

## Tomasz KICZKOWIAK<sup>1</sup>, Szymon GRZYMEK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, INSTYTUT MECHATRONIKI, NANOTECHNOLOGII I TECHNIKI PRÓŻNIOWEJ

<sup>2</sup> POLITECHNIKA GDAŃSKA, KATEDRA KONSTRUKCJI I EKSPLOATACJI MASZYN

# Dostosowanie parametrów modelu procesu do warunków badań symulacyjnych na przykładzie procesu przepływu gazu

Dr hab. inż. Tomasz KICZKOWIAK

Jest kierownikiem Zakładu Napędów i Sterowań w Instytucie Mechatroniki, Nanotechnologii i Techniki Próżniowej Politechniki Koszalińskiej. Pełni również funkcję wicedyrektora Instytutu ds. rozwoju. W swoich pracach zajmuje się zagadnieniami modelowania, symulacji, optymalizacji i badaniami dynamiki napędów pneumatycznych oraz wykorzystaniem ANN w systemach CAD.



e-mail: tomasz.kiczkiowiak@tu.koszalin.pl

Dr inż. Szymon GRZYMEK

Jest adiunktem w Katedrze Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Gdańskiej. W swoich pracach zajmuje się systemami CAD oraz wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych. W dziedzinie jego zainteresowań znajduje się również dynamika napędów pneumatycznych oraz inżynieria mechaniczno-medyczna.



e-mail: sgrymek@pg.gda.pl

### Streszczenie

W pracy przedstawiono procedurę postępowania w przypadku, gdy w badaniach symulacyjnych nie jest możliwe odtworzenie warunków dla których stworzono model matematyczny. Sytuacja taka występuje często w przypadku gdy parametry opisujące właściwości procesu (obiektu) wyznaczane są w badaniach objętych normami. Proponowaną w pracy procedurę zweryfikowano dla procesu przepływu gazu.

**Słowa kluczowe:** symulacja komputerowa, modele matematyczne, napęd pneumatyczny.

## Adaptation of process model's parameters to the conditions of simulation research with as air flow process an example

### Abstract

Sometimes, during computer simulation of mechanical processes, it is not possible to reconstruct the conditions for which the mathematical model has been created. This often takes place when parameters describing the process (object) are determined according to standards. A procedure of activity in such the case is presented in this paper. The procedure was verified for pneumatic driving systems.

**Keywords:** computer simulation, mathematical models, pneumatic driving system.

## 1. Wprowadzenie

Niekiedy parametry opisujące właściwości procesu czy elementów wyznaczane są eksperymentalnie (przykładowo: współczynniki tarcia par kinematycznych, współczynniki wymiarowe zaworów  $K_v$ ). Często procedury ich wyznaczania objęte są normami bądź opisany w literaturze i szeroko stosowanymi metodykami. Nie zawsze jednak modele matematyczne wykorzystywane do wyznaczania wartości parametrów opisujących właściwości mogą być wykorzystane w badaniach symulacyjnych. Sposób postępowania w takich przypadkach przedstawiony został poniżej.

## 2. Proponowana procedura

Załóżmy następującą sytuację: znana jest procedura badawcza i model matematyczny procesu służące do określenia jego właściwości. W badaniach symulacyjnych nie jest możliwe odtworzenie warunków, w których prowadzono badania.

Proponowane postępowanie polega na sprawdzeniu czy:

1. istnieje inna procedura badawcza pozwalająca wyznaczyć parametry procesu, których wartości dostępne są w literaturze a model może być zastosowany w badaniach symulacyjnych,

2. niezgodność warunków w badaniach symulacyjnych dla modelu normowego prowadzi do nieakceptowalnych błędów,
3. istnieje inny model procesu,
4. możliwe jest przeliczenie wartości współczynników charakteryzujących proces według modelu normowego na wartości współczynników innego modelu,
5. możliwe jest wykorzystanie modelu normowego w symulacji po wyliczeniu wartości nowych (ze względów fizykalnych) współczynników.

