

Mgr inż. Andrzej SADOWSKI,  
Prof. Bogdan ŻÓŁTOWSKI  
Wydział Inżynierii Mechanicznej  
UTP Bydgoszcz

## BEZINWAZYJNE METODY POMIARU MOMENTU OBROTOWEGO

### Zarys treści

W niniejszym artykule przedstawiono zależności charakteryzujące moment obrotowy wykorzystywany do napędu maszyn. Wyszczególniono celowość monitorowania jego poziomu w maszynach w aspekcie gospodarki energetycznej w celu obniżenia kosztów, a także zwiększenia efektywności napędu maszyn przy jednoczesnym zachowaniu norm bezpieczeństwa. Przedstawiono i scharakteryzowano metody pomiarowe wykorzystujące techniki bezkontaktowe oraz wyznaczono różnice dzielące je od tradycyjnego podejścia do pomiarów momentu obrotowego

**Słowa kluczowe:** moment obrotowy, moc, czujnik tensometryczny, FAST, SAW.

### WSTĘP

Szybkie i dokładne pomiary momentu obrotowego są istotnym elementem licznych procesów technologicznych i mają zastosowanie w wielu dziedzinach współczesnej techniki. Ze względu na koszty producenci maszyn wybierają elementy napędów w coraz to mniejszych rozmiarach i masie, takie jak przekładnie zębate, sprzęgła, silniki i przetworniki - przy jednoczesnych wymaganiach zwiększających ilość przesyłanej energii. Prowadzić to może do powstawania drgań skrętnych, a w ich wyniku do uszkodzeń zmęczeniowych.

Błyskawiczny rozwój napędów, motoryzacji, układów automatyki i przemysłowych systemów przetwarzania danych, powoduje nieustanne zwiększanie wymogów dotyczących dokładności i uniwersalności używanych w tym celu urządzeń pomiarowych.

Celem tego opracowania jest zaprezentowanie metod pomiaru momentu obrotowego umożliwiających wykonywanie pomiarów w sposób bezinwazyjny.

### MOMENT OBROTOWY

Moment, rozumiany jako działanie pary sił stycznych do powierzchni bocznej walca o średnicy  $d$ , powoduje w wyniku elastyczności walca jego skręcanie. Ze względu na fakt, że najczęściej mierzy się moment przenoszony przez wał, a więc wtedy, gdy wał znajduje się w ruchu obrotowym, moment ten nazwano momentem obrotowym. Definicyjna zależność opisująca moment pary sił jest równa:

$$M_s = 2rF = Fd \quad (1)$$

gdzie:

$F$  – siła działająca na wał,

$d$  – średnica wału,

$r$  – promień wału.

Kąt skręcania wału  $\varphi$  jest miarą skręcenia płaszczyzn osiowych wału. Jego wartość jest równa:

$$\varphi = \frac{M_s l}{GI_0} \quad (2)$$

gdzie:

$M_s$  – moment skręcający działający na wał,

$l$  – długość wału,

$G$  – moduł odkształcenia postaciowego zwany modułem Kirchoffa, charakteryzujący właściwości skrętne materiału, wyrażony w  $N/m^2$ ; jest odpowiednikiem modułu Younga  $E_Y$  w przypadku naprężeń liniowych,

$I_0$  – biegunowy moment bezwładności przekroju poprzecznego wału, dla przekroju kołowego równy:

$$I_0 = \frac{\pi d^4}{32} \quad (3)$$

gdzie:

$d$  – średnica wału.

Przyjmuje się, że maksymalny kąt skręcania wału stalowego w zakresie odkształceń sprężystych, wyrażony w radianach ma metr długości wału nie powinien przekroczyć wartości:

$$\varphi_{max} = \frac{\pi}{720} \quad (4)$$

Skręcenie wału o kąt  $\varphi$  jest widocznym efektem działania momentu – niewidocznym dla obserwatora jest pojawienie się naprężeń deformujących element wału. Takie odkształcenie jest wynikiem naprężeń działających na ten element o kierunkach nachylonych do tworzącej walca w przybliżeniu pod kątem  $\pm\pi/4$  [3].

