

PROBLEMY NIEKONWENCJONALNYCH UKŁADÓW ŁOŻYSKOWYCH
Łódź, 12 – 14 maja 1999 r.

Jadwiga Janowska, Waldemar Oleksiuk
Instytut Mikromechaniki i Fotoniki,
Politechnika Warszawska

METROLOGICZNE WŁASNOŚCI SYSTEMU BADAWCZEGO

SŁOWA KLUCZOWE:

analiza metrologiczna toru pomiarowego stanowiska badawczego, wzorcowanie toru pomiarowego

STRESZCZENIE

W referacie przedstawiono sposób przeprowadzania analizy metrologicznej torów pomiarowych stanowiska badawczego na przykładzie toru pomiaru momentu tarcia w badaniach miniaturowych łożysk ślizgowych

WPROWADZENIE

Podstawowym wymaganiem, jakie powinno spełniać stanowisko do przeprowadzania badań tribologicznych, jest wierne odtwarzanie warunków pracy tribosystemu (np. czopa z panewką). Otrzymane wyniki badań będą wówczas wiarygodnym źródłem informacji o rzeczywistych zjawiskach zachodzących w badanym węźle.

Dokładność i wiarygodność wyznaczania poszczególnych parametrów czy charakterystyk tribosystemu zależy z jednej strony od przyjętych metod badań, z drugiej zaś od metrologicznych własności wykorzystywanych torów pomiarowych stanowiska badawczego. Konieczne jest więc przeprowadzenie wzorcowania wszystkich układów stanowiska badawczego lub dokonanie analizy metrologicznej torów pomiarowych stanowiska.

Przeprowadzanie analizy metrologicznej torów pomiarowych stanowiska badawczego zostanie omówione na przykładzie toru pomiaru momentu tarcia stanowiska do badania miniaturowych łożysk ślizgowych pracujących przy zmiennych w czasie wartościach prędkości poślizgu i nacisku.

W ocenie metrologicznych własności toru pomiarowego stanowiska badawczego uwzględniono następujące zagadnienia:

- budowę toru pomiarowego (budowa poszczególnych bloków i ich parametry),
- równanie pomiaru (napisane przy założeniu, że tor pomiarowy zbudowany jest z liniowych bloków przetwarzania i traktując wartość mierzoną jako wynik pomiaru pośredniego [5]),

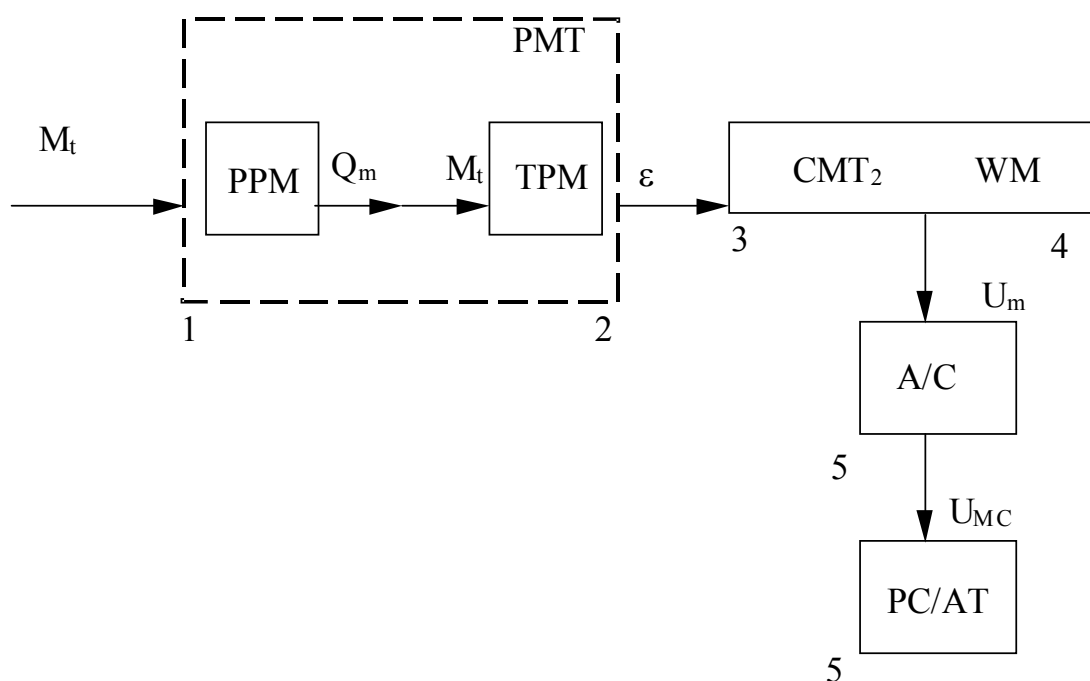
- wzorcowanie toru pomiarowego:
- metoda wzorcowania [6]
- opracowanie wyników wzorcowania [7];
- obliczenie współczynników równania pomiaru [7];
- wyznaczenie błędu pomiaru wielkości mierzonej [7].

