ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1964
Seria: GÓRNICTWO z. 12 Nr kol. 124

TADEUSZ ZARAŃSKI

DOPUSZCZALNE OBCIĄŻENIE SILNIKÓW TRAKCYJNYCH PRZY PRACY POD ZIEMIĄ

Streszczenie. W pierwszej części pracy wykazano, że stosowanie przyrostu temperatury uzwojeń, ponad temperaturę otoczenia, jako kryterium do wyznaczania dopuszczalnego obciążenia silników trakcyjnych przy eksploatacji pod ziemią nie jest właściwe, pomimo że sposób ten daje dobre wyniki przy trakcji na powierzchni. Ze względu jednak na różnice, występujące w temperaturach otoczenia (czynnika chłodzącego) przy eksploatacji silników trakcyjnych na powierzchni i pod ziemią, otrzymuje się, w tym ostatnim przypadku, niewłaściwe wykorzystanie mocy silnika oraz trwałość jego izolacji, odbiegającą poważnie od normalnej, zapewniającej minimum kosztów eksploatacji i niezawodność pracy.

Następnie podano nowy sposób wyznaczania dopuszczalnego obciążenia silników trakcyjnych do pracy pod ziemią przy zastosowaniu, jako kryterium, dopuszczalnej temperatury uzwojeń.

Na zakończenie wykazano, że przy stosowaniu proponowanego sposobu obliczeń otrzymuje się, niezależnie od warunków pracy, pełne wykorzystanie mocy silnika trakcyjnego oraz moralną trwałość jego izolacji.

1. WARUNKI PRACY

Praca lokomotyw przy trakcji pod ziemią, podobnie jak to ma miejsce na powierzchni, jest pracą przerywaną. Składa się ona z długiego szeregu obciążeń, występujących w czasie jazdy po-

ciągu pomiędzy stacjami załadowczymi i podszybiem oraz podczas manewrowania, przerywanych mniej lub więcej regularnie okresami bezprądowymi podczas postoju lokomotyw na stacjach końcowych.

W zasadzie warunki pracy trakcyjnej pod ziemią i na powierzchni są zbliżone, w następstwie czego wykorzystuje się powszechnie do obliczeń trakcji kopalnianej metody, stosowane i wypróbowane przy trakcji na powierzchni [7] i [8]. Między innymi przy wyznaczaniu mocy lokomotyw kopalnianych zakłada się, podobnie jak przy trakcji na powierzchni, że przy pracy praktycznej przyrost temperatury uzwojeń silnika, ponad temperaturę otoczenia, nie może przekroczyć wartości dopuszczalnej, podanej przez normę na silniki trakcyjne [1]. Sposób ten obliczania mocy lokomotywy, który można by nazwać "metodą dopuszczalnego przyrostu temperatury", jest w pełni uzasadniony i daje dobre wyniki w warunkach chłodzenia silników, występujących na powierzchni. Trzeba jednak zwrócić uwagę, że odnośnie chłodzenia silników stosunki pod ziemią różnią się zasadniczo od występujących na powierzchni, specjalnie w zakresie temperatury otoczenia (czynnika chłodzącego).

Podczas gdy na powierzchni temperatura otoczenia, jednakowa w zasadzie dla wszystkich przypadków trakcji, podlega silnym wahaniom dziennym i miesięcznym, uzyskując w naszym klimacie średnią roczną wartość ok. 7,5°C, pod ziemią jest ona zasadniczo różna w każdym konkretnym przypadku, zależy m.in. od głębokości kopalni, intensywności jej przewietrzania, długości dróg przewozowych i podlega tylko niewielkim wahaniom w czasie.

W przeciętnych warunkach, występujących w polskim górnictwie węglowym, na głębokości ok. 500 m, średnia roczna tempe-

ratura powietrza w wyrobiskach przewozowych (temperatura otoczenia) wynosi 20-25°C. W konsekwencji, w warunkach dołowych, silniki trakcyjne, o mocy wyznaczonej przy pomocy wyżej wspomnianej, powszechnie stosowanej "metody dopuszczalnego przyrostu temperatury", na ogół nie spełniają wymagań, odnośnie właściwego wykorzystania ich mocy oraz trwałości izolacji, jak to wykazano w rozdziale 4.2.

Celem umożliwienia właściwego wyboru silnika trakcyjnego do pracy pod ziemią, wyprowadzono i podano w rozdziale 5 nową metodę obliczeń, nazwaną "metodą dopuszczalnej temperatury". W proponowanej metodzie obliczeń założono, że przy eksploatacji silnika, nie przyrost temperatury, lecz temperatura jego uzwojeń nie może przekraczać wartości dopuszczalnej, przy czym za dopuszczalną temperaturę uzwojeń przyjęto temperaturę, przy której izolacja uzwojeń silnika uzyskuje trwałość normalną.

Jako trwałość normalną izolacji uzwojeń przyjmuje się trwałość, ekonomicznie uzasadnioną, zapewniającą minimum kosztów eksploatacji silnika i niezawodność jego pracy. Trwałość taką wykazują silniki trakcyjne przy pracy na powierzchni, zbudowane i eksploatowane zgodnie z przepisami.

W rozdziale 5, 6 wykazano, że w wyniku wyboru silnika proponowaną "metodą dopuszczalnej temperatury" otrzymuje się silnik o pełnym wykorzystaniu jego mocy, uzyskujący w/w trwałość normalną.

2. TRWAŁOŚĆ IZOLACJI UZWOJEŃ

2.1. Podstawowa zależność [5] i [6]

Starzenie się izolacji uzwojeń silnika wywołane jest działaniem następujących czynników:

1) temperatura robocza uzwojeń (działanie cieplne),
2) atmosfera, w której silnik pracuje (działanie chemiczne)
3) drgania, wstrząsy, wydłużanie się i kurczenie przewodów przy ich nagrzewaniu i stygnięciu (działanie mechaniczne)
4) naprężenie dielektryczne (działanie elektryczne).

Przy pracy w temperaturze powyżej 90°C decydujący wpływ na trwałość izolacji ma jednak temperatura robocza uzwojeń. Z tego powodu w dalszych rozważaniach zostało uwzględnione tylko działanie temperatury na starzenie się izolacji.

Według Montsingera zależność pomiędzy stałą temperaturą roboczą uzwojeń Θ, utrzymującą się w silniku przy pracy ze stałym obciążeniem i przy stałej temperaturze otoczenia, a trwałością izolacji można przedstawić w postaci

$$\tau = A\, e^{-h\Theta} \tag{2.1}$$

gdzie:

A oraz h - odpowiednie współczynniki,

e - zasada logarytmów naturalnych.

2.2. Temperatura zastępcza Θ_z

W przypadku, gdy temperatura izolacji silnika Θ zmienia się w czasie, w następstwie zmian obciążenia czy temperatury otoczenia, jeżeli więc:

$$\Theta = f(t)$$

wyznaczenie trwałości izolacji z (2.1) natrafia na poważne trudności. W warunkach tych bardzo pomocną jest tzw. temperatura zastępcza [2].

