 1.15 \cdot 20.5K = 74.58K$$

$$\theta''_{hs1} = \theta''_{gun1} + H_{n1OD}\ g''_{n1} = 44.25K + 1.18 \cdot 11.46K = 57.77K$$

$$\theta''_{hs2} = \theta''_{gun2} + H_{n2OD}\ g''_{n2} = 43.5K + 1.1 \cdot 13.66K = 58.53K$$



4. задатак

- Са кошуљицом:

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

- Без кошуљице:

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

λ_i Специфична топлотна проводност изолације кабла
λ_p Специфична топлотна проводност материјала постељице
λ_z Специфична топлотна проводност тла (земље)
D_p Пречник (еквивалентно по обиму) спољне површи постељице (за израчунавање за реалну геометрију, круг у правоугаонику, видети лабораторијску вежбу 3.).

$$D_u = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4\cdot 95}{\pi}} = 10.998mm \approx 11mm$$

$$D_s = D_u + 2\,\delta_{iz} = 11mm + 2mm = 13mm$$

- Са кошуљицом:

$$R_l^T = \frac{1}{2\cdot\pi\cdot 0.16\,{}^{W}\!/_{m\cdot K}}\cdot\ln\left(\frac{13mm}{11mm}\right)+\frac{1\,{}^{m\cdot K}\!/_{W}}{2\cdot\pi}\cdot\ln\left(\frac{200mm}{13mm}\right)+\frac{2.5\,{}^{m\cdot K}\!/_{W}}{2\cdot\pi}\cdot\ln\left(\frac{1000mm}{200mm}\right)=1.242\,{}^{K}\!/_{W}$$

- Без кошуљице:

$$R_l^T = \frac{1}{2\cdot\pi\cdot 0.16\,{}^{W}\!/_{m\cdot K}}\cdot\ln\left(\frac{13mm}{11mm}\right)+\frac{2.5\,{}^{m\cdot K}\!/_{W}}{2\cdot\pi}\cdot\ln\left(\frac{1000mm}{13mm}\right)=1.89\,{}^{K}\!/_{W}$$

$$R_{Cu} = \frac{1}{\sigma\cdot S}\left(1+\alpha\left(70-20\right)\right)=\frac{1}{56\cdot 95}\left(1+4.29\cdot 10^{-3}\,50\right)=2.28\cdot 10^{-4}\,\Omega m$$

$$R_{Cu}\,I^2 = \frac{\vartheta_{doz}-\vartheta_a}{R_l^T}$$

$$I = \sqrt{\frac{\vartheta_{doz}-\vartheta_a}{R_{Cu}\,R_l^T}}$$

- Са кошуљицом:

$$I = \sqrt{\frac{70-20}{2.28\cdot 10^{-4}\,\Omega m\;1.242\,{}^{K}\!/_{W}}} = 420.2A$$

- Без кошуљице:

$$I = \sqrt{\frac{70-20}{2.28\cdot 10^{-4}\,\Omega m\;1.89\,{}^{K}\!/_{W}}} = 340.6A$$

ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Катедра за енергетске претвараче и погоне

Испит из предмета Термички процеси у електроенергетици

Испит траје максимално 180 минута 23. 1. 2017.
Предметни наставник: Проф. др Зоран Радаковић

1. Написати температурну диференцијалну једначину за ребро за које су познати површ попречног пресека и његов обим и карактеристике материјала ребра, које се хлади природним струјањем ваздуха, када је коефицијент преласка топлоте дуж ребра променљив: $\alpha_n = C_n(\vartheta - \vartheta_a)^n$, где је ϑ температура на позицији x дуж ребра, а ϑ_a температура амбијента (ваздуха). Уважити и компоненту хлађења ребра зрачењем, која се такође мења дуж ребра. (2 п)

2. Написати израз у облику четвороструког интеграла из кога се може одредити фактор виђења правоугаоника 2 са правоугаоника 1. Координате темена правоугаоника 1 су: [0,0,0], [0.2,0,0], [0,0.1,0], [0.2,0.1,0]. Координате темена правоугаоника 2 су: [0.5,0.4,1], [0.7,0.4,1], [0.5,0.5,1], [0.7,0.5,1]. Поставити границе интеграла. Израз под интегралом треба да садржи само променљиве по којима се врши интеграција. (2 п)

3. Написати општу температурну једначину у правоугаоном координатном систему за случај хомогене нелинеарне топлопроводне средине и стационарног топлотног стања. (2 п)

4. Једна велика електроенергетска машина се хлади преко хладњака преко кога расхладно средство (флуид) којим се хладе делови машине предаје топлоту води, као спољашњем расхладном флуиду. Снага одвођења топлота са машине је константна (P_g), као и улазна температура расхладне воде (ϑ_{vu}). Написати скуп једначина који повезују проток флуида и проток воде, температуре флуида на уласку и на изласку из хладњака и температуре воде на изласку из хладњака. Написати и израз за коефицијент проласка топлоте кроз хладњак и навести који параметри у њему зависе од којих горе наведених протока и температура. Да ли се коефицијент проласка топлоте током времена мења у зависности од још неке појаве и како се та промена квантификује? (2п)

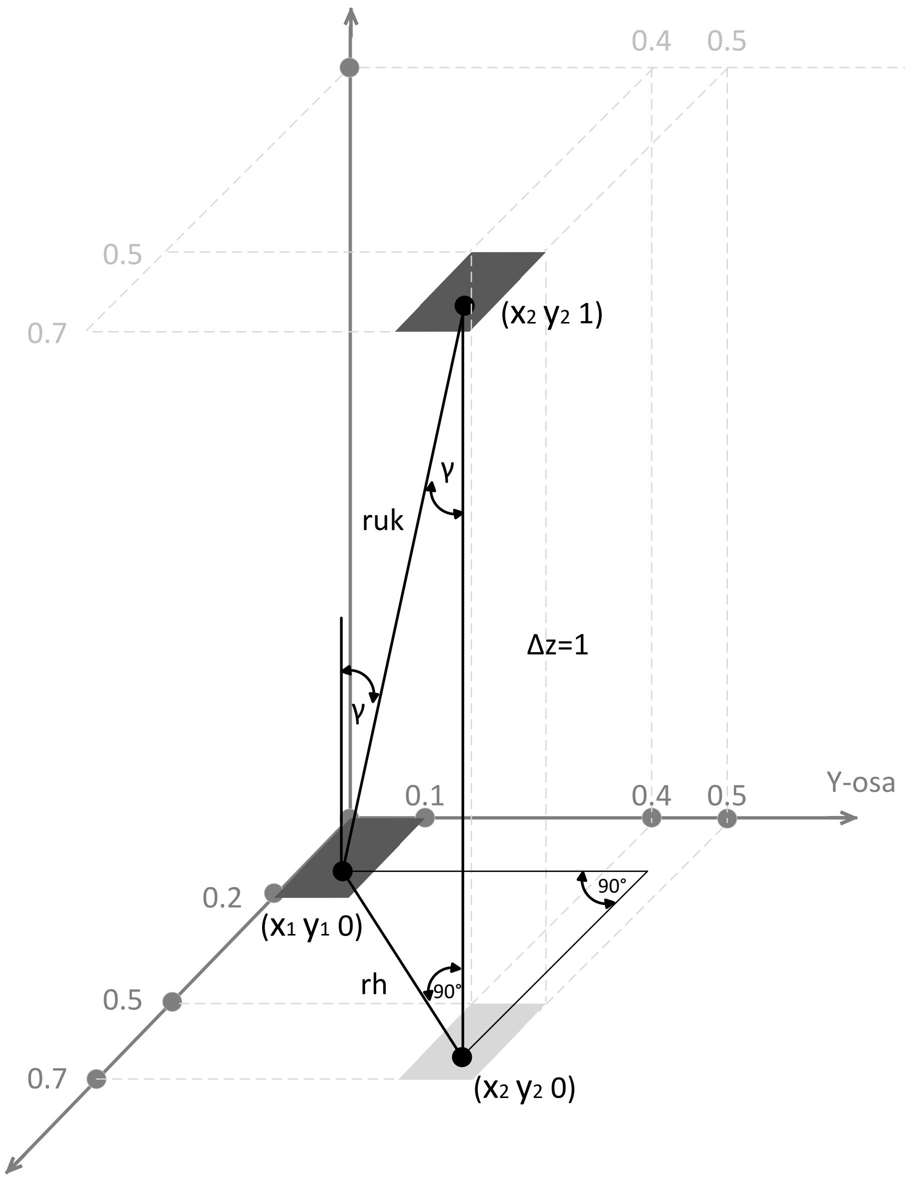
5. Једножилни кабл пресека бакра (специфична електрична проводност на 20°C $\sigma_{20\ Cu}$ =56×10^6 S/m и коефицијент линеарног пораста специфичне електричне отпорности са температуром α_{Cu20} =4.29×10^{-3}°C^{-1}) S_{Cu} = 95 mm^2, са PVC изолацијом дебљине изолације δ_{iz} = 1 mm (топлотне специфичне проводности λ_{PVC} = 0.16 W/(m K)) положена је у тло специфичне топлотне отпорности ρ_z=2.5 (m K)/W. Максимална дозвољена температура PVC изолације износи ϑ_{doz}=70°C, а температура земље удаљене од кабла ϑ_z=20°C. Одредити максимално дозвољену вредност једносмерне струје која протиче кроз кабл за два случаја: а) да је кабл положен директно у тло, б) да је постављен у кошуљицу сачињену од материјала специфичне топлотне отпорности ρ_{zk}=1 (m K)/W - сматрати да је спољашња површ кошуљице цилиндар ваљка пречника D_k=200 mm. При израчунавању сматрати да се као "удаљено референтну тло", на коме је температура једнака ϑ_z=20°C, може узети цилиндар ваљка пречника D_{ref}=1000 mm. (2п)

Решења задатака:

1. задатак

Видети решење задатка 1. са колоквијукма одржаног 23. 1. 2017.