Symbole oznaczeń błędu względnego, błędu bezwzględnego, czułości i innych parametrów przyjęto zgodnie z literaturą [4].

WYZNACZANIE METROLOGICZNYCH WŁASNOŚCI TORÓW POMIAROWYCH STANOWISKA BADAWCZEGO - TOR POMIAROWY MOMENTU TARCIA

1. OPIS BUDOWY TORU POMIAROWEGO

Na rys.1. przedstawiono schemat blokowy toru pomiarowego momentu tarcia stanowiska do badania miniaturowych łożysk ślizgowych.



Rys.1. Schemat blokowy toru pomiaru momentu tarcia; PMT – przetwornik momentu tarcia, 1 – PPM przetwornik przenoszenia momentu, 2 – TPM tensometryczny przetwornik momentu, 3 – CMT₂ cyfrowy mostek tensometryczny, 4 – WM wzmacniacz napięcia, 5 – A/C przetwornik analogowo-cyfrowy, 6 – PC/AT komputer, M_t – mierzony moment tarcia w łożysku ślizgowym, Q_m – siła działająca na sprężynę TPM, M_b – moment działający na sprężynę TPM, ε – odkształcenie sprężyny TPM, U_m – wyjściowe napięcie z układu CMT₂WM, U_{MC} – liczbowa reprezentacja zmierzonego napięcia

Po zadaniu żądanych wartości prędkości poślizgu i nacisku w łożysku ślizgowym (stanowisko do badania miniaturowych łożysk ślizgowych [2]) ramka, zabierana momentem tarcia, obróci się. Kulka, umieszczona w ramce, spowoduje odkształcenie sprężyny płaskiej tensometrycznego przetwornika momentu tarcia TPM. Sygnał z przetwornika momentu tarcia PMT (rys.1.) przekazywany jest na wyjście cyfrowe mostka tensometrycznego CMT i dalej na wzmacniacz układu pomiaru momentu tarcia WM. Sygnał ten podawany jest następnie na wejście karty pomiarowej A/C (przetwornik analogowo-cyfrowy) i zapisywany w pamięci komputera.

1.1. PRZETWORNIK MOMENTU TARCIA

Przetwornik momentu tarcia PMT, przedstawiony na rys.1 , składa się z przetwornika przenoszenia momentu PPM i tensometrycznego przetwornika momentu TPM wykonanego w IMiF PW.

Czułość przetwornika przenoszenia momentu K_{PPM} [4] dana jest wzorem:

$$K_{PPM} = M_b / M_t = 2 \cdot b / a \quad (1)$$

a błąd wyznaczenia czułości (traktując K_{PPM} jako wynik pomiaru pośredniego [5]) wynosi:

$$\delta_{K_{PPM}} = \sqrt{\left(\frac{\partial K_{PPM}}{\partial b}\right)^2 \cdot \delta_b^2 + \left(\frac{\partial K_{PPM}}{\partial a}\right)^2 \cdot \delta_a^2} \quad (2)$$

Podstawiając do wzorów (1) i (2) wartości: $a = 26$ mm, $b = 52$ mm oraz przyjęte wartości błędów ich wyznaczenia: $\delta_a = 0.1$ mm, $\delta_b = 0.1$ mm, czułość przetwornika przenoszenia momentu równa jest: $K_{PPM} = 4$, zaś błąd jej wyznaczenia wynosi: $\delta_{K_{PPM}} = 0.0172$

