

Wyznaczanie momentu maszyn dużej mocy pracujących w zakładach wydobywczych i przerobowych

Determination of the torque of high-power machines used in mining and processing plants



Dr inż. Adam Decner^{*)}



Inż. Lesław Iskierski^{**)}

Treść: W artykule opisano wybrane zagadnienia ze wspólnej pracy Instytutu Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL oraz KGHM Polska Miedź S.A. Zrealizowana praca dotyczyła pomiarów silników napędowych kruszarek stosowanych w Zakładach Wzbogacania Rud KGHMu. Zastosowany system pomiarowy pozwala na przeprowadzanie pomiaru momentu obrotowego podczas normalnej eksploatacji napędów. Za jego pośrednictwem można wyznaczyć charakterystyki obciążenia, rzeczywistą sprawność silnika, moment hamujący maszyny wyciągowej itp. Bezprzewodowe przesyłanie danych pomiarowych upraszcza wykonanie pomiarów i zapewnia separację galwaniczną układu pomiarowego od jakiegokolwiek części napędu. Zastosowanie układu pomiarowego nie zmienia konstrukcji napędu poprzez np. zmniejszenie wytrzymałości wałów, jak to może mieć miejsce w przypadku zastosowania wałów pomiarowych. Autorzy przedstawiają system pomiarowy, jego budowę, zastosowanie oraz prezentują wyniki pomiarów i rejestracji na podstawie wybranego przykładu.

Abstract: This paper describes selected issues of the joint work of the Institute of Electrical Machines and Drives KOMEL and the KGHM Polish Copper SA. The work concerns the tests of electrical motors used to drive the crusher in Ore Enrichment Plant of KGHM. The applied measurement system allows to carry out the measurement of torque during a normal operation of the drive. This equipment allows to determine the characteristics of the load, the actual efficiency of the machine, the braking torque on the shaft of hosting machine, etc. Wireless data measurement simplifies measurements and provides galvanic isolation of the measuring system from any part of the drive. The use of the measurement system does not change anything in construction of the whole drive, for example by weakening the strength of the shafts as it may happen when the measuring shaft is used. The authors present an example of measuring system, its construction, application and the results of measurements and registration.

Słowa kluczowe:

maszyny elektryczne, pomiar momentu, badanie maszyn elektrycznych

Key words:

electrical machines, torque measurements, testing of electrical machines

1. Wprowadzenie

Pomiar rzeczywistego momentu obrotowego rozwijanego przez silniki napędowe eksploatowanych napędów jest w większości przypadków trudny do przeprowadzenia i może być niezwykle kosztowny. Podstawowe trudności są, przede wszystkim natury technologicznej – silnik elektryczny jest częścią większego urządzenia i zwykle projektant nie przewidział potrzeby montażu dodatkowego oprzyrządowania,

a więc stanowisko nie ma takich możliwości. Kolejną przeszkodą są koszty instalacji wału pomiarowego (momentomierza) co wiąże się z koniecznością demontażu maszyny i długiej przerwy w produkcji. Z tych przyczyn użytkownicy maszyn zwykle nie podejmują się badania maszyn na stanowisku ich normalnej eksploatacji, pomimo że uzasadnione może być poznanie wartości występujących momentów, charakteru obciążenia czy rzeczywistej sprawności. Dane uzyskane podczas takich pomiarów mogą pomóc w lepszym wykorzystaniu posiadanych napędów, zmianie trybu pracy czy podjęciu decyzji o wymianie silnika na nową, energooszczędną jednostkę.

^{*)} Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, ^{**)} KGHM Polska Miedź S.A.

W publikacji [1] autorzy podają, że silniki elektryczne częściej ulegają uszkodzeniom i zużywają się szybciej niż napędzane nimi urządzenia mechaniczne np.: wentylatory czy pompy. W publikacjach [8, 6] podano, że najczęściej uszkodzane elementy maszyny elektrycznej to uzwojenia oraz łożyska. Po wykonaniu remontu (wymiany uzwojeń) współczynnik sprawności silnika zwykle ulega obniżeniu. Autorzy publikacji [1] szacują, że spadek sprawności wynosić może, w zależności od technologii remontu, od 1 % do 3 %, a w silnikach wielokrotnie remontowanych nawet 5 %. Wyremontowany silnik wraca do dalszej eksploatacji, lecz charakteryzuje się gorszymi parametrami oraz zwiększoną podatnością na uszkodzenia.

