

Paweł NOWAKOWSKI¹
Bartosz GAPIŃSKI¹

ANALIZA NIEPEWNOŚCI POMIARU ODCHYLEŃKI WALCOWOŚCI W ZALEŻNOŚCI OD STOSOWANEJ STRATEGII POMIARU

Elementy walcowe są stosowane w wielu rozwiązaniach konstrukcyjnych i często stanowią odpowiedzialne połączenia. Niezbędna jest zatem kontrola ich geometrii – w tym odchyłek kształtu. Odchyłka walcowości może przybierać różną postać, a wpływ na nią ma odchyłka linii środkowej, odchyłka promieniowa i przekrojów poprzecznych. Złożoność problemu wymusza opracowanie odpowiedniej strategii pomiarowej zapewniającej możliwie szybki, a jednocześnie metrologicznie poprawny pomiar. Miarą dokładności procesu pomiarowego jest określenie jego niepewności. W artykule przedstawiono analizę niepewności pomiaru odchyłki walcowości dla różnych strategii pomiarowych. Dodatkowo przeprowadzono ocenę niepewności dla tego samego elementu wzorcowego, zrealizowaną w warunkach powtarzalności na przestrzeni 3 tygodni. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, iż najbardziej odpowiednią jest strategia klatki, nawet jeśli ze względu na czas pomiaru zostanie zredukowana do niewielkiej liczby przekrojów.

1. WPROWADZENIE

Elementy walcowe są bardzo powszechnie stosowane w różnych mechanizmach, a w wielu przypadkach wałek i otwór tworzą odpowiedzialne połączenia. Przykładem może być połączenie sworzniowe tłoka i korbowodu, zapewniające ruch obrotowy lub połączenie tłoka i cylindra pozwalające na ruch posuwisto – zwrotny. Odpowiedni dobór parametrów wykonania poszczególnych elementów pozwala na uzyskanie pożądanego efektu końcowego, czyli długą i bezawaryjną pracę całego mechanizmu. Równocześnie, każdy wyrób jest efektem szeregu operacji technologicznych, co powoduje, że spełnienie wymagań konstrukcyjnych nie jest sprawą prostą. Konieczna jest zatem kontrola wszystkich kluczowych charakterystyk w celu potwierdzenia poprawności ich wykonania. Utrzymanie dokładności wykonania podzespołów w zadanych tolerancjach pozwala na zmontowanie poprawnie pracującego mechanizmu [1],[2],[3],[4],[5].

W odpowiedzialnych połączeniach wałka i otworu ważna jest kontrola odchyłek kształtu walcowości, okrągłości i prostoliniowości. W przypadku wymagań pół tolerancji

¹ Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Instytut Technologii Mechanicznej, Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych, E-mail: bartosz.gapinski@put.poznan.pl

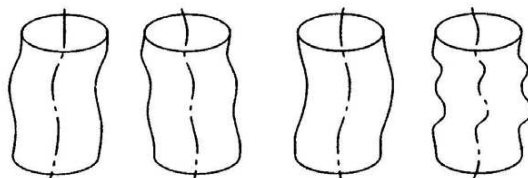
o małych wartościach, na poziomie kilku, kilkunastu mikrometrów, konieczne jest zastosowanie obrabiarek i procesu technologicznego, ale również procesu kontroli z urządzeniami zapewniającymi odpowiednio małą wartość niepewności pomiaru. Jest ona zależna od zastosowanego urządzenia oraz przyjętej strategii pomiarowej. Szacowanie niepewności pomiaru jest często zadaniem skomplikowanym i czasochłonnym, jednak prowadzi do uzyskania pełnej wiedzy o stosowanym procesie pomiarowym [6],[7].

2. ODCHYŁKA WALCOWOŚCI

Dopuszczalna wartość odchyłki walcowości reprezentowana jest w dokumentacji technicznej poprzez pole tolerancji walcowości. Zgodnie z normą PN-EN ISO 12180:2012 [8],[9] jest ono ograniczone przez dwa współosiowe walce, których różnica promieni odpowiada wartości pola tolerancji t . Na wartość tolerancji nie ma wpływu średnica walca. By spełniona była narzucona tolerancja powierzchnia rzeczywista walca nie może wykraczać poza zdefiniowany obszar. Tolerancja walcowości ogranicza odchyłki:

- prostoliniowości tworzących i osi walca,
- okrągłości w przekrojach poprzecznych walca,
- równoległości przeciwległych tworzących [1].

Na postać i wartość odchyłki walcowości składają się: zmiana średnicy walca wzdłuż jego linii środkowej, odchyłka okrągłości w różnych przekrojach oraz niecentryczność zarysów okrągłości względem osi nominalnej elementu [8],[9],[10],[11].



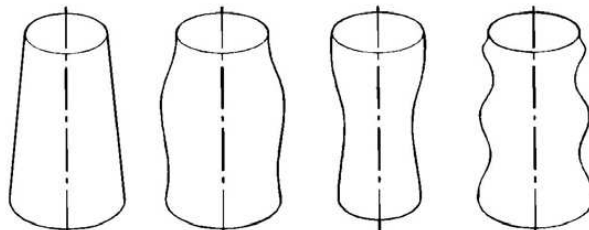
Rys. 1. Przykłady odchyłki linii środkowej [8],[12],[13]

Fig. 1. Examples of centre line deviation [8],[12],[13]

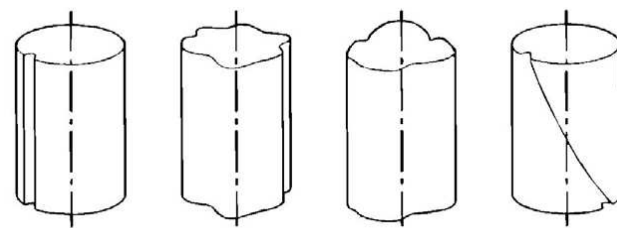
Odchyłka linii środkowej – jest to odchyłka wyrobu nominalnie walcowego, mającego oś, która jest zakrzywiona, przy czym przekroje wyrobu są okręgami o stałym promieniu [8],[9] (rys. 1). Najbardziej charakterystyczną odchyłką tego typu jest pojedyncze lub wielokrotne wygięcie. Odchyłka linii środkowej może być określana za pomocą prostoliniowości linii środkowej [8],[9],[10],[12],[13].