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

Temperaturę zastępczą uzwojeń Θ_z, dla dowolnie zmieniającej się ich temperatury Θ i dla dowolnego okresu czasu t (dzień, miesiąc, rok) można wyznaczyć, w sposób analityczny lub analityczno wykreślny, ze wzoru [2] i [3]:

$$\Theta_z = \frac{1}{h} \ln \frac{1}{t} \int_0^t e^{h\Theta} \cdot d\Theta \qquad (2.2)$$

gdzie:

h - jak przy (2.1)

Po wstawieniu zaś otrzymanej w ten sposób wartości Θ_z w (2.1) otrzymujemy szukaną trwałość izolacji przy zmiennej temperaturze:

$$\tau = A\, e^{-h\Theta_z} \qquad (2.3)$$

2.3. Względna trwałość izolacji x

Oznaczymy sobie przez:

τ_n - normalną trwałość izolacji uzwojeń, ekonomicznie uzasadnioną, zapewniającą minimum kosztów eksploatacji silnika i niezawodność jego pracy,

Θ_n - temperaturę uzwojeń, przy której ich trwałość jest równa w/w trwałości τ_n,

τ - trwałość izolacji przy dowolnej temperaturze Θ.

Wielkości te muszą oczywiście parami spełniać równanie (2.1)

Uwzględniając powyższe oznaczenia można określić względną trwałość izolacji (x) stosunkiem [2]:

$$x = \frac{\tau}{\tau_n} \tag{2.4}$$

który, po uwzględnieniu (2.1) oraz odpowiednim przekształceniu przyjmuje postać:

$$x = e^{h(\Theta_n - \Theta)} \tag{2.5}$$

Ponieważ zgodnie z uwagami w rozdziale 1, temperatura Θ_n jest liczbowo równa temperaturze dopuszczalnej Θ_d czyli:

$$\Theta_n = \Theta_d$$

możemy dla silników trakcyjnych z izolacją klasy B, dla której [2]:

$$h = 0{,}06931 \tag{2.6}$$

przyjąć zgodnie z (5.8)

$$\Theta_n = 130 \ [^oC] \tag{2.7}$$

a w konsekwencji:

$$x = e^{0,06931 \cdot (130 - \Theta)} \tag{2.8}$$

3. STOPIEŃ OBCIĄŻENIA SILNIKA

3.1. Podstawowe określenia

Jeżeli silnik o prądzie znamionowym ciągłym I_c, obciążony jest prądem I, wówczas stopień jego obciążenia (a) określa się stosunkiem:

$$a = \frac{I}{I_c} \tag{3.1}$$

Przy pracy przerywanej, podczas której prąd obciążenia (I_t) zmienia się okresowo w czasie, średni stopień obciążenia silnika (a_c) w ciągu trwania pełnego cyklu pracy (t_c), można znowu wyrazić wzorem:

$$a_c = \frac{I_z}{I_c} \tag{3.2}$$

gdzie I_z - prąd zastępczy, tj. prąd umyślony o stałej wartości zastępujący rzeczywisty, zmieniający się okresowo prąd obciążenia.

Stopień wykorzystania mocy silnika (w_c), przy pracy przerywanej ze stopniem obciążenia a_c, można z kolei określić wzorem

$$w_c = \frac{a_c}{a_{c.d}} \tag{3.3}$$

gdzie $a_{c.d}$ - maksymalnie dopuszczalna, ze względu na nagrzewanie się, wartość stopnia obciążenia silnika, wartość ta została określona w rozdziale 5.4 (5.16)

3.2. Prąd zastępczy

Prąd zastępczy w (3.2) winień być w ten sposób określony, ażeby stanowił właściwe kryterium rzeczywistego obciążenia silnika w ciągu cyklu pracy przerywanej. Wchodzą tu w rachubę:

a) prąd średni $I_{śr}$,
b) prąd skuteczny I_{sk},
c) prąd równoważny I_r,
d) poprawiony prąd równoważny I_r.

a) Prąd średni

Prąd średni $I_{śr}$ - tj. prąd umyślony o stałej wartości, wyznaczony ze wzoru:

$$I_{śr} = \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} I_t \, dt \tag{3.4}$$

b) Prąd skuteczny

Prąd skuteczny I_{sk} - jt. prąd umyślony o stałej wartości, który spowodowałby wydzielenie w silniku takiej samej ilości ciepła (takie same jego grzanie), jak przy rzeczywistym, zmiennym

obciążeniu podczas rozpatrywanej pracy przerywanej, przy czym zakłada się, że ilość wydzielonego ciepła jest proporcjonalna do kwadratu chwilowego prądu.

Oznaczamy przez:

Q_c - ilość ciepła wydzielonego przy rzeczywistym obciążeniu silnika (I_t) w ciągu cyklu pracy przerywanej (t_c), przy czym zgodnie z pow. definicją:

$$Q_c = \int_0^{t_c} RI_t^2 dt \qquad (3.5)$$

(R - współczynnik proporcjonalności)

Q'_c - ilość ciepła wydzielonego przy obciążeniu prądem skutecznym (I_{sk}) w czasie t_c, przy czym:

$$Q'_c = R\, I_{sk}^2\, t_c \qquad (3.6)$$

Zgodnie z określeniem prądu skutecznego zachodzi równość:

$$Q_c = Q_c \qquad (3.7)$$

Po uwzględnieniu (3.5) i (3.6) w (3.7)

$$R\, I_{sk}^2\, t_c = \int_0^{t_c} R\, I_t^2\, dt$$

i ostatecznie, po odpowiednim przekształceniu, wzór na prąd skuteczny przyjmuje postać:

$$I_{sk} = \sqrt{\frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} I_t^2\, dt} \qquad (3.8)$$

c) Prąd równoważny

Prąd równoważny I_r - jt. prąd umyślony o stałej wartości, który powoduje wydzielenie w silniku rzeczywiście takiej samej ilości ciepła (takie samo jego grzanie), jak przy rzeczywistym zmiennym obciążeniu podczas rozpatrywanej pracy przerywanej, przy czym prócz strat obciążeniowych uwzględnia się również i straty jałowe [4].

Ilość ciepła wydzielonego przy rzeczywistym obciążeniu silnika (I_t) w ciągu cyklu pracy przerywanej (t_c), wynosi:

$$Q_c = \int_0^{t_c} (R\, I_t^2 + R\, I_\eta^2)\, dt \qquad (3.9)$$

gdzie:

$R\, I_t^2$ - chwilowe straty obciążeniowe (R - współczynnik proporcjonalności),

$R\, I_\eta^2$ - chwilowe straty jałowe, przy czym I_η - prąd przy którym sprawność silnika osiąga swoje maksimum, ilość zaś ciepła wydzielonego przy obciążeniu prądem równoważnym (I_r) w czasie t_c, jest równa:

$$Q'_c = (R\, I_r^2 + R\, I_\eta^2) \cdot t_c \qquad (3.10)$$

gdzie $R\, I_r^2$ - straty obciążeniowe przy prądzie I_r.