W publikacji [1] autorzy podają, że w rozwiniętych krajach Europy przeciętny okres eksploatacji silników indukcyjnych klatkowych o mocy powyżej 250 kW wynosi nie więcej niż 20 lat. W tym okresie silnik może być jeden lub dwa razy przezwajany. Eksploatacja silników starszych niż 20-letnie, lub więcej niż dwa razy remontowanych, uważana jest za technicznie i ekonomicznie nieracjonalną.

2. Opis miejsca wykonywania pomiarów

Pomiary wytypowanych maszyn wykonane były w oddziale KGHM o nazwie Zakłady Wzbogacania Rud w Polkowicach (O/ZWR) w rejonach Polkowice oraz Rudna. W 2013 roku przebadano w sumie 5 silników: 3 asynchroniczne, synchronizowane typu SAS, 1 silnik synchroniczny typu DS oraz 1 silnik asynchroniczny (SAS i DS są oznaczeniami typu maszyny zastosowanymi przez ich producentów i oznaczają Silnik Asynchroniczny Synchronizowany oraz silnik synchroniczny Двигател Синхронный). W O/ZWR w ciągłej eksploatacji znajdują się 93 sztuki silników typu SAS i DS. W zdecydowanej większości – 87 sztuk – służą do napędu młynów bębnowych a 6 sztuk napędza kruszarki młotkowe [6].

Autorzy publikacji [3] podają, że znaczna część silników pracujących w O/ZWR została wyprodukowana w latach siedemdziesiątych dwudziestego wieku. Pracują więc już blisko czterdzieści lat. Należy zaznaczyć, że proces produkcji O/ZWR jest procesem ciągłym.

Na rysunku 1 przedstawiono silnik asynchroniczny synchronizowany umiejscowiony w ciągu linii technologicznej.



Rys. 1. Silnik w otoczeniu urządzeń technologicznych [3]

Fig. 1. Electrical motor in the field of technological equipment [3]

Autorzy publikacji [7] podają, że w O/ZWR dla złagodzenia skutków rozruchu układów napędowych stosuje się różne układy rozruchowe. Zastosowano układy energoelektroniczne, rozruszniki rezystancyjne oraz wiroprądowe. Niestety część silników uruchamiana jest w sposób bezpośredni.

Pracujące w O/ZWR silniki wyprodukowane zostały ze sprawnością znamionową rzędu $90 \div 93$ %. Ze względu na datę produkcji, kilkudziesięcioletnią eksploatację w trudnych warunkach oraz prowadzone remonty należy się spodziewać, że sprawność silników uległa obniżeniu o kilka procent (nawet o 5 %) [6]. Aby układy napędowe mogły w dalszym ciągu poprawnie funkcjonować, należało poznać warunki naturalnej eksploatacji silników. Dotyczy to przede wszystkim rzeczywistego momentu rozwijanego na wale maszyny a w konsekwencji określenie rzeczywistej sprawności.

3. System pomiarowy

Aby poprawnie zrealizować pomiary prowadzone w ramach ekspertyzy zastosowano układ pozwalający na przeprowadzanie pomiarów momentu obrotowego w warunkach przemysłowych. Za jego pośrednictwem można wyznaczyć rzeczywisty moment na wale silnika, a co za tym idzie charakterystyki obciążenia i sprawność maszyny w miejscu jej normalnej eksploatacji.

Zastosowany układ i system pomiarowy posiada przejrzystą konfigurację, a montaż instalacji pomiarowej nie wymaga długotrwałego postoju maszyny wytypowanej do przeprowadzenia badań. Zwykle czas potrzebny na poprawny montaż wynosi około 3 godz.

Układ zapewnia bezprzewodowe przesyłanie danych pomiarowych z czujników zamontowanych na wale do dekodera, co upraszcza wykonanie pomiarów oraz zapewnia separację galwaniczną układu pomiarowego od elementów konstrukcyjnych napędu. Montując układ pomiarowy nie ingeruje się w strukturę napędu poprzez np. zmniejszenie wytrzymałości wałów, jak to może mieć miejsce w przypadku zastosowania wałów pomiarowych.

