

# Pomiar momentu obrotowego w warunkach przemysłowych

Adam Decner, Lesław Iskierski

## 1. Wstęp

W publikacji [1] podano, 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 przeważany. Eksploatacja silników starszych niż 20-letnie – lub więcej niż dwa razy remontowanych – uważana jest za technicznie i ekonomicznie nieracjonalną.

Również w publikacji [1] podano, że silniki elektryczne częściej ulegają uszkodzeniom i zużywają się szybciej niż napędzane nimi urządzenia mechaniczne np.: wentylatory czy pompy. W publikacjach [2, 3] podano, że najczęściej uszkodzane elementy maszyny elektrycznej to uzwojenia oraz łożyska. Po wykonaniu remontu (wymianie uzwojeń) współczynnik sprawności silnika zwykle ulega obniżeniu. Autorzy publikacji [1] szacują, że spadek sprawności może wynosić, 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. Pomiar rzeczywistego momentu obrotowego rozwijanego przez silniki napędowe eksploatowanych napędów jest w większości przypadków trudny do przeprowadzenia i z pewnością jest kosztowny. Podstawowe trudności wynikają przede wszystkim z budowy urządzenia technologicznego – silnik elektryczny jest tylko jego częścią i zwykle nie przewiduje się potrzeby montażu dodatkowego oprzyrządowania, jakim jest momentomierz, a więc stanowisko nie ma takich możliwości. Kolejną przeszkodą są koszty instalacji wału pomiarowego. Powiązane są one z koniecznością demontażu maszyny i długiej przerwy w produkcji (straty spowodowane postojem). Z powyższych przyczyn użytkownicy maszyn zwykle nie podejmują decyzji o przebadaniu 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, energooszczędniejszą jednostkę.

## 2. Miejsce wykonywania pomiarów

Pomiary wytypowanych maszyn wykonane były w Oddziale Zakładu 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 asynchroniczny. W O/ZWR

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono budowę systemu pomiarowego zastosowanego podczas prac badawczych prowadzonych na terenie KGHM Polska Miedź SA przez Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL. Zaprezentowano możliwości zastosowania systemu oraz wyniki rejestracji i pomiarów w oparciu o wybrany przykład. System umożliwia przeprowadzenie pomiaru momentu obrotowego w czasie normalnej pracy układu napędowego. Możliwe jest wyznaczenie charakterystyk obciążenia (wyznaczenie sprawności), rejestracji momentu na wale podczas rozruchu itp. Zastosowany system nie powoduje konieczności wprowadzenia zmian konstrukcyjnych układu mechanicznego ani nie zakłóca normalnej pracy napędu.

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, pomiar momentu, badanie maszyn elektrycznych, tensometry, telemetria

## 🇬🇧 TORQUE MEASUREMENT IN INDUSTRIAL CONDITIONS

**Abstract:** The paper presents the construction of the measurement system used during the research work carried out in the KGHM Polish Copper SA by the Institute of Electrical Machines and Drives KOMEL. The possibilities of application of the system and the results of the registration and measurements based on the selected example are presented. The system allows to measure torque during normal operation of the drive. It is possible to determine the load characteristics (determination of efficiency), registration of the torque on the shaft during start-up, etc. Used system does not involve structural changes of the mechanical system or interfere with the normal operation.

Keywords: electrical machines, torque measurements, testing of electrical machines, strain gauge, telemetry

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 [3].

W publikacji [3] podano, 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]

W publikacji [4] podano, 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 90–93%. 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%) [3]. Aby układy napędowe mogły w dalszym ciągu poprawnie funkcjonować, należało je poznać w warunkach naturalnej eksploatacji silników. Dotyczy to przede wszystkim rzeczywistego momentu rozwijanego na wale maszyny, a w konsekwencji określenie rzeczywistej sprawności.

### 3. Telemetryczny 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.

Zastosowane układy i system pomiarowy posiadają przejrzystą konfigurację, a montaż instalacji pomiarowej nie wymaga długotrwałego postoju maszyny wytypowanej do przeprowadzenia badań. Zwykle czas potrzebny na poprawny montaż wynosi od 1,5 do 3 godzin.

