16. Трофазни трансформатор снаге S_n = 400 kVA има временску константу загревања T = 4 h, средњи пораст температуре после једночасовног рада са номиналним оптерећењем $\theta_1 = 14\ K$ и максимални степен искоришћења снаге при оптерећењу S_m = 320 kVA.
Напомена: Трансформатор третирати као хомогено тело $(\theta_{Cu} = \theta_u = \theta_{Fe})$.

а) Одредити средњи пораст температуре после 10 h рада са номиналним оптерећењем ако је трансформатор пре оптерећења имао температуру амбијента ($\vartheta_0 = \vartheta_a$).
б) Коју класу изолације има задати трансформатор?
в) Ако је трансформатор достигао своју граничну температуру и искључи се са мреже, одредити потребно време да би се охладио.
г) Одредити вредност оптерећења којим се постиже гранични номинални средњи пораст температуре намотаја после t = 4 h рада ако је $\vartheta_0 = \vartheta_a$.

Решења:

Теоријски увод:

На почетку треба да уведемо ознаке:

ϑ − температура неког дела трансформатора у ℃

$\theta = \vartheta_1 - \vartheta_2$ – разлика температура два дела трансформатора у K или ако је $\vartheta_2 = \vartheta_a$ онда зовемо пораст тепературе

$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ – разлика два пораста температуре у K

Ако трансформатор посматрамо као хомогено тело можемо писати општу једначину за пренос топлоте која следи из закона одржања енергије:

$$Q_p = Q_\theta + Q_d$$

где су: Q_p – произведена топлота, Q_θ – акумулисана топлота и Q_d – топлота која се дисипира тј. одведена топлота

Код трансформатора ова једначина постаје:

$$(P_{Fe} + P_{Cu})dt = mcd\theta + \Sigma\alpha S\theta dt - \text{диференцијална једначина за пренос топлоте}$$

Овде су: m – укупна маса трансформатора као хомогеног тела, c – специфична топлота материјала (уље, бакар, гвожђе), α – коефицијент одношења топлоте, S – површина са које се одводи топлота. Термичка временска константа овог процеса је:

$$T = \frac{mc}{\Sigma\alpha S}$$

$\boxed{C(=mc)=(m_u\, cp_u + m_{Cu}\, cp_{Cu} + m_{Fe}\, cp_{Fe})}$

Треба напоменути да се овде чини доста апроксимација као што су: трансформатор није хомогено тело, губици су променљиви са температуром, коефицијент одношења топлоте је углавном нелинеарано зависан од температуре.

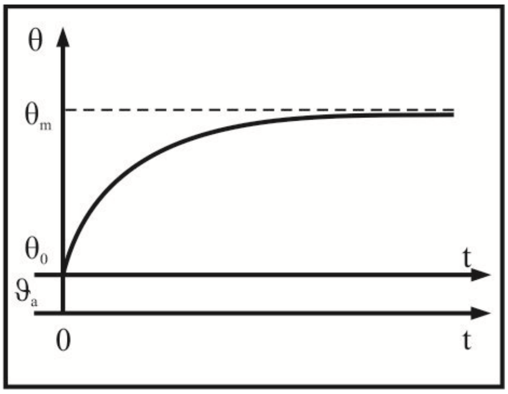
У стационарном стању нема више промене пораста температуре па из горње једначине следи:

$$\theta_m = \frac{(P_{Fe} + P_{Cu})}{\Sigma\alpha S} - \text{пораст температуре у стационарном стању}$$

Када се диференцијална топлотна једначина реши добија функција промене пораста температуре у времену:

$$\theta = \theta_m\left(1 - e^{-t/T}\right) + \theta_0 e^{-t/T}$$

Где је $\theta_0 = \vartheta_0 - \vartheta_a$ почетни пораст температуре.



а) Пошто је по услову задатка почетна температура трансформатора била једнака амбијенталној имамо:

$\vartheta_0 = \vartheta_a \Rightarrow \theta_0 = 0 \Rightarrow \theta = \theta_m\left(1 - e^{-t/T}\right)$

Да би одредили температуру после десеточасовног рада треба прво да израчунамо максимални пораст температуре који се има при номиналном оптерећењу. То можемо да одредимо из услова датог у задатку:

$$\theta(1h) = 14 = \theta_m\left(1 - e^{-1/4}\right) \Rightarrow \theta_m = \frac{14}{\left(1 - e^{-\frac{1}{4}}\right)} = 63{,}3\;K$$

Сада је:

$$\theta(10h) = 63{,}3 \cdot \left(1 - e^{-\frac{10}{4}}\right) = 58{,}1\;K$$

(1-e^(-4))=0.9817

Сматрамо да је прелазни процес завршен када протекне ≈ 4T.

