

Pomiar składowej zmiennej pulsującego ciśnienia powietrza

Radosław Werszko

Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Tribologii (W10/K7), ul. Łukasiewicza 7/9, 50-371 Wrocław

Krzysztof Tomczuk

Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Katedra Inżynierii Kriogenicznej, Lotniczej i Procesowej (W9/K1), Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

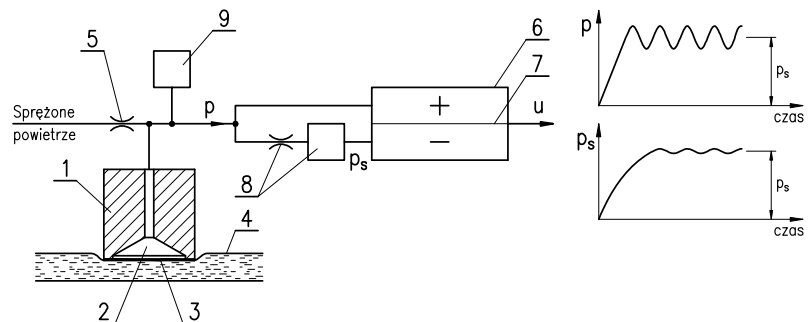
Streszczenie: Przedstawiono przypadek pomiaru składowej zmiennej, której amplituda jest wielokrotnie mniejsza od składowej stałej pulsującego ciśnienia, a częstotliwość jest zawarta w granicach 0,1–2 Hz. Do pomiaru użyto handlowego przetwornika różnicy ciśnień, którego jedno z wejść połączono z pneumatycznym filtrem dolnoprzepustowym. Projekt tego filtra oparto na zaproponowanym modelu układu pomiarowego. Jego weryfikację przeprowadzono na stanowisku pomiarowym, będącym częścią układu do bezinwazyjnego pomiaru średniej wartości ciśnienia krwi.

Słowa kluczowe: średnia wartość ciśnienia krwi, pomiar metodą oscylometryczną, pneumatyczny filtr dolnoprzepustowy, pneumatyczny człon inercyjny pierwszego rzędu, obliczanie filtra pneumatycznego, dotykowy czujnik ciśnienia krwi

1. Wprowadzenie

Problem pomiaru składowej zmiennej pulsującego ciśnienia powietrza pojawił się podczas opracowywania przez autorów tzw. dotykowego czujnika średniej wartości ciśnienia krwi w pojedynczej tętnicy. Ma on postać walca 1 (rys. 1) ze stożkową komorą pomiarową 2, szczelnie przykrytą membraną 3, na którą, przez spłaszczoną ścianę tętnicy 4 i skórę, działa ciśnienie krwi. Natomiast na drugą stronę tej membrany wywiera nacisk sprężone powietrze o ciśnieniu zmieniającym się liniowo, od zadanej wartości początkowej do zera.

Pomiar średniej wartości (składowej stałej) ciśnienia krwi tym czujnikiem odbywa się metodą oscylometryczną. Można ją streścić następująco – jeżeli na elastyczną membranę z jednej jej strony działa pulsujące ciśnienie o stałej amplitudzie, to wahania tej membrany osiągną maksymalną amplitudę tylko w przy-



Rys. 1. Schemat układu do pomiaru średniej wartości ciśnienia krwi: 1 – korpus czujnika, 2 – komora pomiarowa, 3 – membrana, 4 – tętnica, 5 – dławik pneumatyczny, 6 – przetwornik pomiarowy różnicy ciśnień, 7 – membrana przetwornika, 8 – filtr dolnoprzepustowy, 9 – przetwornik pomiarowy (50 kPa), p – ciśnienie pulsujące, p_s – składowa stała pulsującego ciśnienia, u – napięcie wyjściowe przetwornika

Fig. 1. Diagram of the system for mean value of blood pressure measurement: 1 – sensor's case, 2 – measuring chamber, 3 – membrane, 4 – artery, 5 – pressure restrictor, 6 – differential pressure transducer, 7 – transducer's membrane, 8 – low-pass filter, 9 – pressure transducer (50 kPa), p – pulsating pressure, p_s – constant component of the pulsating pressure, u – transducer output voltage

padku, gdy wartość ciśnienia po drugiej stronie tej membrany zrówna się ze średnią wartością pulsującego ciśnienia [5, 7].

W przypadku rozpatrywanego czujnika (rys. 1), wahania jego membrany 3 wywołują sprężanie i rozprężanie zawartego w komorze pomiarowej 2 powietrza, którego ciśnienie w postaci oscylacji jest przekazywane do przetwornika różnicy ciśnień 6, wyposażonego w filtr dolnoprzepustowy 8.

