

TADEUSZ ZARAŃSKI

WPLYW TEMPERATURY WYROBISK NA STOPIEŃ WYKORZYSTANIA  
MOCY ELEKTRYCZNYCH LOKOMOTYW KOPALNIANYCH

Streszczenie. Droga analizy nagrzewania się silnika trakcyjnego przy pracy na powierzchni i w przeciętnych warunkach pod ziemią wykazano, że niesłuszne jest stosowanie pod ziemią tego samego dopuszczalnego przyrostu temperatury uzwojeń ponad temperaturę otoczenia, co na powierzchni. Ze względu bowiem na ogólnie wyższe średnie temperatury otoczenia, występujące w kopalniach, uzwojenia silnika przy pracy pod ziemią osiągają wyższą temperaturę, a w konsekwencji znacznie niższą trwałość, niż przy pracy na powierzchni.

Następnie wyprowadzono zależność pomiędzy stopniem wykorzystania mocy, a nagrzewaniem silnika trakcyjnego; w końcu zaś wyznaczono wzór na dopuszczalną wartość stopnia wykorzystania mocy lokomotywy przy pracy pod ziemią w zależności od temperatury otoczenia (wyrobisk).

1. Uwagi wstępne

Przy elektrycznej trakcji dołowej, zarówno podczas projektowania jak i w praktyce ruchowej (eksploatacji), stosowane są te same kryteria przy wykorzystywaniu mocy lokomotyw, co przy trakcji na powierzchni [1], [2]. Jako punkt wyjścia przyjmowane są zwykle również przy pracy pod ziemią dopuszczalne przyrosty temperatury uzwojeń silnika ponad temperaturę otoczenia (czynnika chłodzącego), podane przez normę "Silniki Trakcyjne Prądu Stałego PN-57/E-06001" [3].

Przyjęcie takie pod względem formalnym nie budzi wątpliwości, gdyż średnia temperatura wyrobisk przewożonych nie przekracza na ogół wartości 25 [°C], założonej jako maksimum przez w/w normę; pod względem jednak merytorycznym nasuwają się poważne zastrzeżenia.

W warunkach chłodzenia silników trakcyjnych zachodzą poważne różnice przy eksploatacji na powierzchni i pod ziemią. Przy pracy na powierzchni temperatura otoczenia (czynnika chłodzącego) zmienia się w sposób naturalny w ciągu roku, osiągając w najbardziej gorącym okresie krótkotrwałe maksimum miesięczne, nieprzekraczające 25 [°C]. Natomiast przy pracy w podziemiach kopalń temperatura otoczenia pozostaje w przybliżeniu stała, w wysokości ok. 25 [°C].

W następstwie powyższych różnic temperatura uzwojeń, przy trakcji dołowej, utrzymuje się praktycznie stale na wysokości, którą, przy trakcji na powierzchni z identycznym stopniem wykorzystania mocy lokomotywy, osiąga tylko szczytowo i to w najgorętszym okresie roku. W dalszej konsekwencji trwałość izolacji, która ze wzrostem temperatury o 8-10 [°C] maleje praktycznie do połowy, obniża się przy pracy pod ziemią poważnie w stosunku do wartości, przyjętej przez normę [3] za ekonomicznie uzasadnioną i osiąganą przy pracy na powierzchni.

W celu otrzymania właściwego kryterium dla określenia do puszczalnego stopnia wykorzystania mocy lokomotywy przy trakcji dołowej w zależności od warunków lokalnych (temperatury wyrobisk), przeprowadzono w rozdziałach 2, 3 i 4 analizę na grzewania się silników trakcyjnych, wykonanych zgodnie z normą [3], typu stosowanego w lokomotywach kopalnianych, przy pracy tak na powierzchni jak i w podziemiach kopalń. Przy przeprowadzeniu analizy nagrzewania się silników ograniczono się do nagrzewania uzwojeń, których izolacja jest najbardziej narażoną częścią silnika na uszkodzenia z powodu przegrzania.

Do analizy zastosowano wzory, wyprowadzone w pracy autora pt. "Pewne zagadnienia z nagrzewania się silników trakcyjnych elektrycznych lokomotyw kopalnianych" [4]. Wzory te zostały wyprowadzone przy założeniach upraszczających, powszechnie stosowanych w klasycznej teorii nagrzewania się maszyn elektrycznych [5], [6] i [7]. Otrzymane zatem, na ich podstawie, wyniki analizy obciążone są pewnymi błędami, niemniej jednak dokładność uzyskanych w ten sposób wyników można uważać za dostateczną do celów praktycznych.

## 2. Nagrzewanie się silnika trakcyjnego przy pracy na powierzchni

### 2.1. Warunki pracy

Do analizy nagrzewania się silnika przyjęto, że temperatura otoczenia ( $\theta_{ot}$ ) zmienia się w ciągu dnia w sposób naturalny, podlegając wahaniom pomiędzy granicznymi wartościami, minimalną  $\theta_{ot.min}$  oraz maksymalną  $\theta_{ot.maks}$ . Graniczne wartości dziennych temperatur zmieniają się w ciągu roku kalendarzowego, przyjmując różne wartości w poszczególnych miesiącach. Dla naszych warunków klimatycznych (Górnośląski Okręg Przemysłowy) można przyjąć za podstawę do analizy odpowiednie wartości średnie z okresu 50-letniego [8] podane w tablicy 1 oraz na rysunku 1.

