ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Nr 43 Górnictwo z.4 1962

TADEUSZ ZARAŃSKI

PEWNE ZAGADNIENIA Z NAGRZEWANIA SIĘ SILNIKÓW TRAKCYJNYCH ELEKTRYCZNYCH LOKOMOTYW KOPALNIANYCH

Streszczenie: W pracy wyprowadzono, w oparciu o klasyczną teorię nagrzewania się maszyn elektrycznych, prostą metodę analizy nieustalonych stanów cieplnych, występujących w silnikach trakcyjnych lokomotyw kopalnianych przy ich eksploatacji.

W szczególności wyprowadzono równanie nagrzewania się i stygnięcia uzwojeń silnika przy zmiennej temperaturze otoczenia (czynnika chłodzącego), następnie wprowadzono wyrażenie na temperaturę zastępczą i względną trwałość izolacji. W końcu podano sposób wyznaczenia przebiegu w czasie średniego nagrzania uzwojeń oraz dopuszczalnej wartości prądu silnika przy przerywanej pracy trakcyjnej.

1. Uwagi ogólne

Najkorzystniejsze warunki pracy lokomotyw elektrycznych, przy których uzyskuje się maksymalne wykorzystanie ich mocy oraz ekonomicznie uzasadnioną trwałość izolacji silników trakcyjnych, można wyznaczyć przy pomocy odpowiedniej analizy procesów cieplnych, zachodzących w silnikach podczas ich eksploatacji.

Do analizy tej potrzebne jest matematyczne ujęcie szeregu zależności, występujących pomiędzy wielkościami mającymi wpływ na nagrzewanie się silników. Ważniejsze z tych zależności wyprowadzone w następnych rozdziałach, przy czym, dla

uproszczenia analizy, przyjęto szereg założeń upraszczających, powszechnie stosowanych w klasycznej teorii nagrzewania się maszyn elektrycznych [1] [2] [3] [4] [5].

Z przyjętych uproszczeń należy wymienić np.

1) jednorodność nagrzewanych silników trakcyjnych względnie ich części (uzwojeń),

2) pominięcie wewnętrznych spadków temperatury w częściach silnika,

3) niezależność współczynnika oddawania ciepła do otoczenia od temperatury uzwojeń silnika,

4) proporcjonalność całkowitych strat mocy, do drugiej potęgi chwilowego prądu obciążenia,

5) niezależność strat mocy w uzwojeniach od ich temperatury,

6) niezależność cieplnej stałej czasowej maszyny do jej temperatury, natomiast zmienność od stanu ruchu (postój wzgl, jazda lokomotywy).

Powyższe założenia upraszczające odbijają się wprawdzie ujemnie na ścisłości wyników analizy, zapewniają jednak dokładność dostateczną dla celów technicznych i pozwalają dojść do pewnych ogólnych wniosków praktycznych w sposób stosunkowo prosty. Za dopuszczalnością założenia, wymienionego wyżej w punkcie 4, przemawia również i ta okoliczność, że nagrzanie maszyny, wyznaczone przy tym założeniu, wypada większe od rzeczywistego, silniki więc trakcyjne, dobrane na podstawie obliczeń w ten sposób uproszczonych, wykazują w rzeczywistości pewień zapas (rezerwę) mocy.

2. Równanie nagrzewania się i stygnięcia uzwojenia maszyny elektr. przy zmiennej temperaturze otoczenia (czynnika chłodzącego)

Kopalniane lokomotywy pracują przy zmieniającej się, w sposób okresowy, temperaturze otoczenia. Różne bowiem temperatury występują na stacjach końcowych (podszybie, stacje załadowcze), a wzdłuż trasy jazdy lokomotyw temperatura otoczenia zmienia się w sposób ciągły. Do analizy więc nagrzewanie się silników i wyznaczanie ich chwilowej tempe-

ratury nie nadają się ogólnie stosowane wzory, wyprowadzone przy założeniu stałości temperatury otoczenia. Zachodzi więc potrzeba wyprowadzenia odpowiedniego równania nagrzewania się i stygnięcia, uwzględniającego zmienność temperatury otoczenia.

W tym celu przedstawimy bilans cieplny nagrzewania się uzwojenia dla dowolnego czasu równaniem:

$$\Delta P\, dt = c\, G\, d\theta + \alpha\, S\, \vartheta\, dt \qquad (2.1)$$

w którym:

- ΔP - wydzielana moc cieplna (straty mocy)
- t - czas nagrzewania,
- c - ciepło właściwe uzwojenia,
- G - ciężar uzwojenia,
- θ - temperatura uzwojenia,
- α - współczynnik oddawania ciepła do otoczenia,
- S - powierzchnia chłodzona,
- ϑ - przyrost temperatury uzwojenia ponad temperaturę otoczenia.