Zgodnie z definicją:

$$Q'_c = Q_c \qquad (3.11)$$

a po uwzględnieniu (3.9) i (3.10) w (3.11):

$$(R\,I_r^2 + R\,I_\eta^2)\,t_c = \int_0^{t_c} (R\,I_t^2 + R\,I_\eta^2)\,dt$$

wreszcie, po odpowiednim przekształceniu, otrzymuje się wzór na prąd równoważny:

$$I_r' = \sqrt{I_{sk}^2 - \left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right) I_\eta^2} \qquad (3.12)$$

gdzie:

I_{sk} - prąd skuteczny z (3.8)

I_η - prąd, przy którym sprawność silnika osiąga swoje maksimum,

ε - względny czas pracy przerywanej; dla pracy trakcyjnej można go wyznaczyć ze wzoru:

$$\varepsilon = \frac{t_j}{t_c}\,100\ [\%] \qquad (3.13)$$

przy czym t_j - czas jazdy lokomotywy między stacjami końcowymi t_c - czas pełnego cyklu pracy lokomotywy, równy sumie czasów (tj) i postoju na stacjach końcowych (t_p), czyli:

$$t_c = t_j + t_p$$

d) Poprawiony prąd równoważny

Poprawiony prąd równoważny I_r' - jt. prąd umyślony o stałej wartości, przy którym ustalony przyrost temperatury uzwojeń silnika ponad temperaturę otoczenia (nagrzewanie się silnika)

jest taki sam, jak przy rzeczywistym, zmiennym obciążeniu podczas rozpatrywanej pracy przerywanej.

Ustalony przyrost temperatury ponad temperaturę otoczenia ϑ_u (nagrzewanie się silnika) można wyrazić wzorem:

$$\vartheta_u = \frac{\Delta P}{O} \tag{3.14}$$

gdzie:

ΔP - całkowite straty w silniku,

O - oddawalność ciepła silnika,

a ponieważ:

$$O = \frac{C}{T}$$

gdzie znowu: C - pojemność cieplna silnika,

T - stała czasowa grzania się silnika,

zatem:

$$\vartheta_u = \frac{\Delta P}{C} T \tag{3.15}$$

Przy pomocy (3.15) można wyznaczyć wielkość nagrzewania się silnika:

1. <u>przy rzeczywistym obciążeniu silnika podczas pracy przerywanej:</u>

$$\vartheta_u = \frac{R I_r^2 + R I_\eta^2}{C} T_{śr} \tag{3.16}$$

gdzie:

$R I_r^2$, $R I_\eta^2$ - jak wyżej pod c,

$T_{śr}$ - średnia wartość stałej czasowej grzania się silnika w czasie cyklu pracy przerywanej z (4.2),

2. przy obciążeniu poprawionym prądem równoważnym I'_r:

$$\vartheta'_u = \frac{R\,I'^2_r + R\,I^2_\eta}{C}\,T'_r \qquad (3.17)$$

gdzie:

$R\,I'^2_r$ - straty obciążeniowe przy prądzie I'_r,

$R\,I^2_\eta$ - straty jałowe jak wyżej pod c),

T'_r - wartość stałej czasowej grzania się silnika przy obciążeniu prądem I'_r.

Zgodnie z definicją:

$$\vartheta'_u = \vartheta_u \qquad (3.18)$$

a po uwzględnieniu (3.16) i (3.17):

$$\frac{R\,I'^2_r + R\,I^2_\eta}{C}\,T'_r = \frac{R\,I^2_r + R\,I^2_\eta}{C}\,T_{śr}$$

i w końcu, po odpowiednim przekształceniu, dochodzi się do wzoru na poprawiony prąd równoważny:

$$I'_r = \sqrt{\left[I^2_{sk} - \left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right) I^2_\eta\right]\frac{T_{śr}}{T'_r} + \left(\frac{T_{śr}}{T'_r} - 1\right) I^2_\eta} \qquad (3.19)$$

gdzie:

I_{sk}, I_η i ε - jak wyżej przy prądzie równoważnym (3.12)

3.3. Ocena kryterii obciążenia silnika

Z wymienionych w rozdziale 3.2 prądów zastępczych, stosowanych jako kryterium obciążenia silnika przy pracy przerywanej, najmniej odpowiednim do tego celu wydaje się prąd średni ($I_{śr}$). Nie jest on, przynajmniej bezpośrednio, sprawdzianem nagrzewania się silnika, które ma decydujący wpływ na wielkość dopuszczalnego obciążenia i możliwość wykorzystania mocy silnika.

W określeniu prądu skutecznego (I_{sk}) uwzględniono wprawdzie grzanie się silnika (wydzielanie się ciepła), lecz zupełnie pominięto zmiany w oddawalności ciepła podczas pracy (pogorszenie się chłodzenia przy postoju), które mają również wpływ na nagrzewanie się (przyrost temperatury ponad temperaturę otoczenia) silnika. Ponadto należy zwrócić uwagę, że wskutek nieścisłości założenia, proporcjonalności całkowitych strat do kwadratu prądu, grzanie się silnika przy prądzie skutecznym jest większe od rzeczywistego. W konsekwencji rzeczywiste nagrzewanie się silnika przy eksploatacji jest mniejsze od obliczeniowego według prądu skutecznego.

Przy określeniu prądu równoważnego (I_r) grzanie się silnika zostało przyjęte w sposób właściwy i ścisły (uwzględniono zarówno straty obciążeniowe jak i jałowe), oddawalność jednak ciepła została również i przy tym prądzie pominięta. W związku z tym rzeczywiste nagrzewanie się przy pracy praktycznej silnika, wybranego według prądu równoważnego, jest nieco większe od obliczeniowego (nie uwzględnienie pogorszenia się chłodzenia podczas postoju).

Określenie poprawionego prądu równoważnego (I'_r) zostało oparte bezpośrednio na nagrzewaniu się silnika, zostały więc w nim uwzględnione, w sposób stosunkowo ścisły, zarówno grzanie

się silnika jak i zmiany w jego oddawalności ciepła. Obliczenia wykonane na podstawie tego prądu są najbardziej ścisłe i dokładne, ale równocześnie żmudne i pracochłonne oraz wymagają dodatkowej znajomości takich wielkości, jak I_{η}, T'_r i $T_{śr}$ (patrz wzór (3.19)), charakteryzujących analizowany silnik.

Reasumując można dojść do wniosku, że najbardziej uzasadnione jest stosowanie w obliczeniach praktycznych prądu skutecznego (I_{sk}), jako kryterium obciążenia silnika, gdyż prąd skuteczny:

1) uwzględnia, z dokładnością wystarczającą dla celów praktycznych, nagrzewanie się silnika (rzeczywiste nagrzewanie się jest nieco mniejsze od obliczeniowego),
2) daje pewien zapas mocy, potrzebnej ze względu na:
   a) nieuwzględnienie przy obliczeniach szczytowego nagrzewania się silnika (stosowane obliczenia oparte są na średnim nagrzewaniu się),
   b) nieprzewidziane przeciążenia, występujące przy eksploatacji,
3) jest stosunkowo prosty w zastosowaniu.

W związku z powyższym w dalszych rozważaniach przyjęto, do wyznaczenia stopnia obciążenia silnika przy pracy przerywanej (3.2) wzór w postaci:

$$a_c = \frac{I_{sk}}{I_C} \tag{3.20}$$

4. NAGRZEWANIE SIĘ SILNIKA

4.1. Podstawowe wzory

Podstawowe wzory, zastosowane do analizy nagrzewania się silnika trakcyjnego, zostały wyprowadzone w pracy [2], poniżej więc ograniczono się tylko do ich podania.

