

Maciej BODNICKI  
Instytut Konstrukcji Przyrządów  
Precyzyjnych i Optycznych  
Politechnika Warszawska

## MOMENTOMIERZE OBROTOWE W BADANIACH UKŁADÓW NAPĘDOWYCH URZĄDZEŃ PRECYZYJNYCH

Streszczenie. Przedstawiono specyfikę stosowania momentomierzy obrotowych w badaniach układów napędowych urządzeń precyzyjnych. Zaprezentowano strukturę takiego momentomierza. Możliwe jest wykorzystywanie symulacji komputerowej przy ocenie przydatności momentomierza do określonych sytuacji pomiarowych. Przedstawiono przykładowy eksperyment symulacyjny.

## ROTARY TORQUE METERS IN PRECISION DRIVE SYSTEMS' TESTING

Summary. Specificity of applying of rotary torque meters for testing precision drive systems is presented. The structure of rotary torque meter is described. There is the possibility of using of computer simulation in suitability of torque meter for actual testing conditions assessment. Example of simulation test is presented.

## ВРАЩАТЕЛЬНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ МОМЕНТА В ИССЛЕДОВАНИИ ТОЧНЫХ ПРИВОДНЫХ СИСТЕМОВ

Резюме. Представлено специфику применения вращательных измерителей момента в исследовании приводных систем точных приборов. Показано структуру такого измерителя. Возможно использовать компьютерную симуляцию при оценке пригодности измерителя для определенных исследовательских ситуаций. Представлен пример симуляции.

### 1. WSTĘP

Pomiary momentu obrotowego stanowią ważny dział diagnostyki układów napędowych urządzeń techniki precyzyjnej. Specyfika badań powoduje, że niezbędne staje się stosowanie specjalnych metod i aparatury. Można przyjąć, że górne zakresy mierzonych momentów wynoszą do ok. 2 Nm. Małe masowe momenty bezwładności wirujących części obiektów badań powodują konieczność uwzględniania wpływu dołączanych przetworników (występowania interakcji obiektu i stanowiska badawczego), zaś pasyżnicze momenty strat mogą być porównywalne z mierzonymi wielkościami. Problemy te stają się szczególnie istotne przy prowadzeniu pomiarów dynamicznych.

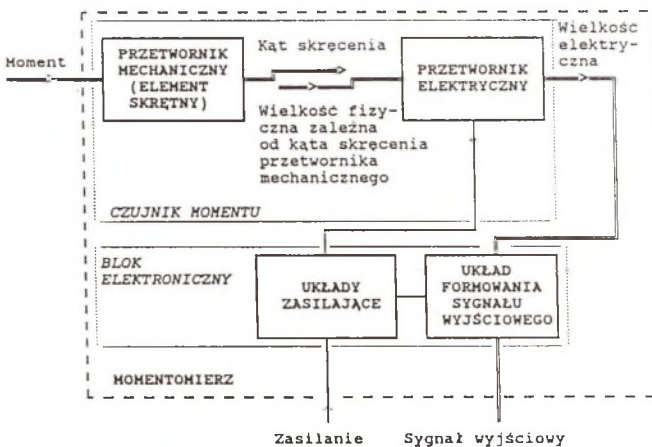
W wielu sytuacjach pomiarowych korzystne (a często niezbędne) jest użycie momentomierza obrotowego, włączanego w badany układ w różnych miejscach łańcucha funkcyjnego: zespół napędowy - mechanizm napędzany - obciążenie.

## 2. MOMENTOMIERZE OBROTOWE

Strukturę momentomierza obrotowego przedstawiono na rys.1. Urządzenie tego typu zawiera czujnik momentu typu skrętnego. Przetwornik mechaniczny czujnika (element skrętny) stanowi fragment wirującej części momentomierza. Kąt skręcenia przetwornika mechanicznego jest proporcjonalny do mierzonego momentu. Sygnał pomiarowy jest generowany przez przetwornik elektryczny, który może być umieszczony w części wirującej (zachodzi wówczas konieczność transmisji sygnału) lub w części nieruchomej. Sygnał z przetwornika elektrycznego podlega przetworzeniu i wzmocnieniu. Ze względu na przydatność momentomierza do zastosowania w zautomatyzowanych lub skomputeryzowanych systemach pomiarowych sygnał wyjściowy powinien być elektrycznym sygnałem analogowym (napięciowym) lub cyfrowym (np. w standardzie TTL).

