

Janusz DEREŻYŃSKI<sup>1</sup>

## **PNEUSMART – SYSTEM DO PNEUMATYCZNYCH POMIARÓW WIELKOŚCI GEOMETRYCZNYCH**

W artykule zamieszczono opis koncepcji i konstrukcji przyrządu do pneumatycznych pomiarów wielkości geometrycznych. Zawarto w nim informację na temat budowy poszczególnych elementów składowych takich jak: część mechaniczna, pneumatyczna oraz sterująca. Ponadto opisano strukturę oprogramowania oraz podstawowe algorytmy wzorcowania przyrządu. W końcowej części zamieszczono charakterystyki statyczne urządzenia oraz wstępne wyniki pomiarów.

### **1. WPROWADZENIE**

W przemyśle szeroką grupę urządzeń pomiarowych stanowią przyrządy pneumatyczne. Znalazły one zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym i precyzyjnym. Główne zalety urządzeń pneumatycznych to szybki, dokładny i bezstykowy pomiar. Urządzenia te są ponadto odporne na zanieczyszczenia środowiska, w którym pracują, a dzięki oczyszczającemu działaniu strugi powietrza są stosowane w układach kontroli czynnej. Cechy te sprawiły, że w Zakładzie Metrologii i Systemów Pomiarowych od wielu lat prowadzone są badania nad właściwościami metrologicznymi pneumatycznych przetworników długości, stanowiących integralną część pneumatycznych przyrządów pomiarowych.

Liczne prace badawcze, granty oraz patenty pozwoliły na zgromadzenie szerokiej wiedzy pozwalającej na aplikację pneumatyki pomiarowej do przyrządu o charakterze przemysłowym, który stanowiłby realną i kompleksową propozycję dla firm wykorzystujących systemy pneumatyczne starszego typu.

Na tej bazie powstała koncepcja przyrządu PNEUSMART, będącego nowocześniejszym następcą takich konstrukcji jak PNEUTRONIK, czy PNEUSTAR [1]. Konstrukcja nowego typu urządzenia stała się tematem prac badawczo-konstrukcyjnych, których efektem ma być opracowanie urządzenia stanowiącego konkretną propozycję dla przemysłu.

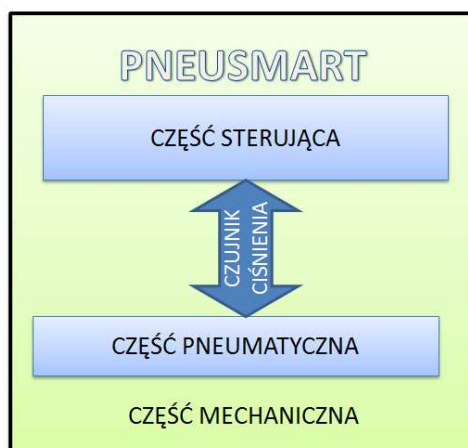
---

<sup>1</sup> Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Mechanicznej, Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych,  
E-mail: j.derezynski@gmail.com

## 2. KONCEPCJA PRZYRZĄDU

Zaprojektowane urządzenie można podzielić na trzy podstawowe zespoły: mechaniczny, sterujący oraz pneumatyczny (rys. 1). Poszczególne zespoły stanowią integralną całość. Część mechaniczna to obudowa urządzenia wraz ze wszystkimi elementami mocującymi elementy pneumatyczne oraz sterujące. Część pneumatyczna to układ pomiarowy w formie kaskady pneumatycznej, którego zadaniem jest generowanie sygnału pomiarowego w postaci zmian ciśnienia w komorze pomiarowej. Część sterująca jest odpowiedzialna natomiast za przekształcenie sygnału pomiarowego na informacje w postaci cyfrowej, a także wszelkie interakcje z użytkownikiem przyrządu i urządzeniami zewnętrznymi. Elementem łączącym część sterującą oraz pneumatyczną jest przetwornik ciśnienia, który dokonuje konwersji sygnału przekazywanego przez sprężone powietrze na sygnały elektryczne w formie cyfrowej. Odpowiednie zestawienie i dobranie poszczególnych elementów ma kluczowe znaczenie dla spełnienia wymagań metrologicznych i funkcjonalnych stawianych przyrządom do pomiarów pneumatycznych.

Właściwości metrologiczne, które założono w projekcie urządzenia to: niepewność pomiaru na poziomie  $\pm 1\mu\text{m}$ , zakres pomiarowy  $100\mu\text{m}$  ( $\pm 50\mu\text{m}$ ), liniowość na poziomie 1%, czas pomiaru do 0,5 s.