W okresie pracy lokomotywy, przez t_{pr} godzin na dobę, występuje grzanie się jej silników. Średni (w czasie trwania cyklu pracy trakcyjnej) przyrost temperatury uzwojeń ponad temperaturę otoczenia (ϑ), w zależności od czasu (t) można przedstawić wzorem:

$$\vartheta = \vartheta_u \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{śr}}}\right) + \vartheta_o \, e^{-\frac{t}{T_{śr}}} \qquad (4.1)$$

przy czym:

ϑ_u - średni (w ciągu cyklu pracy) ustalony przyrost temperatury uzwojeń z (5.13),

e - zasada logarytmów naturalnych,

$T_{śr}$ - średnia wartość (w ciągu cyklu pracy) stałej czasowej grzania się uzwojeń wyznaczona ze wzoru:

$$T_{śr} = \frac{T_j}{\frac{\varepsilon}{100} + y\left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right)} \qquad (4.2)$$

gdzie:

T_j - stała czasowa grzania się uzwojeń podczas jazdy lokomotywy, ε - z (3.13), y - jak przy (5.14),

ϑ_o - średni (w ciągu cyklu pracy), początkowy (dla t=0) przyrost temperatury uzwojeń wyznaczony ze wzoru

$$\vartheta_o = \frac{\vartheta_u \cdot (1 - e^{-\frac{t_{pr}}{T_{śr}}}) \cdot e^{-\frac{24 - t_{pr}}{T_p}}}{1 - e^{-\frac{t_{pr}}{T_{śr}} - \frac{24 - t_{pr}}{T_p}}} \tag{4.3}$$

gdzie: t_{pr} - czas pracy lokomotywy w godzinach na dobę, T_p - stała czasowa grzania się uzwojeń podczas postoju lokomotywy, przy czym $T_p = \frac{T_j}{y}$, inne oznaczenia jak wyżej.

W okresie przerwy w pracy lokomotywy, przez $(24 - t_{pr})$ godzin na dobę, występuje chłodzenie się silnika zgodnie ze wzorem:

$$\vartheta = \vartheta_{t_{pr}} \, e^{-\frac{t - t_{pr}}{T_p}} \tag{4.4}$$

przy czym:

$\vartheta_{t_{pr}}$ - średni (w ciągu cyklu pracy) przyrost temperatury uzwojeń, odpowiadający czasowi t_{pr}, wyznaczony z (4.1), inne oznaczenia jak przy (4.1).

Przez dodanie temperatury otoczenia Θ_{ot} (czynnika chłodzącego) do wyznaczonego uprzednio przyrostu temperatury ϑ, otrzymuje się temperaturę uzwojeń silnika, zatem

1) średnia (w ciągu cyklu pracy) temperatura uzwojeń (Θ):

$$\Theta = \Theta_{ot} + \vartheta \tag{4.5}$$

gdzie: Θ_{ot} - temperatura otoczenia, równa średniej rocznej temperaturze powietrza w wyrobiskach przewozowych, ϑ - z (4.1) lub (4.4)

2) średnia (w ciągu cyklu pracy), ustalona temperatura uzwojeń (Θ_u):

$$\Theta_u = \Theta_{ot} + \vartheta_u \tag{4.6}$$

gdzie: Θ_{ot} - jak przy (4.5), ϑ_u - z (5.13)

4.2. Analiza nagrzewania się silnika

Przy pomocy poprzednio podanych wzorów przeprowadzono obliczenia cieplne silnika trakcyjnego, zaprojektowanego do pracy pod ziemią przy pomocy powszechnie stosowanej "metody dopuszczalnego przyrostu temperatury" (patrz rozdział 1).

Do obliczeń przyjęto następujące dane wyjściowe, jako przeciętne dla polskiego górnictwa węglowego:

1. Średnia roczna temperatura otoczenia (powietrza w wyrobiskach przewozowych)

$$\Theta_{ot} = 20 \ [^oC]$$

2. Względny czas pracy (jazdy) lokomotywy:

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

3. Ilość zmian roboczych: uwzględniono trzy możliwe przypadki:

a) 1 zmiana robocza na dobę - czas pracy lokomotywy t_{pr} = 8 godzin na dobę,

Tablica 1

Wyniki obliczeń silnika trakcyjnego,
o mocy wyznaczonej "metodą dopuszczalnego przyrostu temperatury",
przy pracy pod ziemią

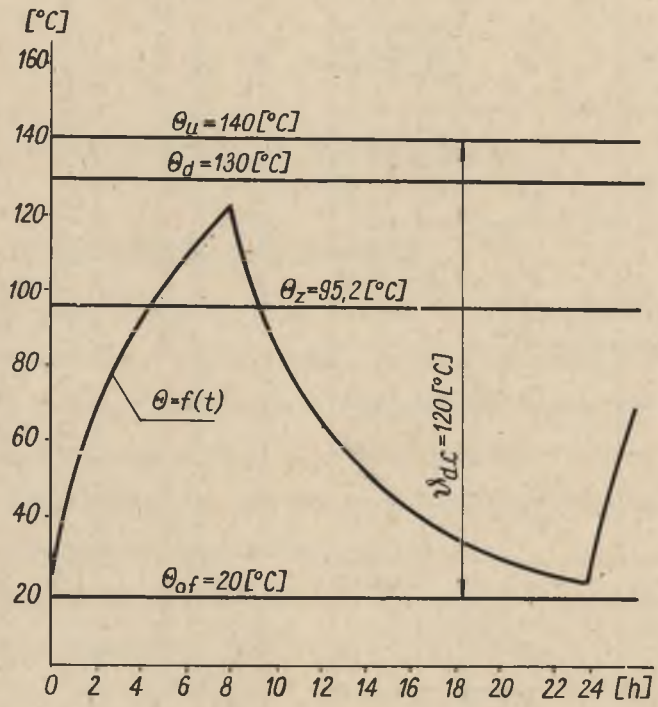
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Lp	Warunki pracy 1) Ilość zmian roboczych na dobę	Θ_{ot} 2)	$\vartheta_{d.c}$ 3)	Θ_u 4)	Θ_d 5)	Θ_z 6)	a_c 7)	w_c 8)	x 9)	Uwagi
	zm/doba	°C	°C	°C	°C	°C				
1	1	20	120	140	130	95,2	0,955	0,836	11,134	
2	2	20	120	140	130	122,7	0,955	0,967	1,659	
3	3	20	120	140	130	140,0	0,955	1,043	0,500	

Uwagi:

1) Warunki przeciętne, występujące w polskim górnictwie węglowym – ε = 70 [%], T_j=3,5 h , y=0,7 izolacja uzwojeń silnika klasy B.
2) Temperatura otoczenia – średnia, roczna temperatura powietrza w wyrobiskach przewozowych.
3) Dopuszczalny przyrost temperatury uzwojeń, ponad temperaturę otoczenia, przy pracy ciągłej (według normy [1]).
4) Ustalona temperatura uzwojeń równa zgodnie z (4.6) sumie kolumn (3 + 4).
5) Dopuszczalna temperatura uzwojeń przy podziemnej eksploatacji wyliczona ze wzorów (5.7) wzgl. (5.8).
6) Temperatura zastępcza uzwojeń wyliczona ze wzoru (2.2).
7) Stopień obciążenia silnika równy $a_c = I_{sk} : I_C$ (3.20).
8) Stopień wykorzystania mocy silnika (w stosunku do maksymalnie dopuszczalnej mocy) wyliczony z (5.19).
9) Względna (w stosunku do normalnej, ekonomicznie uzasadnionej) trwałość uzwojeń silnika, wyliczona z (2.8).

b) 2 zmiany robocze na dobę - czas pracy lokomotywy t_{pr} = 16 godzin na dobę,

c) 3 zmiany robocze na dobę - czas pracy lokomotywy t_{pr} = 24 godzin na dobę.



