

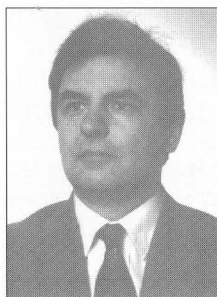
Czesław Janusz JERMAK

POLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT TECHNOLOGII MECHANICZNEJ, ZAKŁAD METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH

Analiza pomiaru zewnętrznych powierzchni walcowych czujnikami pneumatycznymi

Dr inż. Czesław Janusz JERMAK

Absolwent Wydziału Mechanicznego-Technologicznego Politechniki Poznańskiej w 1974 roku. W 1983 roku uzyskał tytuł doktora nauk technicznych. Od początku działalności zawodowej zajmował się problematyką pneumatycznych pomiarów długości. Kierował tematami badawczymi w ramach programów: resortowego R 07, badań podstawowych CPBP 02-20 oraz grantów w 1996 i 2000 roku. Twórca lub współtwórca 20 opatentowanych konstrukcji z dziedziny pneumatyki pomiarowej. Autor 23 publikacji i 30 referatów.



cz.jermak@interia.pl

Streszczenie

W referacie opisano problematykę pomiaru zewnętrznych powierzchni walcowych za pomocą pneumatycznych przetworników długości. Przedstawiono model matematyczny zmian ciśnienia pomiarowego w którym szczególną rolę odgrywa obliczenie powierzchni wypływu z obszaru dyszy pomiarowej. Opracowane wzory pozwoliły na uzyskanie dobrego przybliżenia z wynikami doświadczeń.

Zamieszczono również wyniki badań eksperymentalnych wpływu średnicy otworu dyszy pomiarowej, średnicy czoła oraz średnicy powierzchni mierzonej części na parametry charakterystyki statycznej. W części końcowej sformułowano praktyczne zalecenia dla użytkowników pneumatycznych przetworników długości oraz wyniki analiz przeprowadzonych badań.

Abstract

The problems of measurement of external cylindrical surfaces by means of pneumatic length converter (transducer) are discussed. The mathematic model of the variation of measuring pressure, in which the particular role plays the calculation of the surface of outflow from the area of measuring nozzle, is presented. The proposed formulas allow for good agreement with experimental results.

The experimental results of the influence of the diameter of the orifice of the measuring nozzle, face diameter and the diameter of the measured element on the parameters of static characteristics are also included. In the final section the recommendations for the users of pneumatic length converters (transducers) are formulated. The results of the analysis of the experiments are also presented.

Słowa kluczowe: charakterystyka statyczna, czujnik pneumatyczny

Keywords: static metrological properties, pneumatic gauge

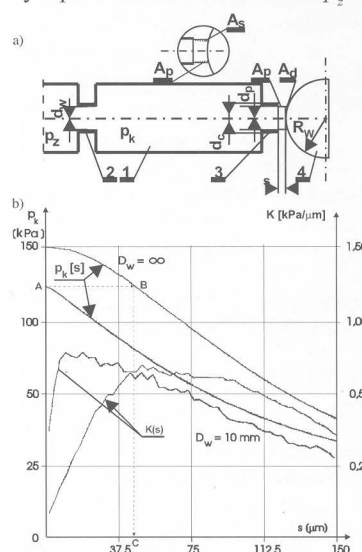
1. Wprowadzenie

Pomiar zewnętrznych powierzchni walcowych należy do najczęściej realizowanych zadań metrologicznych pneumatycznej techniki pomiarowej. Stanowi jednak poważny problem teoretyczny jak i praktyczny ze względu na istotny wpływ promienia powierzchni walcowej na przebieg charakterystyki statycznej pneumatycznego przetwornika długości. Stosowany do opisu właściwości metrologicznych model matematyczny powinien uwzględniać fakt występowania dodatkowej powierzchni wypływu powstającej już w momencie styku czoła dyszy pomiarowej z powierzchnią przedmiotu. W zależności od stosunku średnic przedmiotu do otworu dyszy pomiarowej, pole dodatkowej powierzchni może stanowić nawet 30% całkowitej powierzchni wypływu [3]. Również zmianie ulega ciśnienie pomiarowe, którego wartość jest w całym zakresie pomiarowym niższa od panującego podczas pomiaru powierzchni płaskiej. Potrzeba uzyskania dokładniejszych modeli oraz uwzględnienia wpływu krzywizny wymusiły zastosowanie innego niż dotychczas podejścia do zagadnienia obliczania powierzchni dławiącej.