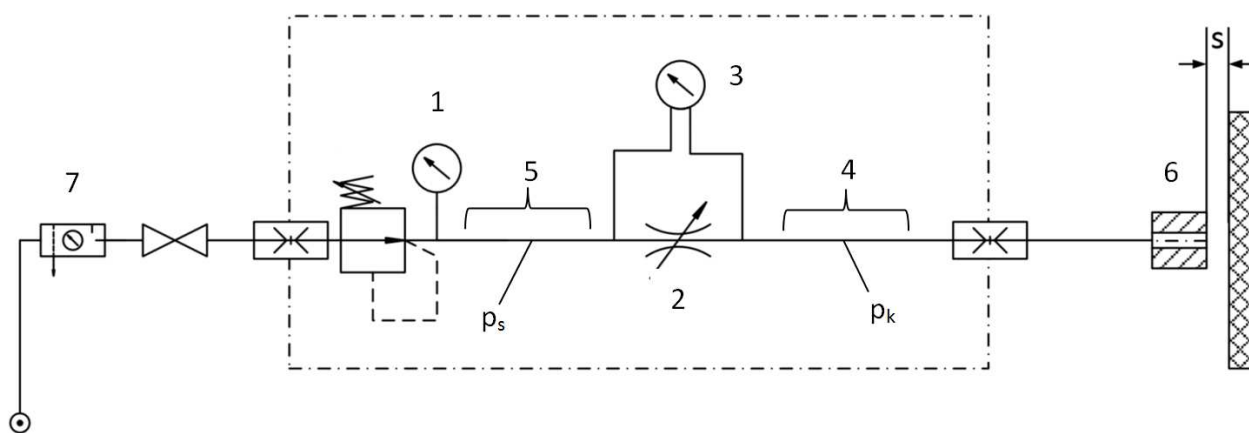
Rys. 1. Koncepcja budowy przyrządu PNEUSMART  
Fig. 1. Concept of construction the device PNEUSMART

## 3. CZĘŚĆ PNEUMATYCZNA

Część pneumatyczną urządzenia stanowi kaskada pneumatyczna (rys. 2). Jej zadaniem jest generowanie sygnału pomiarowego w postaci zmian ciśnienia powietrza  $p_k$  w funkcji zmian szczeliny pomiarowej  $s$ . Do pomiaru ciśnienia zastosowano przetwornik pneumatyczny ciśnienia. Pomiar odbywa się metodą różnicową, w której następuje porównanie wartości ciśnienia panującego w komorze pomiarowej 4 z wartościami stałego ciśnienia  $p_s$  w komorze 5 za stabilizatorem. Rozwiązanie takie pozwala na ograniczenie

wpływu zakłóceń związanych z wahaniami ciśnienia zasilającego kaskadę czy zmianami temperatury. Urządzenie wymaga zasilania sprężonym powietrzem o ciśnieniu od 300 do 500 kPa. Ze względu na ograniczenie gabarytów zespół reduktora i filtra 7 został zabudowany na zewnętrznej ścianie urządzenia.

Podłączenie sprężonego powietrza odbywa się poprzez wąż elastyczny oraz złącze grodziowe umieszczone w płycie tylnej przyrządu. Z zespołu uzdatniania sprężone powietrze przepływa do precyzyjnego stabilizatora ciśnienia 1, gdzie ciśnienie zostaje ustalone na poziomie  $150\text{kPa} \pm 0,01\%$ . Jego wartość jest nastawiana w momencie montażu urządzenia. Następnie sprężone powietrze przepływa przez regulowaną dyszę wlotową, którą stanowi iglicowy zawór wieloobrotowy 2. Zawór regulując przepływ powietrza umożliwia uzyskanie wymaganej charakterystyki statycznej przyrządu i implementację automatycznych procedur wzorcowania urządzenia. Sterowanie otwarciem zaworu odbywa się poprzez silnik krokowy, który jest połączony poprzez sprzęgło z trzpieniem zaworu. Do układu pneumatycznego poprzez wąż elastyczny przyłączona jest głowica pomiarowa 6, na przykład średnicówka lub trzpień pomiarowy. Zmiana szerokości szczeliny  $s$  jest wyznaczana poprzez pomiar różnicy ciśnień w komorze wlotowej przed zaworem oraz komorze pomiarowej znajdującej się za zaworem iglicowym. Do pomiaru ciśnienia wykorzystywany jest różnicowy przetwornik ciśnienia 3, który generuje sygnał pomiarowy w postaci cyfrowej. Przetwornik wykorzystuje interfejs RS-485, co pozwala na połączenie go z systemem sterowania.