Momentomierze obrotowe o zakresach pomiarowych do 2 Nm są produkowane tylko przez nieliczne renomowane firmy światowe. Urządzenia te należą przeważnie do jednego z trzech typów [1]:

- fazoróżnicowych (cyfrowych) - z sygnałem powstającym w części stacjonarnej,
- tensometrycznych - z transmisją sygnału z wałka,
- indukcyjnych - z transmisją sygnału z wałka.

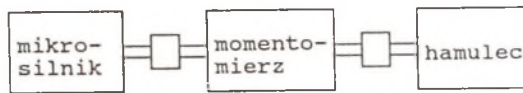


Rys. 1. Struktura momentomierza obrotowego  
Fig. 1. Structure of rotary torque meter

### 3. PRZYKŁAD MODELOWANIA UKŁADU NAPĘDOWEGO Z MOMENTOMIERZEM OBROTOWYM

Włączenie momentomierza obrotowego do układu napędowego powoduje zmianę struktury badanego obiektu. W przypadku urządzeń techniki precyzyjnej staje się to szczególnie istotne. Ze względu na znaczące wartości masowego momentu bezwładności zespołów wirujących w większości typów momentomierzy (np. w przypadku transmisji sygnału z wałka za pośrednictwem transformatorów) odpowiedni zakres pomiarowy może być niewystarczającym argumentem stanowiącym o przydatności przyrządu.

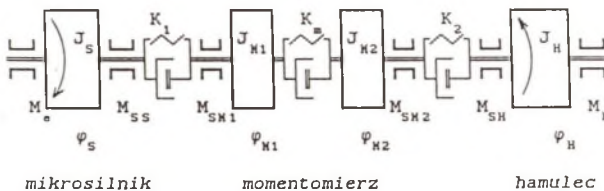
Metodą pozwalającą wstępnie ocenić zasadność zastosowania określonego momentomierza do konkretnej sytuacji pomiarowej może być modelowanie struktury mechanicznej powstałego układu. Pierwszym etapem jest opracowanie modelu, następnie zaś oprogramowania umożliwiającego otrzymywanie w wyniku symulacji komputerowej chwilowych wartości kąta skręcenia elementu skrętnego momentomierza. Prezentowany przykład dotyczy układu przedstawionego na rys. 2 - stosowanego np. w badaniach mikrosilników (wyznaczanie momentu obrotowego rozwijanego przez mikrosilnik metodą z zadawaniem momentu hamującego).



Rys. 2. Rozpatrywany układ z momentomierzem obrotowym  
Fig. 2. Analysed system with rotary torque meter

Model zbudowano zgodnie z zasadą Hamiltona (wariacyjną zasadą najmniejszego działania [3,5]), skutecznie stosowaną do opisu układów elektromechanicznych [4]. Modelowany układ stanowi system łańcuchowy złożony z elementów sprężystych. Przyjęto założenie, że system składa się z elementów o parametrach skupionych, tzn. że jest zbudowany z nieodkształcalnych elementów (brył) charakteryzujących się określonym masowym momentem bezwładności oraz bezmasowych elementów sprężystych. Tłumienie jest wprowadzane przez opory ruchu zależne od prędkości obrotowych brył. Współrzędnymi uogólnionymi są położenia kątowe poszczególnych elementów nieodkształcalnych. Dalsze uproszczenia dotyczą problemów szczegółowych (przede wszystkim współosiowości połączeń urządzeń i właściwości sprzęgieł) oraz przyjętego modelu mikrosilnika.

Schemat systemu przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Model systemu (oznaczenia w tekście)  
Fig. 3. Model of the system

Przyjęto następujące oznaczenia:

- $\varphi_S, \varphi_{M1}, \varphi_{M2}, \varphi_H$  - położenia kątowe elementów nieodsztacanych względem nieruchomego układu odniesienia (współrzędne uogólnione);
- $K_1, K_M, K_2$  - stałe sprężyste bezmasowych elementów skręcanych (połączenia silnik -momentomierz, elementu skrętnego momentomierza, połączenia momentomierz-hamulec);
- $J_S, J_{M1}, J_{M2}, J_H$  - zredukowane masowe momenty bezwładności elementów nieodsztacanych (części wirujących: silnika, "lewej" i "prawej" strony momentomierza, hamulca);
- $M_{SS} = f(\varphi_S), M_{SM1} = f(\varphi_{M1}), M_{SM2} = f(\varphi_{M2}), M_{SH} = f(\varphi_H)$  - momenty strat wynikające m.in. z pracy łożysk;
- $M_c$  - moment "w szczelinie" silnika;
- $M_h$  - moment hamujący hamulca.

