

**Michał JAKUBOWICZ**

ZAKŁAD METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH, INSTYTUT TECHNOLOGII MECHANICZNEJ, POLITECHNIKA POZNAŃSKA,  
pl. M. Skłodowskiej-Curie 5, 60-965 Poznań

**Możliwości wykorzystania metod pneumatycznych w pomiarach długości**

Mgr inż. Michał JAKUBOWICZ

Absolwent Wydziału Budowy Maszyn i Zarządzania, Politechniki Poznańskiej. Od roku 2011 doktorant, a od 2013 asystent w Zakładzie Metrologii i Systemów Pomiarowych, Politechniki Poznańskiej. Zainteresowania badawcze związane są z pomiarami wielkości geometrycznych z wykorzystaniem pneumatycznych przetworników długości.



e-mail: [michal.jakubowicz@put.poznan.pl](mailto:michal.jakubowicz@put.poznan.pl)

**Streszczenie**

W artykule przedstawiono problematykę pneumatycznych pomiarów wielkości geometrycznych. Opisano budowę i zasadę działania pneumatycznych przetworników długości. Zaprezentowano przykłady zastosowania wymienionych przetworników w pomiarach wielkości geometrycznych. W przeciwieństwie do metody stykowej, pomiar metodą bezstykową umożliwia kontrolę o charakterze czynnym oraz pomiar elementów wykonanych z materiałów, w których nacisk końcówki pomiarowej może niekorzystnie wpłynąć na wynik pomiaru.

**Słowa kluczowe:** metrologia, pomiary bezstykowe, pneumatyczny przetwornik długości (PPD).

**Some aspects of application of pneumatics to length measurements****Abstract**

The paper presents problems of pneumatic measurement of geometrical quantities. The initial section presents a short history of the compressed air application to measurements of machine parts. The attention is paid to the theoretical basis of this topic [1, 2]. The construction and operation of an air gauge are described. The paper presents a physical model of the air gauge (Fig. 1) and the advantages of its use in particular measurement tasks. The Department of Metrology and Measurement Systems, Poznan University of Technology, conducted a number of research and practical application of air gauges, which resulted in a number of patented measuring devices for measuring form deviations. Section 3 presents examples of these gauges in the designed and constructed devices for measurement of geometrical quantities (Figs. 3, 4, 5, 6). The paper ends with a short summary. The non-contact method of measurement, in contrast to the contact one, allows for in-process control (check of the dimensions directly during the process) and measurement of material components, in which the stylus pressure can adversely influence the measurement result. It should be noted that in some cases the pneumatic measurement method cannot be replaced by any other method. The advantages of air gauges proved the usefulness of the theoretical analysis and experimental investigations.

**Keywords:** metrology, non-contact measurement, air gauge.

**1. Wstęp**

Jednym z najważniejszych zadań współczesnej metrologii jest pomiar wymiaru i kształtu. Jest to zagadnienie o dużym znaczeniu praktycznym, zwłaszcza w przemyśle łożyskowym, precyzyjnym i silnikowym. Obecnie stosowane w przemyśle metody pomiaru błędów kształtu są w większości metodami stykowymi. Jednak w wielu przypadkach wymagane jest użycie urządzeń realizujących pomiar metodą bezstykową. Dotyczy to zwłaszcza kontroli czynnej [7].

Współczesny przemysł wymaga stosowania urządzeń prostych, nieskomplikowanych oraz zapewniających szybki pomiar, często przeprowadzany w sposób ciągły – bezpośrednio podczas obróbki, przy zachowaniu wymaganej dokładności. Skutkuje to wzrostem zainteresowania budową przyrządów, w których stosuje się przetworniki wykazujące wszystkie te cechy.

Jeżeli kontakt z mierzoną powierzchnią jest utrudniony lub niepożądany, szczególnie podczas kontroli czynnej, wymagane jest użycie urządzeń realizujących pomiar metodą bezstykową.

W takiej sytuacji, ze względu na swoje zalety użyteczne stają się pneumatyczne przetworniki długości (PPD). Możliwość zastosowania przetworników indukcyjnych i optoelektronicznych podczas pomiarów realizowanych bezpośrednio w trakcie obróbki, jest ograniczona, ze względu na warunki panujące w strefie pomiaru.

Po raz pierwszy sprężone powietrze wykorzystano do pomiarów wielkości geometrycznych po zakończeniu pierwszej wojny światowej [14]. Pierwszym konstruktorem pneumatycznego przyrządu pomiarowego był francuski pułkownik Solex [14]. Zdecydowany rozwój pneumatycznej techniki pomiarowej nastąpił w latach dwudziestych XX wieku, kiedy rozpoczęto seryjną produkcję pneumatycznych przyrządów pomiarowych [9, 11].

