

SERGIUSZ BORON

Wpływ charakteru obciążenia na obciążalność prądową górniczych przewodów oponowych

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

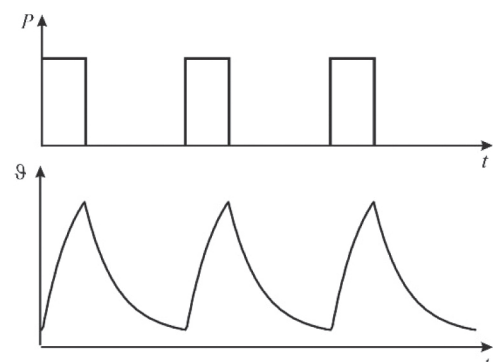
1. WPROWADZENIE

Aktualna norma [1] dotycząca obciążalności prądowej górniczych kabli i przewodów oponowych zawiera zasady doboru dotyczące obciążalności długotrwałej i chwilowej (przy zwarciu). 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. Pracę dorywczą cechuje niezmienną się obciążenie trwające przez określony czas, krótszy niż czas potrzebny do osiągnięcia temperatury ustalonej, po czym następuje okres postoju trwający dostatecznie długo, aby temperatura silnika nie różniła się więcej niż o określoną wartość od temperatury otoczenia (rys. 1). Praca przerywana jest definiowana jako sekwencja jednakowych cykli mogących (w zależności od rodzaju pracy) zawierać okresy obciążenia, postoju, rozruchu i hamowania.

Producent silnika powinien określić znamionową moc obciążenia dla danego rodzaju pracy, a jeżeli rodzaj pracy nie jest podany, to moc odnosi się do ob-

ciążenia 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 jej silnik. 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).



Rys. 1. Przebieg temperatury ϑ i obciążenia P dla pracy dorywczej (S2)

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 [2] 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. WYZNACZANIE OBCIĄŻALNOŚCI PRĄDOWEJ

Wartości obciążalności prądowej długotrwałej dla poszczególnych grup górniczych kabli i przewodów oponowych podane są w normie [1], 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 wyznaczone w sposób doświadczalny lub obliczeniowo. Doświadczalne wyznaczenie 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 oparta na tzw. cieplnym prawie Ohma. Wymaga ona stosowania wielu założeń upraszczających i współczynników geometrii wyznaczonych w sposób przybliżony lub empiryczny. W przypadku nietypowych konstrukcji przewodów lub niekonwencjonalnego sposobu ich ułożenia, jej stosowanie może prowadzić do niedokładnych wyników [3]. Przy wyznaczaniu obciążalności dla obciążenia przerywanego lub dorywczego, konieczne jest przyjęcie dalszych założeń upraszczających (np. do-

tyczących niezmienności cieplnej stałej czasowej). Dodatkowo pojawiająca się w wielu zagadnieniach nieliniowość powoduje, że dokładność obliczeń, jaką zapewniają modele uproszczone, często okazuje się niewystarczająca.

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

$$q = -\lambda \text{grad } \vartheta \quad (1)$$

gdzie λ – współczynnik przewodzenia ciepła.

Pole temperatury wewnątrz przewodu można opisać równaniem Fouriera–Kirchhoffa:

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

gdzie:

- c – pojemność cieplna właściwa [J/(kg·K)],
- σ – gęstość masy ciała [kg/m³],
- q_v – wydajność objętościowa źródeł ciepła [W/m³].

Poszukiwanie pola temperatury sprowadza się do rozwiązania równania (2), przy czym należy uprzednio sformułować warunki graniczne, na które składają się warunki początkowe i brzegowe.

Otrzymanie analitycznego rozwiązania równania różniczkowego opisującego pole temperatury (2) jest możliwe tylko w szczególnych przypadkach, dotyczących uproszczonych modeli o regularnych kształtach (np. w przewodach niez izolowanych). Dla przewodów izolowanych znacznie bardziej efektywne są metody numeryczne [4]. Obliczenia na potrzeby niniejszego artykułu zostały przeprowadzone z wykorzystaniem metody elementów skończonych (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 liczby punktów węzłowych w rozpatrywanym obszarze dzielących go na skończoną liczbę elementów i możliwie dokładnie odzwierciedlających jego kształt. W metodzie obliczane są wartości temperatury w węzłach, a w obrębie każdego elementu szukana temperatura jest aproksymowana pewnym wielomianem, przy czym wielomiany powinny zapewniać ciągłość temperatury na brzegach elementów.

3. OBLICZENIA OBciążALNOŚCI PRĄDOWEJ PRZEWODÓW PRZY PRACY DORYWCZEJ

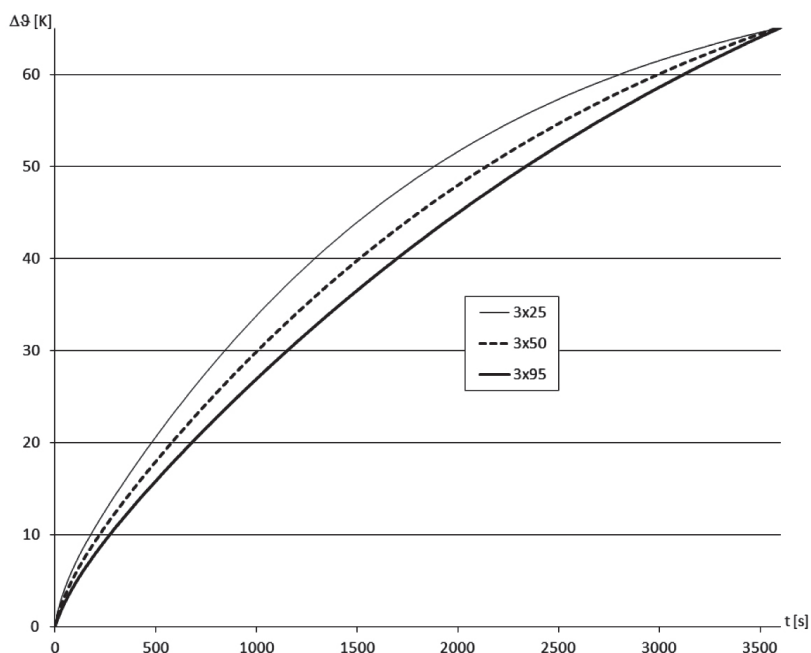
W celu określenia możliwości zwiększenia obciążalności przewodów zasilających silniki pracujące przy obciążeniu dorywczym przeprowadzono obliczenia nagrzewania i stygnięcia górniczych przewodów elektroenergetycznych. Obliczenia przeprowadzono dla przewodów oponowych typu OnGceKz-G na na-

pięcie znamionowe 0,6/1 kV o przekrojach znamionowych żył roboczych od 25 mm² do 95 mm² (zastosowana metodyka obliczeń może być wykorzystana również w przypadku innych typów przewodów i kabli). W tabeli 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.

Tabela 1

Obliczeniowe wartości obciążalności prądowej długotrwałej i dorywczej przewodów typu OnGceKz-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. Przebieg przyrostu temperatury żył roboczych przewodu w czasie nagrzewania prądem równym obciążalności dla rodzaju pracy S2 60 min

Na rysunku 2 przedstawiono przebieg przyrostu temperatury w funkcji czasu dla przewodów o przekroju żyły roboczej 25 mm², 50 mm² 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 ma temperaturę równą temperaturze otoczenia 25°C.

Należy zaznaczyć, że przebieg temperatury przy nagrzewaniu odbiega nieco od eksponencjalnego [3] ze względu na nieliniowość zagadnienia – współczynnik oddawania ciepła do otoczenia w rzeczywistych

układach zależny jest 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.