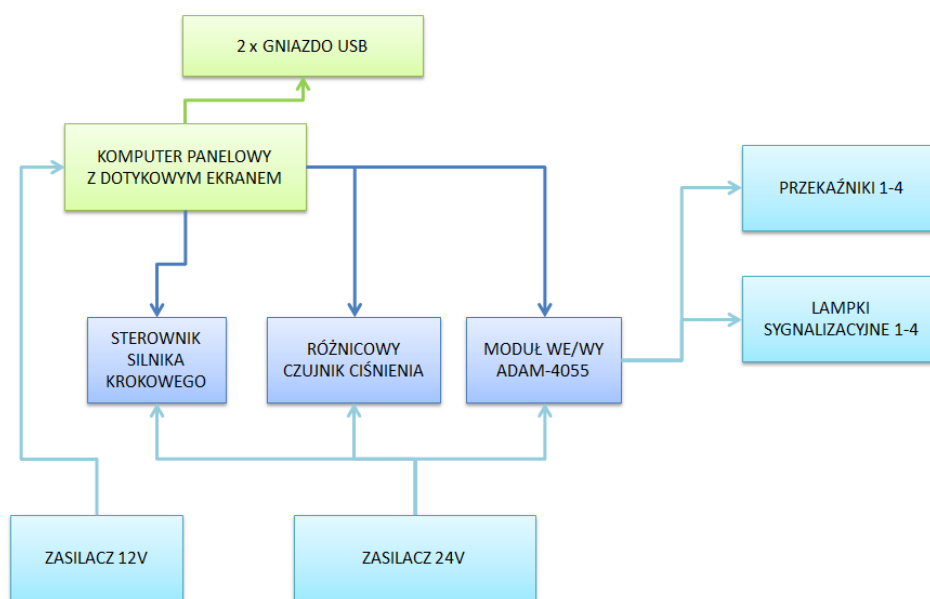


Rys. 2. Schemat pneumatyczny urządzenia  
Fig. 2. Diagram of pneumatic unit

#### 4. STEROWANIE

Część sterowania stanowi najbardziej rozbudowany element składowy urządzenia. Jej zadaniem jest sterowanie pracą przyrządu, komunikacja z użytkownikiem i sterowanie zewnętrznymi urządzeniami, na przykład selektorami urządzeń technologicznych. Elementem sterującym pracą urządzenia jest komputer panelowy. Zastosowanie komputera daje dużą elastyczność w realizacji funkcji sterowania. Wszystkie układy połączone

z komputerem za pomocą sieci wykorzystującej interfejs RS-485. Zastosowano dwie niezależne linie sterowania. Do jednej z nich podłączono czujnik ciśnienia, natomiast do drugiej sterownik silnika krokowego oraz moduł akwizycji danych ADAM-4055. Pozwala to na zwiększenie przepustowości połączenia między czujnikiem a komputerem. Komunikacja pomiędzy komputerem a urządzeniami odbywa się przy wykorzystaniu dwukanałowego konwertera RS-485/USB, który pozwala na stosowanie komputera nieposiadającego portu RS-485. Zadanie sterowania zaworem odbywa się przy wykorzystaniu silnika krokowego, natomiast sterowanie układami wejścia-wyjścia za pomocą zewnętrznego modułu sterowanego poprzez RS-485. Uproszczony schemat połączeń podzespołów urządzenia przedstawiono na schemacie (rys. 3).



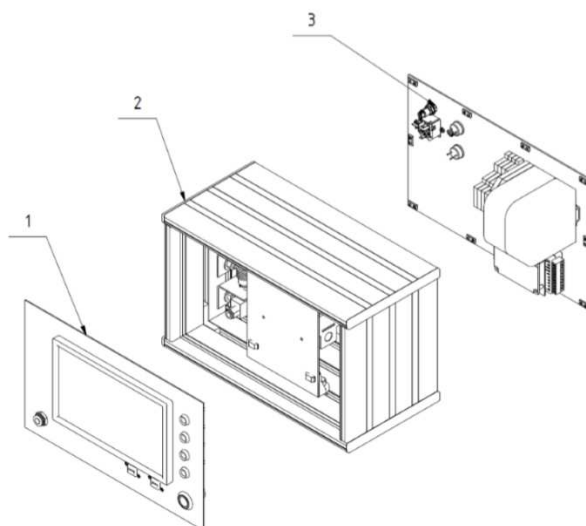
Rys. 3. Uproszczony schemat układu sterowania  
Fig. 3. Simplified diagram of the control system

## 5. CZĘŚĆ MECHANICZNA

Dobre komponenty odpowiednio zestawiono i na tej podstawie zaprojektowano obudowę oraz zabudowę poszczególnych elementów wewnątrz obudowy. Założeniem było stworzenie urządzenia, którego gabaryty pozwalałyby na przenoszenie między stanowiskami pracy oraz wygodną obsługę. Istotne znaczenie miała także prostota wykonania oraz montażu urządzenia. Spowodowało to, że zdecydowano się na dobór jak największej liczby elementów typowych dobieranych z katalogów.

Główną część obudowy wykonano z profili aluminiowych firmy Bosch Rexroth. Producent ten zapewnia szeroką gamę rozmiarów profili wraz z rozbudowanym systemem typowych części do montażu oraz łączenia poszczególnych elementów. Pozwala to na szybkie projektowanie konstrukcji mechanicznej. Ponadto sprawia, że czas potrzebny na

realizacji projektu jest krótszy, niż na przykład przy zastosowaniu rozwiązań dedykowanych. Jest to duża zaleta przy wykonawstwie krótkich serii oraz urządzeń prototypowych takich jakim jest PNEUSMART.



