

Krzysztof Karaśkiewicz, Waldemar Jędrał

Instytut Techniki Ciepłej

NIEPEWNOŚĆ POMIARU PARAMETRÓW POMP W LABORATORIUM AKREDYTOWANYM

W pracy omówiono podstawowe zagadnienia dotyczące pomiarów i wymagań metrologicznych stawianych laboratoriom pompowym wprowadzającym System Jakości. Przeanalizowano podstawowe rodzaje niepewności występujących w trakcie pomiarów. Zwrócono uwagę na źródła ich pochodzenia.

WSTĘP

Wprowadzenie Systemu Jakości do laboratoriów badawczych stawia nowe wymagania personelowi technicznemu. Jakość badań w takich laboratoriach jest zdefiniowana (księga jakości, procedury badawcze) i jawna (klient ma dostęp do księgi jakości i może uczestniczyć w badaniach), [5]. Jej niezachowanie może powodować skutki prawne. Wymusza to precyzyjne, liczbowe określenie niepewności pomiaru, a w przypadku, gdy jest ona zbyt duża w stosunku do wymagań klienta lub obowiązujących norm, szukania sposobów jej zmniejszenia. Zmusza również do krytycznej analizy istniejących przepisów i norm m.in. pod kątem aktualnego poziomu możliwości pomiarowych, a w przypadku gdy jest to możliwe – uzupełnienia lub modyfikacji metodyki pomiaru zgodnie z zaleceniami dotyczącymi Systemów Jakości [4, 5].

1. SPECYFIKA POMIARU PARAMETRÓW POMP

W badaniach pomp i zespołów pompowych, podstawowymi parametrami mierzonymi są: ciśnienie (w króćcu ssawnym i tłocznym), średnie natężenie przepływu, moment skręcający na wale i prędkość obrotowa, a w przypadku monoblokowych zespołów pompowych, moc elektryczna P_{el} silnika napędzającego lub zużycie paliwa silnika spalinowego.

Parametry te w ustalonym punkcie pracy zespołu pompowego nie zachowują się stabilnie, lecz zmieniają się w nieuporządkowany sposób w pewnym zakresie. Przyczyny tych wahań są różnorodnego pochodzenia. W pompach wirowych przyczynami niestabilności mogą być:

- skończona liczba łopatek; przy przechodzeniu łopatki w pobliżu języka spirali zmienia się wartość ciśnienia w tym obszarze i wartość siły działającej na wirnik (powstają pulsacje o częstotliwości łopatkowej proporcjonalnej do prędkości wirnika i do liczby łopatek); gdy łopatka wirnika przesuwana jest w pobliżu łopatek kierownicy powstają impulsy ciśnieniowe (pulsacje o częstotliwości łopatkowej proporcjonalnej do prędkości wirnika, do liczby łopatek wirnika i do liczby łopatek kierownicy),
- niestabilność związana z turbulentnym charakterem przepływu,
- praca w obszarze kawitacji,
- drgania wynikające z niewyważenia zespołu wirującego, z powodu istnienia sił hydraulicznych powodowanych przez spiralę, sił hydraulicznych wywołanych przez jednołatkowe wirniki (pulsacje o częstotliwości proporcjonalnej do prędkości wirnika) itp.,
- drgania wynikające z niewłaściwego zamocowania układu pompowego,
- niestabilność prędkości obrotowej pompy spowodowana wahaniami obciążenia silnika napędzającego pompę, wahaniami napięcia zasilającego silnika elektrycznego lub częstotliwości sieci.

W niektórych przypadkach wahania parametrów mogą być nawet bardzo duże i sięgać kilkunastu procent wartości zakresu. Szczególnie trudnym pomiarem jest pomiar w obszarze kawitacji, kiedy bardzo silnie mogą zmieniać się wszystkie parametry pracy pompy.

Norma PN-85/M-44005, [2] ogranicza stosowanie pomiarów do takich, podczas których oscylacje mierzonej wartości nie przekraczają 6% (w niektórych przypadkach i dla niektórych parametrów powinny być one mniejsze), jednak w obszarze kawitacji trudno ten wymóg spełnić.

W przypadku pomp wyporowych niestabilność parametrów może być wynikiem:

- drgań przenoszonych z silnika napędowego (szczególnie silników spalinowych),
- drgań wynikających ze złego zamocowania zespołu pompowego,
- cyklicznego charakteru pracy organu roboczego, co może powodować bardzo wyraźne pulsacje ciśnienia.

