

Sergiusz BORON
Politechnika Śląska, Gliwice

OBCIĄŻENIE PRĄDOWE GÓRNICZYCH PRZEWODÓW OPONOWYCH ZASILAJĄCYCH KOMBAJNY ŚCIANOWE

Streszczenie. Kryterium doboru górniczych przewodów oponowych do obciążeń prądem elektrycznym opiera się na przyjęciu stałej wartości tego prądu, wynikającej z mocy znamionowej zasilanego urządzenia. W referacie przedstawiono wpływ rzeczywistego charakteru pracy kombajnów ścianowych na przyrost temperatury żył roboczych przewodu zasilającego. Zaproponowano zwiększenie obciążalności prądowej przewodów ze względu na charakter obciążenia zbliżony do pracy przerywanej.

LOAD CURRENT OF MINING FLEXIBLE CABLES FOR SUPPLYING COAL CUTTERS

Summary. The selection of trailing mining cables cross-sectional area is currently based on assumption that the load current is constant and its value results from the rated power of supplied machine. The article presents the influence of utility load conditions on the temperature rise of conductor. Increasing of load capacity due to intermittent operation has been proposed.

1. Wprowadzenie

W obecnie obowiązujących przepisach, regulujących sposób doboru przewodów do obciążeń prądem elektrycznym w podziemiach kopalń, jako kryterium przyjmuje się obciążalność prądową długotrwałą I_{dd} [1,2]. Zakłada się przy tym, że obciążenie prądowe przewodu ma wartość stałą, niezmienną w czasie, równą prądowi wynikającemu z mocy znamionowej urządzeń, z uwzględnieniem współczynników obciążenia i jednoczesności. Stosowanie tego kryterium jest uzasadnione głównie w sieci rozdzielczej, szczególnie średniego napięcia, gdyż kable tam pracujące zasilają z reguły większą grupę odbiorników i w

związku z tym ich obciążenie może nie podlegać większym wahaniom. W przypadku natomiast sieci niskonapięciowych, zwłaszcza oddziaływych, mamy do czynienia z diametralnie inną sytuacją. Obciążenie kabli, a szczególnie przewodów oponowych, może mieć charakter zbliżony do pracy przerywanej. Dotyczy to głównie przewodów zasilających maszyny urabiające, a także (choć w mniejszym stopniu) urządzenia odstawy. Prawidłowe określenie stopnia wykorzystania przewodów może pozwolić na zweryfikowanie dotychczasowych metod ich doboru. Problem ten nabiera szczególnej wagi w kontekście koncentracji wydobywania i wzrastającej mocy jednostkowej maszyn górniczych, w szczególności zasilanych napięciem 1000 V. Duża moc jednostkowa urządzeń powoduje niekiedy konieczność stosowania zasilania dwoma, równolegle ułożonymi przewodami, co powoduje wzrost kosztów wyposażenia ściany oraz pogorszenie niezawodności pracy sieci elektroenergetycznej. W niniejszym referacie przedstawiono wyniki obliczeń przebiegu temperatury żył roboczych przewodów oponowych zasilających kombajny ścianowe. Obliczenia zostały wykonane z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Przebieg obciążenia prądowego przewodów uzyskano na podstawie pomiarów prądu obciążenia silników kombajnów ścianowych przeprowadzonych w podziemiach kopalń.

2. Pomiary ruchowe prądu obciążenia silników kombajnu

Wyniki rejestracji prądów obciążenia silników organów urabiających kombajnów ścianowych zostały udostępnione dzięki uprzejmości firmy SOMAR Sp. z o.o. Pomiar prądów obciążenia silników został wykonany z wykorzystaniem systemu sterowania i kontroli pracy kombajnu MAKS (MAKS-245 oraz późniejsze jego modyfikacje MAKS/E-500, MAKS/Z-500, MAKS-i oraz MAKS_m) uzupełnionego o rejestrator pracy kombajnu RPK-1. Urządzenie to rejestruje przebieg pracy kombajnu przez zapis wszystkich wielkości mierzonych przez system MAKS i czynności sterowniczych. Dane udostępniane są w formie wydruku odpowiednich raportów. Dzięki zastosowaniu dodatkowego modułu mikrokomputerowego MR-1 możliwa jest komputerowa analiza zebranych danych, przy czym pojemność pamięci układu rejestratora pozwala na zapisanie danych dotyczących ok. 20 godzin pracy kombajnu, co odpowiada okresowi 1-2 dób [7]. Wartości prądów obciążenia silników organów urabiających są zapamiętywane co 1 s, oddzielnie dla lewego i prawego silnika kombajnu.