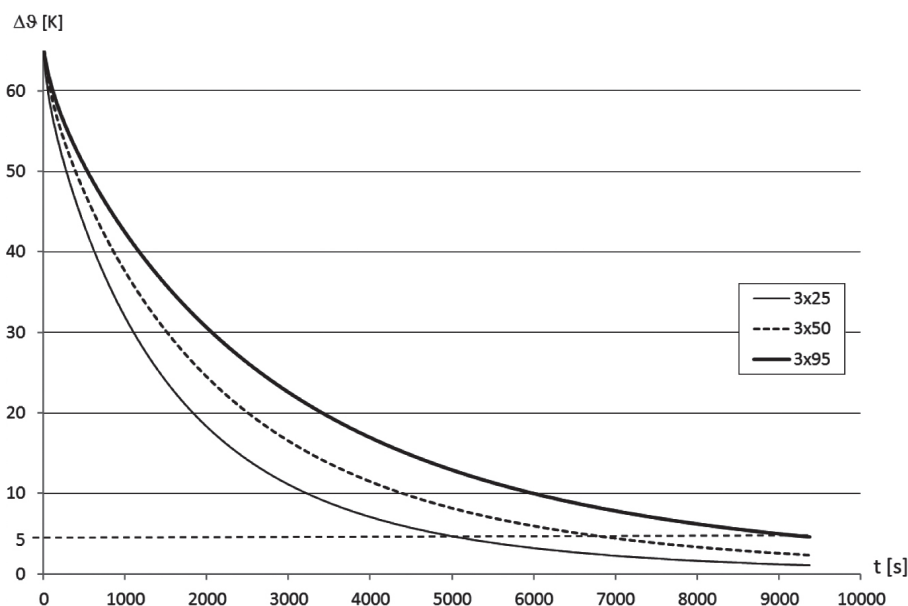
Utrzymywanie się obciążenia przez okres dłuższy niż wynikający z założonego czasu pracy spowoduje przekroczenie temperatury dopuszczalnej długotrwale. Niewielkie i krótkie przekroczenia temperatury dopuszczalnej długotrwale nie mają istotnego znaczenia, jednakże przekroczenia znacznie większe i utrzymujące się przez dłuższy czas niekorzystnie wpływają na trwałość kabla. W tabeli 2 przedstawiono czas, po którym dopuszczalny przyrost temperatury zostanie przekroczony o odpowiednio 10 K, 20 K i 30 K.

W normie [2] dotyczącej maszyn elektrycznych wirujących minimalny okres postoju definiowany jest jako czas potrzebny do takiego ochłodzenia maszyny, aby temperatura zarówno jej, jak i czynnika chłodzącego nie różniły się bardziej niż o 2 K. Ze względu na to, że kable i przewody są chłodzone jedynie powietrzem w sposób niewymuszony, w niniejszym artykule 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. Przebieg przyrostu temperatury izolacji w czasie stygnięcia dla przewodów o różnych przekrojach znamionowych żył roboczych przedstawiono na rysunku 3.

Tabela 2

Czas [s], po którym temperatura dopuszczalna długotrwale izolacji (90°C) zostanie przekroczona o 10 K, 20 K lub 30 K przy obciążeniu kabla przez okres 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



Rys. 3. Przebieg przyrostu temperatury izolacji w czasie stygnięcia przewodów o różnym przekroju żył roboczych nagrzanych prądem obciążenia dla rodzaju pracy S2 60 min

Tabela 3 zawiera obliczeniowe wartości czasu stygnięcia dla przewodów nagrzanych obciążeniem dopuszczalnym wynikającym z rodzaju pracy (prądem podanym w tab. 1). 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.

Tabela 3
Czas potrzebny do osiągnięcia
przez izolację temperatury 30°C
w procesie stygnięcia po nagrzaniu prądem
w przypadku różnych rodzajów pracy

Przekrój znamionowy żyły roboczej [mm ²]	Czas stygnięcia [s] do temperatury 30°C dla przewodu nagrzanego obciążeniem w przypadku rodzaju pracy:	
	S2 60 min	S2 15 min
25	4870	2030
35	5720	2840
50	6610	3660
70	7710	4690
95	8970	5860

Jak wynika z 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.

4. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

Na podstawie analiz i obliczeń przeprowadzonych w niniejszej pracy można wysnuć następujące wnioski:

- 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 długotrwałe 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 nagrzanych 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 obciążalności prądowej przewodów oponowych o dowolnej budowie przy dowolnym rodzaju obciążenia.

Literatura

- [1] PN-G-42060:1997: *Elektroenergetyka kopalniana – Obciążalność przewodów oponowych i kabli stosowanych w podziemnych wyrobiskach zakładów górniczych.*
- [2] PN-EN 60034-1:2011 *Maszyny elektryczne wirujące – Część 1: Dane znamionowe i parametry.*
- [3] Boron S.: *Model matematyczny procesów cieplnych zachodzących w górniczych kablach i przewodach oponowych i jego zastosowanie do analizy obciążalności prądowej*, Rozprawa doktorska, Gliwice 1999 [niepublikowana].
- [4] Szargut J. (red.): *Modelowanie numeryczne pól temperatury*, WNT, Warszawa 1992.

dr inż. **SERGIUSZ BORON**
Katedra Elektrotechniki i Automatyki Przemysłowej
Wydział Górnictwa i Geologii
Politechnika Śląska
ul. Akademicka 2A, 44-100 Gliwice
sergiusz.boron@polsl.pl