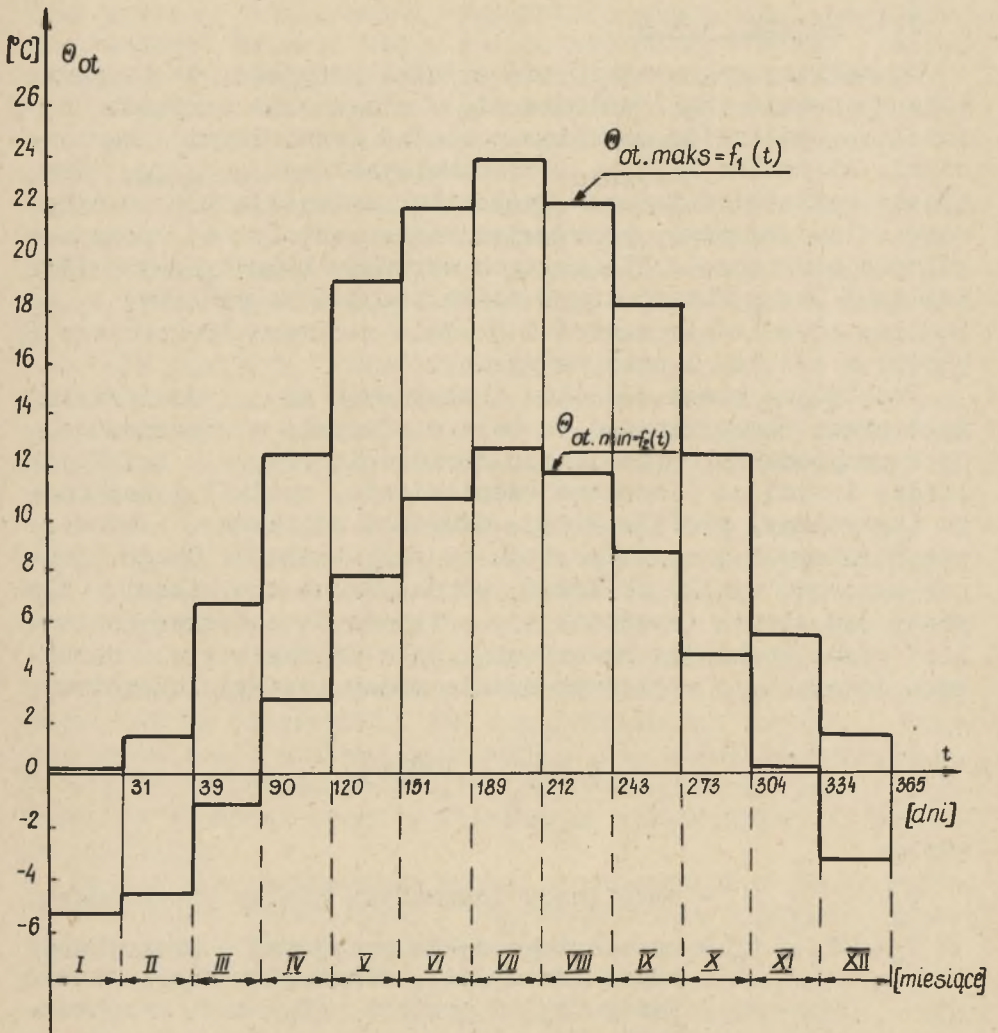
Praktyczna praca silników trakcyjnych na powierzchni jest pracą skomplikowaną, o bardzo różnych, w poszczególnych przypadkach, przebiegach obciążenia (I), zależnych między innymi od pionowego (wzniesienia, spadki) i poziomego (krzywizny) profilu linii, długości odcinków międzyprzystankowych i czasu postoju na przystankach. Chcąc jednak otrzymać wyniki obliczeń, porównywalne z wynikami dla pracy pod ziemią (rozdział 3), przyjęto za podstawę do analizy pracę trakcyjną przerywaną, jaka ma miejsce w warunkach dołowych, o względnym czasie pracy (jazdy) lokomotywy:

$$\epsilon = \frac{t_j}{t_c} \cdot 100[\%] \quad (1)$$

gdzie:

$t_j$  - czas jazdy lokomotywy między przystankami  
 $t_c = t_j + t_p$  - czas całego cyklu przyjętej przerywanej pracy trakcyjnej, składający się z czasów jazdy ( $t_j$ ) i postoju ( $t_p$ ) na przystankach.

Przyjęto również, że lokomotywa pracuje przez szereg następujących po sobie dni po 24 godz/dobę (przypadek najbardziej niekorzystny pod względem cieplnym), w następstwie czego stan nagrzania silnika można uznać za ustalony. Średnie przyrosty temperatury uzwojeń ( $\dot{v}_{gr}$ ) ponad temperaturę otoczenia, w ciągu poszczególnych cykli pracy, podlegają



Rys. 1. Wykres średnich dziennych maksimów ( $\theta_{ot.maks}$ ) i minimum ( $\theta_{ot.min}$ ) temperatury otoczenia w poszczególnych miesiącach

Tablica 1

Średnie dzienne maksima ( $\theta_{ot.maks}$ ) i minima ( $\theta_{ot.min}$ ) temperatury otoczenia w poszczególnych miesiącach dla okresu 50-letniego

Rodzaj średniej dziennej temperatury	M i e s i a c											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Maksimum w [°C]	0,1	1,6	6,5	12,5	19,1	22,0	23,8	22,1	18,1	12,3	5,5	1,5
Minimum w [°C]	-5,5	-4,7	-1,3	2,8	7,7	10,6	12,5	11,7	8,6	4,5	0,1	-3,4

wprawdzie okresowym zmianom, w związku z dobowymi zmianami temperatury otoczenia, lecz średnia wartość tych przyrostów temperatury w ciągu doby, jest równa wartości ustalonej ( $v_{\text{sr.u}}$ ) dla przyjętych do obliczeń warunków pracy lokomotywy.

Odnosnie obciążenia obliczeniowego przyjęto, że moc lokomotywy jest maksymalnie wykorzystana, w związku z czym wspomniany wyżej ustalony średni przyrost temperatury ( $v_{\text{sr.u}}$ ) jest równy maksymalnie dopuszczalnej wartości przy pracy ciągłej ( $v_{\text{d.c}}$ ) zgodnie z normą [3]:

$$v_{\text{sr.u}} = v_{\text{d.c}} \quad (2)$$

Warunek (2) jest spełniony, gdy prąd skuteczny ( $I_{\text{sk}}$ ), wyznaczony dla przyjętej pracy obliczeniowej przy pomocy wzoru:

$$I_{\text{sk}} = \sqrt{\frac{1}{t_c} \int_0^t I^2 dt} \quad (3)$$

jest równy, zgodnie z [4], wartości dopuszczalnej obliczonej ze wzoru:

$$I_{\text{sk.d}} = I_C \sqrt{\frac{\varepsilon}{100} + y \left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right)} \quad (4)$$

gdzie:

- $I_C$  - prąd znamionowy ciągły silnika,
- $\varepsilon$  - względny czas pracy (jazdy) lokomotywy z (1),
- $y = \frac{T_j}{T_p}$  - stosunek cieplnych stałych czasowych uzwojeń silnika podczas jazdy ( $T_j$ ) i postoju ( $T_p$ ).