2. задатак



$$rh = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$
$$ruk = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (1 - 0)^2}$$

$$cos\,\gamma = \frac{1m}{ruk} = \frac{1m}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (1 - 0)^2}}$$

$$F_{12} = \frac{1}{S_1}\iint_{S_1,S_2}\frac{\cos\gamma_1\cos\gamma_2}{ruk^2\,\pi} = \frac{1}{0.2\;0.1}\iint_{S_1,S_2}\frac{\cos^2\gamma}{ruk^2\,\pi} = \frac{1}{0.02}\iint_{S_1,S_2}\frac{\left(\frac{1}{ruk}\right)^2}{ruk^2\,\pi} = \frac{1}{0.02}\iint_{S_1,S_2}\frac{1}{ruk^4\,\pi}$$
$$F_{12} = \frac{1}{0.02}\int_{x1=0}^{x1=0.2}\int_{y1=0}^{y1=0,1}\int_{x2=0,5}^{x2=0,7}\int_{y2=0,4}^{y2=0,5}\frac{1}{((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + 1)^2\,\pi}$$

5. задатак

Видети решење задатка 4. са колоквијукма одржаног 23. 1. 2017.

ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Катедра за енергетске претвараче и погоне

Испит из предмета Термички процеси у електроенергетици

Испит траје максимално 180 минута 8. 2. 2017.
Предметни наставник: Проф. др Зоран Радаковић

1. Поставити систем једначина из кога се може одредити дужина (L) и пречник (D) ребра за хлађење кружног попречног пресека, на располагању је запремина V материјала топлотне проводности λ. Задата је температура базиса ребра који је постављен на тело које се хлади ϑ_b и температура ваздуха (ϑ_a) којим се принудно хлади ребро (коефицијент преласка топлоте је константан и износи α). Користити прецизан гранични услов на базису ребра који је у додиру са ваздухом.

2. Написати двоструки интеграл по y и z координатама на кругу чијим се решавањем долази до вредности фактора виђења круга полупречника R = 1 m са мале хоризонталне површи која се налази у координатном почетку правоуганог координатног система. Круг се налази у yz-равни на x = 1 m, са координатом центра круга: [1,0,1]. Једначина кружнице у равни (центар на координати p, q):

$$(y-p)^2+(z-q)^2=R^2.$$

3. Написати општу температурну једначину у правоуглаоном координатном систему за случај хомогене нелинеарне топлопроводне средине, у којој се температура не мења по координати y.

4. Нацртати дијаграм промене температуре уља и намотаја по висини трансформатора. Дијаграме нацртати за две фазе огледа загревања трансформатора у кратком споју: са пуним губицима и након један сат са номиналном струјом. Навести како се из ова два експеримента одређују највећа температура уља и највећа температура изолације намотаја које се очекују при нормалном раду трансформатора оптерећеним номиналном снагом.

5. Једножилни кабл пресека бакра (специфична електрична проводност на 20°C $\sigma_{20\,Cu}$ =56×10^6 S/m и коефицијент линеарног пораста специфичне електричне отпорности са температуром α_{Cu20} =4.29×10^{-3}°C^{-1}) S_{Cu} = 95 mm^2, са PVC изолацијом дебљине изолације d_{iz} = 1 mm (топлотне специфичне проводности λ_{PVC} = 0.16 W/(m K)) положена је у тло специфичне топлотне отпорности ρ_z=2.5 (m K)/W. Максимална дозвољена температура PVC изолације износи ϑ_{doz}=70°C, а температура земље удаљене од кабла ϑ_z=20°C. За колико процената је мања максимално дозвољена вредност ефективне вредности струје која протиче кроз три једножилна кабла постављена у троугао у односу на једножилни кабл. Сматрати да је отпор протицању наизменичне струје приближно једнак отпору протицању једносмерне струје. Пад температуре услед провођења топлоте кроз тло одредити као да се одвија између цилиндра чија је спољна површ једнака површи додира три кабла постављена у троугао са тлом. При израчунавању пада температуре услед провођења топлоте кроз изолацију кабла сматрати да се врши само кроз део изолације чија је спољна површ у додиру са тлом. При израчунавању сматрати да се као "удаљено референтну тло", на коме је температура једнака ϑ_z=20°C, може узети цилиндар ваљка пречника D_{ref}=1000 mm.

Решења задатака:

1. задатак

$$q_s = -\lambda \, grad \, \vartheta$$
$$q_{sx} = -\lambda \, \frac{d\vartheta}{dx}$$
$$q(x) = -\lambda \frac{D^2\pi}{4} \frac{d\vartheta}{dx}$$
$$\frac{dq(x)}{dx} = -\lambda \frac{D^2\pi}{4} \frac{d^2\vartheta}{dx^2}$$

$$dq_\alpha(x) = \alpha(\vartheta(x) - \vartheta_a)D\pi dx$$
$$dq_\alpha(x) = -dq(x)$$

$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2} = \frac{4\alpha}{\lambda D}(\vartheta(x) - \vartheta_a)$$

Опште решење диференцијалне једначине:

$$\vartheta(x) = C_1 \cdot e^{m \cdot x} + C_2 \cdot e^{-m \cdot x} + \vartheta_a; \; m = \sqrt{\frac{4\alpha}{\lambda D}}$$

Интеграционе константе које фигуришу у изразу (1) одређују се из граничних услова за базисе ребра:

$$\vartheta(0) = \vartheta_b$$

$$\alpha \cdot S \cdot (\vartheta(L) - \vartheta_a) = -\lambda \cdot S \cdot \frac{d\vartheta}{dx}(L) \;\; \Rightarrow \;\; \alpha \cdot (\vartheta(L) - \vartheta_a) = -\lambda \cdot \frac{d\vartheta}{dx}(L)$$

$$C_1 = \frac{(\vartheta_b - \vartheta_a) \cdot (\frac{m\lambda}{\alpha} - 1)}{2 \cdot \frac{m\lambda}{\alpha} \cdot ch(mL) + 2 \cdot sh(mL)} e^{-mL}$$

$$C_2 = \frac{(\vartheta_b - \vartheta_a) \cdot (\frac{m\lambda}{\alpha} + 1)}{2 \cdot \frac{m\lambda}{\alpha} \cdot ch(mL) + 2 \cdot sh(mL)} e^{mL}$$

$$\vartheta(x) = \vartheta_a + \frac{(\vartheta_b - \vartheta_a)}{m\lambda \cdot ch(mL) + \alpha \cdot sh(mL)}(m\lambda \cdot ch[m(L-x)] + \alpha \cdot sh[m(L-x)])$$

Укупна снага којом се топлота одводи преко ребра добија се на следећи начин:

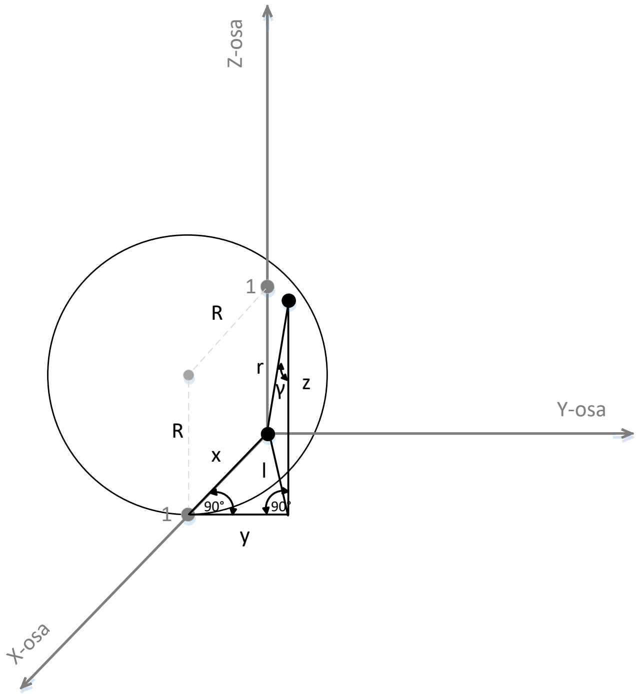
$$q_{uk} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{d\vartheta}{dx}(0) = \lambda \cdot \frac{D^2\pi}{4} \cdot (\vartheta_b - \vartheta_a) \cdot m \frac{m\lambda \cdot th(mL) + \alpha}{m\lambda + \alpha \cdot th(mL)}$$

