ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1969
Seria: GÓRNICTWO z. 41 Nr kol. 269

Tadeusz Zarański

PEWNE ZAGADNIENIA Z PRACY ELEKTRYCZNYCH LOKOMOTYW KOPALNIANYCH

Streszczenie: W nowoczesnych dużych kopalniach drogi transportu urobku z oddziałów produkcyjnych do szybów wydobywczych znacznie się wydłużają. W konsekwencji, przy stosowaniu do przewozu trakcji elektrycznej, otrzymuje się długie czasy trwania okresów pracy lokomotyw (łączny czas pracy i następującego po niej postoju). W referacie wykazano, że w tych warunkach, nawet przy przepisowo zaprojektowanych lokomotywach występuje przy pracy cyklicznie, poważne przekraczanie dopuszczalnej temperatury uzwojeń, co odbija się ujemnie na trwałości izolacji silników trakcyjnych, a w następstwie powoduje zmniejszenie pewności ruchu i zwiększenie kosztów eksploatacji. W końcu zaś wykazano, że przez odpowiednie obniżenie stopnia obciążenia lokomotyw można ww chwilowe szczyty temperatury uzwojeń utrzymać w granicach dopuszczalnych.

1. Uwagi wstępne

Praca trakcyjna elektrycznych lokomotyw kopalnianych jest pracą przerywaną [1] składającą się z długotrwałego szeregu okresów pracy (jazdy) i następującego po niej postoju. Praca ta trwa tak długo, że zostają osiągnięte ustalone przyrosty temperatur wszystkich części silników trakcyjnych, mierzone w odpowiadających sobie chwilach poszczególnych okresów.

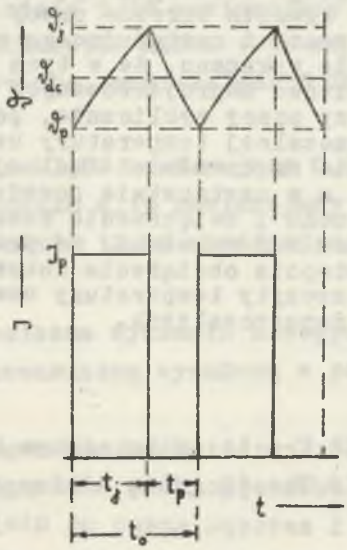
Czas trwania całego okresu pracy przerywanej (t_o) jest równy sumie czasu pracy (jazdy - t_j) i czasu postoju (t_p), czyli:

$$t_o = t_j + t_p, \tag{1}$$

względny zaś czas pracy (ε) określany jest wzorem

$$\varepsilon = \frac{t_j}{t_o} 100 [\%] \tag{2}$$

W następstwie okresowego przebiegu obciążenia w czasie, również przyrosty temperatury silników trakcyjnych ponad temperaturę otoczenia podlegają okresowym wahaniom. Rys. 1 przedstawia przebieg przyrostu temperatury (ϑ) w czasie przy znamionowej pracy przerywanej. Przyrosty te wahają się w granicach pomiędzy ϑ_p (przyrost temperatury minimalny, pod koniec czasu postoju - t_p (a $_j$) przyrost temperatury maksymalnej, szczytowy, pod koniec czasu jazdy - t_j), uzyskując w połowie czasu jazdy wartość dopuszczalną ciągłą ϑ_{do}, określoną przez odnośne przepisy [1][6].



Rys. 1. Przebieg prądu obciążenia (I) oraz przyrostu temperatury (ϑ) w czasie (t) przy pracy znamionowej przerywanej silnika trakcyjnego;

I_p - prąd znamionowy przerywany, ϑ_{do} - dopuszczalny przyrost temperatury przy pracy ciągłej

Przy znamionowej więc pracy przerywanej występuje okresowe przekroczenie dopuszczalnej wartości przyrostu temperatury, gdyż

$$\vartheta_j > \vartheta_{do}$$

co oczywiście odbija się ujemnie na trwałości izolacji silników trakcyjnych, a w konsekwencji powoduje zwiększenie kosztów ich eksploatacji.

Wyżej wymienione ujemne zjawiska pozostają jednak w granicach dopuszczalnych, jeżeli tylko różnica $(\vartheta_j - \vartheta_{dc})$ jest niewielka. W tym też celu przepisy [1] ograniczają czas trwania okresu pracy przerywanej (t_o) do 10 minut czyli winien być spełniony warunek:

$$t_o \leqslant 10 \, [\mathrm{min}]$$

W związku z silnym rozwojem górnictwa i powiększaniem kopalń, drogi transportu urobku pokaźnie się wydłużają, w następstwie czego czasy trwania okresów pracy (t_o) przy praktycznej pracy trakcyjnej znacznie przekraczają wyżej wymienione 10 minut, czyli:

$$t_o \gg 10 \, [\mathrm{min}]$$

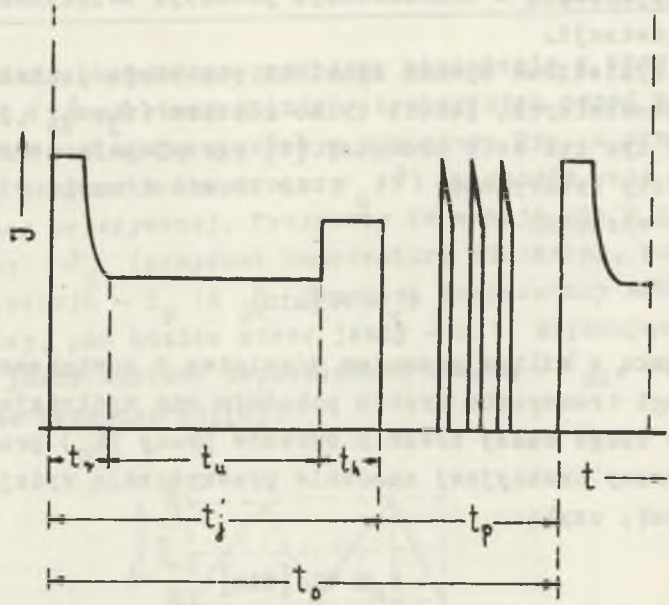
powodując wzrost różnicy $(\vartheta_j - \vartheta_{dc})$ z wszelkimi ujemnymi konsekwencjami.

Celem referatu jest przeprowadzenie analizy powyższego zagadnienia i wyznaczenie ewentualnych środków zaradczych.

2. Założenia i wzory podstawowe

Jako przykład przebiegu w czasie prądu obciążenia silnika, dla pewnego przypadku praktycznej pracy trakcyjnej, może posłużyć rys. 2. Analiza nagrzewania się silnika trakcyjnego w oparciu o powyższy wykres obciążenia byłaby jednak bardzo skomplikowana, pracochłonna i nie posiadałaby charakteru ogólnego. Dlatego też do dalszych obliczeń przyjęto przebieg prądu uproszczony, zgodnie z rys. 3, przy czym wartość jazdy I_j wyznaczono w ten sposób (patrz niżej p. 2 i 3), ażeby nagrzewanie się silnika było identyczne, jak przy rzeczywistym zmiennym w czasie, prądzie obciążenia podczas praktycznej pracy trakcyjnej (rys. 2).

Przy przeprowadzaniu analizy pracy silnika trakcyjnego w dalszych rozdziałach przyjęto ponadto następujące założenia



Rys. 2. Przebieg prądu obciążenia (I) w czasie (t) przy praktycznej pracy trakcyjnej (przerywanej);
t_r - czas rozruchu, t_u - czas jazdy w warunkach ustalonych, t_h - czas hamowania, t_j - czas jazdy, t_p - czas postoju, t_o - czas trwania okresu

uproszczające, stosowane powszechnie w klasycznej teorii nagrzewanie się maszyn elektrycznych [2], [3], [4], [5]:

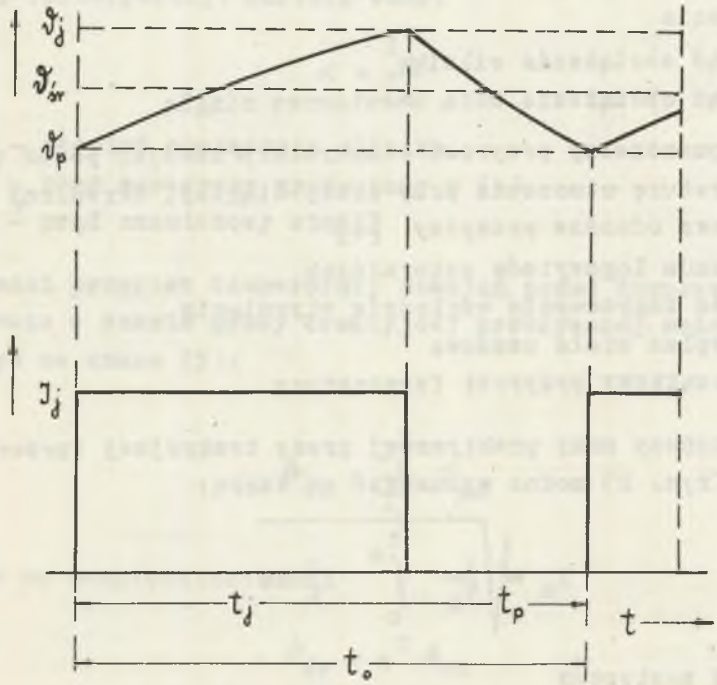
a) jednorodność nagrzewanego silnika trakcyjnego względnie jego części (uzwojeń)

b) niezależność współczynnika oddawania ciepła do otoczenia od temperatury uzwojeń

c) proporcjonalność całkowitych strat mocy do drugiej potęgi chwilowego prądu obciążenia

d) niezależność strat mocy w uzwojeniach od ich temperatury

e) niezależność cieplnej stałej czasowej od obciążenia, temperatury i stanu pracy.



Rys. 3. Przebieg prądu obciążenia (I) oraz przyrostu temperatury (ϑ) w czasie (t) przy uproszczonej (obliczeniowej) pracy trakcyjnej (przerywanej)

I_j - prąd jazdy, $\vartheta_{śr}$ - średni przyrost temperatury, t_j, t_p, t_o - jak na rys. 2

Powyższe założenia upraszczające odbijają się wprawdzie ujemnie na ścisłości wyników analizy, zapewniają jednak dokładność dostateczną dla celów technicznych i pozwalają dojść, w sposób stosunkowo prosty, do pewnych ogólnych wniosków praktycznych.