Norma PN-87/M-44002, [6] podobnie jak norma [2] wprowadza ograniczenie oscylacji mierzonej wartości do poziomu co najwyżej 6%. Jednocześnie zezwala na stosowanie elementów tłumiących w urządzeniu pomiarowym.

2. SZACOWANIE NIEPEWNOŚCI POMIARU – STAN AKTUALNY

Obowiązujące w badaniach pomp normy [2, 6] nie określają precyzyjnie kryteriów i metodyki obliczania niepewności pomiaru o charakterze przypadkowym. Mierzone wielkości, potrzebne do wyznaczenia parametrów pracy pompy, zachowują się jednak przypadkowo pod wpływem różnych czynników, m.in. tych wymienionych w poprzednim rozdziale. Istniejące możliwości pomiarowe w momencie wydania ww. norm uniemożliwiały oszacowanie niepewności przypadkowej.

Powszechnie stosowane przyrządy pomiarowe analogowe (tj. U-rurkowe manometry rtęciowe, urządzenia wskazówkowe) bez możliwości rejestracji szybkozmiennego sygnału mierzonego zmuszały do oceny wartości średniej „na oko”. Ocena taka, choć niekoniecznie mało dokładna, nie pozwala na ścisłe, liczbowe określenie podstawowych cech mierzonej wielkości. Nie pozwala zatem ona na spełnienie podstawowego wymogu precyzyjnego określenia niepewności pomiaru, nakładanego na laboratoria akredytowane.

Coraz powszechniejsze obecnie przyrządy pomiarowe z elementami elektronicznymi umożliwiają rejestrację wartości mierzonej szybkozmienniej, a co za tym idzie, określenie rozkładu i cech statystycznych mierzonej wielkości.

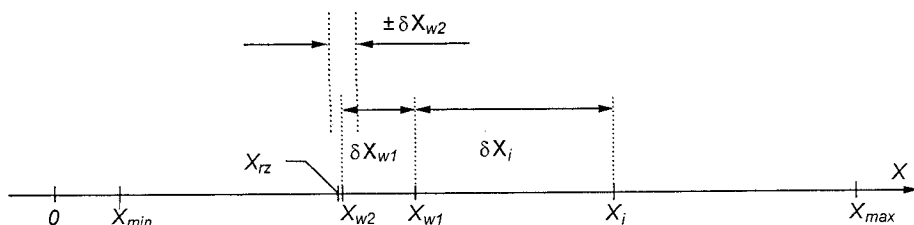
3. NIEPEWNOŚĆ SYSTEMATYCZNA

W normach PN-81/M-44006, [1] i PN-85/M-44005, [2] nałożony jest na laboratoria badające pompy obowiązek legalizacji aparatury pomiarowej. Okres ważności legalizacji wynika z przepisów stosowanych przez instytucje państwowe powołane do wykonywania legalizacji bądź uwierzytelniania (Główny Urząd Miar, Okręgowe Urzędy Miar) i zazwyczaj wynosi jeden rok dla typowych przyrządów laboratoryjnych. Wydawane przez te urzędy świadectwa legalizacji nie zawierają szczegółowej informacji o rozkładzie niepewności systematycznej przyrządu, lecz jedynie potwierdzenie jego klasy, a więc maksymalnej niepewności w całym zakresie działania przyrządu.

W przypadku, kiedy laboratorium działa w systemie jakości, każdy przyrząd pomiarowy musi być uwiarygodniony przez wzorcowanie [5]. Okres ważności wzorcowania nie może być narzucony arbitralnie, lecz powinien zależeć od intensywności użytkowania oraz własności technicznych danego przyrządu, takich jak: wrażliwość na uszkodzenia, trwałość itp. Okres ten powinien być ustalany przez personel techniczny na podstawie czynności sprawdzania bieżą-

cego i okresowego. Wynikiem wzorcowania powinno być świadectwo wzorcowania zawierające charakterystykę niepewności systematycznych przyrządu w całym jego zakresie pomiarowym.

Na rysunku 1 pokazany jest łańcuch niepewności systematycznych przy pomiarze wielkości X_{rz} (wartość rzeczywista).



