

2

OBCIĄŻALNOŚĆ GÓRNICZYCH PRZEWODÓW OPONOWYCH PRZY PRACY PRZERYWANEJ I DORYWCZEJ

2.1 WSTĘP

Aktualna norma [3] dotycząca obciążalności prądowej górniczych kabli i przewodów oponowych zawiera zasady doboru dotyczące obciążalności długotrwałej i chwilowej (przy zwarcu). Norma [2] dotycząca parametrów znamionowych silników wyróżnia, poza obciążeniem długotrwałym, inne rodzaje obciążenia silników elektrycznych. Obciążenie może być opisane liczbowo (moc obciążenia zmienia się w czasie w znany sposób), graficznie lub przez wybranie jednego z predefiniowanych rodzajów obciążenia S1 do S10 (rzeczywiste obciążenie nie powinno powodować większych skutków cieplnych niż wybrane). Obciążenie S1 odpowiada pracy ciągłej przy stałym obciążeniu, obciążenie S2 – pracy dorywczej, S3 do S5 – pracy przerywanej, natomiast S6 do S10 pracy ciągłej przy zmiennym obciążeniu. Producent silnika powinien określić znamionową moc obciążenia dla danego rodzaju pracy, a jeżeli rodzaj pracy nie jest podany, to moc odnosi się do obciążenia S1. Jeżeli dodatkowe elementy wyposażenia są częścią maszyny, parametry znamionowe odnoszą się również do tych elementów. Takimi elementami maszyn mogą być odcinki przewodów, oczywiste jest, że również przewody i kable zasilające maszynę obciążone są w podobny sposób jak silnik maszyny. Nieuwzględnienie przy doborze przekroju znamionowego żył roboczych kabli i przewodów innego rodzaju obciążenia niż S1 może prowadzić do:

- nieuzasadnionego zawyżenia przekroju, a co za tym idzie, zwiększenia kosztów instalacji, jeżeli rzeczywiste obciążenie wywołuje mniejsze przyrosty temperatury niż praca ciągła,
- nadmiernych przyrostów temperatury, jeżeli rzeczywiste obciążenie wywołuje większe obciążenie cieplne niż praca ciągła (może to być wynikiem częstych i ciężkich rozruchów i hamowania elektrycznego, np. rodzaj pracy S4 lub S5).

W praktyce, w wielu przypadkach, szczególnie w odniesieniu do maszyn pracujących w kompleksach ścianowych (np. kombajny i przenośniki ścianowe), rzeczywisty charakter obciążenia jest zbliżony do przerywanego, ale z uwagi na

losowy charakter zmian obciążenia przyporządkowanie jednego ze znormalizowanych rodzajów pracy jest dla tego typu maszyn w zasadzie niemożliwe. W odniesieniu do innych maszyn (przykładem mogą być pompy pracujące cyklicznie) możliwe jest określenie z zadowalającą dokładnością jednego z predefiniowanych w normie [3] rodzajów pracy. W niniejszym artykule przedstawiono analizę procesów nagrzewania i stygnięcia przewodów przy pracy dorywczej. Przedstawioną metodykę obliczeń i analiz można zastosować również do innych rodzajów obciążenia.

2.2 WYZNACZANIE OBCIĄŻALNOŚCI PRĄDOWEJ

Wartości obciążalności prądowej długotrwałej dla poszczególnych grup górniczych kabli i przewodów oponowych podane są w normie [2], jednakże ze względu na to, że kable podobnych typów produkowane przez różnych producentów mogą się nieco różnić konstrukcją, obciążalność podawana przez producenta może nieco się różnić od określonej w normie. Różnice te nie przekraczają 2-3% i powodowane są różną średnicą żył roboczych lub grubością poszczególnych elementów konstrukcyjnych. Wartości obciążalności mogą być wyznaczane w sposób doświadczalny lub obliczeniowo. Doświadczalne wyznaczanie obciążalności jest niepraktyczne i wymaga długotrwałych pomiarów, które należy wykonać dla wszystkich przekrojów znamionowych każdego typu kabla i przewodu. Wśród metod obliczeniowych najstarszą i do chwili obecnej najbardziej rozpowszechnioną metodą obliczania obciążalności prądowej przewodów elektrycznych jest metoda podana przez Nehera i McGratha w 1957r. [4]. Metoda ta oparta jest na tzw. cieplnym prawie Ohma; wymaga stosowania wielu założeń upraszczających i współczynników geometrii wyznaczonych w sposób przybliżony lub empiryczny. Jej stosowanie w przypadku nietypowych konstrukcji przewodów lub niekonwencjonalnego sposobu ich ułożenia, może prowadzić do niedokładnych wyników [1]. W przypadku wyznaczania obciążalności z uwzględnieniem innego niż ciągły charakter obciążenia (praca przerywana, dorywcza), konieczne jest przyjęcie dalszych założeń upraszczających (np. dotyczących niezmienności cieplnej stałej czasowej). Znacznie bardziej efektywne dla takich przypadków są metody numeryczne.