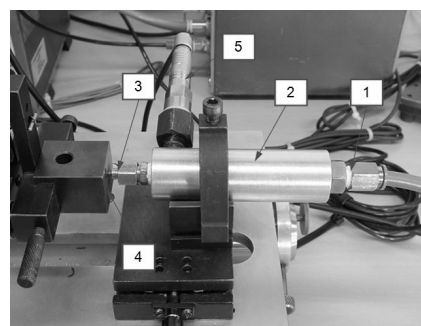
Duży wpływ na wzrost zainteresowania pneumatyką pomiarową miały prace między innymi Breitingera i Balaksina, które przyczyniły się do opracowania teoretycznych podstaw działania czujników pneumatycznych [1, 2]. Lata 1980-90 to okres regresu w konstrukcji i stosowaniu przyrządów pneumatycznych, wpłynęła na to niekorzystna dynamika układów pomiarowych i ograniczone możliwości przetwarzania sygnału pomiarowego [11]. Ponowny wzrost zainteresowania czujnikami pneumatycznymi odnotowano pod koniec XX wieku.

**2. Budowa i zasada działania pneumatycznego przetwornika długości PPD**

Pod pojęciem pneumatyczny przetwornik długości należy rozumieć układ pomiarowy składający się z dyszy wlotowej połączonej komorą pomiarową z dyszą pomiarową. Zmiana odległości pomiędzy powierzchnią pomiarową, a powierzchnią czoła dyszy pomiarowej – zmiana szczeliny pomiarowej, powoduje zmianę parametrów powietrza przepływającego przez przetwornik (ciśnienia, prędkości i ilości) [5]. W zależności od tego, który z wymienionych parametrów zostanie wykorzystany w pomiarach, rozróżnia się czujniki ciśnieniowe i przepływowe [4]. Największe zastosowanie znalazły czujniki ciśnieniowe, w których do pomiarów długości wykorzystywana jest zależność zmiany ciśnienia pomiarowego od zmiany szerokości szczeliny  $s$  (odległości od powierzchni mierzonej).

Pneumatyczny przetwornik długości (PPD) zbudowany jest z dyszy wlotowej 1, komory pomiarowej 2 oraz dyszy pomiarowej 3 (rys. 1) [6, 8]. Do pomiaru zmiany ciśnienia wykorzystany jest czujnik piezorezystancyjny 5. W aplikacyjnych rozwiązaniach często występuje większa liczba dysz pomiarowych (średnicówka pneumatyczna) [15].

Fizyczny model jednokaskadowego pneumatycznego przetwornika długości przedstawiono na rysunku 1.



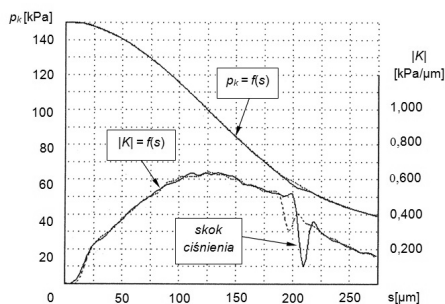
Rys. 1. Fizyczny model pneumatycznego przetwornika długości [6, 8, 11]  
Fig. 1. Physical model of the air gauge [6, 8, 11]

W komorze pomiarowej 2 występuje ciśnienie pomiarowe nazywane często w literaturze tematu ciśnieniem kaskadowym i oznaczane  $p_k$ . Wartość  $p_k$  zmienia się wraz ze zmianą odległości od powierzchni mierzonej 4 oraz zależy od geometrii i oprofilowania dysz. Powszechnie stosowane w przetwornikach dysze wlotowa 1 i pomiarowa 3 posiadają otwory o przekroju kołowym i średnicach, odpowiednio  $d_w$  i  $d_p$ . [6, 8, 11].

W praktyce przemysłowej stosowane są obecnie w pneumatyczne przetworniki długości zasilane ciśnieniem  $p_z \geq 150$  kPa [8].

Współcześnie wytwarzane pneumatyczne przyrządy pomiarowe wyposażone są w układy elektroniczne umożliwiające współpracę z komputerem oraz archiwizację danych. Dorównują w tym względzie najnowszym rozwiązaniom przyrządów z czujnikami indukcyjnymi lub optoelektronicznymi [8].

