

Pomiary pneumatyczne powierzchni walcowych: zarys problematyki

Air gauging: measurements of cylindrical surfaces

CZESŁAW JANUSZ JERMAK
MIROSLAW RUCKI*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.2.11

Przedstawiono problemy związane z pomiarami powierzchni walcowych za pomocą pneumatycznych przetworników długości (PPD). W przypadku pomiarów pneumatycznych powierzchni płaskich i walcowych przebiegi charakterystyk statycznych czujników nieco się różnią. Opisano stanowisko laboratoryjne do badań charakterystyk statycznych PPD oraz omówiono program badań laboratoryjnych mających na celu dokładne określenie owych różnic.

SŁOWA KLUCZOWE: czujnik pneumatyczny, charakterystyka statyczna, pomiar powierzchni walcowej

Principle of air gauging is recalled in the paper in historical context as well as in the context of today's interest of industry. Requirements for gauging of cylindrical surfaces are discussed. Metrological characteristics of the static air gauge would slightly differ between the cases when flat or cylindrical surfaces are subjected to measurement. Described is laboratory test stand equipment and suitable investigation programme for precise identification of the differences.

KEYWORDS: air gauges, static characteristics, measurement of the cylindrical surface

Urządzeń pneumatycznych do pomiaru długości po raz pierwszy użyto w 1917 r. [1]. Od lat 30. XX w. były one wykorzystywane we Francji, w USA, Australii i Wielkiej Brytanii, a od lat 40. również w Związku Radzieckim [2] i Niemczech [3]. W latach 50. zaczęły się pojawiać publikacje naukowe na temat pneumatyki pomiarowej, również w języku polskim [4]. Pneumatyczne przetworniki długości (PPD) przez wiele lat stosowano w kontroli czynnej oraz w automatach sortujących i selekcyjnych, aż zostały stopniowo wyparte przez czujniki indukcyjne [2]. Nadal jednak przemysł interesuje się pneumatyką pomiarową. Przyrządy te są cenione m.in. ze względu na możliwość dokonywania pomiarów metodą bezstykową [5], także wielkości zmiennych w czasie [6]. Ta ważna grupa narzędzi pomiarowych znajduje zastosowanie w dokładnych pomiarach części maszyn [7] oraz w układach biernej [8] i czynnej [9] kontroli wymiaru i kształtu.

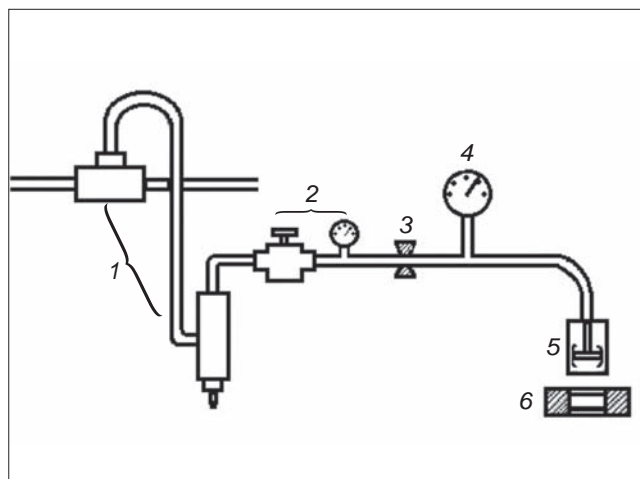
Wytwarzane współcześnie przyrządy pneumatyczne są wyposażone w elektronikę zapewniającą przetwarzanie sygnału pneumatycznego na elektryczny [10]. Istnieje możliwość ich współpracy z komputerem i archiwizacji danych, dostępne są również funkcje sterowania urządzeniami zewnętrznymi itp. [11]. Pod tym względem omawiane urządzenia dorównują najnowszym rozwiązaniom przyrządów wyposażonych w czujniki indukcyjne lub optoelektroniczne [12].