2. Pomiary powierzchni zewnętrznych walcowych

Na rys. 1a, b przedstawiono schematy przetwornika pneumatycznego prostego oraz jego charakterystyki metrologiczne - statyczną $p_k=f(s)$ oraz czułości $|K|=f(s)$. Przetwornik zasilany jest oczyszczonym powietrzem o nadciśnieniu $p_z=150$ kPa wpływającym do dyszy wlotowej 2 o średnicy d_w .

W komorze pomiarowej 1 ustala się ciśnienie pomiarowe (kaskadowe) p_k zależne od wymiarów otworów dysz wlotowej, pomiarowej 3 o średnicy d_p oraz szerokości szczeliny pomiarowej s .



Rys. 1. a) Schemat czujnika pneumatycznego prostego, b) przebiegi charakterystyk statycznych $p_k=f(s)$ i czułości $|K|=f(s)$ dla powierzchni płaskiej i walcowej $D_w=10$ mm, $d_p=2,000$ mm, $d_w=0,800$ mm

Fig. 1. a) Construction of the simple pneumatic sensor, b) static characteristics $p_k=f(s)$ and the sensitivity graph $|K|=f(s)$ for the measurements of flat and rounded details $D_w=10$ mm, $d_p=2,000$ mm, $d_w=0,800$ mm

Ciśnienie pomiarowe zależne jest również - chociaż w mniejszym stopniu - od ukształtowania części wlotowej dysz, szerokości czoła dyszy pomiarowej i długości kanałów przepływowych. Dla $s=0$ podczas pomiaru powierzchni płaskich w komorze pomiarowej ustala się ciśnienie p_k równe ciśnieniu zasilania p_z .

W przypadku pomiarów powierzchni walcowych powstaje dodatkowe pole wypływu powietrza A_d (rys. 1a), którego wartość zależy od promienia powierzchni walcowej R_w (średnicy D_w) i średnicy otworu dyszy d_p . Stąd charakterystyka statyczna otrzymana z pomiarów walca o średnicy $D_w=10$ mm (rys. 1b) rozpoczyna się od ciśnienia p_k niższego o ok. 25 kPa od ciśnienia zasilania $p_z=150$ kPa.

Teoretyczną zależność (funkcję przetwarzania statycznego) wiążącą ze sobą ciśnienie kaskadowe p_k , szczelinę pomiarową s oraz uwzględniającą geometrię można przedstawić w postaci [2]:

$$p_k = \frac{p_z}{\left(1 + \frac{\alpha_p A_p}{\alpha_w A_w}\right)^2} \quad (1)$$

gdzie: α_p , α_w - współczynniki wypływu odpowiednio dla zespołu dysza pomiarowa - przesłona, dysza wlotowa, A_p - pole powierzchni wypływu z dyszy pomiarowej, $A_p = \pi d_p s$, A_w - pole powierzchni wypływu z dyszy wlotowej, $A_w = 0,25\pi d_w^2$.

Należy podkreślić, że niezależnie od kształtu powierzchni mierzonej części minimalną powierzchnię wypływu stanowi pobocznicą stożka o średnicy większej podstawy równej d_p i mniejszej podstawie zależnej od szczeliny s i średnicy d_p [1].

W celu otrzymania charakterystyk statycznych aproksymujących z dużą dokładnością wyniki pomiarów, w zależnościach opisujących funkcję przetwarzania należy uwzględnić minimalne pole powierzchni wypływu. Jeśli strumień wypływa na powierzchnię płaską, powierzchnię wypływu stanowi minimalna powierzchnia stożkowa $A_{ps,min}$ zależna od średnicy d_p oraz szczeliny s .

$$A_{ps,min} = A_p k(s_w) \quad (2)$$

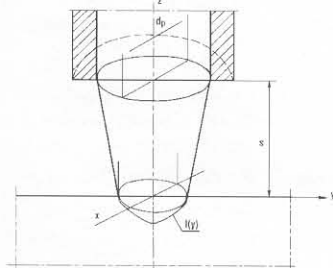
gdzie: $k(s_w) = \frac{1+k_e}{4} \sqrt{4 + \left(\frac{1-k_e}{s_w}\right)^2}$, $s_w = \frac{s}{d_p}$, $k_e = 0,5 + 0,5\sqrt{1-8s_w^2}$

