

3.10.2. – generacja dźwięku

Mirosław Meissner

**OSCYLACJE SAMOWZBUDNE W RUROCIĄGU
Z ZAMKNIĘTYMI ODGAŁĘZIENIAMI**

18/1994

P. 269



WARSZAWA 1994

<http://rcin.org.pl>

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 28 marca 1994 r.



56631



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
Nakład 100 egz. Ark.wyd.2,0 Ark.druk. 2,5
Odfano do drukarni w czerwcu 1994 r.

Wydawnictwo Spółdzielcze sp. z o.o.
Warszawa, ul.Jasna 1

OSCYLACJE SAMOWZBUDNE W RUROCIĄGU Z ZAMKNIĘTYMI ODGAŁĘZIENIAMI

STRESZCZENIE

W pracy zaprezentowano wyniki badań zjawiska wytwarzania oscylacji samowzbudnych w rurociągu z zamkniętymi odnogami. Przedmiotem badań były pomiary częstotliwości i poziomu oscylacji akustycznych w trzech różnych układach doświadczalnych: rurociąg z pojedynczą odnogą, rurociąg z dwoma różnie usytuowanymi odnogami, rurociąg z trzema odnogami.

Badania rurociągu z dwoma odnogami wykazały, że znaczne zmiany częstotliwości drgań występują w takich zakresach długości odnog, w których w przypadku rurociągu z pojedynczą odnogą następuje wzbudzenie oscylacji akustycznych. Oznacza to, że zmiany częstotliwości są efektem sprzężenia zwrotnego pomiędzy sygnałami akustycznymi powstających w obu odnogach. Oddziaływanie to powoduje dla określonych długości odnog wzrost lub zmniejszenie poziomu wytwarzanych oscylacji. Jest to szczególnie widoczne w przypadku rurociągu z trzema odnogami, gdzie dla pewnych długości odnog następuje wzmocnienie amplitudy drgań (ok. 5 dB) lub całkowite wytłumienie oscylacji (ok. 25 dB dla składowej dyskretnej). W warunkach kompensacji drgań zmniejszenie całkowitego poziomu hałasu w rurociągu jest rzędu 15 dB.

SPIS TRESCI

1. Wprowadzenie.....	5
2. Stanowisko badawcze, metody pomiarowe i aparatura.....	8
3. Analiza wyników badań.....	11
3.1. Rurociąg z pojedynczą odnogą.....	11
3.1.1. Rurociąg długi.....	12
3.1.2. Rurociąg krótki.....	18
3.2. Rurociąg z dwoma odnogami.....	21
3.3. Rurociąg z trzema odnogami.....	29
4. Podsumowanie wyników badań oraz wnioski końcowe.....	37
5. Literatura.....	38

1. WPROWADZENIE

W instalacjach przemysłowych, służących do transportu sprężonego powietrza, potencjalnym źródłem akustycznych oscylacji samowzbudnych mogą być rurociągi odpływowe (odnogi) przeznaczone do odprowadzania powietrza z rurociągu głównego [1-8]. Wzbudzenie silnych oscylacji może mieć miejsce, gdy rurociąg odpływowy jest zamknięty a w rurociągu głównym występuje przepływ gazu. Najbardziej niekorzystny ze względu na możliwość wystąpienia oscylacji samowzbudnych jest przypadek, gdy rurociąg odpływowy łączy się z rurociągiem głównym pod kątem prostym i w warunkach odcięcia tworzy rezonator akustyczny.

Wzbudzenie silnych oscylacji przepływowo-rezonansowych w instalacji powoduje znaczny wzrost hałasu wytwarzanego przez system przepływowy oraz jest źródłem dużych wibracji, co może być przyczyną zniszczenia instalacji. Stwarza to istotne zagrożenie dla prawidłowego funkcjonowania takich strategicznych obiektów przemysłowych jak elektrownie a w szczególności siłownie jądrowe.

Mechanizm wytwarzania oscylacji samowzbudnych w rurociągu z jedną zamkniętą odnogą jest podobny do mechanizmu generacji dźwięku o częstotliwościach dyskretnych przy opływie wnek przez muskający przepływ gazu [9-13]. Źródłem silnych oscylacji akustycznych jest więc wzajemne oddziaływanie pomiędzy zaburzeniami warstwy ścinania a pulsacjami akustycznymi generowanymi w odnodze. Mechanizm tego oddziaływania jest następujący [11]:

"Przepływ gazu po separacji w obszarze wylotu odnogi posiada naturalną niestabilność wynikającą z procesu mieszania się ruchomego ośrodka z ośrodkiem nieruchomym w odnodze. Na granicy pomiędzy tymi ośrodkami tworzy się turbulentna warstwa ścinania składająca się z pojedynczych wirów, które są unoszone przez przepływ w obszarze wylotu odnogi. Wytwarzane przez te wiry zaburzenia prędkości mają charakter szerokopasmowy (szum pochodzenia aerodynamicznego). Cyrkulacja pojedynczego wiru zależna jest jedynie od prędkości głównej przepływu oraz okresu

czasu, w jakim wir spływający z krawędzi spływu dotrze do krawędzi napływu.

Zaburzenia akustyczne powstające w odnodze są czynnikiem kontrolującym *koncentrację wirowości* w warstwie ścinania. Im większa jest ta koncentracja (mniejsza średnica wirów), tym większa jest prędkość indukowana przez wiry. *Koncentrację wirowości* w warstwie ścinania wyznacza warunek Kutty-Zukowskiego, zgodnie z którym prędkość indukowana przez wiry musi przy krawędzi spływu kompensować prędkość zaburzeń akustycznych powstających w odnodze.

Wiry odrywające się od krawędzi spływu są w pierwszej połowie okresu drgań akustycznych hamowane przez siłę Coriolisa, której kierunek jest równoległy do prędkości głównej przepływu. Odpowiada to przypadkowi, gdy prędkość akustyczna skierowana jest do wnętrza odnogi. Siła Coriolisa określa wymianę energii pomiędzy zaburzeniami wirowymi warstwy ścinania a przepływem głównym. Jej wartość jest wprost proporcjonalna do prędkości zaburzeń akustycznych powstających w odnodze a jej kierunek zależy od znaku tej prędkości. W przypadku, gdy siła Coriolisa przeciwdziała przemieszczaniu się wirów w kierunku przepływu następuje przeniesienie części energii zaburzeń wirowych do przepływu głównego. Efektem tego jest zmniejszenie *koncentracji wirowości* w warstwie ścinania, czego konsekwencją jest, zgodnie z warunkiem Kutty-Zukowskiego, zmniejszenie amplitudy prędkości zaburzeń akustycznych. W drugiej części okresu drgań akustycznych, kiedy prędkość zaburzeń akustycznych jest skierowana na zewnątrz odnogi, siła Coriolisa powoduje zwiększenie prędkości unoszenia wirów. Zgodnie z tym co powiedziano powyżej, w takim przypadku następuje przeniesienie energii z przepływu głównego do zaburzeń wirowych, czemu towarzyszy wzrost *koncentracji wirowości* w warstwie ścinania, a tym samym wzrost amplitudy zaburzeń akustycznych. Ponieważ proces wymiany energii jest kontrolowany przez oscylacje akustyczne, częstotliwość spływu wirów odpowiada częstotliwości drgań akustycznych.

Amplitudę oscylacji akustycznych w odnodze wyznacza warunek równowagi pomiędzy energią przejętą przez zaburzenia

wirowe z przepływu głównego a stratami wynikającymi z:

- przeniesienia energii zaburzeń wirowych do przepływu głównego w pierwszym okresie drgań,
- uniesienia energii przez wiry poza wylot odnogi,
- wypromieniowania energii akustycznej do rurociągu głównego przez źródło w wylocie odnogi".

Zasadnicza różnica pomiędzy przypadkiem wzbudzenia oscylacji akustycznych we wnęce przez przepływ muskający a zjawiskiem generacji dźwięku w pojedynczej odnodze rurociągu polega na tym, że w rurociągu struktura przepływu głównego oraz warstwy scinania w istotny sposób zależy od rodzaju rurociągu (rurociąg prostokątny lub kołowy) oraz jego wymiarów wewnętrznych. Stąd dla rurociągu o przekroju kołowym parametrem decydującym o wzbudzeniu oscylacji akustycznych jest stosunek średnicy odnogi s do średnicy rurociągu S . Z danych eksperymentalnych dostępnych w literaturze wynika, że maksymalna wartość s/S , przy której występują oscylacje, wynosi ok. 0.55 [3].

Dużo bardziej złożony mechanizm generacji dźwięku występuje w rurociągu z wieloma odnogami, ponieważ w tym przypadku dodatkowym czynnikiem mającym wpływ na strukturę i zaburzenia warstwy granicznej w pojedynczej odnodze są zaburzenia akustyczne wytwarzane przez pozostałe odnogi. Parametrem decydującym o silnym sprzężeniu zwrotnym pomiędzy odnogami jest stosunek l/s , gdzie l to odległość między odnogami. Dla dwóch odnóg maksymalna wartość tego stosunku określona eksperymentalnie wynosi ok. 6 [6].

Celem niniejszej pracy były badania eksperymentalne zjawiska wytwarzania oscylacji akustycznych w rurociągu z zamkniętymi odnogami dla stosunku średnicy s odnogi do średnicy S rurociągu większej niż graniczna wartość 0.55. Przedmiotem badań były pomiary częstotliwości i poziomu oscylacji akustycznych w trzech różnych układach doświadczalnych:

1. rurociąg z pojedynczą odnogą,
2. rurociąg z dwoma różnie usytuowanymi odnogami,
3. rurociąg z trzema odnogami.

Dla układu 3 celem pomiarów było znalezienie warunków, przy

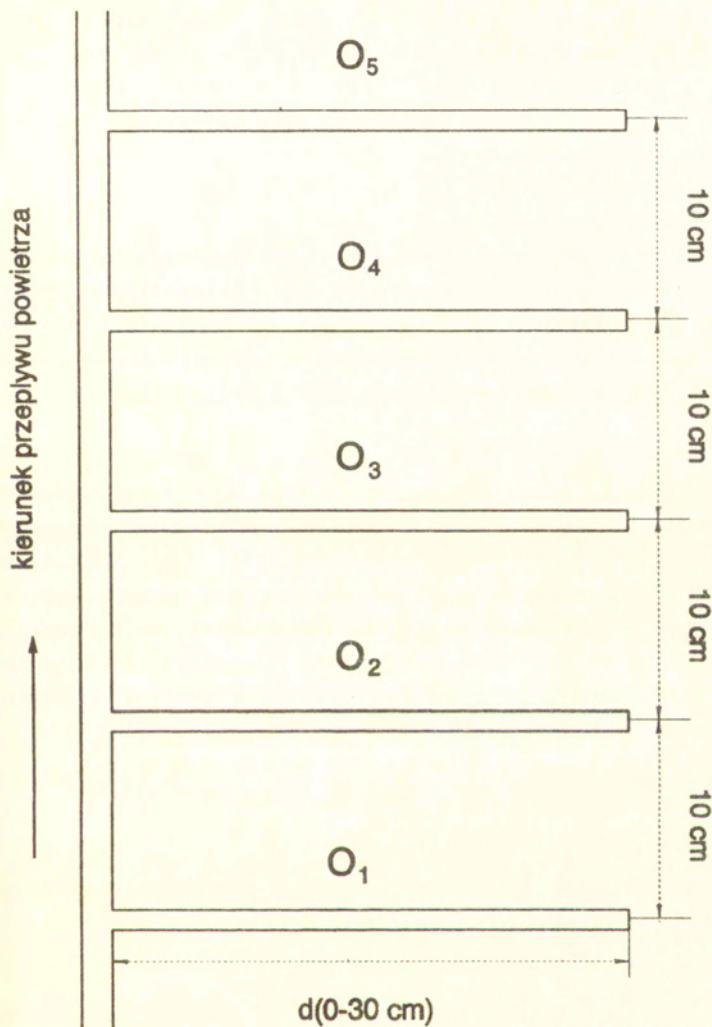
których za pomocą jednej odnogi można wytłumić oscylacje akustyczne wytwarzane przez dwie odnogi.