Badania naukowe pokazują, że ograniczenia wynikające z natury zjawisk gazodynamicznych są do pokonania, co stwarza szansę na rozszerzenie zastosowania PPD w praktyce przemysłowej, a nawet na wyparcie przez nie innych rodzajów czujników [13], zwłaszcza że wciąż możliwy jest rozwój tych urządzeń w celu poprawy ich właściwości metrologicznych [14].

Zasada pomiaru pneumatycznego

Działanie pneumatycznych przetworników do pomiaru długości opiera się na zmianie parametrów przepływającego przez nie powietrza, która jest wywołana przyrostem szczeliny pomiarowej pomiędzy czołem dyszy pomiarowej a powierzchnią mierzonego przedmiotu [15]. Klasyfikacji przetworników dokonuje się na podstawie mierzonego parametru przepływu. W literaturze zachodniej zwykle spotyka się podział na przetworniki przepływowe i ciśnieniowe, przy czym do przepływowych zaliczane są również przetworniki wykorzystujące pomiar prędkości przepływu [16]. Radzieccy naukowcy dzielili czujniki pneumatyczne na przyrządy o zmiennym lub stałym spadku ciśnienia [17] bądź na mano- i rotametryczne [18]. W literaturze polskojęzycznej wyodrębnia się nie tylko przetworniki typu przepływowego i prędkościowego, lecz także – uwzględniając ciśnienie zasilania przyrządu – przetworniki wysoko- i niskociśnieniowe [19]. Obecnie w praktyce przemysłowej najczęściej używa się przyrządów wysokociśnieniowych, w których manometryczne ciśnienie zasilania spełnia warunek $p_{zn} \geq 150 \text{ kPa}$ [15].

Zasada pomiaru pneumatycznego nie uległa większym zmianom od czasów II wojny światowej [20]. Zasadnicze elementy pneumatycznego przetwornika długości przedstawiono na rys. 1.

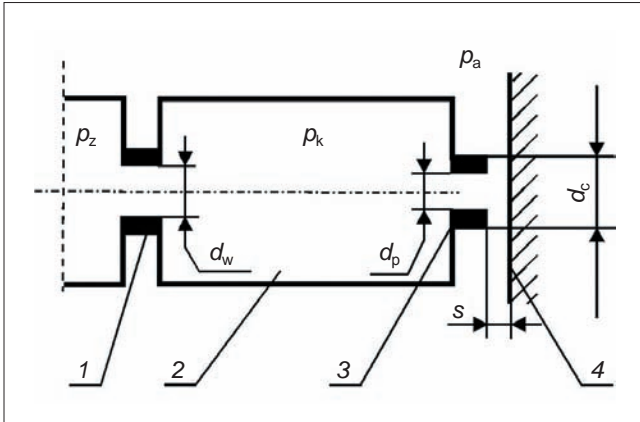


Rys. 1. Podstawowe elementy PPD [16]: 1 – stabilizator ciśnienia zasilającego, 2 – reduktor, 3 – dysza wlotowa, 4 – urządzenie wskazujące ciśnienie lub wielkość przepływu, 5 – głowica pomiarowa z jedną lub kilkoma dyszami, 6 – wzorzec nastawczy

Przetworniki powinny być zasilane uzdatnionym powietrzem spełniającym warunki oczyszczenia zgodnie z drugą klasą jakości stanu powietrza technicznego [21]. Ponadto wymagana jest dokładna stabilizacja ciśnienia zasilania p_z (wahania nie mogą przekraczać 0,03% podczas nominalnego poboru powietrza).