Do komory górnej tego przetwornika, oznaczonej symbolem „+”, doprowadzane jest ciśnienie pulsujące p , a do dolnej, oznaczonej symbolem „-”, tylko składowa stała p_s tego ciśnienia. Ponieważ składowe stałe po obydwu stronach membrany 7 są takie same, na membranę przetwornika oddziałuje tylko skła-

Autor korespondujący:

Krzysztof Tomczuk, krzysztof.tomczuk@pwr.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 03.12.2018 r., przyjęty do druku 28.12.2018 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

dowa zmienna p_z . Wartość ciśnienia wyjściowego p czujnika 1, mierzona przetwornikiem pomiarowym 9, przy której wystąpiła maksymalna amplituda składowej zmiennej p_z , zmierzona przetwornikiem różnicy ciśnień 6, jest traktowana jako średnia wartość mierzonego ciśnienia krwi.

Dzięki zastosowanej konstrukcji, zakres pomiarowy przetwornika może być dostosowany tylko do składowej zmiennej, a zmiany składowej stałej mają znikomy wpływ na dokładność pomiaru. Jednak ze względu na niedoskonałość filtru, w komorze dolnej pojawia się, oprócz składowej stałej, także pozostałość składowej zmiennej o niewielkiej amplitudzie i o innej fazie niż składowa zmienna w komorze górnej. Ta pozostałość zmienia w pewnym stopniu zarówno amplitudę, jak i fazę mierzonej składowej zmiennej p_z , co w konsekwencji zmniejsza dokładność pomiaru średniej wartości ciśnienia krwi. Aby zbadać, jaki wpływ na tę dokładność ma wartość stałej czasowej filtru dolnoprzepustowego T i częstotliwość f pulsacji, opracowano model układu pomiarowego.

2. Model układu pomiarowego

W rozważaniach przyjęto, że składowa zmienna ma postać sinusoidy, a filtr dolnoprzepustowy opisany jest liniowym równaniem różniczkowym I-go rzędu. W takim przypadku przebieg ciśnienia p oraz ciśnienia za filtrem p_f są opisywane równaniami:

$$p = p_s + a \sin(360ft), \tag{1}$$

$$p_f = p_s + b \sin(360ft - \varphi), \tag{2}$$

gdzie:

- p_s – wartość składowej stałej, Pa,
- a i f – amplituda i częstotliwość składowej zmiennej, Pa i Hz,
- t – czas, s,

$$b = \frac{a}{\sqrt{(2\pi fT)^2 + 1}} \text{ – współczynnik tłumienia,}$$

$\varphi = \arctg(-2\pi fT)$ – przesunięcie fazowe sygnału na wyjściu filtru [°],

T – stała czasowa filtru, s.

Odejmując stronami równania (1) i (2) oraz dzieląc je przez amplitudę a otrzymuje się równanie względnego sygnału na wyjściu przetwornika p_z :

$$p_z = \frac{p - p_f}{a} = p' - p'', \tag{3}$$

gdzie:

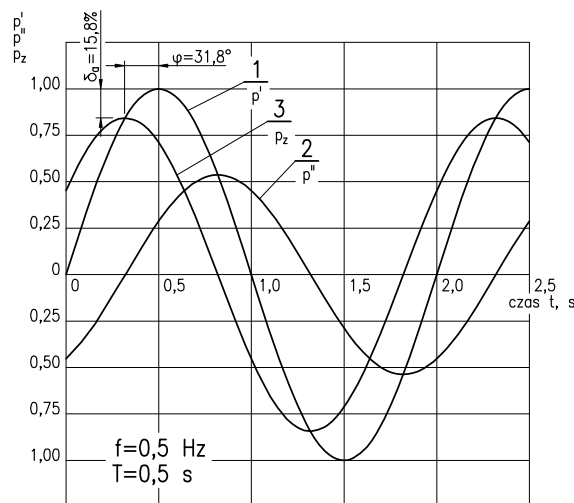
$$p' = \sin 360 ft,$$

$$p'' = \frac{1}{\sqrt{(2\pi fT)^2 + 1}} \sin(360ft - \arctg 2\pi fT).$$

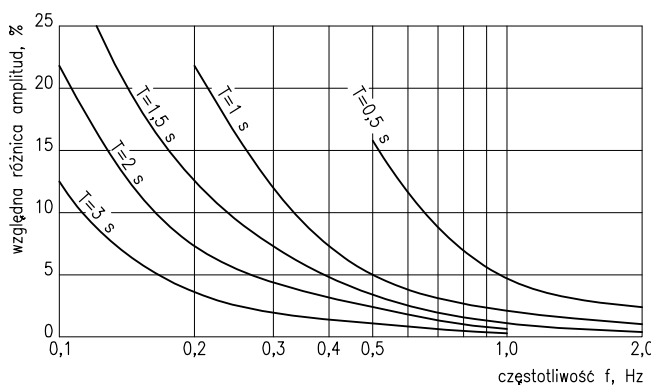
Przebieg ciśnienia p_z zależy od częstotliwości składowej zmiennej f i stałej czasowej filtru T . Na rysunku 2 pokazano przykładowe przebiegi opisane równaniem (3) i jego dwoma składowymi p' i p'' .