Rys. 1. Nagrzewanie się i chłodzenie silnika trakcyjnego, o mocy obliczonej "metodą dopuszczalnego przyrostu temperatury", przy pracy pod ziemią na 1 zmianą na dobę

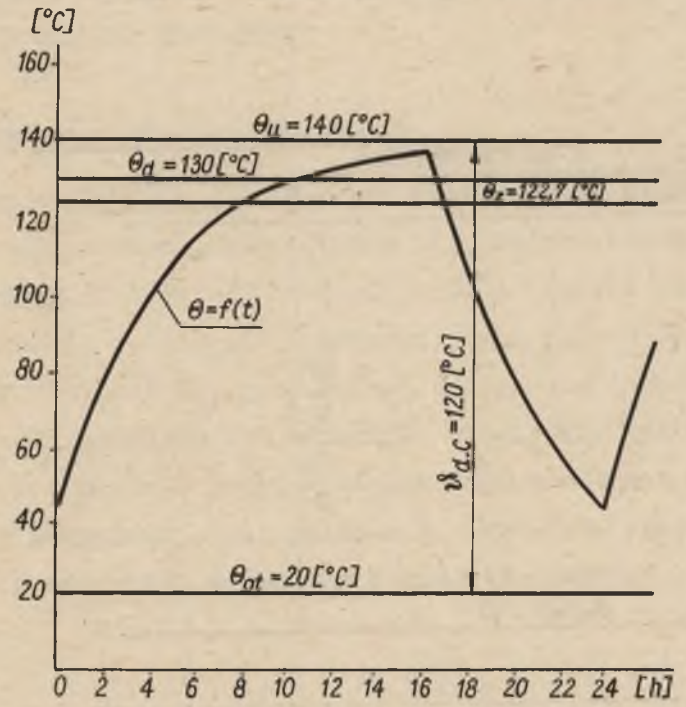
Oznaczenie temperatur uzwojeń: chwilowa - Θ, ustalona - Θ_u, zastępcza - Θ_z, dopuszczalna - Θ_d; Θ_{ot} - temperatura otoczenia, $\vartheta_{d.c}$ - dopuszczalny przyrost temperatury przy pracy ciągłej zgodnie z normą [1]

4. Silnik budowy zamkniętej, z chłodzeniem naturalnym, wykonany zgodnie z normą (1), z izolacją klasy B, dla której dopuszczalny przyrost temperatury ponad temperaturę otoczenia przy pracy ciągłej $\vartheta_{d.C}$

$$\vartheta_{d.C} = 120 \ [^{o}C]$$

a współczynnik "h" z (2.5):

$$h = 0{,}06931$$



Rys. 2. Jak na rys. 1 tylko przy pracy na 2 zmiany na dobę

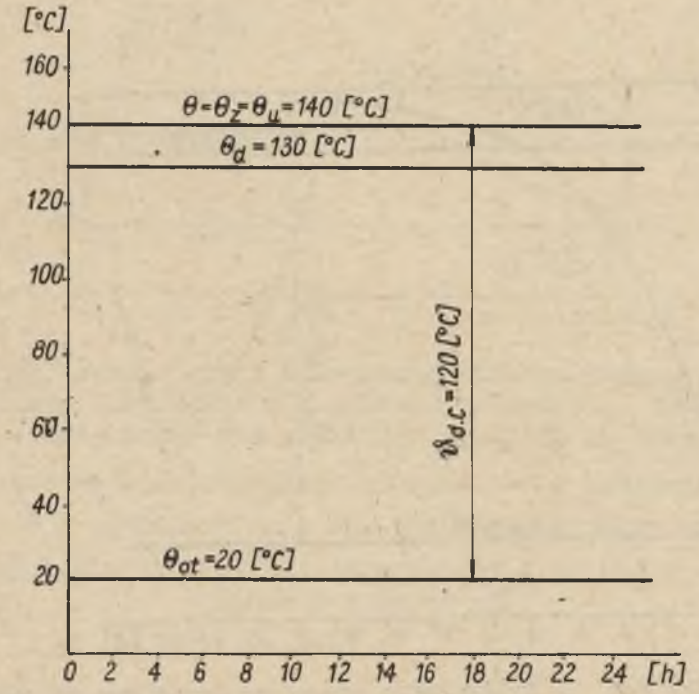
o stałej czasowej grzania się podczas pracy (jazdy) lokomotywy

$$T_j = 3,5 \text{ [h]}$$

i o wartości stosunku "y" (5.14):

$$y = 0,7$$

Wyniki obliczeń zostały ujęte w tablicy 1 oraz na rysunkach 1, 2 i 3. Z obliczeń tych wynika, że silniki wybrane "metodą dopuszczalnego przyrostu temperatury" do pracy pod ziemią, nie zapewniają ani właściwego wykorzystania ich mocy (tablica 1,



Rys. 3. Jak na rys. 1 tylko przy pracy na 3 zmiany na dobę

kolumna 9), ani też normalnej, ekonomicznie uzasadnionej trwałości izolacji uzwojeń (tablica 1, kolumna 10). Przy pracy bowiem na 1 zmianę roboczą na dobę wykorzystanie mocy silnika wynosi zaledwie 83,6% podczas gdy trwałość izolacji jego uzwojeń jest niepotrzebnie, ponad 11-krotnie, przedłużona w stosunku do normalnej. Lepiej przedstawia się sprawa przy 2 zmianach roboczych na dobę. Wykorzystanie mocy silnika wynosi tu 96,7%, trwałość zaś jego uzwojeń w dalszym ciągu jest nadmierna (ponad 1,6-krotna trwałości normalnej). Natomiast przy pracy na 3 zmiany na dobę silnik jest przeciążony ponad 4%, a trwałość jego izolacji wynosi zaledwie 50% trwałości normalnej:

5. DOPUSZCZALNE OBCIĄŻENIE

5.1. Dopuszczalna temperatura Θ_d

Stopień obciążenia silnika ograniczony jest nagrzewaniem się jego podczas pracy. Nagrzewanie się bowiem silnika ma decydujący wpływ na trwałość izolacji uzwojeń (patrz rozdział 2) i w konsekwencji na pewność i koszty ruchu. Jako dopuszczalną temperaturę uzwojeń Θ_d, przy której osiąga się normalną, ekonomicznie uzasadnioną ich trwałość, należy dla pracy pod ziemią (patrz rozdział 1) przyjąć temperaturę zastępczą Θ'_z, wyznaczoną z nagrzewania się silnika w ciągu roku przy eksploatacji na powierzchni zgodnie z normą (1). Zatem:

$$\Theta_d = \Theta'_z \tag{5.1}$$

a ponieważ:

$$\Theta'_z = \Theta'_{ot} + \vartheta_{d.C} + \Delta\Theta \tag{5.2}$$

więc w końcu:

$$\Theta_d = \Theta'_{ot} + \vartheta_{d.C} + \Delta\Theta \tag{5.3}$$

gdzie:

Θ'_{ot} - średnia roczna temperatura otoczenia (czynnika chłodzącego) na powierzchni; w naszym klimacie wynosi ona

$$\Theta'_{ot} = 7{,}5\,[^oC] \tag{5.4}$$

$\vartheta_{d.C}$ - dopuszczalny przyrost temperatury ponad temperaturę otoczenia przy pracy ciągłej według normy [1], dla izolacji klasy B

$$\vartheta_{d.C} = 120\ [^oC] \tag{5.5}$$

$\Delta\Theta$ - różnica pomiędzy zastępczą i średnią temperaturą roczną uzwojeń; można przyjąć:

$$\Delta\Theta \cong 2{,}5\ [^oC] \tag{5.6}$$

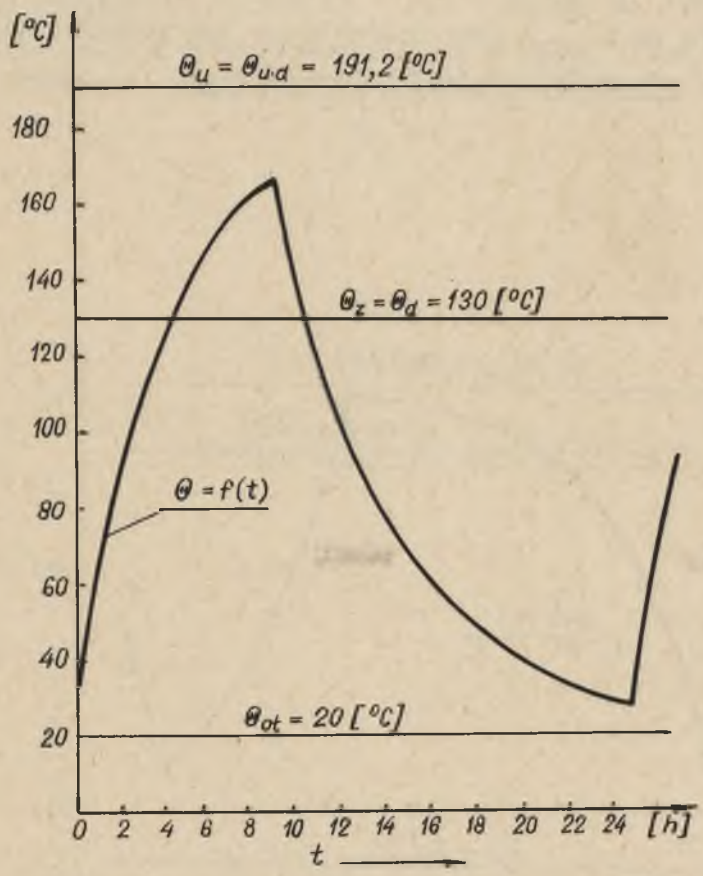
Wstawiając (5.4) i (5.6) w (5.3) otrzymujemy wzór ogólny

$$\Theta_d = 10 + \vartheta_{d.C} \tag{5.7}$$

lub też po uwzględnieniu również (5.5), wzór dla izolacji klasy B:

$$\Theta_d = 10 + 120$$

$$\Theta_d = 130 \ [^oC] \qquad (5.8)$$



Rys. 4. Nagrzewanie się i chłodzenie silnika trakcyjnego, o mocy obliczonej "metodą dopuszczalnej temperatury", przy pracy pod ziemią na 1 zmianę na dobę

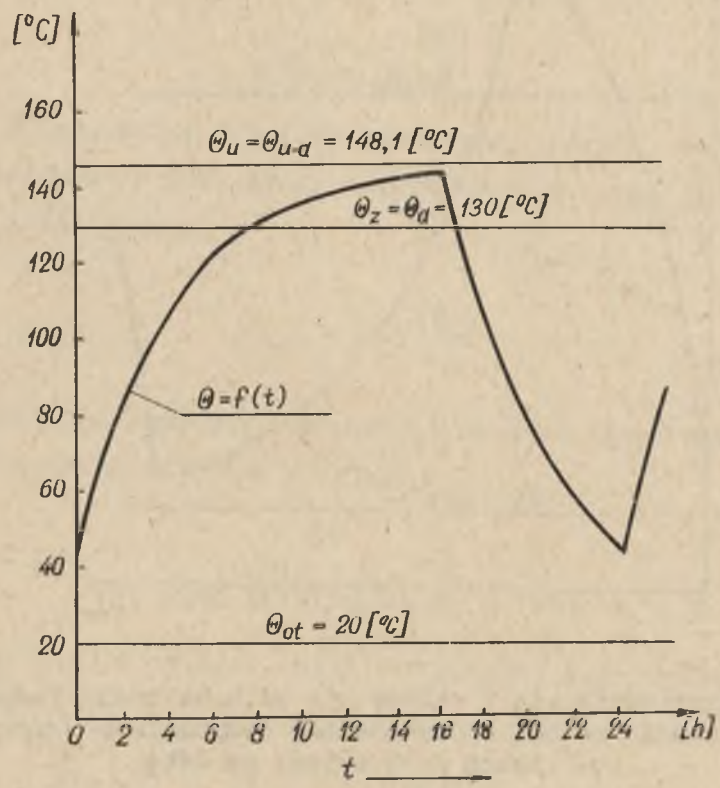
Oznaczenie temperatur uzwojeń: chwilowa - Θ, ustalona - Θ_u, zastępcza - Θ_z, dopuszczalna - Θ_d, dopuszczalna ustalona $\Theta_{u.d}$

Θ_{ot} - temperatura otoczenia

5.2. Dopuszczalna temperatura ustalona $\Theta_{u.d}$

Od dopuszczalnej temperatury uzwojeń Θ_d należy, w przypadku ogólnym, odróżnić dopuszczalną, ustaloną ich temperaturę $\Theta_{u.d}$ tj. temperaturę uzwojeń, która nie może być przekroczona w stanie cieplnym ustalonym, a więc po odpowiednio długim czasie pracy silnika.

