

Ryszard DINDORF, Sebastian MAZUR, Piotr WOŚ
POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA, KATEDRA URZĄDZEŃ MECHATRONICZNYCH
Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

Nowe metody pomiaru przecieku w systemach sprężonego powietrza

Prof. dr hab. inż. Ryszard DINDORF

Prof. dr hab. inż. Ryszard Dindorf jest profesorem nadzwyczajnym i kierownikiem Katedry Urządzeń Mechatronicznych na Wydziale Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Autor jest wykonawcą wielu prac badawczych i autorem licznych publikacji (książek, monografii, podręczników, skryptów, artykułów i referatów) w zakresie modelowania i symulacji oraz badania i diagnostyki systemów płynowych.



e-mail: dindorf@tu.kielce.pl

Mgr inż. Sebastian MAZUR

Jest asystentem w Katedrze Urządzeń Mechatronicznych na Wydziale Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Tytuł zawodowy magistra inżyniera uzyskał na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Świętokrzyskiej. Specjalizuje się w zastosowaniu sieci komputerowych w napędach i sterowaniach pneumatycznych i hydraulicznych stosowanych w automatyzacji produkcji.



e-mail: mazurs@tu.kielce.pl

Dr inż. Piotr WOŚ

Praca naukowa autora ukierunkowana jest na adaptacyjne metody sterowania i regulacji napędów płynowych. Stopień doktora w dziedzinie automatyki i robotyki uzyskał w 2008 r. na Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach, gdzie jest aktualnie zatrudniony na stanowisku adiunkta w Katedrze Urządzeń Mechatronicznych.

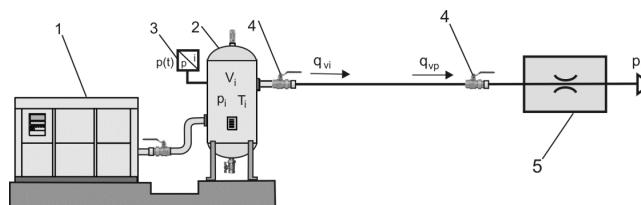


e-mail: wos@tu.kielce.pl

Keywords: compressed air leakage, measurement leakage, pneumatic pipeline, controlled flow.

1. Pośrednia metoda pomiaru przecieku na podstawie spadku ciśnienia

W instalacji pneumatycznej określa się dopuszczalny ilościowy przeciek w wartościach przepływu objętościowego lub procentowy przeciek w odniesieniu do wydajności sprężarki. Do oszacowania przecieku w instalacji sprężonego powietrza stosuje się metodę bezpośredniego pomiaru przecieku za pomocą przepływomierza lub pośrednie metody pomiaru przecieku [1, 2]. Najprostszą metodą ilościowego określenia przecieku (przepływu objętościowego) w instalacji pneumatycznej jest pomiar spadku ciśnienia w zbiorniku sprężonego powietrza przy wyłączonej sprężarce. Schemat ideowy układu pomiarowego przecieku w instalacji pneumatycznej metodą opróżniania zbiornika zamieszczono na rysunku 1. Metoda ta jest zalecana do pomiaru przecieku w instalacji pneumatycznej, której objętości nie jest większa niż 10% objętości zbiornika V_z .



Rys. 1. Pomiar przecieku w instalacji pneumatycznej metodą opróżniania zbiornika: 1 – sprężarka, 2 – zbiornik, 3 – przetwornik ciśnienia, 4 – zawór odcinający przelotowy, 5 – odbiornik sprężonego powietrza

Fig. 1. Measurement of leaks by emptying the receiver: 1 – compressor, 2 – receiver, 3 – pressure sensor, 4 – shut-off valve, 5 – pneumatic devices