3.1. Wykorzystanie tensometrów do pomiaru momentu

Duże znaczenie praktyczne ma pomiar momentu skręcającego za pomocą tensometrów, jak już zaznaczono to wcześniej. Metoda polega na pomiarze kąta skręcenia wału, z którego wyznaczany jest moment T_{obc} przenoszony w ruchu obrotowym przez wałek w przekroju kołowym o średnicy D .

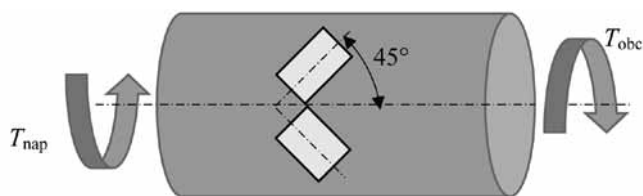
Z teorii wytrzymałości materiałów wiadomo, że w walcowym elemencie, który poddawany jest skręcaniu, maksymalne odkształcenia występują pod kątem 45° do osi skręcenia. Podczas naklejania tensometrów na wał przenoszący moment obciążenia, przestrzegana jest powyższa zasada. Mierząc odkształcenie wału za pomocą tensometrów, wyznaczany jest moment skręcający (obciążenia) wg poniższej zależności [7, 8]

$$T_{obc} = \frac{\pi \cdot D^3 \cdot G \cdot \varepsilon}{8} \quad (1)$$

gdzie:

- T_{obc} – moment obciążenia, Nm
- D – średnica wału, m
- G – moduł sprężystości poprzecznej, GPa
- ε – zmierzone odkształcenie sprężyste wału.

Tensometry mierzące odkształcenia wału ε przyklejane są do powierzchni bocznej wałka w sposób pokazany na rysunku 2. W znacznym uproszczeniu: ε oznacza zmianę długości ΔL drutu użytego do budowy tensometru do jego długości L w stanie spoczynku ($\Delta L/L$).



Rys. 2. Zasada pomiaru momentu skręcającego

Fig. 2. Principle of torque measurements

3.2. Prawidłowe przygotowanie wału do pomiarów

Aby zapewnić prawidłową pracę czujnika tensometrycznego musi on być poprawnie zamocowany na powierzchni wału. Tensometry muszą być przyklejane ze szczególną starannością i dokładnością oraz przy zachowaniu odpowiedniej czystości. Najważniejszym etapem, zajmującym najwięcej czasu jest przygotowanie powierzchni wału, przeznaczonej do przyklejenia czujnika tensometrycznego, która musi być równa, sucha i czysta. W celu usunięcia nierówności, powierzchnię wału należy odpowiednio przygotować np.: usunąć zadziory i rysy poprzez ręczną obróbkę mechaniczną (pilnik, papier ścierny). Czystość uzyskuje się poprzez mycie odpowiednimi środkami chemicznymi. Powierzchnia również powinna posiadać odpowiedni odczyn pH. Po nałożeniu kleju czujnik tensometryczny łączy się z badanym wałem lekko go dociskając, aż do związania kleju. Kleje używane do mocowania tensometru są elementem decydującym o prawidłowej pracy tensometrów.

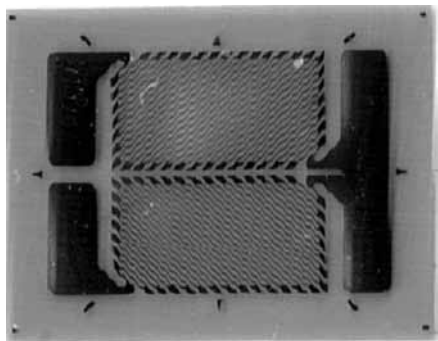
Kleje powinny mieć następujące własności:

- dobre właściwości izolacyjne,
- odporność na działanie podwyższonych temperatur,
- brak pełzania pod obciążeniem,
- bardzo dobrą przyczepność,
- odporność na działanie środków chemicznych.

Obecnie produkowane kleje są kompozycjami różnych składników i zazwyczaj są to kleje cyjanoakrylowe. Klej dobiera się w zależności od rodzaju tensometru i materiału na który ma być naklejony. Z szerokiej gamy dostępnych klejów można znaleźć kleje szybkoschnące pozwalające na przeprowadzenie pomiarów w kilka minut po naklejeniu czujnika na wał.

