

## Urządzenie do automatycznego pomiaru natężenia przecieku w instalacji sprężonego powietrza

**Streszczenie.** Praca dotyczy innowacyjnej metody pośredniego pomiaru natężenia przecieku w instalacji sprężonego powietrza. Natężenie przecieku sprężonego powietrza w instalacji pneumatycznej jest obliczane na podstawie pomiaru prędkości spadku ciśnienia w dwóch przedziałach czasu – z uwzględnieniem i bez uwzględnienia przepływu kontrolowanego. Przedstawione zostało urządzenie pomiarowe, które można wykorzystać do automatycznego pomiaru natężenia przecieku w instalacji sprężonego powietrza.

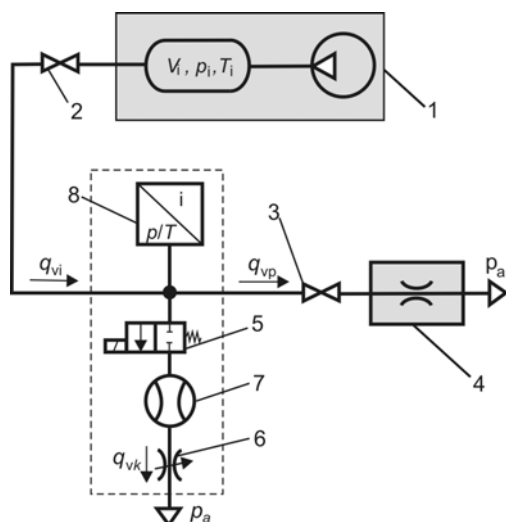
**Abstract.** The paper deals with the innovative indirect measurement method of air leakage flow rate in compressed air system. Compressed air leakage flow rate in the pneumatic system is calculated on the basis of pressure drop rate measurements in two time periods - during leakage with and without the controlled flow. A measurement device, that can be used for automatic measurement of leakage flow rate in compressed air pipeline, is presented. A device for the automatic measurement of leakage flow rate in compressed air pipeline.

**Słowa kluczowe:** system sprężonego powietrza, urządzenie pomiarowe natężenia przecieku, pomiar automatyczny.

**Keywords:** compressed air systems, leakage flow rate measurement equipment, automatic measurement.

### Wstęp

W artykule zamieszczono nowe rozwiązania związane z budową demonstracyjnego urządzenia do automatycznego pomiaru natężenia przecieku w instalacji sprężonego powietrza, które zostało przedstawione na Targach Kielce i wyróżnionego medalem za innowacyjne rozwiązanie w ramach VIII wystawy Pneumicon'2015. Zamieszczono także zaawansowany układ pomiarowy urządzenia do automatycznego pomiaru natężenia przecieku, który jest przedmiotem zgłoszenia patentowego A1417036/2016. Zasada działania przedstawionego urządzenia pomiarowego oparta została na zaproponowanej przez autorów metodzie pośredniego pomiaru natężenia przecieku w instalacji sprężonego powietrza z wykorzystaniem układu pomiarowego włączanego na odgałęzieniu rurociągu, która była tematem kilku publikacji, min. [1], [2] i [3]. Schemat ideowy układu pomiarowego natężenia przecieku w instalacji sprężonego powietrza metodą z przepływem kontrolowanym na odgałęzieniu rurociągu przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Schemat ideowy układu pomiarowego natężenia przecieku z przepływem kontrolowanym na odgałęzieniu rurociągu: 1 – sprężarka i zbiornik, 2, 3 – zawór odcinający, 4 – miejsce przecieku, 5 – zawór przełączający, 6 – zawór nastawny dławiący, 7 – przepływomierz, 8 – podwójny przetwornik pomiarowy ciśnienia i temperatury

Ogólny wzór na masowe natężenie przepływu  $q_m$  sprężonego powietrza, związane ze spadkiem ciśnienia w instalacji, wynika z równania rozprężania politropowego gazu doskonałego w obszarze kontrolnym [4]:

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

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 niezmienniej temperaturze w czasie  $T_i = \text{idem}$ . W takim przypadku uzasadnione jest przyjęcie procesu izotermicznego, dla której  $n=1$ , oraz zapisanie wzoru (1) w postaci objętościowego natężenia przepływu w  $i$ -tym obszarze kontrolnym, jak na rysunku 1:

$$(2) \quad q_{vi} = \frac{q_{mi}}{\rho_i} = \frac{V_i}{\rho_i RT_i} \frac{dp_i}{dt} = \frac{V_i}{\rho_i} \frac{dp_i}{p_i dt}$$

gdzie:  $V_i$  – objętość instalacji pneumatycznej (zbiornika i rurociągów),  $p_i$  – ciśnienie absolutne,  $T_i$  – temperatura absolutna,  $\rho_i$  – gęstość powietrza.