1.2. CYFROWY MOSTEK TENSOMETRYCZNY ZE WZMACNIACZEM NAPIĘCIA

W torze pomiarowym użyto cyfrowego mostka tensometrycznego typu CMT-831 (produkcji Spółdzielni Techno-Mechanik Gdańsk) z automatycznym równoważeniem składowej pojemnościowej. Mostek CMT-831 przeznaczony jest do pomiaru relatywnie małych zmian impedancji w rezystywnych i indukcyjnych układach mostkowych. Przystosowany jest do współpracy z przetwornikami tensometrycznymi, termorezystancyjnymi oraz indukcyjnymi. Przeznaczony jest do pomiaru wielkości statycznych i dynamicznych w zakresie do 500 Hz. Może pracować jako urządzenie autonomiczne lub jako jednostka funkcjonalna wielopunktowego systemu pomiarowego. Wzmacniacz napięcia zbudowano na bazie wzmacniacza operacyjnego.

Czułość oraz błąd wyznaczenia czułości układu mostka ze wzmacniaczem napięcia, wyznaczone na podstawie przeprowadzonego wzorcowania, wynoszą:

$$K_{CMT>} = 0.9183 \text{ V/mN} \cdot \text{m} \quad \delta_{K_{CMT>}} = 0.0023 \text{ V/mN} \cdot \text{m}$$

Całkowity błąd przetwarzania mostka tensometrycznego można przyjąć, zgodnie z danymi technicznymi mostka, jako nie przekraczający $\delta_{CMT} = 3$ $\mu\text{m/m}$, co przy zakresie pomiarowym $z = 2000$ $\mu\text{m/m}$ daje błąd względny $\gamma_{CMT} = 0.15\%$. Natomiast błąd względny wzmacniacza oszacowano na $\gamma_{>} = 0.1\%$. Zatem błąd względny całego układu „CMT,>”, można wyznaczyć ze wzoru [4]:

$$\gamma_{CMT>} = \sqrt{\gamma_{CMT}^2 + \gamma_{>}^2} \quad (3)$$

Dla podanych wcześniej wartości błędów względnych cyfrowego mostka tensometrycznego oraz wzmacniacza napięcia błąd względny tego układu wynosi: $\gamma_{CMT>} = 0.18\%$.

Maksymalny błąd wskazań cyfrowego mostka tensometrycznego ze wzmacniaczem napięcia wynosi:

$$\delta_{CMT>} = \gamma_{CMT>} \cdot M_{b_{\max}} \quad (4)$$

gdzie

$$M_{b_{\max}} = U_{m_{\max}} / K_{\text{CMT}} \quad (5)$$

jest maksymalnym momentem jaki można przyłożyć na wejście tego układu.

Dla: $U_{m_{\max}} = 10 \text{ V}$ maksymalny moment wynosi: $M_{b_{\max}} = 10/0.9183 \cong 10 \text{ mN} \cdot \text{m}$,
co daje maksymalny błąd wskazań układu: $\delta_{\text{CMT}} = 0.18\% \cdot 10 \text{ mN} \cdot \text{m} = 0.018 \text{ mN} \cdot \text{m}$

1.3. PRZETWORNIK ANALOGOWO-CYFROWY

Przetwornik analogowo-cyfrowy stanowi jeden z bloków funkcjonalnych modułu kontrolno-pomiarowego LC-011-1612 firmy Ambex. Moduł ma postać karty umieszczonej w gnieździe na głównej płycie komputera. Producent wykorzystał 12 bitowy przetwornik AD 574A KN uzyskując podział zakresu na 4096 działek. Do obsługi stanowiska wybrano zakres napięć wejściowych $0 \div 10 \text{ V}$, co dało rozdzielczość pomiarową przetwornika wynoszącą 2.441 mV/dz . Czułość przetwornika wynosi $K_{A/C} = 0.4096 \text{ dz/mV}$ lub $K_{A/C} = 1 \text{ V/V}$, natomiast błąd liniowości wraz z błędem przetwarzania nie jest większy niż $\delta_{A/C} = 1 \text{ dz} = 2.44 \text{ mV}$.