Celem analizy było wyznaczenie rzeczywistego stopnia obciążenia przewodu oponowego zasilającego kombajn ścianowy. Wyniki przeprowadzonej analizy mogą zostać wykorzystane do określenia możliwości zwiększenia obciążalności prądowej przewodu bez przekroczenia temperatury granicznej dopuszczalnej długotrwale izolacji. Obliczenia przyrostów temperatury przewodów przeprowadzono z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES) [4].

Ze względu na stosunkowo dużą bezwładność cieplną kabli i przewodów oponowych [4], wartość kroku czasowego w analizie ustalono na 1 min, co jest wartością wystarczającą do zapewnienia odpowiedniej dokładności dla przeprowadzanych obliczeń.

Z uwagi na fakt, że system MAKS dokonuje rejestracji prądu obciążenia silników co 1 s, a przyjęty krok czasowy w analizie MES ma wartość 1 min, obliczone zostały zastępcze, jednonominutowe wartości prądu obciążenia I_{60} , zgodnie z zależnością:

$$I_{60} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{60} ((I_L \cos \varphi_L + I_P \cos \varphi_P)^2 + (I_L \sin \varphi_L + I_P \sin \varphi_P)^2)}{60}} \quad (1)$$

gdzie:

I_L , I_P - wartości prądów obciążenia silnika odpowiednio lewego i prawego organu urabiającego (wyniki rejestracji), odczytywane co 1 s,

$\cos \varphi_L$, $\cos \varphi_P$ - wartości współczynnika mocy prądów obciążenia, wyznaczone w sposób przybliżony na podstawie znajomości prądu obciążenia silnika.

Wyniki rejestracji nie obejmowały pomiaru prądu pobieranego przez silnik ciągnika kombajnu ani też całkowitego prądu przepływającego przez przewód oponowy zasilający kombajn. Powyższe ograniczenia spowodowały konieczność przyjęcia pewnych założeń, dzięki którym możliwa była analiza nagrzewania się przewodu zasilającego. W niniejszym referacie posłużono się zatem pojęciem względnego prądu obciążenia silnika k_{ws} , który zdefiniowano jako stosunek rzeczywistego prądu I_{os} pobieranego przez silnik do jego prądu znamionowego I_{ns} :

$$k_{ws} = \frac{I_{os}}{I_{ns}} \quad (2)$$

Podczas obliczania przebiegu nagrzewania się przewodu przyjęto, że prąd obciążenia tego przewodu I_{op} jest równy iloczynowi:

$$I_{op} = k_{ws} \cdot I_{dd} \quad (3)$$

Zgodnie z tym założeniem, prąd obciążenia silnika napędzającego ciągnik kombajnu jest proporcjonalny do prądu obciążenia silników organów urabiających, natomiast prąd znamionowy kombajnu ścianowego jest równy obciążalności prądowej przewodu zasilającego.

Powyższy sposób obliczania wartości prądu obciążenia przewodu umożliwia ponadto porównanie z wartościami rejestracji, które były wykonywane dla różnych kombajnów (z silnikami o różnych prądach znamionowych), zasilanych różnymi przewodami oponowymi. W obliczeniach przyjęto założenie, że przewodem zasilającym kombajn ścianowy jest przewód typu OnGcekHz-G $3 \times 70 + 25 + 3 \times 4$ mm² o obciążalności prądowej $I_{dd} = 288$ A.