Program symulacyjny zapisano w języku AMIL. Parametry i stałe przyjmowano na podstawie danych katalogowych i pomiarów wykonywanych w IKPPiO PW.

Wykorzystując przygotowane oprogramowanie prowadzono symulacyjne badania przy zmienianych cechach konstrukcyjnych momentomierza (przede wszystkim różnych sztywnościach elementów skrętnych i bezwładnościach zespołów wirujących). Jako sygnał z momentomierza przyjmowano iloczyn kąta skręcenia odcinka pomiarowego i sztywności skrętnej odcinka.

Na rys. 4 zamieszczono przykładowe wyniki eksperymentów symulacyjnych - przedstawiające dwa pomiary w jednakowych warunkach (hamowanie momentem siły o wartości 30 Nmm po czasie 0,2 s od rozpoczęcia rozruchu mikrosilnika prądu stałego typu PBM-40), ale przy zamienionych stronami położeniach momentomierza w układzie. Jak widać, dla zastosowanego momentomierza odznaczającego się różnymi masowymi momentami bezwładności "lewej" i "prawej" części wirnika (spotykane w momentomierzach z transmisją sygnału z części wirującej do stacjonarnej), takie przedstawienie oznacza istotną zmianę powstającego sygnału.

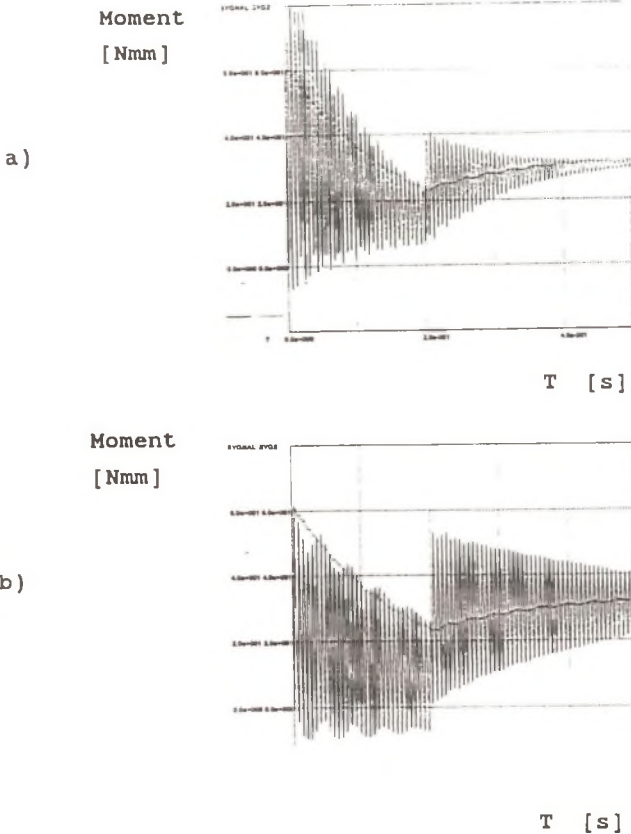
#### 4. PODSUMOWANIE

W IKPPiO PW prowadzone są prace, których celem jest sporządzenie wytycznych dla projektantów złożonych systemów diagnostycznych, w których zostaje wykorzystany tor pomiarowy, zawierający momentomierz obrotowy. Rozwijane jest oprogramowanie symulacyjne tak, aby uwzględniało pozostałe elementy struktury pomiarowej momentomierza, przetwarzające skręcenie odcinka pomiarowego (zwłaszcza przetworniki elektryczne różnych typów).

Ważną częścią prowadzonych prac jest również konstruowanie oryginalnych (opatentowanych) optoelektronicznych momentomierzy obrotowych, specjalnie przydatnych do rozpatrywanych zastosowań. Momentomierze te charakteryzują się przede wszystkim bardzo małym masowym momentem bezwładności wirnika - ok. 15 gcm<sup>2</sup>, przy granicy zakresu pomiarowego dobieranej z przedziału: od 0,05 Nm do 2 Nm. Ostatnia wersja - momentomierze OPM/Z - wyposażone są również w wewnętrzny przetwornik prędkości obrotowej wałka [6].