Podstawową charakterystyką metrologiczną pneumatycznego przetwornika długości jest charakterystyka statyczna  $p_k = f(s)$  opisująca zależność ciśnienia pomiarowego  $p_k$  (kaskadowego), mierzonego w komorze pomiarowej, w stosunku do odległości (szczeliny)  $s$  czoła dysz pomiarowej od powierzchni mierzonej (przesłony) (rys. 2).



Rys. 2. Przykładowa charakterystyka statyczna  $p_k = f(s)$  i charakterystyka czułości  $|K| = f(s)$  pneumatycznego przetwornika długości [11]

Fig. 2. Example of static characteristic  $p_k = f(s)$  and sensitivity  $|K| = f(s)$  of the air gauge [11]

Zastosowanie w dyszach pomiarowych kanału o przekroju kołowym nie zawsze jest korzystne [11]. Związane jest to z występowaniem na przebiegu charakterystyki statycznej  $p_k = f(s)$  gwałtownej zmiany ciśnienia (skoku), ograniczającej zakres pomiarowy przetwornika. Zmiana ta w postaci gwałtownego skoku została przedstawiona na rys. 2. Wpływ na powstanie skoku ma wiele czynników, w tym między innymi: ciśnienie zasilania  $p_z$ , stosunek średnic dysz  $d_w/d_p$  i szerokość szczeliny pomiarowej  $s$  oraz osiowo-symetryczny wpływ powietrza z dyszy pomiarowej [8, 11].

W celu eliminacji negatywnych skutków powyższego zjawiska, prowadzono prace badawcze i koncepcyjne dotyczące zastosowania dysz o przekroju niekołowym np. trójkątnym, kwadratowym, typu gwiazdka [12], oraz zastosowanie dysz szczelinowych, w którym otwór dyszy w przekroju prostokątnym do osi, posiada kształt prostokątny [11].

Do niewątpliwych zalet pomiarów pneumatycznych można zaliczyć [8, 11]:

- niewrażliwość na wilgoć i zanieczyszczenie mierzonej powierzchni;
- łatwość utrzymania czystości głowicy i strefy pomiaru;
- pomiar bezstykowy;
- niewrażliwość na drgania;
- możliwość wykonywania prostych operacji arytmetycznych na sygnałach pomiarowych;
- wysoka trwałość i niezawodność głowic pomiarowych;
- bardzo duża czułość.

Do pewnych ograniczeń stosowania metody pneumatycznej należy uznać [8]:

- niekorzystną dynamikę pneumatycznego przetwornika długości ( $f_{gr} < 5$  Hz);
- niewielki zakres pomiarowy (ok. 200  $\mu$ m);

- konieczność zapewnienia czystego, sprężonego powietrza bez wody i oleju.

Obszary zastosowania pneumatycznych przetworników długości to głównie:

- kontrola bierna części maszyn wytwarzanych w produkcji mało- i wielkoseryjnej (pomiar odchyłek wałków i otworów), sprawdziany odchyłek położenia;
- kontrola czynna w warunkach produkcji wielkoseryjnej i masowej (pomiar na szlifierkach do wałków i otworów);
- specjalne systemy pomiarowe (wielogłowicowe i wielodyszowe).

Obecnie coraz częściej przetworniki pneumatyczne są wykorzystywane w pomiarach odchyłek geometrycznych, w tym w szczególności okrągłości i walcowości.

### 3. Konstrukcje pneumatycznych przyrządów pomiarowych

W Zakładzie Metrologii i Systemów Pomiarowych (ZMiSP), Politechniki Poznańskiej przeprowadzono szereg badań and praktycznym zastosowaniem pneumatycznych przetworników długości, czego wymiernym efektem jest szereg opatentowanych przyrządów pomiarowych przeznaczonych do pomiaru odchyłek kształtu.

Jednym z powstałych w wyniku współpracy z Instytutem Obróbki Skrawania z Krakowa (obecnie Instytut Zaawansowanych Technologii) opracowano i wdrożono serię przyrządów o nazwie Pneutronik (patent PL 203072) (rys. 3) [10].