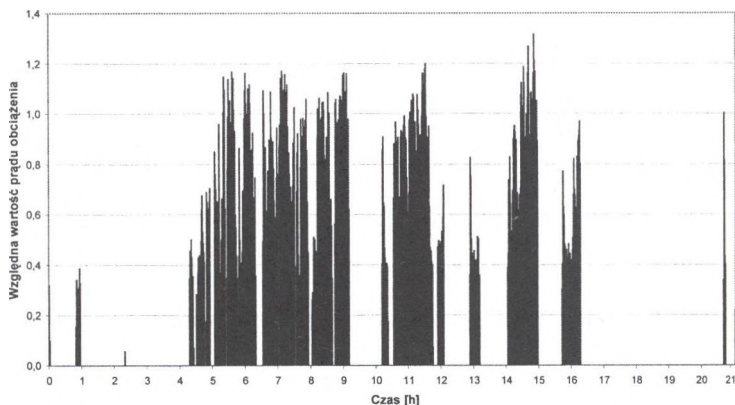
System MAKs nie umożliwiał rejestracji wartości prądów rozruchowych silników; rejestrowany był jedynie fakt wystąpienia rozruchu. Z tego powodu przyjęto założenie, że każdy rozruch trwa 3 sekundy, natomiast prąd rozruchowy jest równy sześciokrotnej wartości prądu znamionowego. Wartości te odpowiadają rozruchowi silnika obciążonego. W rzeczywistości warunki te są z reguły znacznie łagodniejsze; przeprowadzone bowiem obserwacje wykazują, że znaczna część rozruchów dokonywana jest w stanie bezobciążeniowym, jednakże wobec braku dokładnych danych liczbowych przyjęto założenie opisujące najbardziej niekorzystne warunki pracy.

3. Obliczeniowe przebiegi temperatury żył roboczych przewodów oponowych zasilających kombajny ścianowe

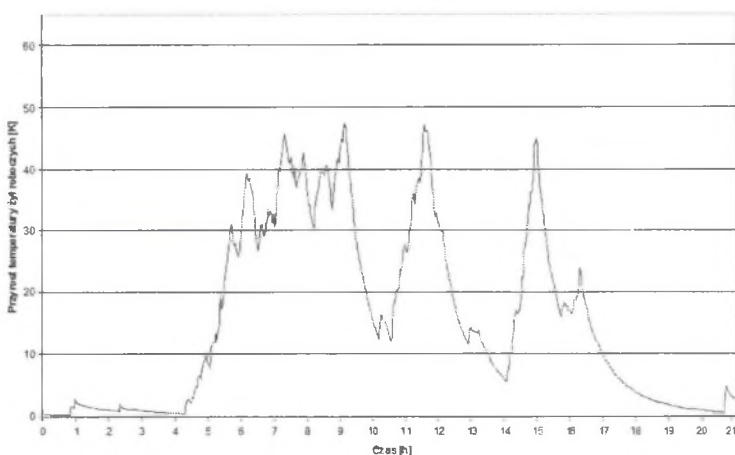
Jak wykazano w [4], analiza stanów nieustalonych nagrzewania się przewodów elektroenergetycznych może być przeprowadzona przy użyciu metody elementów skończonych. Metoda ta została wykorzystana do obliczenia przebiegów temperatury przewodów zasilających kombajny ścianowe przy założeniu ich obciążenia wynikającego z danych pochodzących z rejestracji pracy maszyn urabiających. Z uwagi na fakt, iż elementem najbardziej wrażliwym, a jednocześnie najbardziej narażonym na działanie podwyższonej temperatury podczas nagrzewania prądem elektrycznym, jest izolacja, szczególną uwagę zwrócono na temperaturę, jaką osiąga ten element konstrukcyjny (temperatura ta praktycznie równa jest temperaturze stykających się z izolacją żył roboczych).

Przykładowy przebieg zmian wartości prądu obciążenia w czasie pochodzący z rejestracji oraz odpowiadający mu przebieg temperatury żył roboczych, obliczony z wykorzystaniem

MES, przedstawiono na rysunku 1 i 2. Prąd obciążenia na wykresach wyrażono w postaci wartości względnych, obliczonych wg równania (2).