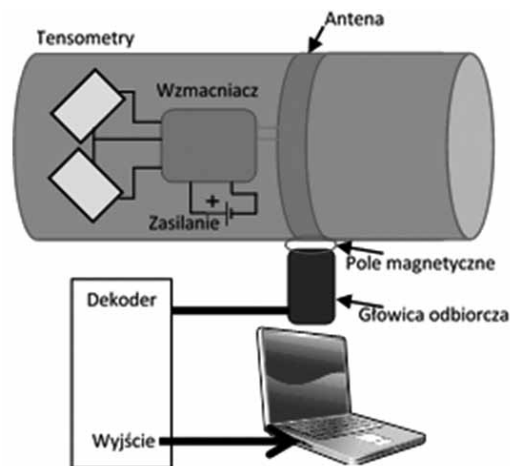
Na rysunku 3 przedstawiono wygląd tensometru.

Na rysunku 4 przedstawiono schemat układu pomiarowego do wyznaczenia momentu obciążenia. Na rysunku 5 przedstawiono układ tensometryczny zamontowany na wale badanego silnika, a na rysunku 6 badany silnik z zamontowanym układem pomiarowym.



Rys. 3. Przykładowy tensometr używany do pomiaru momentu

Fig. 3. Example of a strain gauge used to measure the torque



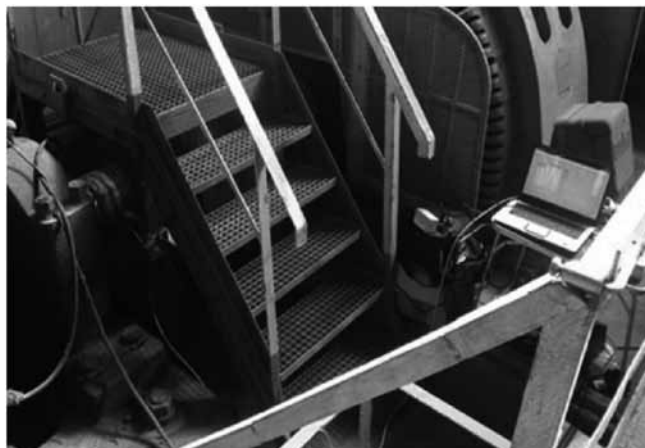
Rys. 4. Układ pomiarowy momentu obciążenia zastosowany w KGHM O/ZWR

Fig. 4. Measuring system of torque applied at KGHM O/ZWR



Rys. 5. Układ tensometryczny zamontowany na wale badanego silnika

Fig. 5. Strain gauge mounted on the shaft of the tested motor



Rys. 6. Układ pomiarowy oraz badany silnik

Fig. 6. Measurement system and the electric motor

4. Pomiary

Celem pomiarów było:

- wyznaczenie parametrów elektrycznych podczas pracy wybranych silników napędowych,
 - wyznaczenie momentu obrotowego silników napędowych młynów metodą pomiaru kąta skręcenia wału.
- Zakres badań obejmował:
- rejestrację momentu obrotowego i prędkości obrotowej podczas rozruchu maszyny,
 - rejestrację prądu i napięcia podczas rozruchu maszyny,
 - pomiar parametrów elektrycznych i mechanicznych podczas pracy pod obciążeniem maszyny.

W celu realizacji zakresu badań, na wałach maszyn zamontowano telemetryczny system do pomiaru momentu obrotowego.

W polu rozdzielni zasilających silniki podłączono układ pomiarowy do pomiaru parametrów elektrycznych.