Przy podejmowaniu decyzji o wyborze nowego modelu czy algorytmu przeliczania współczynników modeli należy zwracać uwagę na:

1. przyjazność numeryczną wybranego rozwiązania (np. stabilność numeryczną),
2. czasochłonność obliczeń (model stosowany będzie w symulacji komputerowej, co może powodować jego wywoływanie w każdym kroku całkowania numerycznego),
3. dokładność obliczeń.

## 3. Przykład

### 3.1. Opis problemu

Jednymi z istotnych wielkości decydujących o zgodności wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych napędu pneumatycznego są parametry opisujące właściwości przepływowe instalacji pneumatycznej. W literaturze [1, 2, 3] występuje wiele modeli opisujących masowe natężenie przepływu przez element pneumatyczny posiadających od jednego do czterech parametrów [2, 6] opisujących właściwości przepływowe. Wykorzystanie tych zależności wymaga jednak identyfikacji wartości stosowanych w nich parametrów. W katalogach dostępne są informacje o przewodności dźwiękowej  $C$  i krytycznym stosunku ciśnień  $b$ , które opisują, zgodnie z normą [4], właściwości przepływowe elementów pneumatycznych. Wykorzystanie tych wielkości w badaniach symulacyjnych jest utrudnione, gdyż model masowego natężenia przepływu prezentowany w normie uwzględnia ciśnienia statyczne, a w symulacji komputerowej wyznaczane są wartości ciśnień spiętrzenia.

Dla modelu przepływu Saint Venanta – Wenzela znane są sposoby [1, 5] przeliczenia przewodności dźwiękowej  $C$  i krytycznego stosunku ciśnień  $b$  na współczynnik przepływu  $\mu$  (opisuje on w tym modelu właściwości przepływowe elementu) lecz są to

procedury iteracyjne. Przeliczenie to musi być dokonywane w każdym kroku całkowania modelu matematycznego napędu pneumatycznego, co znacznie zwiększa nakłady obliczeniowe.

W celu uniknięcia powyższych niedogodności Autorzy postanowili rozważyć możliwość wykorzystania modelu o strukturze określonej w normie [4].

### 3.2. Model masowego natężenia przepływu

Według normy [4] masowe natężenie przepływu czynnika ściśłego może być wyznaczone zgodnie ze wzorami:

$$\dot{m} = \frac{p_1}{\sqrt{T_0}} \cdot \rho_N \cdot \sqrt{T_N} \cdot \varphi(Y_{st}) \quad (1)$$

$$\varphi(Y_{st}) = \begin{cases} C & \text{dla } Y_{st} \leq b \\ C \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{Y_{st} - b}{1 - b}\right)^2} & \text{dla } b < Y_{st} \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$Y_{st} = \frac{p_2}{p_1} \quad (3)$$

gdzie:

- $C$  – przewodność dźwiękowa elementu [ $\text{s} \cdot \text{m}^4 / \text{kg}$ ],
- $p_1$  – absolutne ciśnienie statyczne przed elementem<sup>1</sup> [Pa],
- $p_2$  – absolutne ciśnienie statyczne za elementem<sup>2</sup> [Pa],
- $T_0$  – bezwzględna temperatura gazu przed elementem<sup>2</sup> [K],
- $\rho_N$  – gęstość gazu w warunkach znormalizowanej atmosfery odniesienia ANR<sup>2</sup> [ $\text{kg} / \text{m}^3$ ],
- $b$  – krytyczny stosunek ciśnień [-].

### 3.3. Weryfikacja możliwości wykorzystania modelu normowego

Pierwszym działaniem była ocena możliwości wykorzystania modelu zgodnego z normą, w którym ciśnienia byłyby ciśnieniami spiętrzenia zamiast ciśnieniami statycznymi. Wykorzystując posiadane oprogramowanie komputerowe [6, 7] wygenerowano przebiegi zmian ciśnienia w napełnianym oraz opróżnianym zbiorniku dla wszystkich kombinacji wartości parametrów  $C/d^2 \in \langle 0,0001, 0,0003, 0,0005, 0,0007, 0,001 \rangle$ ;  $b \in \langle 0,000, 0,050, 0,100, 0,300, 0,500, 0,700, 0,900, 0,950, 0,999 \rangle$ ;  $p \in \langle 5, 7, 10, 12, 14 \rangle$  barów (ciśnienie zasilania bądź początkowe ciśnienie w zbiorniku) i identycznych wartości objętości zbiornika, średnicy przewodów, temperatury zasilania dla zbiornika napełnianego i temperatury początkowej w zbiorniku opróżnianym. Następnie podmieniono model natężenia przepływu na model normowy ale z ciśnieniami spiętrzenia. Powtórnie wygenerowano przebiegi zmian ciśnienia.