Temperaturę uzwojenia można przedstawić wzorem:

$$\theta = \theta_{ot} + \vartheta \qquad (2.2)$$

gdzie:

- θ_{ot} - temperatura otoczenia (czynnika chłodzącego) przy czym, w ogólnym przypadku, temperatura otoczenia może zmieniać się z czasem.

Dla uproszczenia analizy można przyjąć, że w rozpatrywanym przedziale czasu zmiany te zachodzą według prostej, czyli:

$$\theta_{ot} = \theta_{ot.o} + k\, t \qquad (2.3)$$

gdzie:

- $\theta_{ot.o}$ - początkowa temperatura otoczenia dla $t = 0$,
- k - współczynnik.

Z (2.2) otrzymuje się różniczkę zupełną:

$$d\theta = d\,\theta_{ot} + d\vartheta$$

a z (2.3) różniczkę:

$$d\,\theta_{ot} = k\,dt$$

stąd

$$d\theta = k\,dt + d\vartheta \qquad (2.4)$$

Podstawiając (2.4) do (2.1) otrzymuje się;

$$\Delta P\,d\,t = c\,G(k\,dt + d\vartheta) + S\vartheta\,dt \qquad (2.5)$$

po podzieleniu obu stron powyższego równania przez αS

$$\frac{\Delta P}{\alpha S}\,dt = \frac{c\,G}{\alpha S}\,k\,dt + \frac{c\,G}{\alpha S}\,d\vartheta + dt\vartheta \qquad (2.5a)$$

a dalej;

$$\vartheta_u\,dt = T\,k\,dt + T\,d\vartheta + dt\vartheta \qquad (2.6)$$

gdzie:

ϑ_u = ustalony przyrost temperatury wyznaczony, z (2.5) dla stanu ustalonego tj. gdy $d\vartheta = 0$ i $k = 0$, ze wzoru:

$$\vartheta_u = \frac{\Delta P}{\alpha S} \qquad (2.6a)$$

T - cieplna stała czasowa, wyznaczona ze wzoru:

$$T = \frac{c\ G}{\alpha S} \tag{2.6b}$$

Przekształcając (2.6) otrzymujemy:

$$dt\ (\vartheta_u - Tk - \vartheta) = T\ d\vartheta$$

lub:

$$dt = \frac{T}{\vartheta_u - Tk - \vartheta}\ d\vartheta;$$

Po scałkowaniu w granicach czasu od 0 do t, względnie przyrostów temperatury od ϑ_o do ϑ, odpowiadających tym czasom, otrzymuje się:

$$t = \left[- T\ln(\vartheta_u - Tk - \vartheta)\right]_{\vartheta_o}^{\vartheta} = - T\ln \frac{\vartheta_u - Tk - \vartheta}{\vartheta_u - Tk - \vartheta_o};$$

stąd:

$$e^{-\frac{t}{T}} = \frac{\vartheta_u - Tk - \vartheta}{\vartheta_u - Tk - \vartheta_o},$$

oraz w końcu:

$$\vartheta = (\vartheta_u - Tk)(1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \vartheta_o e^{-\frac{t}{T}} \tag{2.7}$$

Po wyznaczeniu ze wzoru (2.7) chwilowej wartości przyrostu temperatury ponad temperaturę otoczenia, możemy z kolei obliczyć, z(2.2) i (2.3), chwilową temperaturę izolacji uzwojeń ze wzoru:

$$\theta = \theta_{ot.o} + kt + \vartheta \tag{2.8}$$

3. Temperatura zastępcza i względna trwałość izolacji

Przy pracy praktycznej lokomotyw kopalnianych występują cykliczne zmiany ich obciążenia; również i temperatura otoczenia podlega okresowym wahaniom. W następstwie powyższych okoliczności temperatura uzwojeń silników trakcyjnych ulega poważnym zmianom w czasie. W tych warunkach najprostszym kryterium trwałości izolacji uzwojeń, na którą decydujący wpływ ma temperatura, wydaje się być tzw. "temperatura zastępcza" θ_z.