Pomiar przeprowadza się wtedy, gdy sprężarka i wszystkie odbiorniki są wyłączone. W takim przypadku natężenie przepływu (przeciek)  $q_{vp}$  sprężonego powietrza w miejscach szczelności instalacji wynosi:

$$(3) \quad q_{vp} = q_{vi}$$

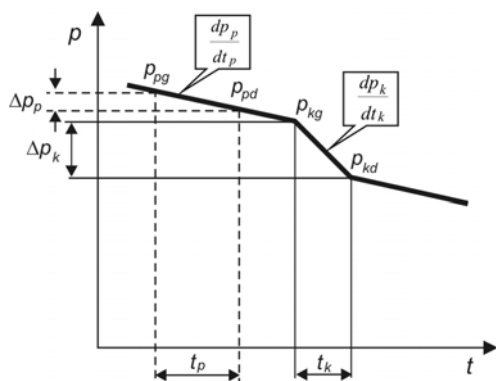
Metoda pomiaru natężenia przecieku w instalacji pneumatycznej na podstawie spadku ciśnienia opiera się na założeniu, że przeciek  $q_{vp}$ , jest proporcjonalny do ciśnienia, co występuje w zakresie przepływu nadkrytycznego.

Zaproponowana metoda pomiaru opiera się na określeniu relacji między natężeniem przecieku przez szczelności w instalacji sprężonego powietrza (w połączeniach, zaworach, odbiornikach i innych), a natężeniem przepływu kontrolowanego na odgałęzieniu rurociągu. Natężenie przecieku sprężonego powietrza w instalacji pneumatycznej oblicza się na podstawie pomiaru ciśnienia w dwóch przedziałach czasu – w przedziale

pomiarowym bez przepływu kontrolowanego i w przedziale pomiarowym z przepływem kontrolowanym. W każdym z tych przedziałów mierzy się wartości ciśnienia górnego i dolnego w określonym przedziale czasu. W zastosowanej metodzie pośredniej pomiaru natężenia przecieku sprężonego powietrza uwzględnia się dwa przedziały pomiarowe widoczne na rysunku 2 [4]:

1. Przedział pomiarowy bez przepływu kontrolowanego, gdy zawór przełączający 5 jest w pozycji przepływ odcięty. W czasie  $t_p$  mierzy się ciśnienie górne  $p_{pg}$  i ciśnienie dolne  $p_{pd}$ , następnie określa się prędkość spadku ciśnienia  $dp_p/dt_p$  w przedziale  $\Delta p_p = p_{pg} - p_{pd}$ . W tym przedziale spadek ciśnienia spowodowany jest przeciekiem  $q_{vp}$  sprężonego powietrza przez nieszczelności 4 w instalacji pneumatycznej.

2. Przedział pomiarowy z przepływem kontrolowanym, gdy zawór przełączający 5 jest w pozycji przepływ otwarty. W czasie  $t_k$  mierzy się ciśnienie górne  $p_{kg}$  i ciśnienie dolne  $p_{kd}$ , następnie określa się prędkość spadku ciśnienia  $dp_k/dt_k$  w przedziale  $\Delta p_k = p_{kg} - p_{kd}$ . W tym przedziale spadek ciśnienia spowodowany jest przeciekiem  $q_{vp}$  sprężonego powietrza w instalacji pneumatycznej 4 oraz przepływem kontrolowanym  $q_{vk}$  przez zawór dławiący nastawny 6 do atmosfery. W czasie  $t_k$  mierzy się także przepływ objętościowy  $q_{vk}$  przepływomierzem 7.