Odchyłka promieniowa – jest to odchyłka wyrobu nominalnie walcowego, mającego wszystkie przekroje poprzeczne okrągłe i współśrodkowe z prostoliniową osią, przy czym średnice poszczególnych przekrojów są zmienne [8],[9] (rys. 2). Do tej grupy można zaliczyć cztery charakterystyczne przypadki: walec nominalny („idealny”), baryłkowość, stożkowość, siodłowość lub ich złożenia. Odchyłka promieniowa może być określana za

pomocą równoległości profilu tworzącej względem osi walca, przyjętej jako prosta bazowa [8],[9],[10],[12],[13].

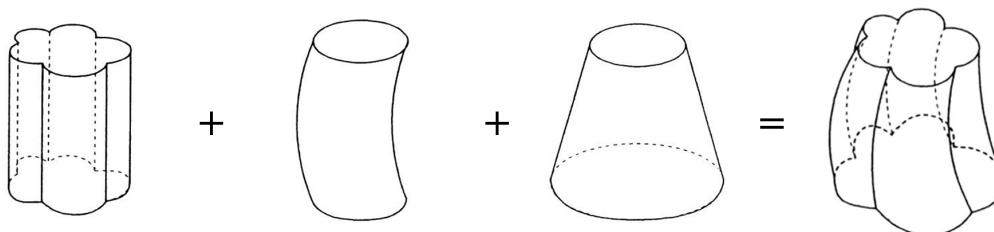


Rys. 2. Przykłady odchyłki promieniowej [8],[12],[13]
Fig. 2. Examples of radial deviation [8],[12],[13]



Rys. 3. Przykłady odchyłki przekrojów poprzecznych [8],[12],[13]
Fig. 3. Examples of roundness profiles deviation [8],[12],[13]

Odchyłka przekrojów poprzecznych – jest to odchyłka wyrobu nominalnie walcowego, mającego przekroje poprzeczne o tej samej średnicy nominalnej obarczone odchyłką okrągłości [8],[9] (rys. 3). Przykładami tego typu odchyłki są np. owalność lub n -graniastosc. Postać i wartość odchyłek przekrojów poprzecznych mogą być zdefiniowane za pomocą okrągłości [8],[9],[10],[12],[13]. Rzeczywista powierzchnia walcowa najczęściej jest uformowana poprzez złożenie dowolnej kombinacji przedstawionych postaci odchyłek walcowości (rys. 4) [10],[13].

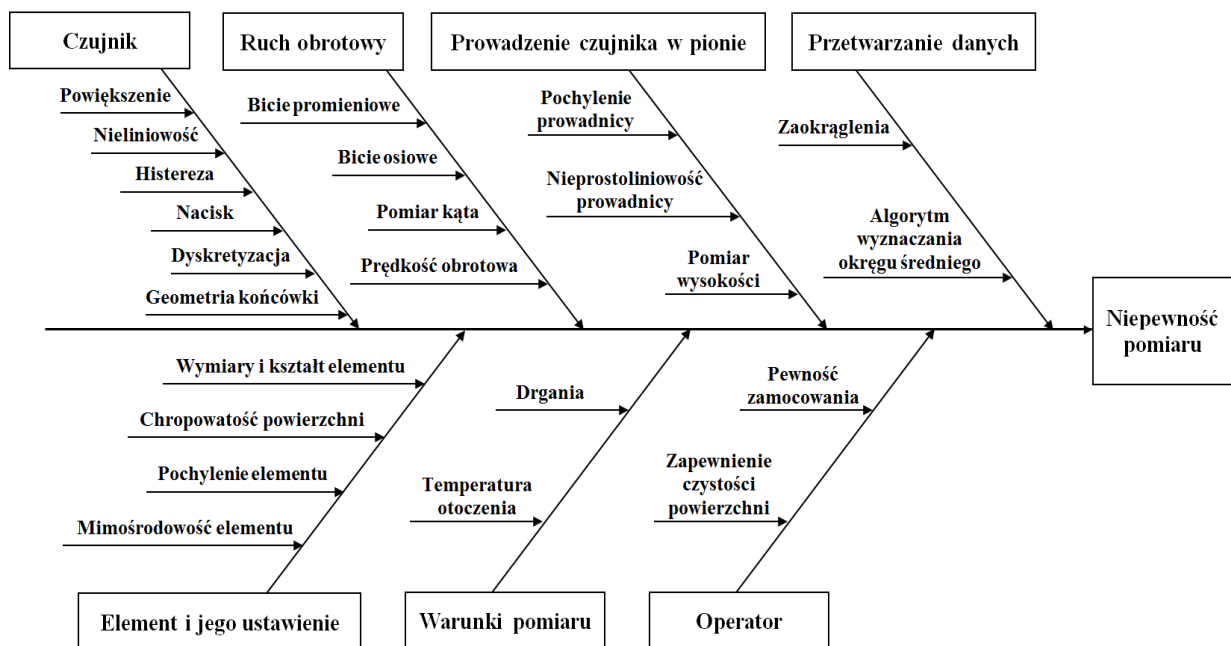


Rys. 4. Przykładowe złożenie postaci odchyłek walcowości [8],[12],[13]
Fig. 4. Example of different cylindricity compound [8],[12],[13]

W celu oceny odchyłki walcowości należy na podstawie danych pomiarowych dokonać obliczenia walca odniesienia. Pozwala on na ocenę wartości i postaci odchyłki kształtu oraz na przykład przy pomiarze na CMM na ocenę średnicy i położenia walca. Walec odniesienia można obliczyć zgodnie z jednym z czterech algorytmów aproksymacyjnych. Są to: walec średni nazywany również walcem Gaussa, najmniejszy walec opisany, największy walec wpisany oraz walce minimalnej strefy nazywane również walcami Czebyszewa [8],[9]. Poszczególne algorytmy aproksymacyjne mają wpływ na uzyskiwanie wartości odchyłki walcowości, ale również średnicy czy położenia osi walca. W zależności od przeznaczenia ocenianej części stosuje się różne walce odniesienia, a dla oceny odchyłki walcowości zalecane jest stosowanie walców minimalnej strefy [14].