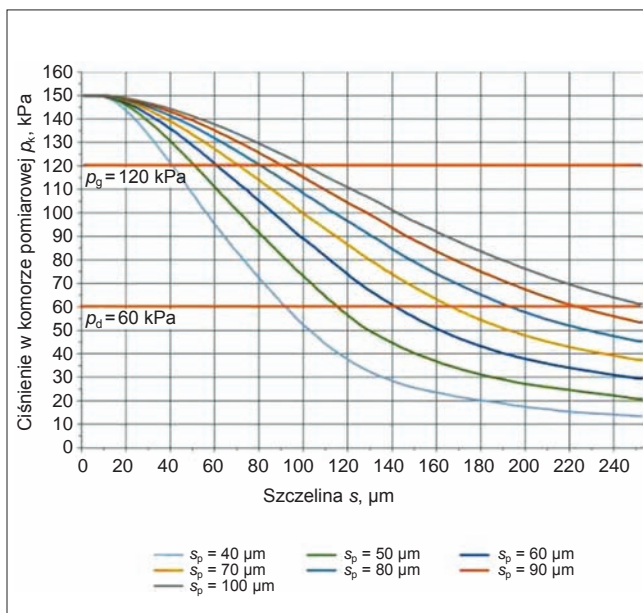
* Dr hab. inż. Czesław Janusz JermaK (czeslaw.jermak@put.poznan.pl), dr hab. inż. Mirosław Rucki (miroslaw.rucki@gmail.com) – Politechnika Poznańska

Schemat ideowy czujnika pneumatycznego pokazano na rys. 2. W trakcie pomiaru wypływ powietrza z dyszy pomiarowej (lub z kilku dysz) jest ograniczony przez przesłonę znajdującą się w odległości s od czoła dyszy. W przemysłowych układach pomiarowych przesłonę stanowi mierzony przedmiot. W dyszach wlotowej i pomiarowej z reguły znajdują się otwory cylindryczne o przekroju kołowym i średnicy odpowiednio d_w i d_p . W miejscu dyszy wlotowej umieszcza się niekiedy zawór iglicowy pozwalający na zmianę przekroju. Pole powierzchni przekroju dyszy wlotowej oznaczono symbolem A_w , dyszy pomiarowej – A_p , a zespołu „dysza pomiarowa – przesłona” (pobocznica cylindra o wysokości s i średnicy d_p) – A_{ps} [15].



Rys. 2. Jednokaskadowy pneumatyczny przetwornik do pomiaru długości: 1 – dysza wlotowa, 2 – komora pomiarowa, 3 – dysza pomiarowa, 4 – przesłona. Oznaczenia: d_w – średnica dyszy wlotowej, d_p – średnica dyszy pomiarowej, d_c – średnica czoła (zewnętrzna) dyszy, s – odległość przesłony od czoła dyszy pomiarowej, p_a – ciśnienie atmosferyczne (barometryczne), p_z – ciśnienie zasilenia, p_k – ciśnienie kaskadowe panujące w komorze pomiarowej [22]

W trakcie pomiaru w komorze pomiarowej panuje ciśnienie pomiarowe (kaskadowe) p_k , którego wartość jest uzależniona od szerokości szczeliny pomiarowej s oraz od geometrii (wymiarów i oprofilowania) dysz wlotowej i pomiarowej.



Rys. 3. Wykres charakterystyk statycznych dla różnych nastaw zaworu iglicowego (p_g i p_d – górna i dolna granica zakresu pomiarowego) [24]

W uproszczeniu funkcja przetwarzania ma postać [23]:

$$p_k = \frac{p_z}{1 + 4 \frac{\alpha_{ps}^2 d_p^2 s^2}{\alpha_w^2 d_w^4}}$$

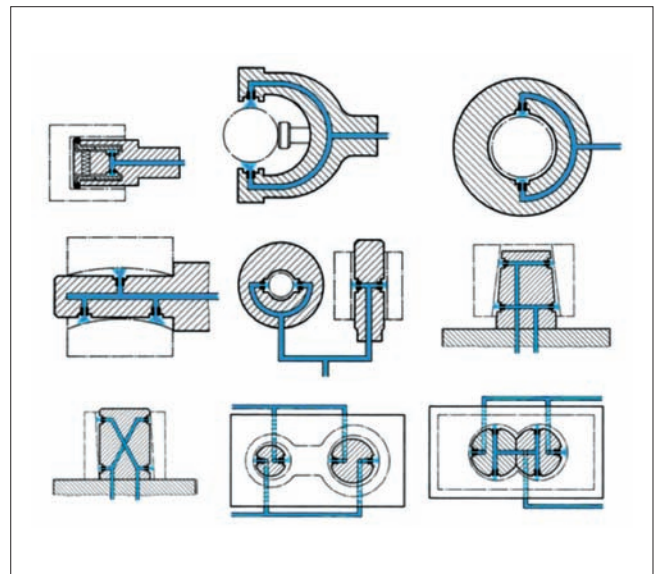
gdzie: α_w i α_{ps} – współczynniki przepływu dla dyszy wlotowej oraz dla zespołu „dysza pomiarowa – przesłona” (współczynniki te mogą ulegać znacznym zmianom w zależności od geometrii dysz i przesłony, m.in. od promienia walcowości mierzonego przedmiotu).