Rys. 3. Przyrząd Pneutronik B25 (po prawej) oraz C2K (po lewej) [8, 10]

Fig. 3. Device Pneutronik B25 (right-hand) and C2K (left-hand) [8, 10]

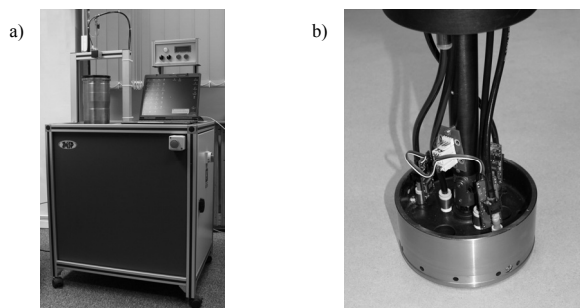
Przyrządy pomiarowe serii Pneutronik składają się z dwóch bloków: pneumatycznego i elektronicznego. Część pneumatyczna służy do przygotowania powietrza oraz do regulacji parametrów metrologicznych urządzenia. Natomiast blok elektroniczny ma budowę modułową z magistralą szeregową służącą do komunikacji między poszczególnymi modułami. Przyrząd Pneutronik posiada możliwość elektronicznej regulacji zera co odróżnia je od konkurencji [8].

Przyrządy serii Pneutronik zostały wykonane w dwóch wersjach: B25 – przeznaczone do pomiarów laboratoryjnych i C2K – przeznaczone do pomiarów przemysłowych (wersja do zabudowy).

Innym przykładem przyrządu przeznaczonym do pomiaru odchyłki okrągłości metodą odniesieniową, wyposażonym w przetwornik pneumatyczny jest przyrząd GeoForm (rys. 4a) (patent PL 212562) [8]. Jest to skomputeryzowany system pomiarowy, w którym zastosowano specjalną średnicówkę pneumatyczną (rys. 4b) z równomiernie rozmieszczonymi trzema niezależnymi pneumatycznymi przetwornikami długości.

Wysokość na której wykonywany jest pomiar uwarunkowana jest wartościami pól tolerancji wykonania tulei. Po zakończeniu pomiaru na ekranie komputera prezentowane są wyniki pomiaru odchyłki w ustalonych przekrojach oraz interpretacja graficzna otrzymanych wyników.

Wykonane stanowisko badawcze, z racji zastosowania oryginalnej koncepcji pomiaru, jak i dopracowania pod kątem sterowania i oprogramowania, może stanowić interesującą ofertę dla przemysłu wytwarzającego tuleje cylindrowe lub inne części typu tuleja.



Rys. 4. Urządzenie GeoForm przeznaczone do bezstykowego pneumatycznego pomiaru tulei cylindrowych: a) urządzenie pomiarowe b) pneumatyczna głowica pomiarowa [3, 8]

Fig. 4. Device GeoForm designer for non-contact pneumatic measurement of cylinders: a) measuring device b) pneumatic measuring head [3, 8]

Kolejnym przykładem przyrządu, który został opracowany i wykonany w ZMiSP był przyrząd PneuStar (zgłoszenie patentowe P 390791) [8, 9]. W przeciwieństwie do przyrządów Pneutronik, bazę sprzętową systemu PneuStar stanowi komputer panelowy z ekranem dotykowym (rys. 5).

Dzięki temu możliwe jest wykorzystanie dowolnego oprogramowania pracującego pod nadzorem systemu operacyjnego Windows. Odpowiednie ustawienie przyrządu do pracy polega na uzyskaniu wskazania wynikającego z wymiaru wzorca. W tym celu wykorzystuje się zestaw wzorców o znanych odchyłkach i za pomocą zaworu iglicowego doprowadza się do zgodności wskazań przyrządu z wartością odchyłek wzorca. Metoda ta jest bardzo pracochłonna.

W przedstawionym przyrządzie zmianę położenia iglicy zapewnia silnik krokowy sterowany z komputera poleceniami wydawanymi przez operatora, co zdecydowanie wpłynęło na uproszczenie procedury wzorcowania, znamienne jest również to, że zakres pomiarowy przyrządu jest dobierany automatycznie [8, 9].



Rys. 5. Urządzenie PneuStar [8, 9]

Fig. 5. Device PneuStar [8, 9]

Na bazie konstrukcji urządzenia PneuStar wykonano nową konstrukcję o roboczej nazwie Pneusmart. Koncepcja części elektrycznej i mechanicznej urządzenia oparta została o konstrukcję modułową, która zapewnia łatwość serwisowania i naprawy, a także pozwala na obniżenie kosztów produkcji. Stworzono także nowe oprogramowanie sterujące pracą urządzenia oraz nowy interfejs użytkownika. Główna modyfikacja programu sterującego pracą urządzenia polega na poprawieniu procedury wzorcowania, która pozwala na wzorcowanie przy użyciu dwóch, a także większej ilości pierścieni wzorcowych.