Streszczenie

W pracy przedstawiono nowe metody pomiaru przecieku w systemach sprężonego powietrza przy wykorzystaniu urządzenia pomiarowego włączonego na odgałęzienie rurociągu. Nowe metody pomiaru opierają się na określeniu relacji między przeciekiem w instalacji pneumatycznej a standardowym przepływem przez otwór kalibrowany lub przepływem kontrolowanym przez zawór dławiący nastawny. Przeciek sprężonego powietrza w instalacji pneumatycznej jest obliczany na podstawie pomiaru spadku ciśnienia w dwóch przedziałach czasu – z uwzględnieniem i bez uwzględnienia przepływu kontrolowanego. Zaproponowane metody pomiaru przecieku w instalacji pneumatycznej, w odróżnieniu od powszechnie stosowanych metod pośrednich, nie wymagają znajomości parametrów zbiornika i sprężarki. Metody te można stosować do pomiaru przecieku w wyodrębnionych gałęziach lub miejscach instalacji pneumatycznej: w rurociągu głównym, przewodach rozprowadzających, przewodach przyłączeniowych do urządzeń pneumatycznych.

Słowa kluczowe: przeciek sprężonego powietrza, pomiar przecieku, instalacja pneumatyczna, przepływ kontrolowany.

New leakage measurement methods in compressed air systems

Abstract

In the paper there are proposed new measurement methods for the compressed air leakage flow rate in pneumatic pipe systems with use of measurement equipment connected to a pneumatic pipeline branch. The new measurement methods are based on determining the relation between the air leakage flow rate in a pipeline and the standard flow rate in a calibrated orifice or the controlled air flow rate in an adjustable throttle valve. The compressed air leakage flow rate in pneumatic systems is calculated on the basis of pressure drop measurements in two time periods - during leakage with and without the controlled flow. The proposed measurement methods for the compressed air leakage of a pneumatic system are independent of receiver and compressor parameters, which is not the case in the traditional methods for measurements of the compressed air leakage. Branch connections of the measurement equipment in a pneumatic system do not require pipeline disassembly or modification. The methods can be used to measure the compressed air leakage in any place of the pneumatic pipe system: main line, distribution lines and connection lines to pneumatic devices.

Przy określaniu przepływu sprężonego powietrza w wyniku spadku ciśnienia w instalacji pneumatycznej stosuje się wzór na strumień masowy podczas politropowego rozprężania w danym obszarze kontrolnym [3]:

$$\dot{m} = \frac{V}{nRT} \frac{dp}{dt} \quad (1)$$

gdzie: V – objętość obszaru kontrolnego, T , p – temperatura absolutna i ciśnienie absolutne sprężonego powietrza, R – indywidualna stała gazowa powietrza, n – wykładnik przemiany politropowej.

Spadek ciśnienia dp/dt sprężonego powietrza w instalacji pneumatycznej występuje przy prawie stałej temperaturze $T = \text{const}$. W takim przypadku uzasadnione jest przyjęcie procesu izotermicznego, dla której $n = 1$, oraz zapisanie wzoru na masowe natężenie przepływu q_{mi} w następującej postaci:

$$q_{mi} = \frac{V_i}{R T_i} \frac{dp_i}{dt} \quad (2)$$

a następnie określenie objętościowego natężenie przepływu q_{vi} :

$$q_{vi} = \frac{q_{mi}}{\rho_i} = \frac{V_i}{\rho_i R T_i} \frac{dp_i}{dt} = \frac{V_i}{p_i} \frac{dp_i}{dt} \quad (3)$$

gdzie: V_i – objętość instalacji pneumatycznej, p_i – ciśnienie absolutne, T_i – temperatura absolutna, ρ_i – gęstość powietrza.