Rys. 2. Spadki ciśnienia w dwóch przedziałach pomiarowych

W zastosowanej metodzie pomiaru natężenia przecieku w instalacji pneumatycznej uwzględnia się równania natężeń przepływu dla dwóch wyodrębnionych przedziałów pomiarowych, które według wzoru (2) zapisano następująco:

$$(4) \quad \begin{cases} V_i \frac{dp_p}{p_p dt_p} = q_{vp} \\ V_i \frac{dp_k}{p_k dt_k} = q_{vp} + q_{vk} \end{cases}$$

gdzie:  $q_{vp}$  – teoretyczne natężenie przecieku w instalacji sprężonego powietrza,  $p_{pg}$ ,  $p_{pd}$  – zmierzone wartości ciśnienia górnego i dolnego w czasie  $t_p$ , w zakresie pomiaru bez przepływu kontrolowanego,  $p_{kg}$ ,  $p_{kd}$  – zmierzone wartości ciśnienia górnego i dolnego w czasie  $t_k$ , w zakresie pomiaru z przepływem kontrolowanym,  $q_{vk}$  – mierzone objętościowe natężenie przepływu w czasie  $t_k$ , w zakresie pomiaru z przepływem kontrolowanym,  $V_i$  – objętość kontrolna (zbiornika i instalacji).

Ponieważ przepływ przez nieszczelności w instalacji przemysłowej jest niestabilny (zmienny w czasie), dlatego równania różniczkowe (4) przekształcono za pomocą funkcji logarytmicznych do postaci:

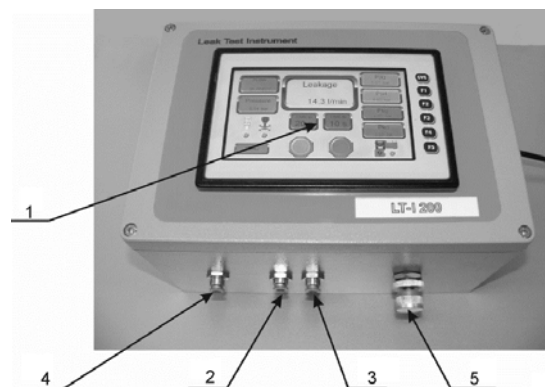
$$(5) \quad \begin{cases} V_i \frac{\ln\left(\frac{p_{pg}}{p_{pd}}\right)}{t_p} = q_{vp} \\ V_i \frac{\ln\left(\frac{p_{kg}}{p_{kd}}\right)}{t_k} = q_{vp} + q_{vk} \end{cases}$$

Po przekształceniu równania (5) i zredukowaniu objętości  $V_i$  otrzymano teoretyczny wzór do obliczania natężenia przecieku (przepływu) objętościowego w instalacji pneumatycznej pośrednią metodą z przepływem kontrolowanym na odgałęzieniu rurociągu, na podstawie pomiaru ciśnienia w dwóch przedziałach czasu:

$$(6) \quad q_{vp} = q_{vk} \frac{\ln\left(\frac{p_{pg}}{p_{pd}}\right) t_k}{\ln\left(\frac{p_{kg}}{p_{kd}}\right) t_p - \ln\left(\frac{p_{pg}}{p_{pd}}\right) t_k}$$

### Budowa demonstracyjnego urządzenia pomiarowego

Widok demonstracyjnego urządzenia pomiarowego zastosowanego do automatycznego pomiaru natężenia przecieku w instalacjach sprężonego powietrza przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Widok demonstracyjnego urządzenia do automatycznego pomiaru natężenia przecieku: 1 – panel dotykowy, 2 – króciec przyłączeniowy do bezpośredniego pomiaru natężenia przecieku, 3 - króciec przyłączeniowy do pośredniego pomiaru natężenia przecieku, 4 - króciec przyłączeniowy do atmosfery, 5 – nastawy zawór dławiący

Demonstracyjne urządzenie pomiarowe przyłącza się na odgałęzieniu rurociągu przesyłowego sprężonego powietrza do rury serwisowej (przyłączeniowej) przez zawór kulowy. Podczas procedury pomiarowej sygnały pomiarowe z przetworników ciśnienia i przepływomierza odbierane są przez system kontrolno-obliczeniowy, a następnie przetwarzane według określonej procedury obliczeniowej, w wyniku której otrzymuje się wartość natężenia przecieku. Dzięki układowi pomiarowemu urządzenia demonstracyjnego można przeprowadzić bezpośredni pomiar przecieku za pomocą przepływomierza i pośredni pomiar natężenia przecieku według zaproponowanej metody. Umożliwia to kalibrację urządzenia pomiarowego i ocenę dokładności pomiaru natężenia przecieku według pośredniej metody pomiaru z przepływem kontrolowanym na odgałęzieniu rurociągu sprężonego powietrza. Na panelu dotykowym urządzenia pomiarowego wprowadzono