Działanie dławicę występuje dla wartości szczelin spełniających nierówność $s \leq 0,2597d_p$ wobec $s < 0,2500d_p$ dla powierzchni walcowej A_p . Obliczenia wykazały, że dla $d_p=2,000$ mm przy $s=0,5$ μ m powierzchnia wypływu osiąga wartość minimalną gdy średnica mniejszej podstawy stożka wynosi $d_s=1,7$ mm, a różnica powierzchni stożkowej $A_{ps,min}$ i cylindrycznej A_p sięga około 3,5 %. Przebiegi charakterystyk statycznych obliczone z uwzględnieniem powierzchni $A_{ps,min}$ oraz A_p różnią się znacznie, zwłaszcza w zakresie liniowych zmian ciśnienia pomiarowego p_k . Jeżeli powierzchnię przysłaniającą stanowi walec o średnicy D_w , pozostaje dodatkowa powierzchnia wypływu (rys. 1b).

W oparciu o poczynione założenie o istnieniu stożkowej minimalnej powierzchni wypływu, opracowano model matematyczny obliczania powierzchni pobocznic stożka ściętego o wysokości s i powierzchni $A_{s,min}$ oraz powierzchni dodatkowej A_{sd} pomiędzy mniejszą podstawą stożka a linią $l(y)$ przenikania z powierzchnią walca o promieniu R_w (rys. 2). Stożek opisany jest wzorem (3):

$$\frac{x^2}{a^2(z)} + \frac{y^2}{b^2(z)} = 1 \quad (3)$$

gdzie: $a(z) = a_o + \frac{r_p - a_o}{s}z$, $b(z) = b_o + \frac{r_p - b_o}{s}z$, $r_p = \frac{d_p}{2}$, s - szczelina



pmiarowa, a_o, b_o - półosie elipsy
Przyjmując oznaczenia jak na rys. 4 powierzchnia mierzonego elementu opisana jest równaniem $(z + R_w)^2 + x^2 = R_w^2$ (4)

Rys. 2. Rzeczywista powierzchnia dławicą
Fig. 2. Air stream outflow surface

Linię przecięcia $l(y)$ walca o promieniu R_w ze stożkiem klinowym można wyznaczyć numerycznie w sposób iteracyjny. Równanie linii $x=l(y)$ opisuje związek (5):

$$x = a_o + \frac{r_p - a_o}{s}z \sqrt{1 - \frac{y^2}{\left(b_o + \frac{r_p - b_o}{s}z\right)^2}} \quad (5)$$

gdzie: $z = \sqrt{R_w^2 - x^2} - R_w$

Powierzchnię pobocznic stożka pomiędzy dyszą pomiarową a linią przenikania z walcem można wyznaczyć obliczając numerycznie całki

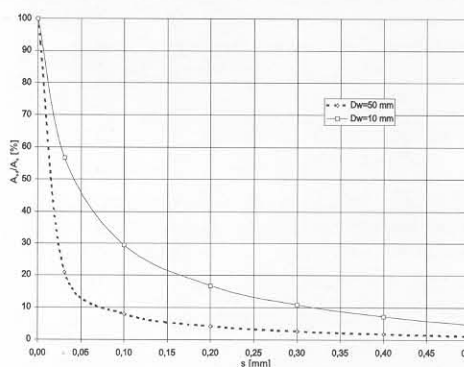
$$A_s = 4 \int_0^{b_o} \int_{a_o \sqrt{1 - \frac{y^2}{b_o^2}}}^{r_p \sqrt{1 - \frac{y^2}{r_p^2}}} F dx dy + 4 \int_0^{r_p} \int_{b_o}^{r_p \sqrt{1 - \frac{y^2}{r_p^2}}} F dx dy + 4 \int_0^{b_o} \int_x^{a_o \sqrt{1 - \frac{y^2}{b_o^2}}} F dx dy \quad (6)$$

gdzie: $F = \sqrt{1 + p^2 + q^2}$, $p = \frac{x}{a^2(z)}$, $q = \frac{y}{b^2(z)}$

$$q = \frac{y}{b^2(z)}$$

$$\frac{(r_p - a_o)x^2}{sa^3(z)} + \frac{(r_p - b_o)y^2}{sb^3(z)}$$

Dwie pierwsze całki określają pole pobocznic stożka ściętego o wysokości s , natomiast trzecia pole powierzchni A_{sd} pomiędzy mniejszą podstawą stożka a linią przenikania z walcem o promieniu R_w . Wartość pola A_{sd} pozostaje w ścisłym związku z wartością szczeliny s , średnicą dyszy pomiarowej d_p i średnicą D_w powierzchni walcowej. Na rys. 3 przedstawiono przebiegi zmienności pola powierzchni A_{sd} odniesionego do całkowitej powierzchni wypływu z dyszy pomiarowej $A_s = A_{s,min} + A_{sd}$ dla przypadku pomiaru powierzchni walcowych o średnicach $D_w=10$ i 50 mm. Z analizy przebiegów wynika wniosek o znacznym udziale powierzchni A_{sd} w całkowitej powierzchni wypływu A_s , zwłaszcza przy pomiarze walca o średnicy $D_w=10$ mm. W zakresie szczelin $s=0,05 \div 0,5$ mm zmiana ta wynosi ok. 40% i wywiera istotny wpływ na przebieg charakterystyki statycznej. Wraz ze wzrostem średnicy walca D_w powierzchnia A_{sd}



ulega zmniejszeniu, osiągając wartość $A_{sd}=A_d=0$ dla powierzchni płaskiej ($D_w=\infty$). Jednocześnie zmniejsza się wpływ szczeliny (rys. 3), co pozwala na zastąpienie powierzchni stożkowej powierzchnią walca.

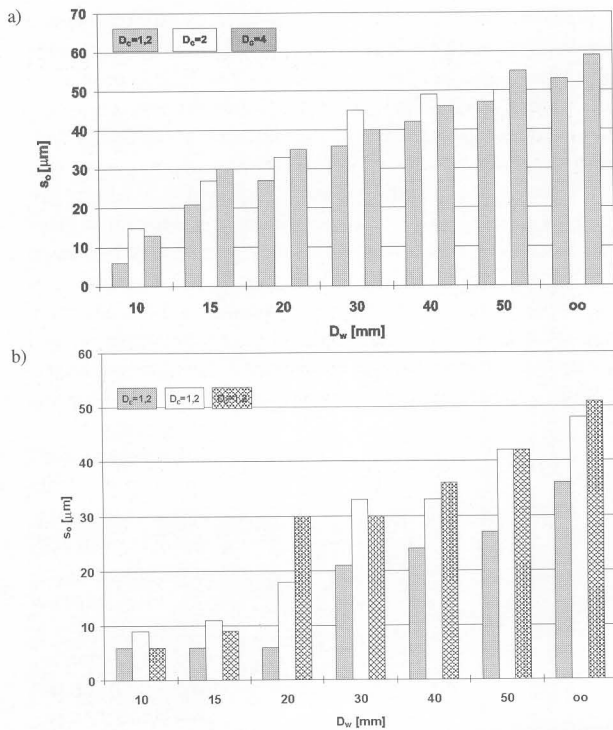
Rys. 3. Przebiegi zmienności udziału pola powierzchni dodatkowej A_{sd} w całkowitej powierzchni wypływu A_s w zależności od s dla różnych średnic D_w , $d_p=2,000$ mm

Fig. 3. The graphs of the changes of additional surface A_{sd} related to the whole outlet surface A_s versus slot width s , the parameter is the diameter of the detail D_w , $d_p=2.000$ mm