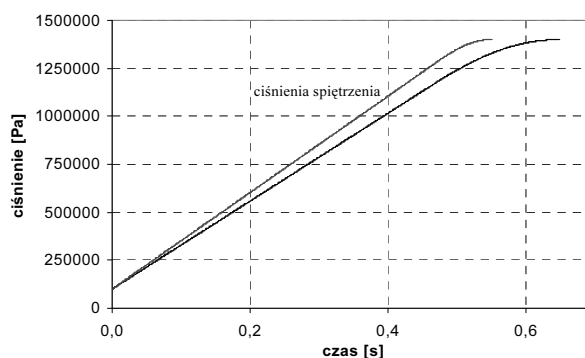
Podstawą oceny możliwości wykorzystania analizowanego modelu była ocena zgodności przebiegów ciśnień w trakcie napełniania bądź opróżniania zbiornika. Wielkościami służącymi do oceny zgodności były: różnica czasów przebiegu procesu oraz średni błąd kwadratowy przebiegu ciśnienia:

1. Największy średni błąd kwadratowy  $\text{MSE} = 4567363220 \text{ Pa}^2$  (przy względnej różnicy czasów  $\text{RTE} = 15,12\%$ ) uzyskano dla procesu napełniania i  $C/d^2 = 0,001$ ;  $b = 0,900$ ;  $p = 14$  barów (rys. 1).
2. Największą różnicę czasów  $\text{TE} = 0,25 \text{ s}$  (przy względnej różnicy  $\text{RTE} = 13,64\%$  i średnim błędzie kwadratowym

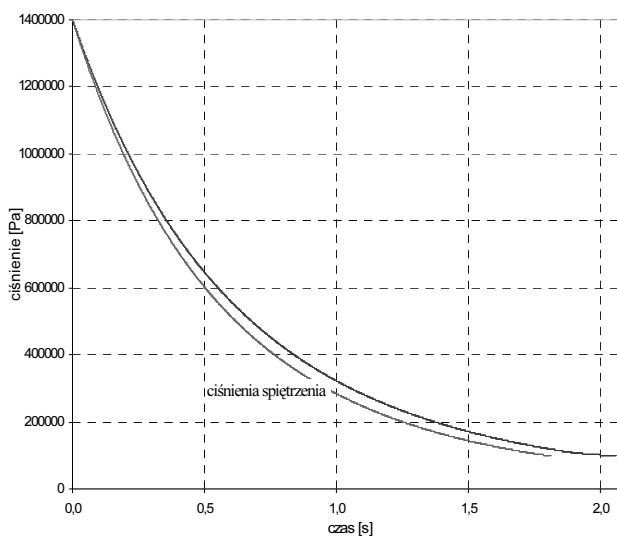
$\text{MSE} = 1200094054 \text{ Pa}^2$ ) uzyskano dla procesu opróżniania i  $C/d^2 = 0,001$ ;  $b = 0,950$ ;  $p = 14$  barów (rys. 2).

3. Najmniejszy średni błąd kwadratowy  $\text{MSE} = 12500 \text{ Pa}^2$  (przy względnej różnicy czasów  $\text{RTE} = 0,09\%$ ) uzyskano dla procesu opróżniania i  $C/d^2 = 0,0001$ ;  $b = 0,000$ ;  $p = 5$  barów<sup>3</sup>.
4. Najmniejszą różnicę czasów  $\text{TE} = 0,007 \text{ s}$  (przy względnej  $\text{RTE} = 0,09\%$  i średnim błędzie kwadratowym  $\text{MSE} = 24184 \text{ Pa}^2$ ) uzyskano dla procesu napełniania i  $C/d^2 = 0,0001$ ;  $b = 0,050$ ;  $p = 5$  barów<sup>3</sup>.