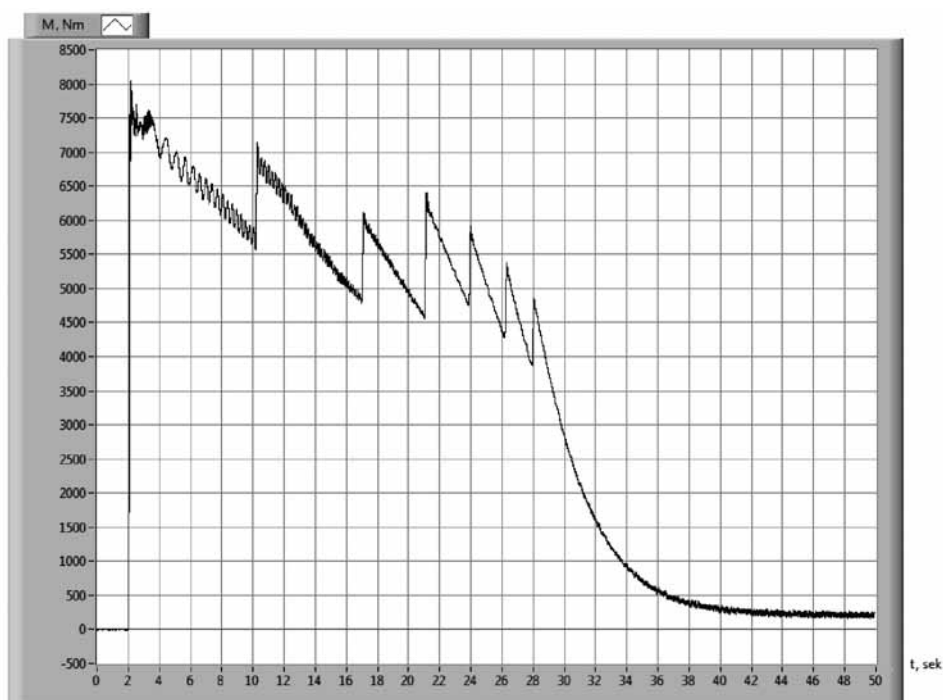
Przeprowadzono rozruchy maszyn i zarejestrowano dla każdej maszyny moment obrotowy, prędkość obrotową, prąd pobierany przez silnik oraz napięcie na szynach zasilających silnik.

Kolejnym etapem było zmierzenie parametrów silników w czasie ich normalnej pracy. Zmierzone momenty obrotowe, prędkość obrotową, prąd pobierany przez silnik oraz napięcie na szynach zasilających silnik oraz moc pobieraną przez silnik. Zmianę obciążenia uzyskiwano poprzez zwiększanie ilości elementów mielących wewnątrz młyna oraz liczby urobku.

Na rysunkach 7, 8, 9 przedstawiono zarejestrowane przebiegi momentu, prędkości obrotowej oraz prądu silnika asynchronicznego pierścieniowego o mocy 320 kW [5, 6].

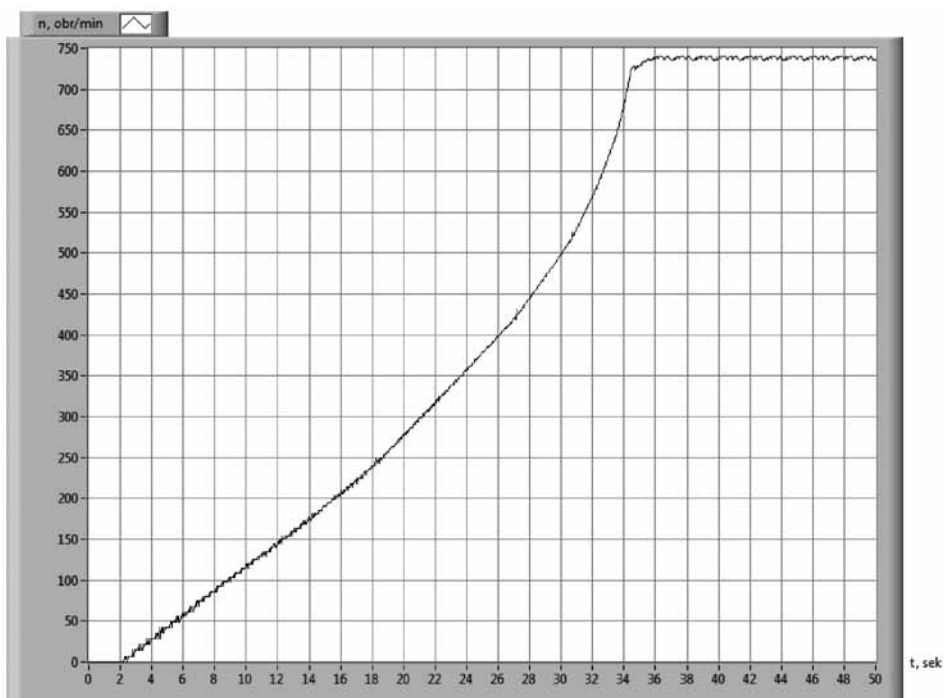
Rys. 7. Przebieg momentu obrotowego w czasie rozruchu