Ако се дужина ребра за хлађење L изрази преко запремине (задата вредност V) и пречника (D): $L = \frac{V}{\frac{D^2\pi}{4}} = \frac{4V}{D^2\pi}$ и уврсти у претходни израз за снагу хлађења q_{uk}, добиће се функционална зависност снаге хлађења од дужине ребра за хлађењем q_{uk} (L). Изједначавањем првог извода функције q_{uk} (L) са нулом, долази се до вредности дужине ребра за хлађење L^* при којој је снага хлађења максимална: q_{uk} (L^*)

2. задатак

Једначина круга

$$y^2 + (z-1)^2 = 1$$



$$\overrightarrow{ort_{mp}} = 1 \cdot \vec{\imath}$$
$$\overrightarrow{ort_k} = -1 \cdot \vec{\imath}$$
$$\vec{r} = 1 \cdot \vec{\imath} + y \cdot \vec{\jmath} + z \cdot \vec{k}$$

$$\cos\gamma_1 = \frac{\overrightarrow{ort_{mp}}\,\vec{r}}{\left\|\overrightarrow{ort_{mp}}\right\| \, \|\vec{r}\|}$$

$$\cos\gamma_2 = \frac{\overrightarrow{ort_k}\,(-\vec{r})}{\left\|\overrightarrow{ort_k}\right\| \, \|\vec{r}\|}$$

$$\cos\gamma_1 = \frac{1 \cdot 1}{1 \cdot \sqrt{1+y^2+z^2}}$$

$$\cos\gamma_2 = \frac{(-1)\cdot(-1)}{1 \cdot \sqrt{1+y^2+z^2}}$$

$$\cos\gamma_1 = \cos\gamma_2 = \cos\gamma = \frac{1}{\sqrt{1+y^2+z^2}}$$

$$l = \sqrt{x^2+y^2} = \sqrt{1+y^2}$$

$$r = \sqrt{l^2+z^2} = \sqrt{1+y^2+z^2}$$

Фактор виђења из дефиниционе формуле

$$F_{12} = \int_{S_1} \frac{cos^2(\gamma)}{r^2\pi} dS_1$$

Како би се интегралило по кружници, неопходно је да се границе унутрашњег интеграла (по координати z) изразе помоћу једначине круга

$$F_{12} = \int_0^2 \int_{-\sqrt{1-(z-1)^2}}^{\sqrt{1-(z-1)^2}} \frac{1}{(1+y^2+z^2)^2\pi} dy\, dz$$

или границе унутрашњег интеграла (по координати y)

$$F_{12} = \int_{-1}^1 \int_{1-\sqrt{1-y^2}}^{1+\sqrt{1-y^2}} \frac{1}{(1+y^2+z^2)^2\pi} dy\, dz$$

Решавањем интеграла у Mathcad-у добија се:

$$F_{12} = 0.276$$

<u>3. задатак</u>

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial z}\right) + q_v = \rho\, c_p \frac{\partial \vartheta}{\partial t}$$

<u>4. задатак</u>

<u>5. задатак</u>

$$R_{Cu} = \frac{D_{Cu}}{2} = \sqrt{\frac{S_{Cu}}{\pi}} = 5.5mm$$

Једножилни кабл

$$R_l^T = \frac{1}{2\cdot\pi\cdot 0.16 W/_{m\cdot K}} \cdot \ln\left(\frac{13mm}{11mm}\right) + \frac{2.5\, ^{m\cdot K}/_W}{2\cdot\pi} \cdot \ln\left(\frac{1000mm}{13mm}\right) = 1.89\, ^K/_W$$

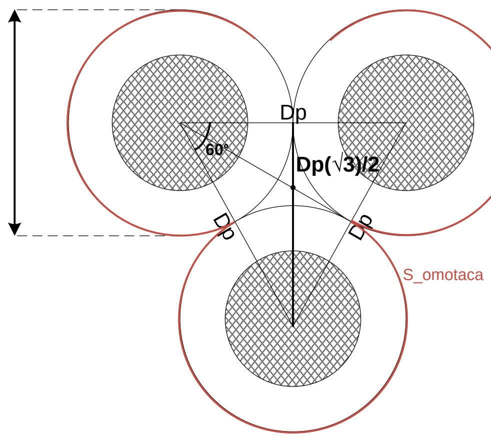
$$R_{Cu}\, I_1^2 = \frac{\vartheta_{cu1} - 20}{R_l{}^T} = \frac{70-20}{R_l{}^T}$$

$$R_{Cu} = \frac{1}{\sigma\cdot S}\left(1+\alpha\left(70-20\right)\right) = \frac{1}{56\cdot 95}\left(1+4.29\cdot 10^{-3}\, 50\right) = 2.28\cdot 10^{-4}\, \Omega m$$

$$R_{Cu}\, I^2 = \frac{\vartheta_{doz} - \vartheta_a}{R_l^T}$$

$$I_1 = \sqrt{\frac{\vartheta_{doz} - \vartheta_a}{R_{Cu}\, R_l^T}} = \sqrt{\frac{\left(70-20\right)K}{2.28\cdot 10^{-4}\, \Omega m 1.89\, ^K/_W}} = 340.6A$$

Трожилни кабл



$$S_{om} = 3\,\pi\,(D_{Cu} + 2\,d_{iz})\,\frac{300}{360} = 102.1\,mm^2$$

$$D_{ekv} = \frac{S_{om}}{\pi} = 32.5\,mm$$

$$R_{li}^{T} = \frac{1}{2\cdot\pi\cdot 0.16\,W\!/_{m\cdot K}}\cdot\ln\left(\frac{13mm}{11mm}\right)\frac{360}{300} = 0.1994\,K\!/_{W}$$

$$R_{lz}^{T} = \frac{2.5\,m\cdot K\!/_{W}}{2\cdot\pi}\cdot\ln\left(\frac{1000mm}{32.5mm}\right) = 1.363\,K\!/_{W}$$

$$\vartheta_{cu3} - 20 = 70 - 20 = R_{Cu}\,I_3^2\,R_{li}{}^{T} + 3\,R_{Cu}I_3{}^2\,R_{lz}{}^{T} = R_{Cu}I_3{}^2\left(R_{li}{}^{T} + 3\,R_{lz}{}^{T}\right)$$

$$I_3 = \sqrt{\frac{\vartheta_{doz} - \vartheta_a}{R_{Cu}\left(R_{li}^{T} + 3R_{lz}^{T}\right)}} = \sqrt{\frac{(70-20)K}{2.28\cdot 10^{-4}\,\Omega m\,(0.1994 + 3\cdot 1.363)\,K\!/_{W}}} = 226.1A$$

$$\frac{I_3}{I_1} = \frac{226.1}{340.6} = 66.4\%$$

ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Катедра за енергетске претвараче и погоне

Испит из предмета Термички процеси у електроенергетици

Испит траје максимално 180 минута 25. 3. 2017.
Предметни наставник: Проф. др Зоран Радаковић

1. Поставити систем једначина из кога се може одредити дужина (L) и страница квадратног попречног пресека (a) ребра за хлађење. На располагању је запремина V материјала топлотне проводности λ. Задата је температура базиса ребра који је постављен на тело које се хлади (ϑ_b) и температура ваздуха (ϑ_a) којим се принудно хлади ребро (коефицијент преласка топлоте по омотачу је константан и износи α). Користити прецизан гранични услов на базису ребра који је у додиру са ваздухом, знајући да је коефицијент преласка топлоте са базиса ребра на ваљак α_b).

2. Нацртати расподелу јачине зрачења (поларни дијаграм) идеалног црног тела температуре површи 600^0C. Колика треба да буде температура идеалног сивог тела емисивности 0.7 да би поларни дијаграм његове расподеле зрачења био исти.

3. Описати типски (према стандардима) оглед загревања енергетског уљног трансформатора.

4. Номинални подаци хладњака уље - вода, уобичајене конструкције са цевима (N_c = 109 цеви у које вода улази и тече у једном смеру и 109 цеви кроз које вода струји у супротном смеру и из њих излази; дужна сваке од цеви износи L_c = 1.993m), око којих преко снопа улазних и излазних цеви струји уље, гласе: проток воде Q_{vode} = 4.167x10^{-3} m^3/s, проток уља Q_{ulja} = 22.2x10^{-3} m^3/s, температуре топлог и хладног уља: ϑ_{tu} = 72°C и ϑ_{hu} = 64°C, температуре топле и хладне воде: ϑ_{tv} = 42°C и ϑ_{hv} = 25°C, расхладна снага хладњака P_h = 298 kW. Вредност фактора хладњака F је блиска јединици, због чега се хладњак може посматрати као елементарни облик хладњака кога сачињавају две цилиндричне коаксијалне цеви кроз које уље и вода протичу у супротним смеровима. Пречник отвора унутрашње цеви, кроз коју протиче вода, износи d_{ucv} = 13 mm, дебљина цеви δ_{cv} = 1 mm, док је еквивавелни унутрашњи пречник цеви кроз коју протиче уље и која је идеално топлотно изолована од околине, d_{ucu} = 22 mm. Проток воде и уља кроз еквиваленти елементарни хладњак (две концентричне цеви) је N_c пута мањи од протока кроз стварни хладњак, а коефицијент проласка топлоте исти.
Током зиме, трансформатор је искључен са мреже, и поново укључен после дужег времена ван погона. У тренутку укључења, температура воде на уласку у хладњак је била ϑ_{vu} = 1°C, а температура масе уља у суду (температура уља које улази у хладњак) ϑ_{uu} = -6°C. Може се сматрати да су протоци уља и воде приближни номиналним и да је коефицијент преласка топлоте једнак вредности у номиналном режиму. Параметри воде и уља: ρ_v = 1001 kg/m^3, c_{pv} = 4209 J/(kg K), ρ_u = 895 kg/m^3, c_{pu} = 2198 J/(kg K). Да ли, и на коју вредност, ће опасти температура воде на изласку из хладњака (опадање температуре испод 0°C доводи до смрзавања воде у хладњаку, и као крајњег резултата хаварије разматраног блок трансформатора на електрани).