2.3 OPIS METODY OBLICZENIOWEJ

Przepływ ciepła wewnątrz obciążonych prądem elektrycznym przewodów elektroenergetycznych odbywa się poprzez przewodzenie, które polega na przekazywaniu energii przez bezpośrednio zderzające się cząsteczki i atomy lub dyfuzję swobodnych elektronów. Dla przewodów zawieszonych w powietrzu, ułożonych w tunelach i przepustach, wymiana ciepła z otoczeniem może odbywać się poprzez promieniowanie cieplne (emisję fal elektromagnetycznych w tym zakresie długości fal, w którym występują istotne efekty przekazywania energii) i konwekcję (przenoszenie energii przez przepływ i mieszanie się strug powietrza

o różnej temperaturze, czemu w niewielkim zakresie towarzyszy również przewodzenie ciepła). W przypadku kabli ułożonych w ziemi wymiana ciepła z otoczeniem odbywa się praktycznie wyłącznie przez przewodzenie.

Ruch ciepła poprzez przewodzenie opisany jest równaniem Fouriera, zgodnie z którym natężenie strumienia cieplnego q jest proporcjonalne do gradientu temperatury ϑ :

$$q = -\lambda \text{ grad } \vartheta \quad (2.1)$$

gdzie:

λ – współczynnik przewodzenia ciepła.

Ilość ciepła Q_1 przypadającego na jednostkę czasu, odpływającego w chwili t na zewnątrz obszaru Ω przez powierzchnię S ograniczającą ten obszar oraz Q_2 zużytego na powiększenie energii wewnętrznej ciała określone są zależnościami:

$$\frac{dQ_1}{dt} = -\iint_S \lambda \text{ grad } \vartheta dS \quad (2.2)$$

$$\frac{dQ_2}{dt} = \iiint_{\Omega} c \sigma \frac{\partial \vartheta}{\partial t} dV \quad (2.3)$$

gdzie:

c – pojemność cieplna właściwa, J/(kg·K),

σ – gęstość masy ciała, kg/m³.

Po zastosowaniu do równania (2.2) twierdzenia Gaussa-Ostrogradskiego otrzymuje ono postać:

$$\frac{dQ_1}{dt} = -\iint_S \lambda \text{ grad } \vartheta dS = \iiint_{\Omega} -\text{div}(\lambda \text{ grad } \vartheta) dV \quad (2.4)$$

Wydajność źródeł ciepła znajdujących się wewnątrz rozpatrywanego obszaru (w przypadku kabli i przewodów są to żyły robocze) można określić wzorem:

$$\frac{dQ_3}{dt} = \iiint_{\Omega} q_V dV \quad (2.5)$$

gdzie:

q_V – wydajność objętościowa źródeł ciepła [W/m³]

Bilans powyższych mocy w każdej chwili t spełnia zależność:

$$\frac{dQ_1}{dt} + \frac{dQ_2}{dt} = \frac{dQ_3}{dt} \quad (2.6)$$

czyli:

$$\iiint_{\Omega} \left[-\text{div}(\lambda \text{ grad } \vartheta) + c \sigma \frac{\partial \vartheta}{\partial t} \right] dV = \iiint_{\Omega} q_V dV \quad (2.7)$$

Z równości całek wynika równość wyrażeń podcałkowych (przy założeniu ich ciągłości), wobec czego otrzymujemy równanie typu parabolicznego:

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} \vartheta) - c \sigma \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = -q_v \quad (2.8)$$

W ogólnym przypadku, przewodność cieplna λ oraz pojemność cieplna właściwa c mogą być zależne od temperatury, przewodność λ może też zależeć od kierunku przepływu ciepła (ciała anizotropowe). W zakresie rozpatrywanych w niniejszej pracy temperatur oraz dla materiałów używanych do konstrukcji przewodów można założyć jednorodność i izotropowość obszaru oraz niezmienność w czasie przewodności cieplnej λ oraz pojemności cieplnej właściwej c . Równanie (2.8) można zapisać w postaci:

$$\nabla^2 \vartheta - \frac{\sigma c}{\lambda} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = -\frac{q_v}{\lambda} \quad (2.9)$$

Powyższe równanie zwane jest też równaniem Fouriera-Kirchhoffa.

Poszukiwanie pola temperatury sprowadza się do znalezienia rozwiązania równania (2.9), przy czym należy uprzednio sformułować warunki graniczne, na które składają się warunki początkowe i brzegowe.

Otrzymanie dokładnego (analitycznego) rozwiązania równania różniczkowego opisującego pole temperatury (2.9) jest możliwe tylko w szczególnych przypadkach, dotyczących uproszczonych modeli o regularnych kształtach (np. w przewodach nieizolowanych). Elektroenergetyczne kable i przewody izolowane cechują się skomplikowanym kształtem geometrycznym z wewnętrznymi źródłami ciepła oraz ze zmieniającymi się warunkami brzegowymi. Dodatkowo pojawiająca się w wielu zagadnieniach nieliniowość powoduje, że dokładność obliczeń jaką zapewniają modele uproszczone często okazuje się niewystarczająca. W takich przypadkach rozwiązanie problemu może być uzyskane jedynie drogą obliczeń numerycznych. Spośród metod numerycznych stosowanych do rozwiązywania tych zagadnień należy wymienić:

- metodę bilansów elementarnych, będącą wariantem metody różnic skończonych,
- metodę elementów brzegowych (MEB),
- metodę elementów skończonych (MES).

Cechą wspólną wymienionych metod jest konieczność dokonania dyskretyzacji rozpatrywanego obszaru, a w przypadku przebiegów nieustalonych również czasu. Obliczenia, których wyniki przedstawiono w artykule, przeprowadzone zostały przeprowadzone z wykorzystaniem MES.

Istota MES polega na możliwości aproksymowania każdej ciągłej wielkości fizycznej (w tym przypadku temperatury) przez dyskretny model zbudowany z tzw. funkcji próbnej. Sposób tworzenia dyskretnego modelu polega na określeniu skończonej liczby punktów węzłowych w rozpatrywanym obszarze dzielących obszar na skończoną liczbę podobszarów (elementów) możliwie dokładnie odzwierciedlających kształt obszaru. W metodzie obliczane są wartości temperatury w węzłach, a w obrębie każdego elementu szukana temperatura jest

aproxymowana pewnym wielomianem, przy czym wielomiany powinny zapewniać ciągłość temperatury na brzegach elementów.

Ogólna postać wielomianu interpolacyjnego może być zapisana jako:

$$g = \sum_{e=1}^{NE} g^{(e)} \quad (2.10)$$

gdzie:

NE – liczba elementów w rozpatrywanym obszarze,

$g^{(e)}$ – rozkład temperatury wewnątrz e -tego elementu.

Poszukiwany rozkład temperatury $g^{(e)}$ w jednym elemencie jest kombinacją liniową tzw. funkcji kształtu oraz temperatur węzłowych:

$$g(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{NP} N_i(\mathbf{x})g_i \quad (2.11)$$

gdzie

$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_M]$ – wektor zawierający współrzędne przestrzenne i czasowe punktu;

M – wymiar zagadnienia,

NP – liczba punktów węzłowych w elemencie,

g_i – wartość poszukiwanej funkcji w węźle i ,

$N_i(x)$ – funkcja kształtu dla i -tego węzła, przyjmuje ona wartości niezerowe tylko w tych elementach, do których należy węzeł i .