1.4. KOMPUTER

Kartę zainstalowano w komputerze klasy IBM PC/AT z zegarem 33/16 MHz.

2. RÓWNANIE POMIARU

Tor pomiarowy zbudowany jest z liniowych bloków przetwarzania, dlatego też przyjęto, że mierzony moment tarcia M_t będzie wyznaczony o zależność:

$$M_t = K_M \cdot (U_{MC} - U_{OM}) \quad (6)$$

w której: K_M [$\text{mN} \cdot \text{m/V}$] - stała przetwarzania toru, U_{MC} [V] - zmierzone przez komputer napięcie wyjściowe toru pomiarowego odpowiadające M_t , U_{OM} [V] - zmierzone przez komputer napięcie odpowiadające $M_t = 0$.

Traktując M_t jako wynik pomiaru pośredniego można obliczyć błąd wyznaczenia momentu korzystając ze wzoru [5], w którym: δ_{K_M} - błąd wyznaczenia współczynnika kierunkowego K_M (współczynnika przetwarzania), $\delta_{U_{MC}}$ - sumaryczny błąd przetwarzania momentu na napięcie, $\delta_{U_{OM}}$ - błąd wyznaczenia przesunięcia (napięcia zerowego U_{OM}).

$$\delta_{M_t}^2 = \left(\frac{\partial M_t}{\partial K_M} \right)^2 \cdot \delta_{K_M}^2 + \left(\frac{\partial M_t}{\partial U_{MC}} \right)^2 \cdot \delta_{U_{MC}}^2 + \left(\frac{\partial M_t}{\partial U_{OM}} \right)^2 \cdot \delta_{U_{OM}}^2 \quad (7)$$

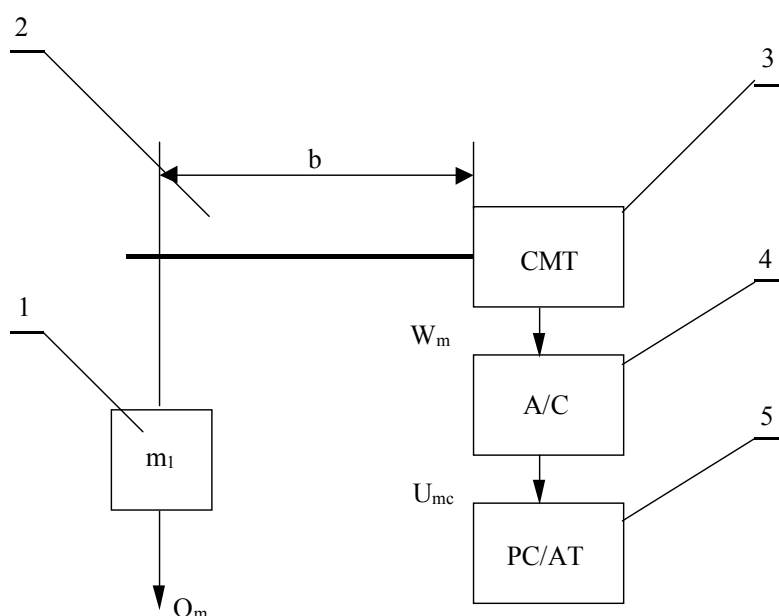
Wyznaczenie statycznych własności metrologicznych toru pomiarowego objęło określenie współczynników w równaniu (6) oraz błędu δ_{M_t} (7).

W celu wyznaczenia współczynników równania (6) przeprowadzono wzorcowanie toru pomiarowego.

3. METODA WZORCOWANIA

Wzorcowanie polegało na zadawaniu obciążenia (o wartościach z zakresu dopuszczalnego dla przetwornika) na sprężynę płaską przetwornika momentu tarcia i rejestrowaniu odpowiadających mu wartości napięcia wyjściowego modułu pomiarowego U_{mc} oraz wskazań W_m cyfrowego mostka tensometrycznego typu CMT-831. Schemat układu do wzorcowania toru pomiaru momentu tarcia pokazano na rys.2.