5. Једножилни бакарни кабл са PVC изолацијом (карактеристике бакра: σ_{20} =56×10^6 S/m, коефицијент линеарног пораста специфичне електричне отпорности са температуром α_{Cu} =4.29×10^{-3}°C^{-1}, c_p =390 J/(kg K), ρ_p = 8900 kg/m^3) има пресек S_{Cu} = 95 mm^2. Колико износе максималне једносекундне струје ако се квар деси из номиналног радног режима, када је температура ϑ_{doz}=70°C, као и из хладног стања (температура кабла једнака температури амбијента ϑ_a=20°C)? Максимална температура која се сме достићи износи $\vartheta_{doz\ ks}$=140°C. При прорачуну сматрати да је термички процес по настанку кратког споја адијабатски. При прорачуну снаге генерисања топлоте узети у обзир температурну промену електричне отпорности; може се сматрати да струја кратког споја има константну вредност.

Решења задатака:

<u>1. задатак</u>

$$q_s = -\lambda \, grad \, \vartheta$$

$$q_{sx} = -\lambda \, \frac{d\vartheta}{dx}$$

$$q(x) = -\lambda a^2 \, \frac{d\vartheta}{dx}$$

$$\frac{dq(x)}{dx} = -\lambda a^2 \, \frac{d^2\vartheta}{dx^2}$$

$$dq_\alpha(x) = \alpha(\vartheta(x) - \vartheta_a)4adx$$

$$dq_\alpha(x) = -dq(x)$$

$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2} = \frac{4\alpha}{\lambda a}(\vartheta(x) - \vartheta_a)$$

Опште решење диференцијалне једначине:

$$\vartheta(x) = C_1 \cdot e^{m\cdot x} + C_2 \cdot e^{-m\cdot x} + \vartheta_a; \; m = \sqrt{\frac{4\alpha}{\lambda a}}$$

Интеграционе константе које фигуришу у изразу (1) одређују се из граничних услова за базисе ребра:

$$\vartheta(0) = \vartheta_b$$

$$\alpha_b \cdot S \cdot (\vartheta(L) - \vartheta_a) = -\lambda \cdot S \cdot \frac{d\vartheta}{dx}(L) \;\; \Rightarrow \;\; \alpha_b \cdot (\vartheta(L) - \vartheta_a) = -\lambda \cdot \frac{d\vartheta}{dx}(L)$$

$$C_1 = \frac{(\vartheta_b - \vartheta_a)\cdot(\frac{m\lambda}{\alpha_b} - 1)}{2\cdot\frac{m\lambda}{\alpha_b}\cdot ch(mL) + 2\cdot sh(mL)} e^{-mL}$$

$$C_2 = \frac{(\vartheta_b - \vartheta_a)\cdot(\frac{m\lambda}{\alpha_b} + 1)}{2\cdot\frac{m\lambda}{\alpha_b}\cdot ch(mL) + 2\cdot sh(mL)} e^{mL}$$

$$\vartheta(x) = \vartheta_a + \frac{(\vartheta_b - \vartheta_a)}{m\lambda\cdot ch(mL) + \alpha_b\cdot sh(mL)}(m\lambda\cdot ch[m(L-x)] + \alpha_b\cdot sh[m(L-x)])$$

Укупна снага којом се топлота одводи преко ребра добија се на следећи начин:

$$q_{uk} = -\lambda\cdot S\cdot\frac{d\vartheta}{dx}(0) = \lambda\cdot\frac{D^2\pi}{4}\cdot(\vartheta_b - \vartheta_a)\cdot m\frac{m\lambda\cdot th(mL) + \alpha_b}{m\lambda + \alpha_b\cdot th(mL)}$$

Ако се дужина ребра за хлађење L изрази преко запремине (задата вредност V) и пречника (D): $L = \frac{V}{\frac{D^2\pi}{4}} = \frac{4V}{D^2\pi}$ и уврсти у претходни израз за снагу хлађења q_{uk}, добиће се функционална зависност снаге хлађења од дужине ребра за хлађењем q_{uk} (L). Изједначавањем првог извода функције q_{uk} (L) са нулом, долази се до вредности дужине ребра за хлађење L^* при којој је снага хлађења максимална: q_{uk} (L^*)

3. задатак

Коефицијент проласка топлоте хладњака, одређен из номиналних података о хладњаку:

$tu\_ul\_nom := 72$ $\quad$ $tv\_ul\_nom := 25$

$tu\_iz\_nom := 64$ $\quad$ $tv\_iz\_nom := 42$

$Qu\_nom := \frac{22.2}{1000} = 0.0222$ $\quad$ $Qv\_nom := \frac{15}{3600} = 4.167 \times 10^{-3}$

$Q\_nom := 298 \cdot 10^{3}$

$S\_hladnjaka := Nc \cdot \pi \cdot dcvsr \cdot 2 \cdot Lc = 19.109$

$dt\_ul := tu\_ul\_nom - tv\_iz\_nom$

$dt\_izl := tu\_iz\_nom - tv\_ul\_nom$

$$P := \frac{tv\_iz\_nom - tv\_ul\_nom}{tu\_ul\_nom - tv\_ul\_nom} = 0.362$$

$$R := \frac{tu\_ul\_nom - tu\_iz\_nom}{tv\_iz\_nom - tv\_ul\_nom} = 0.471$$

$F := 1$ Приближно 1 (тачно 0.98)

Фактор облика хладњака
- графици промене овог фактора се могу наћи у литератури

$$kp := \frac{\left(Q\_nom \cdot \ln\left(\frac{dt\_izl}{dt\_ul}\right)\right)}{S\_hladnjaka \cdot (dt\_izl - dt\_ul)} = 454.608$$

Улазни податак за прорачун температуре воде на изласку из хладњака и температуре уља на изласку из хладњака (уље и вода протичу у супротним смеровима):

tu_izl Temperatura ulja na kraju gde voda izlazi i ulje ulazi

tu_ul Temperatura ulja na kraju gde voda ulazi i ulje izlazi

tv_izl Temperatura vode na kraju gde voda izlazi i ulje ulazi

tv_ul Temperatura vode na kraju gde voda ulazi i ulje izlazi

$tu\_izl := -6$ $\quad$ $tv\_ul := 1$

$Qu := \frac{Qu\_nom}{Nc} = 2.037 \times 10^{-4}$ $\quad$ $Qv := \frac{Qv\_nom}{Nc} = 3.823 \times 10^{-5}$

---

tu_ul := −2 tv_izl := −1.5

Given

rho_v·Qv·cp_v·(tv_ul − tv_izl) = rho_u·Qu·cp_u·(tu_ul − tu_izl)

$$\ln\left[\frac{(tv\_izl - tu\_izl)}{(tv\_ul - tu\_ul)}\right] = kp\cdot(\pi\cdot dcvsr\cdot 2\cdot Lc)\cdot\left[\frac{-1}{(rho\_v\cdot Qv\cdot cp\_v)} + \frac{1}{(rho\_u\cdot Qu\cdot cp\_u)}\right]$$

Solution := Find(tu_ul, tv_izl)

tu_ul := $Solution_0$ tv_izl := $Solution_1$ $Solution = \begin{pmatrix} -4.972 \\ -1.558 \end{pmatrix}$

tv_izl = −1.558

---

5. 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.