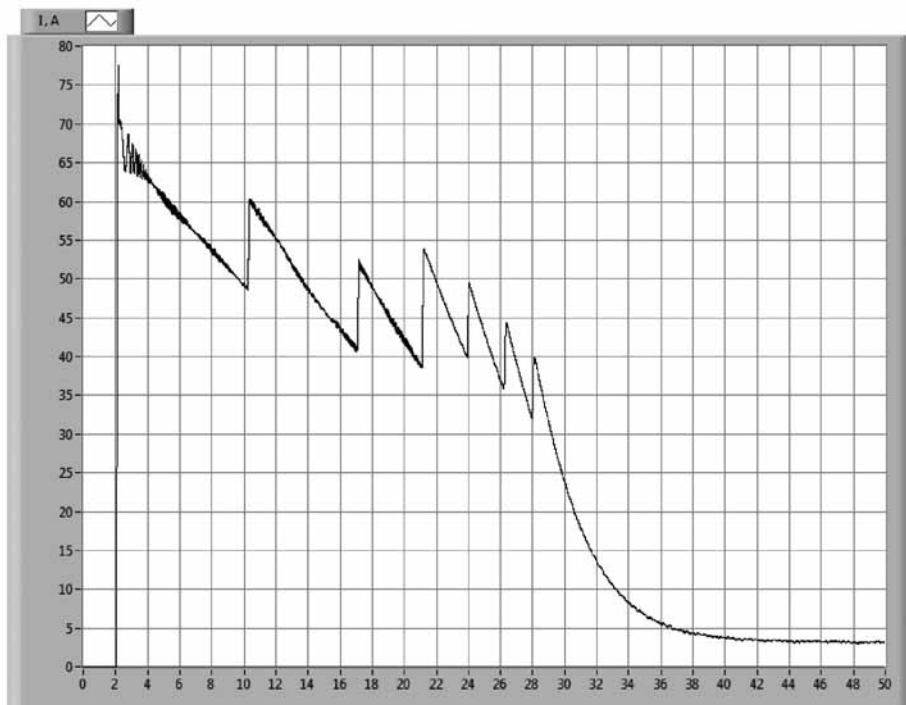
Fig. 7. Torque curve during start-up



Rys. 8. Przebieg prędkości obrotowej w czasie rozruchu

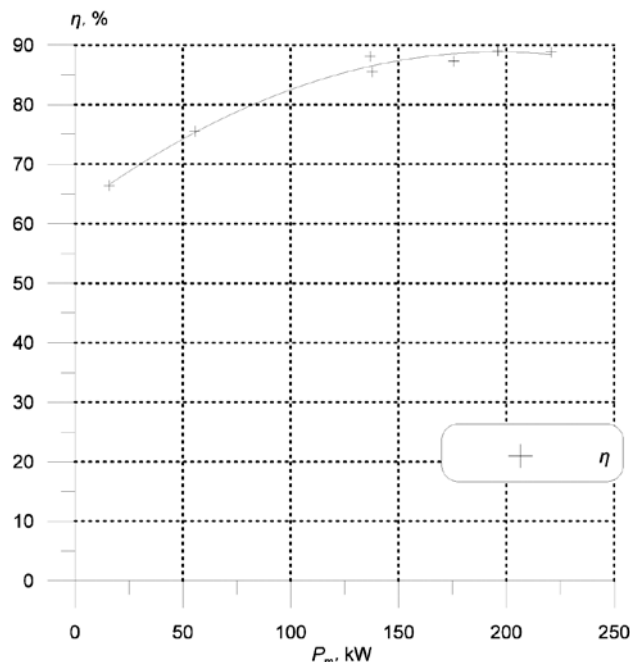
Fig. 8. Rotational speed curve during start-up





Rys. 9. Przebieg prądu stojana w czasie rozruchu
 Fig. 9. Current curve during start-up

Na rysunku 10 przedstawiono wykres sprawności w funkcji mocy mechanicznej.



Rys. 10. Wykres $\eta = f(P_m)$
 Fig. 10. Chart $\eta = f(P_m)$

5. Podsumowanie

Badania przeprowadzono w O/ZWR na wytypowanych egzemplarzach maszyn. Pomiary zostały wykonane na maszynach o mocach od 320 kW do 1250 kW. Silniki te pracują już ok. 40 lat. W tym czasie były kilkukrotnie remontowane, a więc zgodnie z [1] ich sprawność obniżyła się o kilka punktów procentowych. Przeprowadzone badania potwierdziły obniżenie się sprawności silników w stosunku do mocy znamionowej.