2. STANOWISKO BADAWCZE, METODY POMIAROWE I APARATURA

W badaniach wykorzystywano instalację przepływową znajdującą się w Zakładzie Aeroakustyki IPPT PAN. Z dyszy wylotowej powietrze było doprowadzane elastycznym przewodem wysokociśnieniowym do laboratoryjnego układu rurociągu z zamkniętymi odnogami (rys. 1). Układ ten składał się z rury mosiężnej o długości 1.5 m i średnicy $S = 1.6$ cm, w której wykonano 5 otworów gwintowanych rozmieszczonych co 10 cm. W otwory te wkręcano zamknięte odnogi o regulowanej długości i średnicy $s = 1$ cm, oznaczone na rys. 1 jako Q_n , $n = 1-5$. Stosunek s/S w analizowanym przypadku wynosił więc 0.625, co jest wartością większą niż wartość graniczna s/S wyznaczona eksperymentalnie w pracy [3]. Długość prostoliniowego odcinka rurociągu głównego wynosiła 4.6 m, łącznie z elastycznym doprowadzeniem i odprowadzeniem z układu laboratoryjnego lub 2.1 m, gdy wyeliminowano elastyczny przewód odprowadzający powietrze.

Pomiary częstotliwości i poziomu oscylacji akustycznych wykonywano w odległości 30 cm od wylotu rurociągu głównego. Badania prowadzono przy użyciu systemu pomiarowego, składającego się z wąskopasmowego analizatora widma typu 2033 firmy Brüel & Kjær, mikrokomputera pełniącego funkcję kontrolera systemu oraz drukarki STAR SG-10. System ten umożliwia kopiowanie na drukarkę ekranu analizatora 2033, wyznaczenie widma sygnału akustycznego w pasmach tercjowych oraz obliczenie poziomu całkowitego.

W analizie wąskopasmowej sygnałów akustycznych wykorzystywano liniowe uśrednianie 16 widm, a także funkcję analizatora "Hold max" umożliwiającą zapamiętanie maksymalnych wartości ciśnienia akustycznego dla każdej z częstotliwości generowanego sygnału. W szczególnych przypadkach korzystano z funkcji analizatora "Zoom" (lupa), pozwalającej na precyzyjną obserwację ewolucji widma sygnału w bardzo wąskim zakresie częstotliwości.



Rys. 1. Laboratoryjny układ rurociągu: rurociąg główny o średnicy wewnętrznej $S = 1.6 \text{ cm}$, odnogi $O_1 - O_5$ o średnicy wewnętrznej 1 cm i regulowanej długości d : $0-30 \text{ cm}$.

Do pomiaru maksymalnej prędkości u_{\max} wpływającego strumienia powietrza wykorzystywano układ pomiarowy, składający się z rurki Pitota o średnicy 1.6 mm i manometru cieczowego w kształcie litery U. Ponieważ manometr był napełniony wodą, więc prędkość u_{\max} obliczano ze wzoru [14]

$$u_{\max} [\text{m/s}] = 4\sqrt{h} , \quad (1)$$

gdzie $h[\text{mm}]$ jest różnicą poziomów wody w obu odnogach.

Wszystkie badania wykonywano przy maksymalnym wydatku instalacji przepływowej, co dla przyjętej w układzie pomiarowym średnicy wewnętrznej rurociągu głównego, odpowiadało prędkości $u_{\max} = 70 \text{ m/s}$. Dla liczby Reynoldsa $Re < 1160$

$$Re = au_{\max}/\nu , \quad (2)$$

gdzie $a = 0.5S$ to promień rurociągu oraz $\nu = 0.147 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ to współczynnik lepkości kinematycznej, struktura przepływu głównego w rurociągu jest laminarna [15]. Dla określonej doświadczalnie prędkości $u_{\max} = 70 \text{ m/s}$ i średnicy rurociągu $S = 1.6 \text{ cm}$ liczba Reynoldsa przyjmuje wartość 38095, co oznacza, że przepływ w rurociągu głównym posiada strukturę turbulentną. Przy takiej strukturze przepływu rozkład prędkości głównej w przekroju poprzecznym rurociągu opisuje zależność [16]

$$u(r') = u_0 \left(\frac{7r'}{72\theta} \right)^{1/7} , \quad (3)$$

gdzie u_0 to prędkość odniesienia, θ to grubość odpowiadająca stracie pędu w warstwie przyściennej [16]

$$\theta = \int_0^{\infty} \frac{u}{u_{\max}} \left[1 - \frac{u}{u_{\max}} \right] dr' , \quad (4)$$

oraz r' to odległość wzdłuż promienia rurociągu liczona od jego ściany, $0 \leq r' \leq a$. Z zależności (3) wynika, że

$$u_{\max} = u(r' = a) = u_0 \left(\frac{7a}{72\theta} \right)^{1/7} , \quad (5)$$

czyli po wyeliminowaniu prędkości u_0 ze wzoru (3) oraz zamianie zmiennych $r = a - r'$ uzyskuje się

$$u(r) = u_{\max} \left[1 - \frac{r}{a} \right]^{1/7}, \quad (6)$$

gdzie r to odległość wzdłuż promienia rurociągu liczona od jego osi. Na podstawie (6) można określić wydatek przepływu Q

$$Q = \int_0^{2\pi} \int_0^a u(r) r dr d\varphi, \quad (7)$$

gdzie φ to zmienna kątowa w układzie współrzędnych cylindrycznych, a stąd po obliczeniach średnią prędkość przepływu U w rurociągu

$$U = \frac{Q}{\pi a^2} = \frac{49}{60} u_{\max}. \quad (8)$$

W analizowanym przypadku daje to prędkość średnią przepływu $U = 57$ m/s. Oznacza to, że zaburzenia akustyczne propagujące w rurociągu w kierunku przeciwnym do przepływu rozchodzą się z prędkością średnią $c_1 = c_0 - U = 283$ m/s (przyjęto $c_0 = 340$ m/s, co odpowiada temperaturze powietrza 15°C), a propagujące się w kierunku zgodnym z przepływem z prędkością średnią $c_2 = c_0 + U = 397$ m/s.

3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

3.1. RUROCIĄG Z POJEDYNCZĄ ODNOGĄ

W pierwszym etapie badań przeprowadzono pomiary częstotliwości i poziomu oscylacji akustycznych wytwarzanych w rurociągu z pojedynczą odnogą. Rurociągu główny miał w tym przypadku długość 4.6 m. W dalszej części pracy układ ten będzie określany jako "rurociąg długi".

W drugim etapie badań wykonano identyczne pomiary w układzie, w którym zmniejszono długość rurociągu głównego do 2.1 m. Taki układ pomiarowy będzie w pracy określany jako

"rurociąg krótki".

Celem pomiarów było zbadanie, jaki wpływ na częstotliwość i poziom oscylacji ma położenie odnogi względem wylotu rurociągu głównego. W obu przypadkach, dla rurociągu długiego i krótkiego, badania wykonano dla wszystkich pięciu odnóg oznaczonych na rys. 1 jako O_1 , O_2 , O_3 , O_4 i O_5 . Wszystkie pomiary przeprowadzono dla maksymalnej prędkości przepływu powietrza w rurociągu głównym (prędkość mierzona w osi rurociągu wynosiła $U_{\max} = 70$ m/s), a wielkością regulowaną była długość d odnogi.

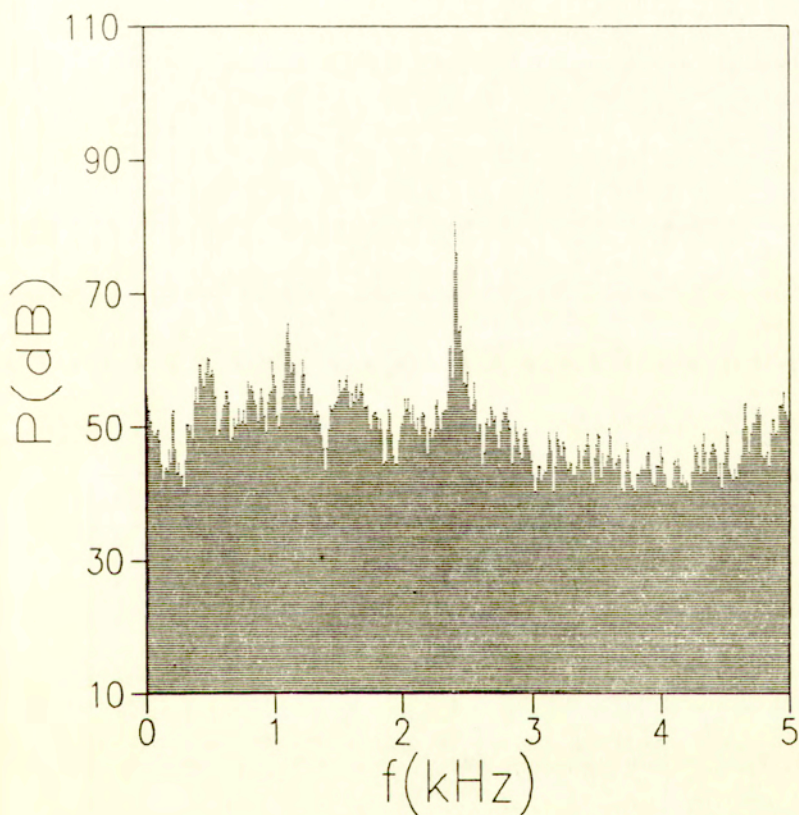
3.1.1. RUROCIĄG DŁUGI

Na rys. 2 przedstawiono przykładowe widmo sygnału akustycznego zarejestrowanego przez mikrofon w punkcie pomiarowym przy wlocie rurociągu głównego, a na rys. 3 widmo tego sygnału w pasmach tercjowych w zakresie częstotliwości do 22.4 kHz. Z rysunków tych wynika, że w rurociągu długim z pojedynczą odnogą poziom oscylacji akustycznych jest stosunkowo niski, rzędu 80 dB, natomiast poziom całkowity hałasu nie przekracza 85 dB. Jest to zgodne z obserwacjami eksperymentalnymi innych autorów, którzy stwierdzili niski poziom oscylacji akustycznych przy stosunku średnicy odnogi s do średnicy kanału S rzędu 0.6 [3].