Po przeanalizowaniu całości wyników uznano, że niezgodności są zbyt duże, aby model opisany w normie z ciśnieniami spiętrzenia mógł być zastosowany do analizy i syntezy w projektowaniu układów pneumatycznych.



Rys. 1. Przebieg zmian ciśnienia w zbiorniku napełnianym  
Fig. 1. A curve of pressure change in a tank during filling



Rys. 2. Przebieg zmian ciśnienia w zbiorniku opróżnianym  
Fig. 2. A curve of pressure change in a tank during emptying

### 3.4. Procedura przeliczania współczynników

Postawiono następującą hipotezę: *model normowy z ciśnieniami spiętrzenia może być zastosowany do analizy i syntezy w projektowaniu układów pneumatycznych jeżeli wartości przewodności dźwiękowej i krytycznego stosunku ciśnień zostaną zastąpione przez nowe współczynniki  $C^*$  i  $b^*$ .*

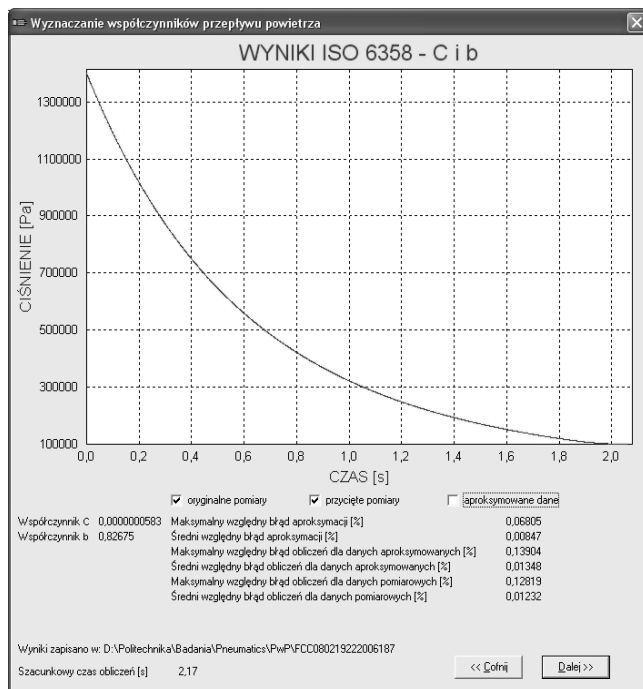
<sup>1</sup> Pomiar realizowany zgodnie z normą [4]

<sup>2</sup>  $p_N = 0.1 \text{ MPa}$ ,  $T_N = 293.15 \text{ K}$ , wilgotność względna 65%

<sup>3</sup> Nie zaprezentowano wykresów, gdyż linie pokrywały się

Tok postępowania przy wyznaczaniu  $C^*$  i  $b^*$  był następujący:

- dla znanych wartości  $C$  i  $b$  przeprowadzono eksperyment napełniania bądź opróżniania zbiornika,
- dla znanego przebiegu ciśnienia i pozostałych parametrów procesu, wykorzystując metodę zbiornikową [8, 6] (np. program FCC – rys. 3) zidentyfikowano współczynniki  $C^*$  i  $b^*$  dla modelu o strukturze normowej.



Rys. 3. Wyznaczanie wartości  $C^*$  i  $b^*$  w programie FCC [6, 7]  
Fig. 3. Determination of  $C^*$  and  $b^*$  in FCC programme [6, 7]