W przypadku, gdy sprężarka i wszystkie odbiorniki są wyłączone, wtedy natężenia przepływu q_{vp} przez miejsca przecieku sprężonego powietrza wynoszą:

$$q_{vp} = q_{vi} \quad (4)$$

Przy pomiarze spadku ciśnienia Δp_i w przedziale czasu Δt_i można na podstawie wzoru (3) określić średni przeciek sprężonego powietrza w instalacji pneumatycznej:

$$q_{vp} = \frac{V_i}{p_i} \frac{\Delta p_i}{\Delta t_i} \quad (5)$$

Metoda pomiaru przecieków w instalacji pneumatycznej metodą opróżniania zbiornika opiera się na założeniu, że utrzymuje się stały przeciek q_{vp} . Takie założenie jest uzasadnione dla przepływu nadkrytycznego, w przypadku gdy $0,125 \leq p_a/p \leq 0,5283$, oraz gdy ekwiwalentna średnica nieszczelności $d_n \ll 1$ mm. Wartość stosunku ciśnień $p_a/p = 0,125$ określono dla maksymalnego ciśnienia absolutnego $p = 0,8$ MPa w instalacji, gdy ciśnienie atmosferyczne $p_a \approx 0,1$ MPa, a $\beta = 0,5283$ jest krytycznym stosunkiem ciśnień.

Straty mocy P_L wynikające z wycieku sprężonego powietrza przez nieszczelności w instalacji oblicza się według wzoru [4]:

$$P_L = q_{vp} \cdot W_p \quad \text{kW} \quad (6)$$

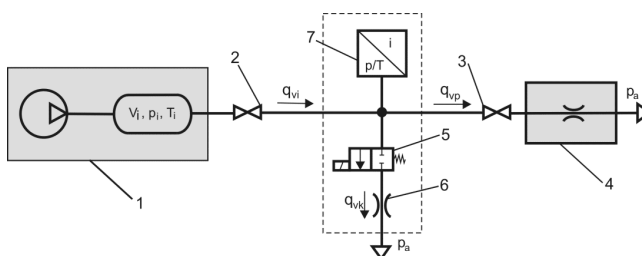
gdzie: W_p – wskaźnik mocy sprężarki w kW/m³/h.

2. Pośrednie metody pomiaru przecieku z kontrolowanym przepływem na odgałęzieniu

Zaproponowano pośrednie metody pomiaru przecieku sprężonego powietrza w instalacji pneumatycznej przy wykorzystaniu urządzenia pomiarowego włączonego na odgałęzieniu rurociągu. Metoda pomiaru opiera się na określeniu relacji między przeciekiem w odbiorniku sprężonego powietrza i instalacji pneumatycznej a przepływem kontrolowanym w otworze kalibrowanym (zwężce, dyszy, zaworze), w dwóch zakresach pomiarowych. Przeciek sprężonego powietrza przez nieszczelności w instalacji pneumatycznej określa się na podstawie pomiaru spadku ciśnienia oraz znanego przepływu kontrolowanego. Pomiary spadków ciśnienia przeprowadza się w dwóch dowolnych przedziałach czasowych, dla przecieku przez nieszczelności z uwzględnieniem i bez uwzględnienia przepływu kontrolowanego. Zaproponowane metody mogą być stosowane do pomiaru przecieku w dowolnym miejscu instalacji pneumatycznej: w rurociągu głównym, przewodach rozprowadzających, przewodach przyłączeniowych do odbiorników (maszyn, urządzeń, narzędzi). Jest to metoda niezależna od parametrów zbiornika i sprężarki, jak w przypadku standardowych pośrednich metod pomiaru przecieku w instalacji pneumatycznej.

2.1. Metoda pomiaru przecieku sprężonego powietrza z otworem kalibrowanym

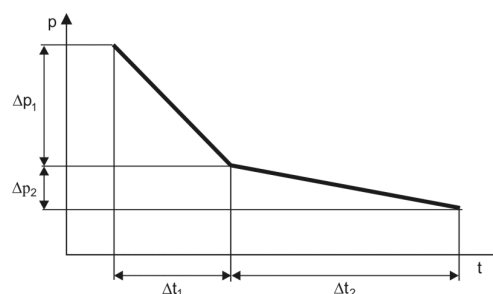
Schemat układu pomiarowego przecieku sprężonego powietrza w instalacji pneumatycznej, w przypadku włączenia otworu kalibrowanego na odgałęzieniu rurociągu, zamieszczono na rysunku 2. Charakterystyki przepływowe otworu kalibrowanego wyznacza się standardową metodą pomiaru przepływu sprężonego powietrza z wpływem do atmosfery, określoną w normie ISO 6358.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego przecieku według standardowego przepływu: 1 – sprężarka i zbiornik, 2, 3 – zawór odcinający, 4 – odbiornik sprężonego powietrza, 5 – zawór przełączający, 6 – otwór kalibrowany, 7 – podwójny przetwornik pomiarowy ciśnienia i temperatury