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

$$P_{akum} = P_{gen} \tag{3.1}$$

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

$$P_{gen} = \rho_{20}\cdot(1+\alpha_{Cu20}\cdot(\vartheta_{Cu}-20))\cdot\frac{I^2}{S} \tag{3.2}$$

Подужна снага којом се енергија акумулише у проводнику дата је изразом

$$P_{akum} = C_{Cu}^{T}\cdot\frac{d\vartheta_{Cu}}{dt} \tag{3.3}$$

Подужни топлотни капацитет проводника је једнак $C_{Cu}^{T} = \rho_{Cu}\cdot S\cdot c_{pCu} = 329.745\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mK}}$

Из претходник израза се добија диференцијална једначина која описује промену температуре бакарног проводника. То је уједно и температура најтоплијих тачака изолације (тачке на унутрашњој површи изолације уз сам проводник).

$$C_{Cu}^{T}\cdot\frac{d\vartheta_{Cu}}{dt} = \rho_{20}\cdot(1-20\cdot\alpha_{Cu20})\cdot\frac{I^2}{S} + \frac{\rho_{20}\cdot\alpha_{Cu20}\cdot I^2}{S}\cdot\vartheta_{Cu} \tag{3.4}$$

Једначина (3.4) се може представити у следећем облику:

$$\frac{d\vartheta_{Cu}}{dt} - \frac{1}{\tau}\cdot\vartheta_{Cu} = \frac{1}{\tau\cdot\alpha_{Cu20}}\cdot(1-20\cdot\alpha_{Cu20}),\quad \tau = \frac{S\cdot C_{Cu}^{T}}{\rho_{20}\cdot\alpha_{Cu20}\cdot I^2} \tag{3.5}$$

Опште решење једначине (3.6) гласи

$$\vartheta_{Cu}(t) = C_1\cdot e^{t/\tau} + \frac{20\cdot\alpha_{Cu20}-1}{\alpha_{Cu20}} = C_1\cdot e^{t/\tau} + \vartheta_p \tag{3.6}$$

$$\vartheta_p = \frac{20\cdot\alpha_{Cu20}-1}{\alpha_{Cu20}} = \frac{20\cdot 4.29\cdot 10^{-3}-1}{4.29\cdot 10^{-3}} = -213.1$$

Интеграциона константа која фигурише у (3.6) одређује се из почетног услова:

$$\vartheta_{Cu}(0) = \vartheta_0 \tag{3.7}$$

$$C_1 = \vartheta_0 - \vartheta_p \tag{3.8}$$

$$\vartheta_{Cu}(t) = (\vartheta_0 - \vartheta_p)\cdot e^{t/\tau} + \vartheta_p \tag{3.9}$$

Максимална једносекундна струја кратког споја при којој температура проводника и изолације неће прећи $\vartheta_{\max} = 140^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$ налази се из услова:

$$\vartheta_{Cu}(t^*) = \vartheta_{\max} = (\vartheta_0 - \vartheta_p) \cdot e^{t^*/\tau} + \vartheta_p, \quad t^* = 1\mathrm{s} \tag{3.10}$$

За $\vartheta_0 = 70°C$

$$\tau = \frac{t^*}{\ln\left(\dfrac{\vartheta_{\max} - \vartheta_p}{\vartheta_0 - \vartheta_p}\right)} = \frac{1}{\ln\left(\dfrac{140 - (-213.1)}{70 - (-213.1)}\right)} = 4.526\mathrm{s} \tag{3.11}$$

$$I_{\max 1s} = \sqrt{\frac{S \cdot C_{Cu}^T}{\rho_{20} \cdot \alpha_{Cu20} \cdot \tau}} = \sqrt{\frac{95 \cdot 329.745}{\left(1/56\right) \cdot 4.29 \cdot 10^{-3} \cdot 4.526}} = 9.505\ \mathrm{kA} \tag{3.12}$$

За 329.745

$$\tau = \frac{t^*}{\ln\left(\dfrac{\vartheta_{\max} - \vartheta_p}{\vartheta_0 - \vartheta_p}\right)} = \frac{1}{\ln\left(\dfrac{140 - (-213.1)}{20 - (-213.1)}\right)} = 2.408\mathrm{s} \tag{3.11}$$

$$I_{\max 1s} = \sqrt{\frac{S \cdot C_{Cu}^T}{\rho_{20} \cdot \alpha_{Cu20} \cdot \tau}} = \sqrt{\frac{95 \cdot 329.745}{\left(1/56\right) \cdot 4.29 \cdot 10^{-3} \cdot 2.408}} = 13.031\ \mathrm{kA} \tag{3.12}$$

ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Катедра за енергетске претвараче и погоне

Испит из предмета Термички процеси у електроенергетици

Испит траје максимално 180 минута 20. 6. 2017.
Предметни наставник: Проф. др Зоран Радаковић

1. Написати диференцијалну једначину чијим се решавањем може доћи до расподеле температуре дуж једног ребра за хлађење облика зарубљене купе чији се већи базис полупречника R_0 налази на хлађеном телу температуре ϑ_b. Мањи полупречник базиса зарубљене купе износи R_1, њена дужина L, а топлотна проводност материјала ребра λ. Диференцијална једначина треба да буде у форми у којој као независно променљива фигурише само растојање од базиса на телу (x), а као зависна променљива само температура (ϑ). Написати прецизне граничне услове полазећи од познатог коефицијента преласка топлоте струјањем са површи ребра ка ваздуху температуре ϑ_∞ (α). Претпостављајући да је познат израз за расподелу температуре дуж ребра $\vartheta(x)$, написати израз за снагу хлађења тела температуре ϑ_b.

2. Посматрајно површ полулопте полупречника R=1 m у чијем се центру кружног базиса налази равно црно тело, температуре 800^0C, мале површи која припада равни базиса полусфере. Одредити висину калоте на коју пада половина укупне снаге зрачења која пада на полулопту.

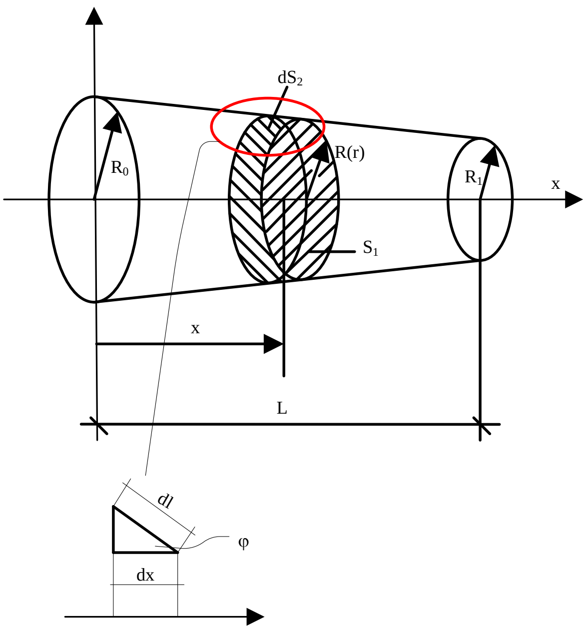
3. Објаснити потребу и описати поступак екстраполације који се примењује да би се добила средња температура намотаја на крају другог дела типског огледа загревања енергетског уљног трансформатора.

4. Коефицијент преласка топлоте, одређен из номиналних података хладњака, износи k_p = 455 W / (m^2 K). Вредност фактора хладњака F је блиска јединици, због чега се хладњак може посматрати као елементарни облик хладњака кога сачињавају две цилиндричне коаксијалне цеви кроз које уље и вода протичу у супротним смеровима. Пречник унутрашње цеви (број цеви износи N_c = 109, а дужина L_c = 1.993m), кроз коју протиче вода, износи d_{ucv} = 13 mm, дебљина цеви δ_{cv} = 1 mm, док је еквиваленти унутрашњи пречник цеви кроз коју протиче уље и која је идеално топлотно изолована од околине, d_{ucu} = 22 mm. Проток воде и уља кроз еквиваленти елементарни хладњак (две концентричне цеви) је N_c пута мањи од протока кроз стварни хладњак, а коефицијент проласка топлоте исти.
Током зиме, трансформатор је искључен са мреже, и поново укључен после дужег времена ван погона. У тренутку укључења, температура масе уља у суду (температура уља које улази у хладњак) износи ϑ_{uu} = - 6°C. Може се сматрати да су протоци уља и воде приближни номиналним (Q_{vode} = 4.167x10^{-3} m^3/s, Q_{ulja} = 22.2x10^{-3} m^3/s) и да је коефицијент преласка топлоте једнак вредности у номиналном режиму. Параметри воде и уља: ρ_v = 1001 kg/m^3, c_{pv} = 4209 J/(kg K), ρ_u = 895 kg/m^3, c_{pu} = 2198 J/(kg K). Написати једначине из којих се може одредити минимална температура воде на уласку у хладњак при којој неће долазити до смрзавања воде у хладњаку?

5. Једножилни кабл пресека бакра (специфична електрична проводност на 20°C $\sigma_{20\,Cu}$ =56×10^6 S/m и коефицијент линеарног пораста специфичне електричне отпорности са температуром α_{Cu20} =4.29×10^{-3}°C^{-1}) S_{Cu} = 95 mm^2, са PVC изолацијом дебљине изолације δ_{iz} = 1 mm (топлотне специфичне проводности λ_{PVC} = 0.16 W/(m K)) положен је у тло специфичне топлотне отпорности ρ_z=2.5 (m K)/W. Максимална дозвољена температура PVC изолације износи ϑ_{doz}=70°C, а температура земље удаљене од кабла ϑ_z=20°C. Нацртати криву промене максимално дозвољене вредности једносмерне струје која протиче кроз кабл у зависности од дебљине кошуљице (δ_k) сачињене од материјала специфичне топлотне отпорности ρ_{zk}=1 (m K)/W, чија се дебљина мења у опсегу 0 - 200 mm (график треба да садржи 9 еквидистантних тачака). При израчунавању сматрати да се за "удаљено референтну тло", на коме је температура једнака ϑ_z=20°C, може узети цилиндар ваљка пречника D_{ref}=1000 mm.