Rys. 1. Zarejestrowany przebieg prądu obciążenia przewodu zasilającego kombajn ścianyowy
Fig. 1. Registered run of load current of trailing cable supplying coal cutter



Rys. 2. Obliczeniowy przyrost temperatury żył roboczych odpowiadający obciążeniu wg rys. 1
Fig. 2. Calculated conductor temperature rise corresponding with load according to fig. 1

Analizę stopnia obciążenia przewodów oponowych zasilających kombajny ścianyowe wykonano w oparciu o dane pochodzące z jedenastu rejestracji przeprowadzonych w oddziałach wydobywczych różnych kopalń węgla kamiennego. Jak wynika z rys. 1, stosunkowo dużą część rejestracji stanowią okresy bezobciążeniowe, wynikające z postoju kombajnu. Postoje takie mogą być planowe (np. podczas zmian konserwacyjno-remontowych, w dniach wolnych od pracy czy też podczas wymiany załogi), których czas trwania wynika z przyjętej organizacji pracy w przodku, oraz nieplanowane, wynikające

z przyczyn w dużej mierze stochastycznych (awarie maszyn i urządzeń, przerwy w pracy odstawy, trudne warunki górniczo-geologiczne, przerwy w zasilaniu itp.).

W tablicach 1 i 2 przedstawiono dane umożliwiające odpowiednią analizę stopnia obciążenia przewodów oponowych zasilających kombajny ścianowe. W tablicy 1 zestawiono częstość (wyrażoną w procentach) występowania prądów obciążenia o wartościach z poszczególnych przedziałów. W tablicy tej (z wyjątkiem ostatniej kolumny) wzięto pod uwagę tylko te okresy, w których prąd przyjmował wartości niezerowe, odpowiadające załączonemu kombajnowi. Przykładowe histogramy prądów obciążenia, również uwzględniające tylko okresy załączenia kombajnu, ilustrują rys. 3÷5. Tablica 2 zawiera natomiast względny czas (wyrażony w procentach) utrzymywania się przyrostu temperatury żył roboczych przewodu w poszczególnych przedziałach. Przykładowe histogramy przyrostów temperatury żył roboczych przewodu w poszczególnych przedziałach przedstawiono na rys. 6÷8.

Tablica 1

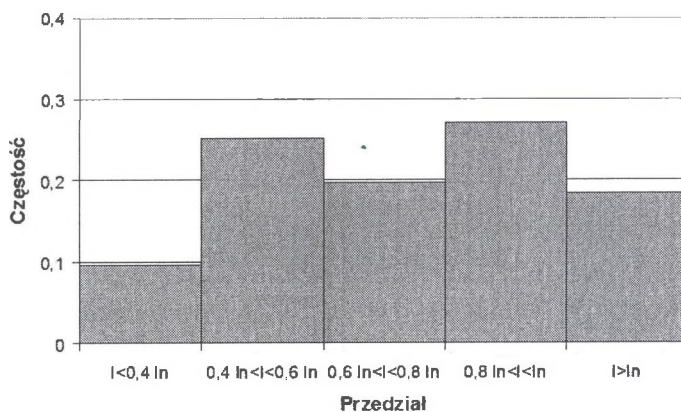
Rozkład prądów obciążenia przewodów oponowych zasilających kombajny ścianowe (wartości w tablicy obejmują tylko okresy, w których kombajn był załączony)

Czas trwania rejestracji	Procentowy udział prądów o wartościach					Średnia wartość prądu obciąż. (krotn. I_n)	Czas trwania obciążenia w stosunku do całości rejestracji [%]
	$\geq I_n$	$(0,8 \div 1)I_n$	$(0,6 \div 0,8)I_n$	$(0,4 \div 0,6)I_n$	$< 0,4I_n$		
21 h 11 min	18,5	27,0	19,7	25,1	9,7	0,73	36,7
22 h 23 min	1,6	16,5	38,1	31,3	12,5	0,62	50,0
21 h 40 min	0,0	22,8	39,1	30,5	7,7	0,66	46,0
26 h 57 min	1,0	29,9	30,5	29,4	9,1	0,66	37,3
20 h 45 min	0,4	16,3	36,5	33,3	13,5	0,60	59,6
25 h 45 min	0,0	2,5	9,8	38,6	49,1	0,43	43,7
25 h 33 min	0,0	2,4	9,5	38,0	50,0	0,42	44,8
49 h 45 min	0,0	4,0	35,3	40,7	19,9	0,54	20,4
24 h 25 min	2,3	6,1	14,0	45,9	31,7	0,50	56,9
21 h 45 min	5,0	18,2	23,7	28,7	24,3	0,59	36,6
36 h 0 min	2,6	6,7	13,2	31,3	46,2	0,47	32,5
Średnia	2,5	12,4	24,6	34,6	25,9	0,56	39,7