Przykłady rzeczywistego przebiegu funkcji przetwarzania $p_k = f(s)$ pokazano na rys. 3 [24] dla różnych przekrojów dyszy wlotowej (różnych nastaw zaworu iglicowego). Jak widać, zmianie ulega długość odcinka proporcjonalnego, traktowanego jako zakres pomiarowy z_p pneumatycznego przetwornika długości, a także nachylenie charakterystyki, które odpowiada czułości statycznej K .

Można zauważyć, że zmiana przekroju dyszy wlotowej powoduje nie tylko zwiększenie lub zmniejszenie czułości wraz ze zmniejszeniem lub zwiększeniem zakresu pomiarowego. Zmianie ulega również wartość szczeliny s_p początkującej zakres pomiarowy. To oznacza, że czujnik o większej czułości ma mniejszy zakres pomiarowy i pracuje w zakresie mniejszych szczelin.

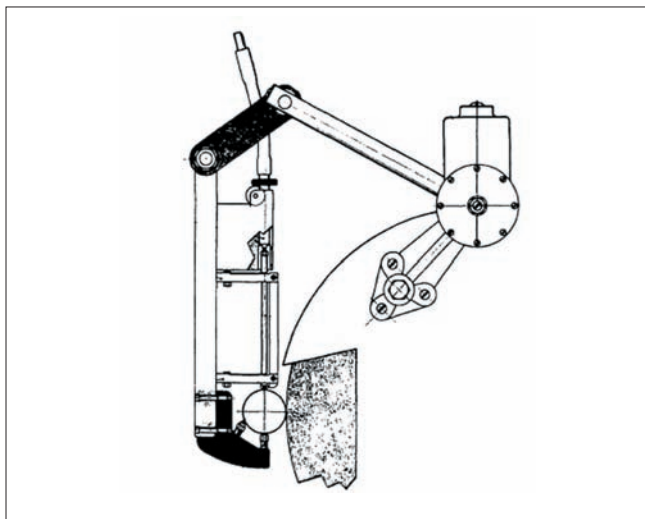
Pomiary elementów walcowych w praktyce przemysłowej

Okrągłość należy do najważniejszych cech geometrycznych wyrobów objętych pomiarami [25]. Pneumatyczne przetworniki długości praktycznie od początku swego istnienia są stosowane do pomiaru średnic [26]. Przy pomiarze bezstykowym wiąże się to z wypływem powietrza na powierzchnię walcową mierzonego przedmiotu. Na rys. 4 przedstawiono przykłady pomiarów średnicy, a także błędów kształtu i położenia za pomocą głowic pneumatycznych.



Rys. 4. Przykłady pomiarów elementów o zaokrąglonej powierzchni [27]

Podobnie jest w układach kontroli czynnej podczas obróbki ubytkowej, np. toczenia lub szlifowania. Klasyczny sposób pomiaru średnicy szlifowanego wałka, stosowany już w latach 50. XX w., przedstawiono na rys. 5 [28]. W tym przypadku osiągnięcie zadanej wartości ciśnienia kaskadowego (odpowiadającej wymiarowi granicznemu) powodowało wyłączenie obrabiarki.