`Class 105 °C', Табела 4А са предавања.

б) Пошто смо утврдили да је максимални пораст температуре при номиналном оптерећењу мањи од 65 K што је максимални прописима дозвољени пораст температуре намотаја за уљно папирну изолацију закључујемо да је упитању класа изолације А тј. уље и папир.

Када је упитању хлађење усмереним струјањем уља (OD) дозвољен пораст температуре износи 70 K.

Максимална амбијентална температура прописана стандардима износи 40°C.

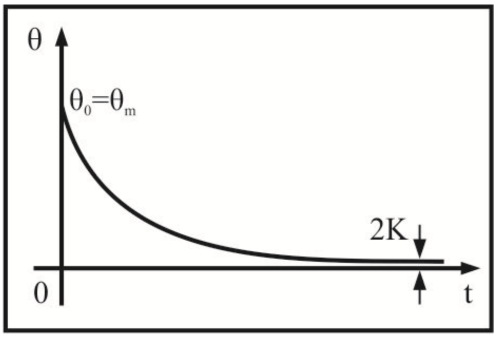
Максимална гранична температура најтоплије тачке намотаја је:

$$\vartheta_{Cu,m} = \theta_m + \vartheta_a = 105°\text{C}\;(ON)$$

1) Номинална снага треба да произведе номинални пораст температуре намотаја
2) Номинални век трајања се има за $\vartheta_{Cu,m} = 105°\text{C}$

в) Када се трансформатор искључи са мреже он се хлади по експоненцијалном закону:

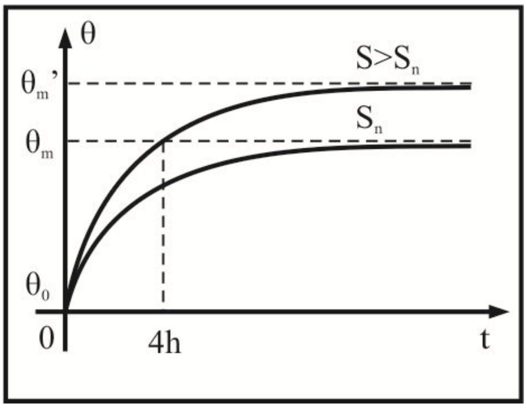
$$\theta = \theta_m e^{-t/T}$$



У стварности је временска константа хлађења различита од времнске константе загревања. Сматрамо да је трансформатор охлађен ако му је пораст температуре пао на 2K. Одатле имамо да је:

$$t_h = T \cdot ln\frac{\theta_m}{\theta} = 4 \cdot ln\frac{63{,}3}{2} = 13{,}8\ h$$

г) Ако трансформатор стартује неоптерећен може радити са $S > S_n$ до достизања максималног номиналног пораста температуре за задату класу изолације.



Једначина која описује загревање трансформатора у случају рада са оптерећењем већим од номиналног:

$$\theta' = \theta'_m\left(1 - e^{-t/T}\right)$$

После 4h рада достиже се максимални дозвољени пораст температуре за задати трансформатор:

$$\theta'(4h) = \theta_{mn} = \theta'_m\left(1 - e^{-4/T}\right)$$

Одавде се добија однос максималних пораста температуре:

$$\frac{\theta'_m}{\theta_{mn}} = \frac{1}{(1 - e^{-1})} = 1{,}58$$

Информација о новом оптерећењу се крије у изразу за θ'_m:

$$\theta'_m = \frac{(P_{Fe} + \beta^2 P_{Cu})}{\Sigma\alpha S}$$

Ако се потражи однос према номиналном порасту температуре:

$$\frac{\theta'_m}{\theta_{mn}} = 1{,}58 = \frac{(P_{Fe} + \beta^2 P_{Cu})}{(P_{Fe} + P_{Cu})}$$