Do pojęcia tego można dojść na podstawie następującego rozumowania. Jeśli izolacja uzwojenia znajduje się przez czas t stale w temperaturze θ, wówczas względną utratę jej trwałości ξ można wyznaczyć wzorem:

$$\xi = \frac{t}{\tau} \tag{3.1}$$

gdzie:

τ - trwałość izolacji w temperaturze θ,

przy czym:

$$\tau = A\, e^{-h\theta} \tag{3.2}$$

A oraz h - odpowiednie współczynniki

Przy zmiennej temperaturze izolacji, jeśli więc:

$$\theta = f(t) \tag{3.3}$$

względna utrata trwałości w ciągu różniczki czasu dt wyniesie

$$d\xi = \frac{dt}{\tau} \tag{3.4}$$

lub też, po uwzględnieniu (3.2):

$$d\xi = \frac{dt}{A}\, e^{h\theta} \tag{3.5}$$

a po dowolnym czasie t, po scałkowaniu (3.5);

$$\xi = \frac{1}{A} \int_0^t e^{h\Theta} dt \qquad (3.6)$$

Jako "temperaturę zastępczą" Θ_z, zastępującą rzeczywistą, zmienną w czasie temperaturę izolacji Θ, przyjmujemy taką stałą temperaturę, przy której, w rozpatrywanym czasie t, względna utrata trwałości izolacji ξ_z jest taka sama, jak przy zastąpionej rzeczywistej temperaturze zatem:

$$\xi_z = \xi \qquad (3.7)$$

przy czym:

$$\xi_z = \frac{t}{A} e^{h\Theta_z} \qquad (3.8)$$

lub po uwzględnieniu (3.7), (3.8) oraz (3.6) i przekształceniu:

$$\frac{t}{A} e^{h\Theta_z} = \frac{1}{A} \int_0^t e^{h\Theta} dt$$

względnie:

$$h\Theta_z = \ln \frac{1}{t} \int_0^t e^{h\Theta} dt$$

w końcu:

$$\Theta_z = \frac{1}{h} \ln \frac{1}{t} \int_0^t e^{h\Theta} dt \qquad (3.9)$$

Przy pomocy powyższego wzoru można wyznaczyć, w sposób analityczny lub analityczno - wykreślny, temperaturę zastępczą θ_z, dla dowolnie zmieniającej się rzeczywistej temperatury izolacji uzwojeń θ. Po jej wyznaczeniu, dla pewnych warunków pracy trakcyjnej, można z kolei, uwzględniając (3.2), wyznaczyć odpowiadającą im trwałość izolacji:

$$\tau_z = A\, e^{-h\theta_z} \tag{3.10}$$

Od powyższej wielkości należy odróżnić tzw. trwałość normalną τ_n, ekonomicznie uzasadnioną, zapewniającą minimum kosztów eksploatacji silnika i niezawodność jego pracy. Trwałości tej odpowiada temperatura uzwojeń θ_n, przy czym:

$$\tau_n = A\, e^{-h\theta_n} \tag{3.11}$$

Względną trwałość izolacji w pewnych warunkach pracy praktycznej o temperaturze zastępczej θ_z, wyznaczonej ze wzoru (3.9), określamy stosunkiem:

$$\chi = \frac{\tau_z}{\tau_n} \tag{3.12}$$

lub też, po uwzględnieniu (3.12), (3.10), (3.11):

$$\chi = e^{h(\theta_n - \theta_z)} \tag{3.13}$$

We wzorze powyższym za wartość θ_n, dla silników trakcyjnych z izolacją klasy B, można przyjąć ok. 130°C. Wtedy wzór (3.13) na względną trwałość izolacji przyjmuje postać:

$$\chi = e^{h(130 - \theta_z)} \tag{3.14}$$

4. Nagrzewanie się silnika przy przerywanej pracy trakcyjnej

Praca elektrycznej lokomotywy kopalnianej jest typową pracą przerywaną, składającą się z cyklicznie powtarzających się okresów pracy (jazdy), przerywanych postojami na stacjach końcowych. Nagrzewanie się silników trakcyjnych podczas pracy przebiega, w sposób stosunkowo skomplikowany, według znanej krzywej "piłowatej", przy czym, po pewnym dłuższym czasie pracy lokomotywy, silniki jej osiągają "umownie ustalony" stan nagrzania. Temperatura uzwojeń podlega wprawdzie nadal okresowym wahaniom pomiędzy wartościami minimalną i maksymalną, lecz temperatura na początku i końcu cyklu pracy pozostaje stałą.

Analizę nagrzewania się silników trakcyjnych można znacznie uprościć i nadać jej charakter bardziej ogólny, gdy zamiast przebiegu chwilowych temperatur uzwojeń (θ) w czasie czyli gdy zamiast funkcji:

$$\theta = f(t) \tag{4.1}$$

analizie poddamy przebieg średnich temperatur uzwojeń podczas poszczególnych cykli pracy ($\theta_{śr}$) czyli:

$$\theta_{śr} = \varphi(t) \tag{4.2}$$

przy czym średnią temperaturę uzwojenia, dla dowolnego cyklu pracy trakcyjnej, określamy wzorem:

$$\theta_{śr} = \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} \theta \, dt \tag{4.3}$$

gdzie:

t_c - czas trwania pełnego cyklu pracy trakcyjnej.