Pomiaru momentu obrotowego dokonuje się w układach energetycznych w szerokim zakresie - od turbin gazowych poczynając, gdzie mierzone momenty dochodzą do 50 kNm, przy prędkościach kątowych rzędu 8000 obr./min., aż do automatów kontrolujących moment zakręcania butelek. Czujniki momentu powszechnie stosuje się w przemyśle motoryzacyjnym do wyznaczania charakterystyki napędowej silnika, w układach wspomagania kierownicy lub sterowania skrzynią biegów, zarówno na etapie projektowania i badania prototypu, jak i podczas eksploatacji gotowego wyrobu. Tymczasem rozwój motoryzacji i dążenie do tworzenia bardziej ekonomicznych i bezpieczniejszych pojazdów wyposażonych

# Logistyka - nauka

w zaawansowane układy sterowania napędem powoduje, że najnowocześniejsze przetworniki momentu obrotowego coraz częściej trafiają nie tylko do pojazdów sportowych, ale i do seryjnie produkowanych pojazdów.

W badaniach maszyn pomiaru momentu obrotowego dokonuje się celem:

a) uzyskania informacji o zmianach momentu obrotowego podczas eksploatacji maszyny - rozruch, bieg jałowy, praca pod obciążeniem; dane te wykorzystuje się m. in. przy doborze sprzęgieł bezpieczeństwa i wałków odbioru mocy;

b) wyznaczenia mocy pobieranej przez maszynę i jej zespoły (wymaga to jednoczesnego pomiaru prędkości obrotowej), co umożliwi dobór mocy silnika napędowego, wyznaczenie mocy biegu jałowego itd.;

c) sprawdzenia poprawności obliczeń wytrzymałościowych wału; znając maksymalną wartość momentu obrotowego przenoszonego przez wał i jego średnicę można wyznaczyć wartości rzeczywistych, maksymalnych naprężeń i porównać je z naprężeniami dopuszczalnymi,

d) uzyskania danych wyjściowych (wartość średnia, amplituda i częstotliwość zmiany naprężeń) do obliczeń sprawdzających trwałość zmęczeniową wału.

## TECHNIKI POMIAROWE

Z uwagi na zasadę pomiaru możliwy jest następujący podział technik pomiaru momentu obrotowego:

### **Pomiar odkształcenia**

- DMS (mostki tensometryczne);
- SAW (powierzchniowa fala akustyczna);
- pośrednie kodowanie magnetyczne;
- FAST (bezpośrednie kodowanie magnetyczne).

### **Pomiar skręcenia**

- transformator różnicowy;
- systemy optyczne;
- dynamometr kwarcowy.

Najprostszą metodą bezpośredniego pomiaru momentu jest tzw. pomiar momentu reakcyjnego, wykonywany głównie w warunkach statycznych, takich jak pomiar momentu rozruchowego silnika z zablokowanym wirnikiem. Realizowane jest to za pomocą czujnika siły przytwierdzonego do dźwigni prostopadłej do osi napędowej, albo przy użyciu

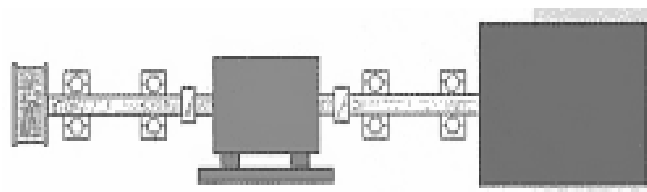
nieruchomego przetwornika momentu obrotowego. Pomiaru takie, pomimo że mogą być bardzo dokładne, wciąż mają ograniczony zakres użyteczności ze względu na konieczność stosowania specyficznych rozwiązań mechanicznych. Dodatkową wadą ograniczającą ich zastosowanie jest występowanie rozbieżności wartości pomiarowych w efekcie występującej bezwładności ciągu mechanicznego. Innym mankamentem tego typu rozwiązań są bardzo duże siły jakie działają na sam przetwornik (rys.1).