Одавде се лако може одредити релативно оптерећење:

$$\beta = \sqrt{\frac{0{,}58P_{Fe} + 1{,}58P_{Cu}}{P_{Cu}}} = \sqrt{0{,}58\frac{P_{Fe}}{P_{Cu}} + 1{,}58} = \sqrt{0{,}58 \cdot \beta_m^2 + 1{,}58} = \sqrt{0{,}58 \cdot \left(\frac{S_m}{S_n}\right)^2 + 1{,}58}$$

$$\beta = \sqrt{0{,}58 \cdot \left(\frac{320}{400}\right)^2 + 1{,}58} = 1{,}4$$

17. Одредити приближно промену граничне температуре трансформатора који има сличну конструкцију као трансформатор из претходног задатка али коме су све линеарне димензије $\sqrt{2}$ пута веће. Којим параметрима се постиже исти гранични пораст температуре за оба трансформатора? Одредити приближно однос номиналних снага и тежина ова два трансформатора.

Решења:

Теорија: Димензиона анализа према услову $B_m = const,\ J = const, k = l_2/l_1 = \sqrt{2}$

$U = 4{,}44 f N B_m S_{Fe} \sim l^2$

$I = J S_{Cu} \sim l^2$

$S \sim UI \sim l^4$

$$P_{Cu} \sim RI^2 = \rho \frac{l_{Cu}}{S_{Cu}} I^2 \sim \frac{l}{l^2} l^4 = l^3$$

$P_{Fe} = m_{Fe} p_{Fe} \sim \gamma_{Fe} V_{Fe} p_{Fe} \sim l^3$

$$\theta = \frac{(P_{Fe} + P_{Cu})}{\Sigma \alpha S} \sim \frac{l^3}{l^2} = l \Rightarrow \frac{\theta_2}{\theta_1} = k \Rightarrow \theta_2 = \sqrt{2} \cdot \theta_1 = \sqrt{2} \cdot 63{,}3 = 89{,}5\ K$$

Да би се за оба трансформатора имао исти гранични пораст температуре мора се за већи трансформатор усвојити мања густина струје при $B_m = const$ или ако се задржи иста густина струје онда треба увести форсирано хлађење.

Из релације за промену снаге са линеарном димензијом имамо:

$$\frac{S_2}{S_1} = k^4 = 4 \Rightarrow S_2 = 4 \cdot 400 = 1600\ kVA$$

Однос тежина ова два трансформатора одређујемо знајући да се маса трансформатора мења са l^3:

$$\frac{G_2}{G_1} = k^3 = 2^{\frac{3}{2}} = 2{,}82 \Rightarrow G_2 = 2{,}82 \cdot G_1$$

18. Трофазни уљни дистрибутивни трансформатор има номиналне губитке: $P_0 = 2100$, $P_k = 13000$ W и термичку временску константу као хомогено тело 2h. Трансформатор је достигао температуру устаљеног стања при оптерећењу од $0{,}5S_n$, када му се прикључи додатно оптерећење од $0{,}7S_n$. Колико дуго може радити са оваквим оптерећењем, а да не прекорачи максимални дозвољени пораст температуре?

Решења:

Пораст температуре у устаљеном стању када је прикључено оптерећење од $0{,}5S_n$ износи:

$$\Theta_{m1} = \Theta_{mn}\frac{\beta^2 P_{kn} + P_{0n}}{P_{kn} + P_{0n}} = 65\frac{0{,}5^2 \cdot 13 + 2{,}1}{13 + 2{,}1} = 23\ K$$

Пораст температуре који би се достигао у устаљеном стању када је прикључено укупно оптерећење од $1{,}2S_n$:

$$\Theta_{m2} = \Theta_{mn}\frac{\beta^2 P_{kn} + P_{0n}}{P_{kn} + P_{0n}} = 65\frac{1{,}2^2 \cdot 13 + 2{,}1}{13 + 2{,}1} = 89{,}6\ K$$

Тражено време се добија из једначине загревања са почетним условом $\Theta_0 = \Theta_{m1}$:

$$\Theta(t_x) = \Theta_{mn} = \Theta_{m1}e^{-\frac{t_x}{T}} + \Theta_{m2}\left(1 - e^{-\frac{t_x}{T}}\right) \Longrightarrow t_x = -Tln\frac{(\Theta_{mn} - \Theta_{m2})}{(\Theta_{m1} - \Theta_{m2})} \approx 2\ h$$