Uwzględniając (2.2) w (4.3) otrzymujemy:

$$\theta_{śr} = \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} \theta_{ot} \, dt + \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} \vartheta \, dt$$

lub też:

$$\theta_{śr} = \theta_{ot.śr} + \vartheta_{śr} \tag{4.4}$$

gdzie:

$\theta_{śr}$ - średnia temperatura uzwojenia podczas rozpatrywanego cyklu pracy trakcyjnej

$\theta_{ot.śr}$ - średnia temperatura otoczenia w czasie trwania cyklu pracy trakcyjnej, wyznaczona ze wzoru:

$$\theta_{ot.śr} = \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} \theta_{ot}\, dt \tag{4.5}$$

$\vartheta_{śr}$ - średni przyrost temperatury uzwojenia ponad średnią temperaturę otoczenia podczas rozpatrywanego cyklu pracy trakcyjnej, wyznaczony ze wzoru:

$$\vartheta_{śr} = \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} \vartheta dt \tag{4.6}$$

We wzorze (4.4) średnia temperatura otoczenia $\theta_{ot.śr}$, wyznaczona przy pomocy (4.5) dla pewnych konkretnych warunków pracy lokomotywy, pozostaje stałą, natomiast średni przyrost temperatury $\vartheta_{śr}$ zmienia się w czasie:

$$\vartheta_{śr} = \chi(t) \tag{4.7}$$

Tę zależność można wyznaczyć w następujący sposób.
Bilans cieplny nagrzewania się uzwojeń silnika dla dowolnego cyklu przerywanej pracy trakcyjnej można uzyskać przez całkowanie równości (2.1) w granicach od $t = 0$ do $t = t_c$, gdzie t_c jest to czas trwania całego cyklu pracy lokomotywy. Oznaczając ponadto przez θ_o i θ_{tc} temperaturę uzwojenia na początku i końcu rozpatrywanego cyklu pracy otrzymujemy:

$$\int_0^{t_c} \Delta P\, dt = \int_{\theta_o}^{\theta_{tc}} c\, G\, d\theta + \int_0^{t_c} \alpha S\, \vartheta\, dt \tag{4.8}$$

względnie:

$$\int_0^{t_c} \Delta P dt = c\, G(\Theta_{t_c} - \Theta_o) + \int_0^{t_c} \alpha S\, \vartheta dt \qquad (4.8a)$$

Temperatura otoczenia na początku i na końcu dowolnego cyklu pracy jest taka sama, czyli:

$$\Theta_{ot.o} = \Theta_{ot.t_c},$$

można więc, zgodnie z (2.2), napisać:

$$\Theta_o = \Theta_{ot.o} + \vartheta_o$$

oraz

$$\Theta_{t_c} = \Theta_{ot.o} + \vartheta_{t_c}$$

gdzie:

ϑ_o i ϑ_{t_c} - przyrosty temperatury uzwojenia ponad temperaturę otoczenia na początku i końcu rozpatrywanego cyklu pracy

lub też

$$\Theta_{t_c} - \Theta_o = \vartheta_{t_c} - \vartheta_o \qquad (4.9)$$

W równaniu (4.8a), można zastąpić zmienną wielkość ϑ, przez średnią jej wartość podczas trwania rozpatrywanego cyklu pracy $\vartheta_{śr}$, która musi spełniać zależność:

$$\vartheta_{śr} \int_0^{t_c} \alpha S\, dt = \int_0^{t_c} \alpha S\, \vartheta dt \qquad (4.10)$$

Jeśli ponadto uwzględnić (4.9) oraz że w przybliżeniu:

$$\vartheta_{t_c} - \vartheta_o = \frac{d\,\vartheta_{śr}}{dt} \cdot t_c \tag{4.11}$$

wówczas z równości (4.8a) otrzymujemy:

$$\frac{\int_o^{t_c} \Delta P dt}{\int_o^{t_c} \alpha S dt}\, dt = \frac{c\,G}{\frac{1}{t_c}\int_o^{t_c} \alpha S dt}\, d\,\vartheta_{śr} + \vartheta_{śr}\, dt \tag{4.12}$$