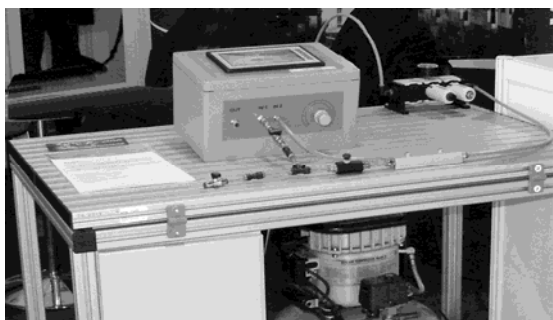
automatyczne funkcje pomiarowe według przyjętej procedury obliczeniowej [5], [6]:

F1 – bezpośredni pomiar natężenia przecieku.

F2 – pomiar ciśnienia,

F3 – pośredni pomiar natężenia przecieku.

Demonstracyjne urządzenie pomiarowe w wersji mobilnej typu LT-I 200, do automatycznego pomiaru natężenia przecieków w instalacji sprężonego powietrza, odznaczone zostało medalem za innowacyjny wyrób na VIII Targach Pneumatyki, Hydrauliki i Sterowań PNEUMATICON'2015, podczas Targów Kielce w dniach 10-12.03.2015. Widok demonstracyjnego urządzenia pomiarowego do testowania na stanowisku targowym pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Widok mobilnego urządzenia pomiarowego LT-I 200 na VIII Targach Pneumatikon'2015

Parametry urządzenia pomiarowego LT-I 200:

- czujnik ciśnienia PE5-PP-GO14 0-10 bar,
- zawór rozdzielający 3/2 NZ G1/2" 24VDC sterowany elektromagnetycznie,
- przepływomierz masowy SONOAIR IP DN15 G1/2" do 200 dcm<sup>3</sup>/min,
- wymiary kompaktowego urządzenia pomiarowego 330x230x180 mm,
- zintegrowany panel dotykowy o rozdzielczości 800x480 px, 32k kolorów, podświetlenie LED, 27 MB pamięci graficznej,
- wbudowane porty komunikacyjne: 2 x Ethernet 10/100 Mbps z obsługą protokołów Modbus TCP Client/Server, EGD, SRTP Slave, WebServer, FTP Server, ICMP (Ping), email, 3 x RS232/485 z obsługą protokołów Modbus RTU Master/Slave, Serial I/O, 2 x CAN pracujący w trybie CANopen lub CsCAN, 2 x USB do programowania oraz obsługi pamięci masowych, slot Micro SD do obsługi kart pamięci przechowywujących receptury, logowane dane procesowe, obsługa opcjonalnych modułów komunikacyjnych do sieci Profibus DP oraz GSM. Wbudowane porty komunikacyjne pozwalają na wymianę danych z innymi urządzeniami automatyki oraz na obsługę dodatkowych modułów I/O. Moduły rozszerzeń mogą być podłączone do urządzenia w sposób lokalny lub oddalony, a wymiana danych pomiędzy sterownikiem a układem I/O może odbywać się w sieci szeregowej, CsCAN lub Ethernet,
- zasilanie 230 V AC (24-30 VDC).

Urządzenie pomiarowe współpracuje z oprogramowaniem LabView na komputerze PC.

#### Przykładowe wyniki pomiaru

Widok demonstracyjnego mobilnego urządzenia pomiarowego LT-I 200, podłączonego do instalacji pneumatycznej podczas przeprowadzania pomiarów testowych, przedstawiono rysunek 5.

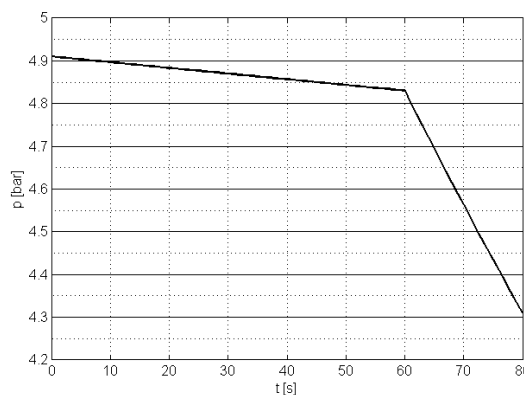
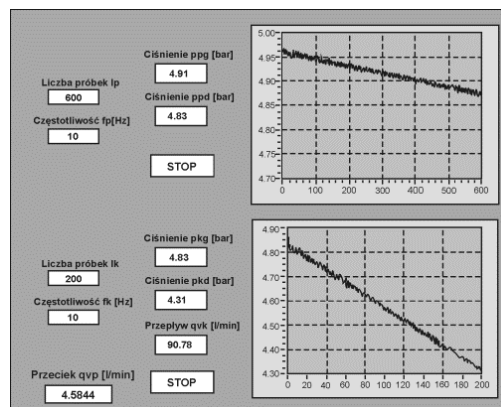