Решења задатака:

1. задатак



$$S_1(x) = R^2(x)\pi$$

$$\frac{dS_1}{dx} = 2R(x)\pi \frac{dR}{dx}$$

$$dS_2 = 2\pi R(x)dl\,;\; dl = \frac{dx}{\cos(\varphi)}$$

$$\cos(\varphi) = \frac{L}{\sqrt{L^2 + (R_0 - R_1)^2}}$$

$$q_s = -\lambda \overrightarrow{grad\vartheta} = -\lambda \frac{d\vartheta}{dx}$$

$$q(x) = -\lambda S_1(x)\frac{d\vartheta}{dx}$$

$$\frac{dq(x)}{dx} = -\lambda\left[\frac{dS_1}{dx}\frac{d\vartheta}{dx} + S_1(x)\frac{d^2\vartheta}{dx^2}\right]$$

$$dq(x) = -\lambda\left[\frac{dS_1}{dx}\frac{d\vartheta}{dx} + S_1(x)\frac{d^2\vartheta}{dx^2}\right]dx$$

$$dq_\alpha(x) = \alpha(\vartheta(x) - \vartheta_\infty)dS_2 = \alpha(\vartheta(x) - \vartheta_\infty)\frac{2\pi R(x)}{\cos(\varphi)}dx$$

$$-dq(x) = dq_\alpha(x)$$

$$\lambda\left[\frac{dS_1}{dx}\frac{d\vartheta}{dx} + S_1(x)\frac{d^2\vartheta}{dx^2}\right]dx = \alpha(\vartheta(x) - \vartheta_\infty)\frac{2\pi R(x)}{\cos(\varphi)}dx$$

$$2\lambda R(x)\pi\frac{dR}{dx}\frac{d\vartheta}{dx} + R^2(x)\pi\lambda\frac{d^2\vartheta}{dx^2} = \alpha(\vartheta(x) - \vartheta_\infty)\frac{2\pi R(x)}{\cos(\varphi)}$$

$$R(x)\lambda\frac{d^2\vartheta}{dx^2} + 2\lambda\frac{dR}{dx}\frac{d\vartheta}{dx} - \frac{2\alpha}{\cos(\varphi)}\vartheta = -\frac{2\alpha\vartheta_\infty}{\cos(\varphi)}$$

$$R(x) = R_0 - \frac{R_0 - R_1}{L}x \qquad \frac{dR}{dx} = \frac{R_1 - R_0}{L}$$

$$\lambda\left[R_0 - \frac{R_0 - R_1}{L}x\right]\frac{d^2\vartheta}{dx^2} + 2\lambda\frac{R_1 - R_0}{L}\frac{d\vartheta}{dx} - \frac{2\alpha}{\cos(\varphi)}\vartheta = -\frac{2\alpha\vartheta_\infty}{\cos(\varphi)}$$

Гранични услови:

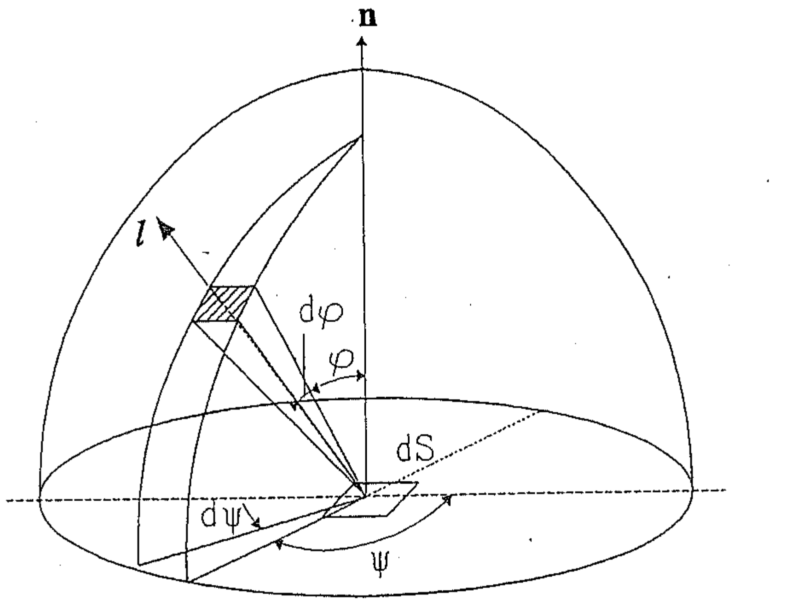
$$\vartheta(x=0)=\vartheta_b$$

$$-\lambda\frac{d\vartheta}{dx}(x=L)=\alpha(\vartheta(x=L)-\vartheta_\infty)$$

Снага хлађења:

$$P=-\lambda R_0^2\,\pi\frac{d\vartheta}{dx}(x=0)$$

<u>2. задатак</u>



$$dq=I_\varphi\,d\omega=I_0\cos\varphi\,d\omega=I_0\cos\varphi\sin\varphi\,d\psi\,d\varphi$$

$$q_{0-\varphi^*}=\int_{\varphi=0}^{\varphi=\varphi^*}\int_{\psi=0}^{\psi=2\pi}I_0\cos\varphi\sin\varphi\,d\psi\,d\varphi=$$

$$2\pi I_0\int_{\varphi=0}^{\varphi=\varphi^*}\cos\varphi\sin\varphi\;d\varphi=2\pi I_0\frac{1}{2}\int_{\varphi=0}^{\varphi=\varphi^*}\sin 2\varphi\,d\varphi=$$

$$2\pi I_0\frac{1}{2}\frac{1}{2}\left(\cos 0-\cos(2\varphi^*)\right)=$$

$$\pi I_0\frac{1}{2}\left(\cos 0-\cos(2\varphi^*)\right)=$$

$$\pi I_0\frac{1}{2}\left(1-\cos(2\varphi^*)\right)$$

$$q_{0-\pi/2}=\pi I_0$$

$$q_{0-\varphi^*}=\frac{q_{0-\pi/2}}{2}\Rightarrow\pi I_0\frac{1}{2}\left(1-\cos(2\varphi^*)\right)=\frac{\pi I_0}{2}$$

$$\left(1-\cos(2\varphi^*)\right)=1$$

$$\varphi^*=45^\circ$$

Висина калоте:

$$H_k=R-R\cos(\varphi^*)=R(1-\cos(\varphi^*))=1m(1-\cos(45^\circ))=0.239m$$

4. задатак

Коефицијент проласка топлоте хладњака, одређен из номиналних података о хладњаку:

$tu\_ul\_nom := 72$

$tv\_ul\_nom := 25$

$tu\_iz\_nom := 64$

$tv\_iz\_nom := 42$

$Qu\_nom := \frac{22.2}{1000} = 0.0222$

$Qv\_nom := \frac{15}{3600} = 4.167 \times 10^{-3}$

$Q\_nom := 298 \cdot 10^{3}$

$S\_hladnjaka := Nc \cdot \pi \cdot dcvsr \cdot 2 \cdot Lc = 19.109$

$dt\_ul := tu\_ul\_nom - tv\_iz\_nom$

$dt\_izl := tu\_iz\_nom - tv\_ul\_nom$

$P := \frac{tv\_iz\_nom - tv\_ul\_nom}{tu\_ul\_nom - tv\_ul\_nom} = 0.362$

$R := \frac{tu\_ul\_nom - tu\_iz\_nom}{tv\_iz\_nom - tv\_ul\_nom} = 0.471$

$F := 1$ Приближно 1 (тачно 0.98)

Фактор облика хладњака - графици промене овог фактора се могу наћи у литератури

$$kp := \frac{\left(Q\_nom \cdot \ln\left(\frac{dt\_izl}{dt\_ul}\right)\right)}{S\_hladnjaka \cdot (dt\_izl - dt\_ul)} = 454.608$$

Улазни податак за прорачун температуре воде на уласку у хладњак и температуре уља на изласку из хладњака (уље и вода протичу у супротним смеровима):

tu_izl Temperatura ulja na kraju gde voda izlazi i ulje ulazi

tu_ul Temperatura ulja na kraju gde voda ulazi i ulje izlazi

tv_izl Temperatura vode na kraju gde voda izlazi i ulje ulazi

tv_ul Temperatura vode na kraju gde voda ulazi i ulje izlazi

$tu\_izl := -6$

$tv\_izl := 0$

$Qu := \frac{Qu\_nom}{Nc} = 2.037 \times 10^{-4}$

$Qv := \frac{Qv\_nom}{Nc} = 3.823 \times 10^{-5}$

$tu\_ul := -2 \qquad tv\_ul := 2$

Given

$$rho\_v \cdot Qv \cdot cp\_v \cdot (tv\_ul - tv\_izl) = rho\_u \cdot Qu \cdot cp\_u \cdot (tu\_ul - tu\_izl)$$

$$\ln\left[\frac{(tv\_izl - tu\_izl)}{(tv\_ul - tu\_ul)}\right] = kp \cdot (\pi \cdot dcvsr \cdot 2 \cdot Lc) \cdot \left[\frac{-1}{(rho\_v \cdot Qv \cdot cp\_v)} + \frac{1}{(rho\_u \cdot Qu \cdot cp\_u)}\right]$$