3. Eksperymentalna ocena wpływu średnicy D_w i wymiarów dyszy pomiarowej na parametry metrologiczne czujnika

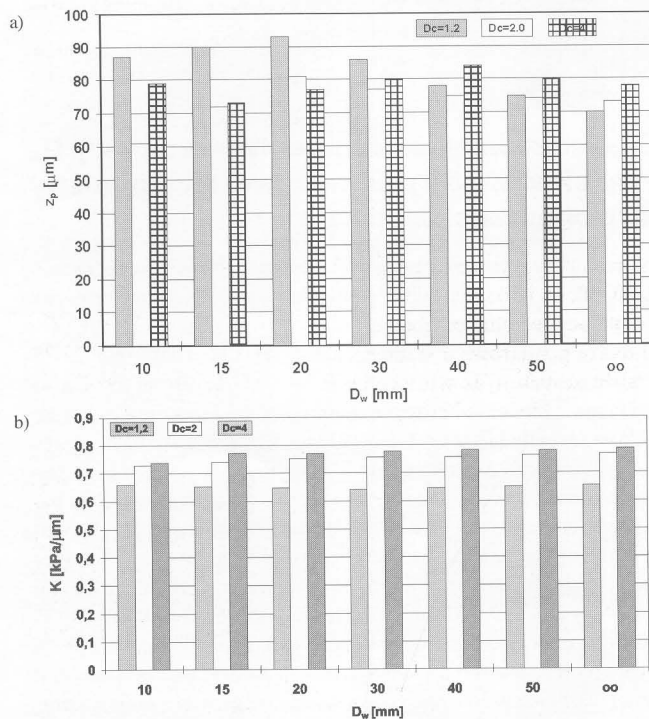
W pomiarach przyjęto szereg powierzchni walcowych o średnicach $D_w=10, 20, 30, 40$ i 50 mm. Przeprowadzono również porównawcze pomiary dla powierzchni płaskiej ($D_w=\infty$). W przetwornikach zastosowano dysze pomiarowe o średnicach $d_p=1,508; 1,808$ oraz 2,028 mm, a także zestaw dysz wlotowych pozwalających na uzyskanie dużych zmian czułości i zakresu pomiarowego. Unormowana średnica czoła D_c wahała się od 1,2 do 4. Ocenie podlegały następujące parametry: czułość K , zakres pomiarowy z_p oraz współrzędna początku zakresu pomiarowego s_o . W wyniku przeprowadzonych badań i analiz stwierdzono, że wzrost średnicy D_w mierzonego elementu powoduje przesunięcie początku zakresu pomiarowego s_o w kierunku większych wartości. Na przykład dla przetwornika z dyszami $d_p=1,508$ mm i $d_w=0,800$ mm wzrost średnicy D_w od 10 mm do ∞ przesuwa współrzędną s_o od 6 μ m do 53 μ m (dla $D_c=1,2$), co z praktycznego punktu widzenia należy uznać za zjawisko korzystne (rys. 4a). Zwiększenie czułości osiągane na drodze powiększenia średnicy d_p powoduje nieznaczne zmniejszenie współrzędnej s_o . Zmiany te występują w całym zakresie średnic D_w i wynoszą średnio 8% (rys. 4b). Dla ustalonego wymiaru D_w mierzonego elementu wartość s_o stanowi funkcję średnicy d_w dyszy wejściowej oraz unormowanej średnicy czoła D_c .

Czujniki z przewagą zakresu pomiarowego, czyli o czułościach rzędu 0,3 \div 0,5 kPa/ μ m charakteryzują mniejsze wartości s_o . Wzrost wielkości czoła D_c w większości przypadków wywołuje powiększenie współrzędnej początku zakresu pomiarowego. Jest to najbardziej zauważalne w pomiarach przetwornikami w których zestaw dysz zapewnia uzyskanie dużej czułości ($d_p=1,508$ mm i $d_w=0,800$ mm oraz $d_p=2,028$ mm i $d_w=0,800$ mm) i unormowanej średnicy czoła $D_c \geq 2$.



Rys. 4. Położenie początku zakresu pomiarowego s_0 dla czujnika a) $d_p=1,508$ mm i $d_w=0,800$ mm, b) $d_p=2,028$ mm i $d_w=0,800$ mm

Fig. 4. The position of the measuring range initial point s_0 for the sensors: a) $d_p=1.508$ mm and $d_w=0.800$ mm, b) $d_p=2.028$ and $d_w=0.800$ mm



Rys. 5. Wpływ wielkości D_w na zakres pomiarowy z_p (a) i czułość K (b) dla czujnika $d_p=1,508$ i $d_w=0,800$ mm

Fig. 5. The influence of the D_w on the measuring range z_p (a) and sensitivity K (b) for the sensor $d_p=1.508$, $d_w=0.800$ mm

Parametry metrologiczne przetwornika (czułość, zakres pomiarowy) pozostają również w ścisłym związku z wymiarami mierzonego przedmiotu, choć w pewnych przypadkach nie jest to zależność jednoznaczna. Badane przetworniki z dyszami o czołach $D_c=2$ i zestawami dysz zapewniającymi uzyskanie dużych zakresów pomiarowych tj. powyżej 100 μm w dla $D_w > 15$ mm posiadały mniejszy zakres pomiarowy od pozostałych układów. Różnice sięgały nawet ponad 100% dla $D_w=15$ mm. W miarę wzrostu średnicy D_w malały do zera. Prawdopodobną przyczyną tego jest występowanie uskoku