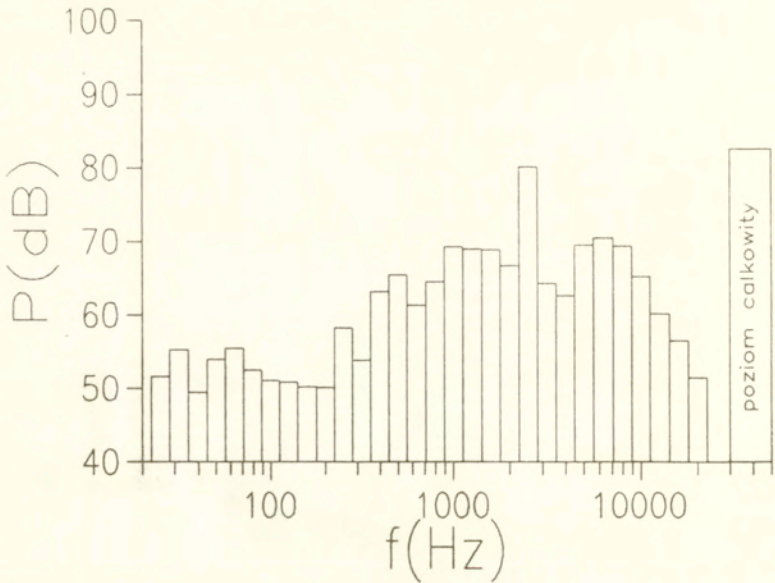
Dla wszystkich pięciu odnóg pełen obraz zmian częstotliwości i poziomu oscylacji w funkcji długości d odnogi uzyskano wykorzystując funkcję "Hold max" analizatora 2033. Przykładowe widmo generowanego sygnału w paśmie 1.6-3.6 kHz przedstawiono na rys. 4, a zestaw charakterystycznych częstotliwości w Tabeli 1. Na rys. 5 przedstawiono dla porównania widmo sygnału generowanego w rurociągu długim bez odnogi.

We wszystkich analizowanych przypadkach stwierdzono, że ten sam charakter zmian częstotliwości przy zmianie długości d występuje przy określonych czterech zakresach wartości d :

- I. 2 - 3.8 cm,
- II. 8.2 - 11 cm,
- III. 13.8 - 18.5 cm,
- IV. 20 - 26 cm.

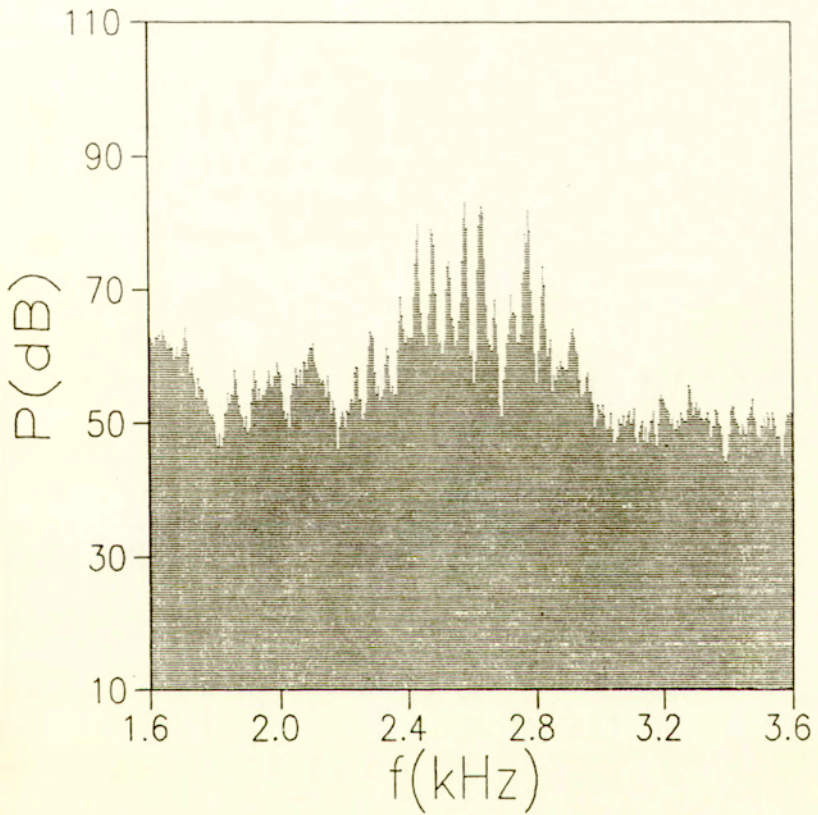


Rys. 2. Przykładowe widmo sygnału akustycznego generowanego w rurociągu z pojedynczą odnogą.

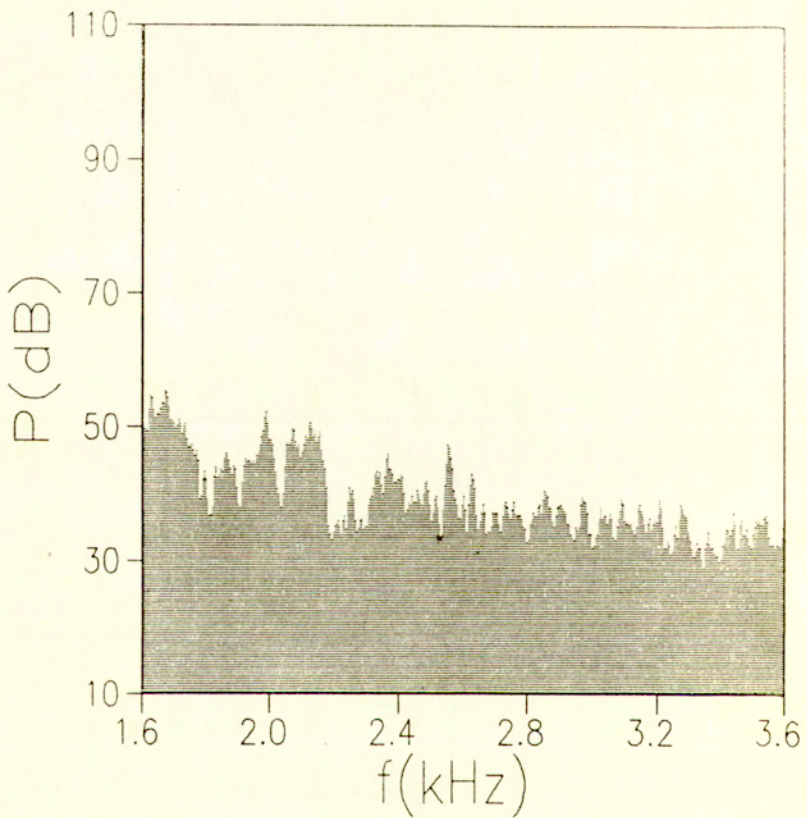


f_t [Hz]	P [dB]	f_t [Hz]	P [dB]	f_t [Hz]	P [dB]
25	51.6	250	58.3	2500	80.2
31.5	55.3	315	53.8	3150	64.3
40	49.4	400	63.2	4000	62.7
50	53.9	500	65.5	5000	69.6
63	55.5	630	61.3	6300	70.5
80	52.5	800	64.5	8000	69.4
100	51	1000	69.3	10000	65.2
125	50.8	1250	69	12500	60.2
160	50.2	1600	68.8	16000	56.5
200	50.1	2000	66.7	20000	51.5
poziom całkowity w paśmie 22.4-22400 Hz 82.6 dB					

Rys. 3. Widmo sygnału z rys. 2 w pasmach tercjowych w zakresie częstotliwości do 22.4 kHz oraz zestawienie wartości poziomu dźwięku P w tych pasmach, łącznie z poziomem całkowitym sygnału; f_t to częstotliwość środkowa tercji.



Rys. 4. Widmo sygnału akustycznego generowanego w rurociągu długim z pojedynczą odnogą O_1 dla długości d z zakresu I ($d = 2 - 3.8$ cm).



Rys. 5. Widmo sygnału akustycznego generowanego w rurociągu długim bez odnogi.

TABLICA 1

Częstotliwości f [Hz] i poziomy P [dB] (liczby w nawiasie) składowych dyskretnych dla rurociągu długiego z jedną odnogą O_1 , O_2 , O_3 , O_4 i O_5 .

O_1	O_2	O_3	O_4	O_5
2235 (57)	2300 (62)	2205 (60)	2235 (61)	2205 (58)
2280 (63)	2350 (68)	2275 (65)	2285 (75)	2290 (70)
2330 (60)	2395 (69)	2330 (64)	2340 (72)	2365 (82)
2375 (68)	2445 (68)	2375 (74)	2390 (73)	2415 (85)
2430 (78)	2500 (81)	2420 (82)	2450 (80)	2475 (81)
2470 (78)	2545 (84)	2480 (81)	2500 (83)	2530 (77)
2525 (73)	2595 (70)	2530 (76)	2550 (84)	2585 (70)
2575 (81)	2655 (73)	2580 (75)	2605 (74)	2640 (74)
2625 (81)	2705 (78)	2635 (79)	2655 (65)	2705 (70)
2655 (67)	2750 (76)	2685 (70)	2715 (69)	2750 (74)
2715 (68)	2900 (66)	2735 (70)	2765 (74)	2810 (60)
2770 (80)		2840 (60)	2810 (63)	2850 (58)
2815 (72)		2880 (60)	2910 (57)	2920 (58)
2910 (62)				

Dla długości odnogi d innej niż z przedziałów I-IV nie zachodzi generacja oscylacji akustycznych.

Należy zwrócić uwagę na fakt, iż minimalna i maksymalna wartość d w przedziałach II-IV odpowiada w przybliżeniu nieparzystym wielokrotnościom minimum d (5,7,9) i maksimum d (3,5,7) z przedziału I. Wynika stąd, że częstotliwości oscylacji akustycznych obserwowane w zakresach II-IV to nieparzyste harmoniczne częstotliwości z zakresu I. Oznacza to, że zamknięta odnoga umieszczona w ścianie rurociągu powoduje wzbudzenie oscylacji dla swoich częstotliwości własnych, wynikających z warunku rezonansu dla układu ćwierćfalowego.

Osobnym zagadnieniem wymagającym dyskusji jest fakt

występowania w każdym zakresie wartości d szeregu częstotliwości dyskretnych przyjmujących wartości z tego samego przedziału, ale różnych dla innego usytuowania odnogi względem wylotu rurociągu głównego (Tabela 1). Zjawisko to można wyjaśnić następująco. Sygnał akustyczny generowany w wylocie odnogi propaguje się wewnątrz rurociągu w kierunku zgodnym i przeciwnym do przepływu powietrza. Na obu końcach prostoliniowego odcinka rurociągu występują odbicia sygnału. Oba sygnały mają inną fazę i amplitudę niż sygnał padający. Propagują się one następnie z powrotem w kierunku odnogi i docierają do jej wylotu z fazą uzależnioną od położenia odnogi w rurociągu głównym. Powstające w ten sposób sprzężenie zwrotne wymusza generację sygnału akustycznego o określonej częstotliwości.

Wpływ tego sprzężenia na proces generacji dźwięku doskonale ilustrują rezultaty badań dla rurociągu krótkiego przedstawione w następnym rozdziale pracy. Zbadano tam wpływ silnie odbijającego wylotu rurociągu na wytwarzanie oscylacji akustycznych.

