

Winicjusz Boroń, Florian Krasucki  
Jerzy Rabsztyn, Antoni St. Wnuk

### OBCIĄŻALNOŚĆ PRĄDOWA OPONOWYCH PRZEWODÓW GÓRNICZYCH

**Streszczenie.** Analizowano warunki pracy i żywotność przewodów oponowych 1000 V użytkowanych w podziemiach kopalń. Zaproponowano następujące podstawowe kryteria dla doboru wartości temperatury dopuszczalnej długotrwałe i wynikającej z niej obciążalności prądowej przewodów oponowych: właściwości mechaniczne gumy oponowej i rezystancja izolacji żył roboczych.

Przeprowadzono badania laboratoryjne dla wyznaczenia wpływu obciążalności prądowej na wartości parametrów ustalonych jako kryteria podstawowe.

Podano metodykę przybliżonego, analitycznego określania prądu dopuszczalnego długotrwałe.

W wyniku badań i analizy zaproponowano zwiększenie temperatury granicznej dopuszczalnej długotrwałe z 60°C do 75°C.

Na podstawie przeliczeń podano nowe, zwiększone wartości obciążeń prądowych przewodów oponowych, odpowiadające temperaturze granicznej równej 75°C.

#### Wstęp

Realizowana koncentracja wydobycia w górnictwie węglowym stwarza sytuację, w której zasadniczego znaczenia nabiera zagadnienie ciągłości dostawy energii elektrycznej do wysokowydajnych maszyn urabiających i załadowniczo-odstawczych. Energia elektryczna dostarczona do silnika maszyny powinna przy tym charakteryzować się odpowiednimi parametrami, ustalonymi zarówno przez dane znamionowe silnika jak i specyfikę pracy i eksploatacji napędu.

W ogólnym przypadku schemat logiczny sprawnej dostawy energii elektrycznej do napędu maszyny można przedstawić jako układ szeregowo połączonych (iloczyn logiczny) elementów wchodzących w skład kopalinianego układu elektroenergetycznego.

Na przykład:

$$X = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 = \prod_{i=1}^6 x_i \quad (1)$$

gdzie:

X - stan sprawności układu zasilania maszyny,

$x_1$  - stan sieci WN,

$x_2$  - stan stacji transformatorowej,

- $x_3$  - stan przewodu oponowego lub kabla na odcinku transformator - łącznik manewrowy,  
 $x_4$  - stan łącznika manewrowego,  
 $x_5$  - stan przewodu oponowego na odcinku łącznik manewrowy - silnik maszyny,  
 $x_6$  - stan silnika.

Układ będzie sprawny jedynie w tym przypadku, kiedy w rozpatrywanym przedziale czasowym wystąpi jednoczesna sprawność wszystkich elementów układu logicznego ( $x_i = 1$ ). Przez pojęcie "sprawności" elementu  $x_i$  należy przy tym rozumieć nie tylko bezawaryjną pracę urządzenia (brak uszkodzenia mechanicznego i elektrycznego) lecz również zdolność przekazywania odpowiednich parametrów energii elektrycznej od elementu  $x_{i-1}$  do elementu  $x_{i+1}$ . Przekazywanie energii powinno poza tym zachodzić z zapewnieniem odpowiedniego, wymaganego przepisami, stopnia bezpieczeństwa.

"Funkcję sprawności" elementów  $x_i$  można wyznaczyć z kolei jako iloczyn logiczny:

$$x_i = a_i \cdot p_i \cdot b_i \quad (2)$$

gdzie:

- $x_i$  - sprawność i-tego elementu układu,  
 $a_i$  - stan bezawaryjny ( $a_i = 1$ ) lub awaryjny ( $a_i = 0$ ) elementu,  
 $p_i$  - stan parametrów przekazywanych ( $p_i = 1$  - poziom wymagany;  $p_i = 0$  - poniżej poziomu wymaganego),  
 $b_i$  - stan bezpieczeństwa ( $b_i = 1$  - urządzenie bezpieczne;  $b_i = 0$  - urządzenie stwarza zagrożenie).

Przyjmując w uproszczeniu, że wszystkie stany są jednakowo możliwe i niezależne, po podstawieniu (2) do (1) otrzymać można wypadkowe wyrażenie na funkcję "sprawności" układu:

$$X = a_1 p_1 b_1 \cdot a_2 p_2 b_2 \cdot a_3 p_3 b_3 \cdot a_4 p_4 b_4 \cdot a_5 p_5 b_5 \cdot a_6 p_6 b_6 = \\ = \prod_{i=1}^6 a_i p_i b_i \quad (3)$$

Z analizy zależności wynika, że o niesprawności układu jako całości decyduje element, którego prawdopodobieństwo przejścia ze stanu 1 do stanu 0 jest największe. Z analizy [1] ogólnych warunków techniczno-ruchowych

oraz statystyk krajowych i zagranicznych wynika, że elementem takim jest przewód oponowy na odcinku łącznik manewrowy - silnik.

Zmniejszenie prawdopodobieństwa wystąpienia niesprawności przewodu oponowego jest możliwe do uzyskania następującymi środkami:

- wzmocnienie mechaniczne przewodu i zmiana niektórych niewłaściwych nawyków eksploatacyjnych (czynnik a);
- ekranowanie żył roboczych oraz stosowanie dodatkowych środków ochronnych (czynnik b);
- odpowiedni dobór przekroju żył roboczych oraz przyjęcie technicznie uzasadnionej obciążalności prądowej (czynnik p).

Przyjęcie odpowiedniej wartości obciążalności prądowej przewodów oponowych wymaga uprzedniego ustalenia temperatury granicznej dopuszczalnej długotrwale oraz przeanalizowania jej wpływu zarówno na właściwości samego przewodu jak i ewentualnego wpływu na środowisko. Ogólnie, zgodnie z wymaganiami polskich norm, temperatura graniczna powinna być dobrana tak, aby zapewniała gospodarczo uzasadnioną trwałość przewodu i nie oddziaływała szkodliwie na inne części urządzenia i przedmioty podlegające jej wpływowi.

