

Szymon SALAMON

ZASTOSOWANIE PRZEPŁYWOMIERZA DO POMIARU PRZECIEKU CZYNNIKA ROBOCZEGO W ELEMENTACH PNEUMATYCZNYCH

Aplication of flow meter to measuring of working medium tightness in pneumatics elements

Wstęp

Występowanie nieszczelności w elementach układów pneumatycznych może być powodowane niedokładnością wykonania i montażu, starzeniem itp. Przyczyny te prowadzą do powstania szczelin o bliżej nieokreślonym kształcie i powierzchni, przez które następuje przepływ medium roboczego. Przepływ ten może zachodzić zarówno między komorami elementu pneumatycznego, co jest nazwane nieszczelnością wewnętrzną, jak i na zewnątrz elementu do atmosfery, co jest nazwane nieszczelnością zewnętrzną.

Badanie szczelności różnych elementów pneumatyki jest częstym wymaganiem stawianym przez procedury kontrolno-odbiorcze podczas wytwarzania, a później również w eksploatacji.

Badanie szczelności powinno umożliwiać sklasyfikowanie konkretnego obiektu jako szczelny lub nieszczelny (klasyfikacja alternatywna). Parametrem klasyfikacyjnym powinna być sumaryczna wartość dopuszczalnego przecieku, niezależnie od tego, czy przeciek występuje w jednym, czy w kilku miejscach. Badania szczelności różnych obiektów technicznych wykonuje się, wykorzystując, stosownie do potrzeb, wiele metod pomiaru przecieku, które obszernie przedstawiono w pracach [2, 3].

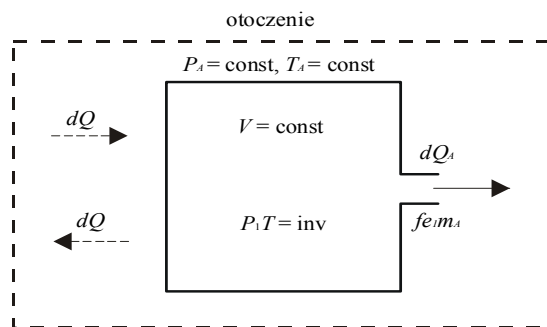
Uproszczony matematyczny model zjawiska nieszczelności

Nieszczelność można określać spadkiem ciśnienia $p(t)$ w obiekcie lub masowym natężeniem przepływu $G(t)$ przez szczelinę. Wyznaczenie jednej z tych

wielkości umożliwia sklasyfikowanie elementu pneumatycznego jako szczelnego lub nieszczelnego, w zależności od założonej nieszczelności granicznej [1].

Rzeczywisty proces opróżniania komory, którą stanowi obserwowany element, zachodzi z wymianą ciepła pomiędzy powietrzem wypełniającym komorę a otoczeniem z różną intensywnością w zależności od warunków określonych: izolacją i chłodzeniem obiektu, czasem trwania tego procesu, co wpływa w sposób zasadniczy na charakter tego procesu.

Ilościowe ujęcie problemu nieszczelności wymaga przyjęcia modelu, jakim jest komora o stałej objętości V i szczelinie o efektywnej powierzchni f_e (rys. 1).



Rys. 1. Model procesu opróżniania komory o stałej objętości

W chwili napełnienia komory powietrzem z magistrali w komorze panują warunki charakteryzowane ciśnieniem p i temperaturą T . Wraz z powietrzem wypływającym przez szczelinę odpływa z komory pewna ilość ciepła dQ_A , a ponadto wskutek różnicy temperatur między otoczeniem a wnętrzem komory jest możliwy dopływ lub odpływ ciepła dQ .