Rys. 5. Widok urządzenia pomiarowego LT-I 200 podczas jego testowania w instalacji sprężonego powietrza

Po przeprowadzeniu testów pomiarowych wprowadzono do wzoru teoretycznego (6) współczynniki poprawkowe:  $K_K$  – współczynniki kalibracji zależny od zakresu pomiaru,  $K_T$  – współczynnik korekcyjny zależny od temperatury pomiaru w instalacji pneumatycznej:

$$(7) \quad K_T = \frac{T_i}{T_N}$$

gdzie:  $T_i$  – temperatura w rurociągu odnotowana podczas pomiaru,  $T_N$  – temperatura znormalizowana w warunkach odniesienia ANR.



Rys. 6. Panel LabView przedstawiający wyniki i wykresy pomiaru

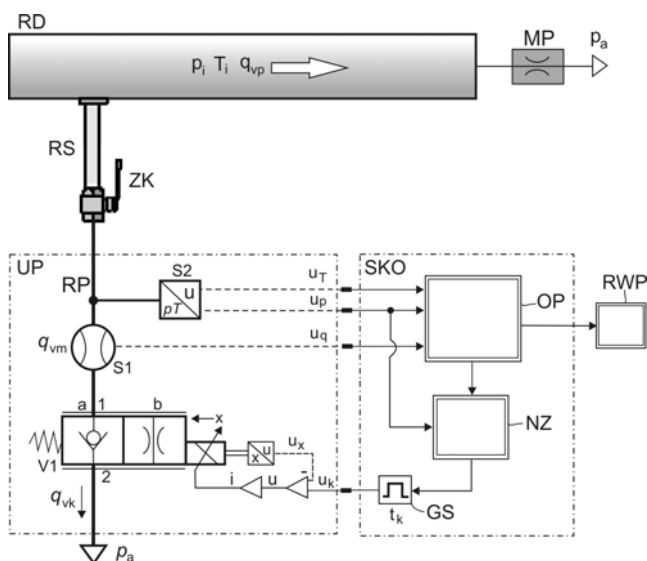
Skorygowany wzór do obliczania natężenia przecieku w instalacji sprężonego powietrza metodą pośrednią z

przepływem kontrolowanym na odgałęzieniu rurociągu ma postać:

$$(8) \quad q_{vpk} = K_K K_T q_{vk} \frac{\ln\left(\frac{P_{pg}}{P_{pd}}\right) t_k}{\ln\left(\frac{P_{kg}}{P_{kd}}\right) t_p - \ln\left(\frac{P_{pg}}{P_{pd}}\right) t_k}$$

Widok panelu operatorskiego LabView z wynikami pomiaru i wykresem przykładowego pomiaru natężenia przecieku w instalacji sprężonego powietrza przedstawiono na rysunku 6. Na panelu LabView widoczne są rejestrowane wyniki pomiaru: górne i dolne wartości ciśnienia w dwóch przedziałach czasu oraz przepływ objętościowy. Dla pierwszego przedziału pomiarowego bez przepływu kontrolowanego ustalono: częstotliwość próbkowania  $f_p = 10$  Hz, liczbę próbek do odczytu  $l_p = 600$ , na tej podstawie ustalono czas pomiaru  $t_p = l_p/f_p = 600/10 = 60$  s. Dla drugiego przedziału pomiarowego z przepływem kontrolowanym ustalono: częstotliwość próbkowania  $f_k = 10$  Hz, liczbę próbek do odczytu  $l_k = 200$ , na tej podstawie ustalono czas pomiaru  $t_k = l_k/f_k = 200/10 = 20$  s.