Jak wynika z rysunku 2, składowa zmienna p_z ma mniejszą amplitudę i jest opóźniona w stosunku do przebiegu p' . Aby zilustrować wpływ wielkości f i T na różnicę między przebiegiem zmierzonym p_z i przebiegiem składowej zmiennej p' wyznaczono zależności względną różnicy amplitud w funkcji częstotliwości, które ułatwiają projektowanie filtru.

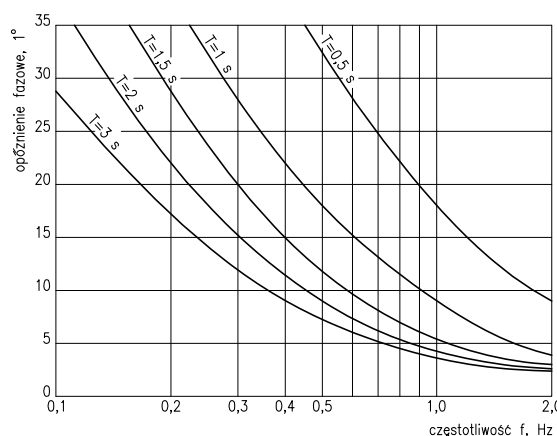
Na rysunku 3 pokazano, wyrażone w procentach, różnice między amplitudami przebiegów p' i p_z :



Rys. 2. Przykładowe przebiegi opisane równaniem (3) i jego składowymi: 1 – składowa zmienna p' , 2 – „pozostałość” p'' , 3 – przebieg wyjściowy p_z
Fig. 2. Exemplary waveforms described by equation (3) and its components



Rys. 3. Względne różnice amplitud δ_a w zależności od częstotliwości f i stałej czasowej T
Fig. 3. Relative differences in amplitude δ_a depending on the frequency f and a time constant T



Rys. 4. Opóźnienie fazowe φ w zależności od częstotliwości f i stałej czasowej T
Fig. 4. Phase delay φ depending on frequency f and time constant T

$$\delta_a = \frac{p' - p_z}{p'} \cdot 100\%. \tag{4}$$

Natomiast na rysunku 4 przedstawiono opóźnienie fazowe φ przebiegu p_z względem p' , przy różnych wartościach częstotliwości f i stałej czasowej T .

Przyjmując różnicę amplitud δ_a lub opóźnienie fazowe φ jako miarę dokładności pomiaru można, na podstawie rysunku 4 i dla składowej zmiennej o znanej częstotliwości f , określić stałą czasową filtra T posługując się jednym z przytoczonych wykresów. Jeżeli mierzona składowa ma przebieg poliharmoniczny, to przy wyborze filtra bierze się pod uwagę tylko pierwszą (podstawową) harmoniczną. Wyższe harmoniczne nie wpływają w stopniu istotnym na błędy pomiarowe.

3. Projekt i badanie filtra dolnoprzepustowego

Jako filtr dolnoprzepustowy posłużył pneumatyczny człon inercyjny pierwszego rzędu, złożony z kapilary 1 (rys. 5) o oporności pneumatycznej R i komory 2 o pojemności pneumatycznej C . Projekt polega na takim doborze wartości R i C , aby uzyskać żadaną wartość stałej czasowej T , gdzie:

$$T = R \cdot C. \quad (5)$$

W oparciu o analogię elektro-pneumatyczną wprowadzono wzory do obliczania wielkości R i C [1, 4]:

$$R = \frac{\Delta p}{q} = \frac{2B\eta l}{\pi \rho d^4}, \quad (6)$$

$$C = \frac{q}{dp/dt} = \frac{V}{nR_g T_g}, \quad (7)$$

gdzie:

R – oporność pneumatyczna kapilary, 1/(ms),

C – pojemność pneumatyczna komory, ms²,

Δp – spadek ciśnienia na kapilarze, kg/(ms²),

q – masowy strumień powietrza, kg/s,

l i d – długość i średnica wewnętrzna kapilary, m,

η – dynamiczny współczynnik lepkości powietrza, Ns/m² lub kg/(ms),

ρ – gęstość powietrza za kapilarą, kg/m³,

B – bezwymiarowy współczynnik korekcyjny (rys. 6),

dp/dt – szybkość zmian ciśnienia, kg/(ms³),

V – objętość komory, m³,

n – wykładnik politropy (tutaj $n \approx 1$),

R_g = 287 m²/(s²K) – stała gazowa powietrza,

T_g – temperatura bezwzględna powietrza, K.