## 2.2. Zastosowane wzory

Bez większego błędu można przyjąć, że dzienne zmiany temperatury otoczenia  $\theta_{\text{ot}}$  przebiegają w czasie prostolinijnie i że jej wartości graniczne, ( $\theta_{\text{ot.min}}$  i  $\theta_{\text{ot.maks}}$ ) przesunięte są w czasie o 12 godzin; jeżeli ponadto rozpoczniemy liczyć czas od chwili, gdy temperatura otoczenia przyjmuje wartość minimalną  $\theta_{\text{ot.min}}$ , wówczas dzienny przebieg temperatury otoczenia przedstawi nam krzywa  $\theta_{\text{ot}} = f(t)$  na rys. 2.

Dzienne więc zmiany temperatury otoczenia można przedstawić przy pomocy wzorów:

dla  $t = 0 \dots 12$  [h]

$$\theta_{ot} = \theta_{ot.min} + k \cdot t \quad (5)$$

dla  $t = 12 \dots 24$  [h]

$$\theta_{ot} = \theta_{ot.maks} - k(t-12) \quad (6)$$

gdzie:

$$k = \frac{\theta_{ot.maks} - \theta_{ot.min}}{12} \quad (7)$$

Do wyznaczenia chwilowych, minimalnych oraz maksymalnych wartości średniego przyrostu temperatury ( $v_{\acute{s}r}$ ) uzwojeń silnika ponad temperaturę otoczenia zastosowano wzór, wyprowadzony w [4], który po uwzględnieniu (2) przyjmuje postać:

$$v_{\acute{s}r} = (v_{dc} - T_{\acute{s}r} \cdot k) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\acute{s}r}}}\right) + v_{\acute{s}r.0} \cdot e^{-\frac{t}{T_{\acute{s}r}}} \quad (8)$$

$v_{d.c}$  - dopuszczalny przyrost temperatury uzwojeń przy pracy ciągłej zgodnie z normą [3]

$$T_{\acute{s}r} = \frac{T_j}{\frac{\epsilon}{100} + y \left(1 - \frac{\epsilon}{100}\right)}$$

- średnia wartość cieplnej stałej czasowej silnika [4] przy rozpatrywanej pracy trakcyjnej; wielkości  $T_j$ ,  $\epsilon$  oraz  $y$  jak w (4),

$k$  - współczynnik wyznaczony z (7),

$v_{\acute{s}r.0}$  - początkowa wartość (dla czasu  $t = 0$ ) średniego przyrostu temperatury uzwojeń wyznaczona przy przyjęciu, że średnie przyrosty temperatury na początku ( $v_{\acute{s}r.0}$ ) i na końcu dziennego cyklu ( $v_{\acute{s}r.24}$ ) dla czasu  $t = 24$  godz. są sobie równe (stan nagrzania ustalony);

zatem:

$$v'_{\text{śr.0}} = \frac{(v'_{\text{d.C}+T_{\text{śr}} \cdot k}) \cdot (1 - e^{-\frac{12}{T_{\text{śr}}}}) + (v'_{\text{d.C}-T_{\text{śr}} \cdot k}) \cdot (1 - e^{-\frac{12}{T_{\text{śr}}}}) e^{-\frac{12}{T_{\text{śr}}}}}{1 - e^{-\frac{24}{T_{\text{śr}}}}}$$

Po wyznaczeniu z (8) przyrostów temperatury:  $v'_{\text{śr.0}}$  (dla  $t = 0$ ),  $v'_{\text{śr.12}}$  (dla  $t = 12$  godz.) oraz  $v'_{\text{śr.24}}$  (dla  $t = 24$  godz.) otrzymano z kolei odpowiadające im średnie temperatury uzwojeń:

dla  $t = 0$

$$\theta_{\text{śr.0}} = \theta_{\text{ot.min}} + v'_{\text{śr.0}} \quad (10)$$

dla  $t = 12$  godz.

$$\theta_{\text{śr.12}} = \theta_{\text{ot.maks}} + v'_{\text{śr.12}} \quad (11)$$

dla  $t = 24$  godz.

$$\theta_{\text{śr.24}} = \theta_{\text{ot.min}} + v'_{\text{śr.24}} \quad (12)$$

Wartości te naniesiono na rys. 2, a otrzymane w ten sposób punkty połączono odpowiednimi odcinkami prostymi, otrzymując uproszczony wykres średniej temperatury uzwojeń w zależności od czasu:  $\theta_{\text{śr}} = \varphi(t)$ . Zależność tę można przedstawić wzorami:

dla  $t = 0 \dots 12$  godz.

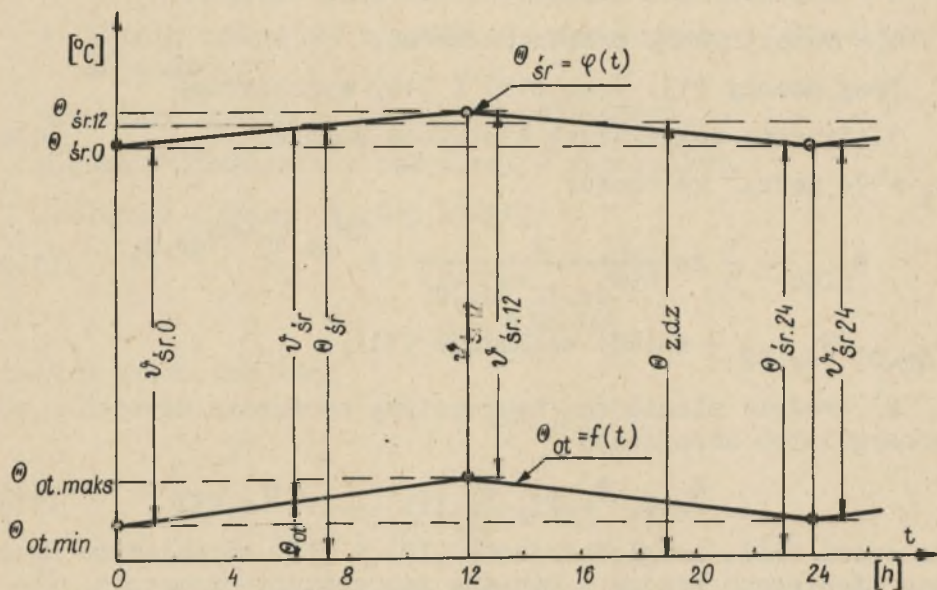
$$\theta_{\text{śr}} = \theta_{\text{śr.0}} + \frac{\theta_{\text{śr.12}} - \theta_{\text{śr.0}}}{12} \cdot t \quad (13)$$

dla  $t = 12 \dots 24$  godz.