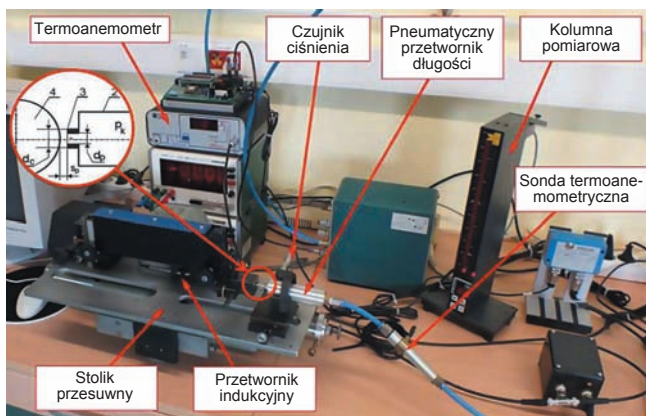
Rys. 5. Zastosowanie pneumatycznego przetwornika długości w układzie kontroli czynnej podczas szlifowania [28]

Prawidłowa praca czujnika pneumatycznego jest możliwa jedynie pod warunkiem poprawnego przeprowadzenia procedury wzorcowania za pomocą wzorców nastawczych, które zazwyczaj mają formę pierścieni, względnie wałców wzorcowych. Jednakże w wielu wypadkach wzorcowanie z zastosowaniem płaskiej powierzchni przesłaniającej uproszczyłoby tę procedurę, nie wspominając o przyjęciu pewnego standardu postępowania podczas badań modeli średnicówek. Z tego punktu widzenia ważne jest ustalenie, czy wpływ zmiany promienia krzywizny mierzonej powierzchni R_w na parametry charakterystyki statycznej jest istotny, czy też można go pominąć.

Badania laboratoryjne

Charakterystyki statyczne przetwornika pneumatycznego wyznaczono na specjalnym stanowisku badawczym [15] (rys. 6), składającym się z fizycznego modelu pneumatycznego przetwornika długości oraz piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia Kistler 4043 A5, współpracującego ze wzmacniaczem Kistler 4801 A [29]. Na rysunku pokazano też schematycznie, że przesłona została wykonana w postaci fragmentu walca o promieniu krzywizny $R_w = 5; 12,5; 25; 50$ mm. Dla porównania wykorzystano również powierzchnię płaską o $R_w = \infty$.

Stopniową zmianę szerokości szczeliny s zapewniał przesuwany stół sterowany komputerowo. Ponadto stanowisko było wyposażone w kolumnę pomiarową Tesa T500 współpracującą z przetwornikiem GT21HP (do pomiaru przemieszczenia stołu), którego błąd graniczny wynosił $U_{0,95} = \pm 0,17 \mu\text{m}$.



Rys. 6. Stanowisko do wyznaczania charakterystyki statycznej pneumatycznego przetwornika długości [29]

Za pomocą sondy termooanemometrycznej, zainstalowanej na przewodzie zasilającym przetwornik, sprawdzano dokładność przylegania czoła dyszy pomiarowej do powierzchni przesłony przy szczelinie $s = 0 \mu\text{m}$. Wykorzystano do tego termooanemometr PAT 88 wykonany w Instytucie Górotworu PAN w Krakowie oraz współpracującą z nim sondę mierzącą prędkość przepływu w przewodzie doprowadzającym powietrze do przetwornika.