Rys. 1. Struktura niepewności systematycznych

X_i jest wartością odczytaną z podstawowego przyrządu pomiarowego stosowanego w laboratorium, X_{w1} wartością odczytaną z przyrządu odniesienia (wzorzec 1), zaś X_{w2} wartością odczytaną z przyrządu odniesienia dla przyrządu wzorcowego 1 (wzorzec 2). Świadectwo wzorcowania powinno zawierać rozkład niepewności $\delta X_i = f(X_i)$ w całym zakresie pracy przyrządu, tj. dla $X_{min} < X_i < X_{max}$.

Gdyby dokonać poprawki wartości X_i o δX_i nie otrzymalibyśmy dokładnej wartości X_{rz} , bowiem wskazania przyrządu odniesienia (wzorzec 1) obciążone są niepewnością pomiarową. Wzorcując go przyrządem o większej dokładności moglibyśmy uzyskać informację o odchyłce δX_{w1} wskazania między przyrządami wzorcowymi X_1 i X_2 . Aby określić niepewność systematyczną, po uwzględnieniu obu odchyłek musielibyśmy znać niepewność pomiaru dla wzorca 2 np. wynikają z jego klasy $\pm \delta X_{w2}$.

W podanym wyżej przykładzie zostało założone, że pozostałe niepewności, składające się na ostateczną niepewność pomiaru, takie jak: metody, przypadkowa i błąd subiektywny, są pomijalne. W ogólnym przypadku jednak powinny być uwzględnione.

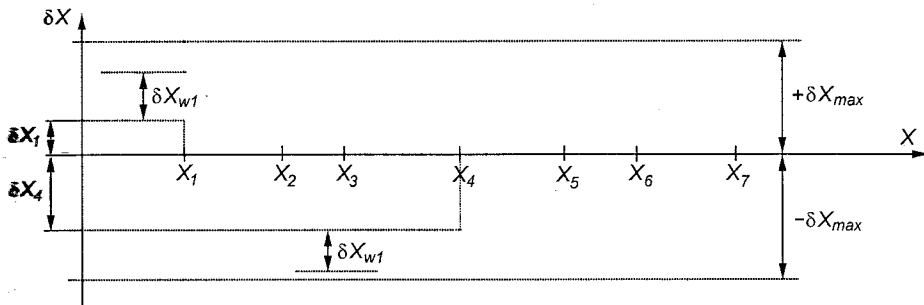
Na świadectwie wzorcowania musi być zatem podana niepewność pomiaru dla przyrządu odniesienia. Może być ona podana np. w postaci maksymalnej niepewności dla całego zakresu lub w postaci rozkładu niepewności.

Wykorzystanie informacji o niepewności systematycznej pozwala na jej znaczną redukcję do poziomu niepewności pomiaru wzorcem. W przypadku jak na rys. 1 do niepewności wynikającej z klasy $\pm \delta X_{w2}$.

Dla porównania przedstawiony jest przypadek, gdy niepewność systematyczna przyrządu określa się wyłącznie poprzez jego klasę, tj. $(\delta X_{max}/X_{max}) \cdot 100\%$.

W takim przypadku sprawdza się jedynie, czy maksymalna niepewność przyrządu powiększona o niepewność pomiaru przyrządu odniesienia (wzo-

1) nie wykracza poza niepewność wynikającą z klasy przyrządu, która np. wybita jest w postaci cechy.



Rys. 2. Określenie klasy przyrządu pomiarowego

Postępowanie się niepewnością wynikającą z klasy przyrządu jest wygodniejsze przy analizie niepewności pomiaru. Nie wymaga bowiem użycia indywidualnej charakterystyki niepewności pomiarowej tego przyrządu. Jeżeli taka niepewność jest wystarczająca dla celów pomiarowych wyznaczonych np. uregulowaniami branżowymi, normami, itp. to nie ma potrzeby korzystania z rozkładu niepewności.

4. NIEPEWNOŚĆ PRZYPADKOWA

Jeżeli niepewność przypadkowa jest porównywalna bądź większa od systematycznej, powinna zostać oszacowana. Niezbędne jest wtedy wielokrotne powtórzenie pomiaru tej samej wielkości. Najlepszym przybliżeniem, w sensie statystycznym, wartości oczekiwanej z nieskończonej liczby pomiarów jest średnia arytmetyczna \bar{X} z serii $n < \infty$ pomiarów. Niepewność przypadkowa jest zwykle określona poprzez obszar wokół wartości średniej, w którym z zadanym prawdopodobieństwem znajduje się pojedynczy pomiar.