W niżej przedstawionym opisie matematycznym procesu nieszczelności powietrze jest traktowane jako gaz idealny. Ogólnie można zatem zapisać:

$$dU + dQ_A \pm dQ = 0 \quad (1)$$

gdzie:

dU – zmiana energii wewnętrznej,

dalej:

$$mdu + udm + i_A dm_A \pm dQ = 0$$

ponieważ

$$i = c_p T, u = c_v T$$

to

$$c_v mdT + c_v T dm + c_p T dm_A \pm dQ = 0 \quad (2)$$

Różniczkując równanie stanu gazu dla $V = \text{const}$

$$pV = mRT$$

otrzymuje się

$$\frac{V dp}{R} - T dm = m dT,$$

po czym równanie (2) przyjmuje postać:

$$c_V \left[\frac{V dp}{R} - T dm \right] + c_V T dm + c_p T dm_A \pm dQ = 0 \quad (3)$$

Uwzględniając zależności:

$$k = \frac{c_p}{c_V}, \quad c_p = \frac{k}{k-1} R, \quad c_V = \frac{k}{k-1} R,$$

oraz dokonując niezbędnych przekształceń, równanie (3) przyjmuje następującą postać:

$$-kRT dm_A \pm (k+1)dQ = V dp \quad (4)$$

Ponieważ proces opróżniania komory o stałej objętości przebiega przy zmiennym ciśnieniu panującym w komorze, to wypływ powietrza z komory do atmosfery może przebiegać w warunkach nadkrytycznych lub podkrytycznych.

W początkowej fazie, kiedy stosunek ciśnień $\varepsilon = \frac{p_A}{p}$, jest mniejszy od

$\varepsilon = 0,5282$, przepływ traktować można jako nadkrytyczny i wówczas wartość przepływu ma postać:

$$dm_A = m_A dt = f_e B p \sqrt{\frac{1}{RT}} dt$$

gdzie:

p, T – chwilowe ciśnienie i temperatura powietrza w komorze,

$$B = \sqrt{\frac{2k}{k-1}} \left[\frac{2}{k+1} \right]^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{k-1}{k+1}},$$

przy czym w skończonych przedziałach czasu Δt można przyjąć stałą wartość przepływu.

Ponieważ

$$dQ = \alpha F (T - T_S) dt$$

gdzie:

α – współczynnik przenikalności ciepła,

F – powierzchnia wymiany ciepła,

$T - T_S$ – temperatura powietrza w komorze i temperatura ścianek, przez które przepływa strumień ciepła,

to wyrażenie (4) przyjmuje następującą postać:

$$-kf_e Bp \sqrt{RT} dt \pm (k+1) \alpha F (T - T_s) dt = Vdp(5)$$

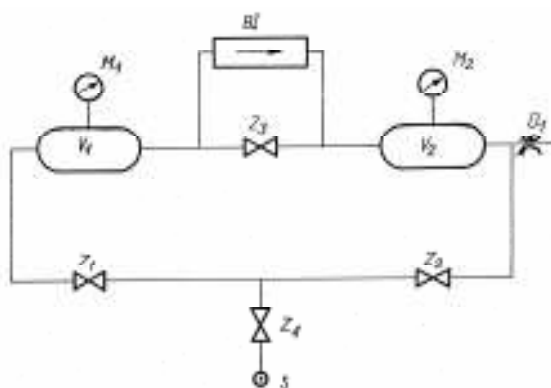
Równanie (5) określa zależność ciśnienia w opróżnionej komorze w funkcji czasu jej opróżniania.

Opis postaci konstrukcyjnej stanowiska badawczego

Badanie możliwości zastosowania przepływomierza firmy Brook's Instrument, przeprowadzono na stanowisku badawczym, składającym się z następujących układów [4]:

- układu pneumatycznego z przepływomierzem firmy Brook's Instrument,
- układu elektrycznego z zasilaczem prądowym, woltomierzem cyfrowym i rejestratorem XY,
- stołu laboratoryjnego umożliwiającego zamocowanie elementów tego stanowiska,
- źródła sprężonego powietrza z blokiem jego przygotowania.