**Rysunek 1. Zasada pomiaru bezpośredniego**

Źródło: Naruszewicz W.: Pomiaru momentu obrotowego (3.08.2012) <http://automatykab2b.pl/technika/760-pomiary-momentu-obrotowego>

Z kłopotami z jakimi spotykamy się przy instalacji tradycyjnego momentomierza wałkowego to konieczność stosowania dodatkowych elementów w konstrukcji układu przeniesienia napędu. Poza czujnikiem znaleźć tam możemy niezbędne dla prawidłowej pracy ułożyskowanie części napędowej, ułożyskowanie wału łączącego czujnik z obiektem badań oraz wyraźnie zaznaczone dwa sprzęgła gwarantujące odpowiednią separację od niepożądanych składników mechanicznych skutkujących błędem pomiarowym, co przedstawiono na rysunku 2. Płacić nam przyjdzie w tym przypadku nie tylko za rozbudowę systemu pomiarowego, ale również znacznie gorszą charakterystyką, szczególnie w dziedzinie przebiegów dynamicznych (histereza, powtarzalność, nieliniowość).



**Rysunek 2. Schemat instalacji czujnika momentu obrotowego**

Źródło: Naruszewicz W.: Pomiaru momentu obrotowego (3.08.2012) <http://automatykab2b.pl/technika/760-pomiary-momentu-obrotowego>

Sposoby pomiaru powinny uwzględniać jak najmniejszą ingerencję w układ napędowy w celu nie wprowadzania dodatkowych strat energii. Zastosowanie w czujnikach, poza elementem pomiarowym, różnego rodzaju elementów dodatkowych takich jak: łożyska, uszczelniacze, przeguby oraz sprzęgła ograniczają wielkość przenoszonego momentu

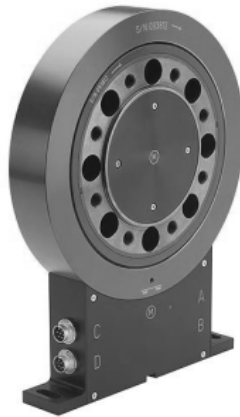
## Logistyka - nauka

i wpływają na zmniejszenie dokładności pomiaru. W związku z tym pomiar powinien być prowadzony bezkontaktowo - w celu uchwycenia zmian oraz niezakłócania strumienia energii w układzie napędowym.

Najbardziej rozpowszechnioną metodą badania momentu obrotowego jest pomiar bezpośredni, w którym przetwornik włączony jest szeregowo w układ mechaniczny i obraca się razem z nim, co przedstawiono na rys.1. Umożliwia to zbieranie danych w każdym niemal miejscu urządzenia podczas jego normalnego cyklu pracy. Metoda ta jest najbardziej skomplikowana i kosztowna, ale daje najszersze możliwości – co w zastosowaniach systemów diagnostyki i monitoringu staje się coraz powszechniejsze.

Konstrukcyjnie czujnik przypomina koło ze szprychami, w którym piasta niewiele różni się średnicą od obręczy, a krótkie cztery szprychy symetrycznie rozmieszczone wokół obwodu pełnią funkcję właściwych czujników. Sposób naklejenia tensometrów oraz budowa tych krótkich belek pomiarowych, pracujących w naprężeniu ścinającym, skutkuje czystym sygnałem obrazującym wartość momentu obrotowego nie obciążonego składnikami pochodzącymi od sił zginania, ściskania i rozciągania, występującymi przy poddawaniu tarczy (a dokładniej zestawu piasta, obręcz) obciążaniu momentem. Sygnał pomiarowy transmitowany jest bezprzewodowo do anteny opasującej tarczę pomiarową ze szczeliną ok.  $2\div 3\text{mm}$ , co całkowicie gwarantuje bezstykową pracę, zapewniając jednocześnie możliwość zasilania układu elektroniki w tarczy pomiarowej.