Zgodnie z powyższą procedurą wyznaczono wartości  $C^*$  i  $b^*$  dla wszystkich kombinacji parametrów eksperymentu opisanych w poprzednim paragrafie. Przykładowe wyniki zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Przykładowe wyniki weryfikacji dla procesu opróżniania zbiornika  
Tab. 1. Exemplary results of verification for tank emptying

| eksperyment          |       | identyfikacja |                        | błąd względny $p$ [%] |         | różnica względna [%] |         |       |
|----------------------|-------|---------------|------------------------|-----------------------|---------|----------------------|---------|-------|
| $C/d^2$<br>$10^{-4}$ | $b$   | $p$           | $C^*/d^2$<br>$10^{-4}$ | $b^*$                 | max     | średni               | $C/d^2$ | $b$   |
| 7                    | 0,000 | 12,0          | 6,68278                | 0,0012                | 0,00791 | 0,00248              | 4,53    |       |
|                      | 0,050 |               | 6,68364                | 0,0475                | 0,00142 | 0,00036              | 4,52    | 4,91  |
|                      | 0,100 |               | 6,68386                | 0,0943                | 0,00807 | 0,00278              | 4,52    | 5,67  |
|                      | 0,300 |               | 6,68375                | 0,2815                | 0,03617 | 0,01059              | 4,52    | 6,16  |
|                      | 0,500 |               | 6,68369                | 0,4679                | 0,05126 | 0,01187              | 4,52    | 6,42  |
|                      | 0,700 |               | 6,68367                | 0,6538                | 0,06055 | 0,00992              | 4,52    | 6,60  |
|                      | 0,900 |               | 6,68367                | 0,8393                | 0,06823 | 0,00611              | 4,52    | 6,75  |
|                      | 0,950 |               | 6,68372                | 0,8854                | 0,07219 | 0,00551              | 4,52    | 6,80  |
|                      | 0,999 |               | 6,68341                | 0,9311                | 0,08123 | 0,00507              | 4,52    | 6,79  |
| 1                    | 0,500 | 7,0           | 0,999                  | 0,4993                | 0,00128 | 0,00050              | 0,10    | 0,14  |
| 3                    |       |               | 2,973                  | 0,4941                | 0,01616 | 0,00766              | 0,87    | 1,18  |
| 5                    |       |               | 4,882                  | 0,4829                | 0,02800 | 0,00775              | 2,35    | 3,42  |
| 7                    |       |               | 6,683                  | 0,4677                | 0,04985 | 0,01414              | 4,52    | 6,46  |
| 10                   |       |               | 9,117                  | 0,4390                | 0,08154 | 0,02459              | 8,83    | 12,21 |

Zauważyć można, że wartości  $C^*$  i  $b^*$  są mniejsze od wartości katalogowych, a błąd względny (maksymalny i średni) wyznaczenia przebiegu ciśnienia jest praktycznie pomijalnie mały. Największy błąd maksymalny jaki uzyskano podczas całego eksperymentu wynosił 0,182%.

Mały błąd wskazuje na słuszność postawionej hipotezy, czyli możliwość wykorzystania w symulacji modelu o strukturze modelu normowego z ciśnieniami spiętrzenia i przeliczonymi wartościami katalogowymi przewodności dźwiękowej  $C$  i krytycznego stosunku ciśnień  $b$ .

### 3.5. Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych

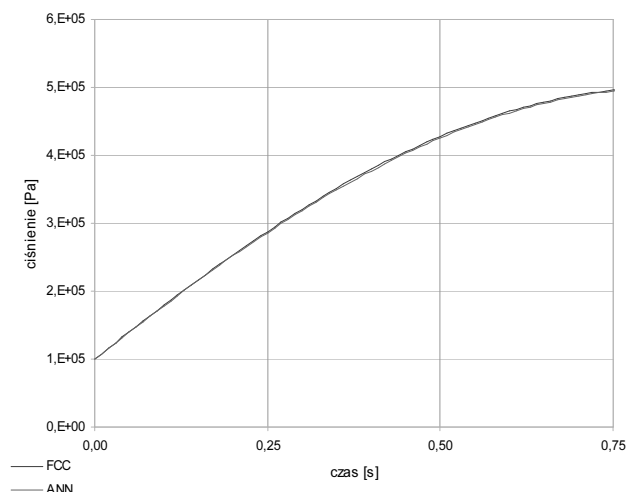
Do przeliczania wartości przewodności dźwiękowej  $C$  i krytycznego stosunku ciśnień  $b$  na nowe wartości  $C^*$  i  $b^*$  (czyli aproksymacji zależności  $C^*/d^2 = f(C/d^2, b, p, x)$  oraz  $b^* = f(C/d^2, b, p, x)$  gdzie  $x$  oznacza typ eksperymentu) zdecydowano się wykorzystać sztuczne sieci neuronowe (ANN).