Rys. 4 Schemat budowy zaprojektowanego urządzenia PNEUSMART  
Fig. 4. Schematic diagram of the designed device PNEUSMART

- Konstrukcję urządzenia można podzielić na trzy główne podzespoły (rys. 4):
- płytę czołową 1, w której zamocowany jest komputer, diody sygnalizujące stany selektorów, włącznik oraz gniazda USB,
  - korpus 2, który stanowi obudowę urządzenia, pozwalającą na sprawne transportowanie oraz zabudowano w nim także wszystkie elementy układu pneumatycznego,
  - płytę tylną 3, na której zamontowano komponenty elektryczne urządzenia wchodzące w skład zespołu sterowania: sterowniki, przekaźniki, bezpieczniki, gniazda zasilania oraz włącznik główny.

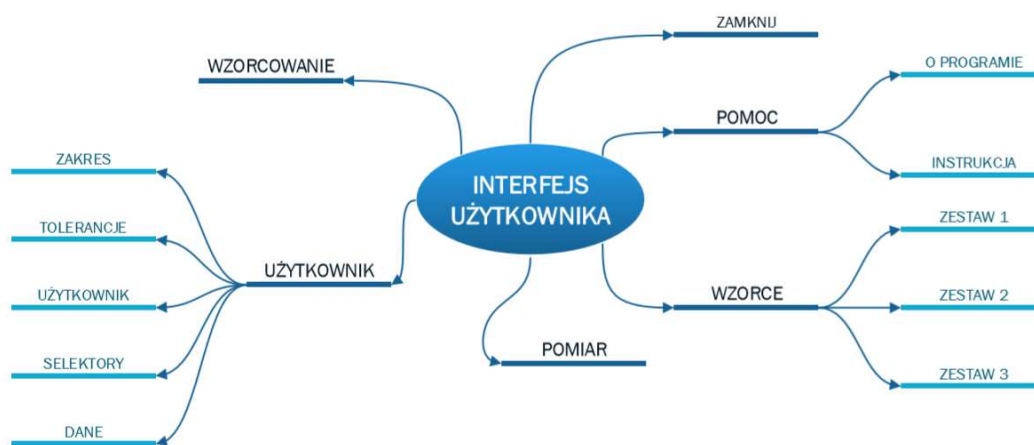


Rys. 5. Model CAD zaprojektowanego urządzenia  
Fig. 5. CAD model of designed device

## 6. OPROGRAMOWANIE

Sterowanie pracą przyrządu odbywa za pomocą komputera PC. Wybrano komputer ze względu na duże możliwości obliczeniowe, elastyczność w tworzeniu aplikacji, a także możliwość przenoszenia oprogramowania na inne komputery. Zaleta ta powoduje brak przywiązania oprogramowania do jednej platformy sprzętowej i pozwala na ewentualny dalszy rozwój oprogramowania. Na komputerze zainstalowano system operacyjny Windows XP. Jest to sprawdzony i stabilny system wykorzystywany w wielu systemach sterowania, gdzie nie ma potrzeby spełniania restrykcji czasowych. Warto nadmienić, że systemy Windows są wykorzystywane przez wielu producentów urządzeń pomiarowych, między innymi w rozwiązaniach firmy Marposs [2].

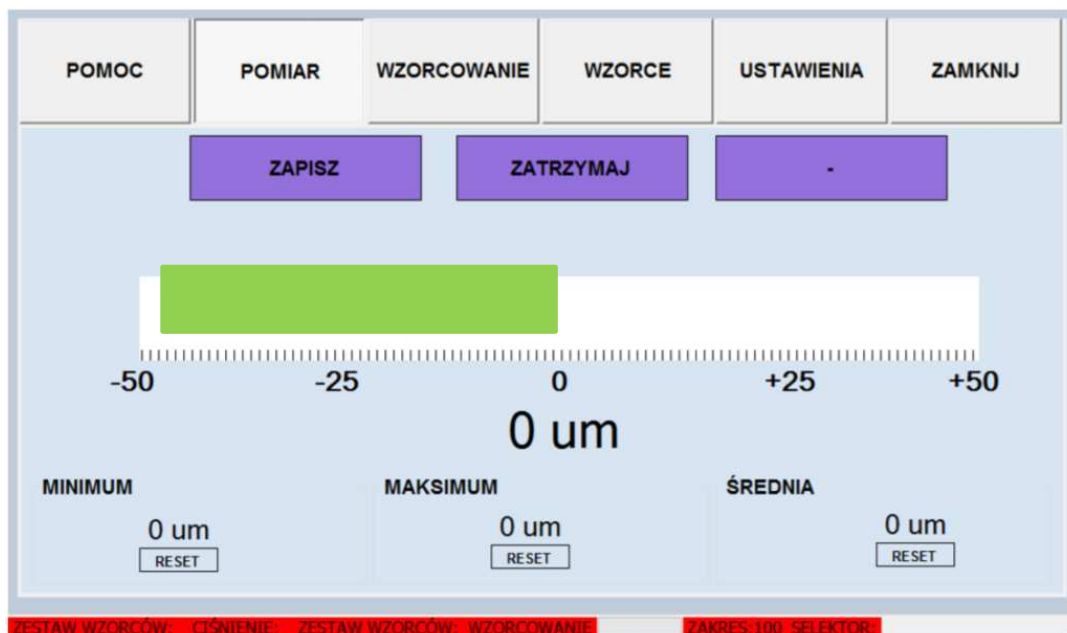
Strukturę interfejsu użytkownika przedstawiono na rysunku 6. Interfejs podzielono na 5 podstawowych części (zakładek): POMOC, POMIAR, WZORCOWANIE, WZORCE, USTAWIENIA. W dziale POMOC zamieszczono informacje dotyczące obsługi urządzenia oraz informacje o ewentualnych problemach, jakie mogą wystąpić w pracy z urządzeniem. Część POMIAR stanowi podstawową i najczęściej wykorzystywaną część interfejsu (rys. 7). Przedstawiany jest tutaj aktualny wynik pomiaru, informacje o średniej, maksymalnej i minimalnej wartości pomiaru, a także informacje o ustawionych przez użytkownika dopuszczalnych odchyłkach od wymiaru nominalnego oraz stanie selektorów, sterujących pracą zewnętrznych urządzeń.