$Solution := Find(tu\_ul, tv\_ul)$

$tu\_ul := Solution_0 \qquad tv\_ul := Solution_1 \qquad Solution = \begin{pmatrix} -4.611 \\ 3.455 \end{pmatrix}$

$tv\_ul = 3.455$

5. задатак

$$\delta k := \begin{pmatrix} 0 \\ 25 \\ 50 \\ 75 \\ 100 \\ 125 \\ 150 \\ 175 \\ 200 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3}$$

$$Dref := 1$$

$$\sigma Cu20 := 56 \cdot 10^{6}$$

$$\alpha Cu := 4.29 \cdot 10^{-3}$$

$$\lambda iz := 0.16 \qquad \lambda k := 1 \qquad \lambda z := \frac{1}{2.5}$$

$$SCu := 95 \cdot 10^{-6}$$

$$Du := \sqrt{\frac{4 \cdot SCu}{\pi}} \qquad \delta iz := 1 \cdot 10^{-3}$$

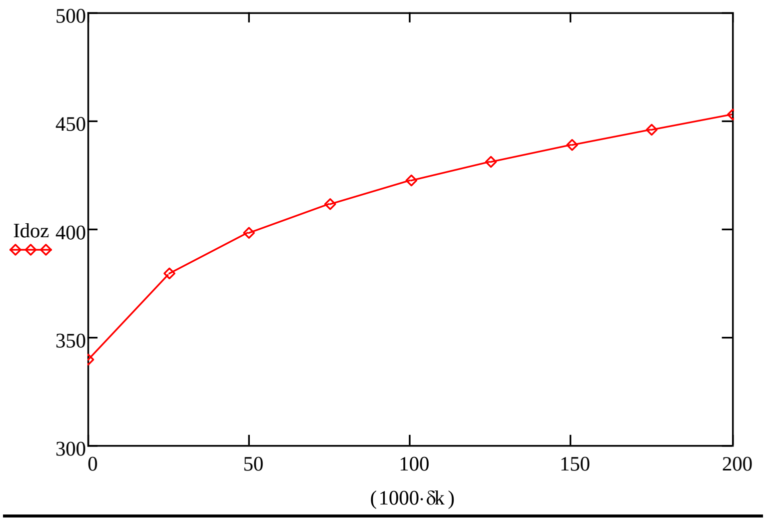
$$Ds := Du + 2 \cdot \delta iz$$

$$Dp := Ds + 2 \cdot \delta k$$

$$RlT := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda iz} \cdot \ln\left(\frac{Ds}{Du}\right) + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda k} \cdot \ln\left(\frac{Dp}{Ds}\right) + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda z} \cdot \ln\left(\frac{Dref}{Dp}\right)$$

$$RCu := \frac{1}{\sigma Cu20 \cdot SCu} \cdot [1 + \alpha Cu \cdot (70 - 20)]$$

$$Idoz := \sqrt{\frac{70 - 20}{RCu \cdot RlT}} = \begin{pmatrix} 340.039 \\ 379.918 \\ 398.684 \\ 411.973 \\ 422.563 \\ 431.511 \\ 439.34 \\ 446.354 \\ 452.743 \end{pmatrix}$$



ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Катедра за енергетске претвараче и погоне

Испит из предмета Термички процеси у електроенергетици

Испит траје максимално 180 минута 4. 7. 2017.
Предметни наставник: Проф. др Зоран Радаковић

1. Написати температурну једначину за једнодимензиони пренос топлоте по координати полупречника у сферном координатном систему за случај стационарног топлотног процеса у хомогеној нелинеарној топлопроводној средини. У једначини не смеју да фигуришу изводи чије је вредност једнака нули. Написати гранични услов за случај да се тело преко граничне површи (сфера спољњег полупречника R) хлади струјањем флуида температуре ϑ_f, при чему коефицијент преласка топлоте са површи тела на флуид износи α. Сматрати да су сви топлотни параметри познати. Општа температурне једначине у сферном координатном систему гласи

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda r^2 \frac{\partial \vartheta}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2 \sin^2 \varphi}\frac{\partial}{\partial \varphi}\left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial \varphi}\right)+\frac{1}{r^2 \sin^2 \theta}\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \sin\theta \frac{\partial \vartheta}{\partial \theta}\right)+q_v=\rho c_p \frac{\partial \vartheta}{\partial t}.$$

2. Написати диференцијалну једначину чијим се решавањем може доћи до расподеле температуре дуж једног ребра за хлађење облика зарубљене купе чији се већи базис полупречника R_0 налази на хлађеном телу температуре ϑ_b. Мањи полупречник базиса зарубљене купе износи R_1, њена дужина L, а топлотна проводност материјала ребра λ. Диференцијална једначина треба да буде у форми у којој као независно промењлива фигурише само растојање од базиса на телу (x), а као зависна промењлива само температура (ϑ). Коефицијент преласка топлоте струјањем са површи ребра ка ваздуху температуре ϑ_∞ је сразмеран разлици температуре површи и температуре амбијента $\alpha = C\,(\vartheta(x) - \vartheta_\infty)^n$.

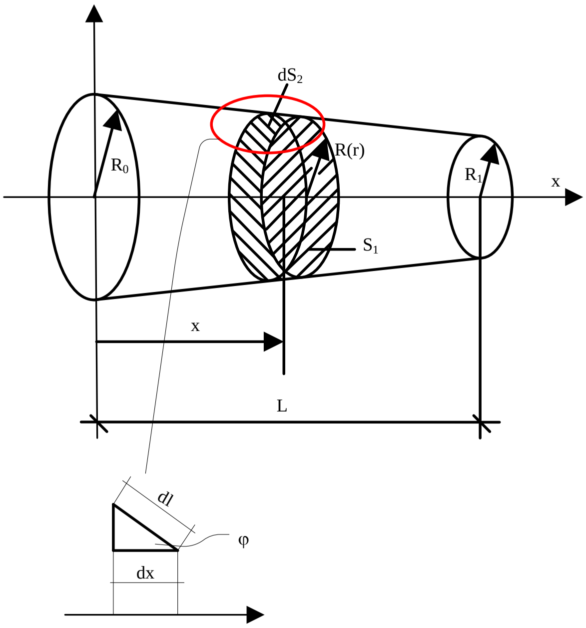
3. Посматрајно површ полулопте полупречника 1 m у чијем се центру кружног базиса налази равно црно тело, температуре 800^0C, мале површи која припада равни базиса полусфере. Одредити висину калоте на коју пада половина укупне снаге зрачења која пада на полулопту.

4. Како се врши укрштање каблова и топловода, односно шта се мора оставити између кабла и топловода?

5. Коефицијент преласка топлоте, одређен из номиналних података хладњака, износи $k_p = 455$ W / (m^2 K). Вредност фактора хладњака F је блиска јединици, због чега се хладњак може посматрати као елементарни облик хладњака кога сачињавају две цилиндричне коаксијалне цеви кроз које уље и вода протичу у супротним смеровима. Пречник унутрашње цеви (број цеви износи $N_c = 109$, а дужина $L_c = 1.993$m), кроз коју протиче вода, износи $d_{ucv} = 13$ mm, дебљина цеви $\delta_{cv} = 1$ mm, док је еквиваленти унутрашњи пречник цеви кроз коју протиче уље и која је идеално топлотно изолована од околине, $d_{ucu} = 22$ mm. Проток воде и уља кроз еквиваленти елементарни хладњак (две концентричне цеви) је N_c пута мањи од протока кроз стварни хладњак, а коефицијент проласка топлоте исти.
Током зиме, трансформатор је искључен са мреже, и поново укључен после дужег времена ван погона. У тренутку укључења, температура масе уља у суду (температура уља које улази у хладњак) износи $\vartheta_{uu} = -6$°C. Може се сматрати да су протоци уља и воде приближни номиналним ($Q_{vode} = 4.167\text{x}10^{-3}$ m^3/s, $Q_{ulja} = 22.2\text{x}10^{-3}$ m^3/s) и да је коефицијент преласка топлоте једнак вредности у номиналном режиму. Параметри воде и уља: $\rho_v = 1001$ kg/m^3, $c_{pv} = 4209$ J/(kg K), $\rho_u = 895$ kg/m^3, $c_{pu} = 2198$ J/(kg K). Написати једначине из којих се може одредити минимална температура воде на уласку у хладњак при којој неће долазити до смрзавања воде у хладњаку?