Temperatura ta ($\Theta_{u.d}$) jest wprawdzie w przypadku eksploatacji silnika w warunkach cieplnych ustalonych (np. przy pracy



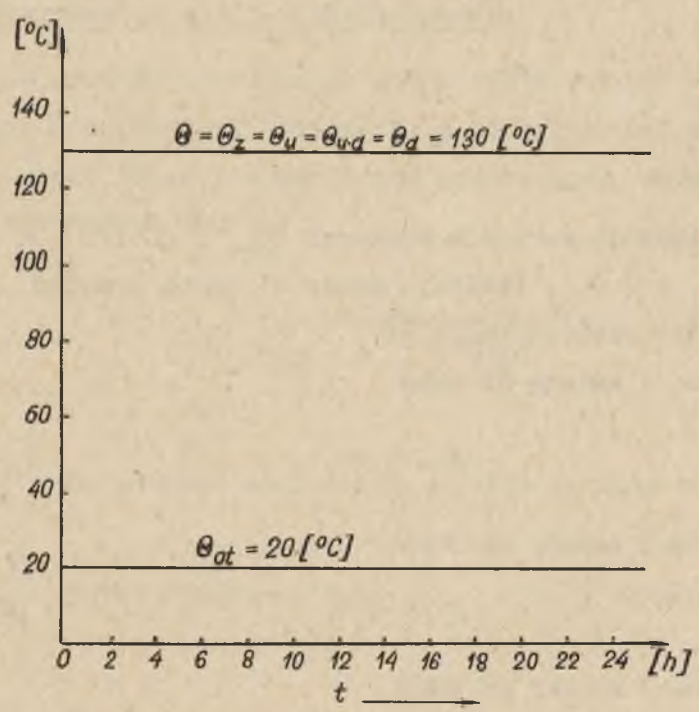
Rys. 5. Jak na rys. 4 tylko przy pracy na 2 zmiany na dobę

na 3 zmiany na dobę) równa liczbowo temperaturze dopuszczalnej (Θ_d), czyli:

$$\Theta_{u.d} = \Theta_d$$

(patrz rys. 6), w przypadkach jednak pracy w warunkach cieplnych nieustalonych (praca na 1 lub 2 zmiany na dobę), w których dla pełnego wykorzystania mocy silnika winna być:

$$\Theta_z = \Theta_d,$$



Rys. 6. Jak na rys. 4 tylko przy pracy na 3 zmiany na dobę

gdzie:

Θ_z - temperatura zastępcza uzwojeń, wyznaczona z rzeczywistej, zmiennej w czasie ich temperatury przy pomocy wzoru (2.2),

dopuszczalna temperatura ustalona jest większa od temperatury dopuszczalnej, czyli

$$\Theta_{u.d} > \Theta_d$$

(patrz rys. 4 i 5)

Ogólnie można napisać:

$$\Theta_{u.d} = z.\Theta_d \tag{5.9}$$

gdzie:

$$z \geqslant 1 \tag{5.10}$$

Dla przeciętnych warunków dołowych ($\Theta_{ot} \cong 20$ [°C], $\varepsilon \cong 70$ [%] $T_j \cong 3,5$ [h], $y \cong 0,7$, izolacja klasy B) można przyjąć następujące wartości współczynnika "z":

1) praca na 1 zmianę na dobę

$$z \cong 1,47 \tag{5.10a}$$

2) praca na 2 zmiany na dobę

$$z \cong 1,14 \tag{5.10b}$$

3) praca na 3 zmiany na dobę

$$z \cong 1,00 \tag{5.10c}$$

5.3. Dopuszczalny ustalony przyrost temperatury $\vartheta_{u.d}$

Dopuszczalną wartość ustalonego przyrostu temperatury uzwojeń silnika $\vartheta_{u.d}$, przy trakcji w wyrobiskach przewozowych o średniej rocznej temperaturze powietrza Θ_{ot}, można wyznaczyć ze wzoru:

$$\vartheta_{u.d} = \Theta_{u.d} - \Theta_{ot} \tag{5.11}$$

lub też po uwzględnieniu (5.9)

$$\vartheta_{u.d} = z.\Theta_d - \Theta_{ot} \tag{5.12}$$

5.4. Dopuszczalny stopień obciążenia $a_{c.d}$

Zależność pomiędzy średnim (w ciągu cyklu pracy) ustalonym przyrostem temperatury uzwojeń ϑ_u a stopniem obciążenia silnika a_c, przy rozpatrywanej pracy przerywanej, można zgodnie z [2], wyrazić wzorem:

$$\vartheta_u = \frac{a_c^2}{\frac{\varepsilon}{100} + y\left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right)} \vartheta_{d.C} \tag{5.13}$$

gdzie:

$a_c = \frac{I_{sk}}{I_C}$ – stopień obciążenia silnika zgodnie z (3.20)

$\varepsilon = \frac{t_j}{t_c} 100\,[\%]$ – względny czas pracy (jazdy lokomotywy) zgodnie z (3.13)

y - stosunek stałych czasowych nagrzewania wzgl. chłodzenia uzwojeń silnika podczas jazdy (T_j) i postoju lokomotywy (T_p), czyli:

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

$\vartheta_{d.C}$ - dopuszczalny przyrost temperatury uzwojeń przy pracy ciągłej zgodnie z normą (1)

Z (5.13) można otrzymać zależność odwrotną:

$$a_c = \sqrt{\frac{\vartheta_u}{\vartheta_{d.C}}\left[\frac{\varepsilon}{100} + y\left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right)\right]} \tag{5.15}$$

i z kolei po podstawieniu zamiast ϑ_u wartości dopuszczalnej $\vartheta_{u.d}$, szukany wzór ogólny na dopuszczalny stopień obciążenia silnika przy pracy przerywanej:

$$a_{c.d} = \sqrt{\frac{\vartheta_{u.d}}{\vartheta_{d.C}}\left[\frac{\varepsilon}{100} + y\left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right)\right]} \tag{5.16}$$

lub też, po uwzględnieniu (5.12):

$$a_{c.d} = \sqrt{\frac{z.\Theta_d - \Theta_{ot}}{\vartheta_{d.C}}\left[\frac{\varepsilon}{100} + y\left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right)\right]} \tag{5.17}$$

Dla silnika trakcyjnego z izolacją klasy B, po uwzględnieniu (5.5) i (5.8) wzór (5.17) przyjmuje postać:

$$a_{c.d} = \sqrt{\frac{z.130 - \Theta_{ot}}{120}\left[\frac{\varepsilon}{100} + y\left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right)\right]} \tag{5.18}$$

Przy pomocy (5.15) i (5.16) można wyprowadzić prosty wzór na wyliczenie stopnia wykorzystania mocy silnika przy pracy przerywanej (w_c). Po podstawieniu (5.15) i (5.16) w (3.3) i odpowiednim uproszczeniu otrzymujemy:

$$w_c = \sqrt{\frac{\vartheta_u}{\vartheta_{u.d}}} \qquad (5.19)$$

przy czym:

ϑ_u - rzeczywisty, ustalony przyrost temperatury uzwojeń wyznaczony ze wzoru:

$$\vartheta_u = \Theta_u - \Theta_{ot}$$

gdzie:

Θ_u - ustalona temperatura uzwojeń, osiągana w rozpatrywanej pracy przerywanej, Θ_{ot} - temperatura otoczenia

$\vartheta_{u.d}$ - dopuszczalny, ustalony przyrost temperatury uzwojeń wyznaczony ze wzoru (5.12)

5.5. Dopuszczalny prąd skuteczny $I_{sk.d}$

Zgodnie z (3.20) stopień obciążenia silnika przy trakcyjnej pracy przerywanej wyraża się wzorem:

$$a_c = \frac{I_{sk}}{I_C}$$

stąd:

$$I_{sk} = a_c \, I_C$$

oraz wartość dopuszczalna prądu skutecznego:

$$I_{sk.d} = a_{c.d} I_C \tag{5.20}$$

gdzie:

$a_{c.d}$ - dopuszczalny stopień obciążenia silnika z (5.17)

Przy pomocy (5.20) można dla każdego konkretnego przypadku trakcji kopalnianej wyznaczyć wartość dopuszczalną prądu skutecznego, która nie może być przekroczona przy pracy praktycznej bez równoczesnego przekroczenia dopuszczalnego nagrzania. Przy projektowaniu więc elektrycznej trakcji dołowej należy w ten sposób dobrać jej parametry, ażeby prąd skuteczny I_{sk}, wyznaczony z rzeczywistych obciążeń silnika przy pomocy (3.8) spełniał równość

$$I_{sk} \leqslant I_{sk.d} \tag{5.21}$$

W przypadku krańcowym równości I_{sk} i $I_{sk.d}$ otrzymuje się maksymalnie dopuszczalne wykorzystanie mocy silnika przy zachowaniu normalnej, ekonomicznie uzasadnionej trwałości izolacji jego uzwojeń.

5.6. Przykłady zastosowania wyprowadzonych wzorów

W tablicy 2 oraz na rysunkach 4, 5 i 6 podano wyniki obliczeń, przeprowadzonych proponowaną "metodą dopuszczalnej temperatury" Do obliczeń przyjęto warunki pracy, występujące przeciętnie w polskim górnictwie węglowym, identyczne z przyjętymi w obliczeniach "metodą dopuszczalnego przyrostu temperatury" (rozdział 4.2 oraz tablica 1 i rysunku 1, 2, 3).

Tablica 2

Wyniki obliczeń silnika trakcyjnego,
o mocy wyznaczonej "metodą dopuszczalnej temperatury",
przy pracy pod ziemią

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Lp.	Warunki pracy[1)] Ilość zmian roboczych na dobę	Θ_{ot}[2)]	$\vartheta_{d.C}$[3)]	Θ_d[4)]	z[5)]	Θ_u[6)]	Θ_z[7)]	a_c[8)]	w_c[9)]	x[10)]	Uwagi
	zm/dobę	°C	°C	°C	-	°C	°C				
1	1	20	120	130	1,47	191,2	130,0	1,141	1,00	1,00	
2	2	20	120	130	1,14	148,1	130,0	0,987	1,00	1,00	
3	3	20	120	130	1,00	130,0	130,0	0,915	1,00	1,00	

Uwagi:

1) Warunki przeciętne, występujące w polskim górnictwie węglowym, identyczne jak w tablicy 1.
2) Temperatura otoczenia - średnia roczna temperatura powietrza w wyrobiskach przewozowych.
3) Dopuszczalny przyrost temperatury uzwojeń, ponad temperaturę otoczenia przy pracy ciągłej według normy [1].
4) Dopuszczalna temperatura uzwojeń przy podziemnej eksploatacji wyliczona ze wzoru (5.7) wzgl. (5.8).
5) Współczynnik dopuszczalnej temperatury uzwojeń, uwzględniający czas pracy silnika, z (5.10a) (5.10b) wzgl. (5.10c).
6) Ustalona temperatura uzwojeń równa, zgodnie z (5.9), iloczynowi kolumn 5 x 6.
7) Temperatura zastępcza uzwojeń wyliczona ze wzoru (2.2).
8) Stopień obciążenia silnika równy $a_c = I_{sk} : I_C$ (3.20).
9) Stopień wykorzystania mocy silnika (w stosunku do maksymalnie dopuszczalnej mocy) wyliczony z (5.19).
10) Względna (w stosunku do normalnej, ekonomicznie uzasadnionej) trwałość uzwojeń silnika, wyliczona z (2.8).

Z porównania tablicy 2 oraz rysunków 4, 5 i 6 z tablicą 1 oraz rysunkami 1, 2 i 3 wynika, że przy trakcji podziemnej proponowana "metoda dopuszczalnej temperatury" góruje nad powszechnie stosowaną "metodą dopuszczalnego przyrostu temperatury". Niezależnie bowiem od ilości zmian roboczych na dobę zapewnia ona pełne wykorzystanie mocy silnika trakcyjnego (patrz tablica 2 kolumna 10) oraz normalną, ekonomicznie uzasadnioną trwałość izolacji jego uzwojeń (patrz tablica 2 kolumna 11).

LITERATURA

[1] Norma: Silniki trakcyjne prądu stałegp PN-57/E-06001.

[2] Zarański Tadeusz: Pewne zagadnienia z nagrzewania się silników trakcyjnych elektrycznych lokomotyw kopalnianych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Górnictwo z. 4 Nr 43. 1962 r.

[3] Zarański Tadeusz: Wpływ temperatury wyrobisk na stopień wykorzystania mocy elektrycznych lokomotyw kopałnianych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Górnictwo z. 8. Nr 103 1964 r.

[4] Jaworski Czesław: Teoria trakcji elektrycznej. Warszawa 1956 r. Wydawnictwa Komunikacyjne.

[5] Pełczewski Władysław: Zagadnienia cieplne w maszynach elektrycznych. Warszawa 1956 r. Państwowe Wydawnictwa Techniczne.

[6] Gotter G.: Erwärmung und Kühlung elektrischer Maschinen. Berlin 1954 r. Springer Verlag.

[7] Szklarski Ludger: Trakcja Elektryczna w Kopalni. Katowice 1960 Wydawnictwo Górniczo-Hutnicze.

[8] Wołotkowskij A.S.: Rudnicznaja Elektrowoznaja Tiaga. Moskwa 1955. Ugletiachizdat.

ДОПУСКАЕМАЯ НАГРУЗКА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РАБОТЕ ПОД ЗЕМЛЁЙ

Р е з ю м е

В первой части работы показывается, что применение приращения температуры обмотки сверх температуры окружающей среды как критерия для определения допускаемой нагрузки тяговых электродвигателей при эксплуатации под землёй неправильно, хотя этот способ и даёт хорошие результаты при тяге на поверхности. Однако из-за разниц температур выступающих в окружающей среде (охлаждающий орган) при эксплуатации тяговых электродвигателей на поверхности и под землёй, в этом последнем случае получается направильное использование мощности электродвигателя и живучесть его изоляции значительно отличается от обычной, гарантирующей наименьшие эксплуатационные расходы и безотказность работы.

Дальше даётся новый способ определения допускаемой нагрузки тяговых электродвигателей для работы под землёй при принятии как критерия допускаемой температуры обмотки.
В заключении доказывается, что при применении предлагаемого способа расчёта получают независимо от условий работы полное использование мощности тягового электродвигателя и нормальную живучесть его изоляции.

PERMISSIBLE LOAD OF TRACTION ENGINES AT THE UNDERGROUND WORKING

S u m m a r y

It is shown that temperature increase of windings above ambient temperature as the permissible load criterion of traction engines at the underground working is not right, in spite of this way gives the good results at common electric traction. There is given the new method of determine the permissible load of traction engines at the underground working with useing permissible temperature of windings as the criterion. It is shown that by useing this way of calculations it is possible to make the most of traction engine power with normal service life of its insulation, independently of service conditions.