Rolę komory filtra może spełniać komora pomiarowa przetwornika, ale jej pojemność C nie jest na ogół znana i trzeba ją wyznaczyć doświadczalnie. W tym celu do badanej komory przetwornika przyłącza się kapilarę o znanej oporności R_0 , a następ-

nie wyznacza się odpowiedź na skok ciśnienia, na podstawie której oblicza się stałą czasową T_0 i oblicza pojemność C jako:

$$C = \frac{T_0}{R_0}. \quad (8)$$

Jeżeli zatem znana jest pojemność komory przetwornika C oraz wartość pożądaną stałą czasową T , to otrzymuje się:

$$R = \frac{T}{C}. \quad (9)$$

Dobór kapilary o pożądaną oporność R sprowadza się do wyznaczenia ze wzoru (6) jej długości l przy znanej średnicy d oraz znanych parametrach powietrza: ρ i η . Współczynnik korekcyjny B , uwzględniający straty związane z tworzeniem się laminarnego przepływu, dobiera się z wykresu (rys. 6) [1]. W przypadku, gdy obliczona długość kapilary jest zbyt duża (tj. $l/d > 80$), wówczas między kapilarę i przetwornik wprowadza się dodatkową komorę.

Przypuśćmy, że należy obliczyć stałą czasową filtra złożonego z kapilary o średnicy $d = 0,23$ mm i długości $l = 40$ mm oraz komory przetwornika i komory dodatkowej o łącznej objętości $V = 6,5$ cm³. Filtr będzie przeznaczony do pomiaru w warunkach laboratoryjnych składowej zmiennej o amplitudzie $a \approx 0,5$ kPa przy składowej stałej $p_s = 32$ kPa. Pozostałe wielkości, niezbędne do obliczeń, mają następujące wartości: $\eta = 18,1 \cdot 10^{-6}$ kg/(ms), $\rho = 1,6$ kg/m³, $B = 68$, $R_g = 287$ m²/(s²K), $T_g = 293$ K, $n = 1$.

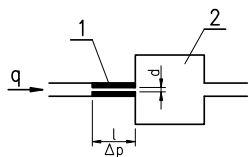
Po podstawieniu do wzorów (6), (7) i (5) odpowiednich wartości otrzymuje się:

$$R = \frac{2 \cdot 68 \cdot 18,1 \cdot 10^{-6} \cdot 40 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 1,6 \cdot (0,23 \cdot 10^{-3})^4} = 69,9997 \cdot 10^8 \text{ 1/(ms)},$$

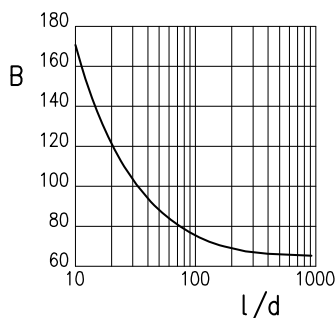
$$C = \frac{6,5 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 287 \cdot 293} = 0,0077297 \cdot 10^{-8} \text{ ms}^2, \quad T = 0,541 \text{ s.}$$

Otrzymane wyniki należy traktować jako orientacyjne, gdyż wzory (6) i (7) są obwarowane kilkoma ograniczeniami [1, 4]. W związku z tym, po zbudowaniu filtra należy bezwarunkowo wyznaczyć doświadczalnie jego odpowiedź skokową, a z niej stałą czasową. Ponieważ taką odpowiedź wyznacza się w warunkach przyszłego pomiaru składowej zmiennej, konieczne jest do tego celu specjalne stanowisko pomiarowe. Składa się ono z przetwornika 1 (rys. 7), filtra 2, dwóch zbiorników buforowych 3 i 4 o objętości $V = 280$ cm³ każdy, kurka trójdrożnego 5 oraz oscyloskopu 6 i drukarki 7.

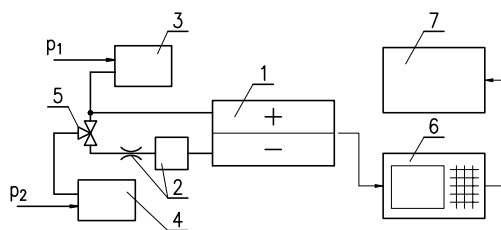
W celu przeprowadzenia eksperymentu, najpierw ustawia się kurkę trójdrożną 5 w takim położeniu, aby obie strony przetwornika 1 były połączone ze zbiornikiem 3. Następnie za pomocą