Przy powyższych założeniach:

1) podstawowe równanie nagrzewania się i stygnięcia silnika trakcyjnego przyjmuje postać:

$$\vartheta = \frac{I^2}{I_c^2}\,\vartheta_{dc}\,(1-e^{-\frac{t}{T}}) + \vartheta_o\, e^{-\frac{t}{T}} \qquad (3)$$

ϑ – przyrost temperatury uzwojenia ponad temperaturę otoczenia

I – prąd obciążenia silnika

I_o – prąd obciążenia mocą znamionową ciągłą

ϑ_{do} – dopuszczalny przyrost temperatury uzwojeń ponad temperaturę otoczenia przy pracy ciągłej, określony przez odnośne przepisy [6]

e – zasada logarytmów naturalnych

t – czas nagrzewania względnie stygnięcia

T – cieplna stała czasowa

ϑ_o – początkowy przyrost temperatury

2) prąd zastępczy przy praktycznej pracy trakcyjnej (przerywanej) (rys. 2) można wyznaczyć ze wzoru:

$$I_z = \sqrt{\frac{1}{t_o} \int_o^{t_o} I_t^2 \, dt} \qquad (4)$$

I_z – prąd zastępczy

t_o – czas trwania okresu pracy (wzór (1))

I_t – chwilowy prąd obciążenia

3) obliczeniowy prąd obciążenia (jazdy) (rys. 3) wyznacza się ze wzoru:

$$I_j = \frac{10}{\sqrt{\varepsilon}} I_z \qquad (5)$$

I_j – obliczeniowy prąd jazdy

ε – względny czas praktycznej pracy trakcyjnej (wzór (2))

I_z – prąd zastępczy (wzór (4)).

Wzór (5) otrzymano przez odpowiednie przekształcenie wzoru (4) po uwzględnieniu w nim następującego przebiegu prądu obciążenia w czasie:

$$t = 0 \ldots t_j \quad - \quad I_t = I_j = \text{const}$$
$$t = t_j \ldots (t_j + t_p) \quad - \quad I_t = 0$$

oraz zależności (1) i (2).

4) stopień obciążenia silnika trakcyjnego przy pracy trakcyjnej (przerywanej) określa wzór:

$$\alpha = \frac{I_z}{I_c} \tag{6}$$

α - stopień obciążenia silnika
I_z - prąd zastępczy wyznaczony z (4)
I_c - prąd znamionowy ciągły

5) średni przyrost temperatury uzwojeń ponad temperaturę otoczenia w czasie pracy trakcyjnej przerywanej można wyznaczyć ze wzoru (5):

$$\vartheta_{śr} = \frac{I_z^2}{I_c^2} \vartheta_{dc} \tag{7}$$

lub po uwzględnieniu (6)

$$\vartheta_{śr} = \alpha^2 \vartheta_{dc} \tag{8}$$

$\vartheta_{śr}$ - średni ustalony przyrost temperatury
I_z - prąd zastępczy (4)
I_c - prąd znamionowy ciągły
ϑ_{dc} - dopuszczalny przyrost temperatury uzwojeń przy pracy ciągłej [6]
α - stopień obciążenia silnika (6)

3. Wyznaczenie szczytowego przyrostu temperatury uzwojeń (ϑ_j) przy pracy trakcyjnej (przerywanej)

Po zastosowaniu wzoru (3) do uproszczonej pracy trakcyjnej (rys. 3) otrzymuje się

a) dla okresu jazdy lokomotywy

$$\vartheta_j = \frac{I_j^2}{I_c^2} \vartheta_{dc} \left(1 - e^{-\frac{t_j}{T}}\right) + \vartheta_p e^{-\frac{t_j}{T}} \tag{9}$$

gdyż dla $t = t_j$ - przy $I = I_j$ oraz $\vartheta_o = \vartheta_p$, ϑ jest równe ϑ_j

b) <u>dla okresu postoju lokomotywy</u>

$$\vartheta_p = \vartheta_j \, e^{-\frac{t_p}{T}} \tag{10}$$

gdyż znowu dla $t = t_p$, przy $I = 0$ oraz $\vartheta_o = \vartheta_j$, ϑ jest równe ϑ_p.

Z kolei po podstawieniu (10) w (9) i odpowiednim przekształceniu stosunek:

$$\frac{\vartheta_j}{\vartheta_{dc}} = \frac{I_j^2}{I_c^2} \, \frac{1 - e^{-\frac{t_j}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_j + t_p}{T}}}$$

i w końcu, po uwzględnieniu (1), (5), (6) oraz

$$t_j = \frac{\varepsilon}{100} t_o \quad \text{(z równości (2))},$$

otrzymuje się

$$\frac{\vartheta_j}{\vartheta_{dc}} = 100 \, \frac{\alpha^2}{\varepsilon} \, \frac{1 - e^{-\frac{\varepsilon t_o}{100T}}}{1 - e^{-\frac{t_o}{T}}} \tag{11}$$