Rys. 6. Struktura interfejsu użytkownika  
Fig. 6. The structure of the user interface

Część WZORCOWANIE pozwala na przeprowadzenie przez użytkownika procedury wzorcowania, która jest niezbędna dla pracy urządzenia i musi być dokonana po każdym uruchomieniu urządzenia. Polega ona na wykonaniu odpowiedniej sekwencji umieszczenia głowicy pomiarowej w określonych przez oprogramowanie wzorcach. Kolejna część WZORCE pozwala na zdefiniowanie wymiarów posiadanych wzorców, których wymiary muszą być odpowiednio dobrane do współpracy z aktualnie zamontowaną głowicą. Zdefiniowane wzorce należy także „aktywować”, co powoduje wpisanie wartości ich

wymiarów do algorytmu wzorcowania. Ostatnią oraz najbardziej rozbudowaną część stanowi zakładka USTAWIENIA. W niej użytkownik ma możliwość zmiany zakresu pracy urządzenia, nastaw selektorów, ścieżki zapisu danych, danych użytkownika, oraz wartości odchyłek mierzonej średnicy.



Rys. 7. Okno interfejsu użytkownika  
Fig. 7. User interface window

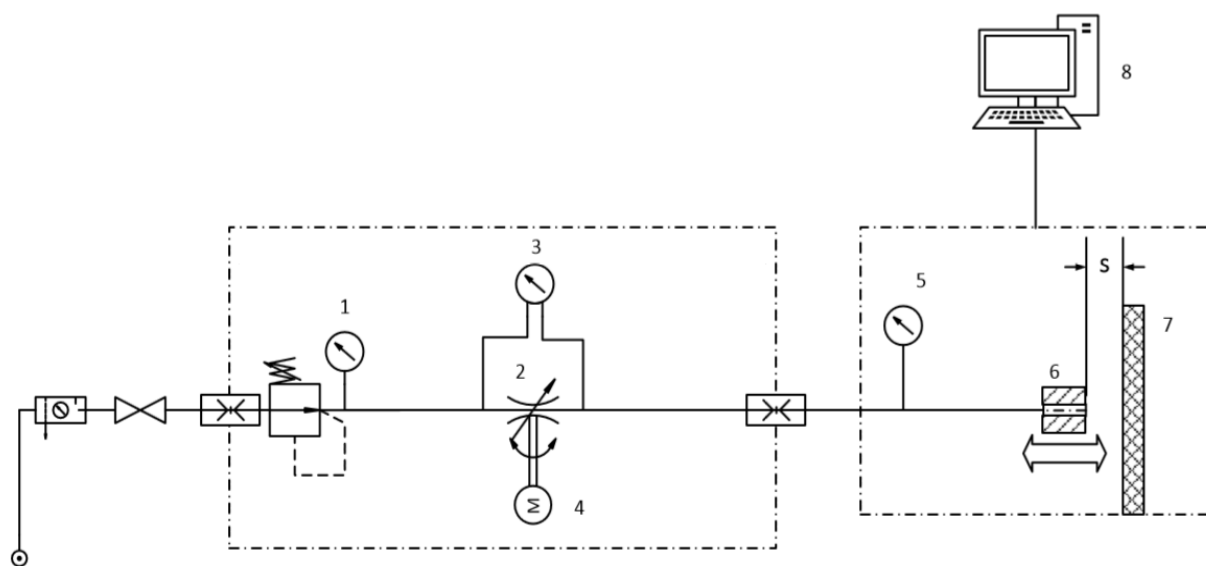
Przedstawiony interfejs (rys. 7) ma wszystkie niezbędne elementy potrzebne do pracy, ponadto jego struktura posiada budowę, która pozwala na łatwą jego rozbudowę o nowe funkcje. Wskaźnik wymiaru zmienia kolor w zależności od tego, czy wymiar mieści się w zakresie założonej tolerancji wymiaru. Przy tym użytkownik otrzymuje informację o tym, czy wymiar jest mniejszy od założonego zakresu, większy lub czy mieści się w dopuszczalnym zakresie. Informacja ta jest powiązana z zapalaniem się diod od S1 do S4, które są umieszczone po prawej stronie ekranu komputera.