Rys. 5. Schemat filtra
Fig. 5. Filter diagram



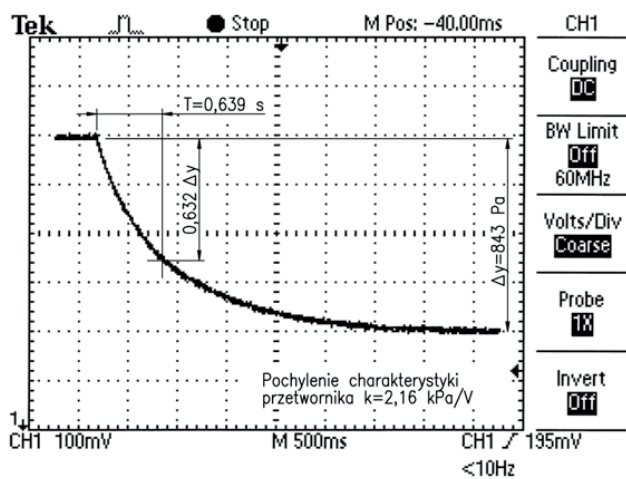
Rys. 6. Zależność współczynnika B od stosunku l/d
Fig. 6. Dependence of the B coefficient from the ratio of l/d



Rys. 7. Stanowisko do wyznaczenia charakterystyki skokowej
Fig. 7. A test stand for the determination of step characteristic

zadajnika (niepokazanego na rysunku) ustawia się ciśnienie p_1 na poziomie składowej stałej, powiększonej o wartość skoku ciśnienia, a za pomocą drugiego zadajnika – ciśnienie p_2 na poziomie składowej stałej pomniejszonej o amplitudę tego przebiegu. Po ustabilizowaniu się ciśnień p_1 i p_2 , szybkim ruchem przełącza się kurek 5 w takie położenie, aby dodatnia strona przetwornika była nadal połączona ze zbiornikiem 3, a ujemna przyłączona do zbiornika 4.

Na rysunku 8 pokazano odpowiedź skokową filtra złożonego z kapilary o średnicy wewnętrznej $d = 0,23$ mm i długości $l = 40$ mm oraz komory o całkowitej objętości $V = 6,5$ cm³. Filtr był połączony z przetwornikiem przeznaczonym do dalszych badań (weryfikacji). Stała czasowa $T = 0,639$ s, wyznaczona na podstawie tego przebiegu, została pomniejszona o połowę czasu narastania skoku [6] – ostatecznie jej wartość wynosi $T = 0,639 - 0,006 = 0,633$ s.



Rys. 8. Przykładowa odpowiedź skokowa filtra
Fig. 8. Exemplary step characteristic of the filter

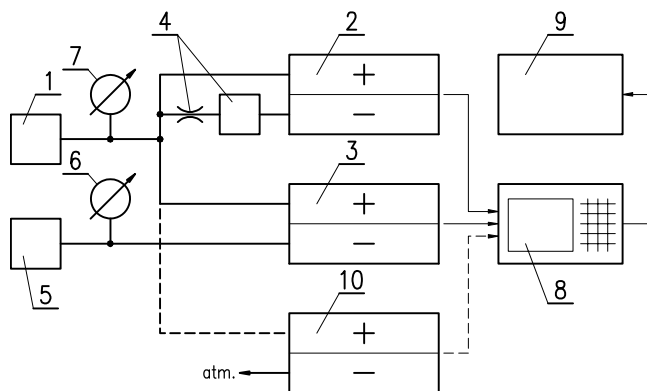
Jak widać, stała czasowa wyznaczona doświadczalnie jest większa niż obliczona – różnica wynosi $\Delta T = 0,633 - 0,541 = 0,092$ s i wynika z nieuwzględnienia w obliczeniach trudnych do oszacowania pojemności przewodów i oporności trójników występujących w układzie pomiarowym.

4. Weryfikacja modelu

Weryfikacja polegała na równoczesnym pomiarze składowej zmiennej za pomocą dwóch identycznych przetworników, przy czym w jednym z nich zamiast filtra zastosowano zadajnik składowej stałej. Dzięki temu jego sygnał wyjściowy nie był zniekształcony przez „pozostałość” składowej zmiennej i był traktowany jako przebieg wzorcowy, z którym porównano przebieg na wyjściu drugiego przetwornika oraz przebieg wyznaczony za pomocą modelu.

Badania przeprowadzono na stanowisku pomiarowym złożonym z pneumatycznego generatora periodycznych przebiegów ciśnienia 1 (rys. 9), dwóch jednakowych przetworników różnicy ciśnień 2 i 3, filtra pneumatycznego 4, zadajnika ciśnienia 5, dwóch manometrów 6 i 7, oscyloskopu 8 i drukarki 9. Dodatkowy przetwornik 10 służył do pomiaru składowej stałej.

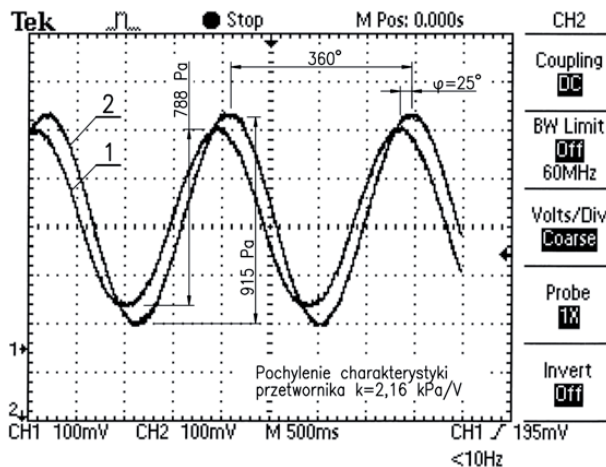
Generator 1 umożliwiał wybór kształtu składowej zmiennej oraz wartości składowej stałej [2]. Wszystkie przetworniki były produktami firmy Motorola: przetworniki 2 i 3 typu MPX5010DP miały zakres pomiarowy 10 kPa, a przetwornik 10 typu MPX5050DP – 50 kPa. Napięciowe sygnały wyjściowe przetworników rejestrowano dwukanałowym oscyloskopem TDS 2002 (Tektronix).



Rys. 9. Stanowisko pomiarowe do weryfikacji modelu
Fig. 9. Scheme of the test stand for the model evaluation

Do badań przyjęto: składową zmienną w postaci sinusoidy o częstotliwości $f = 0,5$ Hz i wartości międzyszczytowej około 1 kPa, składową stałą o wartości $p_s = 32$ kPa, a także filtr o stałej czasowej $T = 0,633$ s, wyznaczonej na podstawie odpowiedzi skokowej.

Przebieg eksperymentu był następujący: na generatorze ustawiono wymagane parametry, a następnie – obserwując manometry 6 i 7 – zwiększano ciśnienie wyjściowe generatora 1 i zadajnika 5. Po ustabilizowaniu się obydwu ciśnień na poziomie 32 kPa eksperyment został zakończony, a wyniki pokazano na oscylogramie (rys. 10).



Rys. 10. Porównanie zmierzonych składowych zmiennych: 1 – z zastosowaniem filtra, 2 – przy użyciu zadajnika
Fig. 10. Comparison of measured variable components: 1 – using a filter, 2 – using the setpoint device

Krzywa 1 o podwójnej amplitudzie 788 Pa jest sygnałem wyjściowym przetwornika 2 (rys. 9), a krzywa 2 – przetwornika 3. Wyrażona w procentach względna różnica ich amplitud oraz opóźnienie fazowe wynoszą odpowiednio:

$$\delta_a = \frac{915 / 2 - 788 / 2}{915 / 2} \cdot 100\% = 13,9\%, \quad \varphi = 25^\circ. \quad (10)$$

Aby ocenić dokładność modelu, do wzoru (2.3) podstawiono odczytaną z oscylogramu częstotliwość $f = 0,5$ Hz oraz wyznaczoną doświadczalnie stałą czasową filtra $T = 0,633$ s, a następnie dla kilku kolejnych wartości czasu t wyznaczono wartości rzędnych przebiegów: p' i p_2 (tab. 1). Następnie obliczono błąd amplitudy δ_a i opóźnienie fazowe φ ze wzorów:

Tabela 1. Rzędne przebiegów p' i p_z obliczone ze wzoru (3)Table 1. Values of the waveforms p' and p_z calculated from the formula (3)

| t, s | 0,00 | 0,05 | 0,10 | 0,15 | 0,20 | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,40 | 0,45 | 0,50 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| p' | 0,0000 | 0,1564 | 0,3090 | 0,4540 | 0,5878 | 0,7071 | 0,8090 | 0,8910 | 0,9511 | 0,9877 | 1,0000 |
| p_z | 0,4014 | 0,5213 | 0,6284 | 0,7200 | 0,7939 | 0,8482 | 0,8817 | 0,8934 | 0,8831 | 0,8511 | 0,7982 |

$$\delta_a^* = \frac{p'_a - p_{az}}{p'_a} \cdot 100\% = 10,7\%, \quad (11)$$

$$\phi^* = 90 \cdot \frac{\Delta t}{t_{90}} = 27^\circ, \quad (12)$$

gdzie:

$p'_a = 1,000$ – amplituda przebiegu p' ,

$p_{az} = 0,8934$ – amplituda przebiegu p_z ,

$\Delta t = 0,15$ – czas przesunięcia fazowego przebiegów p' i p_z ,

$t_{90} = 0,50$ – czas odpowiadający przesunięciu fazowemu 90° .

Różnice między wynikami uzyskanymi na podstawie wyników eksperymentu i obliczeń zgodnie z modelem w postaci równania (3) wynoszą:

$$\Delta_a = 13,9 - 10,7 = 3,2\%, \quad (13)$$

$$\Delta\phi = 25 - 27 = -2^\circ.$$

Wyniki te należy uznać za zadowalające i potwierdzające prawidłowość opisanego modelu.