Dzięki rozwojowi mikroelektroniki możliwe stało się umieszczenie na wale, oprócz samego przetwornika, również połączeń elektrycznych, układów wzmacniania, formowania i bezprzewodowej transmisji sygnału. Pojedyncza, wirująca cewka stosowana jest tylko i wyłącznie jako źródło zasilania czujnika, a sam sygnał przekazywany jest w postaci cyfrowej poprzez zainstalowane na wale złącze podczerwieni lub nadajnik radiowy, co przedstawiono na rys.3. Przetwarzanie sygnałów analogowych na cyfrowe przyniosło wiele korzyści, takich jak zmniejszenie podatności na zakłócenia elektromagnetyczne i wyeliminowanie błędów.

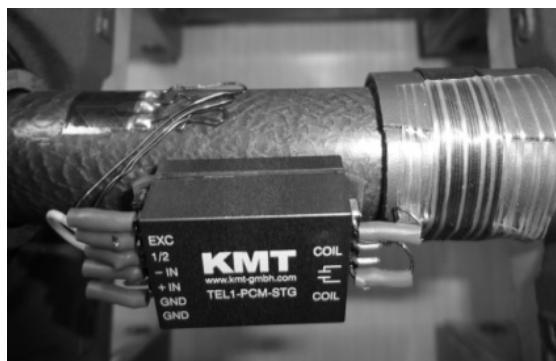


**Rysunek 3. Nowoczesny, bezłożyskowy czujnik wykorzystujący bezprzewodową komunikację z przetwornikiem umieszczonym na wale**

Źródło: Naruszewicz W.: Pomiary momentu obrotowego (3.08.2012) <http://automatykab2b.pl/technika/760-pomiary-momentu-obrotowego>

Zasada działania najczęściej stosowanych przetworników opiera się na pośrednim lub bezpośrednim pomiarze odkształcenia szeregowo zainstalowanego elementu torsyjnego, bądź też na pomiarze deformacji samego wału. Klasyczna i najstarsza konstrukcja bazuje na tensometrach połączonych w mostek Wheatstone'a, które odkształcając się wraz z obciążanym elementem zmieniają swoją rezystancję (rys.4).

Wśród ich zalet omawianego rozwiązania należy wymienić: liniowe charakterystyki przetwarzania, odporność na wibracje i niewielką masę, która ma niebagatelne znaczenie przy dużych prędkościach kątowych.

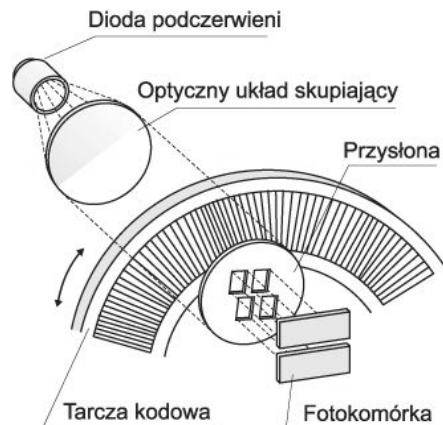


**Rysunek 4. Telemetryczny układ pomiarowy momentu obrotowego z wykorzystaniem tensometru**

Źródło: opracowanie własne

Innym dosyć popularnym i stosowanym od dawna rozwiązaniem, które umożliwia całkowicie bezkontaktowy pomiar momentu obrotowego, jest metoda optyczna. Na elemencie torsyjnym mocuje się dwie tarcze kodowe ze szczelinami umieszczonymi na osiach. Pod

wpływem siły odkształcającej wał wzajemna pozycja tarcz ulega zmianie, a przemieszczenie to jest mierzone za pomocą układów fotokomórek. Ilość światła, jaką przepuszcza taka przysłona, jest proporcjonalna do odkształcenia wału (rys.5).