## 7. OCENA WŁAŚCIWOŚCI METROLOGICZNYCH

W procesie tworzenia urządzenia przeprowadzono serię testów i wstępnych pomiarów. Ich celem było określenie charakterystyki urządzenia i jego właściwości metrologicznych. Proces ten pozwolił na dobór odpowiednich metod wzorcowania, a także pozwolił na weryfikację pewnych założeń oraz hipotez związanych z wykorzystaniem pneumatyki przemysłowej. Pomiary przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym przeznaczonym do analiz charakterystyk statycznych, bo właśnie taki charakter mają przeprowadzane urządzeniem pomiary.



Stanowisko to przedstawiono na rysunku 8. Jedną część stanowi złożone urządzenie w skład, którego wchodzi stabilizator z manometrem 1, zawór 2, manometr różnicowy 3, oraz silnik krokowy 4 połączony sprzęgłem z zaworem. Drugą część to stanowisko pomiarowe. Składa się ono z przesuwnej stolika 6, którego przesuwem steruje komputer 8. Na ruchomym stoliku zamontowana jest dysza pomiarowa, natomiast przesłona 7 jest nieruchoma. Pozycją stolika można sterować bezpośrednio z komputera 8. Istnieje także możliwość przeprowadzenia pracy w cyklu automatycznym, co pozwala na odsunięcie stolika na daną odległość, a następnie powrót na pozycję początkową. Do komputera podłączony jest także przetwornik ciśnienia 5, który pozwala na pomiar ciśnienia w komorze pomiarowej, co pozwala na wyznaczenie charakterystyki statycznej układu.



Rys. 8. Stanowisko pomiarowe wykorzystane przy testach urządzenia  
Fig. 8. The measuring unit used in tests

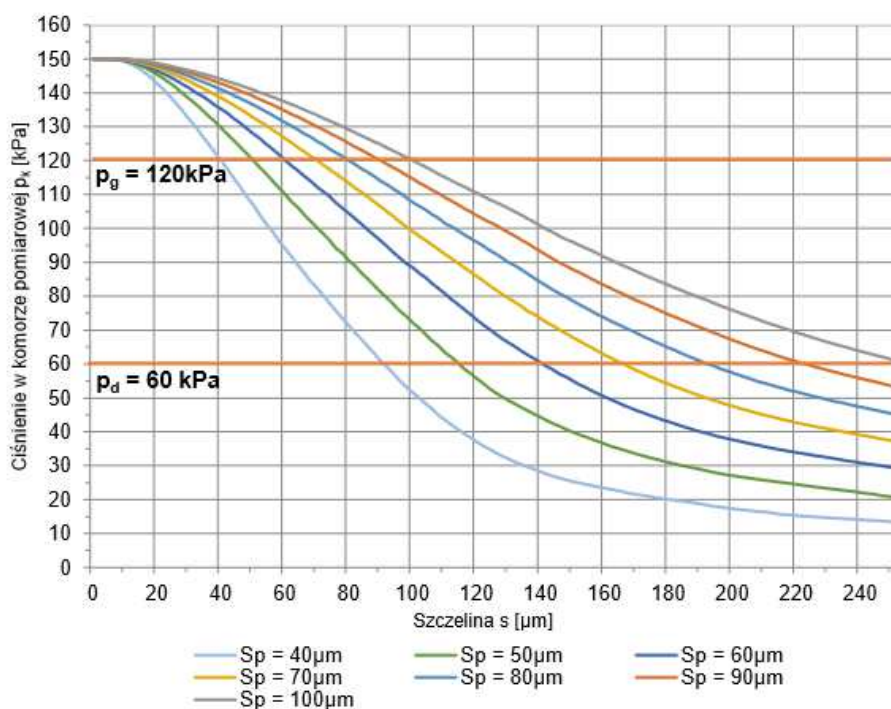
Celem przeprowadzonych pomiarów było wyznaczenie charakterystyk statycznych układu pneumatycznego w urządzeniu dla różnych nastaw (pozycji) zaworu iglicowego, stanowiącego dyszę wlotową. Geometria dyszy wlotowej ma istotny wpływ na przebieg charakterystyki statycznej, a jej zmiana pozwala na zmianę zakresu pomiarowego oraz czułości urządzenia. Pomiary przeprowadzono dla siedmiu różnych nastaw zaworu. Charakterystyka przepływu zaworu iglicowego w funkcji ilości obrotów trzpienia ma charakter nieliniowy, dlatego dla odtwarzania pozycji zaworu wykorzystano zależność od szczeliny początkowej  $S_p$ , dla której przy wykorzystaniu zaworu iglicowego nastawiano jednakowe ciśnienie. Kolejno dla szczelin początkowych  $S_p$  od 40 do 100  $\mu\text{m}$ , zwiększanych co 10  $\mu\text{m}$ , nastawiano ciśnienie 120 kPa. Powodowało to coraz większe otwarcie zaworu w kolejnych krokach pomiarowych.