5. Zmiana w czasie składowej stałej

Podczas tworzenia modelu przetwornika różnicy ciśnień przyjęto milcząco, że wartość składowej stałej (równoznacznej ze średnią wartością pulsacji) pozostaje niezmienna lub zmienia się wielokrotnie wolniej niż przebieg składowej zmiennej. Taka sytuacja występuje w większości pomiarów. Opracowany model zachowuje swą ważność również w przypadku stosunkowo szybkiej zmiany w czasie „składowej stałej” (średniej wartości) pulsacji, pod warunkiem, że zmiana ta jest liniowa lub zbliżona do liniowej. Taki właśnie przypadek ma miejsce podczas pomiaru średniej wartości ciśnienia krwi czujnikiem pneumatycznym [5].

Sygnal liniowo narastający w czasie (rys. 11) i opisywany równaniem $x = vt$, po przejściu przez filtr dolnoprzepustowy I-go rzędu przyjmuje postać [1]:

$$y = v \left[t - T \left(1 - e^{-t/T} \right) \right], \quad (14)$$

gdzie:

v – prędkość zmian sygnału x ,

Pa/s,

T – stała czasowa filtru, s,

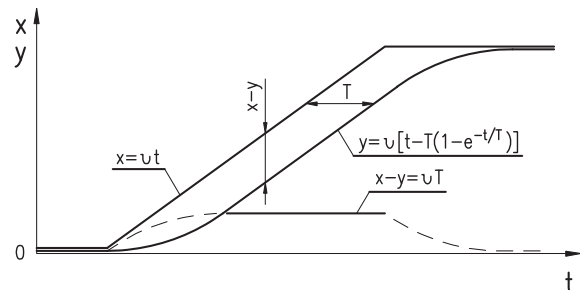
t – czas, s.

Po stosunkowo krótkim procesie przejściowym ($t \geq 3T$) przebieg sygnału można aproksymować prostą:

$$y = vt - vT, \quad (15)$$

a różnica sygnałów wynosi:

$$x - y = vT. \quad (16)$$



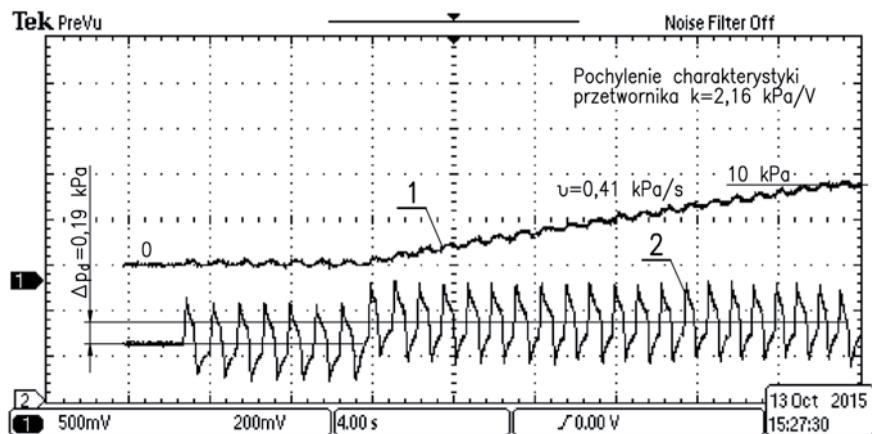
Rys. 11. Odpowiedź y członu inercyjnego I-go rzędu na sygnał liniowo narastający x i ich różnica

Fig. 11. Response of the first order inertial element on the linearly increasing x signal and their difference

Oznacza to, że w wydzielonej (odfiltrowanej) w przetworniku składowej zmiennej pojawia składowa stała vT , zwykle o niewielkiej wartości. Na rysunku 12 pokazano oscylogramy przebiegów ciśnienia pulsującego 1 (mierzonego przetwornikiem o zakresie pomiarowym 0–50 kPa) oraz składowej zmiennej 2, wydzielonej w przetworniku różnicy ciśnień o zakresie 0–10 kPa. Jak widać, podczas narastania średniej wartości ciśnienia pulsującego, następuje skokowa zmiana średniej wartości składowej zmiennej o wartość Δp_d . Pojawienie się tego skoku nie ma wpływu ani na amplitudę, ani na kształt składowej zmiennej. Jediną niedogodnością związaną z jego wystąpieniem jest konieczność wyboru przetwornika różnicy ciśnień o nieco większym zakresie pomiarowym.