Normy pompowe [8, 9] zalecają przyjęcie wielkości tego obszaru równej podwójnej wartości odchylenia standardowego S_X pojedynczego pomiaru X_i od wartości średniej, określanego dla $n \geq 30$ według:

$$S_X = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

Prawdopodobieństwo wystąpienia wartości mierzonej w tym obszarze wynosi 95,4%, a niepewność przypadkowa przyjmowana jest jako:

$$\delta X = \pm 2 S_X$$

W przypadku pomiaru własności takiego samego obiektu, np. pomiaru grubości podkładki, wygodnie jest oszacować S_x dla pewnej serii tych obiektów, określając na tej podstawie niepewność przypadkową dla mierzonej własności dowolnego obiektu.

W przypadku, gdy pojedyncza zmierzona wartość nie jest podstawą ostatecznego wyniku, lecz tworzy się go na podstawie wartości średniej z wielu pomiarów tej samej wielkości, niepewność przypadkową określa się [10] przy wykorzystaniu odchylenia standardowego wartości średniej \bar{X} od wartości oczekiwanej dla danego rozkładu. Takie podejście wynika z faktu, że średnia arytmetyczna jest znacznie lepszym przybliżeniem wartości oczekiwanej niż pojedynczy pomiar.

Niepewność przypadkową określa się wtedy arbitralnie, w zależności od proporcji do niepewności systematycznej. Jeśli np. ta ostatnia jest pomijalna, w porównaniu z niepewnością przypadkową, zazwyczaj przyjmuje się jako satysfakcjonujący poziom ufności 68,2% odpowiadający pojedynczemu odchyleniu standardowemu wartości średniej

$$\delta \bar{X} = \pm S_{\bar{X}}$$

gdzie odchylenie standardowe średniej arytmetycznej \bar{X}

$$S_{\bar{X}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}}$$

Jeżeli niepewność przypadkowa jest porównywalna z niepewnością systematyczną powinna być ona określona na podobnym poziomie ufności. W przypadku, gdy niepewność systematyczna wynika z klasy przyrządu (maksymalna niepewność pomiaru przyrządem określana na poziomie ufności 100%) niepewność losową wygodnie jest przyjąć na poziomie ufności 99,7%. Wtedy niepewność przypadkowa wartości średniej jest określona przez potrójne odchylenie standardowe

$$\delta \bar{X} = \pm 3 S_{\bar{X}}$$

5. NIEPEWNOŚĆ METODY

Wielkości, które wymagają metody postępowania nie związanej bezpośrednio z samym pomiarem, mogą być obarczone dodatkową niepewnością samej metody. Niepewność ta może mieć bardzo różny charakter. I tak np. w orientacyjnej metodzie określania mocy akustycznej zespołu pompowego [7] nieskończoną liczbę punktów na powierzchni pomiarowej zastępuje się pięcioma wyróżnionymi punktami, na podstawie których przeprowadza się uproszczone

całkowanie po powierzchni. Przy określaniu parametrów krytycznych, podczas badania kawitacji, trzeba geometrycznie wyznaczyć punkt przecięcia krzywej kawitacyjnej z krzywą odniesienia, co wiąże się z niedokładnością zależną od liczby punktów pomiarowych w obszarze krytycznym i od sposobu interpolacji krzywych.

6. BŁĄD SUBIEKTYWNY

Podczas wykonywania badań, sama przeprowadzająca je osoba może być źródłem błędów. Mogą one wynikać ze zwykłych pomyłek podczas zapisywania odczytanej wartości do protokołu z badań, np. przez wpisanie 6 zamiast 9 itp.

Mogą być one również wynikiem nieświadomej selekcji wielkości odczytywanych z przyrządu pomiarowego. Jeśli np. laborant spodziewa się określonej wartości i część odczytów jest wyraźnie powyżej tej wartości, to może on wybierać w dalszej kolejności te odczyty, które są poniżej, tak aby wartość średnia wypadła w pobliżu wartości oczekiwanej.

Wreszcie błąd może być wynikiem skłonności do zaokrąglania lub unikania pewnych wartości np. 3 lub 7.

Błędy subiektywne są trudne do kontroli. Zależą one od dojrzałości i doświadczeń personelu badawczego. Wykonanie badań określających typ i częstość błędów subiektywnych popełnianych przez pracowników laboratorium jest czasochłonne (okres wieloletni) i drogie. Jednym ze sposobów ich uniknięcia jest automatyzacja pomiaru. Jeżeli jest to możliwe, należy dążyć do rejestracji wielkości mierzonych, zaś ocenę wiarygodności pomiaru oprzeć na kryteriach liczbowych.