Układ zapewnia bezprzewodowe przesyłanie danych pomiarowych z czujników zamontowanych na wale do dekodera, co upraszcza wykonanie pomiarów oraz zapewnia separację galvaniczną układu pomiarowego od elementów konstrukcyjnych napędu. Montując układ pomiarowy, nie ingeruje się w strukturę napędu poprzez np. osłabienie 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 z wykorzystaniem 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  $45^\circ$  do osi skręcenia. Podczas naklejania tensometrów na wał przenoszący moment obciążenia, przestrzegana jest powyższa zasada. Podczas mierzenia odkształcenia wału za pomocą tensometrów wyznaczany jest moment skręcający (obciążenia) wg poniższej zależności:

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

gdzie:

$T_{obc}$  – moment obciążenia, Nm;

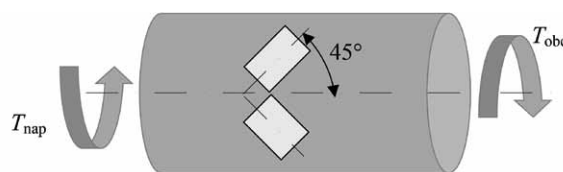
$\pi$  – stała 3,14159;

$D$  – średnica wału, m;

$G$  – moduł sprężystości poprzecznej, GPa;

$\varepsilon$  – zmierzone odkształcenie sprężyste wału.

Tensometry mierzące odkształcenia wału  $\varepsilon$  przyklejane są do powierzchni bocznej wałka w sposób pokazany na rysunku 2.



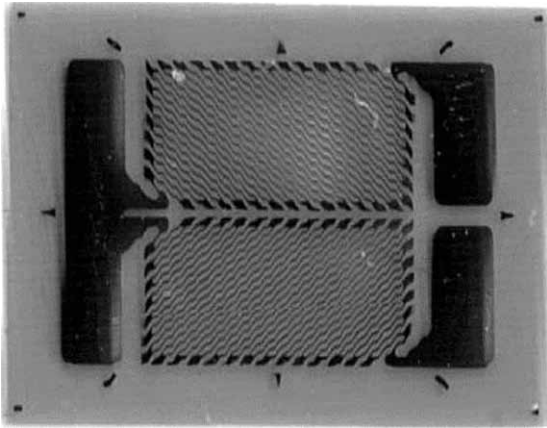
Rys. 2. Zasada pomiaru momentu skręcającego

#### 3.2. Prawidłowe przygotowanie wału do pomiarów

W celu zapewnienia prawidłowej pracy czujnika tensometrycznego musi on być w poprawny sposób zamocowany na powierzchni wału. Tensometry muszą być przyklejane ze szczególną starannością i dokładnością oraz przy zachowaniu odpowiedniej, wręcz laboratoryjnej czystości. Najważniejszym etapem, pochłaniającym 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. 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:

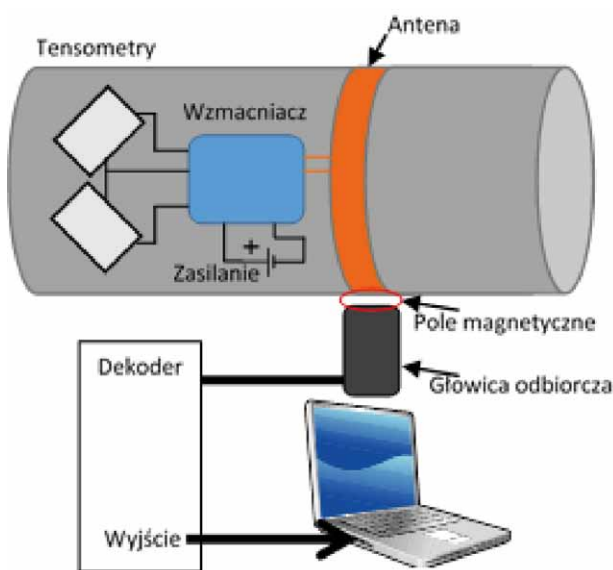
- dobre właściwości izolacyjne;
- odporność na działanie podwyższonych temperatur;
- brak pęcznienia pod obciążeniem;
- bardzo dobrą przyczepność;
- odporność na działanie środków chemicznych.