Z punktu widzenia potrzeb ruchu górniczego wymaganie to oznacza konieczność ustalenia kryteriów doboru temperatury granicznej i wynikającej z tego obciążalności prądowej. Kryteria te powinny przy tym uwzględniać żywotność przewodu, ogólne wymagania techniczno-ruchowe oraz odpowiedni stopień bezpieczeństwa.

#### 1. Analiza żywotności przewodów oponowych eksploatowanych w podziemiach kopalń

O żywotności przewodów oponowych w warunkach ruchu górniczego decydują przede wszystkim czynniki nie dające się ująć w sposób ścisły. W zasadzie czynniki te stanowią zbiór zjawisk losowych, dla których model matematyczny charakteryzuje się znaczną złożonością.

Ogólnie czynniki limitujące żywotność przewodów oponowych górniczych podzielić można na dwie grupy. Do grupy I zaliczyć należy czynniki obiektywne wpływające z charakterystyki środowiska i mikroklimatu kopalnianego oraz ze specyfiki pracy przewodów. Grupę II stanowi zbiór zdarzeń subiektywnych wynikających przede wszystkim z nieodpowiedniej eksploatacji przewodów.

Jednoczesne działanie obydwu grup czynników stwarza sytuację, w której praktyczna żywotność przewodów oponowych jest niedopuszczalnie mała. Dla przewodów eksploatowanych bezpośrednio w przodku (zasilanie kombajnów, wiertarek, górnych napędów przenośników ścianowych itp.) czas ich pracy w zasadzie nie przekracza 12 miesięcy [1]. Tak mała żywotność przewodów po-

woduje znaczne pogorszenie ekonomicznych wskaźników elektryfikacji dołu, co w konsekwencji zwiększa koszt jednostkowy wydobycia tony węgla. Poprawę w zakresie żywotności przewodów uzyskać można przez zastosowanie następujących środków:

- 1° Ograniczenie do minimum niekorzystnego wpływu czynników obiektywnych (grupa I), przez stosowanie odpowiednich konstrukcji przewodów, układaków i racjonalnych sposobów prowadzenia przewodów w przodku.
- 2° Wyeliminowanie z praktyki ruchu górniczego, przez ścisłe egzekwowanie od personelu obsługującego obowiązujących przepisów, czynników zaliczonych do grupy II.
- 3° Powtórne wprowadzenie do eksploatacji, po dokonanej naprawie uszkodzonych przewodów.

Po wprowadzeniu wszystkich ww. środków istnieje realna możliwość wielokrotnego podniesienia żywotności przewodów. Z praktyki innych krajów wynika, że możliwa do uzyskania żywotność przewodów wynosi 5-8 lat.

Dla przypadku teoretycznego (obciążenie prądowe nie zmieniające się w czasie, przewód nieuszkodzony), żywotność przewodów jest funkcją przede wszystkim jakości materiałów, użytych na izolację żył roboczych i oponę oraz temperatury granicznej. Funkcja ta, w ogólnym przypadku posiada charakter wykładniczy. Można ją przedstawić w postaci następującej zależności:

$$L = e^{(a - b\vartheta)} \quad (4)$$

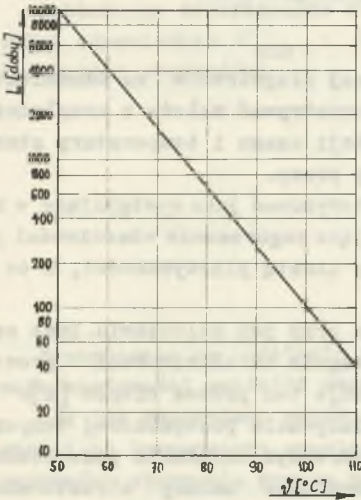
gdzie

- L - teoretyczna żywotność przewodu,
- $\vartheta$  - temperatura graniczna dopuszczalna długotrwale ( $^{\circ}\text{C}$ ),
- a, b - współczynniki stałe zależne od jakości i składu chemicznego materiałów użytych na izolację żył.

Współczynniki a i b wyznaczono dla gum izolacyjnych doświadczalnie [2] utrzymując przybliżoną funkcję żywotności:

$$L = e^{(13,8 - 0,092\vartheta)} \quad (4a)$$

Powyższą zależność graficznie przedstawiono na rysunku 1. Z wykresu wynika, że założenie temperatury granicznej dopuszczalnej długotrwale równej  $60^{\circ}\text{C}$  ( $333^{\circ}\text{K}$ ) jest równoznaczne z przyjęciem teoretycznej żywotności przewodu równej około 4000 dób.



Rys. 1. Zależność żywotności przewodu od temperatury żył roboczych

Uwzględniając rzeczywisty przebieg obciążenia przewodu oponowego (obciążenie nierównomierne, przerywane) można stwierdzić, że żywotność teoretyczna urealniona wynosi:

$$L_r = k L \quad (5)$$

gdzie:

- $L_r$  - żywotność przewodu teoretyczna, z uwzględnieniem charakteru obciążenia,
- $L$  - żywotność teoretyczna wyznaczona wg zależności (4a),
- $k$  - współczynnik nierównomierności obciążenia.

Wartość współczynnika  $k$  zależy przede wszystkim od rodzaju zasilanego napędu (kombajn, przenośnik, wiertarka), warunków geologicznych oraz systemów eksploatacji. Zakładamy wstępnie, że maksymalna wartość współczynnika  $k$  w warunkach krajowego górnictwa wynosi około 2,5 (przyjęto sumaryczny czas obciążenia przewodu prądem równy około 10 godz. w ciągu doby). Wartość współczynnika  $k$  określonego dla warunków krajowych pokrywa się z wynikami badań przeprowadzonych zagranicą [3].