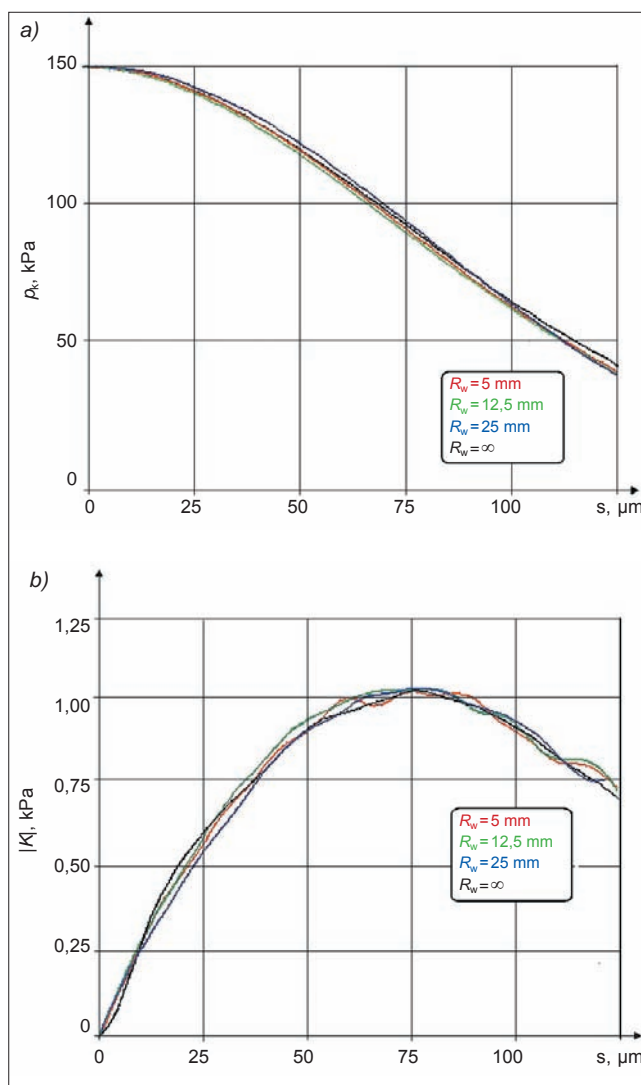
Dzięki przypisaniu poszczególnym wartościom szerokości szczeliny s wartości ciśnienia pomiarowego $p_k = f(s)$ utworzono eksperymentalne charakterystyki statyczne i wyznaczono ważniejsze parametry metrologiczne przetworników. W tym celu posłużono się programem StanBad opracowanym w Zakładzie Metrologii Systemów Pomiarowych Politechniki Poznańskiej. Do obliczenia parametrów metrologicznych oraz graficznej prezentacji wyników wykorzystano program LinStat [15].

Ocenę wpływu promienia R_w powierzchni walcowej na parametry charakterystyki statycznej przeprowadzono dla przetwornika o:

- średnicy dyszy wlotowej $d_w = 0,71; 1,21$ mm,
- średnicy dyszy pomiarowej $d_p = 1,61$ mm,
- unormowanej średnicy czoła $D_c = d_c/d_p = 1,5; 3$.

Wybrane do badań dysze wlotowe zapewniały czujnikom zakres pomiarowy ok. 60 oraz 100 μm przy czułości odpowiednio ok. 1,0 oraz 0,3 kPa/ μm .

Na rys. 7 przedstawiono przykładowe wykresy otrzymane w trakcie badań.



Rys. 7. Uzyskane doświadczalnie przebiegi charakterystyk: a) statycznych, b) czułości przetwornika o wymiarach dysz: $d_p = 1,61$ mm, $d_w = 0,71$ mm, $D_c = 1,5$

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej analizy wstępnej stwierdzono, że wzorcowanie z zastosowaniem płaskich powierzchni przesłaniających wymaga szczegółowych badań laboratoryjnych. Gdyby bowiem udało się wykazać, że wykonywanie wzorca walcowego nie jest konieczne, będzie można znacznie ograniczyć czas i koszty procedury wzorcowania czujnika pneumatycznego.