$$\theta_{\text{śr}} = \theta_{\text{śr.12}} - \frac{\theta_{\text{śr.12}} - \theta_{\text{śr.0}}}{12} \cdot (t-12) \quad (14)$$



Z rysunku 2 wynika, że średnia temperatura uzwojeń podlega poważnym wahaniom dobowym. W tych warunkach, dla wyznaczenia trwałości izolacji uzwojeń, najlepiej jest oprzeć się



Rys. 2. Wykres dziennych zmian temperatury otoczenia  $\theta_{ot}=f(t)$  średniego przyrostu temperatury uzwojeń ponad temperaturę otoczenia  $\nu_{sr}$  oraz średniej temperatury uzwojeń  $\theta_{sr}=\varphi(t)$  przy pracy na powierzchni,  $\theta_{z.dz}$  - dzienna temperatura zastępcza uzwojeń

na tzw. "temperaturze zastępczej uzwojeń". Jako temperaturę zastępczą uzwojeń, dla pewnego przedziału czasu (dzień, miesiąc, rok) przyjmujemy taką stałą temperaturę w rozpatrywanym przedziale czasu, zastępującą rzeczywistą, zmienną w czasie temperaturę uzwojeń  $\theta$ , przy której względna utrata

trwałości izolacji jest taka sama, jak przy zastąpionej temperaturze. Ogólny wzór na temperaturę zastępczą uzwojeń  $\theta_z$  wprowadzono w [4]:

$$\theta_z = \frac{1}{h} \ln \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} e^{h\theta} dt \quad (15)$$

$h$  - współczynnik zależny od izolacji uzwojeń,

$t_1$  - rozpatrywany przedział czasu.

Przy pomocy (15) oraz (13) i (14) wyznaczono:

1) dzienną temperaturę zastępczą uzwojeń  $\theta_{z.dz}$  (dla  $t_1 = 24$  godz.) ze wzoru:

$$\theta_{z.dz} = \frac{1}{h} \ln \frac{1}{h(\theta_{\text{śr.12}} - \theta_{\text{śr.0}})} (e^{h\theta_{\text{śr.12}}} - e^{h\theta_{\text{śr.0}}}) \quad (16)$$

$\theta_{\text{śr.0}}, \theta_{\text{śr.12}}$  - z (10) względnie (11);

2) średnie miesięczne temperatury zastępcze uzwojeń w poszczególnych miesiącach

$$\theta_{z.I}, \theta_{z.II}, \theta_{z.III} \dots \theta_{z.XII} \quad (17)$$

ze wzoru (16), uwzględniając w (10) i (11) odpowiednie średnie miesięczne minima i maksymalne temperatury otoczenia (tablica 1);

3) roczną temperaturę zastępczą  $\theta_{z.r}$  (dla  $t_1 = 365$  dni) ze wzoru:

$$\theta_{z.r} = \frac{1}{h} \ln \frac{1}{365} (31 \cdot e^{h\theta_{z.I}} + 28 \cdot e^{h\theta_{z.II}} + \dots + 31 \cdot e^{h\theta_{z.XII}}) \quad (18)$$

$$\theta_{z.I}, \theta_{z.II}, \dots \theta_{z.XII} - z(17)$$

### 2.3. Wyniki obliczeń

Poniżej zostały podane wyniki obliczeń nagrzewania się silnika przy trakcji na powierzchni dla przyjętych warunków pracy. Celem uzyskania wyników porównywalnych z wynikami obliczeń nagrzewania się przy trakcji w podziemiach kopalń (rozdział 3) przyjęto do obliczeń:

- 1) pracę trakcyjną przerywaną o względnym czasie jazdy,

$$\varepsilon = 70 [\%]$$

- 2) silnik trakcyjny o następujących danych charakterystycznych,

wykonanie - zgodne z normą PN-57/E-06001,

budowa - zamknięta z chłodzeniem naturalnym,

izolacja - klasy B, dla której:

$$v_{d.C}^* = 120 [^{\circ}\text{C}]$$

$$h = 0,06931$$

cieplna stała czasowa:

$$T_j = 3,5 \text{ godz.}$$

$$y = \frac{T_i}{T_p} = 0,7$$

Wyniki obliczeń dla poszczególnych miesięcy zestawiono w tablicy 2. Oznaczenia, użyte w tej tablicy, są identyczne jak na rys. 2. Przy pomocy temperatur zastępczych  $\theta_z$  w poszczególnych miesiącach, podanych w tablicy 2, wyliczono ostatecznie, ze wzoru (18), roczną temperaturę zastępczą  $\theta_{z.r}$  uzwojeń silnika trakcyjnego przy pracy na powierzchni

$$\theta_{z.r} \approx 130 [^{\circ}\text{C}] \quad (19)$$

Tablica 2

Wyniki obliczeń nagrzewania się uzwojeń silnika trakcyjnego przy pracy na powierzchni

Miesiąc	$\theta_{\text{ot.min}}$ [°C]	$\theta_{\text{ot.maks}}$ [°C]	$\nu_{\text{śr.0}} = \nu_{\text{śr.24}}$ [°C]	$\nu_{\text{śr.12}}$ [°C]	$\theta_{\text{śr.0}}$ [°C]	$\theta_{\text{śr.12}}$ [°C]	$\theta_{\text{śr.24}}$ [°C]	$\theta_{\text{z}}$ x) [°C]
I	- 5,5	0,1	121,6	118,4	116,1	118,5	116,1	117,5
II	- 4,7	1,6	121,8	118,2	117,1	119,8	117,1	118,5
III	- 1,3	6,5	122,0	118,0	120,7	124,5	120,7	122,7
IV	2,8	12,3	122,6	117,4	125,4	129,7	125,4	127,6
V	7,7	19,1	123,2	116,8	130,9	135,9	130,9	133,5
VI	10,6	22,0	123,1	116,9	133,7	138,9	133,7	136,7
VII	12,5	23,0	123,2	116,8	135,7	140,6	135,7	138,2
VIII	11,7	22,1	122,8	117,2	134,5	139,3	134,5	136,9
IX	8,6	18,1	122,5	117,5	131,1	135,6	131,1	133,4
X	4,5	12,3	122,0	117,9	126,5	130,2	126,5	128,4
XI	0,1	5,5	121,5	118,5	121,6	124,0	121,6	122,8
XII	- 3,4	1,5	121,3	118,7	117,9	120,2	117,9	119,1

x) średnia miesięczna temperatura zastępcza.