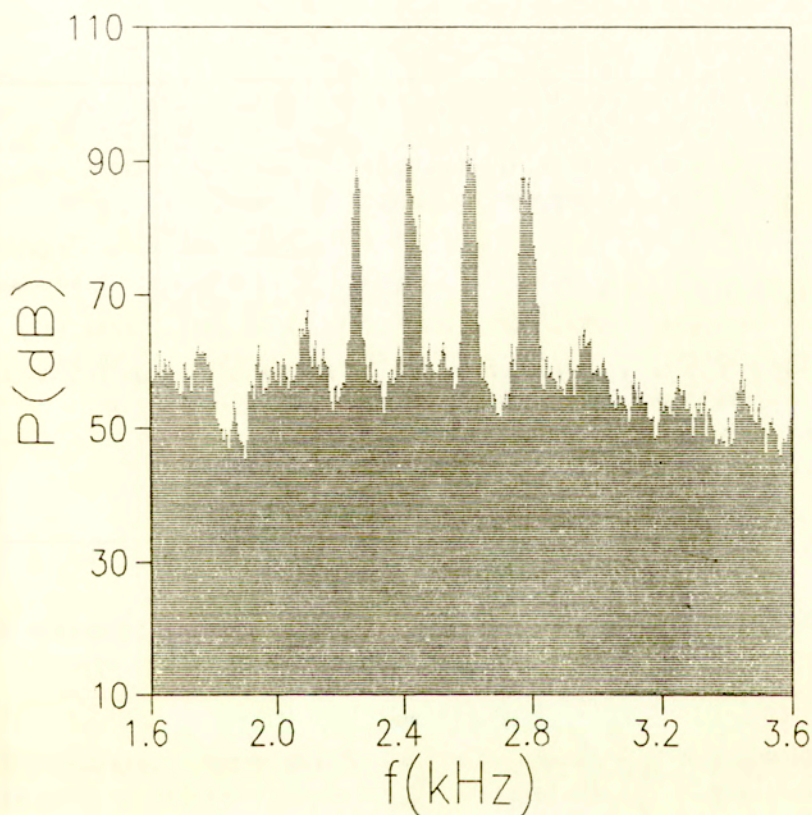
3.1.2. RUROCIĄG KRÓTKI

Na rys. 6 przedstawiono przykładowe widmo sygnału akustycznego wytwarzanego w rurociągu krótkim z odnogami O_1 , O_2 , O_3 , O_4 i O_5 . Parametrem regulowanym była długość odnogi d o wartościach z zakresu I (2-3.8 cm). Z porównania widm z rys. 4 i 6 wynika, że na częstotliwość i poziom oscylacji akustycznych duży wpływ ma odległość wylotu rurociągu od odnogi, a więc amplituda i faza fal akustycznych odbitych od wylotu.

Potwierdzenie tej hipotezy można łatwo uzyskać, obliczając czas propagacji sygnału akustycznego pomiędzy odnogą i wylotem rurociągu. Jeżeli odległość pomiędzy odnogą a wylotem wynosi L , to czas t_1 w jakim sygnał akustyczny propagujący się od odnogi do wylotu dotrze do wylotu wynosi

$$t_1 = L / (c_0 + U) , \quad (9)$$

gdzie $c_0 = 340$ m/s to prędkość dźwięku, natomiast $U = 57$ m/s to średnia prędkość przepływu w rurociągu (rozdział 2).



Rys. 6. Widmo sygnału akustycznego generowanego w rurociągu krótkim z pojedynczą odnogą O_1 dla długości d z zakresu I ($d = 2 - 3.8$ cm).

TABLICA 2

Częstotliwości f [Hz], poziomy P [dB] (liczby w nawiasie) oraz parametr K (liczby poniżej) składowych dyskretnych dla rurociągu krótkiego z jedną odnogą O_1, O_2, O_3, O_4 i O_5 .

O_1 $L = 95$ cm	O_2 $L = 85$ cm	O_3 $L = 75$ cm	O_4 $L = 65$ cm	O_5 $L = 55$ cm
2260 (88) 12.99	2135 (77) 10.98	2205 (92) 10.00	2045 (77) 8.05	2095 (92) 6.97
2425 (91) 13.94	2330 (93) 11.99	2400 (90) 10.89	2280 (95) 8.97	2400 (95) 7.99
2605 (91) 14.98	2525 (93) 12.99	2640 (90) 11.98	2540 (94) 9.99	2700 (87) 8.99
2775 (88) 15.96	2705 (84) 13.92	2860 (82) 12.98	2795 (85) 11.00	
	2920 (72) 15.02			

Po odbiciu od wylotu rurociągu sygnał akustyczny propaguje się pod prąd, a więc czas w jakim osiągnie wylot odnogi wynosi

$$t_2 = L/(c_0 - U) . \quad (10)$$

Stosunek K sumy czasów t_1 i t_2 do okresu drgań akustycznych $T = 1/f$, gdzie f to częstotliwość oscylacji, określa przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałem generowanym w wylocie odnogi a sygnałem odbitym, zamykającym pętlę sprzężenia zwrotnego

$$K = fL \left[\frac{1}{c_0 - U} + \frac{1}{c_0 + U} \right] . \quad (11)$$

Jak wynika z Tablicy 2, dla wszystkich składowych dyskretnych parametr K przyjmuje w przybliżeniu wartości całkowite, co oznacza, że sygnał zwrotny jest w fazie z sygnałem generowanym

w wylocie odnogi.

3.2. RUROCIĄG Z DWOMA ODNOGAMI

Badania zjawiska wzbudzenia oscylacji w rurociągu z dwoma odnogami przeprowadzono w układzie pomiarowym, w którym długość prostoliniowego układu rurociągu wynosiła 4.6 m (rurociąg długi). Celem tych badań było stwierdzenie, czy w porównaniu do układu z pojedynczą odnogą (rozdział 3.1.1) wzajemne oddziaływanie pomiędzy dwoma wnękami może spowodować zwiększenie lub zmniejszenie amplitudy oscylacji akustycznych.

Z uwagi na dużą ilość możliwych kombinacji usytuowania i długości dwóch odnóg, w badaniach ograniczono się do dwóch wybranych grup układów:

Grupa pierwsza

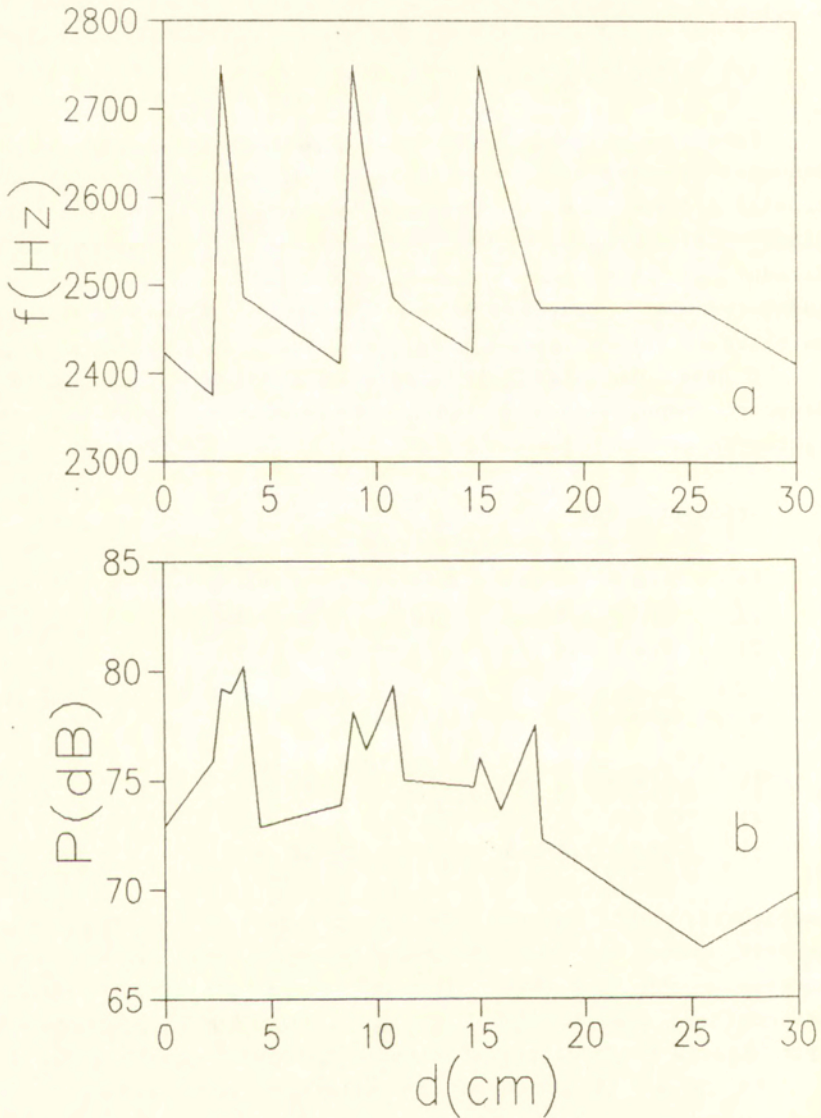
- 1) $O_1(d = 3.4 \text{ cm}) - O_2(d = 0 - 30 \text{ cm}),$
- 2) $O_1(d = 3.4 \text{ cm}) - O_3(d = 0 - 30 \text{ cm}),$
- 3) $O_1(d = 3.4 \text{ cm}) - O_4(d = 0 - 30 \text{ cm}).$

Grupa druga

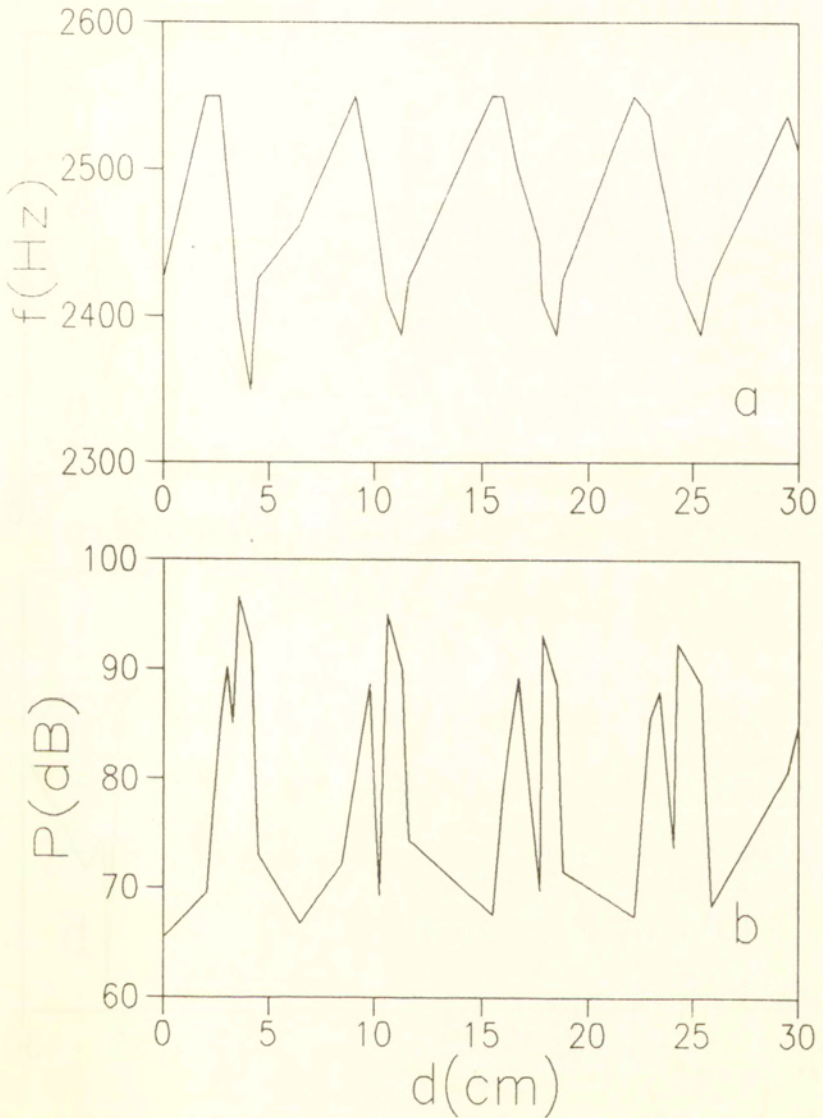
- 1) $O_5(d = 3.4 \text{ cm}) - O_2(d = 0 - 30 \text{ cm}),$
- 2) $O_5(d = 3.4 \text{ cm}) - O_3(d = 0 - 30 \text{ cm}),$
- 3) $O_5(d = 3.4 \text{ cm}) - O_4(d = 0 - 30 \text{ cm}).$

Zastosowany wybór układów nie był przypadkowy. Należy bowiem zwrócić uwagę na fakt, że połączenie układów o tym samym numerze z obu grup daje układ z trzema odnogami, w którym zmienna jest długość odnogi O_2 , O_3 lub O_4 . Wyniki pomiarów dla tych układów zostaną przedstawione w kolejnym rozdziale pracy.