Rys. 3. Przykładowy tensometr używany do pomiaru kąta skręcenia



Rys. 6. Układ pomiarowy oraz badany silnik



Rys. 4. Schemat układu pomiarowego zastosowany w KGHM O/ZWR



Rys. 5. Układ tensometryczny zamontowany na wale badanego silnika

Produkowane obecnie kleje są to zazwyczaj kleje cyjanoakrylowe, składające się z różnych składników o różnych proporcjach. 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 przykładowy tensometr używany do pomiaru kąta skręcenia.

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

#### 4. Wyniki pomiarów

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;
- rejestracja prądu i napięcia podczas rozruchu maszyny;
- pomiar parametrów elektrycznych i mechanicznych podczas pracy pod obciążeniem maszyny.

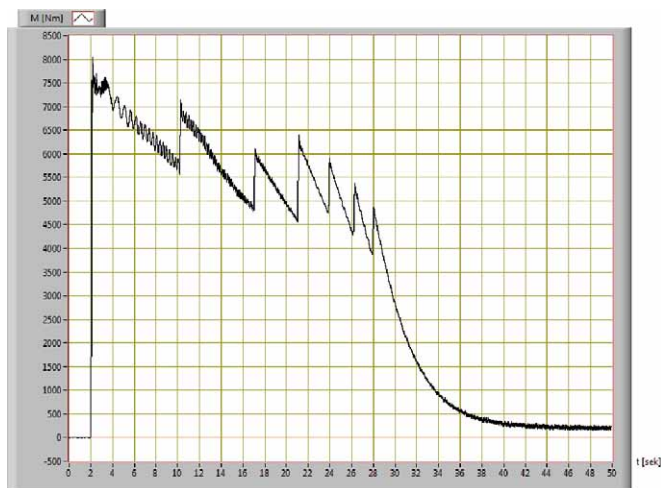
W celu realizacji zakresu badań na wałach maszyn zamontowano tensometry, będące czujnikami telemetrycznego systemu do pomiaru momentu obrotowego.

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

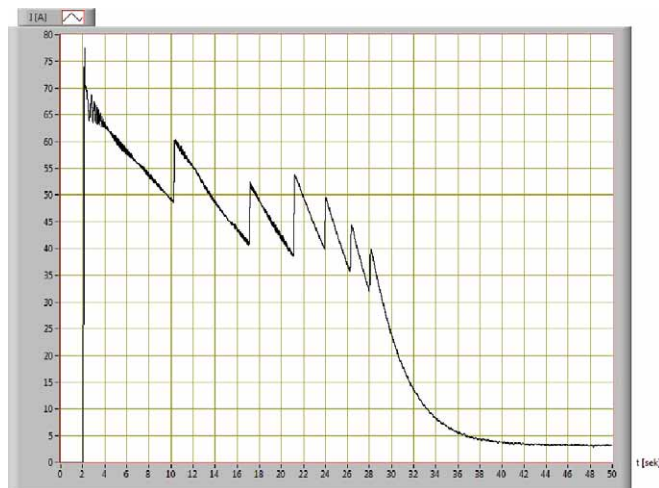
Przeprowadzono rozruchy maszyn i zarejestrowano moment obrotowy, prędkość obrotową, prąd pobierany przez silnik oraz napięcie na szynach zasilających silnik.