Dla wszystkich kombinacji zmiennych niezależnych (wartości jak wyżej) wyznaczono wartości  $C^*$  i  $b^*$  zgodnie z procedurą opisaną w poprzednim paragrafie. Ostatecznie uzyskano zbiór uczący składający się z 450 wektorów. W ten sam sposób, dla:  $C/d^2 \in <0,0002, 0,0006, 0,0009, 0,009>$ ;  $b \in <0,050, 0,400, 0,800>$ ;  $p \in <8, 11>$  barów;  $x$  – napełnianie bądź opróżnianie, uzyskano zbiór testowy zawierający 36 wektorów.

Do wyznaczania wartości  $C^*$  i  $b^*$  zaprojektowano dwie jednokierunkowe sieci neuronowe o identycznej topologii: cztery wejścia, jedno liniowe wyjście i siedem neuronów w pojedynczej warstwie ukrytej. Obie sieci uczone były z wykorzystaniem algorytmu Levenberga – Marquarda przez 1000 epok. Dla wartości wyjść znormalizowanej do zakresu  $[0, 1]$  sieć do wyznaczania wartości  $C^*/d^2$  uzyskała średni błąd kwadratowy na poziomie  $1,242 \cdot 10^{-6}$ , a sieć do wyznaczania wartości  $b^*$  błąd  $2,179 \cdot 10^{-5}$ .

Dla uzyskanych sieci maksymalny błąd bezwzględny wyznaczenia  $C^*/d^2$  dla zbioru uczącego wynosi  $7,12 \cdot 10^{-6}$  a dla zbioru testowego  $1,70 \cdot 10^{-6}$ ; maksymalny bezwzględny błąd wyznaczenia  $b^*$  dla zbioru uczącego wynosi  $2,70 \cdot 10^{-2}$  a dla zbioru testowego  $1,01 \cdot 10^{-2}$ .

W praktyce istotne są nie same błędy wyznaczenia wartości  $C^*$  i  $b^*$ , lecz ich wpływ na przebiegi ciśnień. Z przeprowadzonych analiz wynika, że błąd wyznaczenia  $C^*$  ma znacznie większy wpływ na niezgodność przebiegów niż błąd wyznaczenia  $b^*$ . Wpływ maksymalnego uzyskanego w eksperymencie błędu wyznaczenia  $C^*$  pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Przykładowy wpływ błędu wyznaczenia  $C^*$  dla napełniania  
( $p = 5$ ,  $b^* = 0,0014$ ,  $C^*/d^2_{FCC} = 0,00091$ ,  $C^*/d^2_{ANN} = 0,00092$ )  
Fig. 4. Exemplary influence of  $C^*$  determination error for filling  
( $p = 5$ ,  $b^* = 0,0014$ ,  $C^*/d^2_{FCC} = 0,00091$ ,  $C^*/d^2_{ANN} = 0,00092$ )

#### 4. Podsumowanie

Weryfikacji proponowanej w pracy procedury postanowiono dokonać na przykładzie procesu przepływu gazu. Analiza problemu (punkt 3.1) wykazała, że w rozpatrywanym przypadku możliwe jest jedynie zastosowanie modelu zgodnego z normą z ciśnieniami spiętrzenia lecz z nowymi wartościami współczynników.

Przeprowadzone badania (punkt 3.2) wykazały, że model masowego natężenia przepływu opisany w normie i wykorzystujący ciśnienia statyczne nie powinien być wprost stosowany w symulacji komputerowej układów pneumatycznych (gdzie stosowane są ciśnienia spiętrzenia) ze względu na nieakceptowalne błędy (rys. 1, rys. 2). Natomiast możliwe jest wykorzystanie tego modelu (dla ciśnień spiętrzenia) po przeliczeniu wartości przewodności dźwiękowej i krytycznego stosunku ciśnień na nowe wartości  $C^*$  i  $b^*$  (tab. 1). Efektywnym sposobem przeliczenia jest zaprezentowane w pracy zastosowanie sztucznych sieci neuronowych (rys. 4).