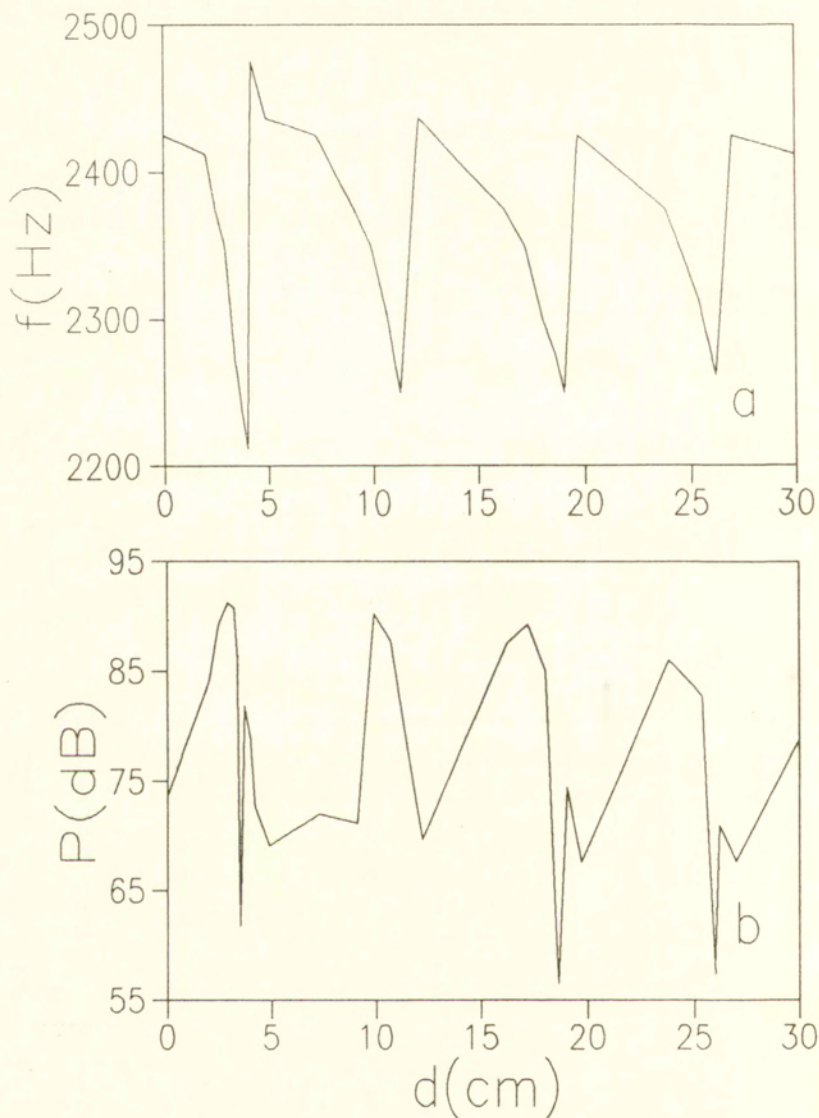
Na rys. 7-12 przedstawiono zależność częstotliwości f i poziomu P oscylacji akustycznych dla układu rurociągu z dwoma odnogami. Wielkością regulowaną jest długość d odnóg O_2 , O_3 i O_4 . Z zestawionych wykresów wynika, że charakter zmian częstotliwości f we wszystkich badanych układach jest bardzo podobny (rys. 7a - 12a). Dla $d = 0$ wielkość f określa wartość



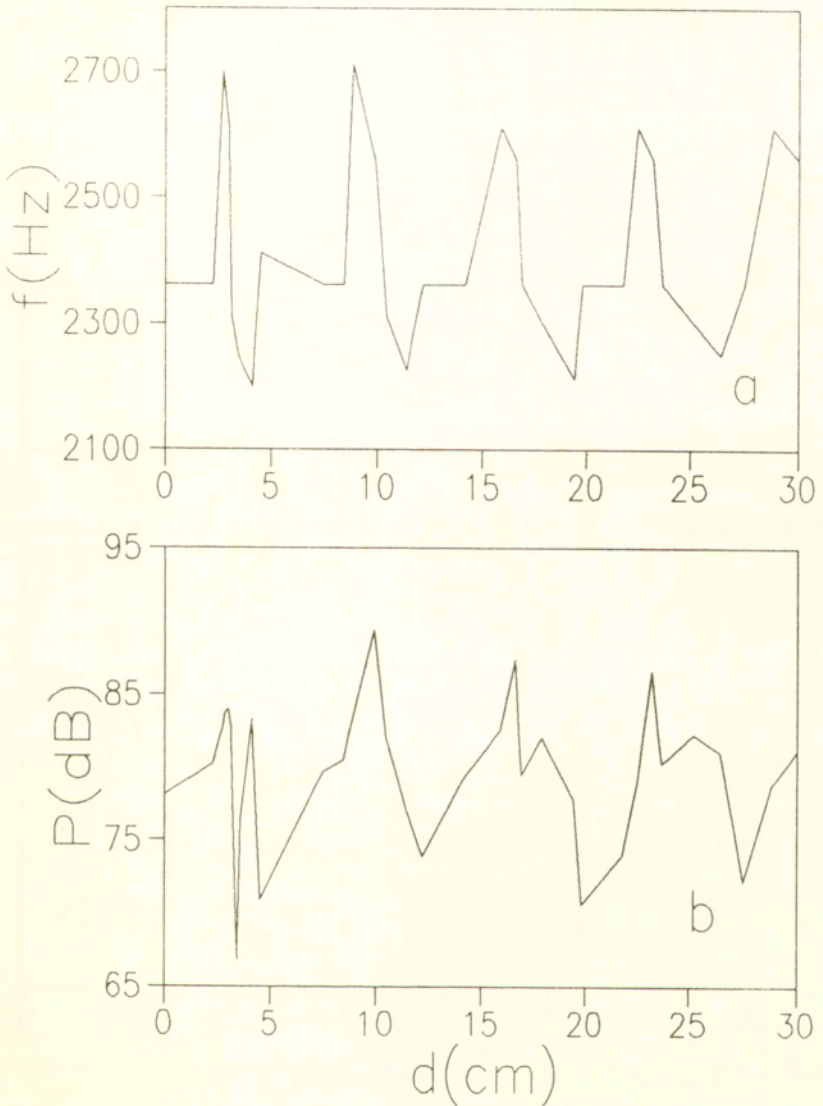
Rys. 7. a) Zależność częstotliwości f i b) poziomu P oscylacji akustycznych od długości d odnogi w układzie rurociągu z dwoma odnogami $O_1(d = 3.4 \text{ cm}) - O_2(d = 0 - 30 \text{ cm})$.



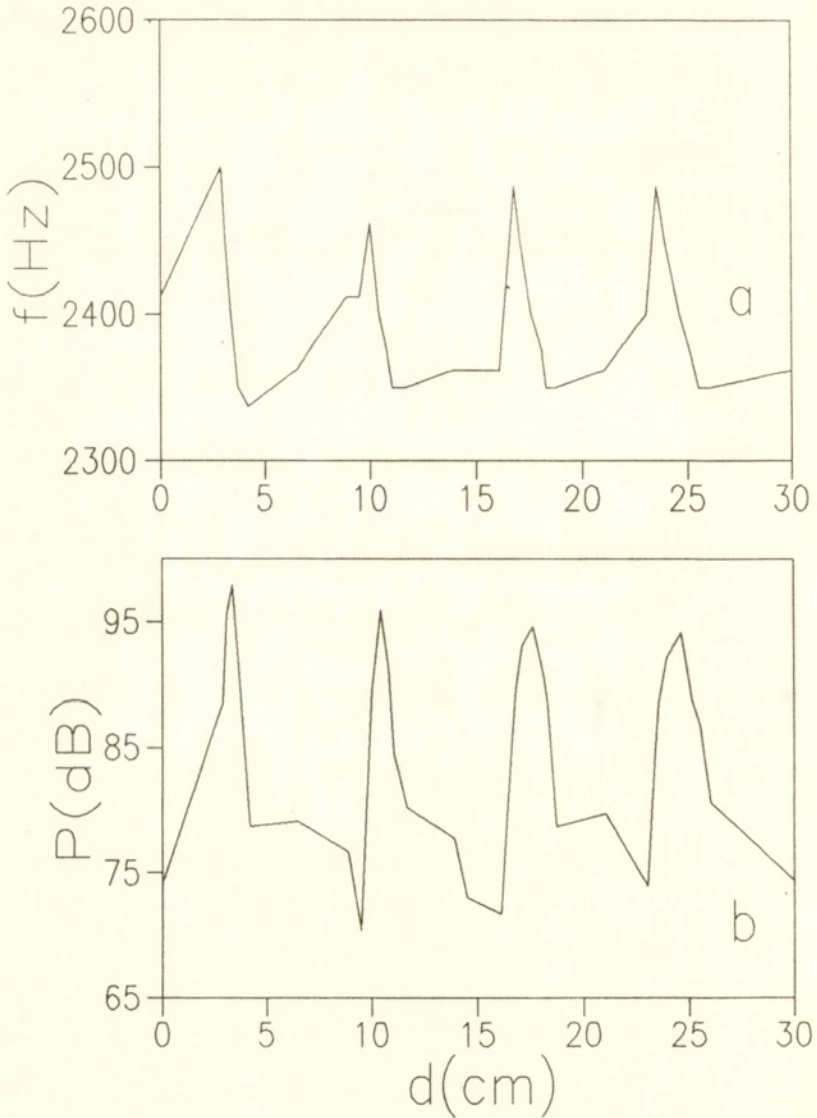
Rys. 8. a) Zależność częstotliwości f i b) poziomu P oscylacji akustycznych od długości d odnogi w układzie rurociągu z dwoma odnogami O_1 ($d = 3.4$ cm) - O_3 ($d = 0 - 30$ cm).