Ze wzoru (11) można wyznaczyć względną wartość szczytowego przyrostu temperatury (V_j) uzwojeń silnika trakcyjnego w stosunku do wartości dopuszczalnej ciągłej (V_{dc}) w zależności od

stopnia obciążenia silnika - α (6)
względnego czasu pracy - ε (2)

czasu trwania całego okresu – t_o (1)
cieplnej stałej czasowej silnika – T

4. Wpływ czasu trwania całego okresu pracy (t_o) na wartość szczytowego przyrostu temperatury uzwojeń (ϑ_j)

Zależność względnej wartości szczytowego przyrostu temperatury uzwojeń silnika ($\frac{\vartheta_j}{\vartheta_{dc}}$) od czasu trwania całego okresu pracy trakcyjnej (t_o) wyznaczono poniżej z (11) dla następujących założeń

a) pełne wykorzystanie mocy silnika, zatem

$$I_z = I_c$$

czyli (6):

$$\alpha = \frac{I_c}{I_c}$$

ostatecznie $\alpha = 1$ (12a)

b) stały względny czas pracy

$$\varepsilon = \text{const} \tag{12b}$$

c) silnik o cieplnej stałej czasowej

$$T = 60 \ [\text{min}] \tag{12c}$$

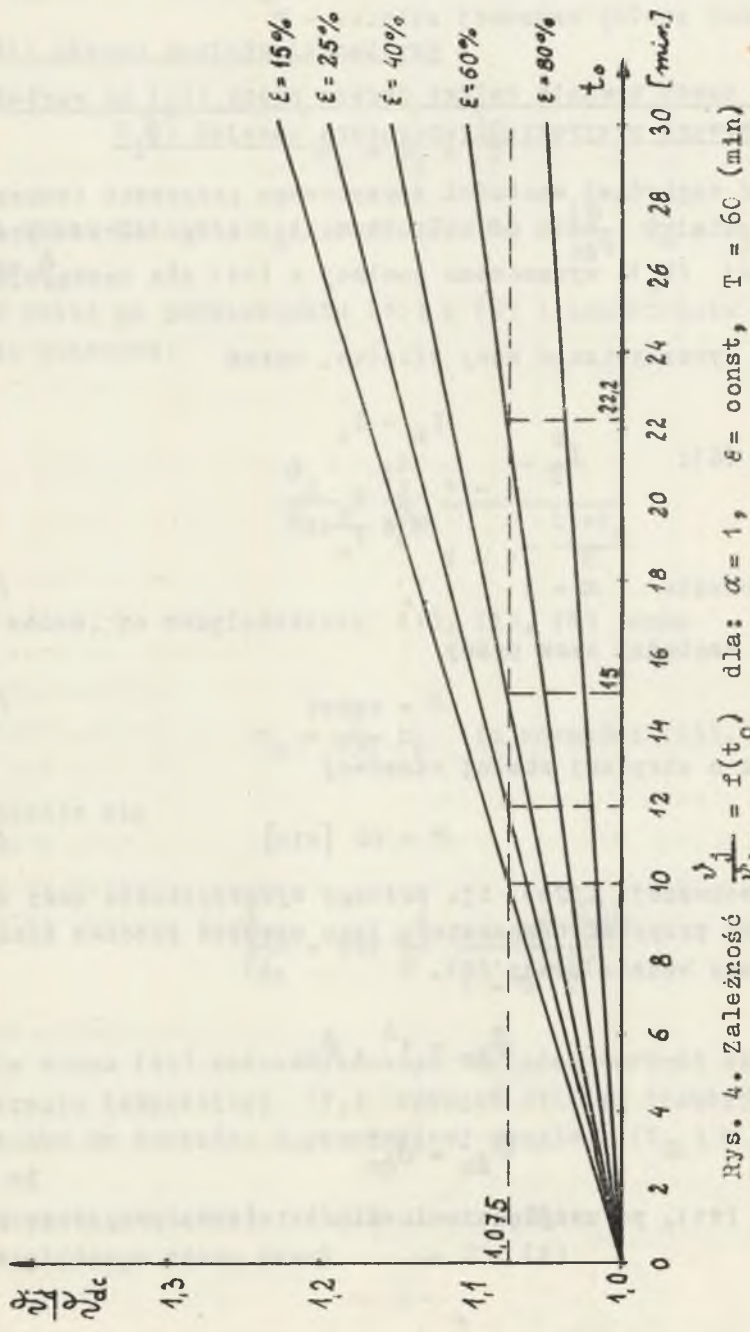
W konsekwencji (12a), tj. pełnego wykorzystania mocy silnika, średni przyrost temperatury jego uzwojeń podczas analizowanej pracy będzie równy (8).

$$\vartheta_{śr} = 1^2 \cdot \vartheta_{dc}$$

zatem:

$$\vartheta_{śr} = \vartheta_{dc} \tag{13}$$

wzór zaś (11), po uwzględnieniu (12a) i (12c) przyjmuje postać



Rys. 4. Zależność $\frac{\vartheta_1}{\vartheta_{dc}} = f(t_o)$ dla: $\alpha = 1$, ε = const, T = 60 (min)

$$\frac{\vartheta_1}{\vartheta_{dc}} = \frac{100}{\varepsilon} \frac{1 - e^{-\frac{\varepsilon t_o}{5000}}}{1 - e^{-\frac{t_o}{60}}} \tag{14}$$

gdzie t_o mierzony jest w minutach.

Szukaną zależność

$$\frac{\vartheta_1}{\vartheta_{dc}} = f(t_o)$$

dla: $\alpha = 1$, $\varepsilon = \text{const}$, $T = 60\,[\text{min}]$, wyznaczona z (14) podaje rys. 4.