Dla każdej pozycji zaworu wyznaczono charakterystykę statyczną dla zakresu szczeliny 0 – 250  $\mu\text{m}$ . Pomiary przeprowadzono dla dyszy pomiarowej o średnicy  $d_p = 2\text{mm}$  oraz średnicy zewnętrznej dyszy  $d_z = 3\text{mm}$ . Podobne dysze stosowane są



w głowicach pomiarowych współpracujących z urządzeniami Aeropan ( $d_p = 2\text{mm}$ ,  $d_z = 2,8\text{mm}$ ) [3].

Wyniki pomiarów zaprezentowano w formie wykresu (rys. 9), pokazującego poszczególne charakterystyki statyczne. Widać, że wraz ze zwiększeniem otwarcia zaworu charakterystyka zmienia swoje nachylenie w części możliwej do aproksymacji funkcją liniową. Wyznaczone charakterystyki poddano aproksymacji przy wykorzystaniu metody najmniejszych kwadratów (rys. 10). Aproksymację przeprowadzono dla zbliżonej do liniowej części charakterystyki w zakresie ciśnień 130 – 70kPa.



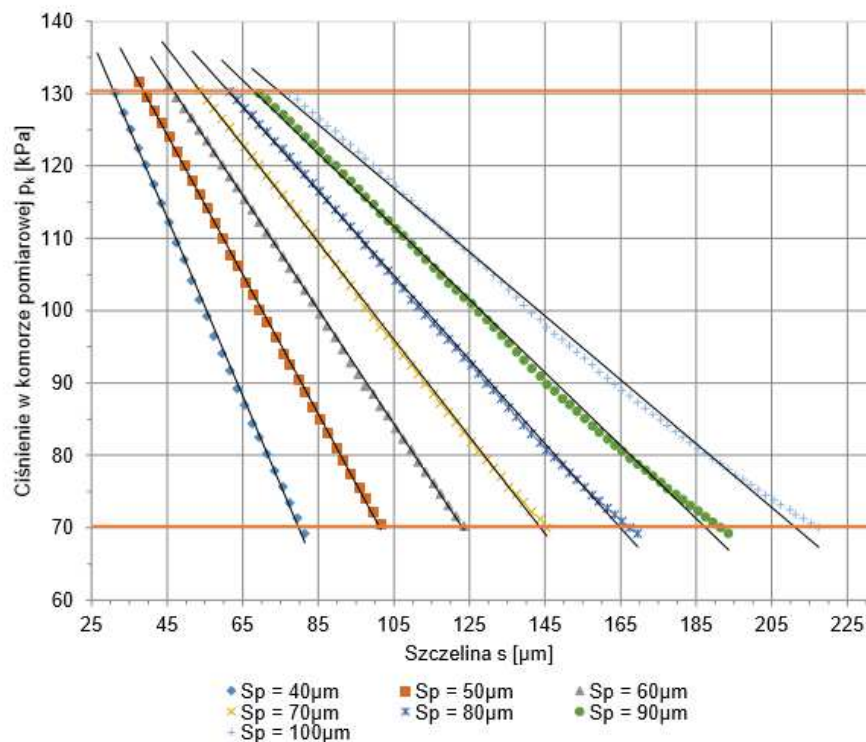
Rys. 9. Wykres charakterystyk statycznych dla różnych nastaw zaworu iglicowego  
Fig. 9. Graph of static characteristics for different settings of the needle valve

Tabela 1. Wyniki aproksymacji charakterystyk w zakresie od 130 do 70kPa  
Table 1. Results of the approximation of the curves in the range of from 130 to 70kPa

PARAMETR:	$S_p = 40\mu\text{m}$	$S_p = 50\mu\text{m}$	$S_p = 60\mu\text{m}$	$S_p = 70\mu\text{m}$	$S_p = 80\mu\text{m}$	$S_p = 90\mu\text{m}$	$S_p = 100\mu\text{m}$
$a_1$	-1,23	-0,96	-0,79	-0,67	-0,58	-0,50	-0,44
$b$	168,21	167,66	167,06	166,37	165,82	165,82	163,22
$s_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	31,5	37,5	45,6	53,6	61,7	69,5	77,5
$s_k$ [ $\mu\text{m}$ ]	81,5	101,5	123,6	145,5	169,6	193,6	217,5
Zakres $z_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	50	64	78	91,9	107,9	124,1	140
$R^2$	0,9989	0,9997	0,9999	0,9995	0,9991	0,998	0,9969
$\delta_{\text{max}}$ [%]	2,0	1,3	0,9	2,0	2,5	1,8	4,4