Oznaczając:

$$\vartheta_{śr.u} = \frac{\int_o^{t_c} \Delta P\, dt}{\int_o^{t_c} \alpha S\, dt} \tag{4.13}$$

oraz:

$$T_{śr} = \frac{c\,G}{\frac{1}{t_c}\int_o^{t_c} \alpha S\, dt} \tag{4.14}$$

otrzymujemy z kolei:

$$\vartheta_{śr.u}\, dt = T_{śr}\, d\,\vartheta_{śr} + \vartheta_{śr}\, dt \tag{4.15}$$

gdzie:

$\vartheta_{śr.u}$ - średni ustalony przyrost temperatury uzwojenia ponad średnią temperaturę otoczenia przy rozpatrywanej pracy trakcyjnej

$T_{śr}$ - średnia cieplna stała czasowa uzwojenia przy rozpatrywanej pracy trakcyjnej

Po rozwiązaniu równania różniczkowego (4.15):

$$\vartheta_{śr} = \vartheta_{śr.u}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_{śr}}}\right) + \vartheta_{śr.o} \cdot e^{-\frac{t}{T_{śr}}} \qquad (4.16)$$

przy czym:

$\vartheta_{śr.o}$ - średni, początkowy (dla czasu $t = 0$) przyrost temperatury uzwojenia ponad średnią temperaturę otoczenia.

Przy pomocy wzoru (4.16) można wyznaczyć krzywą średniego przyrostu temperatury uzwojenia silnika trakcyjnego $\vartheta_{śr} = X(t)$ dla dowolnej przerywanej pracy lokomotywy, dodając zaś do rzędnych otrzymanej w ten sposób krzywej średnią temperaturę otoczenia, zgodnie z równością (4.4), otrzymujemy w końcu przebieg w czasie średniej temperatury uzwojenia silnika przy rozpatrywanej pracy trakcyjnej.

Praktyczny sposób wyznaczenia wielkości $\vartheta_{śr.u}$ oraz $T_{śr}$, występujących we wzorze (4.16), omówiono w następnym rozdziale.

5. Wyznaczenie średniego ustalonego przyrostu temperatury uzwojenia ponad temperaturę otoczenia ($\vartheta_{śr.u}$) oraz średniej cieplnej stałej czasowej silnika ($T_{śr}$) przy przerywanej pracy trakcyjnej

Wyznaczenie wielkości $\vartheta_{śr.u}$ oraz $T_{śr}$ dla pewnych konkretnych warunków pracy trakcyjnej przy pomocy poprzednio wyprowadzonych wzorów (4.13) i (4.14) napotyka na poważne trudności. Celem uniknięcia ich należy wzory powyższe przekształcić.

Zgodnie z ogólnymi uwagami, podanymi w pierwszym rozdziale niniejszej pracy, przyjmujemy:

$$\Delta P = k \cdot I^2 \qquad (5.1)$$

przy obciążeniu więc mocą znamionową ciągłą ma miejsce zależność:

$$\Delta P_c = k\, I_C^2 \tag{5.2}$$

gdzie:

I_C - prąd znamionowy ciągły.

W przypadku utrzymywania się przez czas dłuższy obciążenia prądem I_C, przy założeniu stałej temperatury otoczenia, uzwojenia silnika uzyskają ustalony przyrost temperatury $\vartheta_{u.J}$, który zgodnie z (2.6a) i przy uwzględnieniu (5.2) wyniesie:

$$\vartheta_{u.J_C} = \frac{k\, I_C^2}{\alpha_j S} \tag{5.3}$$

stąd:

$$S = \frac{k\, I_C^2}{\alpha_j\, \vartheta_{u.I_C}} \tag{5.4}$$

przy czym:

α_j - współczynnik oddawania ciepła podczas jazdy silnika

Cieplna stała czasowa silnika podczas jazdy przyjmuje zgodnie z (2.6b) wartość:

$$T_j = \frac{c\ G}{\alpha_j\ S} \tag{5.5}$$

skąd znowu:

$$c\ G = T_j\, \alpha_j\, S \tag{5.6}$$

Po przedstawieniu (5.1) i (5.4) do (4.13) i po przekształceniu otrzymujemy:

$$\vartheta_{śr.u} = \frac{I_{sk}^2}{I_C^2 \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} \frac{\alpha}{\alpha_j} dt} \vartheta_{d.C} \qquad (5.7)$$

gdzie:

I_{sk} - prąd skuteczny przy rozpatrywanej pracy trakcyjnej wyznaczony ze wzoru:

$$I_{sk} = \sqrt{\frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} I^2 \, dt} \qquad (5.8)$$