Obciążenie zadawane było przez zawieszanie odważników technicznych m_1 na uchwycie sprężyny płaskiej przetwornika momentu, przytwierdzonym w miejscu działania kulki (przekazania momentu). Wartości obciążenia sprężyny przetwornika zostały przeliczone na wartości momentu tarcia M_t . Do rejestracji wyników wzorcowania wykorzystano program komputerowy TVTryb.



Rys.2. Wyznaczanie toru pomiarowego momentu tarcia – schemat 1 - m_1 odważnik, 2 – sprężyna płaska, 3 – CMT, > cyfrowy mostek tensometryczny ze wzmacniaczem, 4 – A/C przetwornik analogowo-cyfrowy, 5 – komputer, Q_m - siła działająca na sprężynę, U_{mc} - wartość napięcia wyjściowego modułu pomiarowego, W_m – wskazanie mostka tensometrycznego

3.1. OPRACOWANIE WYNIKÓW WZORCOWANIA

Zarejestrowano wyniki wzorcowania, które w postaci tabel przedstawiono w pracy [2]. Metodą najmniejszej sumy kwadratów obliczone zostały współczynniki regresji liniowej charakterystyki wzorcowania. Określono także błędy współczynników wynikające z rozrzutu zarejestrowanych wyników [8]. Charakterystyka wzorcowania dana jest wzorem:

$$U_{mc} = K_U \cdot M_b + U_0 \quad (8)$$

w którym: U_{mc} [V] – rejestrowane napięcie, M_b [mN·m] – zadawany moment, U_0 [V] – przesunięcie charakterystyki.

Uzyskano następujące wartości współczynników i ich błędów:

$$\begin{aligned} K_U &= 0.8304 \text{ V/mN}\cdot\text{m} & U_0 &= 0.1126 \text{ V} \\ \delta_{K_U} &= 0.0016 \text{ V/mN}\cdot\text{m} & \delta_{U_0} &= 0.011 \text{ V} \end{aligned}$$

Wyniki podano z zawyżoną liczbą miejsc znaczących celem wykorzystania w dalszych obliczeniach.

Opracowanie danych metodą najmniejszej sumy kwadratów wymagało przyjęcia założenia, że moment zadawany był bezbłędnie. W praktyce założenie to nie jest prawdziwe i należy uwzględnić niepewność zadawanego momentu. Moment ten dany jest wzorem:

$$M_b = Q_m \cdot b = m_1 \cdot g \cdot b \quad (9)$$

w którym: m_1 - masa zawieszonych odważników, g – przyspieszenie ziemskie, b – długość ramienia działania siły.

W takim przypadku względny błąd zadawania momentu można wyznaczyć z zależności:

$$\gamma_{Z_{Mb}} = \sqrt{\gamma_m^2 + \gamma_g^2 + \gamma_b^2} \quad (10)$$

w której: γ_m - względny błąd zawieszenia masy, γ_g - względny błąd wartości przyspieszenia ziemskiego, γ_b - względny błąd długości ramienia.

Przyjmując, że błąd przyspieszenia ziemskiego jest pomijalnie mały uzyskuje się

$$\gamma_{Z_{Mb}} = \sqrt{\gamma_m^2 + \gamma_b^2} \quad (11)$$

Podczas wzorcowania użyto odważników klasy 0.1 co oznacza, że $\gamma_m = 0.001$, zaś długość $b = 52 \text{ mm}$ wykonana była z błędem $\gamma_b = 0.1 \text{ mm}$.

Względny błąd długości ramienia wynosi więc: $\gamma_b = \frac{\delta_b}{b} = \frac{0.1}{52} = 0.002$

i ostatecznie: $\gamma_{Z_{Mb}} = \sqrt{0.001^2 + 0.002^2} = 0.0022$

Błąd zadawanego momentu wynosi:

$$\delta_{Z_{Mb}} = M_b \cdot \gamma_{Z_{Mb}} \quad (12)$$

i jest liniową funkcją momentu. Przy momencie zerowym przyjmuje wartość zero. Dlatego powiększa on niepewność wyznaczenia współczynnika kierunkowego K_U . Przyjęto przy tym oznaczenia:

$$K_{U_g} = K_U + 3 \cdot \delta_{K_U} \quad (13)$$

$$K_{U_d} = K_U - 3 \cdot \delta_{K_U} \quad (14)$$

Oznaczając graniczne wartości współczynnika K_U przez $K_{U_{\min}}$ i $K_{U_{\max}}$ można zapisać:

$$K_{U_{\min}} = \frac{U_{mc_d} - U_0}{M_b + \delta_{Z_{Mb}}} = \frac{\frac{U_{mc_d} - U_0}{M_b}}{\frac{M_b + \delta_{Z_{Mb}}}{M_b}} = \frac{K_{U_d}}{1 + \gamma_{Z_{Mb}}} = \frac{K_U - 3 \cdot \delta_{K_U}}{1 + \gamma_{Z_{Mb}}} \quad (15)$$

$$K_{U_{\max}} = \frac{U_{\text{mcg}} - U_0}{M_b + \delta_{Z_{Mb}}} = \frac{\frac{U_{\text{mcg}} - U_0}{M_b}}{\frac{M_b + \delta_{Z_{Mb}}}{M_b}} = \frac{K_{U_g}}{1 + \gamma_{Z_{Mb}}} = \frac{K_U + 3 \cdot \delta_{K_U}}{1 + \gamma_{Z_{Mb}}} \quad (16)$$

3.2. OBLICZENIE WSPÓŁCZYNNIKÓW RÓWNANIA POMIARU

Opracowane wyniki wzorcowania pozwalają obliczyć współczynniki w równaniu (6) pomiaru momentu. Wyznaczając M_b z równania wzorcowania (8) oraz M_t z zależności (1) otrzymujemy równanie:

$$M_t = \frac{1}{K_U + K_{PPM}} (U_{\text{mc}} - U_0) \quad (17)$$

Z porównania otrzymanego równania (17) z równaniem (6) wynikają następujące równości:

$$K_M = \frac{1}{K_U \cdot K_{PPM}} \quad (18)$$

$$U_{MC} = U_{\text{mc}} \quad (19)$$

$$U_{OM} = U_0 \quad (20)$$

Błędy współczynników wynoszą:

$$\delta_{K_M}^2 = \left(\frac{\partial K_M}{\partial K_U} \right)^2 \cdot \delta_{K_U}^2 + \left(\frac{\partial K_M}{\partial K_{PPM}} \right)^2 \cdot \delta_{K_{PPM}}^2 \quad (21)$$

oraz $\delta_{U_{OM}} = \delta_{U_0}$ ze względu na tożsamość U_0 i U_{OM} . Podstawiając do wzoru znane wartości uzyskuje się:

$$\begin{aligned} K_M &= 0.30106 \text{ mN}\cdot\text{m/V} & \delta_{K_M} &= 0.003 \text{ mN}\cdot\text{m/V} \\ U_{OM} &= 0.1126 \text{ V} & \delta_{U_{OM}} &= 0.011 \text{ V} \end{aligned}$$

3.3. WYZNACZENIE BŁĘDÓW POMIARU MOMENTU

Zgodnie ze wzorem (6) i (7) błąd pomiaru momentu tarcia dany jest zależnością:

$$\ddot{a}_{M_t}^2 = (U_{MC} - U_{OM})^2 \cdot \ddot{a}_{K_M}^2 + K_M^2 \cdot \ddot{a}_{U_{MC}}^2 + K_M^2 \cdot \ddot{a}_{U_{OM}}^2 \quad (22)$$

Ze względu na obecność składnika U_{MC} błąd zależy od wartości mierzonego momentu i rośnie z jego wzrostem. Do obliczenia wartości δ_{M_t} potrzebna jest znajomość wszystkich czynników powyższego równania. Do wyznaczenia pozostał zatem błąd $\delta_{U_{MC}}$ przetwarzania momentu na napięcie. W celu jego określenia posłużono się informacjami na temat poszczególnych bloków toru pomiarowego. Przyjęto, że kolejne błędy przetwarzania można odnieść do mierzonego napięcia i geometrycznie zsumować:

$$\delta_{U_{MC}}^2 = \delta_{PMT/U}^2 + \delta_{CMT,>/U}^2 + \delta_{A/C/U}^2 \quad (23)$$

Błąd δ_{PMT} został uwzględniony w błędzie współczynnika K_M we wzorze (21).