3. NIEPEWNOŚĆ POMIARU

Niepewność pomiaru definiowana jest jako parametr związany z wynikiem pomiaru charakteryzującym rozrzut wartości, który można w uzasadniony sposób przypisać wielkości mierzonej [15],[16],[17]. Prawidłowe wyznaczenie niepewności pomiaru jest procesem skomplikowanym i czasochłonnym, ze względu na mnogość źródeł i czynników powodujących ich powstawanie. Wyróżnia się siedem grup czynników wpływających na niepewność pomiaru walcowości: wskazanie czujnika, ruch obrotowy, prowadzenie czujnika w pionie, przetwarzanie danych, ustawienie elementu na stole pomiarowym, warunki otoczenia oraz operator urządzenia (rys. 5) [18],[19].



Rys. 5. Czynniki wpływające na niepewność pomiaru walcowości [18]
Fig. 5. Factors influencing on cylindricity measurement uncertainty [18]

Do opisu niepewności wprowadzono pojęcie niepewności standardowej u , określonej jako niepewność wyniku pomiaru wyrażoną w formie odchylenia standardowego, a także pojęcie niepewności rozszerzonej U , rozumianej jako wielkość określająca przedział wokół wyniku pomiaru, zależny od przyjętego poziomu ufności [6],[17],[20],[21],[22],[23].

$$U = k \cdot u \quad (1)$$

gdzie:

U – niepewność rozszerzona,

u – niepewność standardowa,

k – współczynnik rozszerzenia, zależny od założonego poziomu ufności p , przy czym w praktyce przyjmuje się $k = 2$, co odpowiada poziomowi ufności $p = 95\%$.

Wyznaczenie niepewności typu A opiera się na serii powtarzalnych pomiarów danej wielkości i ma charakter eksperymentalny. Odchylenie standardowe s_x jest wartością przyjmowaną jako niepewność standardowa u [6],[7],[17],[21],[22],[23],[24].

$$u(x) \approx s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

gdzie:

$u(x)$ – niepewność standardowa pomiaru,

s_x – odchylenie standardowe,

x_i – kolejna wartość zbioru danych,

\bar{x} – średnia arytmetyczna wartość zbioru danych,

n – liczba elementów w zbiorze.

Odchylenie standardowe rozkładu próbki oparte na wartościach zmierzonych s_x jest oszacowaniem odchylenia standardowego rozkładu σ . Natomiast wartość średnia \bar{x} z pewnej liczby n wyników pomiarów x_i jest oszacowaniem poprawnej wartości średniej rozkładu [6],[21],[23],[24].

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

gdzie:

x_i – kolejna wartość zbioru danych,

\bar{x} – średnia arytmetyczna wartość zbioru danych,

n – liczba elementów w zbiorze.

Zmniejszenie otrzymanej wartości niepewności standardowej jest możliwe poprzez wyznaczenie wartości średniej z serii pomiarów. W takim przypadku niepewność pomiaru jest o \sqrt{n} razy mniejsza od niepewności standardowej pojedynczego pomiaru [17],[23],[24].

$$u(\bar{x}) = \frac{u(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (4)$$

gdzie:

$u(\bar{x})$ – niepewność otrzymana z wyznaczenia wartości średniej z serii pomiarów,

$u(x)$ – niepewność standardowa pomiaru,

x_i – kolejna wartość zbioru danych,

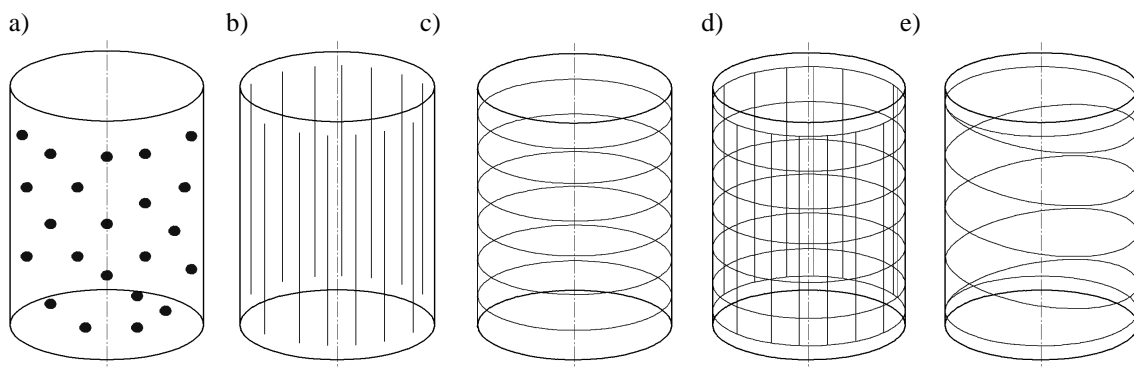
\bar{x} – średnia arytmetyczna wartość zbioru danych,

n – liczba elementów w zbiorze.

W praktyce przemysłowej, ze względu na konieczność redukcji czasu pomiarowego, rzadko można uzyskać wartości odchyłki jako średnią z serii pomiarów [6]. Do tego dochodzi jeszcze utrudnienie w postaci konieczności zapewnienia stałych warunków pomiarowych i powtarzalności procesu.

4. WPŁYW STRATEGII POMIARU WALCOWOŚCI

Odchyłkę walcowości można mierzyć zgodnie z jedną z pięciu strategii pomiarowych: punktów losowych, tworzących, przekrojów poprzecznych, klatki oraz linii śrubowej (rys. 6).