$\vartheta_{d.C}$ - dopuszczalny przyrost temperatury uzwojeń przy pracy znamionowej ciągłej [8], gdyż dla silników trakcyjnych

$$\vartheta_{u.} J_C = \vartheta_{d.C} \qquad (5.9)$$

Po podstawieniu (5.6) do (4.14) otrzymujemy:

$$T_{śr} = \frac{T_j}{\frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} \frac{\alpha}{\alpha_j} dt} \qquad (5.10)$$

Wartość całki:

$$\frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} \frac{\alpha}{\alpha_j} dt \qquad (5.11)$$

we wzorach (5.7) i (5.10) można, dla konkretnej pracy trakcyjnej, wyznaczyć w sposób następujący. Przyjmując przebieg funkcji:

$$\frac{\alpha}{\alpha_j} = \varphi(t)$$

zgodnie z rys.1 otrzymujemy:

$$\frac{1}{t_c}\int_0^{t_c} \frac{\alpha}{\alpha_j}\,dt = \frac{1}{t_c}\left(y\,t_{p1} + 1\,t_{j1} + y\,t_{p2} + 1t_{j2}\right)$$

względnie po odpowiednim przekształceniu:

$$\frac{1}{t_c}\int_0^{t_c} \frac{\alpha}{\alpha_j}\,dt = \frac{\varepsilon}{100} + y\left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right) \qquad (5.12)$$

gdzie:

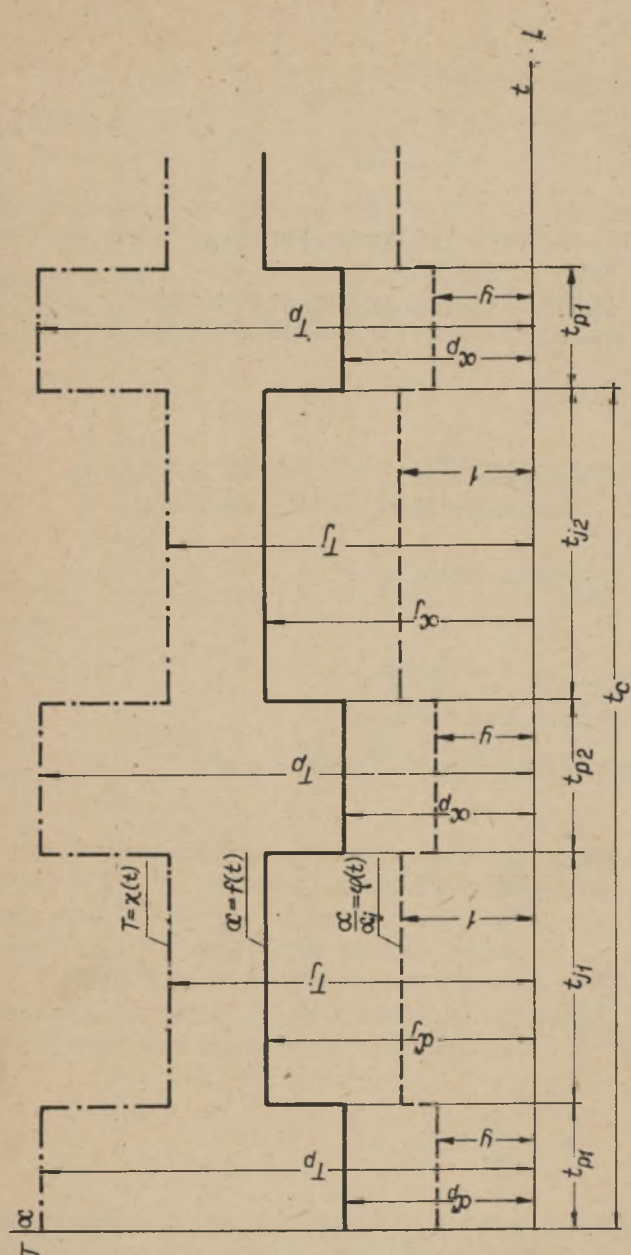
ε - względny czas jazdy lokomotywy przy rozpatrywanej pracy trakcyjnej, wyznaczony ze wzoru:

$$\varepsilon = \frac{t_{j1} + t_{j2}}{t_c}\,100\ [\%] \qquad (5.13)$$

y - stosunek odpowiednich współczynników oddawania ciepła względnie cieplnych stałych czasowych, wyznaczony ze wzoru:

$$y = \frac{\alpha_p}{\alpha_j} \qquad (5.14)$$

α_p - współczynnik oddawania ciepła podczas postoju lokomotywy



Rys. 1. Zależności: $\alpha = f(t)$, $\frac{\alpha}{\alpha_j} = \varphi(t)$ oraz $T = \chi(t)$ przy przerywanej pracy trakcyjnej, t_{p1}, t_{p2} – czas postoju lokomotywy w podszybiu wzgl. stacji załadowczej, t_{j1}, t_{j2} – czas jazdy pociągu z pociągiem pustym wzgl. pełnym, $t_c = t_{p1} + t_{j1} + t_{p2} + t_{j2}$ – całkowity czas jednego cyklu pracy trakcyjnej, $y = \frac{\alpha_p}{\alpha_j}$, gdzie α_p, α_j – współczynniki oddawania ciepła podczas postoju wzgl. jazdy (pracy) lokomotywy, T_p, T_j – cieplne stałe czasowe uzwojeń silnika podczas postoju wzgl. jazdy (pracy) lokomotywy

lub też:

$$y = \frac{T_j}{T_p} \tag{5.14a}$$

T_p - cieplna stała czasowa silnika podczas postoju

Do zależności (5.14a (dochodzimy w następujący sposób: cieplną stałą czasową podczas jazdy silnika można przedstawić wzorem:

$$T_j = \frac{c\ G}{\alpha_j\ S}$$

analogicznie podczas postoju silnika:

$$T_p = \frac{c\ G}{\alpha_p\ S}$$

Dzieląc powyższe równości stronami otrzymujemy:

$$\frac{T_j}{T_p} = \frac{\alpha_p}{\alpha_j}$$

lub uwzględniając (5.14)

$$\frac{T_j}{T_p} = y$$

Po podstawieniu (5.12) w (5.7) względnie (5.10) otrzymujemy w końcu:

$$\vartheta_{śr.u} = \frac{I_{sk}^2}{I_C^2\left[\frac{\varepsilon}{100} + y\left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right)\right]}\ \vartheta_{d.C} \tag{5.15}$$

względnie:

$$T_{śr} = \frac{T_j}{\frac{\varepsilon}{100} + y\left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right)} \qquad (5.16)$$

Przy pomocy wzorów (5.15) i (5.16) można w sposób stosunkowo prosty wyznaczyć wartości $\vartheta_{śr.u}$ i $T_{śr}$ dla znanego silnika przy dowolnej przerywanej pracy trakcyjnej, przy czym za $\vartheta_{d.c}$ należy przyjąć, zgodnie z (5.9), odpowiednią wartość z normy [8]

6. Dopuszczalna wartość prądu skutecznego I_{sk} silnika trakcyjnego przy jego eksploatacji . d

Po odpowiednim przekształceniu wzoru (5.15) otrzymujemy wzór:

$$I_{sk} = I_C \sqrt{\frac{\vartheta_{śr.u}}{\vartheta_{d.C}} \left[\frac{\varepsilon}{100} + y\left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right)\right]} \qquad (6.1)$$

przy pomocy którego możemy z kolei wyznaczyć obciążenie silnika (I_{sk}), odpowiadające dowolnie przyjętemu przyrostowi temperatury ($\vartheta_{śr.u}$) przy rozpatrywanej, przerywanej pracy trakcyjnej o względem czasie pracy ε.

Przyjmując w powyższym wzorze za $\vartheta_{śr.u}$ maksymalnie dopuszczalna wartość średniego przyrostu temperatury ($\vartheta_{śr.u.d}$) w pewnych warunkach pracy, czyli:

$$\vartheta_{śr.u} = \vartheta_{śr.u.d} \qquad (6.2)$$

otrzymujemy maksymalnie dopuszczalną wartość prądu skutecznego ($I_{sk.d}$) w danych warunkach pracy lokomotywy:

$$I_{sk.d} = I_C \sqrt{\frac{\vartheta_{śr.u.d}}{\vartheta_{d.C}} \left[\frac{\varepsilon}{100} + y\left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right)\right]} \qquad (6.3)$$

W rozpatrywanych więc warunkach pracy trakcyjnej muszą być tak dobrane jej parametry, ażeby wartość prądu skutecznego wyznaczona ze wzoru (5.8) przy uwzględnieniu rzeczywistych obciążeń (I) silnika trakcyjnego, nie przekraczała wartości dopuszczalnej ($I_{sk.d}$), wyliczonej ze wzoru (6.3) czyli:

$$I_{sk} \leq I_{sk.d} \tag{6.4}$$

W przeciwnym bowiem razie, tzn. gdyby:

$$I_{sk} > I_{sk.d}$$

wówczas średni ustalony przyrost temperatury uzwojeń silnika przekroczyłby wartość dopuszczalną co w konsekwencji, przy dłuższym utrzymywaniu się takiego stanu, pociągnęłoby odniżenie trwałości izolacji uzwojeń poniżej wartości normalnej, ekonomicznie uzasadnionej.