Tablica 2

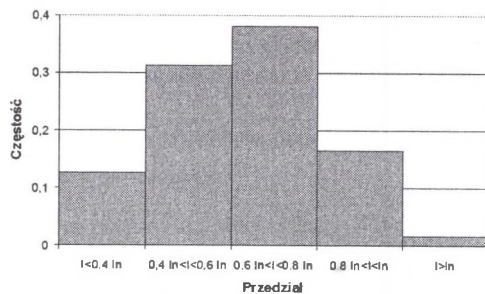
Rozkłady przyrostu temperatury żył roboczych przewodów oponowych zasilających kombajny ścianowe dla poszczególnych rejestracji

Lp.	Δv_{max} [K]	Względny czas (w %) utrzymywania się przyrostu temperatury o wartości				
		≥ 40 K	(30÷40) K	(20÷30) K	(10÷20) K	≤ 10 K
1	47,6	6,5	16,3	11,2	18,7	47,3
2	37,4	0,0	3,1	39,4	16,0	41,5
3	31,3	0,0	0,6	44,0	26,9	28,6
4	40,2	0,4	7,3	20,9	24,7	46,8
5	33,5	0,0	3,3	31,7	54,7	10,3
6	25,0	0,0	0,0	4,0	41,2	54,8
7	24,9	0,0	0,0	3,9	40,9	55,2
8	28,2	0,0	0,0	5,1	19,5	75,4
9	28,2	0,0	0,0	9,6	51,1	39,4
10	33,4	0,0	0,4	10,3	45,0	44,3
11	29,8	0,0	0,0	7,2	20,8	72,0
Średnia	32,7	0,5	2,4	15,0	30,9	51,2



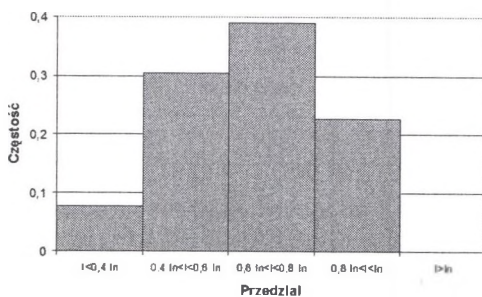
Rys. 3. Histogram prądów obciążenia (rejestracja 1)

Fig. 3. The histogram of load current (registration 1)



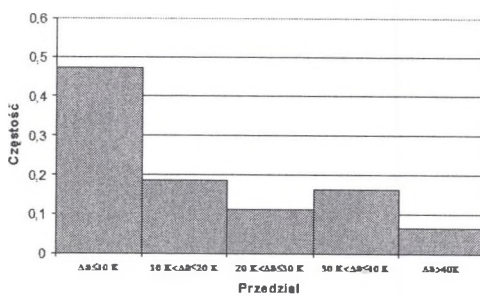
Rys. 4. Histogram prądów obciążenia (rejestracja 2)

Fig. 4. The histogram of load current (registration 2)



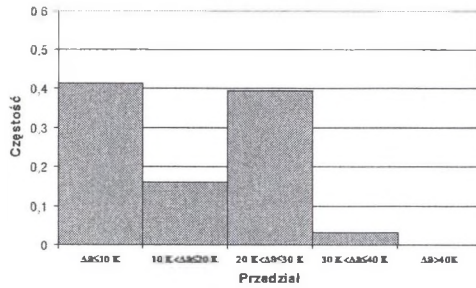
Rys. 5. Histogram prądów obciążenia (rejestracja 3)

Fig. 5. The histogram of load current (registration 3)



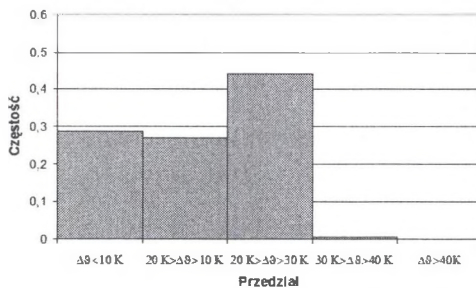
Rys. 6. Histogram przyrostu temperatury żył roboczych (rejestracja 1)

Fig. 6. The histogram of conductor temperature rise (registration 1)



Rys. 7. Histogram przyrostu temperatury żył roboczych (rejestracja 2)

Fig. 7. The histogram of conductor temperature rise (registration 2)



Rys. 8. Histogram przyrostu temperatury żył roboczych (rejestracja 3)

Fig. 8. The histogram of conductor temperature rise (registration 3)

Wartości średnie w tablicach 1 i 2, zaznaczone drukiem wytłuszczonym, obliczono jako średnie ważone z uwzględnieniem czasu trwania poszczególnych rejestracji, zgodnie z zależnością:

$$p_1 t_1 + p_2 t_2 + \dots + p_i t_i + \dots = p_{sr} t_{tot} \quad (4)$$

gdzie:

p_i – względny (procentowy) czas utrzymywania się prądu obciążenia (tablica 1) lub temperatury (tablica 2) o wartości z danego przedziału dla i -tej rejestracji,

t_i – całkowity czas trwania (tablica 2) lub czas trwania okresów obciążenia (tablica 1) i -tej rejestracji,

p_{sr} – średni względny (procentowy) czas utrzymywania się prądu obciążenia lub temperatury o wartości z danego przedziału,

t_{tot} – sumaryczny czas trwania wszystkich rejestracji (tablica 2) lub okresów obciążenia (tablica 1).

Na podstawie analizy danych obliczeniowych przedstawionych w tablicy 1 (oraz na rys. 3÷5) można sformułować wniosek, że prąd pobierany przez silniki napędzające organy

urabiające stosunkowo rzadko przekracza wartość znamionową. Częściowo wynika to z działania układu regulacji prędkości posuwu, który powoduje zmniejszenie prędkości kombajnu po przekroczeniu przez prąd obciążenia ustalonej wartości progowej. Drugim czynnikiem tłumaczącym ten fakt jest to, że zazwyczaj jeden z silników, zasilający organ wyprzedzający, jest bardziej obciążony, natomiast silnik organu urabiającego pozostałą warstwę węgla jest w dużej mierze niedociążony [8]. Praktycznie tylko podczas jednej rejestracji zanotowano znaczącą liczbę przypadków przekroczenia prądu znamionowego, w rejestracjach pozostałych przekroczenia były sporadyczne lub w ogóle nie występowały. W większości przypadków (prawie 60% okresu obciążenia) prąd nie przekraczał 60% prądu znamionowego. Średnia wartość prądu pobieranego przez silniki kombajnu podczas jego pracy wahała się od 42% do 73% prądu znamionowego. Jak wynika z powyższych danych, silniki organów urabiających kombajnu ścianowego są podczas pracy z reguły niedociążone.

Kolejnym bardzo istotnym czynnikiem decydującym o obciążeniu przewodów oponowych zasilających kombajny jest liczba i rozkład okresów bezprądowych, odpowiadających postojowi kombajnu. Tylko w dwóch spośród jedenastu przypadków rejestracji sumaryczny okres pracy kombajnu przekroczył 50% całkowitego czasu rejestracji, co oznacza, że kombajn przez większą część czasu nie pracuje (względny czas postoju w rejestracji nr 8 osiągnął prawie 80%). Tak niewielki stopień wykorzystania czasu dyspozycyjnego kombajnu w połączeniu z jego niedociążeniem w okresie pracy powoduje, że przyrost temperatury żył roboczych przewodu oponowego zasilającego kombajn jest daleki od dopuszczalnego.

W kolumnie 2 tablicy 2 zestawiono maksymalne przyrosty temperatury Δt_{max}^{θ} przewodu zasilającego. Jak wynika z analizy tych danych, tylko w dwóch przypadkach maksymalny przyrost temperatury przekroczył 40 K (przy dopuszczalnej wartości 65 K), natomiast przez zdecydowaną większość czasu (średnio ponad 97%) przyrost temperatury nie przekraczał 30 K.