Rys. 6. Strategie pomiaru odchyłki walcowości: a) punktów losowych, b) tworzących, c) przekrojów poprzecznych, d) klatki, e) linii śrubowej

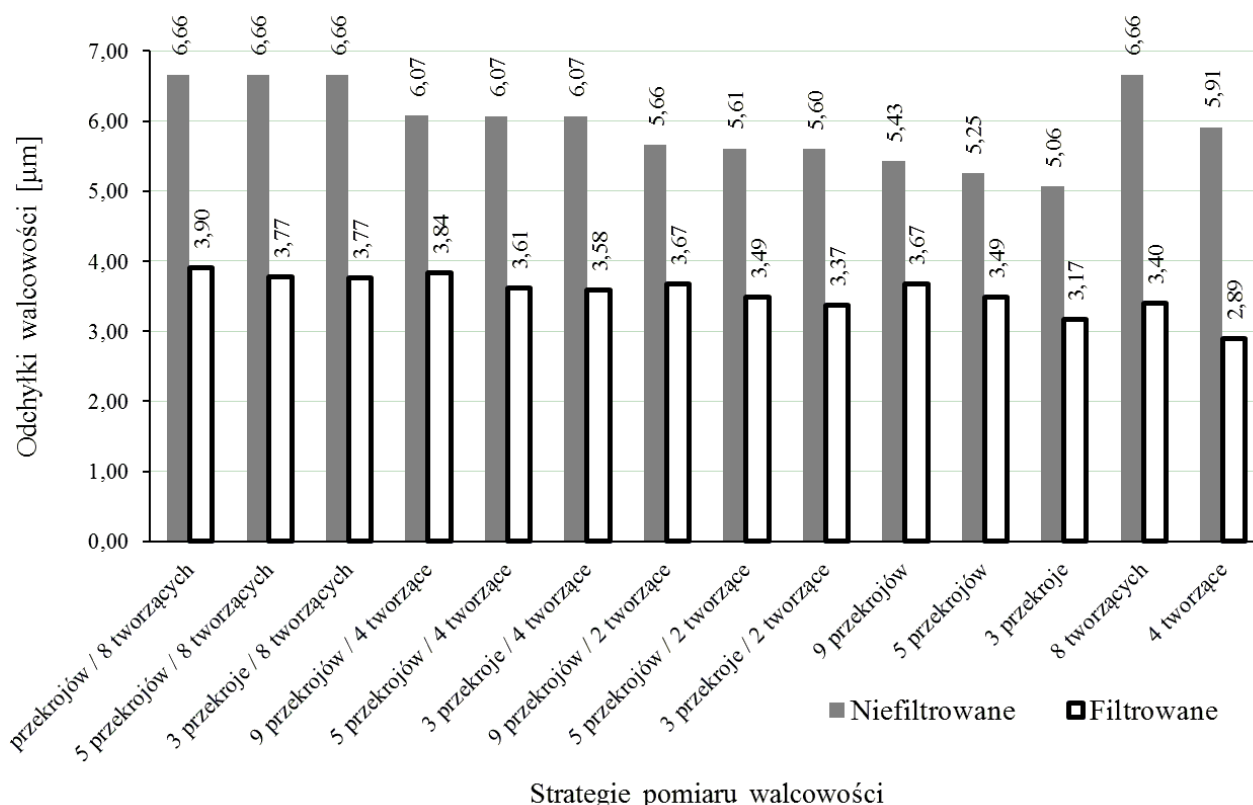
Fig. 6. Strategies of cylindricity measuring: a) random points, b) generatrix line, c) roundness profiles, d) bird cage, e) helix

Najczęściej stosowane są metody przekrojów poprzecznych, wzdłużnych oraz ich połączenie, czyli metoda klatki. Przedstawione w artykule badania przeprowadzone zostały dla tych trzech strategii pomiarowych, a pomiarów dokonano na urządzeniu specjalizowanym do pomiaru odchyłek kształtu Hommel-Etamic Roundscan 535. Zastosowane urządzenie daje możliwość pracy w trybie CNC, co pozwoliło na

wyeliminowanie błędów operatora, związanych choćby z dosunięciem końcówki pomiarowej do mierzonego obiektu. Każdorazowo walec był mierzony strategią klatki dla 9 przekrojów poprzecznych i 8 tworzących, a następnie dokonywano obliczeń dla pozostałych strategii.

Badania niepewności pomiaru zostały zrealizowane w związku z prowadzonymi pracami nad wpływem strategii pomiaru na dokładność określenia odchyłki walcowości. Przeprowadzono je dla serii sworzni produkcyjnych. Do badań nad oszacowaniem wartości niepewności wybrano sworzeń o najmniejszych wartościach odchyłki walcowości, nie charakteryzujący się żadną dominującą postacią odchyłki linii środkowej, promieniowej jak i przekrojów poprzecznych. Pomiaru przeprowadzono z zastosowaniem 14 strategii pomiarowych:

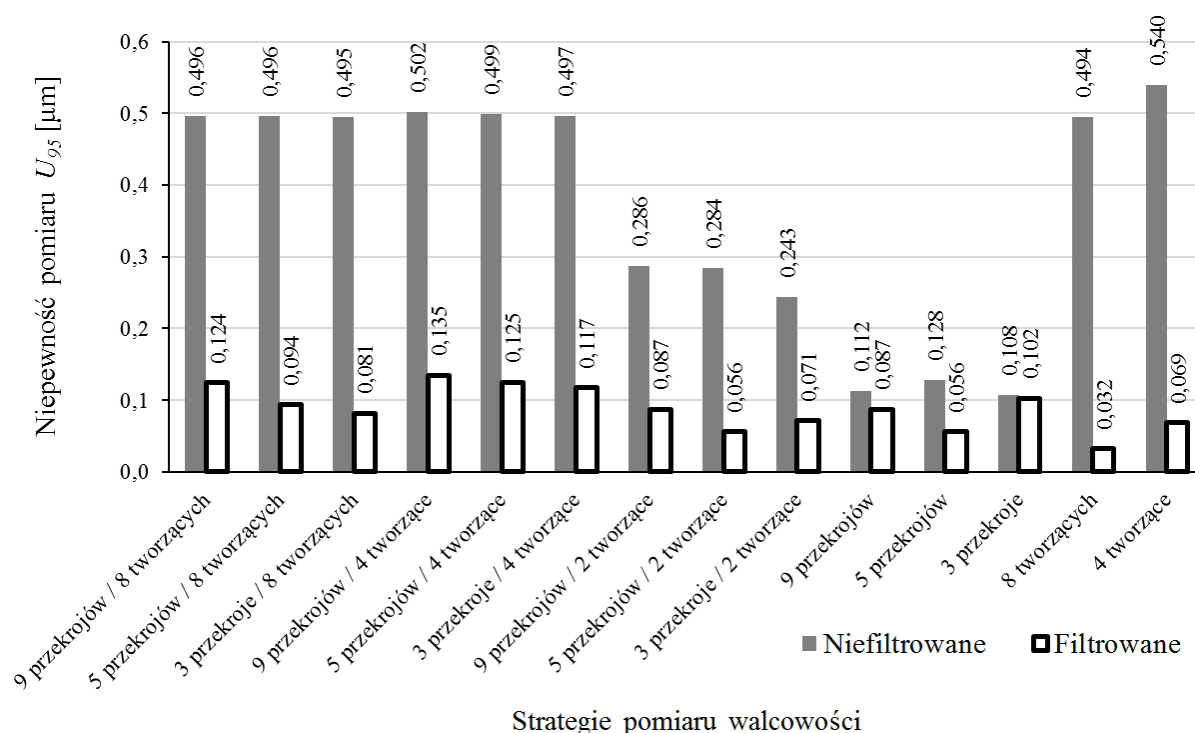
- strategii klatki: 9 przekrojów poprzecznych oraz 8 tworzących, 5 przekrojów poprzecznych oraz 8 tworzących, 3 przekroje poprzeczne oraz 8 tworzących, 9 przekrojów poprzecznych oraz 4 tworzące, 5 przekrojów poprzecznych oraz 4 tworzące, 3 przekroje poprzeczne oraz 4 tworzące, 9 przekrojów poprzecznych oraz 2 tworzące, 5 przekrojów poprzecznych oraz 2 tworzące, 3 przekroje poprzeczne oraz 2 tworzące,
- strategii przekrojów poprzecznych: 9 przekrojów poprzecznych, 5 przekrojów poprzecznych, 3 przekroje poprzeczne,
- strategii tworzących: 8 tworzących oraz 4 tworzące.



Rys. 7. Wyniki pomiaru odchyłki walcowości dla różnych strategii pomiarowych
 Fig. 7. Results of cylindricity measurements for different measuring strategies

Przy doborze liczb przekrojów kierowano się doświadczeniem z wcześniejszych pomiarów oraz wymaganiami płynącymi z praktyki przemysłowej. Można stwierdzić, iż strategia zawierająca 9 przekrojów poprzecznych oraz 8 tworzących jest wystarczająca do opisania rzeczywistej postaci odchyłki walcowości. Pomiar taki zajmował w omawianym przypadku prawie 6 minut. Praktyka przemysłowa pokazuje, iż niezwykle cenna jest możliwość redukcji czasu pomiaru, stąd badania dla mniejszej liczby przekrojów. Dodatkowo zmierzone, dla omawianych strategii, przekroje pozwalały na obliczenie wartości odchyłki walcowości dla pozostałych przyjętych do badań strategii. Wylimitowano w ten sposób wpływ błędów wynikających z pomiaru poszczególnych przekrojów dla kolejnych strategii.

Na podstawie uzyskanych danych pomiarowych obliczono wartość odchyłki walcowości dla wszystkich strategii, zarówno biorąc pod uwagę dane niefiltrowane, jak i filtrowane z zastosowaniem filtra biegunowego 0 - 15f/obr i liniowego 0,80mm, dobranego zgodnie z zaleceniami literaturowymi [10]. Dane te pozwoliły stwierdzić w badanym przypadku znaczny wpływ odchyłki walcowości uzyskanej na podstawie pomiaru tworzących walca. Na wykresie przedstawiono wartości będące średnią arytmetyczną z 30 powtórzeń pomiarów dla wymienionych strategii (rys. 7).



Rys. 8. Wartość niepewności pomiaru odchyłki walcowości dla różnych strategii pomiarowych