Zaawansowany układ pomiarowy urządzenia do automatycznego pomiaru natężenia przecieku jest przedmiotem zgłoszenia patentowego A1 417036/2016 pt. "Urządzenie do automatycznego pomiaru natężenia przecieku w rurociągach przesyłowych gazu, zwłaszcza sprężonego powietrza", którego schemat zamieszczono na rysunku 7.



Rys. 7. Schemat zaawansowanego układu pomiarowego urządzenia do automatycznego pomiaru natężenia przecieku

Oznaczenia na rysunku 7: RD – rura dystrybucyjna, RS – rura serwisowa, MP – miejsce przecieku, ZK – zawór kulowy, RP – rura pomiarowa, UP – układ pomiarowy, SKO – system kontrolno-obliczeniowy, OP – blok obliczeniowy przecieków, NZ – blok nastawy zaworu, GS – generator sygnału sterującego zaworem, MRP – moduł rejestracji pomiarów, S1 – przepływomierz, S2 – przetwornik pomiarowy ciśnienia i temperatury, V1 – regulowany zawór dławiąco – odcinający.

## Podsumowanie

Innowacyjność urządzenia pomiarowego polega na automatycznym pomiarze natężenia przecieku z kontrolowanym przepływem na odgałęzieniu rurociągu instalacji pneumatycznej. Nowa pośrednia metoda pomiaru przecieku nie wymaga, w odróżnieniu od powszechnie stosowanych metod pośrednich, znajomości parametrów sprężarki i zbiornika. Wykonane urządzenie testowe do automatycznego pomiaru natężenia przecieku w instalacjach sprężonego powietrza umożliwi przeprowadzenie pomiaru przecieku w dowolnym czasie i w dowolnym miejscu instalacji sprężonego powietrza. Zastosowanie tego urządzenia zmniejszy koszty pomiaru natężenia przecieku w instalacji sprężonego powietrza, ponieważ niewymagany jest demontaż lub przeróbka rurociągu. Wystarczy podłączyć urządzenie pomiarowe w dowolnym miejscu instalacji pneumatycznej przez zawór kulowy lub w dowolnym punkcie poboru sprężonego powietrza. Urządzenie pomiarowe w postaci demonstracyjnej jest obecnie testowane w audytach energetycznych sprężonego powietrza przez specjalistyczną firmę. Natomiast zgłoszenie patentowe jest wykorzystywane do projektu badawczego w poddziałaniu 4.1.2 „Regionalne Agendy Naukowo-Badawcze” w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjnej Rozwój (POIR).

„Mobilne demonstracyjne urządzenie pomiarowe” zrealizowano w ramach projektu „Perspektywy RSI Świętokrzyskie” – IV etap, Zadanie 5: Kreowanie nowych form współpracy nauki z biznesem, Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki (POKL) współfinansowanego z Europejskiego Funduszu Społecznego (EFS).

**Autorzy:** prof. dr hab. inż. Ryszard Dindorf, dr inż. Piotr Woś, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Zakład Urządzeń Mechatronicznych, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: [dindorf@tu.kielce.pl](mailto:dindorf@tu.kielce.pl); [wosi@tu.kielce.pl](mailto:wosi@tu.kielce.pl).

## LITERATURA

- [1] Dindorf R., Mazur S., Woś P.: Nowe metody pomiaru przecieku w systemach sprężonego powietrza. Pomiary Automatyka Kontrola, nr 6, 2013.
- [2] Dindorf R., Woś P.: Metoda pośrednia pomiaru przecieku w instalacji sprężonego powietrza. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, nr 38, 2014.
- [3] Dindorf R., Woś P.: Indirect method of leakage flow rate measurement in compressed air pipelines. Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications Inc. Switzerland, Vol.630, 2014.
- [4] Dindorf R., Woś P.: Przetworniki i układu pomiarowe w systemach hydraulicznych i pneumatycznych. Monografie, Studia, Rozprawy M63. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2014.
- [5] Dindorf R., Woś P.: Mobilne urządzenie do automatycznego pomiaru natężenia przecieku w instalacjach sprężonego powietrza. Hydraulika i Pneumatyka, nr 4, 2015.
- [6] Dindorf R., Woś P.: Demonstracyjne urządzenie do automatycznego pomiaru natężenia przecieku w instalacji sprężonego powietrza. SP'2016 - XI Konferencja Naukowa „Systemy pomiarowe w badaniach naukowych i w przemyśle”. Łągow, 12-15 czerwca 2016.