### 3. Nagrzewanie się silnika trakcyjnego przy pracy w podziemiach kopalń

#### 3.1. Warunki pracy

Temperatury otoczenia ( $\theta_{ot}$ ) na stacjach końcowych trakcji elektrycznej (podszybia, stacja załadowcza) podlegają pewnym nieznacznym wahaniom dziennym, miesięcznym względnie rocznym. Dla uproszczenia jednak analizy oraz w celu otrzymania wyników średnich rocznych przyjęto, że temperatury te są stałe ( $\theta_{ot.1}$  - na podszybiu,  $\theta_{ot.2}$  - w stacji załadowczej) i równe odpowiednim średnim temperaturom rocznym. Dalej przyjęto, że temperatura otoczenia zmienia się, podczas jazdy po ciągu między stacjami końcowymi, prostolinijnie, proporcjonalnie do czasu.

Praktyczna praca trakcyjna w warunkach dołowych jest pracą przerywaną; za podstawę więc do analizy przyjęto obliczeniową pracę przerywaną, o względnym czasie pracy (jazdy) lokomotywy:

$$\varepsilon = \frac{t_j}{t_c} 100 [\%] \quad (20)$$

gdzie:

$t_j = t_{j.1} + t_{j.2}$  - łączny czas przejazdów lokomotywy z podszybia do stacji załadowczej (pociąg pusty) i z powrotem (pociąg ładowny),

$t_c = t_j + t_p$  - całkowity czas cyklu obliczeniowej pracy przerywanej, składający się z w/w łącznego czasu jazdy ( $t_j$ ) oraz czasu postoju na obu stacjach końcowych ( $t_p = t_{p.1} + t_{p.2}$ ).

Podobnie, jak w przypadku pracy na powierzchni (rozdział 2), przyjęto pracę na 3 zmiany (24 godzin na dobę) przez szereg następujących po sobie dób (pod względem cieplnym najbardziej niekorzystny przypadek). Stan więc nagrzewania silnika można uznać za ustalony. Chwilowe wprawdzie wartości przyrostu temperatury uzwojeń ponad temperaturę otoczenia podlegają w ciągu cyklu pracy nieznacznym, okresowym waha-

niom, w następstwie zmian obciążenia i temperatury otoczenia, średnia natomiast wartość przyrostu temperatury w poszczególnych cyklach ( $v'_{sr}$ ) pozostaje stałą i równą wartości ustalonej ( $v'_{sr,u}$ ) dla przyjętych warunków pracy lokomotywy.

Obciążenie silnika trakcyjnego zostało dobrane identycznie, jak w przypadku obliczenia nagrzania przy pracy na powierzchni (rozdział 2), a mianowicie przyjęto maksymalne, dopuszczalne przez normę [3], wykorzystanie mocy lokomotywy, przy którym średni ustalony przyrost temperatury uzwojeń ( $v'_{sr,u}$ ), w ciągu cyklu pracy, jest równy maksymalnie dopuszczalnej wartości przy pracy ciągłej ( $v'_{d,C}$ ), czyli:

$$v'_{sr,u} = v'_{d,C} \quad (21)$$

a prąd skuteczny (3) jest równy wartości dopuszczalnej  $I_{sk,d}$  [4]

$$I_{sk,d} = I_C \sqrt{\frac{\epsilon}{100} + y(1 - \frac{\epsilon}{100})}$$

oznaczenia jak przy (4) z uwzględnieniem (20).

### 3.2. Zastosowane wzory

Wahania temperatury uzwojeń silników trakcyjnych przy pracy pod ziemią, w warunkach nagrzania ustalonego, są bardzo małe, gdyż ciepłota stała czasowa silników trakcyjnych, stosowanych pod ziemią, jest stosunkowo duża, w porównaniu z czasami trwania cykli pracy trakcyjnej ( $t_c$ ). W tych warunkach różnice pomiędzy temperaturami średnią ( $\theta_{sr}$ ) i zastępczą ( $\theta_z$ ) uzwojeń są nieznaczne, czyli:

$$\theta_{sr} \approx \theta_z \quad (22)$$

przy obliczeniu więc trwałości izolacji uzwojeń można, z dokładnością najzupełniej wystarczającą dla celów praktycznych, stosować temperaturę średnią zamiast temperatury zastępczej. W ten sposób uzyskuje się znaczne uproszczenie obliczeń; dlatego też poniżej ograniczono się do wyznaczenia średniej rocznej temperatury uzwojeń.

Średnie roczne zmiany temperatury otoczenia ( $\theta_{ot}$ ) w czasie, podczas pełnego cyklu pracy trakcyjnej ( $t_c$ ), można przedstawić przy pomocy wzorów:

dla  $t = 0 \dots t_{p.1}$  - postój w podszybiu

$$\theta_{ot} = \theta_{ot.1} \quad (23)$$

gdzie:

$\theta_{ot.1}$  - średnia roczna temperatura na podszybiu,

dla  $t = t_{p.1} \dots (t_{p.1} + t_{j.1})$  - jazda pociągu pustego

$$\theta_{ot} = \theta_{ot.1} + k_1 \cdot (t - t_{p.1}) \quad (24)$$

gdzie:

$$k_1 = \frac{\theta_{ot.2} - \theta_{ot.1}}{t_{j.1}} \quad (25)$$

$\theta_{ot.2}$  - średnia roczna temperatura na stacji załadowniczej

dla  $t = (t_{p.1} + t_{j.1}) \dots (t_{p.1} + t_{j.1} + t_{p.2})$  - postój w stacji załadowniczej:

$$\theta_{ot} = \theta_{ot.2} \quad (26)$$

dla  $t = (t_{p.1} + t_{j.1} + t_{p.2}) \dots t_c = (t_{p.1} + t_{j.1} + t_{p.2} + t_{j.2})$  -

- jazda pociągu ładownego:

$$\theta_{ot} = \theta_{ot.2} - k_2 \left[ t - (t_{p.1} + t_{j.1} + t_{p.2}) \right] \quad (27)$$

gdzie:

$$k_2 = \frac{\theta_{ot.2} - \theta_{ot.1}}{t_{j.2}} \quad (28)$$

Przy pomocy wzorów (23) ... (28) wyznaczono, zgodnie z [4], średnią roczną temperaturę otoczenia:

$$\theta_{ot.śr} = \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} \theta_{ot.} dt \quad (29)$$

Do wyznaczenia średniej rocznej temperatury uzwojeń ( $\theta_{\text{śr}}$ ) zastosowano wzór, wyprowadzony w pracy [4], z uwzględnieniem (21)

$$\theta_{\text{śr}} = \theta_{\text{ot.śr}} + \nu_{\text{d.C}} \quad (30)$$

gdzie:

$$\theta_{\text{ot.śr}} - \text{z (29)}$$

$\nu_{\text{d.C}}$  - dopuszczalny przyrost temperatury uzwojeń ponad temperaturę otoczenia przy pracy ciągłej zgodnie z normą [3].