Fig. 2. Air leakage measuring circuit based on the standard flow: 1 – compressor and receiver, 2,3 – shut-off valve, 4 – pneumatic devices, 5 – switching valve, 6 – calibrated orifice, 7 – dual pressure and temperature sensor

Metoda pomiaru polega na określeniu relacji między przeciekiem q_{vp} w instalacji pneumatycznej (urządzeniu, maszynie) 4 a przepływem q_{vk} w otworze kalibrowanym 6 w dwóch zakresach pomiarowych jak rysunku 3.



Rys. 3. Spadki ciśnienia w dwóch zakresach pomiarowych w metodzie pomiaru przecieku według standardowego przepływu

Fig. 3. Pressure change in two states of the compressed air leakage based on the standard flow

Po otwarciu zaworu przełączającego 5 rozpoczyna się pierwszy krótkotrwały pomiar, w którym rejestruje się spadek ciśnienia Δp_1 i temperaturę T_1 w przedziale czasu Δt_1 . Po zamknięciu zaworu przełączającego 5 rozpoczyna się drugi dłuższy pomiar, w którym rejestruje się spadek ciśnienia Δp_2 w przedziale czasu Δt_2 . W układzie pomiarowym zastosowano zawór przełączający 2/2 sterowany elektromagnetycznie 5 oraz podwójny przetwornik pomiarowy 7 typu p/T, do pomiaru ciśnienia i temperatury. W tej metodzie pomiaru przecieku w instalacji pneumatycznej równania bilansu natężenia (5), dla pierwszego i drugiego zakresu pomiarowego, zapisuje się następująco:

$$\begin{cases} \frac{V_i}{p_1} \frac{\Delta p_1}{\Delta t_1} = q_{vp} + q_{vk} \\ \frac{V_i}{p_2} \frac{\Delta p_2}{\Delta t_2} = q_{vp} \end{cases} \quad (7)$$

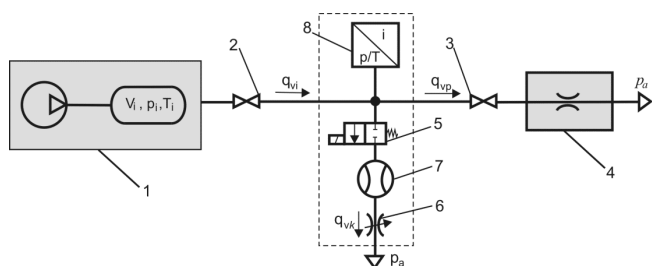
gdzie: $\Delta p_1, \Delta p_2$ – spadki ciśnienia w 1 i 2 zakresie pomiarowym, $\Delta t_1, \Delta t_2$ – przedziały czasu w 1 i 2 zakresie pomiarowym, p_1, p_2 – średnie ciśnienia w 1 i 2 zakresie pomiarowym, q_{vp} – sumaryczny przepływ objętościowy przez nieszczelności w instalacji pneumatycznej, q_{vk} – średni przepływ objętościowy przez otwór kalibrowany w 1 zakresie pomiarowym.