Podjęto również próby pomiaru chropowatości i wyznaczenia zarysu badanego przedmiotu. W tym celu opracowane zostało urządzenie Pneuskaner (rys. 6) (patent PL 210612) [8, 13], którego główną część stanowi pneumatyczny przetwornik długości. Istotą urządzenia jest to, że przetwornik zamocowany na wózku tocznym przesuwa się w kierunku prostopadłym do osi podłużnej przedmiotu, utrzymując stałe ciśnienie w komorze pomiarowej, niezależnie od odległości pomiędzy czołem dyszy pomiarowej, a mierzonym przedmiotem. Przesuw wózka zapewnia silnik krokowy.



Rys. 6. Urządzenie do wyznaczania zarysu [8, 13]

Fig. 6. The device for measurement of flat surface profiles: [8, 13]

## 4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury stwierdzono, że istnieje możliwość zastąpienia w pomiarach metody stykowej, pomiarem z wykorzystaniem czujników pneumatycznych zapewniających pomiar o charakterze bezstykowym. Należy podkreślić, że w niektórych przypadkach (kontrola czynna) metoda bezstykowa nie jest możliwa do zastąpienia inną metodą, skąd wynika potrzeba prowadzenia badań nad optymalizacją parametrów przedstawionych w artykule przetworników.

Prowadzone badania symulacyjne i doświadczalne dążą do polepszenia parametrów metrologicznych, a tym samym zwiększania możliwości aplikacji pneumatycznych przetworników długości w głowicach pomiarowych przeznaczonych do pomiarów wielkości geometrycznych.

## 5. Literatura

- [1] Balaksin O. B.: Avtomatizacia pnevmaticheskogo kontrola razmerov v masinostroenii, Masinostroenie, Moskva, 1964.
- [2] Breitinger R.: Fehlerquellen beim pneumatischen Langmessen, Stuttgart, Dissertation, TU Stuttgart, 1969.
- [3] Cellary A., Jermak Cz. J.: Pomiaru odchyłki okrągłości pneumatyczną metodą odniesieniową, Proceedings of the 13th National & 4th International Conference "Metrology in Production Engineering", 23-25.09.2009, Poznań – Żerków, s. 59-64, 2009.
- [4] Farago F. T., Curtis M. A.: Handbook of Dimensional Measurement, Industrial Press Inc. New York, s. 123-150, 2004.
- [5] Jakubiec W., Malinowski J.: Metrologia wielkości geometrycznych, Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2004.
- [6] Jakubowicz M.: Zastosowanie pneumatycznych przetworników długości do pomiarów wielkości geometrycznych, Inżynieria Wytwarzania, pod red. M. Dudziak, A. Kołodziej; Wyd. PWSZ Kalisz, s. 81-86, 2012.
- [7] Jakubowicz M.: Ocena możliwości zastosowania pneumatycznego przetwornika długości do pomiarów odchyłki okrągłości, Aparatura Badawcza i Dydaktyczna, Wyd. Cibrabid, 2/2013, s. 115-121, 2013.
- [8] Jermak Cz. J.: Teoretyczne i praktyczne aspekty kształtowania statycznych właściwości metrologicznych pneumatycznych przetworników długości, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, Rozprawy nr 476, 2012.
- [9] Jermak Cz. J.: Koncepcja pneumatycznych przyrządów PneuStar do pomiarów długości, Aparatura Badawcza i Dydaktyczna, Wyd. Cibrabid, 1/2013, s. 25-30, 2013.
- [10] Jermak Cz. J., Chuchro Z.: Pneumatyczne przyrządy do pomiaru długości Pneutronik – od koncepcji do realizacji. Materiały I Międzynarodowej Konferencji „Metrologia w Technikach Wytwarzania”, Kraków 25-27.09.2003, t. 1, s. 87-95, 2003.
- [11] Jermak Cz. J., Jakubowicz M.: Ocena właściwości statycznych pneumatycznych przetworników długości (PPD) z dyszami szczelinowymi, Pomiar Automatyka Kontrola, Wyd. PAK, t. 58, s. 994-997, 2012.
- [12] Jermak Cz. J., Rucki M.: Poprawa właściwości metrologicznych czujników pneumatycznych do pomiaru długości przez eliminację osiowej symetrii wypływu powietrza, Archiwum Technologii Maszyn i Automatyki, vol. 24, nr 2, Poznań, s. 75-82, 2004.
- [13] Rucki M.: Właściwości dynamiczne wysokociśnieniowych czujników pneumatycznych o zmniejszonych komorach pomiarowych, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, Rozprawy nr 459, 2011.
- [14] Zelczak A.: Pneumatyczne pomiary długości, Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2002.