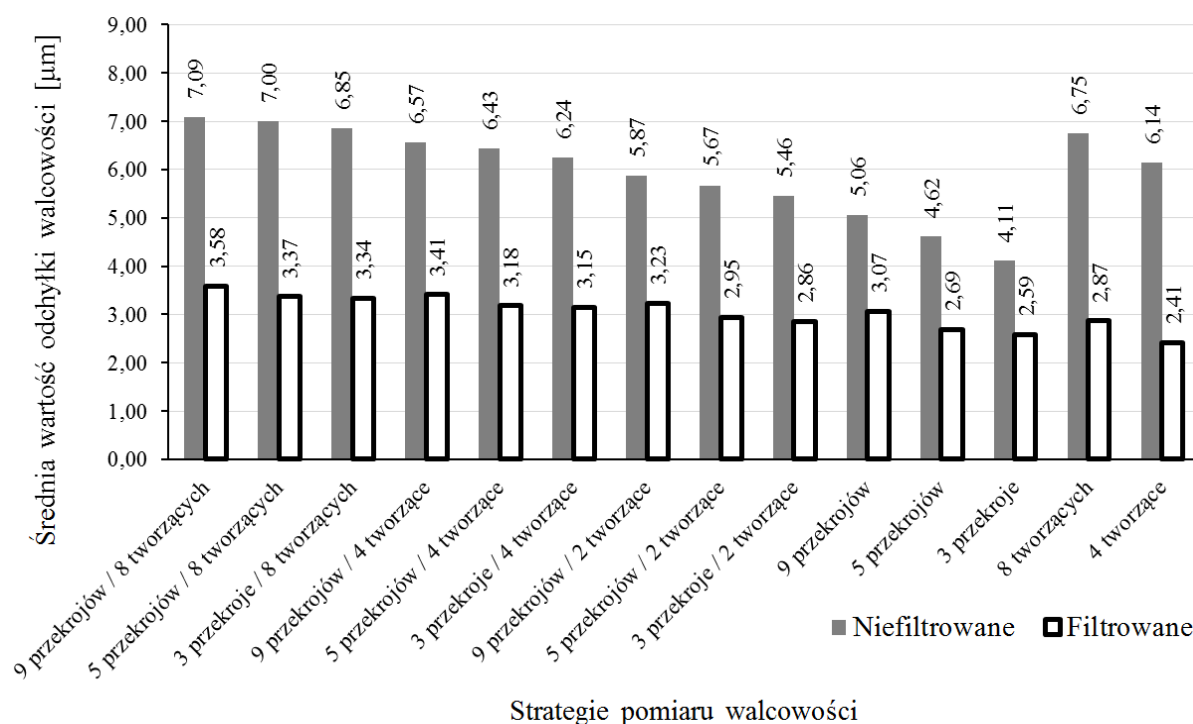
Fig. 8. Uncertainty of cylindricality measurements for different measuring strategies

Na podstawie 30 powtórzeń pomiaru odchyłki walcowości dla różnych strategii pomiarowych obliczono, zgodnie z przedstawionymi w rozdziale 3 zasadami, niepewność pomiaru U_{95} metodą A (rys. 8). Należy jednak zaznaczyć, iż szacowanie niepewności

pomiaru jest ściśle związane z warunkami jego realizacji. Zatem, na uzyskaną wartość niepewności wpływ ma choćby długość i średnica badanego wałka, a co za tym idzie przedstawiony w artykule wpływ strategii pomiarowej nie może mieć charakteru uniwersalnego w odniesieniu do wartości niepewności dla poszczególnych strategii pomiarowych.

Wyniki oceny niepewności pomiaru dla różnych strategii pozwalają stwierdzić, iż wartości niepewności wyznaczone dla pomiarów niefiltrowanych są zdecydowanie większe (nawet pięciokrotnie) od pomiarów z zastosowaniem filtracji. Największe wartości niepewności dla pomiarów bez filtracji zanotowano dla strategii zawierających 8 lub 4 tworzące (na poziomie $U_{95} = 0,5\mu\text{m}$). Wprowadzenie filtracji powoduje eliminację błędów losowych, co przekłada się na zwiększenie powtarzalności uzyskanych wyników pomiarów. Pozwoliło to na uzyskanie niepewności pomiaru na poziomie $U_{95} = 0,12\mu\text{m}$.

Jak wspomniano, szacowanie niepewności przeprowadzono dla oceny pomiarów serii wałków w związku z badaniami nad wpływem strategii pomiaru na dokładność określenia odchyłki walcowości. Po oszacowaniu niepewności dla 30 powtórzeń pomiaru wałka, przeprowadzono dodatkowe badania w celu określenia niepewności pomiaru w trakcie długotrwałego cyklu badawczego. W trakcie badań nad wpływem strategii pomiarowej przeprowadzono pomiary dla serii ponad 300 wałków.