LITERATURA

- Burrows V.R. "The Principles and Applications of Pneumatic Gauging". *Founding, Welding, Production Engineering*. Oct. 1976: pp. 31÷42.
- Вороничев П.П. и др. "Инкрементные емкостные преобразователи перемещений". Датчики и системы. No. 2 (2001).
- Goethel E.F. "Pneumatisches Längenmeßverfahren". *Archiv für Technisches Messen*. Vol. 151 (Juli 1947): pp. V 1121÷1126.
- Mierzejewski H. „Szybkość działania czujnika pneumatycznego”. *Przegląd Mechaniczny*. Nr 4 (1954) XIII: s. 110÷111.
- Лепешкин А.В., Михайлин А.А., Шейпак А.А. „Гидравлика и гидропневмопривод. Часть 2”. 5-е издание. Москва: МГИУ, 2009.
- Grandy D., Koshy P., Klocke F. "Pneumatic non-contact roughness assessment of moving surfaces". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. Vol. 58/1 (2009): pp. 515÷518.
- Hennessy R. "Use air to improve measurements; manufacturers turn to air gaging for high-resolution measurements". *Quality Magazine*. No. 5 (2005): pp. 30÷33.
- Wang Y.H. et al. "An Automatic Sorting System Based on Pneumatic Measurement". *Key Engineering Materials*. Vols. 295–296 (2005): pp. 563÷568.
- Koehn C. "In-Process Air Gaging". *Quality Magazine*. Vol. 53, Iss. 5 (2014): pp. 22–23.
- Jabłoński Z., Zelczak A. „Nowe możliwości zastosowania pomiarów elementów maszyn metodami pneumatycznymi”. *Materiały VIII Konferencji Naukowo-Technicznej „Metrologia w technikach wytwarzania maszyn” Szczecin–Międzyzdroje, 20÷23.09.1999 r.*: s. 75÷81.
- Rucki M., Barisic B., Varga G. "Air Gauges as a Part of the Dimensional Inspection Systems". *Measurement*. Vol. 43, Iss. 1 (2010): pp. 83÷91.
- Schuetz G. "Air Gaging Gets Better with Age". *Quality Magazine*. No. 3 (2008): pp. 28÷32.
- Schuetz G. "When Air Blows Mechanical Gaging Away". *Quality Magazine*. Vol. 53, Iss. 1 (2014): pp. 28÷32.
- Jermak C.J., Rucki M. "Air Gauging: Still Some Room for Development". *AASCIT Communication*. Vol. 2, Iss. 2 (2015): pp. 29÷34.
- Jermak C.J. „Teoretyczne i praktyczne aspekty kształtowania statycznych właściwości metrologicznych pneumatycznych przetworników długości”. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2012.
- Curtis M., Farago F. "Handbook of Dimensional Measurement". New York: Industrial Press Inc., 2014.
- „Справочник металлиста”. Под ред. С.А. Чернавского и В.Ф. Решикова. Т. 1. Изд. 3-е, перераб. Москва: Машиностроение, 1976.
- Владзиевский А.П., Белоусов А.П. „Основы автоматизации и механизации технологических процессов в машиностроении”. Москва: Издво „Высшая школа” 1966.
- Jakubiec W., Malinowski J. „Metrologia wielkości geometrycznych”, wydanie czwarte zmienione. Warszawa: WNT, 2004.
- Kennedy C.W., Hoffman E.G., Bond S.D. "Inspection and Gaging", 6th ed. New York: Industrial Press Inc., 1987.
- Zelczak A. „Pneumatyczne pomiary długości”. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2002.
- Jermak C.J., Rucki M. "Air Gauging: Static and Dynamic Characteristics". Barcelona: IFSA, 2012.
- Глухов В.И. „Расчет характеристик пневматических систем высокого давления для измерения размеров”. Измерительная техника. No. 6 (1971): стр. 107.
- Dereżyński J. „PNEUSMART – system do pneumatycznych pomiarów wielkości geometrycznych”. *Inżynieria Maszyn*. R. 18, z. 3 (2013): s. 88÷98.
- Badadhe A.M. "Metrology And Quality Control". Pune: Technical Publications, 2006.
- Fullmer I.H. "Dimensional Metrology: Subject-Classified with Abstracts". Washington: US Government Printing Office, 1966.
- "Air Gaging Instruments": www.swissinstruments.com/downloads/Dimensionair-DimentronCatalog.pdf (dostęp: 12.10.2015 r.).
- Tanner C.J. "Air gauging – history and future developments". *Institution of Production Engineers Journal*. Vol. 37, Iss. 7 (1958): pp. 448÷462.
- Jakubowicz M., Jermak C.J. „Niepewność pomiaru długości z użyciem przetwornika pneumatycznego”. *Inżynieria Maszyn*. R. 18, z. 3 (2013): s. 48÷59.
- Jermak C.J., Rucki M. „Problematyka pomiaru zewnętrznych powierzchni walcowych czujnikami pneumatycznymi”. *Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, seria „Mechanika”*. Nr 63, t. 1 (1997): s. 85÷93. ■