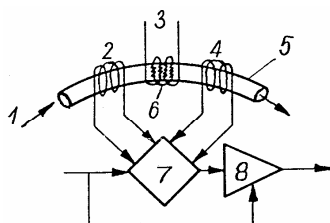
Przepływomierz został zastosowany w pneumatycznym układzie pomiarowym do badania szczelności, którego schemat przedstawiono na rys. 2. Układ pomiarowy zbudowano z następujących elementów składowych: zbiorników ciśnieniowych: V_1 i V_2 , zaworów odcinających: Z_1 , Z_2 i Z_3 , zaworu dławiącego D , manometrów: M_1 i M_2 oraz przepływomierza firmy Brook's Instrument. Układ ten był zaopatrywany w sprężone powietrze ze sprężarki S poprzez blok przygotowania powietrza.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego do badania szczelności z zastosowaniem przepływomierza firmy Brook's Instrument

W układzie zastosowano termiczny przepływomierz gazu holenderskiej firmy Brook's Instrument model 5850. Jego schemat funkcjonalny przedstawiono na rys. 3. Zasada jego działania jest następująca: umieszczona spirala grzew-

cza (6) w rurze sensorowej (5) zasilana jest z układu mocy (3), wytwarzając ciepło, które ogrzewa przepływający przez rurę sensorową gaz. Na tej samej rurze (5) umieszczone są w jednakowych odległościach od spirali grzewczej (6) oporowe czujniki temperatury na wlotowej (2) i wylotowej (4) stronie. Jeżeli w rurze (5) nie ma przepływu gazu, to czujniki oporowe (2) i (4) otrzymują jednakową ilość ciepła, opór czujników jest ten sam, zatem mostek elektryczny (7) pozostaje w równowadze. Przepływ gazu w rurze (5) powoduje wzrost temperatury czujnika oporowego (2), a tym samym odpowiednią zmianę oporności czujnika (4). Zmiany te powodują zachwianie równowagi mostka, co daje sygnał elektryczny proporcjonalny do wielkości przepływu gazu. Sygnał ten trafia do wzmacniacza (8), a stąd do rejestratora cyfrowego.