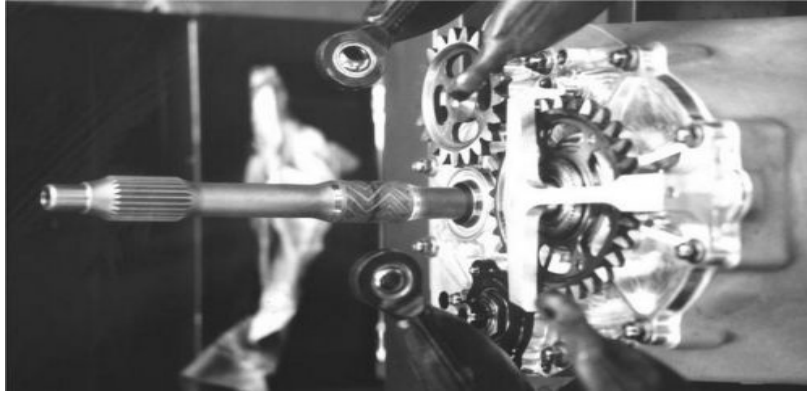
**Rysunek 5. Zasada optycznej metody pomiaru kąta skręcenia wału**

Źródło: Naruszewicz W.: Pomiar momentu obrotowego (3.08.2012) <http://automatykab2b.pl/technika/760-pomiary-momentu-obrotowego>

Metoda ta polecana jest do pomiarów elementów maszynowych o najwyższych prędkościach obrotowych, co jest możliwe dzięki całkowitemu wyeliminowaniu łożysk i innych podzespołów mechanicznych. Omawianą metodę wykorzystuje się również do pomiaru bardzo dużych momentów skręcających, gdyż brak łożysk i sama specyfika konstrukcji pozwala na budowanie elementów torsyjnych o dowolnej wytrzymałości.

Metodą pomiarową zdobywającą coraz większą popularność, jest technika FAST. U jej podstaw leży wykorzystanie zjawiska magnetostrykcji, polegające na zmianie naprężenia materiału w zależności od stanu jego namagnesowania. W konstrukcji czujnika wykorzystano zjawisko odwrotne, tj. zmianę orientacji domen magnetycznych w materiale, w zależności od naprężeń skręcających, jakim został on poddany.

Dzięki zwartej budowie i wysokiej odporność, systemy te charakteryzują się dużą odpornością na warunki środowiskowe, takie jak: zanieczyszczenie, wibracje i wysokie temperatury, a jednocześnie są najmniejszymi i najtańszymi podzespołami tej klasy urządzeń. Doskonale nadają się do stosowania w miejscach, w których klasyczne czujniki w ogóle nie mogłyby pracować. Przykładem takich aplikacji mogą być niewielkie ręczne elektronarzędzia lub wnętrza silników spalinowych, co przedstawiono na rys. 6.



**Rysunek 6. Widok czujnika momentu wykonanego w technologii FAST**

Źródło: Idziak P., Antczak M.: Magnetostrykcyjny przetwornik momentu obrotowego z obwodem magnetycznym wykonany z kompozytu proszkowego. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 62, Wrocław 2008.

Innym rozwiązaniem, jest stosowanie technologii SAW (Surface Acoustic Wave), która opiera się na pomiarze zmian częstotliwości rezonansowej czujników umieszczonych na danym elemencie i pobudzanych falami akustycznymi o bardzo wysokiej częstotliwości. Czujniki SAW mają wiele zalet, takich jak możliwość dokonywania pomiarów całkowicie bezdotykowych, nieduży pobór mocy, pomijalną bezwładność, niski koszt i prostą konstrukcję. Charakteryzują się one również bardzo dużą rozdzielczością, dokładnością i odpornością na zaburzenia elektromagnetyczne [2].

### **PODSUMOWANIE**

Pomimo dziesięcioleci doświadczeń i wdrażania wielu nowych rozwiązań technicznych, pomiary momentu obrotowego nadal wiążą się z koniecznością stosowania wyrafinowanych i nierzadko kosztownych rozwiązań elektromechanicznych. Większość obecnie dostępnych czujników to dopracowane do perfekcji, aczkolwiek klasyczne konstrukcje, pojawiają się także nowe metody pomiarowe. Dzięki postępowi w dziedzinie inżynierii materiałowej i elektroniki nowe rozwiązania dominują w wybranych zastosowaniach, czyniąc pomiary szybszymi i dokładniejszymi.