Ostatecznie zaś, mnożąc każdorazowo otrzymane wartości stosunku $\frac{\vartheta_1}{\vartheta_{dc}}$ przez odpowiednią wartość dopuszczalną ciągłą ϑ_{dc} [6] ku $\frac{\vartheta_1}{\vartheta_{dc}}$ [6], otrzymuje się wartości szczytowego przyrostu temperatury w zależności od czasu trwania okresu pracy t_o.

Z wykresów na rys. 4 można wyciągnąć wniosek, że przy pełnym wykorzystaniu silnika (α=1) i dłuższych okresach pracy (gdy $t_c > 10\,[\text{min}]$) mogą wystąpić pod koniec okresu jazdy szczytowe przyrosty temperatury, znacznie przekraczające (ponad 20%) wartości dopuszczalne przy pracy ciągłej, zwłaszcza przy małych względnych czasach pracy (ε). Stan taki trudno jest uznać za właściwy i dopuszczalny, gdyż powoduje on obniżenie trwałości izolacji silnika trakcyjnego poniżej wartości ekonomicznie i technicznie uzasadnionej.

5. Proponowany sposób zabezpieczenia przed nadmiernymi szczytami temperatury

Po odpowiednim przekształceniu (11) można otrzymać wzór ogólny:

$$\alpha = \frac{1}{10} \sqrt{\frac{\vartheta_1}{\vartheta_{dc}} \frac{1 - e^{-\frac{t_o}{T}}}{1 - e^{-\frac{\varepsilon t_o}{100T}}} \varepsilon} \tag{15}$$

lub też po uwzględnieniu (12c)

$$\alpha = \frac{1}{10}\,\frac{\vartheta_j}{\vartheta_{dc}}\,\frac{1 - e^{-\frac{t_o}{60}}}{1 - e^{-\frac{\varepsilon t_o}{6000}}}\,\varepsilon \tag{15a}$$

wzór dla silnika o cieplnej stałej czasowej $T = 60$ [min].

Ze wzorów (15) względnie (15a) wynika, że chcąc, ażeby przy pewnych ϑ_{dc}, t_o oraz ε, wartość przyrostu temperatury uzwojeń silnika pod koniec okresu jazdy (ϑ_j) nie przekroczyła pewnej wartości maksymalnej przyjętej za dopuszczalną, szczytową przy pracy przerywanej (ϑ_{dp}) czyli ażeby:

$$\vartheta_j \leqslant \vartheta_{dp} \tag{16}$$

nie powinien stopień obciążenia silnika (α) przekroczyć wartości dopuszczalnej (α_d) czyli musi być:

$$\alpha \leqslant \alpha_d \tag{17}$$

wyznaczonej ze wzoru:

$$\alpha_d = \frac{1}{10}\sqrt{\frac{\vartheta_{dp}}{\vartheta_{dc}}\,\frac{1 - e^{-\frac{t_o}{60}}}{1 - e^{-\frac{\varepsilon t_o}{6000}}}\,\varepsilon} \tag{18}$$

Kwestia wyznaczenia dopuszczalnego stopnia obciążenia silnika trakcyjnego (α_d) sprowadza się więc do określenia dopuszczalnego, szczytowego przyrostu temperatury przy pracy przerywanej (ϑ_{dp}). Celem rozwiązania tego zagadnienia proponuje się w rozdziałach 5.1. i 5.2 przyjęcie alternatywne dwóch wartości dopuszczalnych nagrzania ϑ_{dp}.

5.1. Dopuszczalny przyrost temperatury przy pracy przerywanej (ϑ_{dp}) - równy dopuszczalnej wartości przy pracy ciągłej (ϑ_{dc})

Przy tym przyjęciu, tj. gdy:

$$\vartheta_{dp} = \vartheta_{dc} \tag{19}$$

i przy doborze takiego stopnia obciążenia silnika trakcyjnego (α_{d1}) ażeby

$$\vartheta_j = \vartheta_{dp} \tag{20}$$

szczytowe przyrosty temperatury uzwojeń silnika, pod koniec okresu jazdy (ϑ_j), są równe wartości dopuszczalnej przy pracy ciągłej czyli:

$$\vartheta_j = \vartheta_{dc} \tag{21}$$

Przypadek ten przedstawiony jest na rys. 5c, na którym, dla porównania, podano też pracę przy pełnym wykorzystaniu mocy silnika tj. przy $\alpha = 1$ (rys. 5a).

Wartość dopuszczalnego stopnia obciążenia α_{d1} można wyznaczyć z (18) po podstawieniu (19), zatem