Połączenie prac teoretycznych i konstrukcyjnych umożliwia wykonywanie licznych eksperymentów z zastosowaniem momentomierzy obrotowych. Prowadzone są m.in.:

- badania zmienności momentu chwilowego drobnomodułowych przekładni zębatych,
- badania właściwości mikrosilników elektrycznych prądu stałego i silników skokowych,
- pomiary momentu serwomechanizmów napędzanych mikrosilnikami.



Rys. 4. Wyniki symulacji pomiarów momentomierzem o różnych wartościach masowych momentów bezwładności "lewej" i "prawej" części zespołu wirującego  
 $SYG2 = K_M(\varphi_{M1} - \varphi_{M2})$  - sygnał z momentomierza, SYG1 - moment "w szczelinie" mikrosilnika

a)  $J_{M1} = 50 \text{ gcm}^2$ ,  $J_{M2} = 150 \text{ gcm}^2$ ; b)  $J_{M1} = 150 \text{ gcm}^2$ ,  $J_{M2} = 50 \text{ gcm}^2$

Fig. 4. Simulation results of the measurements by torque meter with different values of moment of inertia "left" and "right" parts' of the rotary unit  
 $SYG2 = K_M(\varphi_{M1} - \varphi_{M2})$  - output of the torque meter, SYG1 - "air gap" torque of DC micromotor

a)  $J_{M1} = 50 \text{ gcm}^2$ ,  $J_{M2} = 150 \text{ gcm}^2$ ; b)  $J_{M1} = 150 \text{ gcm}^2$ ,  $J_{M2} = 50 \text{ gcm}^2$

## LITERATURA

- [1] Bodnicki M.: Application of rotary optoelectronic torque meter in mechatronic drive system testing procedures. International Seminar "Dynamical and Strength Analysis of Driving Systems" Svratka, 1993, ss.26-30
- [2] Bodnicki M.: Symulacyjne badania mechatronicznego układu napędowego zawierającego momentomierz obrotowy. Materiały III Sympozjum "Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych", Krynica 21-25.09.1993
- [3] Gutowski R., Świetlicki W.A.: Dynamika i drgania układów mechanicznych. PWN, Warszawa 1986
- [4] Karpiński S., Majewski T.: Zastosowanie symulacji komputerowej do badania dynamiki układu elektromechanicznego. Materiały Sympozjum MECHATRONIKA'92, WPW, Warszawa 1992, ss.122-124
- [5] Szklarski L., Jaracz K.: Wybrane zagadnienia dynamiki napędów elektrycznych. PWN, Warszawa 1986
- [6] Opracowanie typoszeregu optoelektronicznych momentomierzy nowej generacji. Sprawozdanie z realizacji Grantu KBN nr 8 0386 9101. Praca niepublikowana, IKPPIO PW. Warszawa 1993.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jan Kosmol

Wpłynęło do Redakcji w grudniu 1993 r.

**Abstract**

There is a specificity of measurement of torque in precision drive systems testing procedures. Rotary torque meters designed for these applications should meet certain requirements. The structure of rotary torque meter contains: torsion member (mechanical transducer), electrical transducer and electronic unit (see Fig. 1) [1]. Rotary torque meters rated below 2 Nm are manufactured by very few, well renowned companies in the world. These instruments usually belong to one of the following three types: phase differential (digital), tensometric and induction type. Since the drive system under the test will certainly be influenced by the action of the rotary torque meter, actual measuring configuration of this system must be considered. There is the good possibility of using of computer simulation in suitability of torque meter for actual testing conditions assessment.

Presented example applies to drive system shown on Fig 2. Mathematical model considering dynamic features of the system was developed basing on Hamilton's principle [3,4,5] (see Fig.3). Computer simulation is used to determine instantaneous values of the angle of twist of mechanical transducer installed in the torque meter [2]. Simulation tests, in which parameters of the meter transducers are suitably adjusted, proved impact of structural features of the torque meter on the output signal. For example change of position of torque meter, with different values of moment of

inertia "left" and "right" parts' of the rotary unit, gives change of output (see Fig 4).

The research works on application of the rotary torque meters for testing precision drives are carried out in IKPPIO PW. New approach to measurement of torque has been created with new optoelectronic torque meters (OPM type), particularly suitable for the applications in question [6]. The evolution of software for simulation tests covers the other elements of the output processing chain within the torque meter (specially various types of electrical transducers).