Przy pracy trakcyjnej na powierzchni, gdzie temperatura otoczenia zmienia się w sposób naturalny, a średnie dobowe maksima temperatury, nawet w najbardziej gorących miesiącach, nie przekraczają 25 [°C] można według [8] przyjąć za dopuszczalną wartość średniego ustalonego przyrostu temperatury ($\vartheta_{sr.u.d}$) wartość dopuszczalną przy pracy znamionowej ciągłej ($\vartheta_{d.C}$) czyli:

$$\vartheta_{sr.u.d} = \vartheta_{d.C} \tag{6.5}$$

a wówczas wzór ogólny (6.3) przyjmuje postać:

$$I_{sk.d} = I_C \sqrt{\frac{\varepsilon}{100} + y\left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right)} \tag{6.6}$$

W warunkach występujących w podziemiach kopalń, gdzie temperatura otoczenia, podlegając tylko pewnym nieznacznym wahaniom, pozostaje stale bliska 25 [°C], przyjęcie we wszystkich przypadkach równości (6.5), jak to ma miejsce dla pracy trakcyjnej na powierzchni, i wyznaczanie wartości dopu-

szczalnej prądu skutecznego ze wzoru (6.6), nie wydaje się słuszne i zaprojektowanie silników trakcyjnych dołowych według tych samych wzorów doprowadziłoby do nadmiernie wysokiej temperatury uzwojeń co odbiłoby się ujemnie na ich trwałości.

Sprawa dopuszczalnych wartości przyrostów temperatury uzwojeń ($\vartheta_{sr.u.d}$) w warunkach dołowych została szczegółowo omówiona w innych pracach autora [6] [7]

LITERATURA

[1] Gotter G.: Erwärmung Kühlung elektrischer Maschinen. Berlin 1954 Springer-Verlag.

[2] Jaworski Cz.: Teoria Trakcji Elektrycznej. Warszawa 1956 Wydawnictwa Komunikacyjne.

[3] Pełczewski W.: Zagadnienia Cieplne w Maszynach Elektrycznych. Warszawa 1956 Państwowe Wydawnictwa Techniczne.

[4] Szklarski L.: Trakcja Elektryczna w Kopalni. Katowice 1960 Wydawnictwo Górniczo-Hutnicze.

[5] Wołotkowskij A.S.: Rudnicznaja Elektrowoznaja Tiaga. Moskwa 1955 Ugletiechizdat.

[6] Zarański T.: Wpływ temperatury wyrobisk na stopień wykorzystania mocy elektrycznych lokomotyw kopalnianych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 1961.

[7] Zarański T.: Dopuszczalne obciążenie kopalnianych lokomotyw elektrycznych w zależności od ilości zmian roboczych na dobę. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 1961.

[8] Norma.; Silniki trakcyjne prądu stałego. PN-57/E-06001.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ НАГРЕВА ТРАКЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ РУДНИЧНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

Резюме

В реферате выведен, в отнесении к классической теории нагрева электрических машин, простой метод анализа нестационарных тепловых состояний, выступающих в тракционных электродвигателях рудничных электровозов во время их эксплоатации.

В особенности выведено уравнение нагрева и остывания обмотки двигателя при переменной температуре окружающего пространства (охлаждающей среды). Затем выведено уравнение для приведённой температуры и относительной прочности изоляции.

В заключении приведён способ определения пробела среднего нагрева обмоток и допускаемой силы тока двигателя при тракционной работе с перерывами.

EINIGE PROBLEME DER ERHITZUNG VON MOTOREN DER ELEKTRISCHEN GRUBENLOKOMOTIVEN

Zusammenfassung

In dem Vortrag wurde in Bezug auf klassische Theorie der Erhitzung der elektrischen Maschinen — von einer einfachen Analysen — Methode zur Feststellung der durschnittlichen zeitlichen Erhitzung die bei der Eksploatation von Motoren der elektrischen Untertage-Lokomotiven auftreten. Besonders hat man eine Gleichung entwickelt für die Erhitzung und Erkältung der Wicklungen des Motors bei verschiedenen Temperaturen der Umgebung, nachher hat man einen speziellen Ausdruck für eine probehalber gewählte Temperatur eingefürt sowie einen relativen Haltbarkeitswert der Isolation. Zuletzt hat man eine Methode zur Feststellung der durcchnittlichen zeitlichen Erhitzung der Wicklungen und der Höhe ener zulässigen Stromstärke bei intermittierendem Traktionsbetrieb angegeben.