Решења задатака:

2. задатак



$$S_1(x) = R^2(x)\pi$$

$$\frac{dS_1}{dx} = 2R(x)\pi\frac{dR}{dx}$$

$$dS_2 = 2\pi R(x)dl\,;\; dl = \frac{dx}{\cos(\varphi)}$$

$$\cos(\varphi) = \frac{L}{\sqrt{L^2 + (R_0 - R_1)^2}}$$

$$q_s = -\lambda\overrightarrow{grad}\vartheta = -\lambda\frac{d\vartheta}{dx}$$

$$q(x) = -\lambda S_1(x)\frac{d\vartheta}{dx}$$

$$\frac{dq(x)}{dx} = -\lambda\left[\frac{dS_1}{dx}\frac{d\vartheta}{dx} + S_1(x)\frac{d^2\vartheta}{dx^2}\right]$$

$$dq(x) = -\lambda\left[\frac{dS_1}{dx}\frac{d\vartheta}{dx} + S_1(x)\frac{d^2\vartheta}{dx^2}\right]dx$$

$$dq_\alpha(x) = \alpha(\vartheta(x) - \vartheta_\infty)dS_2 = \alpha(\vartheta(x) - \vartheta_\infty)\frac{2\pi R(x)}{\cos(\phi)}dx$$

$$-dq(x) = dq_\alpha(x)$$

$$\lambda\left[\frac{dS_1}{dx}\frac{d\vartheta}{dx} + S_1(x)\frac{d^2\vartheta}{dx^2}\right]dx = \alpha(\vartheta(x) - \vartheta_\infty)\frac{2\pi R(x)}{\cos(\phi)}dx$$

$$2\lambda R(x)\pi\frac{dR}{dx}\frac{d\vartheta}{dx} + R^2(x)\pi\lambda\frac{d^2\vartheta}{dx^2} = C(\vartheta(x) - \vartheta_\infty)^{n+1}\frac{2\pi R(x)}{\cos(\phi)}$$

$$R(x)\lambda\frac{d^2\vartheta}{dx^2} + 2\lambda\frac{dR}{dx}\frac{d\vartheta}{dx} = C(\vartheta(x) - \vartheta_\infty)^{n+1}\frac{2}{\cos(\phi)}$$

$$R(x) = R_0 - \frac{R_0 - R_1}{L}x \qquad \frac{dR}{dx} = \frac{R_1 - R_0}{L}$$

$$\lambda\left[R_0 - \frac{R_0 - R_1}{L}x\right]\frac{d^2\vartheta}{dx^2} + 2\lambda\frac{R_1 - R_0}{L}\frac{d\vartheta}{dx} = C(\vartheta(x) - \vartheta_\infty)^{n+1}\frac{2}{\cos(\phi)}$$

3. задатак

Видети решење задатка 2 на испиту одржаном 20. 6. 2017.

5. задатак

Видети решење задатка 4 на испиту одржаном 20. 6. 2017.

ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Катедра за енергетске претвараче и погоне

Испит из предмета Термички процеси у електроенергетици

Испит траје максимално 180 минута 21. 8. 2017.
Предметни наставник: Проф. др Зоран Радаковић

1. Поставити систем алгебарских једначина из кога се може одредити снага хлађења преко ребра за хлађење кружног попречног пресека (пречник круга D). Ребро се састоји из два дела: дужина делова (L_1 и L_2), топлотна проводност делова λ. Део 1 је ослоњен на тело које се хлади. Задата је температура базиса ребра који је постављен на тело које се хлади ϑ_b и температура ваздуха (ϑ_a) којим се принудно хлади ребро (коефицијент преласка топлоте је константан и износи α). Користити прецизан гранични услов на базису ребра који је у додиру са ваздухом.

2. Посматрајмо површ полулопте полупречника R=1 m у чијем се центру кружног базиса налази равно црно тело, температуре 800^0C, мале површи која припада равни базиса полусфере. Написати израз чијим се коришћењем може одредити снага зрачења која пада на део полулопте који се налази у опсегу углова у сферном координатном систему (φ_1, φ_2) и (ψ_1, ψ_2).

3. Написати општу температурну једначину у правоугаоном координатном систему за случај хомогене нелинеарне топлопроводне средине, у којој се температура мења само по координати z.

4. За елементарни облик хладњака кога сачињавају две цилиндричне коаксијалне цеви кроз које уље и вода (вода се хлади уљем) протичу у супротним смеровима су познати подаци: коефицијент преласка топлоте k_p, површ кроз коју се размењује топлота S, обим пресека додирне површи између уља и воде O, запремински проток воде Q_{vode}, запремински проток уља Q_{ulja}, температура уља које се хлади ϑ_{tu}, температура воде која се доводи у хладњак ϑ_{hv}.
Написати систем једначина из кога се могу одредити температуре уља на месту његовог изласка из хладњака ϑ_{hu} и температура воде након њеног изласка из хладњака ϑ_{tv}.
Полазећи од познатих вредности ϑ_{hu} и ϑ_{tv} и осталих претходно наведених величина, написати израз за одређивање разлике температуре уља и воде ϑ_{hu} - ϑ_{tv} на растојању x од места уласка уља у хладњак.

5. Које се додатне мере предвиђају техничким препорукама ЕПС-а на деловима укрштања кабловског вода са топловодом? Референтна ситуација је да се кабл и топловод полажу у тло, без ограничења њихове међусобне удаљености.

ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Катедра за енергетске претвараче и погоне

Испит из предмета Термички процеси у електроенергетици

Испит траје максимално 180 минута 4. 9. 2017.
Предметни наставник: Проф. др Зоран Радаковић
За рад изабрати 4 од датих 5 задатака. Максимални број поена на сваком од задатака износи 2.5.

1. Поставити систем алгебарских једначина из кога се може одредити снага хлађења преко ребра за хлађење чији је обим попречног пресека O и површ попречног пресека S. Ребро се састоји из два дела: дужина делова (L_1 и L_2), топлотна проводност делова λ_1 и λ_2. Део 1 је ослоњен на тело које се хлади. Задата је температура базиса ребра који је постављен на тело које се хлади ϑ_b и температура ваздуха ϑ_a, којим се принудно хлади ребро (коефицијент преласка топлоте је константан и износи α). Користити прецизан гранични услов на базису ребра који је у додиру са ваздухом.

2. Посматрајмо површ полулопте полупречника R = 1 m у чијем се центру кружног базиса налази равно црно тело, температуре 800°C, мале површи која припада равни базиса полусфере. Написати израз чијим се коришћењем може одредити снага зрачења која пада на део полулопте дефинисане пресечним равнима које су паралелне кружном базису и које се налазе на растојањима (H_1 и H_2) од базиса.

3. Написати израз за снагу хлађења размењивача топлоте уље - вода, за размењивач за који се у литератури може наћи зависност коефицијената F. На који се начин квантификује, односно у математички модел уводи, запрљање хладњака? Написати изразе за два случаја: а) да су површи ка уљу и ка води приближно исте, б) да се ове површи разликују. При писању израза као референтну површ, за коју се "везује" коефицијент проласка топлоте, узети површ према уљу.

4. За елементарни облик хладњака кога сачињавају две цилиндричне коаксијалне цеви кроз које уље и вода (уље се хлади водом) протичу у супротним смеровима су познати подаци: коефицијент преласка топлоте k_p, површ кроз коју се размењује топлота S, обим пресека додирне површи између уља и воде O, запремински проток воде Q_{vode}, запремински проток уља Q_{ulja}, температура уља на месту његовог уласка у хладњак ϑ_{tu}, температура воде која се доводи у хладњак ϑ_{hv}.
Написати систем једначина из кога се могу одредити температуре уља на месту његовог изласка из хладњака ϑ_{hu} и температура воде на месту њеног изласка из хладњака ϑ_{tv}.
Полазећи од познатих вредности ϑ_{hu} и ϑ_{tv} и осталих претходно наведених величина, написати израз за одређивање разлике температуре уља и воде $\vartheta_{hu} - \vartheta_{tv}$ на растојању x од места уласка уља у хладњак.

5. Једножилни кабл пресека бакра (специфична електрична проводност на 20°C $\sigma_{20\,Cu} = 56\times10^6$ S/m и коефицијент линеарног пораста специфичне електричне отпорности са температуром $\alpha_{Cu20} = 4.29\times10^{-3}$ °C^{-1}) $S_{Cu} = 95$ mm^2, са PVC изолацијом дебљине изолације $\delta_{iz} = 1$ mm (топлотне специфичне проводности $\lambda_{PVC} = 0.16$ W/(m K)) положен је у тло специфичне топлотне отпорности $\rho_z = 2.5$ (m K)/W. Максимална дозвољена температура PVC изолације износи $\vartheta_{doz} = 70$°C, а температура земље удаљене од кабла $\vartheta_z = 20$°C. Нацртати криву промене максимално дозвољене вредности једносмерне струје која протиче кроз кабл у зависности од дебљине кошуљице (δ_k) сачињене од материјала специфичне топлотне отпорности $\rho_{zk} = 1$ (m K)/W, чија се дебљина мења у опсегу 0 - 200 mm (график треба да садржи 9 еквидистантних тачака). При израчунавању сматрати да се за "удаљено референтну тло", на коме је температура једнака $\vartheta_z = 20$°C, може узети цилиндар ваљка пречника $D_{ref} = 1000$ mm.