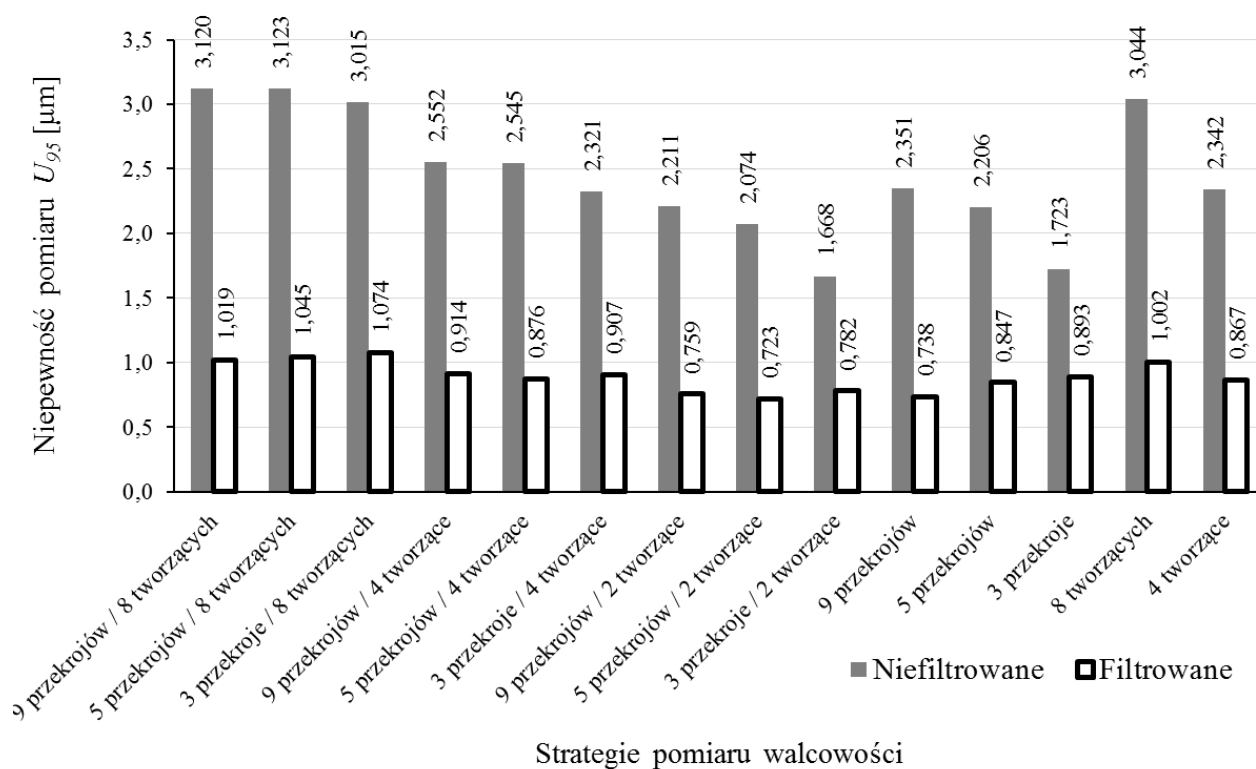


Rys. 9. Wyniki pomiaru odchyłki walcowości dla różnych strategii pomiarowych
Fig. 9. Results of cylindricity measurements for different measuring strategies

Równocześnie z badaniami tej serii dokonano pomiaru wyselekcjonowanego wałka badawczego, mierząc go zgodnie z ustalonymi strategiami, na początku i na końcu każdego

dnia badawczego oraz jako co 10 sztukę w cyklu pomiarowym. Łącznie dokonano 60-krotnego pomiaru wałka wzorcowego. Wartości średnie odchyłki walcowości dla poszczególnych strategii przedstawiono na rysunku 9.

Analizując uzyskane dane pomiarowe można stwierdzić, iż średnie wartości odchyłki walcowości mierzone dla cyklu 30 powtórzeń oraz dla cyklu, w którym mierzono odchyłki na co 10 walcu w cyklu pomiarowym nie różnią się bardziej niż $0,5\mu\text{m}$. Należy zatem uznać, że wyniki pomiaru cechują się dla wszystkich strategii wysoką stabilnością. Na podstawie przeprowadzonych badań dokonano, zgodnie z metodyką przedstawioną w rozdziale 3, analizy niepewności dla 60 powtórzeń pomiaru wałka wzorcowego, sprawdzanego jako co 10 w cyklu pomiarowym. Ze względu na dostępność urządzeń badawczych pomiary łącznie trwały około 3 tygodni (rys. 10).



Rys. 10. Wartość niepewności pomiaru odchyłki walcowości dla różnych strategii pomiarowych
Fig. 10. Uncertainty of cylindricity measurements for different measuring strategies

Analizując uzyskane wartości niepewności pomiaru odchyłki walcowości dla różnych strategii pomiarowych można stwierdzić, iż niepewność dla danych uzyskanych w cyklu 3 tygodni jest znacznie większa niż dla pomiaru w serii 30 powtórzeń. Wpływ ma tutaj wiele czynników, takich jak choćby powtarzalność mocowania i bazowania elementu. W trakcie badań starano się zachować warunki powtarzalności, dlatego urządzenie pomiarowe oraz badane elementy znajdowały się w klimatyzowanym pomieszczeniu, w którym przez cały czas pomiarów temperatura wynosiła $20,8 \pm 0,9^\circ\text{C}$.

Jak można zaobserwować, nawet tak stabilne warunki nie pozwoliły na uzyskanie w długim horyzoncie czasowym równie niskiej wartości niepewności jak dla cyklu 30 powtórzeń.

Należy również podkreślić, że wyniki pomiaru odchyłki walcowości charakteryzują się zbieżnymi wartościami, których różnice nie przekraczają dla ich wartości średnich $0,5\mu\text{m}$. Równocześnie wartości odchyłek różnią się bardzo i są dla cyklu 60 powtórzeń prawie 10 krotnie wyższe. W przypadku tego cyklu badawczego można stwierdzić, iż niepewność dla danych filtrowanych jest praktycznie na stałym poziomie, a maksymalna różnica wynosi $0,2\mu\text{m}$ pomiędzy strategiami pomiarowymi. Znacznie większe wartości uzyskano dla pomiarów niefiltrowanych i tutaj różnice wynoszą do $1,5\mu\text{m}$ w zależności od strategii pomiarowej.

5. WNIOSKI

W artykule przedstawiono analizę niepewności pomiaru odchyłki walcowości dla różnych strategii pomiarowych. W badaniach wybrano wałek wzorcowy charakteryzujący się najmniejszymi odchyłkami kształtu spośród badanej partii elementów. Opracowano dla niego różne strategie pomiarowe zawierające pomiar metodą klatki, tworzących i przekrojów poprzecznych. Dla wybranych strategii dokonano pomiarów w dwóch cyklach badawczych. Pierwszy, to pomiar wałka w jednym zamocowaniu i 30-krotne powtórzenie pomiaru. Drugi obejmuje wyniki 60 powtórzeń pomiarów przeprowadzonych w ciągu 3 tygodni, a zrealizowanych w trakcie całej serii badawczej.

Wyniki pomiarów pozwalają stwierdzić, iż dla obu cykli badawczych maksymalna liczba przekrojów poprzecznych i wzdłużnych pozwala jak najpełniej wykryć wartość i postać odchyłki walcowości. Stwierdzono również, iż zbliżone wartości odchyłki zaobserwować można dla strategii zawierających co najmniej 4 tworzące. Pokazuje to, że warto stosować do oceny odchyłki walcowości metodę klatki, nawet jeśli jest ona zredukowana do 3 przekrojów poprzecznych i 2 tworzących.