Opracowano w ramach projektu „Techniki wirtualne w badaniach stanu, zagrożeń bezpieczeństwa i środowiska eksploatowanych maszyn” **WND-POIG.01.03.01-00-212/09**. Realizowanego przez Zakład Pojazdów i Diagnostyki, Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy



## NON-CONTACT MEASUREMENT METHODS OF TORQUE

**Summary:** In this paper depending on the torque used to drive machines. Detailed monitoring of its level of desirability of the machines in the aspect of energy management to reduce costs and drive efficiency while maintaining the machinery safety standards. Presents the measurement methods and characterized using non-contact technique and determination of the differences between them and the traditional approach for measuring torque.

**Keywords:** torque, power, strain gauge, FAST, SAW.

### LITERATURA

1. Idziak P., Antczak M.: Magnetostrykcyjny przetwornik momentu obrotowego z obwodem magnetycznym wykonanym z kompozytu proszkowego. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 62, Wrocław 2008.
2. Kawalec A.: Zastosowanie podzespołów z akustyczną falą powierzchniową do przetwarzania sygnałów. Biuletyn WAT, vol. LV, nr 1, Warszawa 2006.
3. Miłek M.: Metrologia elektryczna wielkości nieelektrycznych. Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra 2006.
4. Naruszewicz W.: Pomiary momentu obrotowego (3.08.2012) <http://automatykab2b.pl/technika/760-pomiary-momentu-obrotowego>.
5. Materiały firmy Wobit (5.04.2012): <http://wobit.pl/index.php?site=applications&type=11&details=92>.
6. Tylicki H.: Optymalizacja procesu prognozowania stanu technicznego pojazdów mechanicznych. Rozprawa habilitacyjna nr 86, ATR Bydgoszcz, 1999.
7. Tylicki H., Żółtowski B.: Urządzenia elektryczne pojazdów samochodowych. PWSZ, Piła 2011.
8. Tylicki H., Żółtowski B.: Rozpoznawanie stanu maszyn. ITE - PIB, Radom 2010 s.188.
9. Tylicki H., Żółtowski B.: Terra-technologie eksploatacji pojazdów mechanicznych. Wyd. ATR, Bydgoszcz 2005. s.260.
10. Żółtowski B.: Badania dynamiki maszyn. ISBN – 83-916198-3-4, Bydgoszcz, 2002.
11. Żółtowski B., Cempel C. (red.): Inżynieria diagnostyki maszyn. ITE Radom, 2004.
12. Żółtowski B., Niziński S.: System informatyczny eksploatacji pojazdów mechanicznych. Wyd. PWSZ, Piła 2004 (s.234).

## Logistyka - nauka

13. Żółtowski B., Tylicki H.: Wybrane problemy eksploatacji maszyn. PWSZ, Piła 2004.
14. Żółtowski B., Tylicki H.: Elementy diagnostyki technicznej maszyn. PWSZ, Piła 2008.
15. Żółtowski B., Castaneda Heredia L.F.: Estudio de explotación de vehículos ferroviarios. EAFIT University, Colombia, 2009 s.298.
16. Żółtowski B., Castaneda Heredia L.F.: Badania pojazdów szynowych. Transport. Wydawnictwo UTP, Bydgoszcz, 2009 s.220.
17. Żółtowski B.: Podstawy diagnozowania maszyn. UTP, Bydgoszcz 2011s.200.
18. Żółtowski B., Castaneda Heredia L.F.: Bases del diagnostico tecnico de maquinas. EAFIT University, Colombia, 2010 s.233.
19. Żółtowski B., Niziński S.: Modelowanie procesów eksploatacji. ITE - PIB, Radom 2010.