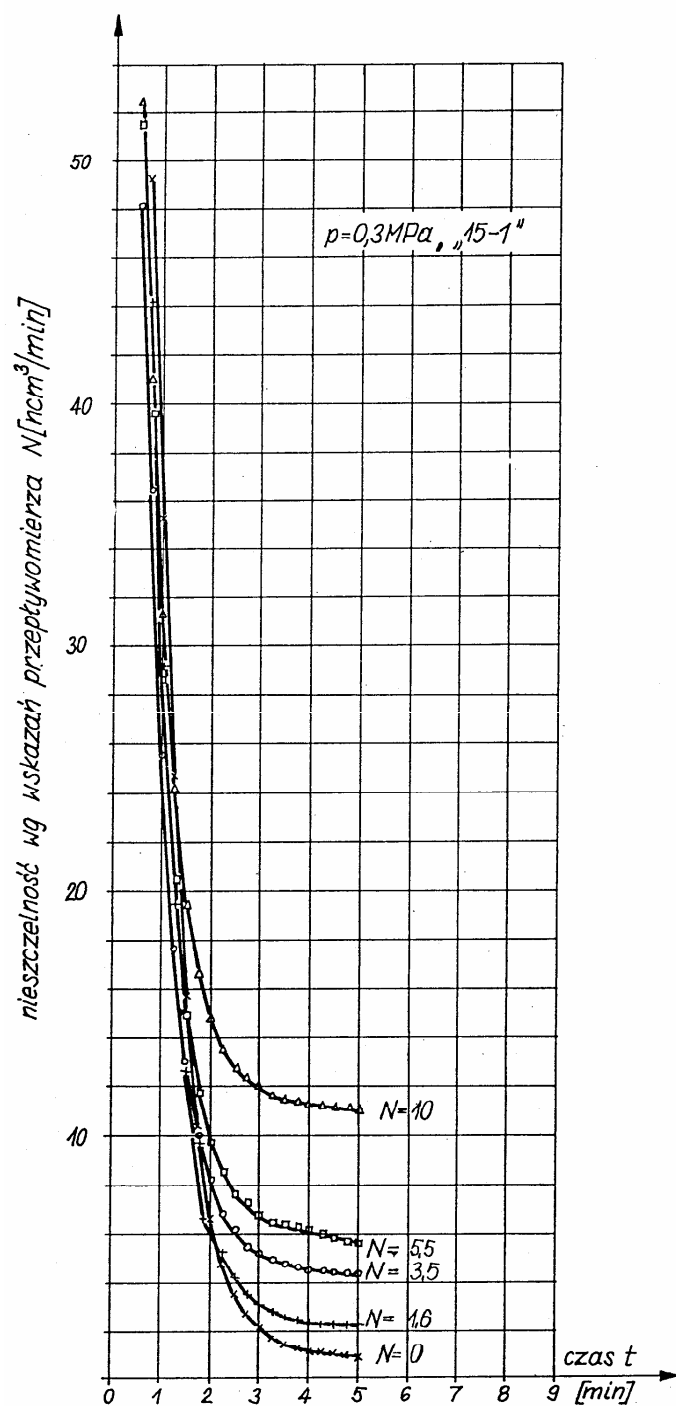
Rys. 3. Schemat funkcjonalny przepływomierza firmy Brook's Instrument: 1 – przepływ, 2 – czujnik temperaturowy po stronie wlotowej, 3 – zasilanie, 4 – czujnik temperaturowy po stronie wylotowej, 5 – rura, 6 – spirala grzewcza, 7 – mostek elektryczny, 8 – wzmacniacz

Dane techniczne termicznego przepływomierza gazu firmy Brook's Instrument są następujące:

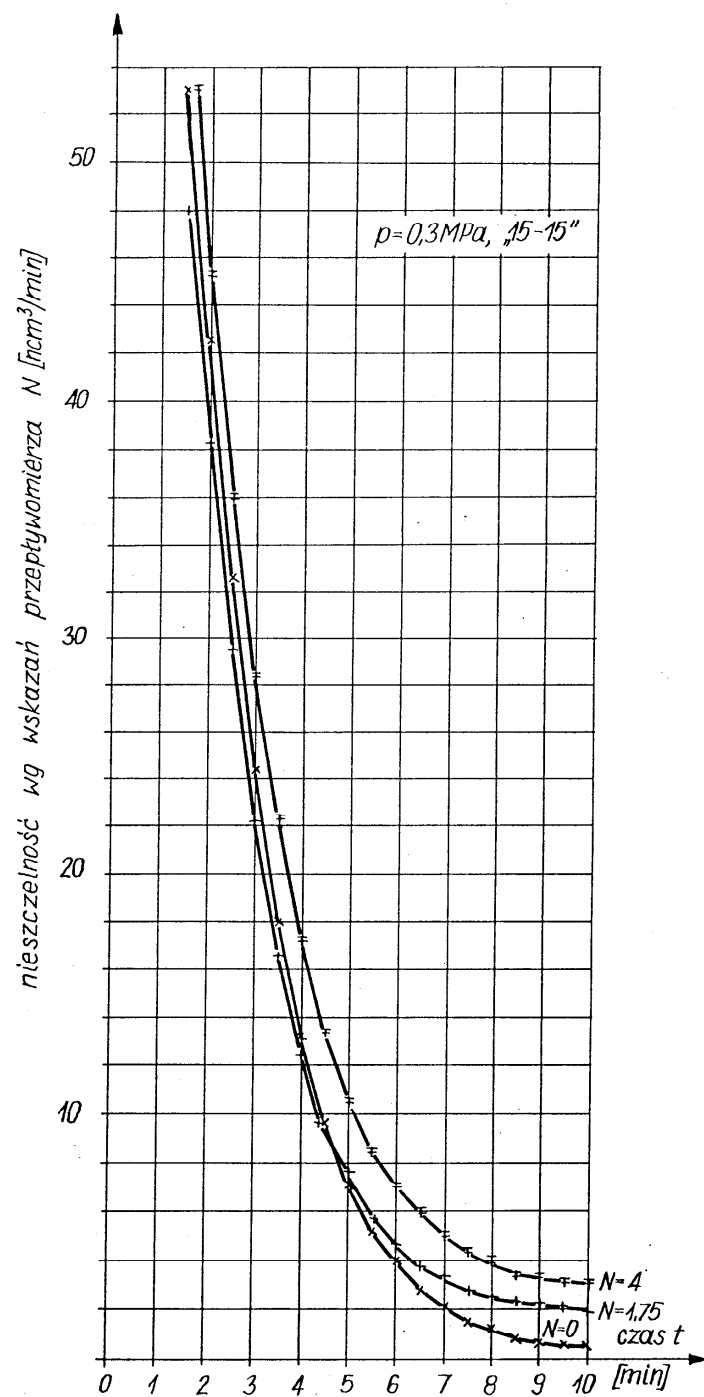
- dokładność: $\pm 1\%$ pełnej skali z uwzględnieniem liniowości warunków kalibracji,
- powtarzalność: $\pm 0,25\%$ wartości nominalnej,
- zakres: 50 do 1,
- czas reakcji: standardowo mniej niż 3 sekundy do 2% pełnej skali wartości końcowej (sygnał przepływu i wyjścia) dla zmiany sygnału do 0 od 100%.