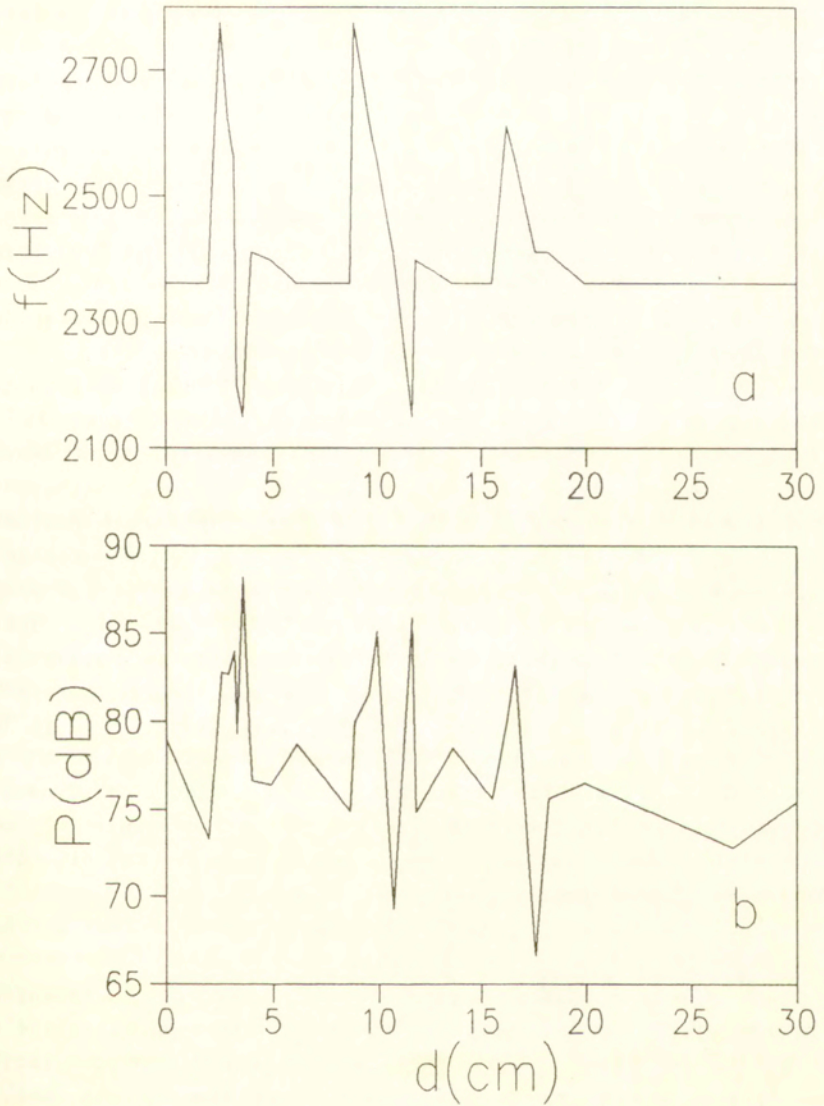
Rys. 9. a) Zależność częstotliwości f i b) poziomu P oscylacji akustycznych od długości d odnogi w układzie rurociągu z dwoma odnogami $O_1(d = 3.4 \text{ cm}) - O_4(d = 0 - 30 \text{ cm})$.



Rys. 10. a) Zależność częstotliwości f i b) poziomu P oscylacji akustycznych od długości d odnogi w układzie rurociągu z dwoma odnogami O_1 ($d = 3.4$ cm) - O_2 ($d = 0 - 30$ cm).



Rys. 11. a) Zależność częstotliwości f i b) poziomu P oscylacji akustycznych od długości d odnogi w układzie rurociągu z dwoma odnogami Q_5 ($d = 3.4$ cm) - Q_3 ($d = 0 - 30$ cm).



Rys. 12. a) Zależność częstotliwości f i b) poziomu P oscylacji akustycznych od długości d odnogi w układzie rurociągu z dwoma odnogami $O_5(d = 3.4 \text{ cm}) - O_4(d = 0 - 30 \text{ cm})$.

częstotliwości oscylacji akustycznych w przypadku układu rurociągu z pojedynczą odnogą O_1 lub O_5 . Wzrost d powoduje gwałtowne zwiększenie częstotliwości f a następnie przy dalszym zwiększaniu wartości d jej szybki spadek. Jedyne wyjątek od tej zasady występuje dla układu $O_1(d = 3.4 \text{ cm}) - O_4(d = 0-30 \text{ cm})$, w którym częstotliwość f najpierw maleje a potem narasta przy wzroście długości odnogi od wartości początkowej $d = 0$ (rys. 9a). Należy zwrócić uwagę na fakt, iż zmiany f o podobnym charakterze występują w każdym przypadku dla wartości d z zakresów I-IV, gdy w rurociągu z pojedynczą odnogą następuje wzbudzenie oscylacji akustycznych (zob. rozdział 3.1.1).

Podobną prawidłowość można zaobserwować również analizując zmiany poziomu P dla każdego z badanych układów (rys. 7b - 12b). Porównując uzyskane wykresy można zauważyć, że w dwóch przypadkach (układy $O_1 - O_3$ i $O_5 - O_3$, rys. 8b i 11b) następuje przy pewnych określonych wartościach d znaczny wzrost poziomu oscylacji (rzędu 20-30 dB) w porównaniu z przypadkiem rurociągu z pojedynczą odnogą (na rysunkach odpowiada to wartości P przy $d = 0$). W tych dwóch przypadkach wartość minimalna P jest bardzo zbliżona do wielkości P dla rurociągu z pojedynczą odnogą. Inaczej przedstawia się to dla pozostałych czterech układów, w których wielkością zmienną jest długość odnogi O_2 lub O_4 (rys. 7b, 9b, 10b, 12b). Tutaj maksymalna wielkość P jest tylko o kilkanaście dB większa niż dla układu z pojedynczą odnogą, natomiast wartość minimalna w odróżnieniu od poprzednich dwóch układów jest znacznie mniejsza niż dla rurociągu z pojedynczą odnogą.

Przeprowadzona analiza wyników badań pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

- 1) Znaczne zmiany częstotliwości f drgań akustycznych występują w takich zakresach wartości d , w których następuje w przypadku rurociągu z pojedynczą odnogą wzbudzenie oscylacji akustycznych. Oznacza to, że zmiany f są efektem wzajemnego oddziaływania sygnałów akustycznych powstających w obu odnogach.

- 2) We wszystkich badanych układach obecność drugiej odnogi może dla określonych jej długości spowodować znaczny wzrost

poziomu oscylacji. Dotyczy to szczególnie układów, w których regulowana była długość odnogi O_3 .

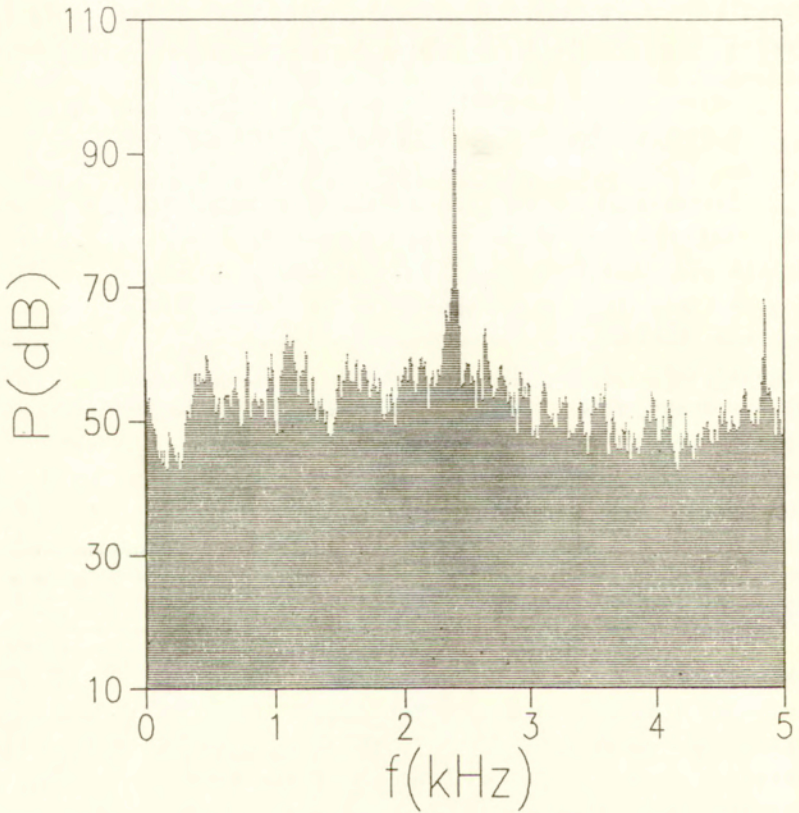
3) W przypadku, gdy wielkością zmienną była długość odnogi O_2 lub O_4 poziom P oscylacji może być znacznie mniejszy niż dla układu z pojedynczą odnogą. Oznacza to, że oscylacje w rurociągu z pojedynczą odnogą można wyraźnie zmniejszyć wprowadzając do układu dodatkową odnogę o odpowiednio dobranej długości.

3.3. RUROCIĄG Z TRZEMA ODNOGAMI

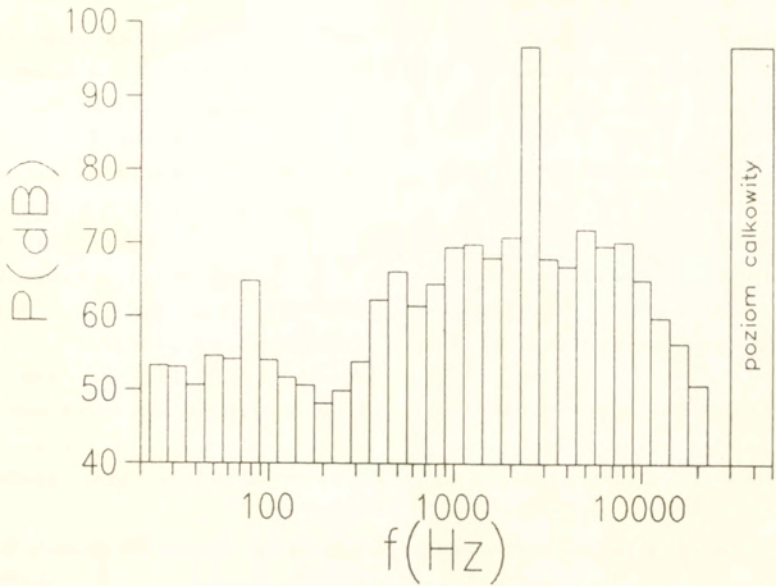
Zasadniczym celem przeprowadzonych badań było wykazanie, że zastosowanie w układzie rurociągu z dwoma odnogami dodatkowej trzeciej odnogi o regulowanej długości pozwala na znaczne obniżenie generowanego hałasu. Jako układ podstawowy wybrano rurociąg z dwoma odnogami O_1 i O_5 o tych samych długościach 3.4 cm. Na rys. 13 przedstawiono widmo sygnału akustycznego generowanego w tym układzie, a na rys. 14 widmo tego sygnału w pasmach tercjowych w pełnym paśmie akustycznym. Jak widać poziom powstających oscylacji akustycznych jest znaczny, ok. 95 dB dla składowej dyskretnej. Ponieważ poziom tej składowej jest dużo większy od poziomu tła szumowego o pochodzeniu aerodynamicznym, więc całkowity hałas w paśmie do 22.4 kHz jest rzędu 97 dB.

Do wytłumienia oscylacji akustycznych powstających w układzie podstawowym wykorzystano odnogi: O_2 , O_3 i O_4 o zmiennej długości, tworząc w ten sposób trzy układy rurociągu z trzema odnogami: $O_1 - O_2 - O_5$, $O_1 - O_3 - O_5$ i $O_1 - O_4 - O_5$. W układzie $O_1 - O_3 - O_5$ odległość pomiędzy środkową a skrajnymi odnogami jest identyczna. Jest to więc układ symetryczny, w którym oddziaływanie pomiędzy parami odnóg: $O_1 - O_3$, $O_3 - O_5$, powinno być takie same. Dwa pozostałe przypadki reprezentują układy niesymetryczne.

Na rys. 15 przedstawiono zależność częstotliwości f i poziomu P oscylacji od długości d dodatkowej odnogi dla układu symetrycznego $O_1 - O_3 - O_5$. W przebiegu f w funkcji d można wyróżnić obszary znacznych zmian częstotliwości f oraz takie zakresy wartości d , dla których $f = \text{const.}$. W tym ostatnim



Rys. 13. Widmo sygnału akustycznego generowanego w układzie podstawowym $O_1(d = 3.4 \text{ cm}) - O_3(d = 3.4 \text{ cm})$.



f_t [Hz]	P [dB]	f_t [Hz]	P [dB]	f_t [Hz]	P [dB]
25	53.3	250	49.9	2500	96.8
31.5	53.1	315	53.8	3150	67.9
40	50.6	400	62.3	4000	66.8
50	54.7	500	66.1	5000	71.9
63	54.1	630	61.4	6300	69.7
80	64.8	800	64.4	8000	70.2
100	54	1000	69.5	10000	65.1
125	51.7	1250	69.9	12500	59.9
160	50.6	1600	68	16000	56.4
200	48.2	2000	70.8	20000	50.7
poziom całkowity w paśmie 22.4–22400 Hz 96.9 dB					

Rys. 14. Widmo sygnału z rys. 13 w pasmach tercjowych w zakresie częstotliwości do 22.4 kHz oraz zestawienie wartości poziomu dźwięku P w tych pasmach, łącznie z poziomem całkowitym sygnału; f_t to częstotliwość środkowa tercji.

przypadku, jak widać na rys. 15a, wartość f jest taka sama jak dla układu podstawowego $O_1 - O_5$ ($d = 0$). Zachodzi to dokładnie wtedy, gdy w odnodze O_3 nie powstają oscylacje samowzbudne, a więc jej długość d jest spoza zakresów I-IV (rozdział 3.1.1).

Wzbudzenie drgań w odnodze O_3 i ich oddziaływanie na sygnał generowany w odnogach O_1 i O_5 ma zasadniczy wpływ na poziom wypadkowych oscylacji akustycznych (rys. 15b). Możliwy jest tu przypadek znacznego wzrostu wartości P , do poziomu większego od 100 dB (długość d odnogi O_3 jest taka sama jak odnóg O_1 i O_5), ale również przypadek całkowitego wygaszenia oscylacji.

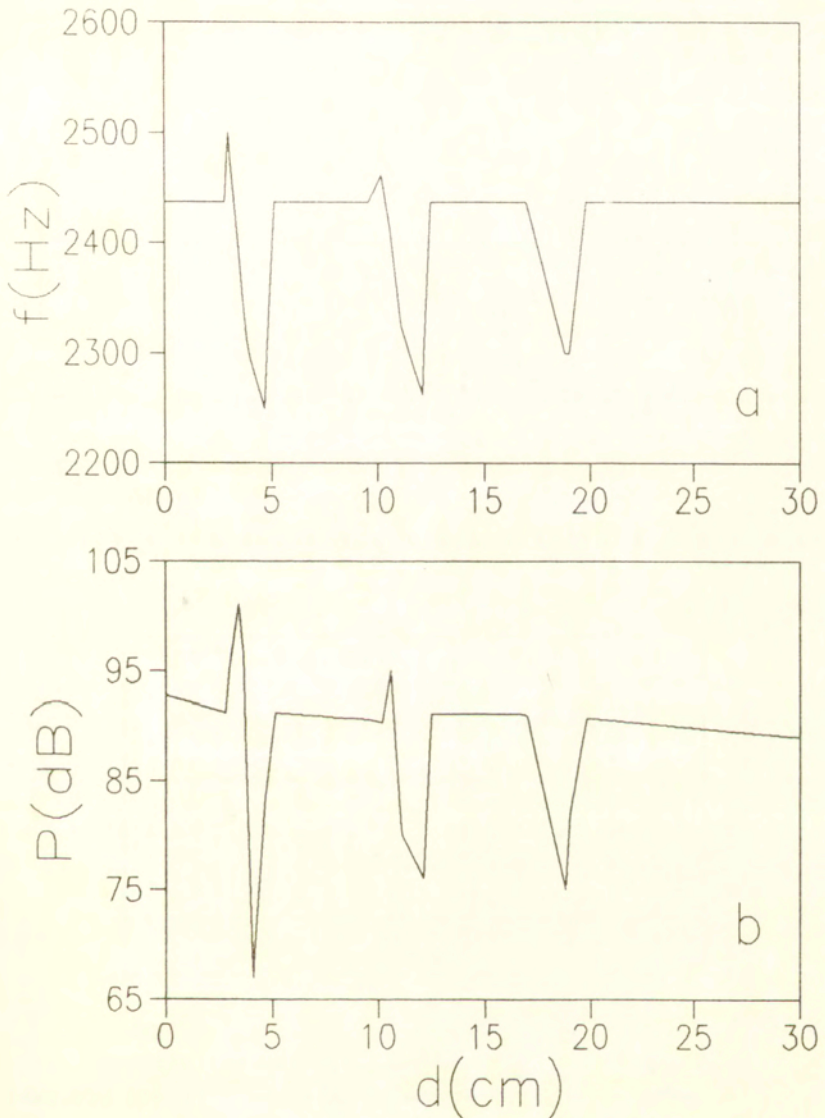
Ilustracją tego jest wykres na rys. 16, na którym przedstawiono widmo w pasmach tercjowych sygnału akustycznego w przypadku wytłumienia oscylacji. Z porównania rys. 14 z rys. 16 wynika, że efektem kompensacji drgań w układzie jest spadek całkowitego poziomu hałasu aż o 15.5 dB.

Na rys. 17 i 18 przedstawiono zależność częstotliwości f i poziomu P oscylacji od długości d dodatkowej odnogi dla układów niesymetrycznych $O_1 - O_2 - O_5$ i $O_1 - O_4 - O_5$. W obu przypadkach zmiany f i P w funkcji d wykazują bardzo duże podobieństwo. Bierze się to stąd, iż w obu układach są takie same odległości pomiędzy odnogą środkową a odnogami skrajnymi tzn. $l(O_1 - O_2) = l(O_4 - O_5)$ oraz $l(O_2 - O_5) = l(O_1 - O_4)$, gdzie l to odległość pomiędzy odnogami. Wskazuje to na ważną prawidłowość, a mianowicie, że struktura przepływu głównego w rurociągu ma pomijalny wpływ na akustyczno-przepływowe oddziaływanie pomiędzy odnogami.

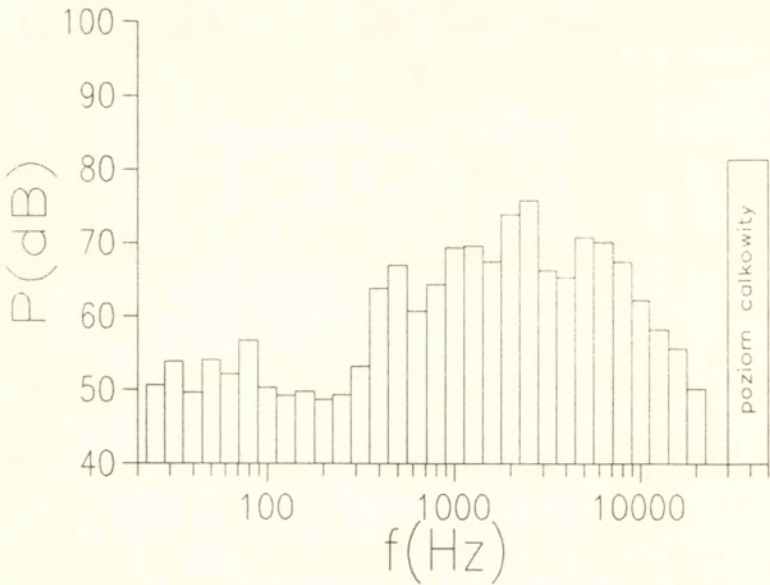
Z porównania wykresów na rys. 15b, 17b i 18b wynika, że podobnie jak dla układu symetrycznego, w układach niesymetrycznych występuje efekt tłumienia oscylacji akustycznych. Przy niesymetrii rozmieszczenia odnóg nie zachodzi jednak silne wzmocnienie amplitudy oscylacji, co było ewidentnie widoczne w przypadku układu symetrycznego.

Przeprowadzona dyskusja rezultatów badań pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

- 1) W symetrycznym układzie rurociągu z trzema odnogami możliwe jest przy spełnieniu określonych warunków znaczne wzmocnienie amplitudy oscylacji powstających w pierwotnym

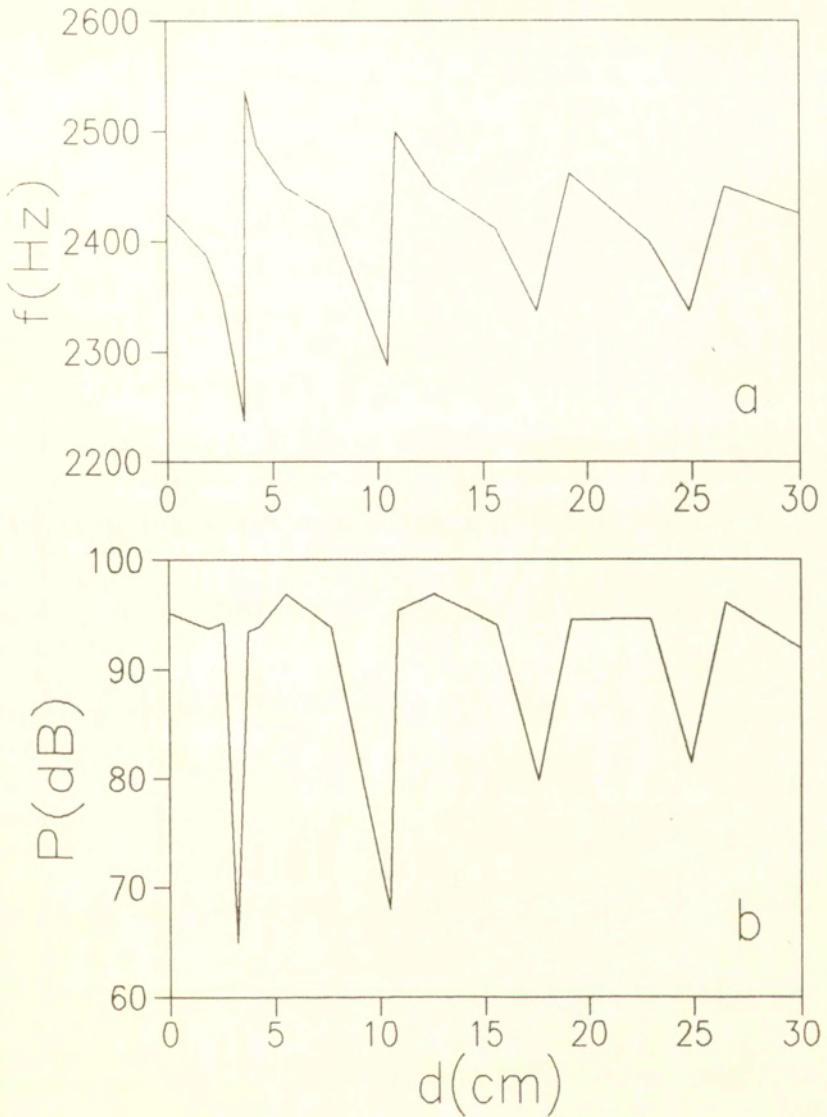


Rys. 15. a) Zależność częstotliwości f i b) poziomu P oscylacji akustycznych od długości d odnogi w symetrycznym układzie rurociągu z trzema odnogami $O_1(d = 3.4 \text{ cm}) - O_3(d = 0 - 30 \text{ cm}) - O_5(d = 3.4 \text{ cm})$.