W rozpatrywanym przykładzie (rys. 12) prędkość narastania składowej stałej od wartości 0 do 10 kPa wynosi $v = 0,41$ kPa/s, a stała czasowa filtru, wyznaczona przy skoku ciśnienia od 0 do 10 kPa, ma wartość $T = 0,49$ s. A zatem przewidywany skok średniej wartości składowej zmiennej jest równy:

$$\Delta p = vT = 0,41 \cdot 0,49 = 0,20 \text{ kPa}. \quad (17)$$



Rys. 12. Przebieg ciśnienia pulsującego 1 oraz składowej zmiennej 2, wydzielonej w przetworniku różnicy ciśnień

Fig. 12. Runs of the pulsating pressure 1 and variable component 2, received from the differential pressure transducer

Natomiast na oscylogramie wartość tego skoku wynosi $\Delta p_d = 0,19$ kPa. Są to wartości stosunkowo małe i bliskie sobie. Większa niedogodność może wyniknąć w przypadku, gdy przebieg składowej stałej jest malejący. Wówczas składowa stała vT ma znak ujemny, co może oznaczać przemieszczenie się składowej zmiennej w obszar „nietolerowany” przez przetwornik. W takiej sytuacji należy użyć przetwornika różnicy ciśnień o większym zakresie pomiarowym.

6. Podsumowanie

Pomiar składowej zmiennej za pomocą przetwornika różnicy ciśnień, wyposażonego w pneumatyczny filtr dolnoprzepustowy, w istotnym stopniu spełnia oczekiwania związane z bezinwazyjnym pomiarem średniej wartości ciśnienia krwi [5]. Do zalet pomiaru należy możliwość użycia dostatecznie czułego przetwornika o zakresie pomiarowym dostosowanym do amplitudy składowej zmiennej, a także niewrażliwość układu na zmiany wartości składowej stałej (poza przebiegiem przejściowym).

Pewną niedogodnością może być jedynie możliwość przeciążenia przetwornika podczas przyłączania go do źródła pulsacji. Pomimo, że nowoczesne przetworniki ciśnienia są odporne na znaczne, nawet pięciokrotne [3], przekroczenie zakresu pomiarowego, to jednak wspomniane przyłączenie powinno odbywać się stopniowo.

Zaproponowany model układu pomiarowego został pozytywnie zweryfikowany doświadczalnie: pozwala on wybrać najlepszą wartość stałej czasowej filtra, dla której „pozostałość” składowej zmiennej i ewentualnie składowej stałej są znikomo małe.

Bibliografia

1. Chorowski B., Werszko M., *Mechaniczne urządzenia automatyki*, WNT, Warszawa 1990.
2. Jędrusyna A., Kubowicz Z., *Pneumatyczny generator dowolnych sygnałów ciśnieniowych*. „Pneumatyka”, Nr 2, 2005, 33–35.
3. Karta katalogowa: Przetworniki różnicy ciśnień firmy Motorola.
4. Multrus L., *Pneumatische Strahlelemente und Steuerungssysteme*, Krauskopf-Verlag, Mainz 1969.
5. Werszko M., Tomczuk K., Werszko R., *Pomiar średniej wartości ciśnienia krwi czujnikiem pneumatycznym*, „Pneumatyka”, Nr 1, 2009, 36–42.
6. Werszko M., Tomczuk K., Werszko R., *Korekta wyników pomiarów pulsujących ciśnień*, „Pneumatyka”, Nr 2, 2011, 41–46.
7. Pałko T., Hachoł A., *Pomiary ciśnienia. Biocybernetyka i inżynieria biomedyczna 2000*, praca zbiorowa pod red. M. Nałęcza, tom 2, *Biopomiary*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001, rozdz. 4, 85–100.

Measurement of an Alternating Component of Pulsating Air Pressure

Abstract: The case when the amplitude is much smaller than the constant component, and the frequency ranges 0.1–2 Hz is presented. Stock transducers equipped with a pneumatic low-pass filter were used. Design of the filter is based on the proposed measuring system model and verified by using a special pneumatic device dedicated for measuring the human blood pressure.

Keywords: mean value of blood pressure, measurement by oscillometric method, pneumatic low-pass filter, pneumatic inertial element of the first order, calculation of the pneumatic filter, blood pressure tactile sensor

dr inż. Radosław Werszko

radoslaw.werszko@pwr.edu.pl

Wykładowca w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn i Tribologii na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej. W ramach swojej pracy naukowej zajmował się między innymi rezonatorowymi przetwornikami siły oraz opracował nową metodę kompensacji wpływów temperaturowych w przetwornikach pomiarowych opartych na rezonatorach kwarcowych. Jest także współautorem podręczników „Podstawy metrologii – wybrane zagadnienia” oraz „Podstawy automatyki – wybrane zagadnienia”.



dr hab. inż. Krzysztof Tomczuk

Krzysztof.Tomczuk@pwr.wroc.pl

Adiunkt w Katedrze Inżynierii Kriogenicznej Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej. Jego zainteresowania naukowe obejmują m.in. tematykę pomiarów wielkości nieelektrycznych, a w szczególności nieinwazyjnych pomiarów fali tętna krwi, analizę i przetwarzanie danych pomiarowych, opracowania i wdrażanie inteligentnych algorytmów sterowania. Jest współautorem podręczników „Mechatronics and Control Systems Handbook” oraz „Ćwiczenia laboratoryjne z podstaw automatyki”.