Wyniki pomiarów przecieków za pomocą przepływomierza

Pomiary nieszczelności w układzie pomiarowym z wykorzystaniem przepływomierza firmy Brook's Instrument, przeprowadzono zgodnie z metodyką badań opisaną w [4], dokonując zmian czynników mogących mieć wpływ na rezultat pomiarów, takich jak: ciśnienie robocze, nieszczelność, konfiguracja i pojemność układu pomiarowego.



Rys. 4. Nieszczelność wg wskazań przepływomierza dla ciśnienia 0,3 MPa i układu pomiarowego „15-1”



Rys. 5. Nieszczelność wg wskazań przepływomierza dla ciśnienia 0,3 MPa i dla układu pomiarowego „15-15”

Wyniki badań przedstawiono na rys. 4 i 5, jako zależności funkcyjne $N = f(t)$, przy czym: N oznacza wartość nieszczelności zmierzonej przepływomierzem firmy Brook's Instrument, wyrażonej w cm^3/min , zaś t oznacza czas pomiaru wyrażony w sekundach.

W trakcie badań przeprowadzono wiele serii pomiarów nieszczelności, mających charakter pomiarów pomocniczych (rozpoznawczych) i zasadniczych (weryfikujących), w niniejszej pracy prezentowane są fragmenty tych badań.

W układzie pomiarowym, zestawiano pary zbiorników ciśnieniowych, o pojemnościach $V_1 = 15 \text{ dm}^3$ i $V_2 = 1 \text{ dm}^3$ oraz $V_1 = 15 \text{ dm}^3$ i $V_2 = 15 \text{ dm}^3$.

Na rys. 4, przykładowo, przedstawiono wyniki pomiarów nieszczelności w funkcji czasu dla układu pomiarowego ze zbiornikami ciśnieniowymi $V_1 = 15 \text{ dm}^3$ i $V_2 = 1 \text{ dm}^3$, przy ciśnieniu roboczym $p = 0,3 \text{ MPa}$ i nieszczelnościach $N = 0; 1,6; 3,5; 5,5; 10 \text{ cm}^3/\text{min}$.

