

silniki prądu stałego, choraągiewki, mocowanie choraągiewek

Tadeusz GLINKA*, Bronisław DRAK*

MOCOWANIE CHORAĄGIEWEK W SILNIKACH PRĄDU STAŁEGO DUŻEJ MOCY

Silniki prądu stałego dużej mocy pracują w układach napędowych maszyn wyciągowych w górnictwie i w układach napędowych walcarek w hutnictwie. Są to silniki wielobiegunowe o stosunkowo małej znamionowej prędkości obrotowej. Duża różnica w średnicach wirnika i komutatora powoduje, że choraągiewki łączące końcówki uzwojenia z działkami komutatora mogą mieć długość nawet około jednego metra. Choraągiewki te, w czasie pracy silnika są poddane działaniu sił elektrodynamicznych i sił bezwładności. Doświadczenie eksploatacyjne wykazuje, że choraągiewki są najbardziej awaryjnym węzłem silnika i często łamią się. Na przykładzie silnika walcowniczego, o średnicy wirnika $D = 4500$ mm, średnicy komutatora $D_k = 2280$ mm i liczby działek komutatora $K = 1050$, zilustrowano siły działające na choraągiewki oraz wpływ mocowania choraągiewek na ich trwałość.

1. WSTĘP – DEFINICJA PROBLEMU

Silniki prądu stałego dużej mocy pracują w układach napędowych maszyn wyciągowych w górnictwie i w układach napędowych walcarek w hutnictwie. Są to silniki wielobiegunowe o stosunkowo małej znamionowej prędkości obrotowej. Na przykład silnik wyciągowy typu P-4100, zainstalowany na jednej z kopalń węgla kamiennego, ma dane znamionowe: 1600 kW, 650 V, 2660 A, $2p = 24$, 45 obr/min. Silnik ten ma średnicę zewnętrzną wirnika $D = 4100$ mm, a średnicę zewnętrzną komutatora $D_k = 2500$ mm, liczbę żłobków $Z = 440$ i liczbę działek komutatora $K = 880$. Długość choraągiewek łączących końcówki uzwojenia z działkami komutatora $l_{ch} = 770$ mm. Silnik walcowniczy typu CDH 4500, firmy AEG, o danych znamionowych: $P_N/P_{max} = 2000/4000$ kW, $U_N = 515$ V, $n_N/n_{max} = 0-41/71$ ob/min. ma liczbę biegunów $2p = 20$, średnicę wirnika $D = 4500$ mm, średnicę komutatora $D_k = 2280$ mm, liczbę działek komutatora $K = 1050$. Choraągiewki w tym silniku mają długość około 1 m. Choraągiewki w czasie pracy silnika są poddane działaniu sił elektrodynamicznych i sił bez-

* Instytut Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Śląska, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, glinka.tadeusz@gmail.com, bronislaw.drak@polsl.pl

władności i muszą być mocowane mechanicznie aby nie ulegały zmęczeniowemu łamaniu.

2. RODZAJE MOCOWANIA CHORAĞIEWEK

Wpływ rodzaju mocowania chorągiewek na ich trwałość zostanie zilustrowany na przykładzie silnika walcowniczego typu CDH 4500, firmy AEG, o danych znamionowych:

moc znamionowa i maksymalna: $P_N/P_{\max} = 2000/4000$ kW,

prędkość obrotowa znamionowa i maksymalna $n_N/n_{\max} = 0-41/71$ obr./min.,

napięcie: $U_N = 515$ V,

prąd znamionowy i maksymalny $I_N/I_{\max} = 4240/9040$ A,

liczba biegunów $2p = 20$.

Średnica wirnika $D = 4500$ mm, średnica komutatora $D_k = 2280$ mm, liczba działek komutatora $K = 1050$. Chorągiewki mają długość około 1m. Silnik CDH 4500 został zainstalowany w latach 30-tych XX wieku do napędu walcarki pielgrzymowej rur bez szwów w jednej z hut. W wykonaniu fabrycznym chorągiewki były mocowane w połowie długości do podzwojnika, przy pomocy grzebienia drewnianego i między sobą były powiązane sznurem, a dystans między chorągiewkami był utrzymywany przy pomocy „guzików” izolacyjnych tworzących pierścień.