Po przekształceniu równania (7) otrzymano wzór do obliczania przecieku (przepływu) objętościowego w instalacji pneumatycznej w przypadku metody pomiaru przecieku z otworem kalibrowanym:

$$q_{vp} = q_{vk} \frac{\frac{\Delta p_2}{p_2} \Delta t_1}{\frac{\Delta p_1}{p_1} \Delta t_2 - \frac{\Delta p_2}{p_2} \Delta t_1} \quad (8)$$

2.2. Metoda pomiaru przecieku sprężonego powietrza z przepływem kontrolowanym

Nowa zmodyfikowana metoda pomiaru przecieku sprężonego powietrza opiera się na określeniu relacji między przeciekiem q_{vp} sprężonego powietrza w odbiorniku sprężonego powietrza 4 a przepływem q_{vk} przez zawór dławicy nastawny 6, kontrolowanym (mierzonym) za pomocą przepływomierza 7. Schemat takiego układu pomiarowego przecieku z przepływem kontrolowanym zamieszczono na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat układu pomiarowego przecieku z przepływem kontrolowanym: 1 – sprężarka i zbiornik, 2, 3 – zawór odcinający, 4 – odbiornik sprężonego powietrza, 5 – zawór przełączający, 6 – zawór dławicy nastawialny, 7 – przepływomierz, 8 – podwójny przetwornik pomiarowy ciśnienia i temperatury

Fig. 4. Air leakage measuring circuit based on the controlled flow: 1 – compressor and receiver, 2,3 – shut-off valve, 4 – pneumatic devices, 5 – switching valve, 6 – adjustable throttle valve, 7 – flowmeter, 8 – dual pressure and temperature sensor

Pomiar przecieku sprężonego powietrza w instalacji pneumatycznej metodą z przepływem kontrolowanym przeprowadza się następująco:

- Pomiar przecieku w instalacji sprężonego powietrza przeprowadza się wówczas, gdy wyłączona jest sprężarka (instalacja pneumatyczna jest pod ciśnieniem zbiornika sprężonego powietrza) 1 oraz gdy nie ma poboru sprężonego powietrza w odbiorniku pneumatycznym 4.
- Metoda pomiaru przecieku opiera się na określeniu relacji między przeciekiem q_{vp} sprężonego powietrza w odbiorniku pneumatycznym 4 a przepływem q_{vk} przez zawór dławicy nastawny 6, kontrolowanym (mierzonym) za pomocą przepływomierza 7.
- Przez zmianę nastawy zaworu 6 można dostosować przepływ kontrolowany q_{vk} do przepływu (przecieku) q_{vp} przez nieszczelności występujące w instalacji sprężonego powietrza, a także dobrać przepływ przez zawór 6 do zakresu pomiarowego przepływomierza 7.
- Pomiar temperatury T wykorzystuje się do przeliczenia wyników pomiaru przepływu objętościowego lub masowego dla znormalizowanej atmosfery odniesienia ANR.

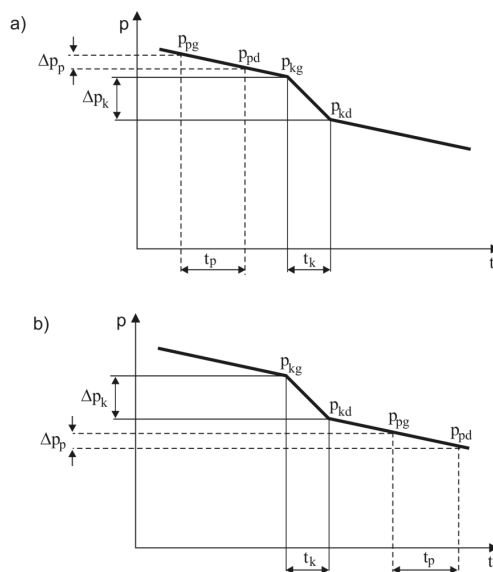
W metodzie pomiaru uwzględnia się dwa zakresy pomiarowe widoczne na rysunku 5, które można dobrać w dowolnej kolejności i w różnych przedziałach czasowych:

1. Pierwszy zakres pomiarowy jest pomiarem przecieku bez przepływu kontrolowanego, gdy zawór przełączający 5 jest w pozycji przepływu odcięty. W czasie t_p występuje spadek ciśnienia Δp_p , wynikający z różnicy ciśnienia górnego p_{pg} i ciśnienia dolnego p_{pd} , spowodowany przeciekiem sprężonego powietrza w urządzeniu pneumatycznym 4.
2. Drugi zakres pomiarowy jest pomiarem przecieku z przepływem kontrolowanym, gdy zawór przełączający 5 jest w pozycji przepływu otwarty. W czasie t_k występuje spadek ciśnienia Δp_k , wynikający z różnicy ciśnienia górnego p_{kg} i ciśnienia dolnego p_{kd} , spowodowany przeciekiem sprężonego powietrza w instalacji pneumatycznej 4 oraz przepływem sprężonego powietrza do atmosfery przez zawór dławicy nastawny 6. W czasie t_k mierzy się przepływomierzem 7 przepływ objętościowy przez zawór dławicy nastawny 6.

W tej metodzie pomiaru przecieku w instalacji pneumatycznej równania bilansu natężeń przepływu, dla przyjętych dwóch zakresów pomiarowych spadku ciśnienia, zapisuje się według wzoru (3) następująco:

$$\begin{cases} V_i \frac{dp_p}{p_p dt_p} = q_{vp} \\ V_i \frac{dp_k}{p_k dt_k} = q_{vp} + q_{vk} \end{cases} \quad (9)$$

gdzie: p_p – ciśnienie w zakresie pomiaru przecieku bez przepływu kontrolowanego, p_k – ciśnienie w zakresie pomiaru przecieku z przepływem kontrolowanym, t_p – czas pomiaru przecieku bez przepływu kontrolowanego, t_k – czas pomiaru przecieku z przepływem kontrolowanym, q_{vp} – sumaryczne natężenie przepływu objętościowego przez nieszczelności w instalacji pneumatycznej, q_{vk} – średnie mierzone natężenie przepływu objętościowego przez zawór dławicy nastawny w czasie t_k .



Rys. 5. Spadki ciśnienia w dwóch zakresach pomiarowych w metodzie pomiaru przecieku z przepływem kontrolowanym według sposobu a lub b
Fig. 5. Pressure change in two states of the compressed air leakage based on the controlled flow according to the mode a or b

Ponieważ przepływ przez nieszczelności w instalacji przemysłowej jest nieustalony (zmienia się czasie), dlatego równania różniczkowe (9) przekształcone zostało za pomocą funkcji logarytmicznych do postaci:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_i \frac{\ln\left(\frac{p_{pg}}{p_{pd}}\right)}{t_p} = q_{vp} \\ V_i \frac{\ln\left(\frac{p_{kg}}{p_{kd}}\right)}{t_k} = q_{vp} + q_{vk} \end{array} \right. \quad (10)$$

gdzie: p_{pg}, p_{pd} – ciśnienie górne i dolne w zakresie pomiaru przecieku bez przepływu kontrolowanego, p_{kg}, p_{kd} – ciśnienie górne i dolne w zakresie pomiaru przecieku z przepływem kontrolowanym.

Po przekształceniu równania (10) otrzymano wzór do obliczania przecieku (przepływu) objętościowego w instalacji pneumatycznej w przypadku stosowania metody pomiaru z przepływem kontrolowanym:

$$q_{vp} = q_{vk} \frac{\ln\left(\frac{p_{pg}}{p_{pd}}\right) t_k}{\ln\left(\frac{p_{kg}}{p_{kd}}\right) t_p - \ln\left(\frac{p_{pg}}{p_{pd}}\right) t_k} \quad (11)$$