Zastosowany telemetryczny system do pomiaru momentu obrotowego o klasie dokładności 0,2 % wartości mierzonej (dane producenta systemu), spełnił swoją rolę. W praktyce dokładność pomiaru uzależniona jest od wielu czynników, min.: czystości i równości powierzchni, jakości montażu tensometru, itd. i może być mniejsza od podanej przez producenta systemu. Pracujące maszyny elektryczne można z powodzeniem wyposażyć w czujniki tensometryczne i przebadac. Do tego celu potrzebne jest 15 ÷ 20 cm wolnej przestrzeni na wale maszyny. Przestrzeń ta powinna być cylindryczna i wolna od wszelkiego rodzaju zmian średnicy np.: rowki pod kliny oraz bez śladów zadrapań. Aby poprawnie przygotować system do przeprowadzenia pomiarów potrzebny jest czas. Niestety, maszyna musi zostać zatrzymana. Dla wprawnego pomiarowca potrzeba około 1,5 godziny, aby poprawnie przygotować system. Najtrudniejszym i najbardziej pracochłonnym, ale też najważniejszym etapem jest przygotowanie powierzchni i naklejenie czujnika tensometrycznego. Czynność ta wymaga dużej precyzji, cierpliwości i czystości.

W przeciągu 2 godzin od przystąpienia ekipy pomiarowej do prac otrzymuje się pełnowartościowy momentomierz, wykorzystujący elementy występujące już w układzie. Tutaj kryje się niewątpliwa zaleta systemu pomiarowego, w postaci zaoszczędzonego czasu potrzebnego na zmontowanie. Rozprzęganie, montaż, ponowne sprzęganie i osiowanie współpracujących ze sobą elementów pochłania o wiele więcej czasu i angażuje wiele więcej osób. Zastosowany do pomiarów telemetryczny system do pomiaru momentu obciążenia jest praktycznym i skutecznym instrumentem znajdującym zastosowanie m.in. w pomiarach na rzeczywistych obiektach w trakcie ich normalnej eksploatacji.

Uniwersalność systemu telemetrycznego jest duża. Możliwe jest, aby oczylnikować w podobny sposób maszyny wyciągowe, czy inne ważne napędy, które wymagają ciągłego nadzoru lub istnieje potrzeba ich modernizacji, zmiany trybu pracy itp. Badania takie wykonano na maszynie wyciągowej jednej z kopalń.

6. Literatura

1. *Bernatt M., Zieliński T., Piszczek J.M.*: Remontować czy wymieniać silniki elektryczne dużej mocy?, wyd. BOBRME Komel, Wydanie I, Katowice, 2006
2. *Decner A., Iskiński L.*: Zastosowanie metody bezpośredniego pomiaru momentu w napędach dużej mocy, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne* nr 1/2014 (101), Komel, 2014
3. *Jakubowicz A., Orłoś Z.*: Wytrzymałość materiałów, WNT, Warszawa 1966.
4. *Katarzyński S., Kocańda S., Zakszewski M.*: Badania właściwości mechanicznych metali. WNT, Warszawa, 1967.
5. Opracowanie nr CS4-050061 „Analiza możliwości modernizacji silników napędowych młynów”, Praca niepublikowana, Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych Komel, 2013
6. *Pacholski E., Leśnik M.*: Eksploatacja silników typu SAS w KGHM Polska Miedź O/ZWR w Polkowicach. Doświadczenia, problemy, działania przyszłościowe, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne* nr 1/2012 (94), BOBRME Komel, 2012
7. *Pacholski E., Iskiński L.*: Analiza wpływu sposobu rozruchu silników napędowych na parametry sieci elektroenergetycznej, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne* nr 2/2013 (99), BOBRME Komel, 2013
8. *Szymaniec S.*: Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń i stanu łożysk silników indukcyjnych klatkowych w warunkach przemysłowej eksploatacji, *Studia i Monografie, Politechnika Opolska, Opole* 2006.

***Zwiększajmy prenumeratę
najstarszego – czołowego miesięcznika
Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Górnictwa!***

Liczba zamawianych egzemplarzy określa zaangażowanie jednostki
gospodarczej w procesie podnoszenia kwalifikacji swoich kadr!