Wartości funkcji g_i w punktach węzłowych wyznacza się z odpowiednio opracowanego układu równań. Równania te opracowuje się na podstawie całkowego opisu zagadnienia [1].

2.4 OBLICZENIA OBCIĄŻALNOŚCI PRĄDOWEJ PRZEWODÓW PRZY PRACY DORYWCZEJ

Przez analogię do definicji podanej w normie [3], praca dorywcza kabla (przewodu) może być zdefiniowana jako praca z niezmiennym się obciążeniem trwającym przez określony czas, krótszy niż czas potrzebny do osiągnięcia temperatury ustalonej, po czym następuje okres postoju trwający dostatecznie długo, aby temperatura kabla nie różniła się więcej niż o określoną wartość od temperatury otoczenia. Temperaturę otoczenia przyjęto równą 25°C.

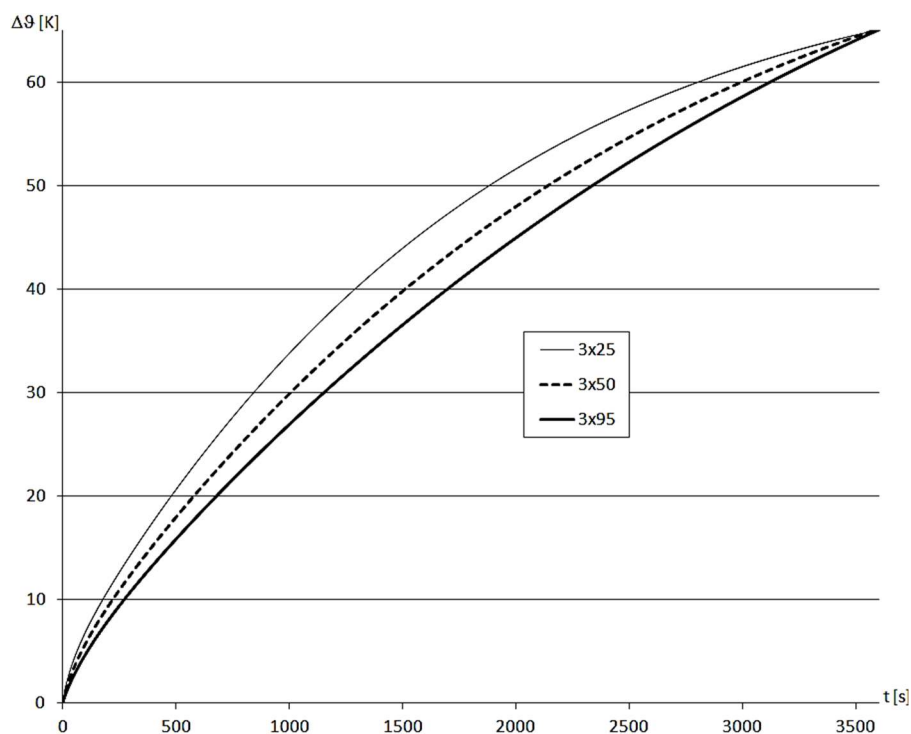
W celu określenia możliwości zwiększenia obciążalności przewodów zasilających silniki pracujące przy obciążeniu dorywczym, przeprowadzono obliczenia nagrzewania i stygnięcia górniczych przewodów elektroenergetycznych. Obliczenia przeprowadzono dla przewodów oponowych typu OnGceKz-G na napięcie znamionowe 0,6/1 kV dla przekrojów znamionowych żył roboczych od 25 do 95 mm² (zastosowana metodyka obliczeń może być wykorzystana również dla innych typów przewodów i kabli). W tabeli 2.1 przedstawiono obliczeniowe wartości obciążalności prądowej dorywczej dla pracy S2 60 min, S2 30 min i S2 15 min (dla porównania podano wartości obciążalności prądowej długotrwałej).

Podano również wartości względne (w procentach), odniesione do obciążalności prądowej długotrwałej.

Na rys. 2.1 przedstawiono przebieg przyrostu temperatury w funkcji czasu dla przewodów o przekroju żyły roboczej 25, 50 i 95 mm². Przedstawione przebiegi dotyczą temperatury izolacji w najgorętszym miejscu, w praktyce równej temperaturze żył roboczych. Przyjęto założenie, że w chwili $t = 0$ przewód posiada temperaturę równą temperaturze otoczenia 25°C.