Otrzymano w ten sposób równania prostych, przybliżające rzeczywiste charakterystyki statyczne wyznaczone na stanowisku laboratoryjnym. Równania prostych dla poszczególnych charakterystyk przedstawiono w tabeli 1. Analizując wyniki można zauważyć, że wraz ze wzrostem otwarcia zaworu zwiększa się zakres pomiarowy przyrządu, jednak jednocześnie zmniejsza się czułość pomiaru. Przy większym zakresie zwiększa się także maksymalny błąd nieliniowości, co powoduje zwiększenie się niepewności pomiaru. Spośród wyznaczonych charakterystyk zwrócono uwagę na charakterystyki  $S_p = 60\mu\text{m}$  oraz  $S_p = 80\mu\text{m}$ . Wykorzystanie pierwszej z nich pozwala na wykonanie pomiaru z błędem nieliniowości ograniczonym do  $\delta_{\text{max}} = 1\%$ , ale przy zakresie  $60\mu\text{m}$ . Natomiast w drugim przypadku uzyskano zakres pomiarowy  $100\mu\text{m}$ , który jest typowym zakresem dla wielu pneumatycznych systemów pomiarowych.

Wyznaczone proste są potrzebne dla implementacji algorytmu automatycznego wzorcowania przyrządu przy wykorzystaniu dwóch wzorców. Jedną z wyznaczonych na stanowisku charakterystyk można wykorzystać, w zależności od wymagań metrologicznych, do zaprojektowanego przyrządu. Operator w takim przypadku nie musi ręcznie regulować zaworu wlotowego. Jego zadanie ogranicza się do wykonania odpowiedniej sekwencji umieszczania głowicy w zadeklarowanych wzorcach.



Rys. 10. Wyniki aproksymacji charakterystyk w zakresie od 130 do 70kPa  
 Fig. 10. Results of the approximation of the curves in the range of from 130 to 70kPa

Należy zwrócić uwagę, że pomiary dokonano dla jednej dyszy pomiarowej o określonej średnicy  $d_p$  oraz  $d_z$  i nie stanowią one kompleksowej oceny właściwości metrologicznych przyrządu. Pokazują natomiast jakich niepewności pomiarów przy danych

zakresach pomiarowych można oczekiwać. Przedstawienie tych danych w funkcji szczeliny początkowej stanowi istotną informację dla konstruktorów specjalizowanych głowic pomiarowych, przeznaczonych do pomiarów przy wykorzystaniu przyrządu PNEUSMART.

Na bazie przedstawionych charakterystyk można dobrać kluczowe wymiary głowicy, które pozwalają na współpracę z przyrządem w oparciu o wybraną przez konstruktora charakterystykę. Wybór charakterystyki uzależniony jest głównie od tolerancji mierzonego wymiaru. Wyniki pomiarów dla pojedynczej dyszy można skutecznie wykorzystać także do konstruowania specjalizowanych głowic opartych o dwie lub więcej dysz. Proces ich projektowania oraz przykłady obliczeniowe można znaleźć w artykule Lotze [4].

## 8. PODSUMOWANIE

W opracowaniu opisano poszczególne elementy zaprojektowanej konstrukcji. W toku projektowym udało się osiągnąć główne cele projektu. Stworzono kompletny projekt urządzenia. Wykonano jego część mechaniczną. Stworzono elastyczny program sterujący jego pracą wraz z interfejsem użytkownika. Opracowano także metody wzorcowania urządzenia. Uruchamianie urządzenia wymagało wielu prób i testów różnych rozwiązań konstrukcyjnych. Ostatecznie udało się dobrać optymalnie wszystkie komponenty tak, aby spełniały swoje funkcje. Zaprojektowane urządzenie stanowi spójną całość zabudowaną w mobilnej obudowie. Powstała dokumentacja techniczna opisuje konstrukcję urządzenia, co pozwala na jego produkcję oraz wdrożenie w obecnej formie do użytku. Urządzenie stanowi konkretną ofertę dla odbiorców przemysłowych, którzy zajmują się produkcją masową elementów mechanicznych, ze szczególnym uwzględnieniem elementów typu tuleja czy pierścień.

## LITERATURA

- [1] CHUCHRO Z., JERMAK CZ. J., 2001, *Pneutronik B25 i B50 - nowa generacja pneumatycznych przyrządów do pomiarów długości*, Konferencja Manufacturing 2001, Poznań, 2, 155-160.
- [2] Manual Gauging [b.r.w], Reference guide, Testar Marposs Division. <http://www.marposs.com>
- [3] AEROPAN Manual, VEB Kombinat Mess- und Regelungstechnik, 1970.
- [4] LOTZE W., 1971, *Endwurf pneumatischer Messwertaufnehmer*, Feingerätetechnik, 29/9, 389-394.

## PNEUSMART – PNEUMATIC SYSTEM FOR GEOMETRICAL MEASUREMENTS

The article contains a description of the concept and design of the apparatus for pneumatic measurements of geometric. It includes information on the construction of various components such as mechanical parts, pneumatic and control. Furthermore, it describes the software structure and basic algorithms for calibration of the instrument. In the final section presents the static characteristics of the device and preliminary results.