Analizując wartości niepewności pomiaru można stwierdzić, że znacznie większe jej wartości notowane są dla przekrojów niefiltrowanych. W przypadku stosowania filtracji eliminowane są pewne wartości losowe, które nie stanowią de facto odchyłki walcowości, a pochodzą od chropowatości i błędów pomiarowych. Porównując wartości niepewności dla obu cykli wyraźnie można stwierdzić, iż wyniki uzyskane w trakcie 30 powtórzeń w jednym zamocowaniu pozwoliły na uzyskanie znacznie mniejszych wartości niż w cyklu długotrwałym. Pomimo dochowania staranności w zapewnieniu warunków powtarzalności niemożliwe było uniknięcie błędów pochodzących od mocowania i bazowania elementu. Kolejnym krokiem jaki zamierzają podjąć autorzy jest próba określenia wpływu poszczególnych czynników, np. bazowania elementu, na wartość niepewności pomiaru. Uzyskane w ten sposób wartości niepewności dla oceny odchyłki walcowości pozwalają szerzej spojrzeć na problem dokładności pomiaru rozumiany nie tylko jako sam pomiar, ale jako cały proces, wraz ze wszystkimi wpływającymi na niego czynnikami.

LITERATURA

- [1] HUMIENNY Z., 2004, *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) Podręcznik europejski*, WNT, Warszawa.
- [2] KOŁODZIEJ A., 2012, *Metrologiczne aspekty połączeń w budowie maszyn. Odchyłka walcowości w połączeniach osiowosymetrycznych*, Inż. Ap. Chem., 51/2, 32-33.
- [3] BIAŁAS S., 2003, *Tolerancje geometryczne w specyfikacjach geometrii wyrobu*, Mechanik, 3, 140-144.
- [4] CELLARY A., 2004, *Uprozczone metody pomiaru błędów kształtu przedmiotów statystycznie powtarzalnych*, PAK, 02, 9-13.
- [5] HUMIENNY Z., 2007, *Nowe spojrzenie na tolerancje geometryczno-wymiarowe*, PAK, 01, 27-30.
- [6] GRZELKA M., GAPIŃSKI B., MARCINIAK L., 2012, *Wyznaczanie niepewności pomiaru odchyłki kształtu na przyrządzie specjalizowanym*, Mechanik, 10, 874-877.
- [7] ADAMCZAK S., 2008, *Struktura geometryczna powierzchni. Badania porównawcze przyrządów. Cz. 1 Eksperymentalny błąd metody*, Mechanik, 3, 198-203.
- [8] Norma PN-EN ISO 12180-1, 2012, *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) - Walcowość - Część 1: Terminologia i parametry kształtu walcowego*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- [9] Norma PN-EN ISO 12180-2, 2012, *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) - Walcowość - Część 2: Operatory specyfikacji*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- [10] ADAMCZAK S., 2008, *Pomiary geometryczne powierzchni, zarysy kształtu, falistość i chropowatość*, WNT, Warszawa.
- [11] ADAMCZAK S., JANECKI D., 2001, *Modernizacja przyrządów do oceny struktury geometrycznej powierzchni. Cz.2. Pomiary zarysów walcowości*, Mechanik, 7, 495-499.
- [12] CHOU S-Y., SUN C-W., 2000, *Assessing cylindricity for oblique cylindrical features*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40, 327-341.
- [13] GAPIŃSKI B., KOŁODZIEJ A., i inni, 2012, *Influence of measurement strategy on the value of cylindricity*, Materiały XX IMEKO, World Congress, Metrology for Green Growth, Busan, Republic of Korea.
- [14] WECKENMANN A., KNAUER M., 1998, *Comparability of Coordinate Measurements*, Zeszyty Naukowe PŁ Filii w Bielsku-Białej, Budowa i Eksploatacja Maszyn, 44, 245-255.
- [15] *Międzynarodowy Słownik Podstawowych i Ogólnych Terminów Metrologii*, Główny Urząd Miar, Warszawa 1996.
- [16] *Wyrażanie niepewności pomiaru – przewodnik (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)*, Główny Urząd Miar, Warszawa 1999.
- [17] ARENDARSKI J., 2006, *Niepewność pomiarów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- [18] SIENIŁO M., ŻEBROWSKA-ŁUCYK S., 2012, *Niepewność pomiaru wymiarów i odchyłek kształtu tłoków silnikowych za pomocą FMM*, Mechanik, 3, 214-216.
- [19] ŻEBROWSKA-ŁUCYK S., 2005, *Czynniki wpływające na niepewność wyznaczania odchyłek geometrycznych za pomocą FMM*, PAK, 12, 13-16.
- [20] SŁADEK J., KRAWCZYK M., 2005, *Dokładność maszyn i pomiarów współrzędnościowych - metody wyznaczania niepewności pomiaru*, PAK, 12, 27-30.
- [21] GRZELKA M., GAPIŃSKI B., MARCINIAK L., WIECZOROWSKI M., MATLIŃSKI K., OLSZEWSKA I., 2010, *Pomiary cech geometrycznych przedmiotów obrotowo-symetrycznych*, PAK, 1, 35-37.
- [22] GAPIŃSKI B., 2010, *Strategia pomiaru na CMM elementu obciążonego błędem okrągłości*, PAK, 1, 24-25.
- [23] BARZYKOWSKI J., DOMAŃSKA A., KUJAWIŃSKA M., i inni, 2004, *Współczesna metrologia. Zagadnienia wybrane*, WNT, Warszawa.
- [24] DOROZHOVETS M., WARSZA Z. L., 2007, *Wyznaczanie niepewności typu A pomiarów o skorelowanych rezultatach obserwacji*, PAK, 2, 20-24.

ANALYSIS OF UNCERTAINTY FOR MEASUREMENT OF CYLINDRICITY WITH DIFFERENT MEASUREMENT STRATEGY

Cylindrical elements are used in many constructions. In many cases these type of components are basis of responsible connections, therefore, it is necessary to control not only its diameter but also the shape deviation. The shape deviation

may have different character what is caused by deviation from center line, radial deviation and deviation of roundness profiles. Regarding this aspect, it is essential to develop an appropriate measurement strategy that ensures as fast measurement as possible with its metrological correctness. A measure of the measurement process accuracy is its uncertainty. The paper presents an analysis of the uncertainty for different measurement strategies of the cylindricity. In addition, uncertainties were estimated for the same master item carried out under repeatability conditions for 3 weeks. Obtained results led to conclude that bird cage strategy is the most appropriate one even if number of measured sections is reduced very much.