Analiza funkcji $N = f(t)$ przedstawionych w [4] oraz przykładowo na rys. 4 pozwala sformułować następujące wnioski:

- przy konfiguracji i pojemności układu pomiarowego „15-1” (tj. pojemnościach zbiorników $V_1 = 15 \text{ dm}^3$ i $V_2 = 1 \text{ dm}^3$) czas oczekiwania na prawidłowe wskazania przepływomierza i rozdzielczość pomiarów nieszczelności ustalił się pomiędzy 2. a 3. Minutą,

- na długość tego czasu nie ma istotnego wpływu ciśnienie i wartość nieszczelności, co zostało potwierdzone badaniami statystycznymi na poziomie ufności $\alpha = 0,05$.

Na rys. 5 przedstawiono wyniki pomiarów nieszczelności w funkcji czasu dla układu pomiarowego ze zbiornikami ciśnieniowymi $V_1 = 15 \text{ dm}^3$ i $V_2 = 1 \text{ dm}^3$, przy ciśnieniu roboczym $p = 0,3 \text{ MPa}$ i nieszczelnościach $N = 0; 1,75; 4 \text{ cm}^3/\text{min}$.

Analiza funkcji $N = f(t)$ przedstawionych w [4] i na rys. 5 pozwala sformułować następujące wnioski:

- przy konfiguracji i pojemności układu pomiarowego „15-15” (tj. pojemnościach zbiorników $V_1 = 15 \text{ dm}^3$ i $V_2 = 1 \text{ dm}^3$) czas oczekiwania na prawidłowe wskazania przepływomierza i rozdzielczość pomiarów nieszczelności umiejscowił się w przedziale pomiędzy 5. a 6. minutą,

- na długość tego czasu (również w tym przypadku) nie ma istotnego wpływu ciśnienie robocze i wartość nieszczelności, co zostało potwierdzone badaniami statystycznymi na poziomie ufności $\alpha = 0,05$.

Piśmiennictwo

1. Salamon S. i in.: Badania szczelności elementów pneumatyki hamulcowej. Zag. Ekspl. Maszyn PAN, 4/1992.
2. Salamon S., Żółtowski B.: Concept of the direct comparison method in tightness investigations. COMADEM'97, Helsinki 1997.
3. Salamon S., Żółtowski B.: Tightness test of pneumatics element of brake system. Acta Polytechnica. Journal of Advanced Engineering Design. Special Issue. 40, 4/2000.

4. Salamon S.: Badanie możliwości zastosowania komory Brooksa w urządzeniach do pomiaru nieszczelności. Materiały Konferencyjne IX Kongresu Eksploatacji Urządzeń Technicznych, Radom – Krynica 2001.

Streszczenie

Badanie szczelności, polegające na konieczności pomiaru dopuszczalnego sumarycznego przecieku czynnika roboczego, implikuje problemy o znacznej skali trudności. Pojawiają się one zwłaszcza przy masowym wytwarzaniu tych elementów i wynikającej stąd potrzebie maksymalnego skracania czasu tego pomiaru. Teoretyczne ujęcie zjawiska przecieku czynnika roboczego z konstrukcyjnie zamkniętej przestrzeni roboczej nie stwarza możliwości praktycznego rozwiązania tego problemu. Z tych przyczyn podjęto badania nad wykorzystaniem do pomiaru przecieku przepływomierza. W prezentowanych badaniach szczelności, zastosowano przepływomierz, którego zasada działania wykorzystuje ideę komory Brooksa.

Summary

The measurement of leaks (untightness) in pneumatic elements presents a lot of problems connected with the stabilization of conditions in which such measurement takes place, as well as the reduction of time it takes to carry it out. The latter problem is very significant in the case of leak gauging activities in industrial conditions. It is required to reduce the measurement time down to the necessary minimum. This can be achieved, among other things, through applying, for instance, the Books Instrument's flow meter.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Eugeniusz Krasowski