Tabela 2.1 Obliczeniowe wartości obciążalności prądowej długotrwałej i dorywczej przewodów typu OnGcekż-G.

Przekrój znamionowy żyły roboczej, mm ²	S1 (praca ciągła)		S2 60 min		S2 30 min		S2 15 min	
	A	%	A	%	A	%	A	%
25	152	100	161	106	183	120	224	147
35	187	100	202	108	236	126	292	156
50	233	100	258	111	306	131	382	164
70	288	100	330	115	398	138	502	174
95	345	100	410	119	502	146	637	185



Rys. 2.1 Przebieg przyrostu temperatury żył roboczych przewodu w czasie nagrzewania prądem równym obciążalności dla rodzaju pracy S2 60 min

Należy zaznaczyć, że przebieg temperatury przy nagrzewaniu odbiega nieco od eksponencjalnego [1] ze względu na nieliniowość zagadnienia – współczynnik oddawania ciepła do otoczenia w rzeczywistych układach zależy od temperatury powierzchni oddającej ciepło. Z tego względu formalnie nie można

mówić o wartości cieplnej stałej czasowej, widoczny jest jednak wolniejszy przyrost temperatury przewodów o większym przekroju żył roboczych.

Utrzymywanie się obciążenia przez czas dłuższy, niż wynikający z założonego czasu pracy, spowoduje przekroczenie temperatury dopuszczalnej długotrwale. Niewielkie i krótkie przekroczenia temperatury dopuszczalnej długotrwale nie mają istotnego znaczenia, jednakże przekroczenia znacznie większe i utrzymujące się przez dłuższy czas niekorzystnie wpływają na trwałość kabla. W tabeli 2.2 przedstawiono czas, po którym dopuszczalny przyrost temperatury zostanie przekroczony o odpowiednio 10, 20 i 30 K.

Tabela 2.2 Czas (w sekundach), po którym temperatura dopuszczalna długotrwale izolacji zostanie przekroczona o 10, 20 lub 30 K przy obciążeniu kabla przez czas dłuższy niż określony rodzajem pracy

Przekrój znamionowy żyły roboczej, mm ²	S2 60 min			S2 30 min			S2 15 min		
	10 K	20 K	30 K	10 K	20 K	30 K	10 K	20 K	30 K
25	-	-	-	610	1570	-	220	430	680
35	4160	-	-	520	1210	2280	200	400	630
50	2050	-	-	460	1020	1770	190	380	590
70	1550	5920	-	430	930	1520	180	370	560
95	1230	3300	-	390	790	1340	180	360	540

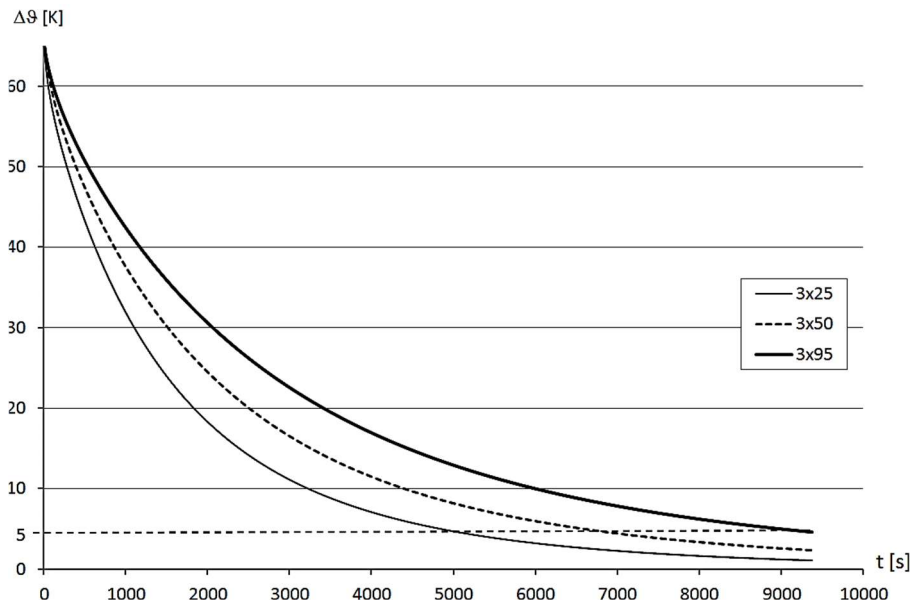
W normie [3], dotyczącej maszyn elektrycznych wirujących, minimalny okres postoju definiowany jest jako czas potrzebny do takiego ochłodzenia maszyny, aby temperatura maszyny i czynnika chłodzącego nie różniły się bardziej, niż o 2 K. Ze względu na fakt, że kable i przewody są chłodzone jedynie powietrzem w sposób niewymuszony przyjęto, że okres postoju powinien być na tyle długi, aby spowodować ochłodzenie kabla (przewodu) do temperatury nie wyższej niż o 5°K od temperatury otoczenia. W tabeli 2.3 przedstawiono obliczeniowe wartości czasu stygnięcia dla przewodów nagrzanych obciążeniem dopuszczalnym wynikającym z rodzaju pracy (prądem podanym w tabeli 2.1).

Tabela 2.3 Czas potrzebny do osiągnięcia przez izolację temperatury 30°C w procesie stygnięcia po nagrzaniu prądem dla różnych rodzajów pracy

Przekrój znamionowy żyły roboczej, mm ²	Czas stygnięcia (w sekundach) do temperatury 30°C dla przewodu nagranego obciążeniem dla rodzaju pracy	
	S2 60 min	S2 15 min
25	4870	2030
35	5720	2840
50	6610	3660
70	7710	4690
95	8970	5860

Wyniki obliczeń należy traktować jako orientacyjne, gdyż w rzeczywistości warunki chłodzenia mogą być inne niż przyjęte do obliczeń. Istotny wpływ na przebieg procesu chłodzenia może mieć temperatura otoczenia, ruch powietrza,

obecność innych kabli w pobliżu, sposób ułożenia itp. czynniki. Czasy podane w tabeli odnoszą się do temperatury żył roboczych, przebieg temperatury innych elementów przewodu jest inny z uwagi na bezwładność procesu przewodzenia ciepła.



Rys. 2.2 Przebieg przyrostu temperatury izolacji w czasie stygnięcia przewodów o różnym przekroju żył roboczych nagranych prądem obciążenia dla rodzaju pracy S2

Jak wynika z rezultatów obliczeń, czas stygnięcia przewodu o danym przekroju żył roboczych zależy od rodzaju pracy powodującej nagrzanie. Czas stygnięcia dla pracy S2 15 min jest znacząco krótszy niż dla pracy S2 60 min, co można wytłumaczyć faktem, że przy większym, ale krócej trwającym obciążeniu (S2 15 min), ciepło zakumulowane w przewodzie jest mniejsze, niż przy obciążeniu mniejszym, ale dłuższym (S2 60 min). Wynika to z tego, że w momencie ustania obciążenia temperatura zewnętrznych warstw przewodu jest silnie zależna od rodzaju pracy. Przykładowo, w przypadku przewodu o przekroju żył roboczych 95 mm², po zakończeniu cyklu pracy S2 15 min temperatura obliczeniowa najchłodniejszego punktu opony wynosi 36°C, natomiast po cyklu S2 60 min jest to 53°C.

2.5 PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych analiz i obliczeń można sformułować następujące wnioski i uwagi końcowe:

1. Obciążalność prądowa przewodów zależna jest od rodzaju pracy zasilanych maszyn, w przypadku obciążenia dorywczego obciążalność ta może być od kilku do kilkudziesięciu procent większa niż obciążalność długotrwała. Wartości te zależne są od czasu trwania obciążenia oraz przekroju znamionowego żył roboczych przewodu

2. Skutkiem zbyt długo trwającego obciążenia zwiększonym prądem (przekroczenie czasu określonego rodzajem pracy) jest przekroczenie temperatury dopuszczalnej długotrwale izolacji. Skutki te mogą być szczególnie niekorzystne dla przewodów o mniejszym przekroju żył roboczych.
3. Czas stygnięcia przewodów do temperatury zbliżonej do temperatury otoczenia (osiągnięcie tej temperatury jest warunkiem uznania rodzaju pracy maszyny jako dorywczej) zależy od przekroju żył przewodu oraz od rodzaju pracy. Czas ten wynosi od ok. 2,5 h (dla przewodów o większym przekroju żył nagranych pracą S2 60 min) do nieco powyżej 30 min (dla przewodów o mniejszym przekroju dla rodzaju pracy S2 15 min).

Przedstawiona w artykule metodyka obliczeń może być wykorzystana do obliczeń kabli i przewodów oponowych o dowolnej budowie przy dowolnym rodzaju obciążenia.

LITERATURA

1. S. Boron. „Model matematyczny procesów cieplnych zachodzących w górniczych kablach i przewodach oponowych i jego zastosowanie do analizy obciążalności prądowej.” Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Wydział Górnictwa i Geologii, Gliwice, 1999.
2. „Elektroenergetyka kopalniana – Obciążalność przewodów oponowych i kabli stosowanych w podziemnych wyrobiskach zakładów górniczych.” PN-G-42060:1997.
3. „Maszyny elektryczne wirujące – Część 1: Dane znamionowe i parametry.” PN-EN 60034-1:2011.
4. J.H. Neher, M.H. McGrath. „The calculation of the temperature rise and load capability of cable systems.” *AIEE Transactions*, vol. 76, part 3, 1957.
5. J. Szargut. *Modelowanie numeryczne pól temperatury*. Warszawa: WNT, 1992.

Data przesłania artykułu do Redakcji: 10.2016

Data akceptacji artykułu przez Redakcję: 03.2017

dr inż. Sergiusz BORON

Politechnika Śląska

Wydział Górnictwa i Geologii

Katedra Elektryfikacji i Automatyzacji Górnictwa

ul. Akademicka 2A, 44-100 Gliwice, Polska

e-mail: sergiusz.boron@polsl.pl

OBCIĄŻALNOŚĆ GÓRNICZYCH PRZEWODÓW OPONOWYCH PRZY PRACY PRZERYWANEJ I DORYWCZEJ

Streszczenie: Podstawą doboru przekroju żył górniczych przewodów elektroenergetycznych jest obciążalność prądowa długotrwała, wynikająca z pracy ciągłej odbiorników. Norma dotycząca parametrów znamionowych silników wyróżnia, poza obciążeniem długotrwałym, inne rodzaje ich obciążenia, które mogą być opisane liczbowo, graficznie lub przez wybranie jednego z predefiniowanych rodzajów S1 do S10. W przypadku pracy przerywanej, dorywczej lub przy zmiennym obciążeniu silników, dobór przewodu zasilającego w oparciu o obciążalność długotrwałą, może prowadzić do nieuzasadnionego zawyżenia przekroju żył lub nadmiernego przyrostu ich temperatury. W artykule opisano metodykę wyznaczania obciążalności przewodów dla obciążeń innych niż długotrwałe. Przedstawiono wyniki przykładowych obliczeń obciążalności górniczych przewodów oponowych dla obciążenia dorywczego o różnym czasie trwania, a także czasu stygnięcia do temperatury zbliżonej do temperatury otoczenia.

Słowa kluczowe: obciążalność prądowa, elektroenergetyczne przewody górnicze, praca przerywana i dorywcza

CURRENT-CARRYING CAPACITY OF MINING FLEXIBLE CABLES AT INTERMITTENT AND SHORT-TIME DUTY

Abstract: The basis for a selection of conductors' cross section of mining power cables is the continuous current carrying capacity, resulting from continuous running duty of motors. Polish Standard for rated parameters of motors determines, besides the continuous running, other types of load that can be described numerically, graphically or by selecting one of the predefined types S1 to S10. In case of intermittent, short-time or variable load, the selection of the cable cross-section based on the continuous carrying capacity may lead to unjustified overestimation of cross section or excessive temperature rise of the cable insulation. The methodology for determining the intermittent or short-time current carrying capacity has been described in the article. Results of current carrying capacity calculations for intermittent load and of the time of cooling to an ambient temperature have been presented.

Key words: current carrying capacity, mining power cables, intermittent and short-time duty