4. Zakończenie

Z przeprowadzonej analizy zarejestrowanych wyników pomiaru wynika jednoznacznie, że istnieje możliwość istotnego zwiększenia obciążalności przewodów oponowych zasilających kombajny ścianowe w praktyce. Wniosek taki potwierdza między innymi zapis w normie brytyjskiej [3], w której dla przewodów oponowych zasilających kombajny

ścianowe i maszyny „o podobnym charakterze pracy” określona jest skorygowana obciążalność I_{dp} uwzględniająca rzeczywisty charakter obciążenia. Stopień zwiększenia obciążalności prądowej przewodów zależy będzie, od pola przekroju znamionowego żył roboczych – dla przewodów o większym przekroju istnieje możliwość zwiększenia obciążalności w większym stopniu, co wynika z większej bezwładności cieplnej. Oczywiście, może dojść do sytuacji, w której obciążenie przewodu oponowego będzie większe niż przewidywane, co może spowodować przekroczenie temperatury dopuszczalnej długotrwale dla izolacji (choć w świetle wyników rejestracji sytuacja taka wydaje się mało prawdopodobna). Należy jednak zaznaczyć, że krótkotrwale, niewielkie przekroczenie temperatury dopuszczalnej długotrwale nie powoduje praktycznie żadnych negatywnych, nieodwracalnych zmian właściwości izolacji [6,9]. Dotyczy to w szczególności izolacji wykonanej z gumy etylenowo-propylenowej. Jak wykazują bowiem badania laboratoryjne [6], krótkotrwały wzrost temperatury nawet do 140°C nie powoduje trwałego pogorszenia własności izolacji wykonanej z tego materiału. Duże znaczenie ma też fakt, że żywotność przewodów oponowych ograniczona jest przede wszystkim przez uszkodzenia mechaniczne [5,9]. Może to stanowić dodatkowy argument za zwiększeniem obciążalności przewodu, gdyż przewody oponowe zasilające maszyny urabiające praktycznie nigdy nie pozostają w użyciu na tyle długo, aby o ich wycofaniu z eksploatacji decydowało starzenie cieplne. Zmiana kryterium doboru przewodów oponowych do obciążeń prądem elektrycznym daje możliwość zastosowania przewodów oponowych o mniejszym przekroju żył roboczych, co wiąże się z wymiernymi istotnymi efektami ekonomicznymi. Przykładowo, zmniejszenie pola przekroju żył roboczych z 95 do 70 mm², w przypadku typowych przewodów kombajnowych, oznacza oszczędność ok. 70 000 zł na jeden kilometr długości przewodu.

O realności przedstawionej w referacie propozycji zwiększenia obciążalności górniczych przewodów oponowych o izolacji z gumy etylenowo-propylenowej zasilających kombajny ścianowe świadczą również podobne propozycje będące przedmiotem analiz i badań w Stanach Zjednoczonych [9,10].

BIBLIOGRAFIA

1. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. (DzU Nr 139 poz. 1169) w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych.

2. PN-G-42060:1997. Elektroenergetyka kopalniana. Obciążalność przewodów oponowych i kabli stosowanych w podziemnych wyrobiskach zakładów górniczych.
3. Flexible trailing cables for use with coalcutters and similar face equipment. British Coal Specification 188/1978.
4. Boron S.: Model matematyczny procesów cieplnych zachodzących w górniczych kablach i przewodach oponowych i jego zastosowanie do analizy obciążalności prądowej. Rozprawa doktorska (niepublikowana), Gliwice 1999.
5. Boron W. i inni: Badania nad możliwością zwiększenia obciążalności prądowej górniczych kabli i przewodów oponowych. Projekt badawczy nr 9 9030 91 02. Katowice 1992 (niepublikowana).
6. Cinquemani P. L., Kuchta F. L., Rahman M. M., Rufinazzi F., Zaopo A.: 105 °C/140 °C Rated EPR Insulated Power Cables. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, No. 1, January 1996.
7. Jaszczuk M., Siwiec J., Sobczyk J.: Możliwość rejestracji parametrów pracy kombajnów ścianowych wyposażonych w układ sterowania MAKS-245. Materiały Międzynarodowej Konferencji Automatyzacji Górnictwa ICAMC'95, Gliwice 1995.
8. Jaszczuk M.: Przyczynę do zmiany algorytmu automatycznego sterowania prędkością posuwu kombajnu ścianowego. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, nr 6-7/96, Katowice.
9. Yenchek M. R., Kovalchik P. G.: Mechanical Performance of Thermally Aged Trailing-Cable Insulation. IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 25, no. 6, 1989.
10. Yenchek M. R., Kovalchik P. G.: Thermal Characteristics of Energized Shielded Drag and an Unshielded Reeled Trailing Cable. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 27, No. 4, July/August 1991.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Bogdan Miedziński