W końcu, uwzględniając (22) i (30), przyjęto, że roczna temperatura zastępcza uzwojeń ( $\theta_{\text{z.r.}}$ ) jest równa:

$$\theta_{\text{z.r.}} = \theta_{\text{ot.śr}} + \nu_{\text{d.C}} \quad (31)$$

### 3.3. Wyniki obliczeń

Obliczenie nagrzania silnika trakcyjnego przy pracy pod ziemią zostały wykonane dla ogólnych warunków, podanych wyżej w rozdziale 3.1. Warunki pracy. Jako szczegółowe warunki przyjęto przeciętne warunki, występujące przy przewozie głównym kopalnianym, na głębokości ok. 400 [m], o długości dróg przewozowych ok. 2000 [m], przy stosowanych w górnictwie prędkościach pociągów i organizacji ruchu. Zatem:

1) względny czas jazdy:

$$c = 70 [\%] \quad (32)$$

2) temperatura otoczenia (wartości średnie roczne):

$$\text{podszybie} - \theta_{\text{ot.1}} = 18,5 [^{\circ}\text{C}] \quad (33)$$

$$\text{stacja załadownicza} - \theta_{\text{ot.2}} = 25,5 [^{\circ}\text{C}] \quad (34)$$

W obliczeniach został uwzględniony silnik trakcyjny typu, stosowanego normalnie w lokomotywach kopalnianych, o następujących danych charakterystycznych:

wykonanie - zgodnie z normą FN-57/E-06001,

budowa - zamknięta z chłodzeniem naturalnym,



izolacja - klasy B, dla której:

$$\nu_{d.c} = 120 \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (35)$$

$$h = 0,06931 \quad (36)$$

cieplna stała czasowa:

$$T_j = 3,5 \text{ godz.}$$

$$y = \frac{T_j}{T_p} = 0,7$$

Ostateczne wyniki obliczeń nagrzewania się silnika trakcyjnego przy pracy pod ziemią przedstawiają się następująco:

- 1) średnia roczna temperatura otoczenia (czynnika chłodzącego) ze wzoru (29) z uwzględnieniem (23) ... (28) oraz (33) i (34)

$$\theta_{ot.śr} = 22 \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (37)$$

- 2) roczna temperatura zastępcza uzwojeń - ze wzoru (31) z uwzględnieniem (35) i (37):

$$\theta_{z.r} = 142 \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (38)$$

#### 4. Porównanie nagrzewania się silnika trakcyjnego przy pracy na powierzchni i pod ziemią

W rozdziałach 2 i 3 przeprowadzono analizę nagrzewania się silnika trakcyjnego przy pracy bądź też na powierzchni, już to pod ziemią. W obu przypadkach przyjęto jednakowy charakter pracy, stopień wykorzystania mocy silnika trakcyjnego oraz rodzaj jego budowy.

Istotną natomiast różnicą w obu przypadkach stanowią różne temperatury otoczenia. Podczas gdy przy pracy na powierzchni temperatura otoczenia zmieniała się w dużych granicach w ciągu roku w sposób naturalny, osiągając w najbardziej gorącym okresie krótkotrwałe maksyma miesięczne w wysokości 23,8 [°C], pod ziemią temperatura otoczenia podlegała tylko nieznacznym wahaniom, przy czym średnia roczna jej wartość była równa 22 [°C].

Powyższe różnice, występujące w temperaturze otoczenia, spowodowały stosunkowo duże różnice w nagrzewaniu się silników na powierzchni i pod ziemią. Podczas gdy na powierzchni roczna temperatura zastępcza uzwojeń wynosiła, zgodnie z (19),

$$\theta'_{z.o.r.} = 130 \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (39)$$

pod ziemią była ona równa, zgodnie z (38):

$$\theta_{z.o.r.} = 142 \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (38)$$

O ile w pierwszym przypadku temperaturę tę (39), jako osiągniętą w następstwie eksploatacji silnika trakcyjnego w normalnych warunkach, zgodnie z wymaganiami normy [3], można uznać za dopuszczalną, to w drugim przypadku wydaje się ona (38) nadmierną i powoduje znaczne skrócenie trwałości izolacji silnika, co w konsekwencji pociąga zwiększenie kosztów eksploatacji oraz zmniejszenie pewności ruchu. Względna bowiem trwałość izolacji uzwojeń ( $x$ ) przy pracy w warunkach dołowych, w stosunku do trwałości na powierzchni, wyliczona ze wzoru ogólnego [4]:

$$x = e^{h \cdot (\theta'_{z.o.r.} - \theta_{z.o.r.})} \quad (40)$$

z uwzględnieniem (36), (38) i (39) wynosi:

$$x = e^{0,06931 \cdot (130 - 142)}$$

czyli:

$$x \approx 0,43 \quad (41)$$

Trwałość zatem izolacji przy pracy pod ziemią jest ponad 2-razy mniejsza, jak na powierzchni, pomimo zastosowania w obu przypadkach tego samego stopnia wykorzystania mocy lokomotywy, a w konsekwencji tej samej wartości przyrostu temperatury uzwojeń ponad temperaturę otoczenia, dopuszczalnej przez przepisy [3].

Stan taki nie można uznać za właściwy, a otrzymane wyniki analizy nagrzewania się silnika trakcyjnego zdają się przemawiać przeciw stosowaniu przy trakcji dołowej przyrostów temperatury, dopuszczalnych przez normę [3], niezależnie od temperatury wyrobisk. W konsekwencji również i przy określe-  
niu właściwego stopnia wykorzystania mocy lokomotywy w warunkach dołowych nie można nie uwzględniać temperatury wyrobisk.

Sprawę dopuszczalnych przyrostów temperatury, względnie dopuszczalnego stopnia wykorzystania mocy lokomotywy przy trakcji dołowej, w zależności od temperatury wyrobisk, omówiono w rozdziale 6.

5. Zależność pomiędzy stopniem wykorzystania mocy a nagrzewaniem się silników trakcyjnych

Jako kryterium wykorzystania mocy silnika, o prądzie znamionowym ciągłym  $I_C$  - przy obciążeniu prądem  $I$ , przyjmuje się zwykle stopień jego obciążenia ( $a$ ) wyrażony wzorem:

$$a = \frac{I}{I_C} \quad (42)$$

Wzór (42) nie nadaje się jednak do bezpośredniego zastosowania przy pracy trakcyjnej, o charakterze pracy przerywanej, przy której obciążenie silnika ( $I$ ) zmienia się okresowo. Za miarę więc wykorzystania mocy silników trakcyjnych, w rozpatrywanych przypadkach pracy, przyjęto średnią wartość ich obciążenia ( $a_{sr}$ ) w ciągu cyklu pracy ( $t_C$ ):

$$a_{sr} = \frac{I_{sk}}{I_C} \quad (43)$$

gdzie:

$I_{sk}$  - prąd skuteczny wyznaczony z (3).

Pomiędzy średnim ustalonym przyrostem temperatury uzwojeń ponad temperaturę otoczenia  $v_{sr.u}$ , a średnim obciążeniem silnika ( $I_{sk}$ ) przy pracy przerywanej, zachodzi zależność [4]

$$v_{sr.u} = \frac{I_{sk}^2}{I_C^2 \left[ \frac{\epsilon}{100} + y \cdot \left( 1 - \frac{\epsilon}{100} \right) \right]} \cdot v_{d.c} \quad (44)$$

lub też po uwzględnieniu (43)

$$v'_{\text{śr.u}} = \frac{a_{\text{śr}}^2}{\frac{\varepsilon}{100} + y \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right)} v'_{\text{d.C}} \quad (45)$$

gdzie:

$v'_{\text{d.C}}$  - dopuszczalny przyrost temperatury uzwojeń ponad temperaturę otoczenia przy pracy ciągłej zgodnie z normą [3]; dla uzwojeń wirnika z izolacją klasy B wynosi on:

$$v'_{\text{d.C}} = 120 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (46)$$

pozostałe oznaczenia jak przy (4).

Przez odpowiednie zaś przekształcenie (45) otrzymuje się szukaną zależność pomiędzy wykorzystaniem mocy (stopniem obciążenia -  $a_{\text{śr}}$ ) silnika a przyrostem temperatury jego uzwojeń ( $v'_{\text{śr.u}}$ ) dla pewnej konkretnej pracy przerywanej ( $\varepsilon, y$ ):

$$a_{\text{śr}} = \sqrt{\frac{v'_{\text{śr.u}}}{v'_{\text{d.C}}} \left[ \frac{\varepsilon}{100} + y \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right) \right]} \quad (47)$$

Z zależności (47) można wyznaczyć dopuszczalny stopień wykorzystania mocy silnika ( $a_{\text{śr.d}}$ ) dla przyjętego, w pewnych konkretnych warunkach pracy, dopuszczalnego przyrostu temperatury ( $v'_{\text{śr.u.d}}$ ):

$$a_{\text{śr.d}} = \sqrt{\frac{v'_{\text{śr.u.d}}}{v'_{\text{d.C}}} \left[ \frac{\varepsilon}{100} + y \left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right) \right]} \quad (48)$$

a następnie, uwzględniając (43), dopuszczalną wartość prądu skutecznego ( $I_{sk.d}$ ) dla przyjętych warunków pracy:

$$I_{sk.d} = a_{sr.d} \cdot I_C \quad (49)$$

## 6. Wnioski końcowe

Z przeprowadzonej analizy nagrzewania się silników trakcyjnych można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Nie wydaje się słusznym przyjmowanie za punkt wyjścia, przy projektowaniu trakcji dołowej względnie eksploatacji lokomotyw pod ziemią, dopuszczalnego przyrostu temperatury uzwojeń ponad temperaturę otoczenia, podanego w normie "Silniki trakcyjne prądu stałego" PN-57/E-06001, jak to jest praktykowane przy trakcji na powierzchni. Przy tym bowiem przyjęciu, ze względu na ogólnie wyższe średnie temperatury otoczenia występujące pod ziemią, nagrzanie silników trakcyjnych w warunkach dołowych, przy tym samym przyroście temperatury ponad temperaturę otoczenia, a więc przy identycznym wykorzystaniu ich mocy, jest większe niż na powierzchni, a trwałość izolacji silników, na odwrót, znacznie mniejsza.

2. Celem uzyskania przy eksploatacji silnika pod ziemią, takiej samej, ekonomicznie uzasadnionej, trwałości izolacji, jak na powierzchni, należy w takim stopniu wykorzystywać jego moc, w zależności od temperatury występującej w wyrobiskach przewozowych, ażeby osiągnięta przez uzwojenia temperatura zastępcza była równa rocznej temperaturze zastępczej ( $\theta_{z,r}$ ), uzyskiwanej przy trakcji na powierzchni z pełnym wykorzystaniem mocy silnika (przyrost temperatury równy dopuszczalnemu według normy [3]). W konsekwencji więc należy przyjąć roczną temperaturę zastępczą przy pracy na powierzchni ( $\theta_{z,r}$ ) za maksymalną dopuszczalną temperaturę zastępczą uzwojeń przy pracy pod ziemią ( $\theta_{z,d}$ ), czyli:

$$\theta_{z,d} = \theta_{z,r}' \quad (50)$$

przy czym dla izolacji klasy B zgodnie z (39):

$$\theta_{z,r}' = 130 [^{\circ}C] \quad (51)$$

3. Jako wielkość wyjściową przy trakcji dołowej należy zatem przyjmować dopuszczalną temperaturę zastępczą uzwojeń ( $\theta_{z.d}$ ), a nie jak na powierzchni, dopuszczalny średni przyrost temperatury ponad temperaturę otoczenia; tę ostatnią zaś wielkość ( $\nu_{\text{sr.u.d}}$ ) można wyznaczyć dopiero po uprzednim przyjęciu dopuszczalnej temperatury zastępczej uzwojeń ( $\theta_{z.d}$ ) z następującego wzoru, uwzględniającego lokalne warunki pracy (temperaturę wyrobisk)

$$\nu_{\text{sr.u.d}} = \theta_{z.d} - \theta_{\text{ot.sr}} \quad (52)$$

gdzie:

$\theta_{\text{ot.sr}}$  - średnia roczna temperatura otoczenia z (29).

Dla silnika z izolacją uzwojeń klasy B należy, zgodnie z (50) i (51), przyjmować:

$$\theta_{z.d} = 130 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (53)$$

4. Dopuszczalny średni stopień wykorzystania (obciążenia) lokomotywy ( $a_{\text{sr.d}}$ ) zależy od temperatury wyrobisk ( $\theta_{\text{ot.sr}}$ ), organizacji przewozu ( $\epsilon$ ) oraz rodzaju budowy silników (rodzaj izolacji, sposób chłodzenia  $y$ ); wartość tę można wyznaczyć ze wzoru (48) z uwzględnieniem (52)

$$a_{\text{sr.d}} = \sqrt{\frac{\theta_{z.d} - \theta_{\text{ot.sr}}}{\nu_{\text{d.C}}} \left[ \frac{\epsilon}{100} + y \left( 1 - \frac{\epsilon}{100} \right) \right]} \quad (54)$$

lub też dla silników z izolacją uzwojeń klasy B po uwzględnieniu (46) i (53)

$$a_{\text{sr.d}} = \sqrt{\frac{130 - \theta_{\text{ot.sr}}}{120} \left[ \frac{\epsilon}{100} + y \left( 1 - \frac{\epsilon}{100} \right) \right]} \quad (54a)$$

5. Dopuszczalna wartość prądu skutecznego ( $I_{\text{sk.d}}$ ) jest również funkcją w/w warunków pracy; wartość tę można wyliczyć po uprzednim wyznaczeniu dopuszczalnego, średniego stopnia wykorzystania mocy lokomotywy ( $a_{\text{sr.d}}$ ) z (54) względnie (54a), ze wzoru (49),

$$I_{\text{sk.d}} = a_{\text{sr.d}} \cdot I_C$$

6. Przy elektrycznej trakcji dołowej, zarówno podczas projektowania, jak i przy eksploatacji, należy w każdym konkretnym przypadku w ten sposób dobierać parametry pracy trakcyjnej w zależności od temperatury wyrobisk i innych warunków pracy, ażeby prąd skuteczny ( $I_{sk}$ ), wyznaczony z chwilowych obciążeń silnika ( $I$ ) dla pełnego cyklu pracy lokomotywy ( $t_c$ ) ze wzoru (3):

$$I_{sk} = \sqrt{\frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} I^2 dt}$$

względnie średni stopień wykorzystania mocy silnika ( $a_{sr}$ ), wyznaczony znowu ze wzoru (43)

$$a_{sr} = \frac{I_{sk}}{I_c}$$

były równe co najwyżej odpowiednim wartościom dopuszczalnym ( $I_{sk.d}$  wzgl.  $a_{sr.d}$ ) wyznaczonym z (49) i (48); wyznaczone więc wyżej wartości  $I_{sk}$  względnie  $a_{sr}$  muszą spełniać nierówności:

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

względnie:

$$a_{sr} \leq a_{sr.d}$$

## LITERATURA

- [1] Szklarski L.: Trakcja Elektryczna w Kopalni. Katowice 1960 r. Wydawnictwo Górniczo-Hutnicze.
- [2] Wołotkowskij A.S.: Rudnicznaja Elektrowoznaja Tiaga. Moskwa 1955 r. Ugletiechizdat.
- [3] Norma: Silniki Trakcyjne Prądu Stałego PN-57/E-06001.
- [4] Zarański T.: Pewne zagadnienia z nagrzewania się silników trakcyjnych elektrycznych lokomotyw kopalnianych. Ze zsyty Naukowe Politechniki Śląskiej - Górnictwo z.4 - Nr 43. 1962 r.
- [5] Gotter G.: Erwärmung und Kühlung elektrischer Maschinen. Berlin 1954 r. Springer-Verlag.
- [6] Jaworski Cz.: Teoria Trakcji Elektrycznej. Warszawa 1956r Wydawnictwa Komunikacyjne.
- [7] Pełczewski W.: Zagadnienia Ciepłne w Maszynach Elektrycznych. Warszawa 1956 r. Państwowe Wydawnictwa Techniczne.
- [8] Praca zbiorowa: Przyczynki do klimatologii Polskiej - Temperatury. Wiadomości służby hydrologicznej i meteorologicznej - tom I, zeszyt 5.



ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК  
НА СТЕПЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОЩНОСТИ ШАХТНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

Р е з ю м е

Путём анализа нагрева тягового электродвигателя при работе на земле и в средних условиях в подземелье показали, что применение под землёй такого же самого приращения температуры обмотки сверх температуры окружающей среды как и на земле — неправильно.

И так, из-за более высоких средних температур окружающей среды, выступающих на шахтах, обмотки электродвигателя при работе под землёй достигают более высоких температур, а в итоге располагают меньшим сроком службы, чем при работе на поверхности.

В дальнейшей части выведена зависимость между степенью использования мощности и нагревом тягового электродвигателя; в завершении была разработана формула для расчёта допускаемой величины степени использования мощности электровоза при работе под землёй в зависимости от температуры окружающей среды (выработки).

EINFLUSS DER TEMPERATUR IN DER TRANSPORTZONE  
AUF DEN AUSNUTZUNGSGRAD DER ELEKTRISCHEN GRUBENLOKOMOTIVE

Z u s a m m e n f a s s u n g

Die Analyse der Fahrzeugmotorerwärmung übertage und in den Durchschnittsbedingungen untertage beweist, dass es falsch wäre denselben Temperaturzuwachs in beiden Fällen als zulässig zu betrachten. Die Wicklung des Motors erreicht höhere Temperatur in Anwendung untertage wo die mittlere Umgebungstemperatur höher ist, wie übertage. Eine wesentlich kürzere Lebensdauer des untertage eingesetzten Motors ist die Folge. Die Abhängigkeit der Erwärmung von dem Leistungsausnutzungsfaktor wird besprochen. Zum Schluss wird eine Formel zur Berechnung der zulässigen Belastung der Lokomotive in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur untertage angeführt.