

Jan CIEPŁUCHA
POLITECHNIKA ŁÓDZKA

Eksperymentalne badania oscylacyjnych przepływów w pneumatycznych liniach pomiarowych^{*)}

Dr hab. inż. Jan CIEPŁUCHA prof. nadzw.

Kierownik Zakładu Metrologii Przepływów w Instytucie Maszyn Przepływowych Politechniki Łódzkiej. Głównie zainteresowania naukowe pomiary parametrów strugi płynu, ze szczególnym uwzględnieniem pomiarów niestacjonarnych wielkości, podstawowe zagadnienia metrologii.



e-mail: jancie@p.lodz.pl

Streszczenie

Omówiono pomiary niestacjonarnych ciśnień za pomocą elektropneumatycznego toru pomiarowego. Część pneumatyczna tego układu pomiarowego jest głównym źródłem zniekształceń sygnału wyjściowego. Przedstawiono stanowisko badawcze oraz wyniki badań eksperymentalnych transmisji sygnału w prostej pojedynczej linii pneumatycznej w porównaniu z rozwiązaniem przyjętego modelu matematycznego, opartego na podstawowych równaniach mechaniki płynów. Pomiary przeprowadzono w szerokim zakresie zmian częstotliwości ($0 \div 3$ kHz), względnej amplitudy ($2 \div 11$ %) pulsacji oraz bezwymiarowego wskaźnika tłumienia linii ($0,009 \div 0,037$).

Słowa kluczowe: niestacjonarne przepływy płynu, mechanika płynu

Experimental Investigations of Oscillatory Flows in Pneumatic Signal Lines

Abstract

Measurements of unsteady pressures by means of the electro-pneumatic measurement line are discussed. A pneumatic part of the measurement system is the main source of the inlet signal deformation. The test rig and the results of experimental investigations of the signal transmission in the straight single pneumatic line compared to the solution of the assumed mathematical model, based on fundamental equations of fluid mechanics, are presented. The measurements were conducted in a wide range of changes in frequency (0-3 kHz), relative pulsation amplitude (2-11%), and the dimensionless coefficient of the line damping (0.009 – 0.037).

Keywords: unsteady fluid flow, fluid mechanics

1. Wprowadzenie

Zwiększenie sprawności procesów konwersji energii wymaga ciągłego doskonalenia konstrukcji maszyn i urządzeń energetycznych. Nieodzownym składnikiem tych działań obok prac konstrukcyjnych i teoretycznych są prace eksperymentalne pozwalające na identyfikację niestacjonarnych, przestrzennych pól ciśnień, temperatur, prędkości oraz innych parametrów strugi płynu bezpośrednio zaangażowanej w proces konwersji energii. Pomiary tych niestacjonarnych parametrów przepływu są również konieczne w całym okresie eksploatacji maszyn energetycznych, zwiększona amplituda pulsacji np. ciśnienia może doprowadzić do poważnych awarii tych obiektów [6].

Pomiar niestacjonarnego ciśnienia w danym punkcie strugi płynu wymaga umieszczenia w tym punkcie elektrycznego prze-

twornika ciśnienia połączonego z odpowiednią aparaturą wzmacniająco-rejestrującą. Pomimo znacznej miniaturyzacji przetworników warunek ten w wielu przypadkach nie może być spełniony z wielu względów np. ograniczona przestrzeń pomiarowa, wysoka temperatura strugi, nieakceptowalne oddziaływanie przetwornika na mierzone wielkości. Problem ten jest rozwiązywany przez połączenie przetwornika ciśnienia z punktem pomiarowym linią pneumatyczną wykonaną w postaci rurki/rurek lub wierconego otworu/otworów (o średnicy małej w porównaniu z długością) i ewentualnie zakończonych na końcu komorą.

Zjawiska fizyczne zachodzące w linii pneumatycznej transmitującej niestacjonarny sygnał ciśnienia powodują powstanie liniowych i nieliniowych zniekształceń w transmitowanym sygnale pomiarowym. Zależność między parametrami strugi na wlocie linii (punkt pomiarowy) i na jej końcu (w miejscu umieszczenia elektrycznego przetwornika ciśnienia) wynika z propagacji fal ciśnienia wewnątrz linii pneumatycznej i jest funkcją m.in. parametrów płynu na wlocie, geometrycznej konfiguracji linii, wzajemnego oddziaływania linii pneumatycznej, otoczenia i przetwornika pomiarowego itp. Prace teoretyczne [4] [5] i eksperymentalne [2] [3] nad tym zagadnieniem są od wielu lat prowadzone w Instytucie Maszyn Przepływowych Politechniki Łódzkiej.

Wynikiem prowadzonej analizy teoretycznej zjawiska opracowano dwa modele. Pierwszy z nich, liniowy oparty jest na podstawowych równaniach mechaniki płynu (stanu, ciągłości przepływu, zachowania pędu i energii) dla niestacjonarnego, laminarnego i osiowo symetrycznego przepływu ściśliwego, lepkiego i przewodzącego ciepło gazu w linii pneumatycznej o wewnętrznej średnicy d małej w porównaniu z długością L zakończonej komorą o objętości V_k . Dodatkowo założono nieodkształcalne ścianki i stałą ich temperaturę wzdłuż długości.

W wyniku rozwiązania otrzymanego układu równań różniczkowych wyznaczono bezwymiarowe parametry transmisji sygnału: częstotliwość N , tłumienie D , objętość komory na końcu linii V , wskaźniki $p1z$, $p20$, $T20$ określające odpowiednio stosunek pierwszych harmonicznych ciśnienia na końcu i wlocie linii, zmianę składowej stałej ciśnienia i temperatury gazu w przekroju wlotowym i końcowym. Określają je niżej podane zależności:

$$N = \frac{n \cdot L}{a_0}; \quad D = \frac{4 \cdot R_g \cdot \mu \cdot L \cdot T_0}{a_0 \cdot d^2 \cdot p_0}; \quad V = \frac{4 \cdot V_k}{\pi \cdot d^2 \cdot L};$$

$$p1z = \frac{p^1_k}{p^1_0}; \quad p20 = \frac{p^0_k - p^0_0}{\varepsilon^2 \cdot p^0_0}; \quad T20 = \frac{T^0_k - T^0_0}{\varepsilon^2 \cdot T^0_0};$$

gdzie: n – częstotliwość oscylacji w Hz,

a_0, p_0, T_0, μ – prędkość dźwięku, ciśnienie, temperatura, lepkość dynamiczna gazu na wlocie linii,

R_g – stała gazowa,

p^0, T^0, p^1, T^1 – składowe stałe i pierwsze harmoniczne ciśnienia i temperatury,

$\varepsilon = p^1_0 / p^0_0$ – względna amplituda pulsacji,

o, k, \sim – parametry gazu w przekroju wlotowym, końcowym linii oraz w niezakłóconej strudze.

Model ten pozwala na określenie, dla założonych parametrów gazu na wlocie, parametrów termodynamicznych i kinematycznych w dowolnym punkcie linii.

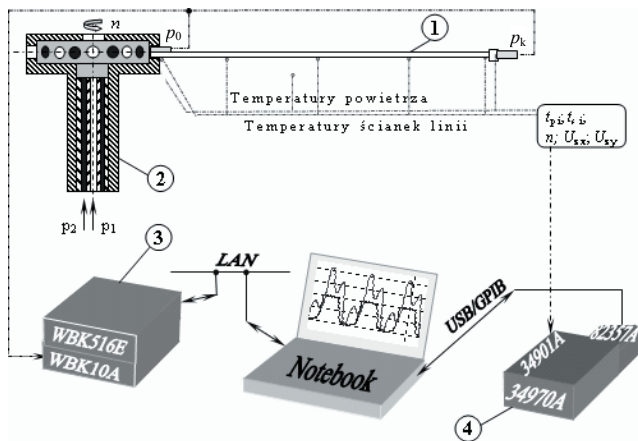
Drugi z opracowanych modeli teoretycznych „ $x-t$ ” jest modelem nieliniowym, jednowymiarowym laminarnego i turbulentnego przepływu gazu przez rurkę z wymianą ciepła [7].

^{*)} Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2004-2006 jako projekt badawczy

2. Stanowisko badawcze

Do realizacji postawionego zadania badawczego wykonano specjalne stanowisko (rys. 1). Jego podstawowe elementy to:

- badana linia pneumatyczna,
- generator niestacjonarnego ciśnienia,
- przetworniki elektryczne do pomiaru zmian ciśnienia na wlocie i końcu badanej linii oraz uśrednionej temperatury gazu i ścianek linii,
- stacja akwizycji danych,
- oprogramowanie stanowiska.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 - badana linia pneumatyczna, 2 - generator niestacjonarnego ciśnienia, 3 - stacja akwizycji danych WaveBook 516E, 4 - multimetr Agilent 34970A z 20 kanałowym skanerem 34901A i interfejsem USB/GPIB 82357A

Fig. 1. Block diagram of the test rig: 1 - tested pneumatic line, 2 - unsteady pressure generator, 3 - data acquisition station, 4 - data acquisition/switch unit

Do generacji niestacjonarnego ciśnienia o nastawialnych parametrach użyto własnej konstrukcji generatora wykonanego w postaci szybkiego, pneumatycznego komutatora, którego wirnik łożyskowany w pneumatycznych łożyskach promieniowych i osiowym, napędzany mikroturbiną powietrzną generował w gniazdach pomiarowych zmiany mierzonego ciśnienia.

W płaszczyźnie wlotowej linii zainstalowano elektryczny, miniaturowy przetwornik ciśnienia typu XCS 062 firmy Kulite o zakresie pomiarowym 35 kPa (5 psid) oraz rozpiętą wzdłuż średnicy mikrotermoparę typu E o średnicy drutów 0,12 mm firmy Omega spawaną czołowo laserem w atmosferze argonu.

W końcowej części linii zamocowano mosiężną tulejkę w której umieszczono miniaturowy przetwornik ciśnienia, model 8514-10 f-my Endevco o zakresie pomiarowym 70 kPa (10 psid) z elementami kompensacji termicznej zabudowanymi w korpusie przetwornika, a tuż przed nim rozpiętą wzdłuż średnicy linii mikrotermoparę, wykonaną analogicznie jak termopara w przekroju wlotowym linii.

Miniaturowe przetworniki ciśnienia wyworcowano na specjalnie skonstruowanym stanowisku uzyskując wieloparametrowe charakterystyki statyczne, mierzone ciśnienie jest funkcją sygnału wyjściowego przetwornika, jego temperatury oraz wartości napięcia zasilania. Niepewność pomiaru ciśnienia w zakresie zmian temperatury przetwornika 15°C ÷ 40°C jest poniżej 0,5 % zakresu pomiarowego.

Do pomiaru temperatury ścianek linii użyto termopar typu E o średnicy drutów $\phi 1,5$ mm, których spoinę typu V wykonano poprzez spawanie laserem w atmosferze argonu.

Sygnały wyjściowe przetworników ciśnienia podano na wejście stacji akwizycji danych WaveBook/516E z modułem WBK10A firmy IOtech, Inc. umożliwiającą rejestrację mierzonych ciśnień z rozdzielczością 16 bitów i maksymalną częstotliwością próbkowania 333 kHz w dwu kanałach pomiarowych. Zarejestrowane sygnały transmitowano poprzez lokalny Ethernet do komputera.

Pomiary sygnałów uśrednionych w czasie wielkości (temperatury: gazu na wlocie i końcu linii, ścianek linii, otoczenia oraz

napięcia zasilania przetworników ciśnienia i częstotliwości obrotów wirnika generatora) dokonano multimetrem firmy Hewlett Packard typu Agilent 34970A z 20 kanałowym skanerem 34901A i interfejsem USB/GPIB 82357A.

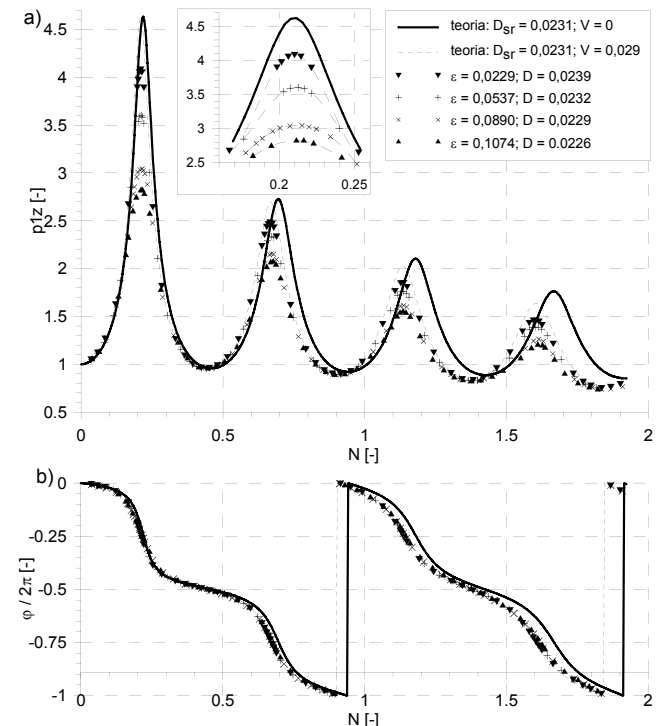
Do sterowania procesem pomiarowym, wykonania obliczeń zarejestrowanych przebiegów, porównania ich z modelem teoretycznym i przedstawienia ich w graficznej postaci opracowano wg własnej koncepcji program komputerowy TLP.m, z wykorzystaniem programu MatLab ver. 7.2.0.232 i toolbox'ów: Signal Processing ver. 6.5, Statistics ver. 5.2 firmy MathWorks, Inc. oraz autorskimi programami sterującymi aparaturą pomiarowo-rejestrującą.

Pomiary prowadzono metodą „on line” dokonując pomiaru zmian ciśnienia w czasie jednego pełnego obrotu wirnika generatora (12 okresów zmian) z częstotliwością próbkowania $f_p = 330$ kHz niezależnie od częstotliwości f_g zmian generowanego ciśnienia. Uzyskany wynik obliczeń zarejestrowanego przebiegu był na bieżąco graficznie porównywany z rozwiązaniem teoretycznym (model liniowy).

3. Wyniki pomiarów

Badania prowadzono w szerokim zakresie zmian parametrów transmitowanego sygnału: $n = 40 \div 3000$ Hz ($N = 0,3 \div 2,8$); $D = 0,009 \div 0,037$; $\varepsilon = 0,02 \div 0,11$ oraz różnych konfiguracji geometrycznych linii pneumatycznej. Linie wykonano ze stali kwasoodpornej (18 ÷ 20 % Cr, 8 ÷ 11 % Ni) MIFAN SA. Milanówek, bez komory na końcu linii ($V = 0$). Na zewnętrznej ściance linii zamocowano 5 mikrotermopar w odległościach $\xi = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 0,95$ od wlotu linii. Linie zaizolowano cienką taśmą teflonową. Pomiary wykonano dla 4 różnych wartości względnej amplitudy pulsacji ε .

Poniżej, dla przykładu, przedstawiono wyniki badań linii wykonanej w postaci pojedynczej, prostej rurki o średnicach: wewnętrznej $d = 1,48$ mm, zewnętrznej 1,81 mm i długości $L = 300$ mm ($L/d = 203$).



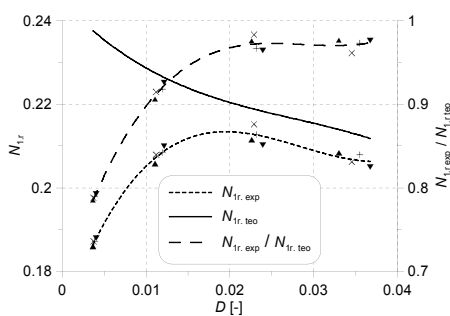
Rys. 2. Wpływ względnej amplitudy pulsacji ε na wartość wskaźnika p_{1z} i przesunięcie fazowe ϕ

Fig. 2. Influence of the relative amplitude of pressure oscillations ε on the value of p_{1z} and the phase shift ϕ

Na rys. 2 pokazano wzmocnienie p1z oraz przesunięcie fazowe φ pierwszych harmonicznych transmitowanego sygnału wyznaczone z liniowego modelu teoretycznego i zmierzonego dla różnych względnych amplitud pulsacji ε . Rozwiązanie teoretyczne jest jakościowo zgodne z wynikami eksperymentu.

Największe różnice występują w obszarach rezonansowych i dotyczą one zarówno wartości wskaźnika p1z jak i bezwymiarowej częstotliwości N . Stwierdzono wyraźną zależność między względną amplitudą ε a wartością „piku” rezonansowego, jest to szczególnie widoczne w obszarze 1. rezonansu (szczegół na rys. 2.a).

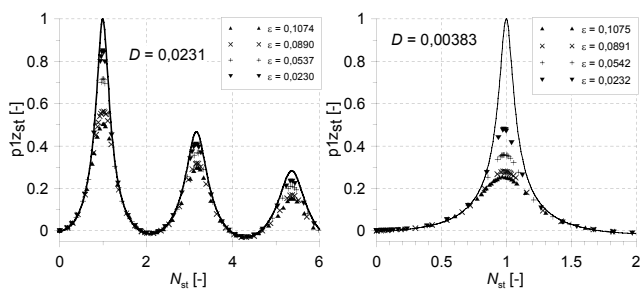
Częstotliwości rezonansowe, wg liniowego modelu, są funkcją tłumienia linii D . Na rysunku 3 pokazano zmiany częstotliwości 1. rezonansu: teoretyczną $N_{1,rez,teo}$ i zmierzoną $N_{1,rez,exp}$ w funkcji tłumienia linii. Dla linii o tłumieniu $D = 0,02 \div 0,04$ częstotliwość zmierzona jest bliska teoretycznej ($N_{1,rez,exp} / N_{1,rez,teo} \approx 0,97$, dla $D < 0,02$ częstotliwość zmierzona jest znacznie mniejsza od wyznaczonej z przyjętego modelu matematycznego).



Rys. 3. Zależność częstotliwości 1. rezonansu od tłumienia linii D
Fig. 3. Frequency of the 1st resonance vs. the line damping D

Wartość częstotliwości rezonansowej wg tego modelu jest zależna od długości linii L oraz objętości komory V_k na końcu linii. Przeprowadzone symulacje dla wszystkich badanych linii pozwoliły na uzyskanie zgodności modelu matematycznego z eksperymentem dla objętości $V_k = 15 \text{ mm}^3$ (co dla omawianej linii daje względną objętość komory $V = 0,029$). Istnienie takiej objętości w badanych liniach jest fizycznie niemożliwe – maksymalna objętość jaka mogłaby ewentualnie wystąpić nie przekracza 3 mm^3 . Rozwiązanie modelu teoretycznego dla $V_k = 15 \text{ mm}^3$ pokazano na rys. 2 linią przerywaną.

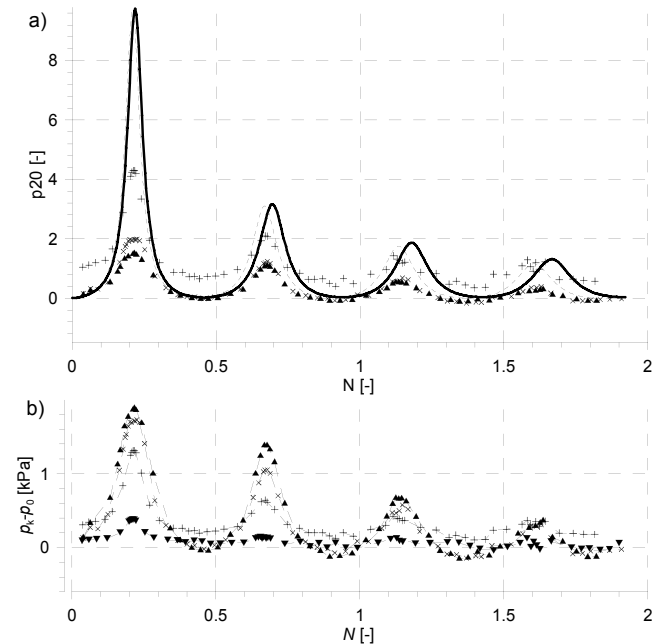
Celem ilościowego określenia wpływu tłumienia linii D na występujące różnice dokonano standaryzacji parametru p1z i bezwymiarowej częstotliwości pulsacji N przyjmując zmiany p1z w granicach $0 \div 1$ i współrzędne, wyznaczonego z rozwiązania teoretycznego, „piku” 1. rezonansu (1,1). Porównanie zmierzonych i wyznaczonych z rozwiązania teoretycznego (dla $V_k = 15 \text{ mm}^3$) wartości p1z w układzie współrzędnych standaryzowanych przedstawiono na rys. 4 dla omawianej linii ($D = 0,0231$) i linii o rząd mniejszym tłumieniu.



Rys. 4. Zmiany standaryzowanych wartości p1z
Fig. 4. Changes in standardized values of p1z

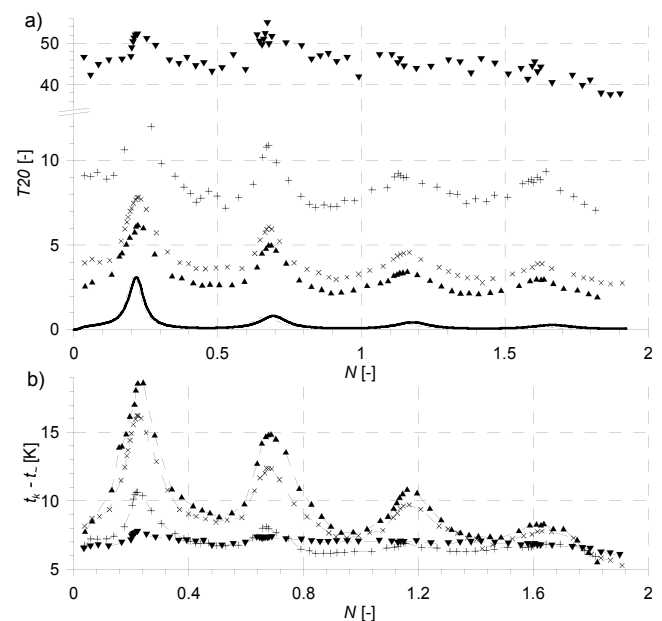
Zmianę składowej stałej transmitowanego sygnału określa bezwymiarowy wskaźnik p20 (rys. 5.a). Wyniki pomiarów są

również jakościowo zgodne z rozwiązaniem modelu liniowego. W miarę wzrostu względnej amplitudy pulsacji ε maleją wartości p20 w obszarach rezonansów. Dla małych wartości ε obserwowano znaczny rozrzut wartości p20 wynikający z dokładności pomiaru niewielkich zmian składowej stałej odniesionych do ε^2 . Przyrost składowej stałej na końcu linii względem przekroju wlotowego jest tym większy im większa jest amplituda ε , pokazano to na rys. 5.b.



Rys. 5. Wpływ względnej amplitudy pulsacji ε na zmianę składowej stałej ciśnienia transmitowanego sygnału (oznaczenia jak na rys. 2)
Fig. 5. Influence of the relative amplitude of pressure oscillations ε on the constant pressure component (notations as in fig. 2)

W trakcie pomiarów stwierdzono znaczne zmiany średniej temperatury gazu wewnątrz linii oraz wyraźny rozkład temperatury ścianek wzdłuż ich długości. Zmiany temperatury gazu wewnątrz linii, jakościowo zgodne z modelem liniowym, znacznie przekraczały wartości wynikające z rozwiązania teoretycznego (rys. 6).



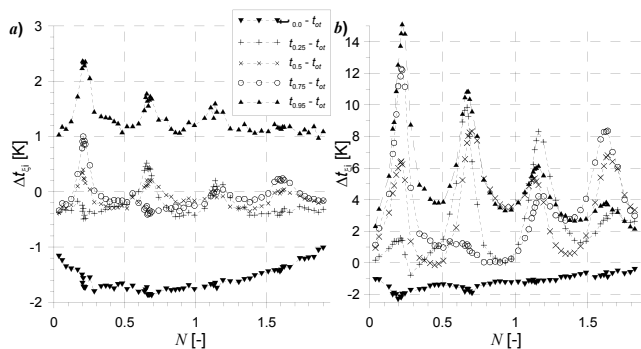
Rys. 6. Wpływ względnej amplitudy pulsacji ε na zmianę składowej stałej temperatury gazu w linii (oznaczenia jak na rys. 2)
Fig. 6. Influence of the relative amplitude of pressure oscillations ε on the value of the constant temperature component (notations as in fig. 2)

Podobnie jak zmiany składowej stałej ciśnienia są one w podobny sposób zależne od względnej amplitudy pulsacji ε . Dyssypacja energii wewnątrz linii powoduje wyraźny wzrost średniej temperatury gazu nawet przy niewielkich amplitudach oscylacji – na rys. 6.b dla $\varepsilon = 0,0229$ efekty rezonansowe są słabo widoczne, ale mimo tego nastąpił kilkustopniowy przyrost temperatury gazu na końcu linii.

Stwierdzone różnice wynikają z niezgodności przyjętego liniowego modelu matematycznego z obiektem rzeczywistym. Główne rozbieżności to:

- założona w modelu stała temperatura ścianek,
- laminarny charakter przepływu gazu w linii.

Wykonane pomiary temperatury ścianek linii wskazują na ich zależność zarówno od miejsca pomiaru, częstotliwości N oraz względnej amplitudy ε (rys. 7). Największe przyrosty temperatury ścianek występują w obszarze 1. rezonansu na końcu linii ($\xi = 0,95$).



Rys. 7. Zmiany temperatury ścianek badanej linii w 5 wybranych punktach wzdłuż jej długości: a) $\varepsilon = 0,0223$; b) $\varepsilon = 0,1074$
Fig. 7. Changes in wall temperature of the line under analysis in 5 selected points along the line length: a) $\varepsilon = 0,0223$; b) $\varepsilon = 0,1074$

Założenie laminarnego przepływu jest słuszne dla oscylacji o niewielkich amplitudach a w przypadku większych amplitud jedynie w obszarach poza rezonansem, dla częstotliwości rezonansowych następuje turbulizacja przepływu czemu, w przypadku omawianych badań dodatkowo sprzyjała mikrotermopara umieszczona na końcu linii.

W badaniach Bergha i Tijdemana [1] prowadzonych w zakresie $n = 10 \div 200$ Hz i względnej amplitudzie $\varepsilon = 0,0065$ uzyskano dobrą zgodność (rozbieżności poniżej 5%) wyniku eksperymentu i rozwiązania liniowego modelu.

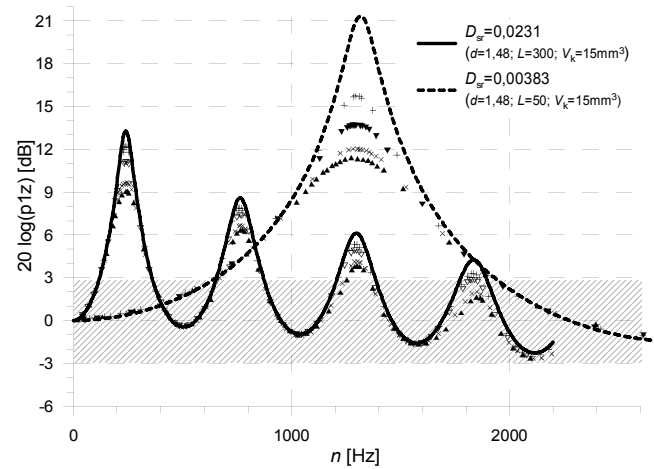
4. Wnioski

Linia pneumatyczna wnosi znaczne zniekształcenia transmitowanego niestacjonarnego sygnału, co pozwala na postawienie dwu podstawowych zaleceń:

- jeśli to tylko możliwe należy unikać stosowania sygnałowej linii pneumatycznej,
- w przypadku konieczności jej użycia należy tak dobrać jej wymiary geometryczne aby dla danych warunków pomiaru w zakresie mierzonych częstotliwości nie znalazł się w obszarze rezonansu.

Do określenia wartości częstotliwości rezonansowych linii o tłumieniach $D > 0,2$ można wykorzystać liniowy model zjawiska. Umożliwia on w prosty i szybki sposób możliwie dokładnie określić ich wartości (porównaj rys. 3). Przyjmując jako granicę dopuszczalnych zniekształceń sygnału wyjściowego ± 3 dB można określić przedziały częstotliwości spełniających to kryterium.

Dla omawianej linii o tłumieniu $D = 0,0231$, w badanym zakresie $n < 2200$ Hz, wynoszą one (rys. 8): $0 \div 120$; $360 \div 665$; $870 \div 1200$; $1385 \div 1775$; $1992 \div 2200$ Hz, a dla linii o tłumieniu $D = 0,00383 - 0 \div 650$; $1930 \div 2600$ Hz.



Rys. 8. Tłumienie niestacjonarnego sygnału transmitowanego przez linię pneumatyczną
Fig. 8. Damping of the unsteady signal transmitted by the pneumatic line

Zastosowanie bardziej złożonych numerycznych symulacji realizowanych w praktyce CFD (Computational Fluid Dynamics) metodami DNS (Direct Numerical Simulation), LES (Large Eddy Simulation) i RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) do wyznaczenia parametrów termodynamicznych i kinematycznych gazu w linii jest bardzo pracochłonne i czasochłonne oraz wymaga dużych mocy obliczeniowych i jest praktycznie stosowane do bardzo prostych przypadków, krótkie ($L/d < 10$), proste odcinki linii [8].

Znaczny wzrost temperatury gazu na końcu linii, w miejscu umieszczenia elektrycznego przetwornika ciśnienia, powoduje wzrost temperatury jego membrany na ogół powyżej temperatury korpusu w którym jest utwierdzona. Powstające naprężenia termiczne, przy niewielkich szywnościach poprzecznych membrany są dodatkowym źródłem trudnych do określenia losowych błędów mierzonego ciśnienia.

5. Literatura

- [1] Bergh H., Tijdeman H.: Theoretical and Experimental Results for the Dynamic Response of Pressure Measuring Systems, National Aero- and Astronautical Research Institute, Amsterdam Jan. 1965
- [2] Cieplucha J.: Transmisja sygnału niestacjonarnego ciśnienia przez linię pneumatyczną. Politechnika Łódzka, Rozprawy naukowe, z. 193, Łódź 1993
- [3] Cieplucha J.: Measurement of unsteady gas pressure with pneumatic signal line. Proceedings of the XIII IMEKO World Congress. Torino, September 1994, vol. 3 pp. 1922-1927
- [4] Kazimierski Z., Trojnarowski J.: Time averaged Pressure of Fluctuating Gas Motion in Small Diameter Tubes, AIAA Journal, 1987, No 4
- [5] Kazimierski Z., Horodko L.: Pressure Averaging by Small Diameter Tubes in Pulsating Flow, AIAA Journal, 1990, No 1
- [6] Liu Hong, Chen Zuoyi: Characteristics Pertinent to Propagation of Pulsating Pressure in the Channels of Turbine Machines, Thermal Engineering vol.54, No. 1, 2007, pp.72-78
- [7] Sobczak K.: Numeryczna analiza transmisji oscylacyjnego sygnału ciśnienia w pneumatycznych liniach pomiarowych. Kongres Metrologii, Kraków, wrzesień 2007
- [8] Sobczak K.: Numeryczny model turbulentnego przepływu pulsacyjnego gazu w rurkach z wykorzystaniem metody LES. Praca doktorska Politechnika Łódzka, Łódź 2006