3. Podsumowanie

W pracy przedstawiono metody pośredniego pomiaru przecieku sprężonego powietrza w instalacji pneumatycznej przy wykorzystaniu urządzenia pomiarowego włączonego na odgałżenie rurociągu. Zaproponowane metody pomiaru opierają się na określeniu relacji między przeciekiem w instalacji pneumatycznej a przepływem kontrolowanym, na podstawie pomiaru spadku ciśnienia w dwóch przedziałach czasu. Przedstawiono dwie metody pomiarowe przecieku z otworem kalibrowanym i z przepływem kontrolowanym. W pierwszej metodzie do określenia prze-

cieku wymagana jest znajomość charakterystyki przepływowej otworu (zwężki, dyszy) kalibrowanego. W drugiej metodzie wymagany jest przepływomierz do pomiaru przepływu przez zawór dławiący nastawny. Zaproponowane metody pomiaru przecieku w instalacji pneumatycznej, w odróżnieniu od powszechnie stosowanych metod pośrednich, nie wymagają znajomości parametrów zbiornika i sprężarki. Metody te można stosować do pomiaru przecieku w wyodrębnionych gałęziach lub miejscach instalacji pneumatycznej: w rurociągu głównym, przewodach rozprzewadzających, przewodach przyłączeniowych do odbiorników (maszyn, urządzeń, narzędzi). Zastosowanie tych metod zmniejsza koszty pomiaru przecieku w instalacji pneumatycznej, ponieważ nie wymagany jest demontaż lub przeróbka rurociągu, wystarczy podłączyć urządzenie pomiarowe w dowolnym miejscu instalacji pneumatycznej przez zawór kulowy lub punkcie poboru sprężonego powietrza. Pośrednie metody pomiaru przecieku mają istotne znaczenie do oszacowania kosztów eksploatacji systemów sprężonego powietrza.

4. Literatura

- [1] Dindorf R., Woś P.: Measurement methods of compressed air leakage for pneumatic system. *Hydraulica a Pneumatica*, no.3, p.001-005, 2012 (Slovak Republic).
- [2] Dindorf R., Woś P., Mazur S.: Pośrednie metody pomiaru przecieków sprężonego powietrza. *Hydraulika i Pneumatyka*, nr 3, s.008-012, 2012.
- [3] Dindorf R.: Napędy płynowe. Podstawy teoretyczne i metody obliczania napędów hydrostatycznych i pneumatycznych. Podręcznik akademicki. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej. Kielce 2009.
- [4] Liang H., Maolin C., Jiawei W.: Instantaneous Leakage Flow Rate Measurement of Compressed Air. *International Conference on Mechanic Automation.*, 26-28 June 2010, Beijing, China.

otrzymano / received: 20.03.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.05.2013

artykuł recenzowany / revised paper

INFORMACJE

Nowa inicjatywa PAK

Na stronie internetowej Wydawnictwa PAK został utworzony dział: **Niepewność wyników pomiarów** w którym są zamieszczane aktualne informacje dotyczące problemów teoretycznych i praktycznych związanych z szacowaniem niepewności wyników pomiarów. W dziale znajdują się:

- aktualne informacje o publikacjach dotyczących niepewności wyników,
- informacje o przedsięwzięciach naukowo-technicznych i edukacyjnych, o tematyce związanej z niepewnością,
- dokumenty dotyczące niepewności,
- pytania do ekspertów (FAQs).

Zapraszamy:

- autorów opublikowanych prac dotyczących niepewności o nadsyłanie tekstów do zamieszczenia w tym dziale,
- organizatorów przedsięwzięć naukowo – technicznych lub edukacyjnych do nadsyłania informacji o imprezach planowanych lub odbytych,
- zainteresowanych zagadnieniami szczegółowymi do nadsyłania pytań do ekspertów.

Materiały mogą mieć formę plików lub linków do źródeł. Warunkiem zamieszczenia w tym dziale strony internetowej PAK materiałów lub linków jest przysłanie do redakcji PAK pocztą zwykłą zgody właściciela praw autorskich na takie rozpowszechnienie. Zamieszczanie i pobieranie materiałów i informacji w tym dziale strony internetowej jest bezpłatne. Redakcja PAK będzie nadzorować zawartość działu, ale za szczegółowe treści merytoryczne odpowiadają autorzy nadsyłanych materiałów.