Po podstawieniu liczbowej wartości współczynnika  $k$  do zależności (5), otrzymać można teoretyczną, urealnioną żywotność przewodu jako równą ok. 10.000 dób (przy założeniu temperatury granicznej równej 60°C), czyli ok. 25 lat.

Z wyżej podanych stwierdzeń wynika, że istnieje realna możliwość podwyższenia wartości temperatury granicznej i związanej z tym obciążalności prądowej. Podwyższona wartość temperatury granicznej powinna przy tym być dobrana z uwzględnieniem ogólnych kryteriów bezpieczeństwa i pewności ruchowej.

Z analizy warunków pracy i eksploatacji przewodów oponowych w podziemnych kopalniach wynika, że podstawowymi kryteriami doboru temperatury granicznej są parametry mechaniczne gum oraz wartość rezystancji izolacji. Wynika to z faktu, że wielkości te mają bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo eksploatacji oraz charakteryzują się znaczną zmiennością z temperaturą.

## 2. Ciepłne charakterystyki parametrów mechanicznych gum w przewodach oponowych

Wpływ temperatury granicznej dopuszczalnej długotrwanie na właściwości mechaniczne gum izolacyjnych i oponowych rozpatrywać należy z uwzględnieniem zmienności wybranych parametrów w funkcji czasu i temperatury starzenia cieplnego oraz podwyższonej temperatury pracy.

Ogólnie starzenie cieplne można scharakteryzować jako występujące w miarę upływu czasu zmiany strukturalne powodujące pogorszenie właściwości gum. Najczęściej starzenie cieplne przejawia się utratą plastyczności, a co za tym idzie zwiększoną kruchością gumy.

Starzenie gumy zachodzi przede wszystkim przy jej utlenianiu. Inne czynniki, takie jak ciepło, światło, ozon są jedynie katalizatorami procesu utleniania, przy czym najsilniej intensyfikuje ten proces ciepło [2].

Rozróżnić można dwojakiego rodzaju oddziaływania podwyższonej temperatury na zmianę właściwości gumy. Przy długotrwałym działaniu podwyższonej temperatury (starzenie cieplne) zachodzą chemiczne zmiany strukturalne. Właściwości fizykomechaniczne zmieniają się przy tym w sposób nieodwracalny. Krótkotrwałe podniesienie temperatury powoduje zmiany odwracalne; ochłodzenie gumy do temperatury początkowej przywraca poprzednie jej właściwości.

Z przeprowadzonych badań [3, 4, 5] wynika, że w procesie starzenia cieplnego najistotniejsze jest pogorszenie właściwości mechanicznych gum, a w szczególności wskaźników wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia względnego przy zerwaniu.

Charakter zmiany tych wskaźników jest przy tym bliski zależności eksplotencjalnej i może być opisany równaniami:

$$\sigma_2 = \sigma_1 \cdot e^{-\alpha_1 \cdot t} \quad (6a)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \cdot e^{-\alpha_2 \cdot t} \quad (6b)$$

gdzie:

$\sigma_1, \varepsilon_1$  - odpowiednio wytrzymałość na rozciąganie i wydłużenie względne przed starzeniem,

$\sigma_2, \varepsilon_2$  - odpowiednio wytrzymałość na rozciąganie i wydłużenie względne po starzeniu,

$t$  - długość czasu starzenia,

$\alpha_1, \alpha_2$  - współczynniki szybkości starzenia zależne od rodzaju gumy i temperatury starzenia.

Zakładając dopuszczalne obniżenie wskaźników wytrzymałościowych do wartości odpowiednio  $\sigma_{\min}$  i  $\epsilon_{\min}$  otrzymać można równanie orientacyjnej żywotności przewodów:

$$L_{\sigma} = \frac{1}{\alpha_1} \ln \frac{\sigma_1}{\sigma_{\min}} \quad (7a)$$

$$L_{\epsilon} = \frac{1}{\alpha_2} \ln \frac{\epsilon_1}{\epsilon_{\min}} \quad (7b)$$

Wyznaczenie na podstawie zależności (7a) i (7b) żywotności przewodów wymaga znajomości wartości współczynników  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$ .

Jak już wspomniano współczynniki te zależą od temperatury starzenia a więc i od temperatury granicznej. Praktyczne wyznaczenie współczynników szybkości starzenia wymaga przeprowadzenia wielu prób w ciągu stosunkowo długiego okresu czasu.

Częściowe dotąd przeprowadzone badania dla gum stosowanych w przewodach górniczych [3, 4, 5] pozwalają jedynie na sformułowanie pewnych ogólnych wniosków dotyczących zmian parametrów mechanicznych gum w procesie starzenia cieplnego. Z wniosków tych wynika, co następuje:

- 1° W procesie starzenia cieplnego wytrzymałość na rozciąganie gumy izolacyjnej i przewodzącej zmniejsza się, natomiast oponowej praktycznie pozostaje na stałym poziomie.
- 2° Wydłużenie względne gumy izolacyjnej, przewodzącej i oponowej przy starzeniu cieplnym zmniejsza się, przy czym wielkość tych zmian zależy przede wszystkim od temperatury starzenia.
- 3° Przy identycznych parametrach starzenia (czas i temperatura) największymi zmianami wydłużenia względnego charakteryzuje się guma oponowa, a najmniejszymi - izolacyjna.
- 4° Wskaźniki mechaniczne gum po roku starzenia cieplnego w temperaturach 75-95°C zmieniają się stosunkowo nieznacznie (5-28%).

Istotnym problemem, z punktu widzenia doboru temperatury granicznej, jest zmienność parametrów mechanicznych gumy przy różnych jej temperaturach pracy. W ogólnym przypadku wskaźniki wytrzymałościowe gum w zakresie temperatur 20-120°C zmieniają się eksponentalnie [3] wg zależności:

$$\sigma_T = \sigma_{20} \cdot C_1 \cdot e^{B_1/T} \quad (8a)$$

$$\epsilon_T = \epsilon_{20} \cdot C_2 \cdot e^{B_2/T} \quad (8b)$$

$$Z_T = Z_{20} \cdot C_3 \cdot e^{B_3/T} \quad (8c)$$

gdzie:

- $\sigma_T, \epsilon_T, Z_T$  - odpowiednio wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie względne przy zerwaniu i wskaźnik odporności na rozdieranie w temperaturze różnej od 20°C,  
 $\sigma_{20}, \epsilon_{20}, Z_{20}$  - jw. - określone w temperaturze 20°C,  
 $C_1, C_2, C_3$   
 $B_1, B_2, B_3$  - stałe współczynniki zależne od rodzaju gumy,  
 $T$  - temperatura bezwzględna w (°K).

Wartości współczynników B i C, wyznaczone eksperymentalnie dla gumy izolacyjnej i oponowej zostały zestawione w tablicy 1.

Tablica 1

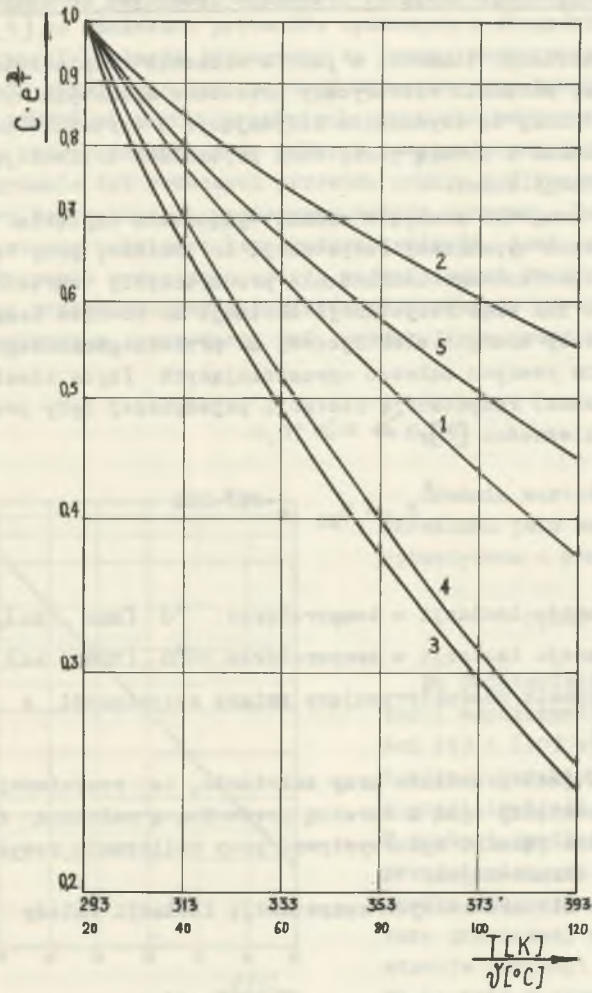
Wartości współczynników zmiany parametrów mechanicznych

Rodzaj gumy	Wartości współczynników					
	$B_1$ (°K)	$B_2$ (°K)	$B_3$ (°K)	$C_1$	$C_2$	$C_3$
Izolacyjna	1580	920	-	0,0045	0,043	-
Oponowa	1100	690	1620	0,023	0,095	0,004

Na podstawie równań (8a), (8b), (8c) oraz danych zawartych w tablicy obliczyć można rzeczywistą wartość wskaźników mechanicznych gum przy różnych temperaturach pracy. W postaci graficznej zależności te zostały przedstawione na rysunku 2.

Z wykresów wynika, że przy przyjęciu temperatury granicznej równej 60°C (333°K) wytrzymałość na rozciąganie i wydłużenie względne przy zerwaniu gumy izolacyjnej spadają odpowiednio do ok. 52% i 66% wartości określonych przy temperaturze 20°C (293°K). Wskaźniki te dla gumy oponowej (obliczone przy założeniu, że jej temperatura przy znamionowym obciążeniu przewodu jest równa 40°C) wynoszą odpowiednio 76% dla wytrzymałości na rozciąganie, 85% dla wydłużenia względnego oraz 66% dla wskaźnika odporności na rozdieranie.





Rys. 2. Właściwości mechaniczne gum w funkcji temperatury

1 - wytrzymałość na rozciąganie gumy oponowej, 2 - wydłużenie względne przy zerwaniu gumy oponowej, 3 - wskaźnik odporności na rozdieranie gumy oponowej, 4 - wytrzymałość na rozciąganie gumy izolacyjnej, 5 - wydłużenie względne przy zerwaniu gumy izolacyjnej

### 3. Zależność rezystancji izolacji przewodów oponowych od temperatury

Rezystancja izolacji stanowi, z punktu widzenia bezpieczeństwa eksploatacji, podstawowy parametr elektryczny przewodów oponowych. Wynika to przede wszystkim z faktu, że czynnikiem decydującym o wartości prądu jednofazowego uszkodzenia z ziemią jest, obok pojemności doziemnej, wypadkowa rezystancja izolacji sieci.

W górnictwie krajowym przyjęto zasadę wyłączania napięcia w sieci w przypadku obniżenia wypadkowej rezystancji do poziomu, przy którym spodziewany prąd jednofazowego uszkodzenia przekroczyłby wartości ustalone jako bezpieczne. Tak więc rezystancja izolacji ma również bezpośredni wpływ na ciągłość dostawy energii elektrycznej do przodka górniczego.

Przy przyjęciu pewnych założeń upraszczających (żyła idealnie okrągła, izolacja jednorodna) rezystancję izolacji pojedynczej żyły przewodu obliczyć można, z zależności [6]:

$$R_{\psi} = R_{20} e^{-\alpha(\psi-20)} \quad (9)$$

gdzie:

$R_{\psi}$  - rezystancja izolacji w temperaturze  $\psi^{\circ}\text{C}$  (Mom . km),

$R_{20}$  - rezystancja izolacji w temperaturze  $20^{\circ}\text{C}$  (Mom . km),

$\alpha$  - współczynnik charakteryzujący zmianę rezystancji z temperaturą ( $1/^{\circ}\text{C}$ ).

Zależność (9) jest prawdziwa przy założeniu, że rezystancja izolacji jest określana pomiędzy żyłą a warstwą przewodzącą nałożoną równomiernie na izolacji. Można ją więc wykorzystywać przy obliczaniu rezystancji izolacji przewodów ekranowanych.

Dla przewodów nieekranowanych rezystancję izolacji należy obliczać z zależności:

$$R'_{\psi} = g R_{20} e^{-\alpha(\psi-20)} \quad (10)$$

gdzie:

$g$  - współczynnik geometrii przewodu uwzględniający ilość i rozmieszczenia żył w ośrodku przewodu.

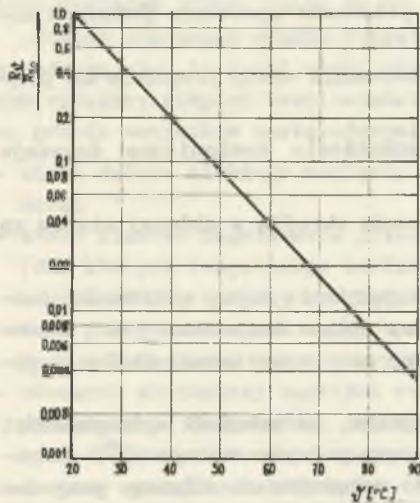
Dla działania zabezpieczeń upływnościowych istotna jest rezystancja izolacji określona pomiędzy trzema zwartymi żyłami roboczymi a żyłą ochronną (ziemią). W tym przypadku wartości otrzymane wg zależności (9) i (10) należy podzielić przez trzy.

Dla określenia wartości współczynnika  $\alpha$  przeprowadzono szereg badań i pomiarów [4] na odcinkach przewodów oponowych o długości ok. 15 m. Pomiarów rezystancji izolacji dokonywano za pomocą megomierza lampowego (typ R505 "Elpo") przyjmując jako wartość mierzoną rezystancję odczytaną po upływie 60 sekund od chwili przyłożenia napięcia pomiarowego.

Badania przeprowadzono przy różnych temperaturach izolacji otrzymanych przez podgrzanie żył roboczych przewodu prądem trójfazowym symetrycznym. Temperaturę żył roboczych wyznaczano metodą oporową. Założono uproszczenie, że w stanie ustalonym temperatura izolacji jest równa temperaturze żył. Współczynnik wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów.

W wyniku przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że współczynnik  $\alpha$  dla gum izolacyjnych w przewodach OnG produkcji krajowej mieści się w przedziale:

$$0,07 \leq \alpha \leq 0,095$$



Rys. 3. Rezystancja izolacji żył roboczych w funkcji temperatury

Średnia wartość współczynnika  $\alpha$  określona jako wartość średnia arytmetyczna z pomiarów, wynosi:

$$\alpha \approx 0,082 \text{ (1/}^\circ\text{C)}$$

Po podstawieniu otrzymanej wartości współczynnika  $\alpha$  do zależności (9) i (10) otrzymać można orientacyjny charakter zmienności rezystancji izolacji z temperaturą. W postaci graficznej zależność tę przedstawiono na rys. 3. Z wykresu wynika, że przy przyjęciu temperatury granicznej równej  $60^\circ\text{C}$  rezystancja izolacji spada średnio ok. 25-krotnie w stosunku do wartości określonej w temperaturze  $20^\circ\text{C}$ .

#### 4. Analiza możliwości podwyższenia wartości temperatury granicznej dopuszczalnej długotrwałe

Przekształcając funkcję (4) z uwzględnieniem równości (5) otrzymać można zależność temperatury granicznej od przyjętej teoretycznej urealnionej żywotności przewodów:

$$v_g^b = \frac{1}{b} (a + \ln \frac{k}{L_T}) \quad (11)$$

Z analizy danych krajowych i zagranicznych wynika, że za technicznie i ekonomicznie uzasadnione można uznać przyjęcie żywotności teoretycznej urealnionej równej 2500 dób (ok. 8 lat). Dla wartości liczbowych współczynników  $a$ ,  $b$ ,  $k$  jak w p. 1 dla przewodów 1-żyłowych odpowiada to temperaturze granicznej równej 75°C.

Wpływ podwyższonej do 75°C temperatury granicznej na ustalone jako kryteria parametry przewodu ocenić można na podstawie uprzednio podanych zależności i rozważań.

W szczególności za punkt wyjścia dla dokonania oceny proponuje się przyjęcie dwu podstawowych założeń:

- 1° O odporności przewodu na typowe uszkodzenia mechaniczne decyduje przede wszystkim guma oponowa.
- 2° Właściwości elektroizolacyjne przewodu określa w głównej mierze guma izolacyjna.

Przyjęcie podanych założeń sprowadza zagadnienie oceny możliwości podwyższenia temperatury granicznej do analizy wpływu temperatury na zmienność parametrów mechanicznych gumy oponowej oraz rezystancji izolacji gumy izolacyjnej.

Z przedstawionych na rys. 2 krzywych wynika, że wskaźnik wytrzymałości na rozciąganie gumy oponowej obniża się, przy podwyższeniu do 75°C temperatury granicznej, o ok. 9% w stosunku do wskaźnika określanego przy temperaturze 60°C. Podobnie kształtują się zmiany pozostałych parametrów mechanicznych gumy oponowej (odporność na rozdzieranie - 7,5%, wydłużenie względne przy zerwaniu - 12%).

Jednocześnie, jak stwierdzono w trakcie badań, parametr decydujący o odporności mechanicznej przewodu, a mianowicie wskaźnik wytrzymałości na rozciąganie gumy oponowej praktycznie nie zmienia swojej wartości w trakcie starzenia cieplnego.

Z podanych stwierdzeń wynika, że wprowadzenie podwyższonej do 75°C temperatury granicznej nie powoduje istotnego obniżenia właściwości mechanicznych przewodów.

Kryterium, które w znacznie poważniejszym stopniu limituje temperaturę graniczną, jest rezystancja izolacji gumy izolacyjnej. Jak już wspomniano w p. 3, w zakresie temperatur 20-60°C rezystancja izolacji spada ok. 25-krotnie.

Podwyższenie temperatury granicznej do 75°C stwarza sytuację, w której, przy długotrwałym obciążeniu przewodu prądem znamionowym, rezystancja izolacji spada ok. 90-krotnie w stosunku do rezystancji określonej w temperaturze 20°C.

Zgodnie z ustaleniami zawartymi w projekcie normy na górnicze przewody oponowe rezystancja izolacji jednej żyły powinna mieścić się (w zależności od przekroju żyły) w granicach (286-99 Mom.km) dla przewodów nieekranowanych oraz (121-46 Mom.km) dla przewodów ekranowanych. Oznacza to, że w krańcowym przypadku (temperatura żyły - 75°C, przewód ekranowany o przekroju żył roboczych - 95 mm<sup>2</sup>) rezystancja izolacji trzech żył zwartych względem ekranu spada do ok. 170 kom.km.

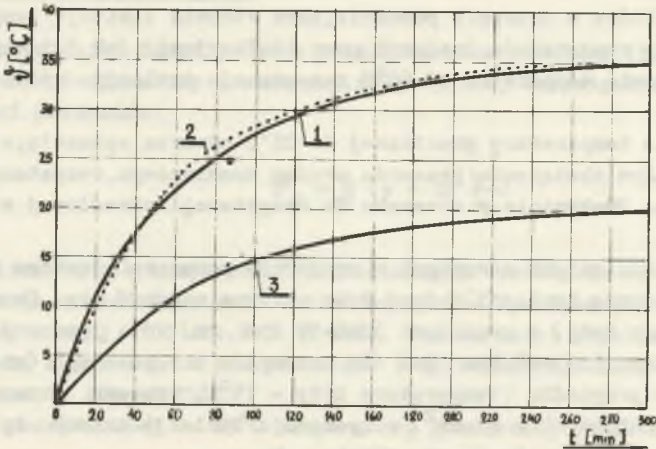
Pomimo znacznego spadku rezystancji izolacji przewodu przyjąć można, że wypadkowy stan izolacji sieci utrzymany zostanie na poziomie zapewniającym wymagany stopień bezpieczeństwa i pewności ruchowej. Uzasadnić to można przede wszystkim następującymi podstawowymi stwierdzeniami:

- sieci dołowe niskiego napięcia charakteryzują się ograniczoną rozciągłością;
- stałe czasowe nagrzewania przewodów o dużych przekrojach żył roboczych (dla których rezystancja izolacji jest najmniejsza) są rzędu kilkadziesiąt minut, co przy uwzględnieniu nierównomiernie przerywanego charakteru pracy zasilanych napędów stwarza małe prawdopodobieństwo długotrwałego podniesienia temperatury żył do wartości granicznej;
- stosunek minimalnej wartości rezystancji izolacji przewodu, wynikły z podwyższenia temperatury granicznej, do rezystancji pomiarowej zabezpieczeń upływowych w wystarczającym stopniu zabezpiecza wymaganą ciągłość dostawy energii elektrycznej.

##### 5. Analityczne określenie dopuszczalnej obciążalności prądowej przewodów oponowych

Przykładowo na rys. 4 przedstawiono czasowy przebieg nagrzewania prądem znamionowym przewodu typu OnG o przekroju żył roboczych 50 mm<sup>2</sup>. Na rysunku linią przerywaną (krzywa 2) zaznaczono dodatkowo teoretyczny przebieg eksponentylny nagrzewania żył roboczych przewodu.

Z przedstawionych krzywych wynika, że nagrzewanie przewodu nie przebiega w sposób ściśle eksponentylny; w ogólnym przypadku stała czasowa w procesie nagrzewania jest funkcją temperatury.



Rys. 4. Czasowy przebieg nagrzewania przewodu OnG 3 x 50 + 35 + 3 x 4 mm<sup>2</sup> prądem znamionowym

1 - krzywa nagrzewania izolacji żył roboczych, 2 - teoretyczna krzywa nagrzewania, 3 - krzywa nagrzewania opony przewodu

Dla stanu ustalonego (ilość ciepła wydzielanego w przewodzie jest równa ilości ciepła oddawanego do otoczenia) dopuszczalna obciążalność prądowa przewodu jest funkcją przyjętej temperatury granicznej dopuszczalnej długotrwale, temperatury otoczenia oraz właściwości cieplnych i wymiarów konstrukcyjnych przewodu. Ścisłe sprecyzowanie tej funkcji sprowadza się do sformułowania cieplnego prawa Ohma i rozwiązania go z uwzględnieniem danego typu przewodu.

W warunkach równowagi cieplne prawo Ohma można sformułować następująco:

$$\Delta \vartheta = P S \quad (12)$$

gdzie:

$\Delta \vartheta$  - różnica temperatur żył roboczych i otoczenia (°C),

P - moc strumienia cieplnego równego mocy strat elektrycznych w żyłce (W/m),

S - oporność cieplna przewodu (cm<sub>c</sub> · m).

Dla przewodów elektrycznych niskiego napięcia, przy przepływie prądu małej częstotliwości, można założyć, że moc strat elektrycznych w żyłce równa jest stratom czynnym w miedzi. Moc strumienia cieplnego, przeliczona na 1 metr przewodu, będzie więc równa:

$$P = m I^2 R \quad (13)$$

gdzie:

m - liczba żył przewodu,

I - prąd obciążenia żył (A),

R - opór czynny jednej żyły przewodu w temperaturze  $\vartheta$  (Ω/m).

Oporność cieplna  $S$  może być wyrażona jako suma dwu składowych: oporności wewnętrznej  $S_w$ , charakteryzującej spadek temperatury od żył roboczych do powierzchni przewodu i równoważnej oporności powierzchniowej  $S_p$ , charakteryzującej spadek temperatury od powierzchni przewodu do otoczenia:

$$S = S_w + S_p \quad (14)$$

Po podstawieniu zależności (13) i (14) do (12) i przekształceniu będzie:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta t^{\theta}}{m R (S_w + S_p)}} \quad (15)$$

Z zależności (15) wynika, że zagadnienie wyznaczenia obciążalności prądowej przewodów sprowadza się do obliczenia wartości oporności  $S_w$  i  $S_p$ .

Przy przyjęciu pewnych założeń upraszczających, ciepłe oporności wewnętrzne i powierzchniowe przewodu z trzema żyłami roboczymi mogą być wyrażone [2] w postaci:

$$S_w = \frac{\alpha \bar{\sigma}_w}{6\pi} \ln \frac{r^3}{1,7 r_1 d_z^2} \quad (16)$$

$$S_p = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{a}{r} + \frac{2b}{\Delta t^{\theta}} \right) \quad (17)$$

gdzie:

$\alpha$  - współczynnik poprawkowy uwzględniający błędy wynikłe z przyjęcia założeń upraszczających,

$\bar{\sigma}_w$  - wewnętrzna oporność cieplna właściwa ( $^{\circ}\text{Cm/W}$ ),

$r$  - promień przewodu (mm),

$r_1$  - promień żyły (mm),

$d_z$  - średnica żyły na izolacji (mm),

$a, b$  - współczynniki stałe,

$\Delta t^{\theta}$  - różnica temperatury żyły i otoczenia ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Podstawiając obliczone wartości  $S_w$  i  $S_p$  do wyrażenia (15) otrzymać można ostateczne wyrażenie na prąd dopuszczalny długotrwale

$$I = \sqrt{\frac{\Delta t^{\theta}}{m R \left( \frac{\alpha \bar{\sigma}_w}{6\pi} \ln \frac{r^3}{1,7 r_1 d_z^2} + \frac{a}{2\pi r} + \frac{b}{\pi \Delta t^{\theta}} \right)}} \quad (18)$$

Tablica 2

## Obciążalność prądowa przewodów oponowych górniczych

Przekrój żył roboczych przewodów	Obciążalność prądowa przewodów								
	wg obowiązującej normy	Temperatura graniczna 60°C		Temperatura graniczna 75°C		wyznaczona wg zależności (18)		wyznaczona wg zależności (18)	
		stara konstrukcja	nowa konstrukcja	stara konstrukcja	nowa konstrukcja	stara konstrukcja	nowa konstrukcja	stara konstrukcja	nowa konstrukcja
mm <sup>2</sup>	A	A	A	A	A	A	A	A	B
2,5	27	31	28	37	34	37	34	34	34
4	36	39	38	46	45	46	45	45	45
6	47	50	49	60	58	60	58	58	58
10	65	69	68	82	81	82	81	81	81
16	87	89	91	106	108	106	108	108	108
25	115	119	122	142	141	142	141	141	141
35	143	144	141	171	171	171	171	171	171
50	178	177	174	211	208	211	208	208	208
70	220	218	213	260	258	260	258	258	258
95	265	-	260	-	314	-	-	-	314



Przy określeniu prądu dopuszczalnego długotrwale korzystano z wartości  $\alpha$ ,  $\delta$ , a i b wyznaczonych doświadczalnie [2] oraz z danych konstrukcyjnych przewodów produkcji krajowej. Temperaturę otoczenia przyjęto zgodnie z normami równą  $25^{\circ}\text{C}$ .

Wyniki przeliczeń dla temperatur granicznych  $60$  i  $75^{\circ}\text{C}$  zestawiono w tabelicy 2. W kolumnie 2 tabelicy podano obciążalności prądowe zgodne z dotąd obowiązującymi normami państwowymi (PN-55/E-05021) "Wyznaczanie obciążalności przewodów i kabli". Obciążalności te odnoszą się do przewodów oponowych starej konstrukcji wykonywanych wg nieaktualnych norm. Obciążalności prądowe, obliczone zgodnie z zależnością (18) dla przewodów starej konstrukcji, zestawiono w kolumnie 3. Z porównania danych zawartych w kolumnach 2 i 3 wynika, że metodyka analitycznego obliczenia obciążalności prądowej wg zależności (18) może być stosowana z wystarczającą dla celów praktycznych dokładnością.

W kolumnie 4 tabelicy podano obciążalności prądowe obliczone analitycznie dla przewodów o konstrukcji zgodnej z obecnie obowiązującymi normami. Na podstawie porównania obliczonych obciążalności prądowych dla przewodów o starej i nowej konstrukcji (kolumny 3 i 4) stwierdzić można, że zmiana niektórych parametrów konstrukcyjnych przewodów spowodowała nieznaczne (maksymalnie 10%) zmiany dopuszczalnych obciążeń prądowych.