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

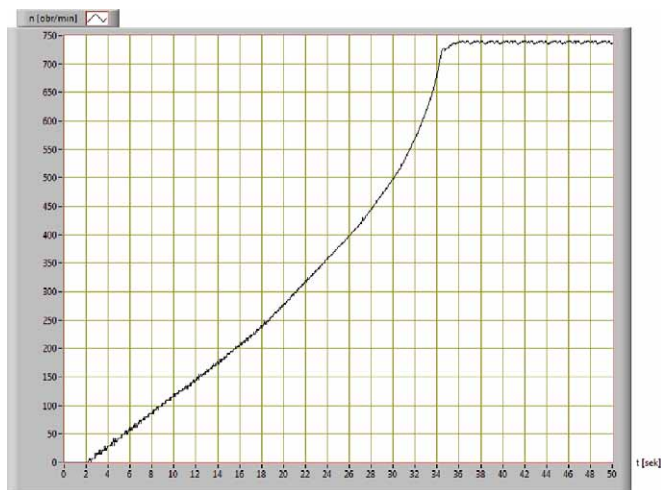




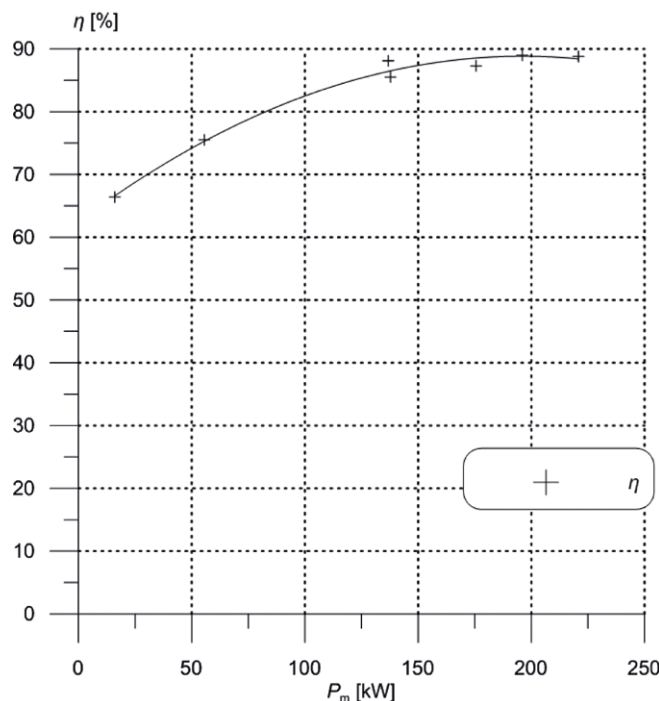
Rys. 7. Przebieg momentu obrotowego w czasie rozruchu



Rys. 9. Przebieg prądu stojana w czasie rozruchu



Rys. 8. Przebieg prędkości obrotowej w czasie rozruchu



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

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

Na rysunku 10 przedstawiono wykres sprawności i poślizgu w funkcji mocy mechanicznej.

## 5. Podsumowanie

Badania przeprowadzono w O/ZWR na wybranych egzemplarzach elektrycznych silników napędowych. Pomiarzy zostały wykonane na maszynach o mocach od 320 kW do 1250 kW, pracujących już ok. 40 lat. W tym czasie były kilkakrotnie 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 znamionowej klasie dokładności 0,2% wartości mierzonej, spełnił swoją rolę. Pracujące maszyny elektryczne można z powodzeniem wyposażyć w czujniki tensometryczne i przebadać. 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 ok. 1,5 godziny, aby poprawnie przygotować system. Najważniejszym etapem, który jednocześnie jest najtrudniejszy i najbardziej pracochłonny, jest przygotowanie powierzchni i naklejenie czujnika tensometrycznego. Czynność ta wymaga dużej czystości, precyzji i cierpliwości.

W ciągu maksymalnie 3 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.

## 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] SZYMANIEC S.: *Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń i stanu łożysk silników indukcyjnych klatkowych w warunkach przemysłowej eksploatacji*, Studia i Monografie. Politechnika Opolska, Opole 2006.
- [3] PACHOLSKI E., LEŚNIK M.: *Eksploatacja silników typu SAS w KGHM Polska Miedź O/ZWR w Polkowicach. Doświadczenia, problemy, działania przyszłościowe*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 1(94)/2012, BOBRME Komel 2012.
- [4] PACHOLSKI E., ISKIERSKI L.: *Analiza wpływu sposobu rozruchu silników napędowych na parametry sieci elektroenergetycznej*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 2(99)/2013, BOBRME Komel 2013.
- [5] Opracowanie nr CS4-050061 *Analiza możliwości modernizacji silników napędowych młynów*. Praca niepublikowana, Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych, BOBRME Komel 2013.
- [6] *Kodeks etyki pracownika naukowego. Komisja do spraw etyki w nauce*, uchwalony przez Zgromadzenie Ogólne Polskiej Akademii Nauk w dniu 13 grudnia 2012 r.
- [7] DECNER A., ISKIERSKI L.: *Zastosowanie metody bezpośredniego pomiaru momentu w napędach dużej mocy*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 1(101)/2014, Komel 2014.

 dr inż. Adam Decner – specjalista badawczo-techniczny, Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, e-mail: a.decner@komel.katowice.pl

inż. Lesław Iskierski – Główny Specjalista ds. infrastruktury technicznej TE, KGHM Polska Miedź SA, e-mail: l.iskierski@khgm.pl

artykuł recenzowany