7. NIEPEWNOŚĆ WARUNKÓW ODNIESIENIA

O jakości pomiaru świadczy powtarzalność pomiaru. Aby prawidłowo odtworzyć pomiar należy właściwie zidentyfikować warunki środowiskowe i ogólnie wszystkie te czynniki, które wpływają na wartość mierzonej wielkości [3]. Wielkości te powinny być kontrolowane, a jeśli to niezbędne i możliwe, monitorowane i rejestrowane. Warunki odniesienia nie powinny się zmieniać w trakcie pomiaru i odpowiadać tym przewidzianym dla danego typu badania. Jeżeli takie zmiany zachodzą, ich wpływ na wynik pomiaru powinien być określony.

W przypadku obiektu badanego, np. zespołu pompowego mogą to być:

- stopień nagrzania silnika napędzającego,
- wielkość napięcia zasilającego i częstotliwość w sieci,
- prędkość obrotowa pompy,

- geometryczna wysokość ssania,
- temperatura pompowanego medium,
- własności hydrauliczne układu pomiarowego,
- poziom tła akustycznego,
- dla hydroforu – nastawy ciśnień pracy.

W przypadku przyrządu pomiarowego takimi czynnikami mogą być:

- temperatura otoczenia, jego ciśnienie lub wilgotność,
- warunki zasilania (stopień naładowania baterii) przyrządu,
- ustawienie przyrządu, wypoziomowanie itp.

8. NIEPEWNOŚĆ POMIARU

Na niepewność pomiaru składają się wszystkie niepewności i błędy wymienione w poprzednich rozdziałach. Jej określenie wymaga kilkuletnich badań uwzględniających te niepewności, które zależą od poziomu i umiejętności personelu, jak i te związane z jakością aparatury pomiarowej. Ze względu na koszty takich badań zwykle ogranicza się zakres ostatecznej niepewności pomiarowej do tych składników, które są największe i mogą być oszacowane na bieżąco.

9. PODSUMOWANIE

- Dokonując oceny całkowitej niepewności pomiarów pomp należy brać pod uwagę specyfikę pomiarów.
- Ze względu na trudności w ocenie ostatecznej niepewności pomiarowej szczególnie starannie należy oszacować niepewności: systematyczną, przypadkową i metody. Należy dążyć do uniknięcia błędów subiektywnych poprzez automatyzację pomiaru.
- Podczas pomiarów należy kontrolować i mierzyć parametry warunków odniesienia dla zapewnienia stabilności przebiegu pomiarów i ich powtarzalności.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-81/M-44001 Pompy wirowe i ich układy. Wielkości charakterystyczne. PKNMiJ 1981.
- [2] PN-85/M-44005 Pompy wirowe. Pomiary wielkości charakterystycznych. PKNMiJ 1986.
- [3] Przewodnik nr 25 – Wymagania ogólne dotyczące kompetencji laboratoriów pomiarowych i badawczych. PKN, Warszawa 1995.

- [4] PN-ISO 8402 Zarządzanie jakością i zapewnienie jakości. Terminologia. PKN, Warszawa 1996.
- [5] PN/EN-45001 Ogólne kryteria działania laboratoriów badawczych. PKNMiJ, Warszawa 1993.
- [6] PN-87/M-44002 Pompy wyporowe. Badania odbiorcze. PKNMiJ 1987.
- [7] PN-84/N-01332 Hałas. Orientacyjna metoda określenia poziomu mocy akustycznej hałasu maszyn. PKNMiJ 1981.
- [8] PN-EN-ISO 9906 Pompy wirowe – Przepisy badań odbiorczych parametrów hydraulicznych – Klasa 1 i 2 – norma w przygotowaniu.
- [9] ISO 5198 Centrifugal, mixed flow and axial pumps – Code for hydraulic performance tests – Precision class, ISO 1987.
- [10] John R. Taylor: Wstęp do analizy błędów pomiarowych. PWN, Warszawa 1995.

UNCERTAINTY IN THE MEASUREMENT OF PUMP PARAMETERS IN AN ACREDITED LABORATORY

Summary

The basic problems related to measurement and the metrological standards for pump laboratories introducing a Quality System are discussed in the paper. Fundamental types of uncertainty appearing during measurement are analyzed. Their origin is also considered.