Poszczególne składniki równania (23) traktowane jako błędy trzysigmowe osiągają wartości:

$$\delta_{\text{CMT},>/U} = \delta_{\text{CMT},>} \cdot K_{\text{CMT},>} \cdot K_{A/C}$$

$$\delta_{\text{CMT},>/U} = 0.018 \cdot 0.9183 \cdot 1 [(mN \cdot m) \cdot (V/mN \cdot m) \cdot (V/V)] = 0.0165 [V] \quad (24)$$

$$\delta_{/AC/U} = \delta_{A/C} \cdot K_{A/C}$$

$$\delta_{/AC/U} = 2.44 \cdot 1 [mV/V] = 0.0024 [V] \quad (25)$$

Wstawiając uzyskane wartości do równania (23) otrzymujemy: $\delta_{U_{MC}} = 0.0167 [V]$

Błąd pomiaru momentu tarcia obliczono dla dwóch skrajnych wartości 0 i 10 V. W ten sposób stało się możliwe przybliżone rozdzielenie składowych błędów: zależnej i niezależnej od mierzonej wartości. Uzyskano następujące wyniki:

$$\begin{aligned} \ddot{a}_{M_{t10}}^2 &= (U_{MC=10V} - U_{OM})^2 \cdot \ddot{a}_{K_M}^2 + K_M^2 \cdot \ddot{a}_{U_{MC}}^2 + K_M^2 \cdot \ddot{a}_{U_{OM}}^2 \\ \ddot{a}_{M_{t0}}^2 &= (U_{MC=0V} - U_{OM})^2 \cdot \ddot{a}_{K_M}^2 + K_M^2 \cdot \ddot{a}_{U_{MC}}^2 + K_M^2 \cdot \ddot{a}_{U_{OM}}^2 \\ \text{Dla } U_{MC} &= 10 \text{ V} \quad \delta_{M_{t10}} = 0.0303 \text{ mN} \cdot \text{m} \\ \text{Dla } U_{MC} &= 0 \text{ V} \quad \delta_{M_{t0}} = 0.00603 \text{ mN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

Przyjmując, że błąd δ_{M_t} dla $U_{MC} = 0 \text{ V}$ nie zawiera składowej zależnej od mierzonego momentu tarcia, odniesiono różnicę $\delta_{M_{t10}} - \delta_{M_{t0}}$ do zakresu pomiarowego, co pozwoliło na oszacowanie obu składowych. Wykonane obliczenia pozwalają stwierdzić, że błąd pomiaru momentu tarcia w stanowisku mieści się w granicach: $\pm 0.006 [mN \cdot m] \pm 0.1 \%$ mierzonej wartości.

LITERATURA

1. Janowska J.: Analiza metrologiczna wyników badań na przykładzie łożysk ślizgowych. Konferencja Problemy Niekonwencjonalnych Układów Łożyskowych, Łódź, 1995, Materiały konferencyjne s. 28-32
2. Janowska J.: Wpływ metody wyznaczania krzywych Stribeck na ich przebieg w badaniach miniaturowych łożysk ślizgowych. Praca doktorska, Warszawa 1996
3. Janowska J.: Wpływ metody badawczej na wyniki wyznaczania charakterystyk tarcia miniaturowych łożysk ślizgowych. Konferencja Problemy Niekonwencjonalnych Układów Łożyskowych, Łódź, 1997, Materiały konferencyjne s. 9-15
4. Jaworski J.: Matematyczne podstawy metrologii, Warszawa, WNT 1979
5. Obalski J.: Podstawy metrologii, Warszawa, PWN 1979
6. Piotrowski J.: Podstawy metrologii, Warszawa, PWN 1979
7. Strzałkowski A., Śliżyński A.: Matematyczne metody opracowywania wyników pomiarów, Warszawa, PWN 1978

METROLOGICAL PROPERTIES OF THE MEASUREMENT SYSTEM

ABSTRACT

The method of metrological analysis of the data channels in the measurement system in case of measurement of a friction torque in small sliding bearings

Recenzent: Jan Burcan