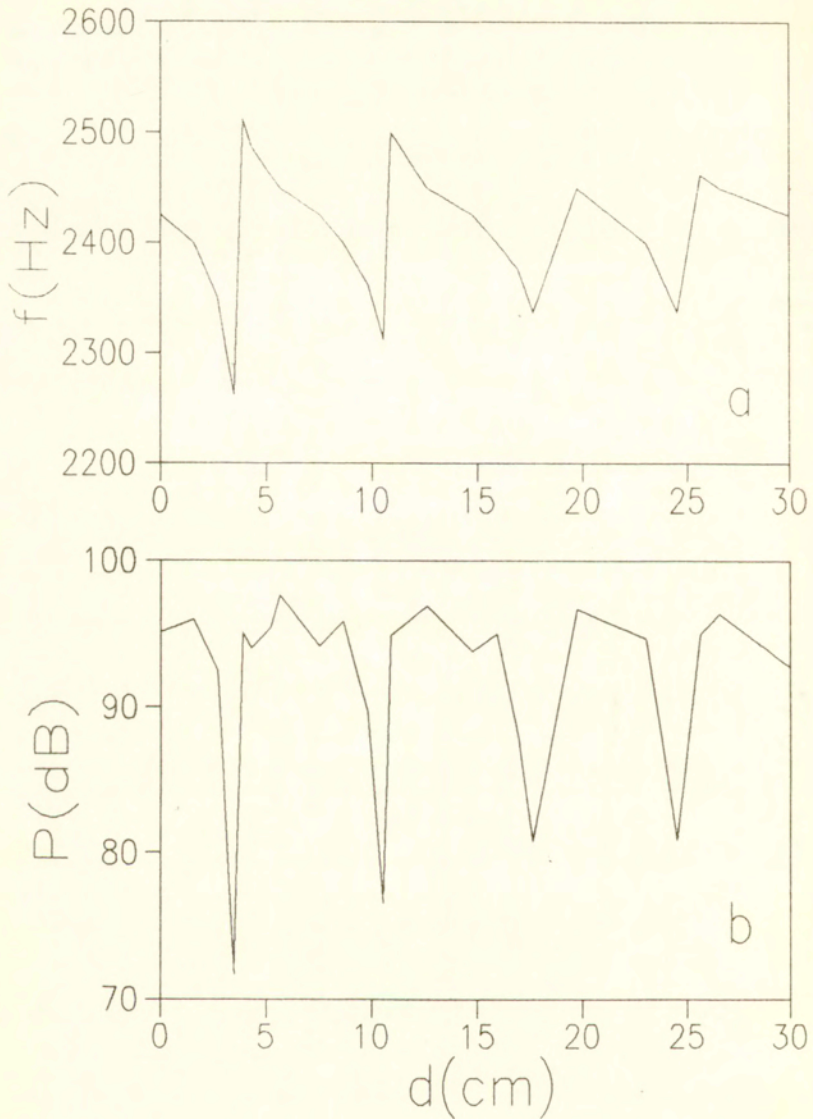


f_t [Hz]	P [dB]	f_t [Hz]	P [dB]	f_t [Hz]	P [dB]
25	50.6	250	49.3	2500	75.9
31.5	53.8	315	53.2	3150	66.3
40	49.6	400	63.8	4000	65.4
50	54	500	67	5000	70.8
63	52.2	630	60.7	6300	70.2
80	56.7	800	64.3	8000	67.5
100	50.3	1000	69.4	10000	62.3
125	49.2	1250	69.7	12500	58.3
160	49.8	1600	67.5	16000	55.7
200	48.7	2000	73.9	20000	50.2
poziom całkowity w paśmie 22.4-22400 Hz 81.4 dB					

Rys. 16. Widmo w pasmach tercjowych sygnału akustycznego generowanego w symetrycznym układzie z trzema odnogami Q_1 ($d = 3.4$ cm) - Q_3 ($d = 0 - 30$ cm) - Q_5 ($d = 3.4$ cm) w przypadku wytłumienia oscylacji oraz zestawienie wartości poziomu dźwięku P w tych pasmach, łącznie z poziomem całkowitym sygnału; f_t to częstotliwość środkowa tercji.



Rys. 17. a) Zależność częstotliwości f i b) poziomu P oscylacji akustycznych od długości d odnogi w niesymetrycznym układzie rurociągu z trzema odnogami $O_1(d = 3.4 \text{ cm}) - O_2(d = 0 - 30 \text{ cm}) - O_3(d = 3.4 \text{ cm})$.



Rys. 18. a) Zależność częstotliwości f i b) poziomu P oscylacji akustycznych od długości d odnogi w niesymetrycznym układzie rurociągu z trzema odnogami $O_1(d = 3.4 \text{ cm}) - O_4(d = 0 - 30 \text{ cm}) - O_5(d = 3.4 \text{ cm})$.

układzie rurociągu z dwoma odnogami.

2) W układach symetrycznym i niesymetrycznym zachodzi dla określonych długości d środkowej odnogi całkowite wytłumienie oscylacji. Uzyskane w ten sposób zmniejszenie całkowitego poziomu hałasu w rurociągu jest rzędu 15 dB.

3) Struktura przepływu głównego w rurociągu ma pomijalny wpływ na akustyczno-przepływowe oddziaływanie pomiędzy odnogami.

4. PODSUMOWANIE WYNIKÓW BADAN ORAZ WNIOSKI KONCOWE

Przedstawione w pracy rezultaty badań pokazują, że zjawisko wytwarzania oscylacji samowzбудnych w rurociągu z zamkniętymi ogałężeniami ma zasadniczo odmienny charakter niż proces generacji dźwięku podczas opływu wnęki przez strumień gazu w otwartej przestrzeni [9-13]. Nie wynika to z odmiennego mechanizmu powstawania oscylacji, którego opis przedstawiono w rozdziale 1, ale innych warunków kształtowania przepływu głównego i zaburzeń wirowych w rurociągu. Należy bowiem zwrócić uwagę na fakt, że w rurociągu z jedną odnogą wzbudzenie oscylacji występuje tylko dla określonych długości d odnogi, a częstotliwości f składowych dyskretnych pochodzą z tego samego, jednego zakresu (rys. 4, tablica 1). Jest to zasadniczo inny rezultat niż w przypadku opływu pojedynczej wnęki przez strumień gazu, gdzie dla każdej wartości d następuje wzbudzenie oscylacji, a ponadto częstotliwość drgań zmienia się w sposób ciągły w funkcji d [13].

Badania wykazały, że wprowadzenie do układu dodatkowej, drugiej odnogi powoduje przy pewnych określonych długościach odnog znaczny wzrost poziomu generowanego dźwięku (ok. 15 dB dla składowej dyskretnej - rys. 2, 13). Spowodowane to jest oddziaływaniem sygnału akustycznego wzbudzonego w jednej odnodze na zaburzenia wirowe w otworze drugiej odnogi. Uzyskane rezultaty nie potwierdziły wniosków przedstawionych w [6], a dotyczących granicznej wartości stosunku l/s , przy której nie występuje już efekt sprzężenia pomiędzy odnogami (l - odległość pomiędzy odnogami, s - średnica odnog; w badanym układzie $l \leq 40$ cm, $s = 1$ cm,). Znaczne zwiększenie amplitudy oscylacji

stwierdzono bowiem nawet dla $l/s = 40$, co jest wielkością znacznie przewyższającą graniczną wartość $l/s \approx 6$ uzyskaną w pracy [6]. Fakt, iż stosunek l/s nie jest jedynym parametrem decydującym o wzajemnym oddziaływaniu pomiędzy odnogami, wynika stąd, że dodatkowym czynnikiem mającym wpływ na to oddziaływanie są struktura zaburzeń przepływu w otworach odnog, a więc stopień koncentracji wirowości w warstwie ścinania oraz amplituda zaburzeń prędkości w kierunku stycznym do ścian odnog. Wielkości te są funkcją prędkości przepływu oraz geometrii układu pomiarowego, co może być przyczyną rozbieżności pomiędzy wynikami badań dla różnych warunków pomiarowych.

Niezwykle interesujący z praktycznego punktu widzenia okazał się układ rurociągu z trzema odnogami. Badania wykazały, że przy odpowiednim zestrojeniu układu możliwe jest zwiększenie poziomu wytwarzanych oscylacji w porównaniu z układem z dwoma odnogami (ok. 5 dB), ale, co wydaje się najistotniejsze, dla ściśle określonych długości d regulowanej odnogi możliwe jest całkowite wytłumienie oscylacji (rys. 15b, 17b, 18b), dające w efekcie spadek całkowitego poziomu generowanego dźwięku aż o ponad 15 dB (rys. 14, 16).

UWAGI AUTORA

Dziękuję mgr inż. Mieczysławowi Czechowiczowi z Pracowni Akustyki Środowiska w Zakładzie Aeroakustyki IPPT PAN za techniczną pomoc przy realizacji badań eksperymentalnych.

5. LITERATURA

- [1] J.C.Bruggeman, *Flow-induced pulsations in pipe systems*, Doctoral Dissertation, 1987, Technische Universitaet Eindhoven, Holandia.
- [2] J.C. Bruggeman i inni, *Flow induced pulsations in gas transport systems: analysis of the influence of closed side branches*, ASME Journal of Fluids Engineering, 111, 1989, 484-491.

- [3] W. Jungowski i inni, *Cylindrical side-branch as tone generator*, Journal of Sound and Vibration, 131, 1989, 265-285.
- [4] J.C. Bruggeman i inni, *Self-sustained aero-acoustic pulsations in gas transport systems: experimental study of the influence of closed side branches*, Journal of Sound and Vibration, 150, 1991, 371-393.
- [5] X.Zhang, J.A.Edwards, *Experimental investigation of supersonic flow over two cavities in tandem*, AIAA Journal, 30, 1992, 1182-1190.
- [6] S.Ziada, T.Buehlmann, *Self-excited resonances of two side-branches in close proximity*, Journal of Fluids and Structures, 6, 1992, 583-601.
- [7] M. Meissner, *Discrete sound induced by low Mach number flow over side branch deep cavity in a rectangular duct*, Archives of Acoustics, 17, 1992, 287-305.
- [8] M.C. Peters, *Aeroacoustic sources in internal flows*, Doctoral Dissertation, Chapter 6, *The aeroacoustic behavior of pipe systems with two closed side branches*, 1993, Technische Universitaet Eindhoven, Holandia.
- [9] P.A. Nelson i inni, *Fluid dynamics of a flow excited resonance, part I: experiment*, Journal of Sound and Vibration, 78, 1981, 15-38.
- [10] D.Rockwell, *Oscillations of impinging shear layers*, AIAA Journal, 21, 1983, 645-664.
- [11] P.A. Nelson i inni, *Fluid dynamics of a flow excited resonance, part II: flow acoustic interaction*, Journal of Sound and Vibration, 91, 1983, 375-402.
- [12] M. Meissner, *Self-sustained deep cavity oscillations induced by grazing flow*, Acustica, 62, 1987, 221-228.
- [13] M. Meissner, *Experimental investigation of discrete sound production in deep cavity exposed to airflow*, Archives of Acoustics, 18, 1993, 131-156.
- [14] J. Bukowski, *Hydro-aeromechanika*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1957, s. 121.
- [15] B. Sredniawa, *Hydrodynamika i teoria sprężystości*, PWN, Warszawa, 1977, s. 305.

- [16] D. Ronneberger, *The dynamics of shearing flow over a cavity - a visual study related to the acoustic impedance of small orifices*, *Journal of Sound and Vibration*, 74, 1980, 565-581.
- [17] G.K. Batchelor, *An introduction to fluid dynamics*, Cambridge Press, 1967, s. 320.