czułości (zakłócenia w przebiegu charakterystyki statycznej), lokalizującego się w środkowej części zakresu pomiarowego, którego efekt dodatkowo wzmacniany był działaniem dyszy wejściowej. Ponadto w pomiarach elementów o średnicy $D_w=10$ mm zachodzi zjawisko zmniejszania zakresu pomiarowego ze wzrostem D_c . Różnice sięgają nawet 50%. Stosując zestawy dysz zapewniające uzyskanie mniejszych zakresów pomiarowych $z_p < 80$ μm obserwowano wzrost zakresu z_p dla rosnących wartości D_c . Największe wartości zakresu pomiarowego wykazują czujniki z wąskimi powierzchniami czoł ($D_c < 1,5$). Przewaga zakresu nad czujnikami wyposażonymi w dysze o szerokości czoła $D_c=4$ wynosi od 5% do 30% w zależności od średnicy D_w . Dla czujników o zakresie pomiarowym $z_p > 80$ μm tendencja ta występowała począwszy od $D_w \geq 40$ mm (rys. 5a).

Czułość w rozpatrywanych zestawach czujników wykazywała generalnie mniejsze wahania niż zmiany zakresu pomiarowego. Zauważono ogólną prawidłowość zmniejszania czułości wraz ze zmianami wielkości czoła D_c (rys. 5b). Zmiany te mają charakter niezależny od średnicy mierzonego elementu i zestawu dysz, zapewniającego dużą czułość bądź zakres pomiarowy.

4. Wnioski końcowe

Na podstawie badań i analiz sformułowano następujące wnioski:

1. Minimalną powierzchnię wypływu (powierzchnię dławiącą) z dyszy pomiarowej stanowi powierzchnia poboczniczy stożka.
2. Dla średnic dyszy pomiarowej $d < 1,7$ mm można z pomijalnym małym błędem przyjąć w obliczeniach walcową powierzchnię wypływu $A_p = \pi d_p s$.
3. W pomiarach zewnętrznych powierzchni walcowych powstaje dodatkowa powierzchnia wypływu, której udział w ogólnym bilansie powierzchni dławiącej zależy od średnicy mierzonego walca D_w i średnicy dyszy pomiarowej d_p .
4. Dysponując zależnościami opisującymi minimalną powierzchnię wypływu na walec o średnicy D_w oraz doświadczalną lub teoretyczną charakterystyką statyczną dla przypadku płaskiej powierzchni dławiącej możliwe jest skonstruowanie charakterystyki statycznej dla powierzchni walcowej o dowolnej średnicy. Metodyka pozwala na oszacowanie z 10% dokładnością zakresu pomiarowego nowej charakterystyki.
5. Wzrost średnicy D_w mierzonego elementu oraz średnicy czoła D_c powoduje przesunięcie początku zakresu pomiarowego s_0 w kierunku większych wartości.
6. Czujniki z dyszami o czołach $D_c=2$ i zestawami dysz zapewniającymi uzyskanie dużych zakresów pomiarowych tj. powyżej 100 μm w dla $D_w \geq 15$ mm posiadają mniejszy zakres pomiarowy od pozostałych układów. Różnice sięgają nawet ponad 100% dla $D_w=15$ mm.

Literatura

- [1] B. Bałaziński: Wpływ średnicy mierzonego przedmiotu walcowego na wskazania pneumatycznych przyrządów pomiarowych. *Mechanik* 1979, nr 6
- [2] R. Breitinger: Fehlerquellen beim pneumatischen Längenmessung, Dissertation. TU Stuttgart 1969.
- [3] M. J. Cejtin: O nastrojki bezkontaktnych pneumatycznych sistem dla izmierenija razmierzov, *Izmeritel'naja Technika* 1962, nr 5.
- [4] J. Cz. Jermak: Metrologiczne aspekty teorii i stosowania w układach kontroli czynnej małowagarytowych czujników pneumatycznych. Raport z realizacji projektu 7 T07D 033 08 1996.
- [5] W. Lotze: Gestaltung und Berechnung austauschbarer Meßdüsen pneumatischer Niederdruck-Längenmeßgeräte. *Feingerätetechnik*, 14.Jg. 4/1965.
- [6] L. A. Zalmanzon: Teoria elementów stosowanych w technice strumieniowej. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1971.

Title: The Analysis of Measurements of External Cylindrical Surfaces by Means of Pneumatic Sensors