W roku 1980 silnik przeszedł remont generalny, w ramach którego:

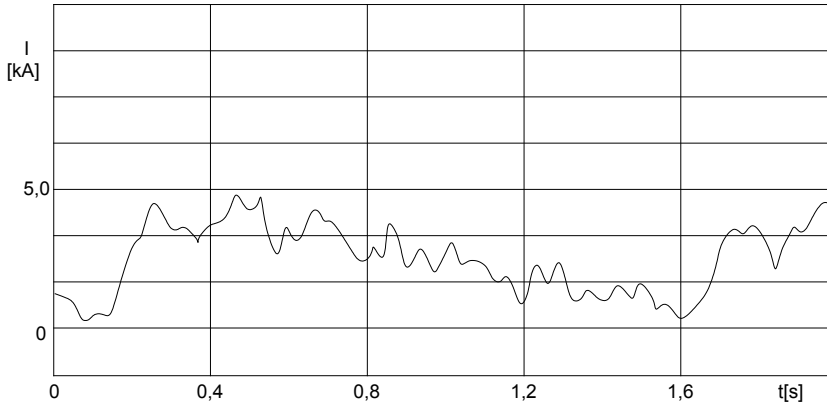
- wymieniono uzwojenia,
- wymieniono komutator na nowy,
- wymieniono wał na nowy.

W czasie remontu zrezygnowano z grzebienia drewnianego. Chorągiewki po kilku miesiącach eksploatacji silnika zaczęły się łamać w strefie przy komutatorze. Przywrócono więc mocowanie fabryczne chorągiewek i dodatkowo wzmocniono sztywność chorągiewek od strony komutatora poprzez łączenie chorągiewek w wiązki po 5 sztuk tworząc rodzaj „kratownicy”. Rozwiązanie to zdało egzamin. Silnik pracował bezawaryjnie 28 lat, co należy odnotować za sukces. W roku 2008 chorągiewki zaczęły się łamać ponownie, jeden fragment chorągiewki wypadł robiąc zwarcia w strefie komutatora.

Specyfika walcowania rury jest taka, że w czasie walcowania wymagana moc na walcach, w zależności od profilu rury i rodzaju materiału, może wynosić ponad 10000 kW. Aby tę moc zapewnić, na wale silnika umieszczono koło o momencie bezwładności około $1,1 \times 10^6$ kgm². W czasie walcowania rury około 1/3 energii dostarcza silnik zmniejszając przy tym swoją prędkość obrotową, a 2/3 energii koło zamachowe. Silnik pracuje przy prędkościach zbliżonych do znamionowych 36–40 obr./min. Maksymalny zanotowany spadek prędkości obrotowej w czasie walcowania wynosił 5,3 obr./min. Po przejściu rury przez walce silnik zwiększa prędkość obrotową „ładując” energetycznie koło zamachowe.

Prąd obciążenia silnika jest zmienny w czasie. Przykładowy przebieg prądu pokazano na wykresie (rys. 1). Jest to jeden z łagodniejszych wariantów walcowania. Przy innych parametrach walcowanej rury maksymalna wartość prądu silnika może przekraczać 8000 A. Cykl walcowania, jak wynika z przebiegu prądu obciążenia silnika (rys. 1), wynosi około 1,55 s, w tym :

- walcowanie około 0,3 s,
- a czas wybiegu około 1,25 s.



Rys. 1. Przebieg prądu silnika w czasie walcowania rury 355.6×8
 Fig. 1. The flow of the motor's current at the time of rolling the tube 355.6×8

3. BADANIE CHORAĞIEWEK

Badania przeprowadzono na dwóch chorağiewkach:

- 1 – wyciętej z komutatora (rys. 2)
 - 2 – zapasowej z magazynu, która była wykonana z tej samej partii miedzi (rys. 3).
- Celem badań było porównanie ich właściwości fizycznych.



Rys. 2. Fragment chorağiewki wycięty z silnika
 Fig. 2. Part of the riser cut from the engine



Rys. 3. Fragment chorańiewki zapasowej wziętej z magazynu, a pochodzącej z tej samej partii materiału co chorańiewka przedstawiona na rys. 2

Fig. 3. Part of the backup riser taken from the stockroom, and originating from the same batch of material as riser presented in Fig. 2

Wyniki badań są następujące:

Chorańiewka zapasowa (2) jest prosta i jest sprężysta, po niewielkim ugięciu wraca do stanu pierwotnego. Chorańiewka wycięta (1) ma powierzchnię nierówną, a po niewielkim ugięciu nie wraca do położenia pierwotnego.

Pomiar twardości HRF chorańiewek podano tabeli 1. Pomiar twardości HRF wykonano w 5-iu punktach na długości wycinków.

Tabela 1. Twardości HRF chorańiewek: 1 – z rysunku 2 i 2 – z rysunku 3
Table 1. HRF hardness of the risers: 1 – in Figure 2 and 2 – in Figure 3

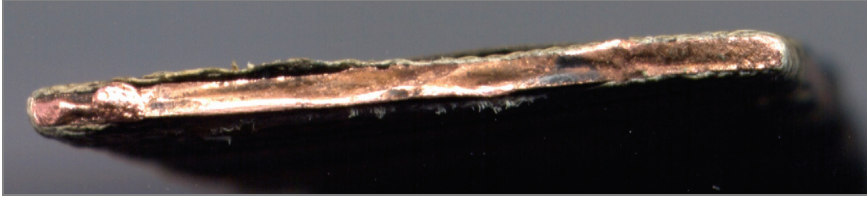
Punkt pomiarowy	Chorańiewka (1)	Chorańiewka (2)
1	35,4	78,9
2	57,2	78,8
3	39,1	76,2
4	50,8	68,8
5	39,9	76,2
Wartość średnia	44,5	75,8

Twardość średnia chorańiewki (1) jest mniejsza o 59% od twardości chorańiewki (2). Przyczyna tkwi w ciągłych zmianach temperatury chorańiewek, gdyż prąd płynący w chorańiewce jest impulsowy o częstości od 12 do 13,3 Hz, jak to pokazano na rysunku 7. Miedź miękka ma także mniejszą wytrzymałość mechaniczną na zginanie.

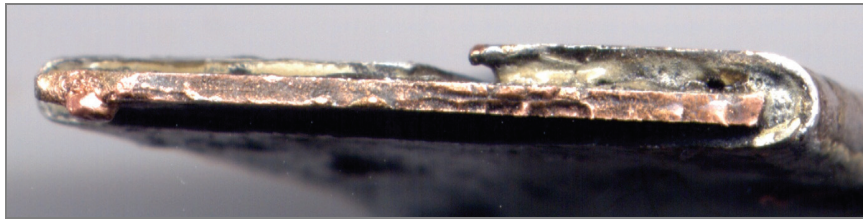
Obserwacja powierzchni przelomu fragmentu chorańiewki wykazuje, że wyłamanie jest typu zmęczeniowego. Potwierdzają to także zdjęcia – rys. 4 i rys. 5.

Zmieniła się także rezystywność materiału chorańiewek, choć w znacznie mniejszym stopniu. Aby to wykazać zmierzono rezystancję fragmentów chorańiewki wyłamananej (1) i chorańiewki zapasowej z magazynu (2). Pomiar porównawczy rezystan-

cji wykonano na fragmentach o identycznej długości (158 mm). Pomiar wykonano metodą techniczną. Aby zmniejszyć do minimum błąd pomiarowy, fragmenty chora-giewek połączono w szereg i mierzono spadki napięcia przy tym samym prądzie. Rezystancja fragmentu chora-giewki, który wyłamał się wynosi 106 $\mu\Omega$. Rezystancja fragmentu chora-giewki z magazynu wynosi 100 $\mu\Omega$. Jak widać rezystancja fragmentu chora-giewki która pracowała jest o 6% większa.



Rys. 4. Widok powierzchni jednego końca złamanej chora-giewki (1)
Fig. 4. View of the surface of one end of a broken riser (1)



Rys. 5. Widok powierzchni drugiego końca złamanej chora-giewki (1)
Fig. 5. View of the surface of the other end of a broken riser (1)

4. PRZYCZYNY WYSTĄPIENIA ZMĘCZENIA CHORA-GIEWEK

W czasie pracy silnika prąd płynie tylko w tych chora-giewkach, które są dołączone do działek komutatora znajdujących się aktualnie pod szczotkami – rys. 6. Prąd ten ma charakter trójkątny jak to pokazano na rys. 7. Czas przepływu prądu jest równy czasowi komutacji prądu w zwojach twornika. Dla prądu obciążenia silnika 8 kA i prędkości obrotowej 40 obr/min.

Czas komutacji wynosi:

$$T_k = T \frac{b_{sz}}{K} 2p = 0,075 \frac{2,5}{1050} 20 = 3,8 \times 10^{-3} s \quad (1)$$

$$T = \frac{60}{n \times 2p} = \frac{60}{40 \times 20} = 0,075 s \quad (2)$$

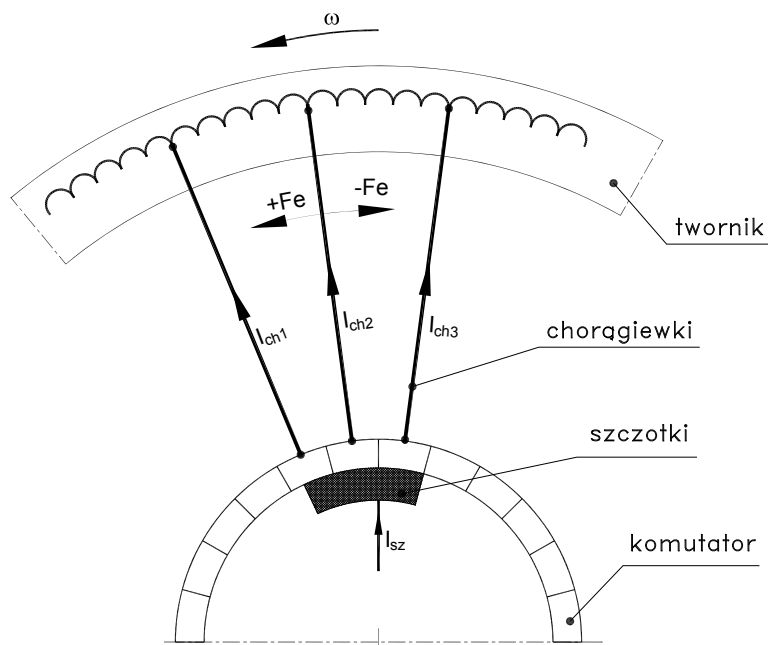
gdzie:

$T_k, i T$ – oznaczają czas komutacji i pół okres zmiany prądu twornika tzn. czas obrotu wirnika o kąt łuku jednego bieguna,

$K = 1050$ – liczba działek komutatora,

$b_{sz} = 2,5$ – szerokość szczotek liczona w działkach komutatora,

$2p = 20$ – liczba biegunów.



Rys. 6. Szkic poglądowy połączenia komutatora z uzwojeniem twornika – chorągiewki
Fig. 6. Sketch illustrating the connection of the commutator to the armature winding – the riser

Wartość maksymalna prądu chorągiewki wynosi:

$$I_m = \frac{I}{p \times b_{sz}} = \frac{8000}{10 \times 2,5} = 320 \text{ A} \quad (3)$$

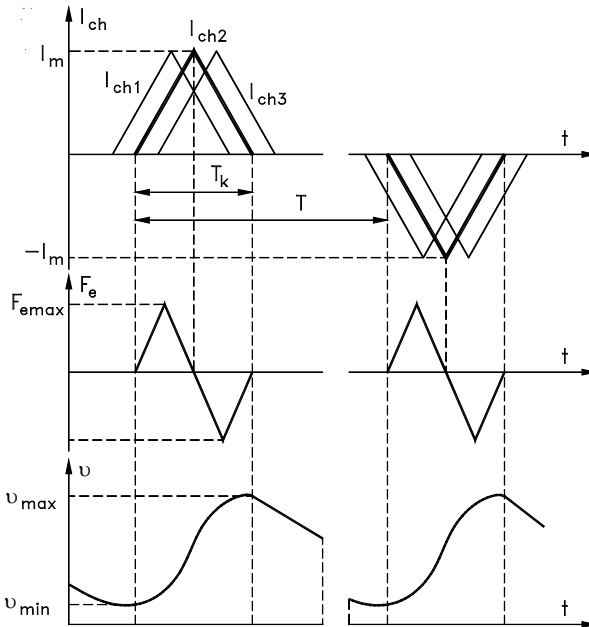
Maksymalna gęstość prądu w chorągiewce:

$$j_m = \frac{I_m}{S_{ch}} = \frac{320}{20} = 16 \text{ A/mm}^2 \quad (4)$$

$$S_{ch} = 1 \times 20 = 20 \text{ mm}^2$$

Prąd płynący w chorągiewkach generuje:

Siły elektrodynamyczne $F_{e \max}$, które są zmienne w czasie, jak pokazano na rys. 7. Siły te mają charakter impulsów zmiennych powtarzających się 20 razy na jeden obrót wirnika, czyli z częstotliwością 13,3 Hz, a wartość ich jest proporcjonalna do kwadratu prądu.



Rys. 7. Przebieg prądu w chorażewkach I_{ch} , siły elektrodynamicznej F_e działającej na chorażewkę, i przebieg temperatury chorażewki v

Fig. 7. The flow of the current in risers I_{ch} , electrodynamic forces acting on the riser F_e , and the temperature curve of the riser v

Cykliczną zmianę temperatury chorażewek od v_{\max} , do v_{\min} i v_{\max} itd., która zachodzi także z częstotliwością 13,3 Hz, jak to pokazano na rys. 7.

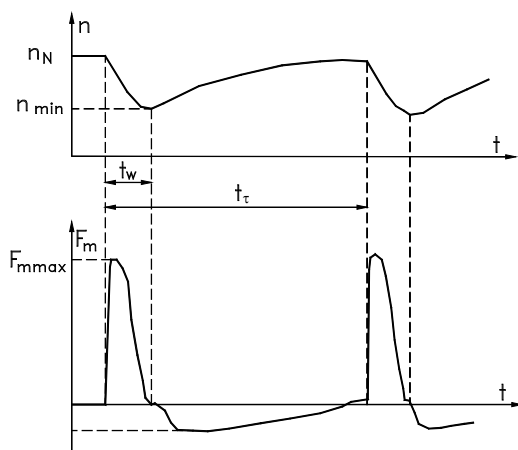
Prędkość obrotowa silnika zmienia się o wartość $\Delta n = (n_N - n_{\min}) = 3$ do 5 obr./min., która zachodzi w czasie $\Delta t = t_w = 0,35$ s. Maksymalna wartość przyspieszenia kąowego wynosi:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi \Delta n}{30 \Delta t} = \frac{\pi 5}{30 \times 0,35} = 1,5 \text{ [1/s}^2\text{]} \quad (5)$$

Przyspieszenie to zmienia się z częstotliwością cykli walcowania, a więc około 0,7 Hz i generuje zmienne siły bezwładności działające na chorażewki, jak to pokazano na rys. 8.

Chorażewki są wykonane z płaskownika miedzianego o grubości 1 mm, są elastyczne i mimo mocowania w połowie długości do podzwojnika, mają możliwość drgań. Drgania wzbudzone siłami elektrodynamicznymi występują tylko w tych cho-

rażewkach w których płynie prąd (rys. 6). Siły bezwładności działają równocześnie na wszystkie działki i wywołują drgania całego „kosza” chorągiewek.



Rys. 8. Przebieg prędkości obrotowej n i siły bezwładności F_m działającej na chorągiewkę
Fig. 8. Rotation speed curve n and the inertial forces acting on the riser curve F_m

5. WNIOSKI

Silnik walcowniczy od czasu remontu generalnego pracował poprawnie 28 lat. Aktualny stan techniczny silnika jest następujący:

- izolacja uzwojeń jest w stanie poprawnym, oceniona w skali od 1 do 5; na 3,5,
- komutator jest dobry, jego powierzchnia jest gładka i nie ma śladów opalenia,
- szczotki nie wykazują śladów iskrzenia, ich stan jest dobry,
- chorągiewki są zużyte, materiał chorągiewek jest w 100% zmęczony i wymagają wymiany.

Zaleca się możliwie szybką wymianę, sukcesywnie w przerwach technologicznych walcowania, wszystkich chorągiewek.

Zaleca się przeprowadzić badania stanu technicznego izolacji uzwojeń co 3 lata.

Artykuł opracowano w ramach projektu badawczego Narodowego Centrum Nauki nr 6025/B/T02/2011/40.

LITERATURA

- [1] GIEMKE R.G., *Niedomagania maszyn elektrycznych*, WNT, 1962.
- [2] GOGOLEWSKI Z., GABRYŚ W., *Maszyny prądu stałego. Obliczenia, konstrukcje, zagadnienia specjalne*, PWT, 1960.
- [3] KORDECKI A., *Budowa maszyn elektrycznych. Projektowanie maszyn prądu stałego*, WNT, 1975.

ATTACHING THE RISERS IN THE HIGH POWER DC ENGINES

DC motors operate as high power drive systems in mining hoists and drive systems in the steel mills. These are multipolar motors with relatively low rated speed. The large difference in diameters of the rotor and of the commutator results in risers' length of up to one meter (riser is commutator part connecting winding end to the commutator bar). The risers, when the engine is working, are subjected to electromagnetic forces and inertia forces. Operational experience shows that the risers are the most-likely-to-fault engine points and often experience failures. Forces acting on the risers are illustrated together with the effect of type of attachment of the risers on their durability. Example used is rolling-mill motor with a rotor diameter $D = 4500$ mm, commutator diameter $D_k = 2280$ mm and the number of commutator bars $K = 1050$.