W kolumnach (5 - stare konstrukcje i 6 - nowe konstrukcje) zestawiono wyniki obliczonych analitycznie obciążalności prądowych przy założeniu temperatury granicznej  $75^{\circ}\text{C}$ . Z porównania danych zawartych w kolumnach 2 i 6 wynika, że podwyższenie wartości temperatury granicznej dopuszczalnej długotrwale do  $75^{\circ}\text{C}$  pozwala na stosunkowo znaczne (średnio o około 22%) zwiększenie obciążalności prądowej przewodów oponowych.

Zaznaczyć należy, że norma PN-55/E-05021 jest obecnie nowelizowana. W nowo opracowanym projekcie zastrzeżono, że norma nie będzie obejmowała kabli i przewodów instalowanych w podziemiach kopalń. Wynika z tego konieczność przeprowadzenia badań uzupełniających i wprowadzenia do aktualnie opracowywanych przepisów eksploatacji urządzeń elektrycznych w górnictwie nowych wartości obciążalności prądowych.

Przyjęcie w przepisach zaproponowanej wartości temperatury granicznej  $75^{\circ}\text{C}$  oraz związanych z tym zwiększonych dopuszczalnych obciążeń prądowych powinno w istotny sposób przyczynić się do częściowego zmniejszenia występujących dotąd trudności przy zasilaniu maszyn i urządzeń górniczych, w szczególności w oddziałach o skoncentrowanym wydobywaniu.

### Zakończenie

Biorąc pod uwagę przeprowadzone rozważania i obliczenia oraz uwzględniając wymagania techniczno-ruchowe, gospodarcze i bezpieczeństwo, sformułować można następujące wnioski i uwagi końcowe:

1. Żywotność przewodów oponowych w warunkach ruchu górniczego jest limitowana przede wszystkim czynnikami nie dającymi się ująć w sposób ścisły. Czynniki te stanowią zbiór zjawisk losowych wynikających z dużego prawdopodobieństwa uszkodzeń mechanicznych przewodów.
2. Za podstawowe kryteria doboru obciążalności prądowej przewodów oponowych uznać należy parametry mechaniczne gumy oponowej oraz rezystancję izolacji żył roboczych.
3. Największą zmiennością z temperaturą (spośród wielkości przyjętych za kryteria) charakteryzuje się rezystancja izolacji. W związku z powyższym obciążalność prądowa przewodów jest limitowana przede wszystkim wypadkowym stanem izolacji przewodów w temperaturze granicznej dopuszczalnej długotrwale.
4. Dla obecnie stosowanych konstrukcji przewodów oponowych za uzasadnione należy uznać podwyższenie temperatury granicznej do  $75^{\circ}\text{C}$ . Uzyska się dzięki temu zwiększenie dopuszczalnych obciążalności prądowych średnio o ok. 22%.
5. Przyjęcie podwyższonych wartości obciążalności prądowych przewodów oponowych powinno w istotny sposób przyczynić się do częściowego usunięcia istniejących trudności, związanych z odpowiednim doбором przekroju przewodów oponowych w przodkach o dużej koncentracji wydobycia.

### LITERATURA

- [1] Krasucki F.: Teoretyczne i techniczne kryteria bezpieczeństwa w elektroenergetycznych sieciach górniczych. Praca doktorska, Politechnika Śląska 1966.
- [2] Poszerstnik M.J., Salutina M.A.: Tiejłowej rasczot sudowych kabielej. Sudostrojenie 1964.
- [3] Ozjernoj M.I., Sobolew W.G.: Szachtnyje gibkije kabielei. "Wiedra" 1966.
- [4] ZKMPW: Kable i przewody górnicze. Studia oraz badania laboratoryjne i ruchowe. 1965-1972.
- [5] Krasucki F.: Problemy niezawodności oraz bezpieczeństwa elektryfikacji i automatyzacji podziemi kopalń węgla. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Górnictwo z. 51, 1972.
- [6] Krasucki F.: Opór izolacji kabli i przewodów górniczych. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Górnictwo, z. 41, 1969.

А. ЛЕРНАЛ НАГРУЗКА ШАХТНЫХ ЭЛЕКТРОПРОВОДОВ  
В РЕЗИНОВОЙ ТРУБКЕ

## Резюме

В статье даётся анализ режима работы и долговечности 1000 в проводов в резиновой трубке, применяемых в шахтах. Авторы представляют основной критерий подбора значений температуры, допускаемой на продолжительное время, и обусловленной ею амперной нагрузки проводов в резиновой трубке, механических свойств резины, а также сопротивления изоляции рабочих жил.

Проведены лабораторные исследования для определения влияния амперной нагрузки на величину параметров, установленных в качестве основных критериев.

Поданы методы приближенного аналитического определения тока, допускаемого на продолжительное время.

В результате исследований и анализа предложено увеличить предельную допускаемую на продолжительное время температуру с  $60^{\circ}\text{C}$  до  $75^{\circ}\text{C}$ .

На основании вычислений поданы новые, увеличенные значения амперных нагрузок для проводов в резиновой трубке, соответствующие предельной температуре  $75^{\circ}\text{C}$ .

THE CURRENT LOAD CAPACITY OF THE CAB TYRE CABLES FOR THE COAL  
INDUSTRY PURPOSES

## Summary

In the paper have been analysed the service conditions and a lifetime of the 1000 V cab tyre cables used in the mine underground. The following criterions for the long permissible temperature affecting the current load capacity of the cab tyre cables have been given: the mechanical properties of the tyre rubber and the resistance of the wire insulation.

During investigations in the laboratory have been determined the current load capacity influence on the steady state parameters as a main criterion. The method of the approximative analytic definition of the long permissible current have been described too.

As a main gain of this investigations and analysis it is a proposal of increasing the long permissible temperature from  $60^{\circ}\text{C}$  (centigrades) to  $75^{\circ}\text{C}$ .

On that basis have been given new greater values of the current load capacities of the cab tyre cables corresponding to the critical temperature of  $75^{\circ}\text{C}$ .