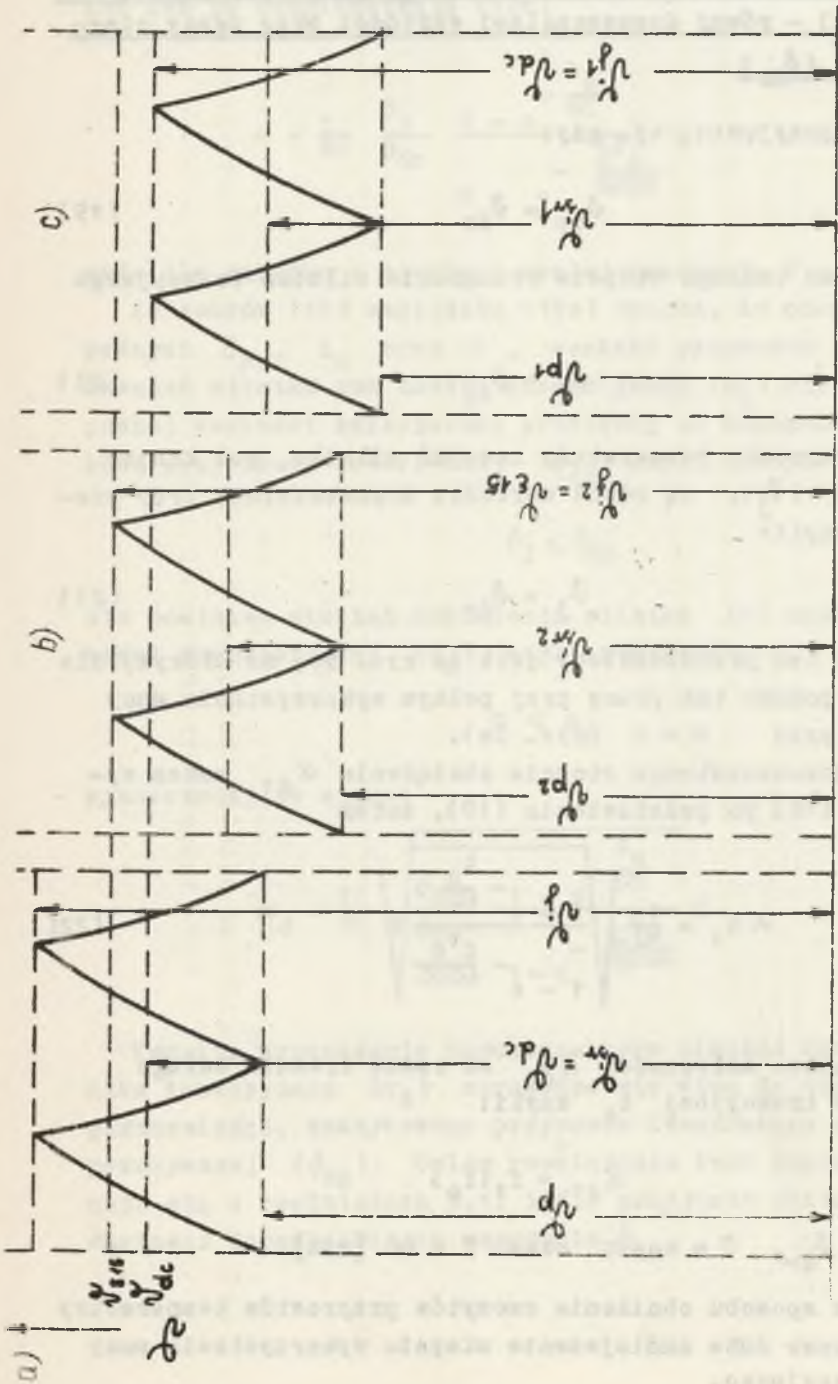
$$\alpha_{d_1} = \frac{1}{10}\sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_o}{60}}}{1 - e^{-\frac{\varepsilon t_o}{6000}}}\,\varepsilon} \tag{22}$$

Na rys. 6 podano zależność α_{d1} od czasu trwania całego okresu pracy trakcyjnej t_o czyli:

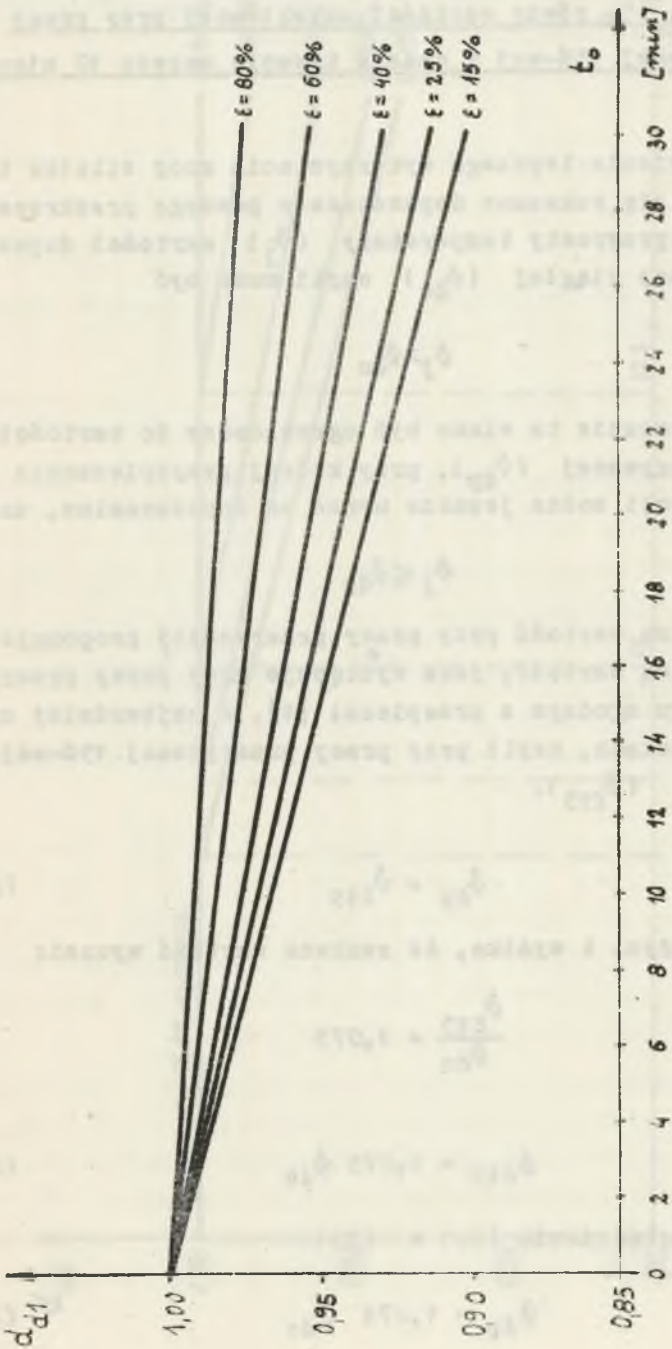
$$\alpha_{d1} = f_1(t_o)$$

przy $\vartheta_{dp} = \vartheta_{dc}$, $\varepsilon = \text{const}$ oraz $T = 60$ [min].

Wadą tego sposobu obniżenia szczytów przyrostów temperatury jest stosunkowo duże zmniejszenie stopnia wykorzystania mocy silnika trakcyjnego.



Rys. 5. Przebieg przyrostu temperatury (ϑ) w czasie (t) przy pracy trakcyjnej (przerywanej) z różnymi stopniami obciążenia silnika (α) . a) - dla $\alpha = 1$, b) - dla $\alpha = \alpha_{d2}$, c) - dla $\alpha = \alpha_{d2}$ przy czym $\alpha = 1 > \alpha_{d2} > \alpha_{d1}$; ϑ_{do} - dopuszczalny przyrost temperatury przy pracy ciągłej, ϑ_{15} - przyrost temperatury uzyskiwany przy pracy przerywanej 15%-wej o czasie trwania okresu 10 minut



Rys. 6. Zależność $\alpha_{d1} = f_1(t_o)$ dla $\vartheta_{dp} = \vartheta_{do}$, ε = const, T = 60 [min]; α_{d1} – dopuszczalny stopień obciążenia silnika trakcyjnego, ϑ_{dp} – dopuszczalny szczytowy przyrost temperatury przy pracy przerywanej

5.2. Dopuszczalny przyrost temperatury przy pracy przerywanej (ϑ_{dp}) - równy wartości uzyskiwanej przy pracy przerywanej 15%-wej w czasie trwania okresu 10 minut ($\vartheta_{\varepsilon 15}$)

Celem umożliwienia lepszego wykorzystania mocy silnika trakcyjnego, wydaje się wskazane dopuszczenie pewnego przekroczenia przez szczytowe przyrosty temperatury (ϑ_j) wartości dopuszczalnej przy pracy ciągłej (ϑ_{dc}) czyli może być

$$\vartheta_j > \vartheta_{dc}$$

z tym że przekroczenie to winno być ograniczone do wartości dopuszczalnej przerywanej (ϑ_{dp}), przy której przyspieszenie starzenia się izolacji można jeszcze uznać za dopuszczalne, zatem

$$\vartheta_j \leqslant \vartheta_{dp}$$

Za dopuszczalną wartość przy pracy przerywanej proponuje się przyjąć maksymalną wartość, jaka występuje przy pracy przerywanej o przebiegu zgodnym z przepisami [1], w najbardziej niekorzystnych warunkach, czyli przy pracy przerywanej 15%-wej w okresie 10 [min] ($\vartheta_{\varepsilon 15}$).

Zatem

$$\vartheta_{dp} = \vartheta_{\varepsilon 15} \tag{23}$$

Z wykresu na rys. 4 wynika, że szukana wartość wynosi:

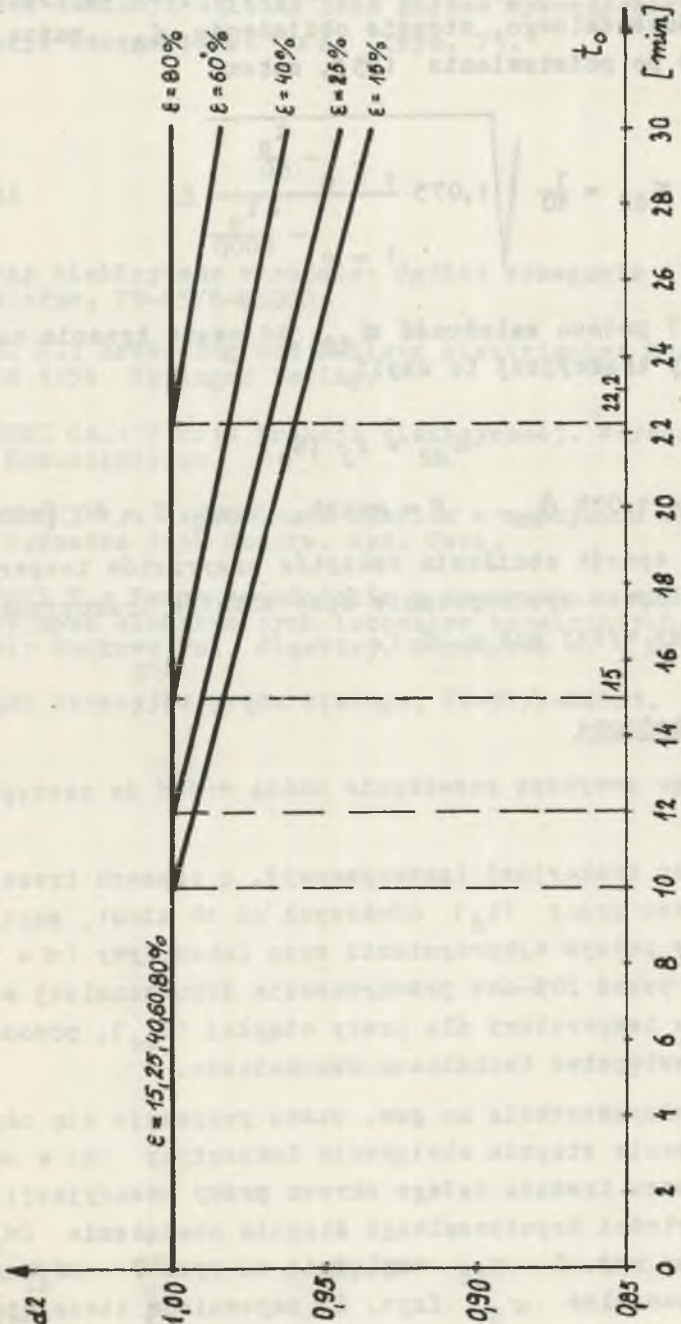
$$\frac{\vartheta_{\varepsilon 15}}{\vartheta_{dc}} = 1{,}075$$

czyli

$$\vartheta_{\varepsilon 15} = 1{,}075\ \vartheta_{dc} \tag{24}$$

i w końcu po uwzględnieniu (24) w (23):

$$\vartheta_{dp} = 1{,}075\ \vartheta_{dc} \tag{25}$$



Rys. 7. Zależność $\alpha_{d2} = f_2(t_o)$ dla $\vartheta_{dp} = \vartheta_{s15} = 1,075\,\vartheta_{dq}$, s = const, T = 60 [min]; α_{d2} – dopuszczalny stopień obciążenia silnika trakcyjnego, ϑ_{dp} – dopuszczalny, (szczytowy), przyrost temperatury przy pracy przerywanej

Omawiany przypadek pracy przedstawiony jest na rys. 5b, a wartość dopuszczalnego, stopnia obciążenia α_{d2} można wyznaczyć z (18) po podstawieniu (25), zatem:

$$\alpha_{d2} = \frac{1}{10}\sqrt{1{,}075\,\frac{1-e^{-\frac{t_o}{60}}}{1-e^{-\frac{\varepsilon t_o}{6000}}}\,\varepsilon} \tag{26}$$

Na rys. 7 podano zależność α_{d2} od czasu trwania całego okresu pracy trakcyjnej to czyli

$$\alpha_{d2} = f_2\,(t_o)$$

przy $\vartheta_{dp} = 1{,}075\,\vartheta_{do}$, $\varepsilon = \text{const}$, oraz $T = 60$ [min]

Omawiany sposób obniżenia szczytów przyrostów temperatury daje nieco lepsze wykorzystanie mocy silnika trakcyjnego niż sposób podany wyżej pod p. 5.1.

6. Wnioski końcowe

Reasumując powyższe rozważania można dojść do następujących wniosków:

1. Przy pracy trakcyjnej (przerywanej), o czasach trwania całego okresu pracy (t_o) dłuższych od 10 minut, mogą wystąpić, przy pełnym wykorzystaniu mocy lokomotywy ($\alpha = 1$), znaczne, ponad 20%-owe przekroczenia dopuszczalnej wartości przyrostu temperatury dla pracy ciągłej (ϑ_{do}), powodując ujemne następstwa techniczno-ekonomiczne.

2. Celem niedopuszczenia do pow. stanu proponuje się odpowiednie obniżenie stopnia obciążenia lokomotywy (α) w zależności od czasu trwania całego okresu pracy trakcyjnej; wyliczone wartości dopuszczalnego stopnia obciążenia (α_d) podane są na rys. 6 – α_{d1} względnie na rys. 7 – α_{d2}. Wartości dopuszczalne α_{d1} (rys. 6) zapewniają nieco większą

trwałość izolacji silnika lecz gorsze wykorzystanie mocy lokomotyw niż wartości αd_2 (rys. 7).

LITERATURA

[1] Maszyny elektryczne wirujące: Ogólne wymagania i badania techniczne, PN-65/E-06000

[2] GOTTER G.: Erwärmung und Kühlung elektrischer Maschinen, Berlin 1954 Springer Verlag.

[3] JAWORSKI Cz.: Teoria trakcji elektrycznej. Warszawa 1956 Wyd. Komunikacyjne.

[4] PEŁCZEWSKI W.: Zagadnienia cieplne w maszynach elektrycznych Warszawa 1956 Państw. Wyd. Tech.

[5] ZARAŃSKI T.: Pewne zagadnienia z nagrzewania się silników trakcyjnych elektrycznych lokomotyw kopalnianych. Zeszyty Naukowe Pol. Śląskiej. Górnictwo z. 4 Nr 43 1962 r.

[6] Silniki trakcyjne prądu stałego, PN-57/E-06001.