Proponowane podejście – zastąpienie oryginalnych wartości współczynników modelu nowymi wartościami przy zachowaniu jego struktury – wydaje się możliwe do zastosowania również w przypadku innych procesów mechanicznych.

#### 5. Literatura

- [1] Iwaszko J.: Opory przepływu powietrza przez elementy pneumatyczne. Prace naukowe, Mechanika Z.177, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 1999.

- [2] Kamiński Z.: Ocena modeli matematycznych charakterystyk przepływowych oporów pneumatycznych. *Hydraulika i pneumatyka* 5/2003 s. 5 – 7.
- [3] Kiczkoziak T.: Algorytmy i modele w projektowaniu pneumatycznych układów napędowych. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2005.
- [4] Polska Norma PN-92/M-73723: Napędy i sterowanie pneumatyczne. Elementy pneumatyczne. Wyznaczanie parametrów przepływowych.
- [5] Grymek Sz., Kiczkoziak T.: Conversion of the sonic conductance  $C$  and the critical pressure ratio  $b$  into the airflow coefficient  $\mu$ . *Journal of Mechanical Science and Technology*. Vol. 19, No 9/2005, s. 1706–1710.
- [6] Kiczkoziak T., Grymek Sz.: Program do wspomaganie obliczeń parametrów opisujących właściwości przepływowe elementów pneumatycznych. PAK 4/2008
- [7] Grymek Sz., Kiczkoziak T.: Komputerowo wspomaganie obliczenia współczynnika przepływu gazu. *ZN Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej*, Nr: 37, Koszalin 2005, s. 33–40.
- [8] Iwaszko J.: Nowa metoda pomiaru współczynnika przepływu. *Archiwum Budowy Maszyn* 1983, tom XXX, zeszyt 3 – 4, s. 163 – 172.

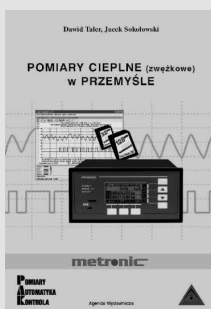
Artykuł recenzowany

## INFORMACJE

### Książki Wydawnictwa PAK



Książka „**Komputerowa technika pomiarowa. Oprogramowanie wirtualnych przyrządów w LabVIEW**”, autorstwa Dariusza Świsulskiego, stanowi kontynuację wydanej w 2002 roku książki „Komputerowa technika pomiarowa w przykładach”. Zasadniczą część książki zajmuje bardzo szczegółowy opis środowiska LabVIEW. Książka przeznaczona jest dla osób rozpoczynających pracę z oprogramowaniem LabVIEW, ale będzie również interesująca dla osób, które już wcześniej używały tego środowiska.



Książka „**Pomiary cieplne (zwięzkowe) w przemyśle**” stanowi nową pozycję literatury poświęconą pomiarom strumienia masy i ciepła płynów przepływających w przewodach przy użyciu zwięzków pomiarowych. Książka przeznaczona jest dla inżynierów i techników zajmujących się zagadnieniami ciepłoprzepływowymi w przemyśle, energetyce i ogrzewnictwie. W książce omówiono przyrządy i układy do pomiarów zwięzkowych strumienia ciepła, produkowane przez firmę Metronic.



Książka „**Regulacja mikroklimatu pomieszczenia**” stanowi nowe opracowanie w stosunku do wydanej w 2002 r. książki „Klimat Pomiaru Regulacja”. Prezentuje ona aktualny stan wiedzy na temat mikroklimatu pomieszczeń i nowoczesne rozwiązania systemów pomiarowo - regulacyjno - sterujących oferowanych przez firmę LAB-EL. Rozwiązania te są osiągnięciem polskiej myśli technicznej o standardzie europejskim.

#### Zamówienia prosimy składać na adresy PAK:

Wydawnictwo PAK  
00-050 Warszawa, ul. Świętokrzyska 14A,  
tel./fax: 022 827 25 40

Redakcja PAK  
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, p. 30b,  
tel./fax: 032 237 19 45  
e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl