

## INTERNATIONAL SEMINAR ON SHAFT HOISTING TECHNOLOGY

Jerzy ANTONIAK

Antoni JANKOWSKI

Silesian Technical University, Gliwice, Poland

## PROGNOZOWANIE WARUNKÓW TERMICZNYCH HAMULCÓW TARCZOWYCH MASZYN WYCIĄGOWYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono metodę prognozowania warunków termicznych hamulców tarczowych maszyn wyciągowych, zawierającą określenie przyrostu średniej i szczytowej temperatury powierzchni tarczy oraz przyrostu średniej temperatury objętościowej tarczy. Zgodnie z przedstawionymi zależnościami zaprezentowano wyniki obliczeń cieplnych hamulca tarczowego maszyny wyciągowej typu 4L-5000/2x2900, które porównano z wynikami badań przeprowadzonych na wymienionej maszynie.

## WSTĘP

Wywiązująca się podczas hamowania energia cieplna powoduje przyrost temperatury elementów ciernych hamulca. Wartość osiąganej temperatury należy do parametrów decydujących o przebiegu zjawisk i procesów zachodzących w skojarzeniu okładzina-bieżnia hamulcowa. Ma ona bezpośredni wpływ na własności cierno-zużyciowe pary hamulcowej, w tym zwłaszcza na wartość współczynnika tarcia oraz trwałość okładzin ciernych. Nadmierny przyrost temperatury może być przyczyną występowania niepożądanych naprężeń i odkształceń tarczy hamulcowej, a w ekstremalnych przypadkach nawet jej uszkodzeń. Istnieje więc konieczność prognozowania warunków termicznych pracy hamulca już na etapie jego projektowania oraz takiego kształtowania i doboru cech konstrukcyjnych i materiałowych układu hamulcowego, by spełnione były wysokie wymagania niezawodnościowe stawiane hamulcom maszyn wyciągowych.

Zagadnienia cieplne w hamulcach były przedmiotem wielu rozważań teoretycznych i badań eksperymentalnych [1,4,5,6,7,10,11,13,14], również w odniesieniu do maszyn wyciągowych [2,3,9,12]. W artykule przedstawiono metodę określania warunków cieplnych pracy hamulca tarczowego maszyny wyciągowej oraz przeprowadzono komputerowe obliczenia hamulca maszyny wyciągowej typu 4L-5000/2x2900, na podstawie opisanej poniżej metody. Wyniki porównano z wynikami badań przeprowadzonych na omawianej maszynie wyciągowej.

WPROWADZENIE DO METODY PROGNOZOWANIA WARUNKÓW TERMICZNYCH HAMULCA

Zaprezentowana poniżej metoda obliczeń termicznych hamulców tarczowych maszyn wyciągowych oparta została na przedstawionej konferencji naukowej w Kanadzie w 1989 r. metodzie obliczeń cieplnych hamulców [8]. W przeciwieństwie do metod energetycznych publikowanych wcześniej [2], prezentowany sposób prognozowania warunków termicznych opiera się na odmiennym niż przyjmowany do tej pory, przebiegu zmienności temperatury powierzchni tarczy względem czasu.

T.P. Newcomb [10] zaprezentował równanie wiążące przyrost temperatury powierzchni tarczy z maksymalną mocą jednostkową pochłanianą przez tarczę:

$$T_t = \frac{2y_1 Q_D}{k_1} \sqrt{\frac{\alpha_1 t}{\pi}} \left[ 1 - \frac{2}{3} \frac{t}{t_h} \right] \quad /1/$$

gdzie:

$$Q_D = \frac{M_h \omega_2}{2i_1 \frac{\pi}{4} [D^2 - /D - 2W/2]} \quad /2/$$

$\alpha_1$  - współczynnik dyfuzji cieplnej materiału tarczy,

$k_1$  - współczynnik przewodności cieplnej tarczy,

$i_1$  - ilość tarcz,

$D$  - średnica zewnętrzna tarczy hamulcowej,

$W$  - szerokość wykładziny,

$\omega_2$  - prędkość kątowa tarczy,

$M_h$  - moment hamowania,

$t_h$  - całkowity czas hamowania,

$y_1$  - współczynnik rozdziału energii - przyjęto, iż prócz tarczy i okładziny część energii wydzielającej się w procesie hamowania /ok.1 %/ przejmowana jest przez otoczenie /powietrze/ w procesie konwekcji, tak więc założony współczynnik rozdziału energii wynosi:

$$y_1 = y - 0,01 \quad /3/$$

przy czym

$$y = \frac{A_1 \sqrt{\rho_1 k_1 c_1}}{A_1 \sqrt{\rho_1 k_1 c_1} + i_2 A_2 \sqrt{k_2 c_2 \rho_2}} \quad /4/$$

gdzie:

$A_1, A_2$  - czynna powierzchnia tarczy, okładziny,

$k_1, k_2$  - współczynnik przewodności cieplnej tarczy, okładziny,

$\rho_1, \rho_2$  - masa właściwa tarczy, okładziny,

$c_1, c_2$  - ciepło właściwe tarczy, okładziny,

$i_2$  - ilość par siłowników na jednej tarczy.

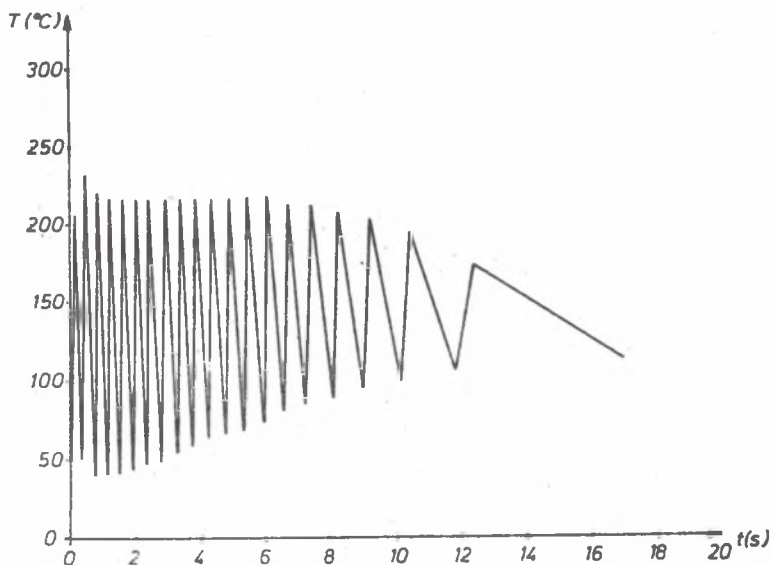
Różniczkując równanie /1/ względem czasu, maksymalna temperatura  $T_{\max}$  występuje w chwili  $t = t_h/2$  i wynosi:

$$T_{\max} = \frac{4}{3} \frac{\gamma_1 \alpha_D}{k_1} \sqrt{\frac{\alpha_1 t_h}{2\pi}} \quad /5/$$

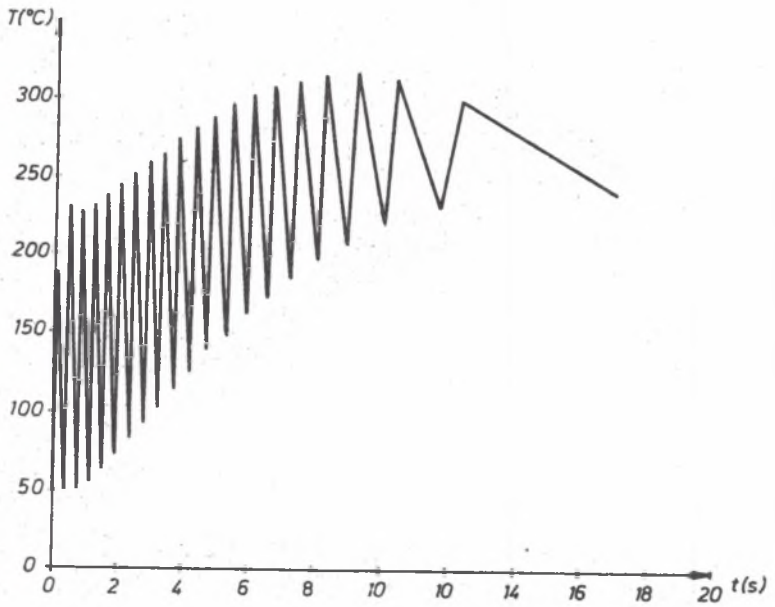
Równania /1/ i /5/, w myśl tradycyjnej metody obliczeń termicznych, są prawdziwe dla nieskończenie grubych tarcz /gdzie grubość jest powiązana z czasem hamowania/, krótkich czasów hamowania i stałego opóźnienia - wyciągi spełniają wszystkie trzy wyżej wymienione założenia.

Zależność /1/ ma identyczną postać, z zależnością opisującą przyrost temperatury powierzchni tarczy, przedstawioną w pracy [2], w której opisana jest metoda Ferodo. Określa temperaturę maksymalną osiąganą przez tarczę podczas pojedynczego hamowania z dość dobrym przybliżeniem, jednakże oparta jest na błędnych założeniach uzyskiwania temperatury maksymalnej w porowie czasu hamowania.

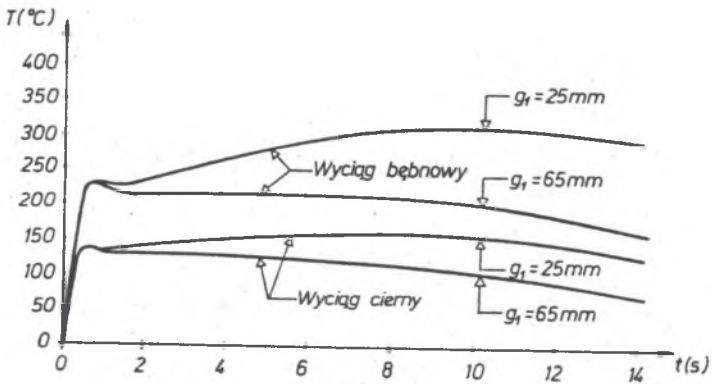
Wyniki symulacji komputerowej metodą elementów skończonych /MES/ zagadnień cieplnych w hamulcach tarczowych maszyn wyciągowych bębnowych i ciernych w RPA [8] wykazują zgoła odmienny charakter przebiegu zmienności szczytowych przyrostów temperatury powierzchni tarczy /wyniki symulacji przedstawiono na rys.1,2,3/. Przyjąć więc można, iż przebieg zmienności temperatury powierzchni tarczy ma charakter piłowy /rys.1,2/, zaś zależność /1/ opisuje maksymalny uśredniony przyrost temperatury powierzchni tarczy - z pewnym przybliżeniem.



Rys.1. Wynik symulacji komputerowej - przebieg temperatury powierzchni tarczy /grubość tarczy 50 mm/



Rys.2. Wyniki symulacji komputerowej - przebieg temperatury powierzchni tarczy /grubość tarczy 25 mm/



Rys.3. Wyniki symulacji komputerowej - przebieg szczytowej temperatury powierzchni tarczy

PRZYROSTY TEMPERATUR UZYSKIWANE PODCZAS POJEDYNCZEGO HAMOWANIA

Maksymalny uśredniony przyrost temperatury powierzchni tarczy.

Do określenia maksymalnego uśrednionego przyrostu temperatury powierzchni tarczy posłużono się wzorem z pracy G.Deke'a [8]:

$$T_x = \frac{y_1 M_h \omega_2}{6241 W/D - W} \frac{T_F}{x i_1} \quad /6/$$

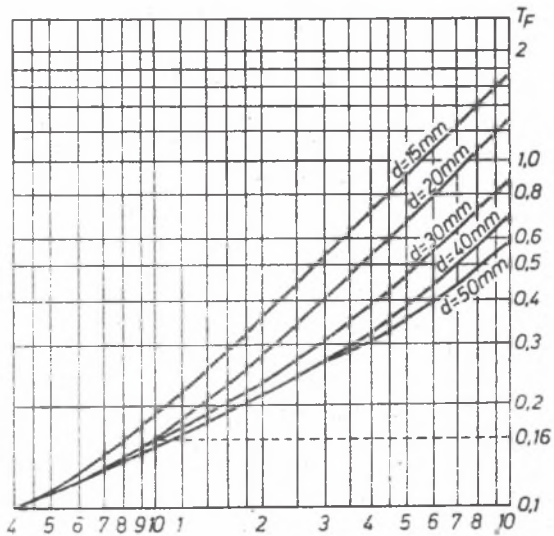
gdzie:

$T_F$  - współczynnik temperatury wyznaczony z diagramu zamieszczonego na rys.4 w funkcji czasu hamowania  $t_h$  i grubości tarczy  $s_1$ .  
 Dla  $t_h = 4$  s przyjmuje się  $T_F = 0,1$ , natomiast dla czasów hamowania mniejszych od 4 s /np. podczas ciągnięcia urobku/ proponuje się przyjmować  $T_F$  z zależności:

$$T_F = 0,1 / \frac{t_h}{4} /^{0,8} \quad /7/$$

$x$  - współczynnik wyrażający wpływ ilości tarcz określony doświadczalnie na podstawie zestawienia wyników pomiaru temperatury tarczy z obliczeniami wg metody Ferodo. Pozwala to zauważyć, iż ilość tarcz ma wpływ na wielkość przyrostu temperatury [7] - nie tylko ze względu na skrócenie czasu hamowania, ale także w wyniku malejącej liczby obrotów tarczy. Proponuje się współczynnik  $x$  obliczać wg wzoru:

$$x = /i_1/^{1/16} \quad /8/$$



Rys.4. Diagram  $T_F$

## Szczytowy przyrost temperatury powierzchni tarczy

Wzór /6/ nie uwzględnia zmian temperatury w kierunku obwodowym tarczy, co w systemach hamulcowych maszyn wyciągowych musi być wzięte pod uwagę. Problem zmian temperatury w kierunku obwodowym tarczy ujęty został w pracy G. Dike'a, który wykazał, iż szczytowy przyrost temperatury powierzchni jest proporcjonalny do sumarycznego kąta przykrycia wszystkich okładzin i odwrotnie proporcjonalny do liczby obrotów tarczy podczas hamowania. Wzór opisujący szczytowy przyrost temperatury powierzchni tarczy przyjmuje więc postać:

$$T_{\text{omax}} = T_x \beta_1' \quad /9/$$

gdzie:

Wartość  $\beta_1$  opisuje tablica 1.

Tablica 1

Wartości współczynnika korekcyjnego  $\beta_1$  w zależności od wielkości sumarycznego kąta przykrycia wszystkich okładzin

$\Theta$	20	40	60	90
$\beta_1$	1,52	1,46	1,4	1,32

Tablica 1 zawiera wartości współczynnika  $\beta_1$  dla 10 obrotów tarczy w zależności od wielkości sumarycznego kąta przykrycia wszystkich okładzin, który oblicza się ze wzoru:

$$\Theta = \frac{i_2 L_B}{\pi / D - w} \cdot 360 \quad /10/$$

gdzie:

$i_2$  - ilość par siłowników na jednej tarczy,

$L_B$  - długość wykładziny.

W praktyce tarcza podczas hamowania wykonuje różną ilość obrotów i w myśl teorii [8] zakładana wartość  $\beta_1'$  wynosi:

$$\beta_1' = \beta_1 / \frac{8,5}{n_1}^{0,1} \quad /11/$$

gdzie:

$n_1$  - ilość obrotów tarczy podczas hamowania określona zależnością

$$n_1 = \frac{v \cdot t}{2\pi D} \quad /12/$$

## Przyrost średniej temperatury objętościowej tarczy

Przyrost średniej temperatury objętościowej tarczy zależy od masy tarczy i rozkładu ciepła właściwego w tarczy. Zakładając jednakże równomierny jej rozkład w objętości, a tym samym równomierne rozchodzenie się energii, wyrównana temperatura objętościowa tarczy wynosi:

$$\Delta T = \frac{E_D}{m c_1} \quad /13/$$

gdzie:

$E_D$  - energia pochłaniana przez tarczę,

$$E_D = \gamma_1 \frac{M_h \omega_2^2 t_h}{2 i_1} \quad /14/$$

W przypadku gdy  $t > t_h$ , jako przyrost średniej temperatury tarczy przyjmuje się spadek wynikający z warunków chłodzenia statycznego i kinematycznego i wynosi:

$$T = \Delta T \exp /-b t/ \quad /15/$$

Wartość współczynnika chłodzenia zależy od konstrukcji i prędkości bębna lub koła pędnego oraz tarczy hamulcowej zgodnie z zależnością:

$$b = b_0 + b_1 v^\beta \quad /16/$$

gdzie:

$b_0$  - współczynnik szybkości chłodzenia na postoju,

$b_1, \beta$  - współczynniki zależne od konstrukcji.

## TEMPERATURY UZYSKIWANE PODCZAS WIELOKROTNEGO HAMOWANIA

Podczas występującego wielokrotnego hamowania w celu określenia temperatury należy brać pod uwagę przyrost temperatury podczas poszczególnych zahamowań oraz okresy przerw, podczas których zachodzi chłodzenie.

Jeżeli pomiędzy poszczególnymi zahamowaniami występują jednakowe przerwy, a podczas hamowania rozpraszana jest ta sama energia, to po "n" zahamowaniach średnia temperatura objętościowa tarczy wynosi:

$$T_n = T_0 + n \Delta T - \Delta T \times \left[ \frac{n-1}{2} n - \frac{n-2}{2} / n - 1 / x \right] \quad /17/$$

$$x = 1 - \exp /-b t_0/ \quad /18/$$

Prawa strona równania /17/ posiada ekstremum /moment, w którym chłodzenie

tarczy jest równe jej nagrzewaniu/ - jest to temperatura równowagi, która wynosi:

$$T_e = T_o + n_e \Delta T - \Delta T \times \left[ \frac{n_e - 1}{2} n_e - \frac{n_e - 2}{2} / n_e - 1 / x \right] \quad /19/$$

przy czym:

$$n_e = \frac{2 + x - 3 \frac{x^2}{x}}{2 / x - x^2 /} \quad /20/$$

Zależność /20/ została wyznaczona z warunku na ekstremum funkcji /ze względu na "n"/.

Temperatura maksymalna, jaką może osiągnąć powierzchnia tarczy po uzyskaniu w swej objętości temperatury równowagi, wynosi:

$$T_n = T_e + T_o \quad \max \quad /21/$$

Temperatura tarczy osiągana podczas eksploatacji hamulca jest superpozycją przyrostów temperatury tarczy podczas kolejnych zahamowań, pomniejszonych o spadki temperatury wynikające z chłodzenia, podczas przerw pomiędzy tymi zahamowaniami.

#### WYNIKI OBLICZEŃ I BADAŃ PRZYROSTÓW TEMPERATURY TARCZY PODCZAS HAMOWANIA AWARYJNEGO

##### Obliczenia komputerowe

Na podstawie przyjętych zależności opracowano w IMG Politechniki Śląskiej program obliczeniowy i wykonano przykładowe obliczenia termiczne hamulca maszyny wyciągowej typu 4L-5000/2x2900 [15]. Obliczenia wykonano za pomocą komputera IBM-xt. Obliczono maksymalny ( $T_{max}$ ), maksymalny uśredniony ( $T_x$ ) i szczytowy ( $T_{omax}$ ) przyrost temperatury powierzchni tarczy oraz przyrost średniej temperatury objętościowej tarczy ( $dT$ ), a także temperaturę maksymalną powierzchni tarczy ( $T_{nmax}$ ) i średnią temperaturę objętościową tarczy ( $T_n$ ) po "n" zahamowaniach. Dane techniczne charakteryzujące hamulce maszyny wyciągowej, niezbędne do wykonania obliczeń oraz wyniki obliczeń przedstawiono w postaci wydruków komputerowych. Obliczenia wykonano dla różnych prędkości jazdy wyciągu w stanie zrównoważonym ( $dQ = 0$ , hamowanie przy pomocy jednej tarczy) oraz obciążonym maksymalną statyczną nadwagą ( $dQ = 24,5$  kN, hamowanie przy użyciu dwóch tarcz). Znak "+" oznacza jazdę nadwagi w górę, a znak "-" oznacza jazdę w dół. Założono, że hamowanie odbywa się w odstępach czasowych niezbędnych do uzyskania ponownie po zahamowaniu prędkości jazdy przyjętych do obliczeń. Przyjęte do obliczeń prędkości początkowe hamowania, stan obciążenia wyciągu, ilość hamujących tarcz i inne dane



odzwierciedlają parametry hamowania założone w badaniach eksploatacyjnych wymienionej maszyny wyciągowej. Odzworowanie danych wejściowych miało na celu umożliwienie porównania wyników obliczeń z wynikami badań, a w konsekwencji udzielenie odpowiedzi, w jakim stopniu przyjęta metoda obliczeń termicznych odzwierciedla stan rzeczywisty hamulca.

Wydruk nr 1

---

Predkosc liniowa - v [m/s] : 6.600  
 Srednica tarczy hamulcowej - D [m] : 5.460  
 Srednica bebna maszyny wyciągowej - Db [m] : 5.000  
 Dlugosc okładziny - LB [m] : 0.300  
 Szerokosc okładziny - W [m] : 0.220  
 Zredukowana na line masa zastepcza - m [kg] : 175019.000  
 Liczba tarcz - i1 [ ] : 1.000      **Nadwaga statyczna dQ (N) : 0,000**  
 Liczba okładzin - i2 [ ] : 7.000 *por*  
 Grubosc tarczy - g1 [mm] : 29.000  
 Grubosc okładziny - g2 [mm] : 25.000  
 Wspolczynnik dyfuzji - a1 [m<sup>2</sup>/s] : 0.00004  
 Wsp. dyfuzji cieplnej okładziny - a2 [m<sup>2</sup>/s] : 0.000104  
 Wsp. przewodnosci cieplnej tarczy - k1 [W/mdeg] : 37.000  
 Wsp. przewodnosci cieplnej okładziny - k2 [W/mdeg] : 0.259  
 Gestosc wlasciwa materialu tarczy - r1 [kg/m<sup>3</sup>] : 7780.000  
 Gestosc wlasciwa materialu okładziny - r2 [kg/m<sup>3</sup>] : 2140.000  
 Cieplo wlasciwe materialu tarczy - c1 [J/kgdeg] : 465.000  
 Cieplo wlasciwe materialu okładziny - c2 [J/kgdeg] : 1160.000  
 Wsp. korekcyjny strumienia cieplnego - gama [ ] : 1.000  
 Moment hamowania - Mh (Nm) : 698387.200  
 Temp. otoczenia - Tho [K] : 294.000  
 Wsp. konstrukcji bebna - b1 [ ] : 0.00002  
 Wsp. szybkoosci chłodzenia na postoju - bo [deg/s] : 0.0002  
 Wsp. konstrukcji bebna - beta [ ] : 0.800  
 Dopuszczalna max temp. pow. tarcia - Thdop [K] : 525.000  
 Wspolczynnik przykrycia - kp [ ] : 0.142  
 Przerwa pomiedzy pojedynczymi zahamowaniami - to [s] : 4.500  
 Masa tarczy ( - ) - m [kg] : 743.000  
 Masa tarczy ( + ) - m [kg] : 743.000  
 Numer kolejny zahamowania - n [ ] : 3.000

---

Opoznienie hamowania ( - ) - Z [m/s<sup>2</sup>] : 1.596  
 Opoznienie hamowania ( + ) - Z [m/s<sup>2</sup>] : 1.596  
 Czas hamowania ( - ) - th [s] : 4.135  
 Czas hamowania ( + ) - th [s] : 4.135  
 Wsp. rozdzialu energii - y1 [ ] : 0.981  
 Max usredniony przyrost temp. powierzchni ( - ) - Tx [K] : 25.689  
 Max usredniony przyrost temp. powierzchni ( + ) - Tx [K] : 25.689  
 Szczytowy przyrost temp. pow. ( - ) - T<sub>max</sub> [K] : 46.630  
 Szczytowy przyrost temp. pow. ( + ) - T<sub>max</sub> [K] : 46.630  
 Jednostkowa moc tarcia tarczy - QD [W/m<sup>2</sup>] : 0.255  
 Jednostkowa moc tarcia okładziny - QL [W/m<sup>2</sup>] : 1.995  
 Predkosc liniowa - V [m/s] : 6.600  
 Max przyrost temp. powierzchni ( - ) - T<sub>max</sub> [K] : 23.320  
 Max przyrost temp. powierzchni ( + ) - T<sub>max</sub> [K] : 23.320  
 Minimalna powierzchnia tarczy hamulcowej ( - ) - Aw [m<sup>2</sup>] : 34.260  
 Minimalna powierzchnia tarczy hamulcowej ( + ) - Aw [m<sup>2</sup>] : 34.260  
 Przyrost sr. temp. obj. tarczy ( - ) - dT [deg] : 10.826  
 Przyrost sr. temp. obj. tarczy ( + ) - dT [deg] : 10.826  
 Sr. temp. obj. tarczy po n zah. ( - ) - Tn [K] : 326.436  
 Sr. temp. obj. tarczy po n zah. ( + ) - Tn [K] : 326.436  
 Temp. max w n zah. ( - ) - T<sub>max</sub> [K] : 362.268  
 Temp. max w n zah. ( + ) - T<sub>max</sub> [K] : 362.268

## Wydruk nr 2

---

Prędkość liniowa -  $v$  (m/s): 7,500  
 Nadwaga statyczna -  $dQ$  (N): 0,000  
 Liczba tarcz -  $l$  ( ): 1,000  
 Moment hamowania -  $M_h$  (Nm): 678433,780  
 Przerwa pomiędzy pojedynczymi zahamowaniami -  $t_0$  (s): 5,000  
 Numer kolejny zahamowania -  $n$  ( ): 3,000

---

Opóźnienie hamowania ( - ) -  $Z$  (m/s<sup>2</sup>): 1.551  
 Opóźnienie hamowania ( + ) -  $Z$  (m/s<sup>2</sup>): 1.551  
 Czas hamowania ( - ) -  $t_h$  (s): 4.837  
 Czas hamowania ( + ) -  $t_h$  (s): 4.837  
 Wsp. rozdziału energii -  $\eta$  [ ]: 0.981  
 Max uśredniony przyrost temp. powierzchni ( - ) -  $T_x$  (K): 31.102  
 Max uśredniony przyrost temp. powierzchni ( + ) -  $T_x$  (K): 31.102  
 Szczytowy przyrost temp. pow. ( - ) -  $T_{max}$  (K): 54.871  
 Szczytowy przyrost temp. pow. ( + ) -  $T_{max}$  (K): 54.871  
 Jednostkowa moc tarcia tarczy -  $QD$  (W/m<sup>2</sup>): 0.281  
 Jednostkowa moc tarcia obładziny -  $QL$  (W/m<sup>2</sup>): 2.203  
 Prędkość liniowa -  $V$  (m/s): 7.500  
 Max przyrost temp. powierzchni ( - ) -  $T_{max}$  (K): 27.842  
 Max przyrost temp. powierzchni ( + ) -  $T_{max}$  (K): 27.842  
 Minimalna powierzchnia tarczy hamulcowej ( - ) -  $A_m$  (m<sup>2</sup>): 38.575  
 Minimalna powierzchnia tarczy hamulcowej ( + ) -  $A_m$  (m<sup>2</sup>): 38.575  
 Przyrost sr. temp. obj. tarczy ( - ) -  $dT$  [deg]: 13.980  
 Przyrost sr. temp. obj. tarczy ( + ) -  $dT$  [deg]: 13.980  
 Sr. temp. obj. tarczy po  $n$  zah. ( - ) -  $T_n$  (K): 335.877  
 Sr. temp. obj. tarczy po  $n$  zah. ( + ) -  $T_n$  (K): 335.877  
 Temp. max w  $n$  zah. ( - ) -  $T_{max}$  (K): 376.810  
 Temp. max w  $n$  zah. ( + ) -  $T_{max}$  (K): 376.810

## Wydruk nr 3

---

Prędkość liniowa -  $v$  (m/s): 8,000  
 Nadwaga statyczna -  $dQ$  (N): 0,000  
 Liczba tarcz -  $l$  ( ): 1,000  
 Moment hamowania -  $M_h$  (Nm): 678433,780  
 Przerwa pomiędzy pojedynczymi zah. -  $t_0$  (s): 5,500  
 Numer kolejny zahamowania -  $n$  ( ): 3,000

---

Opóźnienie hamowania ( - ) -  $Z$  (m/s<sup>2</sup>): 1.551  
 Opóźnienie hamowania ( + ) -  $Z$  (m/s<sup>2</sup>): 1.551  
 Czas hamowania ( - ) -  $t_h$  (s): 5.160  
 Czas hamowania ( + ) -  $t_h$  (s): 5.160  
 Wsp. rozdziału energii -  $\eta$  [ ]: 0.981  
 Max uśredniony przyrost temp. powierzchni ( - ) -  $T_x$  (K): 35.316  
 Max uśredniony przyrost temp. powierzchni ( + ) -  $T_x$  (K): 35.316  
 Szczytowy przyrost temp. pow. ( - ) -  $T_{max}$  (K): 61.508  
 Szczytowy przyrost temp. pow. ( + ) -  $T_{max}$  (K): 61.508  
 Jednostkowa moc tarcia tarczy -  $QD$  (W/m<sup>2</sup>): 0.300  
 Jednostkowa moc tarcia obładziny -  $QL$  (W/m<sup>2</sup>): 2.350  
 Prędkość liniowa -  $V$  (m/s): 8.000  
 Max przyrost temp. powierzchni ( - ) -  $T_{max}$  (K): 30.672  
 Max przyrost temp. powierzchni ( + ) -  $T_{max}$  (K): 30.672  
 Minimalna powierzchnia tarczy hamulcowej ( - ) -  $A_m$  (m<sup>2</sup>): 39.281  
 Minimalna powierzchnia tarczy hamulcowej ( + ) -  $A_m$  (m<sup>2</sup>): 39.281  
 Przyrost sr. temp. obj. tarczy ( - ) -  $dT$  [deg]: 15.906  
 Przyrost sr. temp. obj. tarczy ( + ) -  $dT$  [deg]: 15.906  
 Sr. temp. obj. tarczy po  $n$  zah. ( - ) -  $T_n$  (K): 341.639  
 Sr. temp. obj. tarczy po  $n$  zah. ( + ) -  $T_n$  (K): 341.639  
 Temp. max w  $n$  zah. ( - ) -  $T_{max}$  (K): 387.294  
 Temp. max w  $n$  zah. ( + ) -  $T_{max}$  (K): 387.294

Wydruk nr 4

Prędkość liniowa -  $v$  (m/s): 12,000  
 Nadwaga statyczna -  $dQ$  (N): 0,000  
 Liczba tarcz -  $i1$  ( ): 1,000  
 Moment hamowania -  $Mh$  (Nm): 636530,048  
 Przerwa pomiędzy pojedynczymi zah. -  $t_0$  (s): 10,667  
 Numer kolejny zahamowania -  $n$  ( ): 3,000

Opóźnienie hamowania ( - ) -  $Z$  (m/s<sup>2</sup>): 1.455  
 Opóźnienie hamowania ( + ) -  $Z$  (m/s<sup>2</sup>): 1.455  
 Czas hamowania ( - ) -  $t_h$  (s): 8.249  
 Czas hamowania ( + ) -  $t_h$  (s): 8.249  
 Wsp. rozdziału energii -  $\gamma1$  ( ): 0.981  
 Max usredniony przyrost temp. powierzchni ( - ) -  $T_x$  (K): 37.501  
 Max usredniony przyrost temp. powierzchni ( + ) -  $T_x$  (K): 37.501  
 Szczytowy przyrost temp. pow. ( - ) -  $T_{max}$  (K): 91.757  
 Szczytowy przyrost temp. pow. ( + ) -  $T_{max}$  (K): 91.757  
 Jednostkowa moc tarcia tarczy -  $QD$  (W/m<sup>2</sup>): 0.422  
 Jednostkowa moc tarcia okładziny -  $OL$  (W/m<sup>2</sup>): 3.307  
 Prędkość liniowa -  $V$  (m/s): 12.000  
 Max przyrost temp. powierzchni ( - ) -  $T_{max}$  (K): 54.581  
 Max przyrost temp. powierzchni ( + ) -  $T_{max}$  (K): 54.581  
 Minimalna powierzchnia tarczy hamulcowej ( - ) -  $A_m$  (m<sup>2</sup>): 40.969  
 Minimalna powierzchnia tarczy hamulcowej ( + ) -  $A_m$  (m<sup>2</sup>): 40.969  
 Przyrost sr. temp. obj. tarczy ( - ) -  $dT$  (deg): 35.789  
 Przyrost sr. temp. obj. tarczy ( + ) -  $dT$  (deg): 35.789  
 Sr. temp. obj. tarczy po n zah. ( - ) -  $T_n$  (K): 400.972  
 Sr. temp. obj. tarczy po n zah. ( + ) -  $T_n$  (K): 400.972  
 Temp. max w n zah. ( - ) -  $T_{nmax}$  (K): 457.203  
 Temp. max w n zah. ( + ) -  $T_{nmax}$  (K): 457.203

Wydruk nr 5

Prędkość liniowa -  $v$  (m/s): 16,000  
 Nadwaga statyczna -  $dQ$  (N): 0,000  
 Liczba tarcz -  $i1$  ( ): 1,000  
 Moment hamowania -  $Mh$  (Nm): 578663,680  
 Przerwa pomiędzy pojedynczymi zah. -  $t_0$  (s): 10,667  
 Numer kolejny zahamowania -  $n$  ( ): 3,000

Opóźnienie hamowania ( - ) -  $Z$  (m/s<sup>2</sup>): 1.323  
 Opóźnienie hamowania ( + ) -  $Z$  (m/s<sup>2</sup>): 1.323  
 Czas hamowania ( - ) -  $t_h$  (s): 12.098  
 Czas hamowania ( + ) -  $t_h$  (s): 12.098  
 Wsp. rozdziału energii -  $\gamma1$  ( ): 0.981  
 Max usredniony przyrost temp. powierzchni ( - ) -  $T_x$  (K): 84.242  
 Max usredniony przyrost temp. powierzchni ( + ) -  $T_x$  (K): 84.242  
 Szczytowy przyrost temp. pow. ( - ) -  $T_{max}$  (K): 125.710  
 Szczytowy przyrost temp. pow. ( + ) -  $T_{max}$  (K): 125.710  
 Jednostkowa moc tarcia tarczy -  $QD$  (W/m<sup>2</sup>): 0.511  
 Jednostkowa moc tarcia okładziny -  $OL$  (W/m<sup>2</sup>): 4.008  
 Prędkość liniowa -  $V$  (m/s): 16.000  
 Max przyrost temp. powierzchni ( - ) -  $T_{max}$  (K): 80.122  
 Max przyrost temp. powierzchni ( + ) -  $T_{max}$  (K): 80.122  
 Minimalna powierzchnia tarczy hamulcowej ( - ) -  $A_m$  (m<sup>2</sup>): 65.433  
 Minimalna powierzchnia tarczy hamulcowej ( + ) -  $A_m$  (m<sup>2</sup>): 65.433  
 Przyrost sr. temp. obj. tarczy ( - ) -  $dT$  (deg): 63.625  
 Przyrost sr. temp. obj. tarczy ( + ) -  $dT$  (deg): 63.625  
 Sr. temp. obj. tarczy po n zah. ( - ) -  $T_n$  (K): 484.096  
 Sr. temp. obj. tarczy po n zah. ( + ) -  $T_n$  (K): 484.096  
 Temp. max w n zah. ( - ) -  $T_{nmax}$  (K): 546.700  
 Temp. max w n zah. ( + ) -  $T_{nmax}$  (K): 546.700

Wydruk nr 6

Prędkość liniowa -  $v$  (m/s): 16,000  
 Nadwaga statyczna -  $dQ$  (N): 0,000  
 Liczba tarcz -  $l1$  ( ): 2,000  
 Moment hamowania -  $Mh$  (Nm): 1447243,879  
 Przerwa pomiędzy pojedynczymi zah. -  $t0$  (s): 10,667  
 Numer kolejny zahamowania -  $n$  ( ): 3,000

Opóźnienie hamowania ( - ) -  $Z$  [m/s<sup>2</sup>]: 3,308  
 Opóźnienie hamowania ( + ) -  $Z$  [m/s<sup>2</sup>]: 3,308  
 Czas hamowania ( - ) -  $th$  [s]: 4,837  
 Czas hamowania ( + ) -  $th$  [s]: 4,837  
 Wsp. rozdziału energii -  $\gamma1$  [ ]: 0,981  
 Max usredniony przyrost temp. powierzchni ( - ) -  $Tx$  [K]: 67,771  
 Max usredniony przyrost temp. powierzchni ( + ) -  $Tx$  [K]: 67,771  
 Szczytowy przyrost temp. pow. ( - ) -  $Tmax$  [K]: 101,357  
 Szczytowy przyrost temp. pow. ( + ) -  $Tmax$  [K]: 101,357  
 Jednostkowa moc tarcia tarczy -  $QD$  [W/m<sup>2</sup>]: 0,639  
 Jednostkowa moc tarcia okładziny -  $QL$  [W/m<sup>2</sup>]: 5,012  
 Predkosc liniowa -  $V$  [m/s]: 16,000  
 Max przyrost temp. powierzchni ( - ) -  $Tmax$  [K]: 63,355  
 Max przyrost temp. powierzchni ( + ) -  $Tmax$  [K]: 63,355  
 Minimalna powierzchnia tarczy hamulcowej ( - ) -  $Am$  [m<sup>2</sup>]: 33,446  
 Minimalna powierzchnia tarczy hamulcowej ( + ) -  $Am$  [m<sup>2</sup>]: 33,446  
 Przyrost sr. temp. obj. tarczy ( - ) -  $dT$  [deg]: 31,812  
 Przyrost sr. temp. obj. tarczy ( + ) -  $dT$  [deg]: 31,812  
 Sr. temp. obj. tarczy po  $n$  zah. ( - ) -  $Tn$  [K]: 389,048  
 Sr. temp. obj. tarczy po  $n$  zah. ( + ) -  $Tn$  [K]: 389,048  
 Temp. max w  $n$  zah. ( - ) -  $Tmax$  [K]: 458,852  
 Temp. max w  $n$  zah. ( + ) -  $Tmax$  [K]: 458,852

Wydruk nr 7

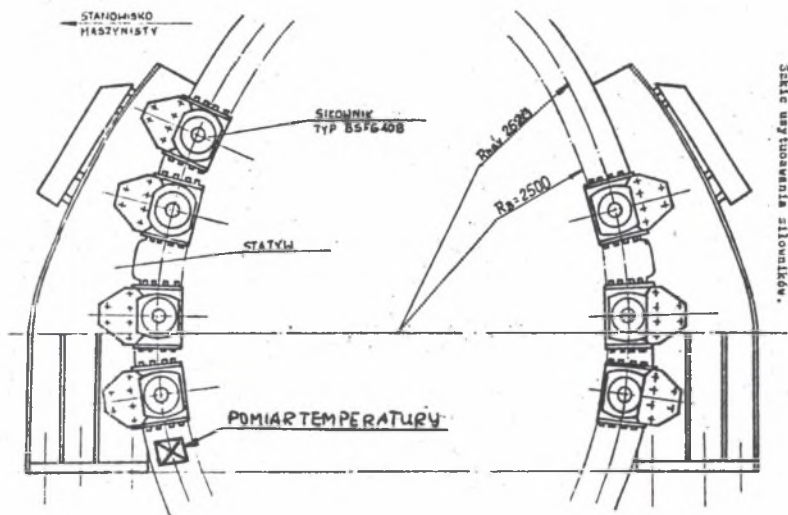
Prędkość liniowa -  $v$  (m/s): 16,000  
 Nadwaga statyczna -  $dQ$  (N): 245250,000  
 Liczba tarcz -  $l1$  ( ): 2,000  
 Moment hamowania -  $Mh$  (Nm): 1447243,000  
 Przerwa pomiędzy pojedynczymi zah. -  $t0$  (s): 10,700  
 Numer kolejny zahamowania -  $n$  ( ): 3,000

Opóźnienie hamowania ( - ) -  $Z$  [m/s<sup>2</sup>]: 1,906  
 Opóźnienie hamowania ( + ) -  $Z$  [m/s<sup>2</sup>]: 4,709  
 Czas hamowania ( - ) -  $th$  [s]: 8,393  
 Czas hamowania ( + ) -  $th$  [s]: 3,398  
 Wsp. rozdziału energii -  $\gamma1$  [ ]: 0,981  
 Max usredniony przyrost temp. powierzchni ( - ) -  $Tx$  [K]: 84,160  
 Max usredniony przyrost temp. powierzchni ( + ) -  $Tx$  [K]: 53,083  
 Szczytowy przyrost temp. pow. ( - ) -  $Tmax$  [K]: 119,120  
 Szczytowy przyrost temp. pow. ( + ) -  $Tmax$  [K]: 82,244  
 Jednostkowa moc tarcia tarczy -  $QD$  [W/m<sup>2</sup>]: 0,639  
 Jednostkowa moc tarcia okładziny -  $QL$  [W/m<sup>2</sup>]: 5,012  
 Predkosc liniowa -  $V$  [m/s]: 16,000  
 Max przyrost temp. powierzchni ( - ) -  $Tmax$  [K]: 83,452  
 Max przyrost temp. powierzchni ( + ) -  $Tmax$  [K]: 53,098  
 Minimalna powierzchnia tarczy hamulcowej ( - ) -  $Am$  [m<sup>2</sup>]: 57,033  
 Minimalna powierzchnia tarczy hamulcowej ( + ) -  $Am$  [m<sup>2</sup>]: 23,694  
 Przyrost sr. temp. obj. tarczy ( - ) -  $dT$  [deg]: 55,196  
 Przyrost sr. temp. obj. tarczy ( + ) -  $dT$  [deg]: 22,346  
 Sr. temp. obj. tarczy po  $n$  zah. ( - ) -  $Tn$  [K]: 458,912  
 Sr. temp. obj. tarczy po  $n$  zah. ( + ) -  $Tn$  [K]: 360,763  
 Temp. max w  $n$  zah. ( - ) -  $Tmax$  [K]: 523,287  
 Temp. max w  $n$  zah. ( + ) -  $Tmax$  [K]: 420,844

Uwaga! W wydrukach od 2 do 7 pozostałe dane, jak w wydruku nr 1. Moment hamowania dla poszczególnych  $v$  obliczono z przyjęciem rzeczywistych  $\mu$  z badań/wartości współczynnika tarcia.

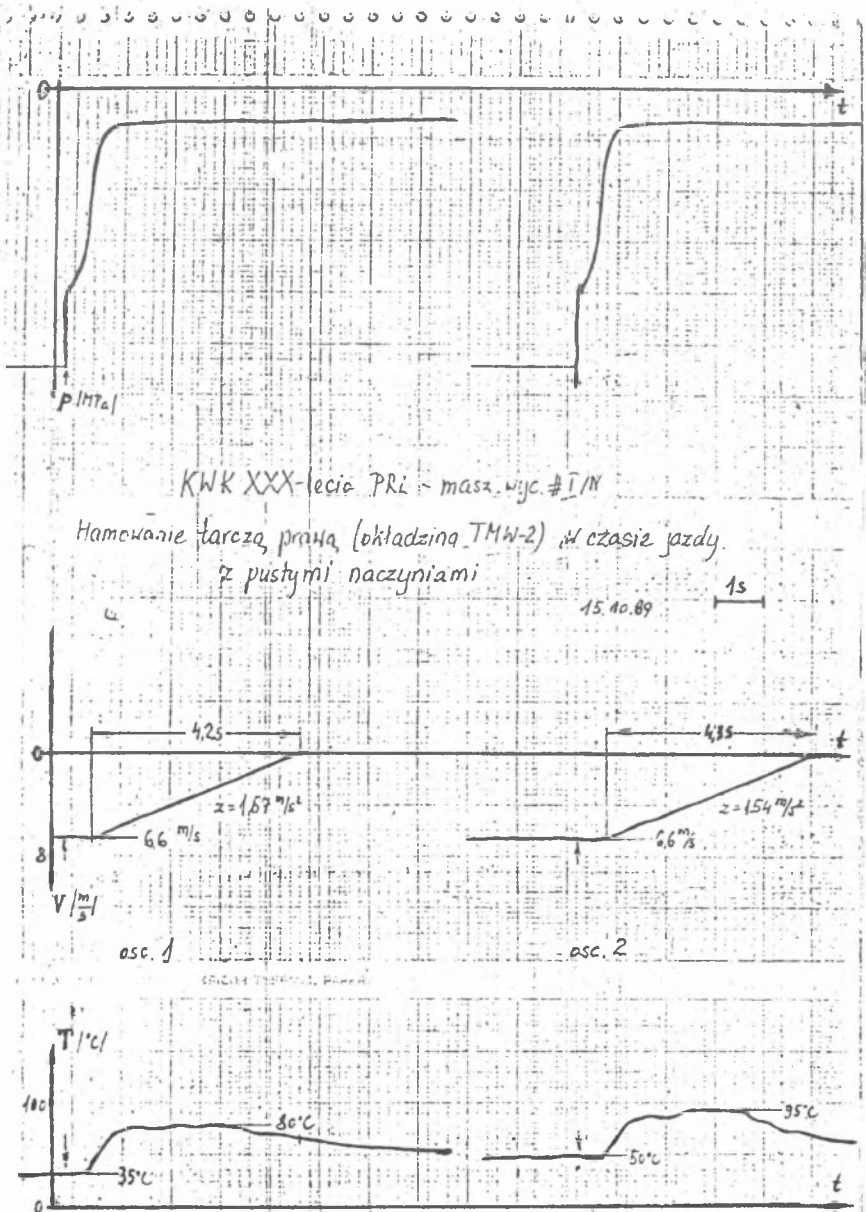
## Badanie eksploatacyjne

Badania wykonano w KWK "XXX-lecia PRL" - szyb Ludwik na maszynie wyciągowej, której charakterystykę przedstawiono we wcześniej zamieszczonych wydrukach komputerowych. Szkic rozmieszczenia siłowników na tarczy hamulcowej oraz miejsce w którym mierzono temperaturę, przedstawiono na rys.5.



Rys.5. Szkic usytuowania siłowników hamulca maszyny wyciągowej typu 4L-5000/2x2900. Siłowniki typu BFSG-408, produkcji ASEA Szwecja

Badania wykonano przy obciążeniu siłowników jednej tarczy okładzinami typu Galfel, a drugiej okładzinami TMW-2. W niniejszym opracowaniu zamieszczono wyniki prób hamowania przy użyciu tarczy z okładzinami typu TMW-2. Próby dla 16 m/s wykonywano po uprzednim wychłodzeniu tarczy, aby w kolejnych hamowaniach nie powodować przegrzania tarczy i okładzin. W czasie badań rejestrowano ciśnienie w układzie hamulcowym, prędkość maszyny oraz temperaturę powierzchni tarczy hamulcowej. Temperaturę mierzono metodą bezstykową, za pomocą mierników typu "56", działających na zasadzie promieni podczerwonych. Mierniki zainstalowano na wylocie tarczy z grupy czterech siłowników. Wybrane przebiegi zarejestrowanych wielkości przedstawiono na rys.6.



Rys.6. Wybrane przebiegi ciśnienia siłownika, prędkości jazdy oraz przyrostów temperatury w czasie hamowania awaryjnego maszyny wyciągowej 4L-5000/2x2900

## PODSUMOWANIE

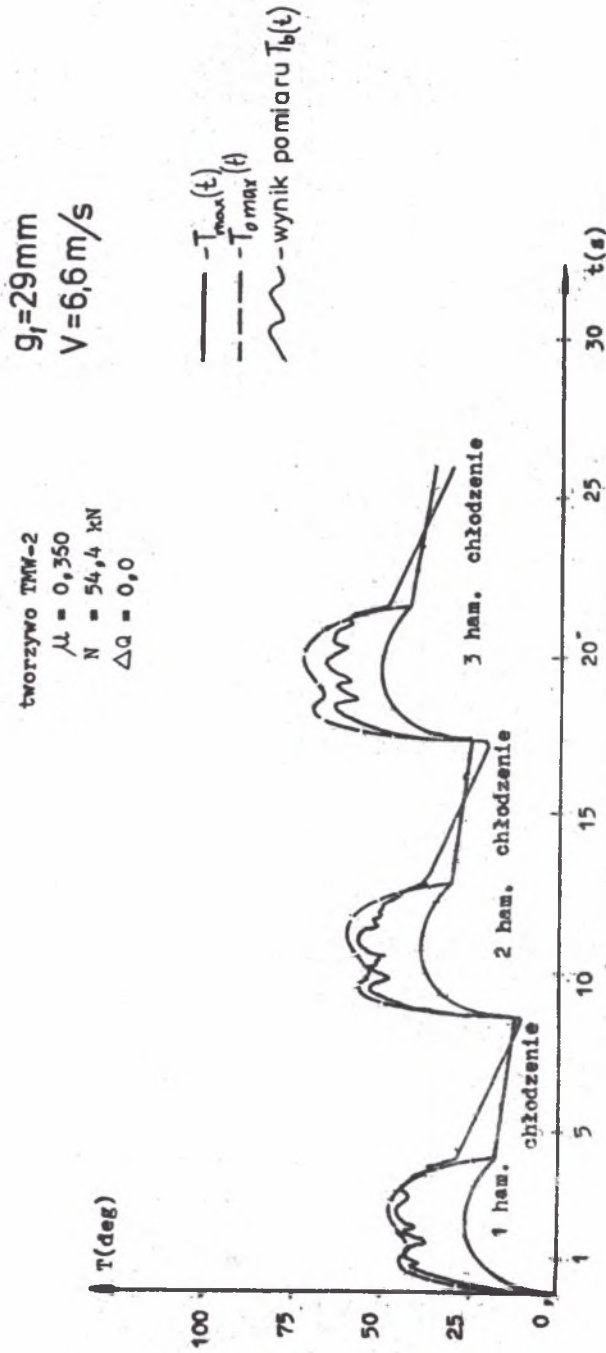
Zaprezentowana metoda obliczeń termicznych, przy zastosowaniu komputerowej techniki obliczeniowej, pozwoliła na graficzne przedstawienie przyrostów temperatury maksymalnej i szczytowej w świetle otrzymanego przebiegu rzeczywistego przyrostu temperatury powierzchni tarczy podczas hamowania awaryjnego/rys. 7, 8, 9, 10 oraz tablica 2/.

Tablica 2

Zestawienie wyników obliczeń i badań przyrostów temperatury tarczy dla różnych prędkości początkowych hamowania

$v$ (m/s)	$i_1$	dQ kN	Kier. jazdy	Obliczenia w (deg)				Badania
				$T_{max}$	$T_x$	$T_{omax}$	dT	$T_b$
6,6	1	0	+	23,2	25,6	46,6	10,8	45
7,5	1	0	+	27,8	31,1	54,8	13,9	55
8,0	1	0	+	30,6	35,3	61,5	15,9	60
12,0	1	0	+	54,5	57,5	91,7	35,7	90
16,0	1	0	+	80,1	84,2	125,7	63,6	130
16,0	2	0	+	63,3	67,7	101,3	31,8	brak wyniku
16,0	2	24,5	+ -	53,1 83,4	53,0 84,1	82,2 119,1	22,3 55,2	81 brak wyniku

Wykresy przedstawiają przebiegi przyrostów temperatury powierzchni tarczy w czasie hamowania wielokrotnego następującego w krótkich odstępach czasowych (przerwa niezbędna dla uzyskania ponownie zakładanej prędkości jazdy), dla różnych prędkości początkowych. Rysunek 11 przedstawia wzrost szczytowego, uśrednionego i rzeczywistego przyrostu temperatury powierzchni tarczy, dla różnych prędkości początkowych hamowania. Z wykresów wynika, iż najbardziej zbliżony do przyrostu temperatury powierzchni uzyskiwanej w czasie badań jest szczytowy przyrost temperatury powierzchni tarczy ( $T_{omax}$ ). Przebieg rzeczywistego i szczytowego przyrostu temperatury najbardziej zbliżony jest, dla prędkości do 8 m/s, a przy wzroście prędkości punkt najwyższy rzeczywistego przebiegu odchyła się w stronę początku hamowania. Biorąc pod uwagę całokształt obliczeń i badań należy stwierdzić, że metoda obliczeń nadaje się do zastosowania w prognozowaniu warunków termicznych hamulców tarczowych maszyn wyciągowych.



Rys. 7. Wykresy wzrostu maksymalnych, szczytowych oraz rzeczywistych /badanych/ przyrostów temperatury w czasie wielokrotnego hamowania awaryjnego, dla prędkości początkowej  $v = 6,6 \text{ m/s}$



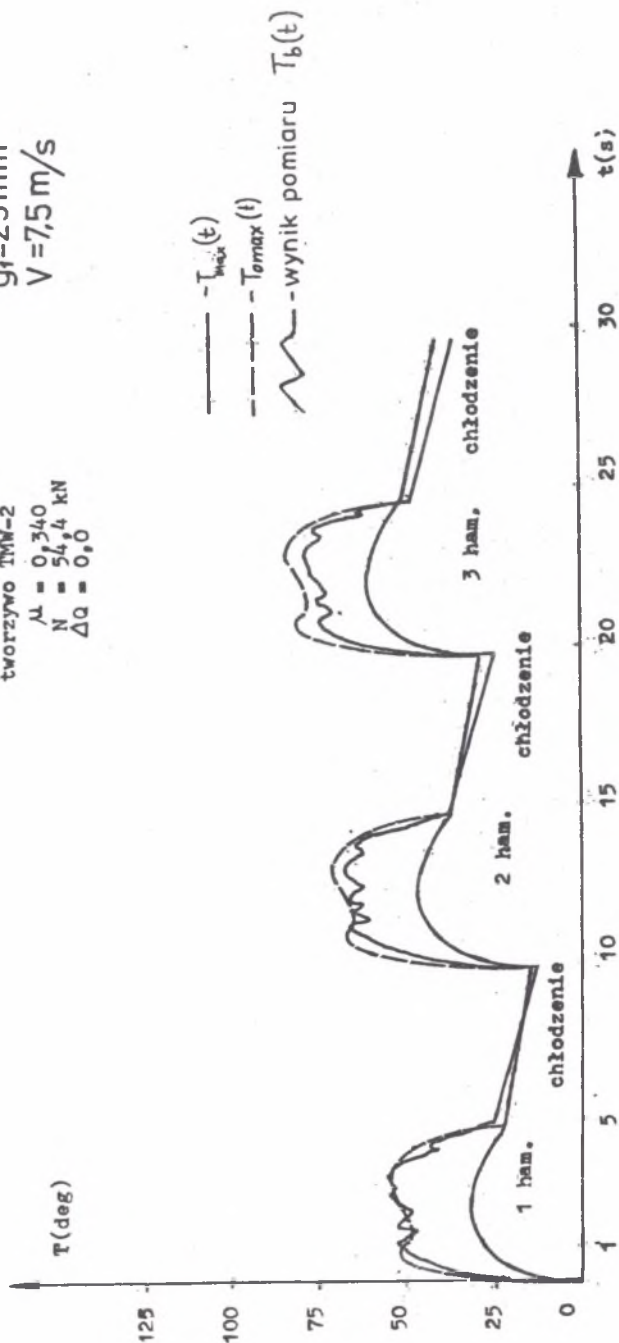
$g_f = 29 \text{ mm}$   
 $V = 7,5 \text{ m/s}$

tworzywo TMW-2

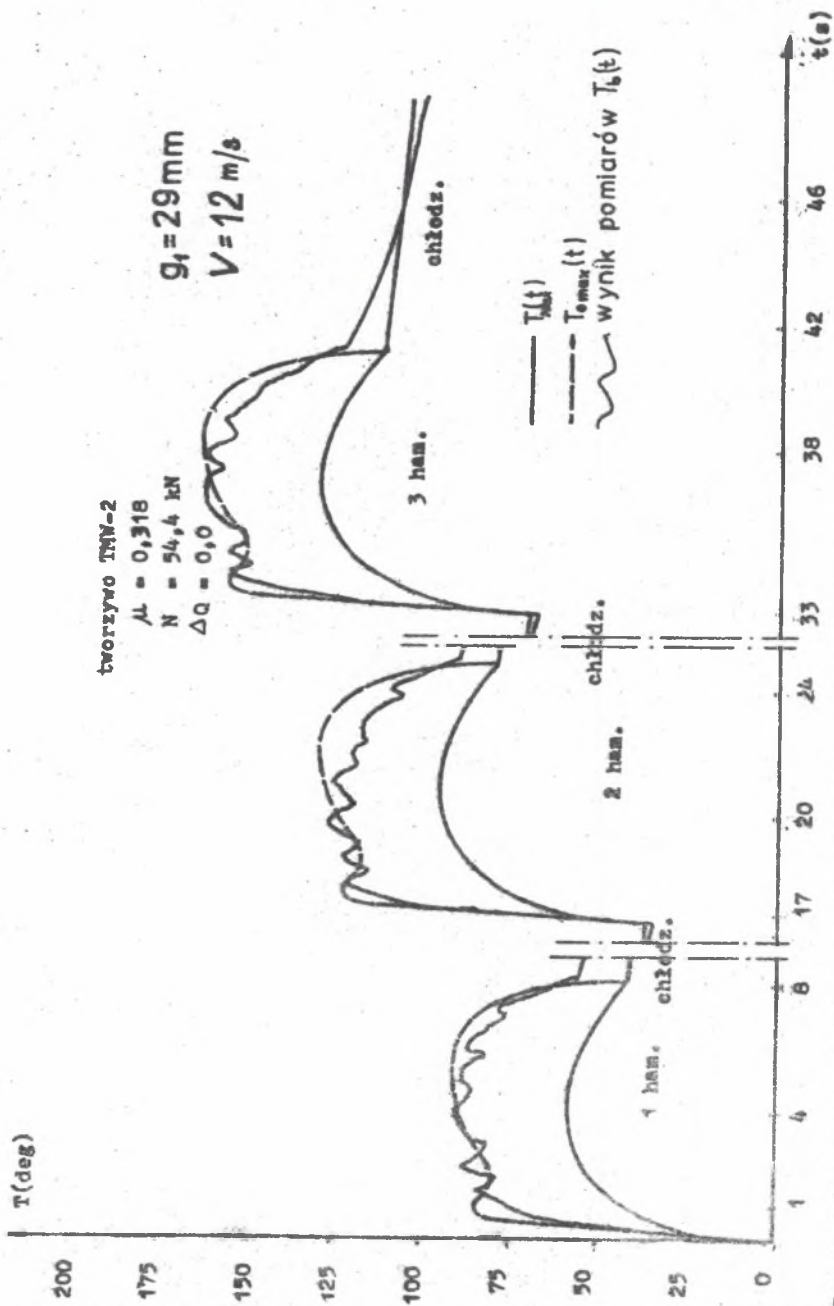
$\lambda = 0,340$

$N = 54,4 \text{ kN}$

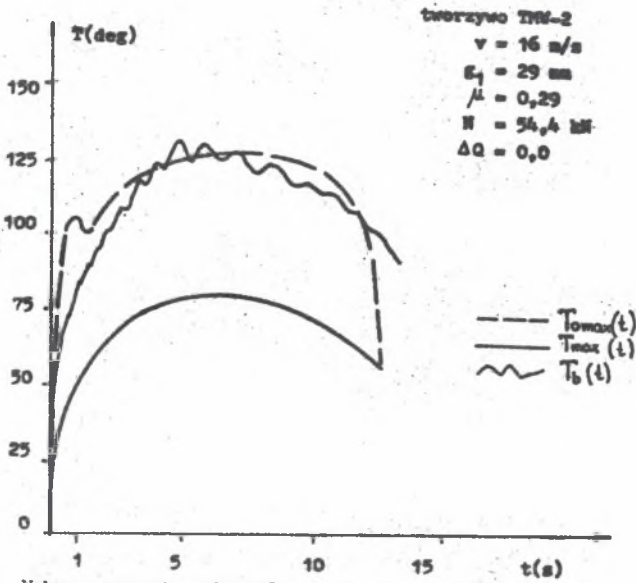
$\Delta Q = 0,0$



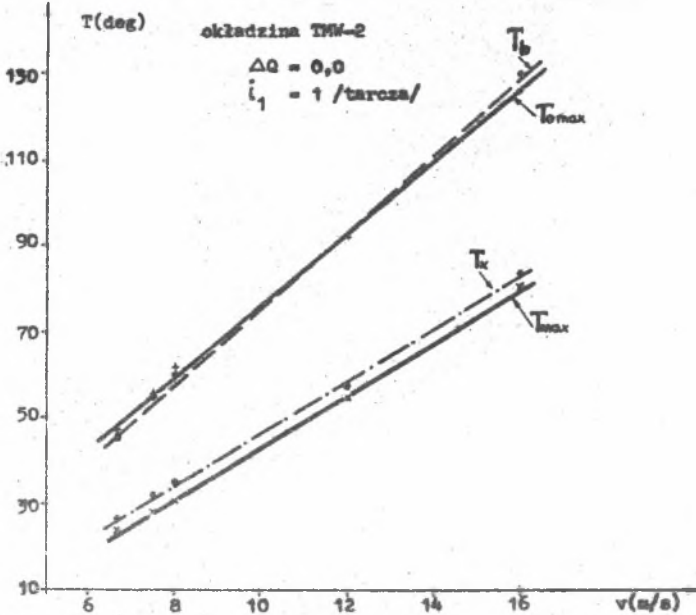
Rys. 8. Wykresy wzrostu maksymalnych, szczytowych oraz rzeczywistych /badanych/ przyrostów temperatury w czasie wielokrotnego hamowania awaryjnego, dla prędkości początkowej  $v = 7,5 \text{ m/s}$



Rys. 9. Wykresy wzrostu maksymalnych, szczytowych oraz rzeczywistych przyrostów temperatury w czasie wielokrotnego hamowania awaryjnego, dla prędkości początkowej 12 m/s



Rys.10. Wykresy wzrostu maksymalnych szczytowych oraz rzeczywistych/badanych/ przyrostów temperatury w czasie wielokrotnego hamowania awaryjnego, dla prędkości początkowej  $v = 16,0 \text{ m/s}$ .



Rys.11. Wykresy wzrostu maksymalnego, maksymalnego uśrednionego, szczytowego i rzeczywistego przyrostu temperatury tarczy podczas hamowania awaryjnego, w zależności od prędkości początkowej hamowania - m.w. 4L-5000/2x2900

## LITERATURA

1. Barecki Z.: Wpływ cech konstrukcyjnych i parametrów hamowania na charakterystykę mechaniczną hamulca szczękowego maszyny wyciągowej. Praca doktorska, Gliwice 1984.
2. Barecki Z.; Jankowski A.: Prognozowanie zmiany temperatury tarczy hamulca maszyny wyciągowej. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa nr 1 /210/ 1987.
3. Belobrow W.I.: Dynamika, nagryw i iznostormozow szachtnych podjemnych maszyn. Izdatielstwo Naukowa Dumka, Kijew 1981.
4. Braun E., Jewdokimow, Cziczinadze A.: Modelirowanie trienija i iznaszywanija w maszynach. Izd. Maszynostrojenie, Moskwa 1982.
5. Friction Materials for Engineers Ferodo Ltd. 1968.
6. Grib W.: Riesznie tribotiechniczeskich zadacz czislennymi metodami. Izd. Nauka, Moskwa 1968.
7. Jankowski A.; Badania i obliczenia hamulców maszyn wyciągowych dużej mocy /etap III i IV/. Praca NB Instytutu Mechanizacji Górnictwa, Politechniki Śl. Gliwice 1988 i 1989.
8. Some im important aspects in the application of disc break technology to mine hoists. International Conference on Hoisting, Canada 1989.
9. Karpyszew W.: Tormoznyje ustrojstwa szachtnych podjemnych maszyn. Izd. Nedra, Moskwa 1986.
10. Newcomb T., Spurr R.: Braking of Road Vehicles. Chapman and Hall. Ltd, London 1967.
11. Piątkiewicz A., Solski R.: Dźwignice t.1, WNT, Warszawa 1977.
12. Ścieszka S.: Problemy termiczne hamuclów tarczowych do maszyn wyciągowych. Biuletyn ZUT Zgoda Świętochłowice, 1973.
13. Tieplowaja dinamika trenija. Izd. Nauka, Moskwa 1965.
14. Wrzesiński W.: Hamowanie pojazdów samochodowych. WKiŁ, Warszawa 1978.
15. Marek W., Nowiński K.: Praca magisterska Instytut Mechanizacji Górnictwa Politechniki Śl., Gliwice 1990.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jan Orłacz

Wpłynęło do Redakcji w październiku 1990

## ASSESSMENT OF THERMAL CONDITIONS OF WINDER DISC BRAKES

## S u m m a r y

In the paper the prediction method of thermal conditions of winder disc brakes including increment of mean and peak temperatures of disc surface as well as increment of mean volume temperature, is shown. Basing on presented formula, results of thermal calculation of winder disc brakes for hoist 4L-5000/2x2900 type comparing to in-the-field data are presented.

## Прогнозирование термических условий дисковых тормозов шахтных подъемных машин

## Резюме

В реферате представлен метод прогнозирования термических условий дисковых тормозов шахтных подъемных машин, включающий определение прироста средней и максимальной температуры площади диска, а также прироста средней объемной температуры диска. На основе представленных зависимостей даны результаты термических расчетов дискового тормоза шахтной многоканатной подъемной установки типа 4Л - 5000/2x2900, которые сравнивались с результатами эксплуатационных исследований, проведенных на этой установке.