

LABORATORIUM AKUSTYKI

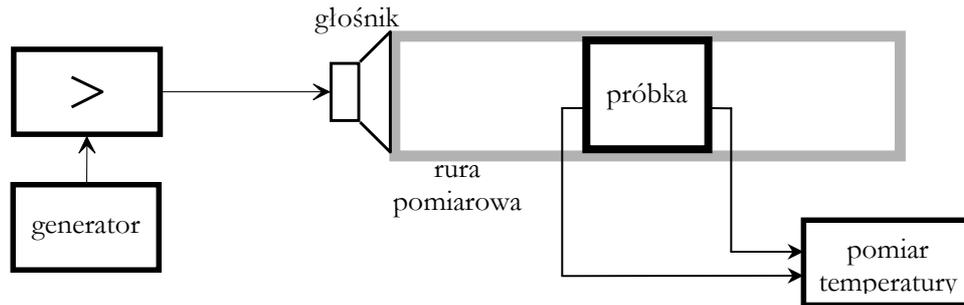
ĆWICZENIE NR 8

Badanie zjawisk zachodzących w silniku termoakustycznym

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie zjawisk zachodzących w silniku termoakustycznym.

2. Układ pomiarowy



Urządzenia pomiarowe:

- Generator Rigol DG2041A;
- Wzmacniacz Yamaha P2500S;
- Głośnik B&C SPEAKERS 6 NDL 38;
- Miernik temperatury Voltcraft PL-120-T2, dwie termopary typu K;
- Aluminiowy uchwyt głośnika;
- Dwie aluminiowe rury $\Phi 60$ grubości 6mm z uchwytami;
- Rura z pleksi zawierająca regenerator;
- Drewniana obudowa głośnika oraz podstawa.

3. Zadanie laboratoryjne

- 3.1. Zmierzyć różnicę temperatur w funkcji częstotliwości dla kilku wybranych materiałów.
- 3.2. Zbadać wpływ grubości próbki d na różnicę temperatur w funkcji częstotliwości dla wybranych materiałów.
- 3.3. Zmierzyć różnicę temperatur w funkcji częstotliwości dla próbki złożonej z różnych materiałów.
- 3.4. Zbadać wpływ kształtu sygnału pobudzającego na różnicę temperatur w funkcji częstotliwości dla wybranych materiałów.

4. Zagadnienia do przygotowania

- 4.1. Silniki Stirlinga.
- 4.2. Silnik termoakustyczny.

Literatura

- [1] A. Dobrucki, Przetworniki elektroakustyczne, WNT 2007.
- [2] Konrad Janowicz, Możliwości maksymalizacji natężenia fali akustycznej w silniku termoakustycznym – analiza układu i badania doświadczalne. Praca dyplomowa, Politechnika Wrocławska 2011.
- [3] S. Żmudzki, Silniki Stirlinga, WNT, Warszawa (1993).

2. Teoria urządzeń termoakustycznych

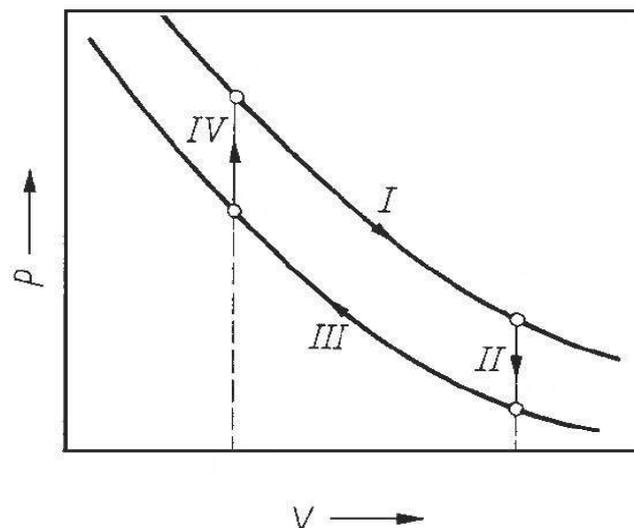
2.1 Cykl Stirlinga

W urządzeniach termoakustycznych, zarówno wykonujących pracę dzięki wymianie ciepła jak również dokonujących wymiany ciepła na skutek dostarczonej pracy działają w oparciu o następujących po sobie kompresji, podgrzewania, rozprężania i chłodzenia. Cykl kolejnych przemian izotermicznych i izochorycznym dla tego typu silników zwany jest cyklem Stirlinga.

Można wyróżnić w nim cztery etapy.

- I. Rozszerzalność izotermiczna. Gaz pozostaje w kontakcie termicznym ze źródłem ciepła. Proces jest odwracalny.
- II. Izochoryczne ochładzanie. W nieodwracalnym procesie gaz zostaje schłodzony do temperatury pozostającej w kontakcie z nim chłodnicy.
- III. Kompresja izotermiczna. Gaz pozostaje w kontakcie z chłodnicą. Proces jest odwracalny.
- IV. Izochoryczne ogrzewanie. Gaz zostaje podgrzany do temperatury źródła ciepła.

Poniższy wykres obrazuje opisaną sytuację.



Rysunek 1: Idealny cykl Stirlinga.

W przypadku wyidealizowanym cykl Stirlinga jest kompletny a urządzenie osiąga maksymalną sprawność [1], sprawność Carnota.

Skonstruowanie urządzenia osiągającego maksymalną sprawność jest w praktyce niemożliwe, dlatego cykl Stirlinga należy traktować jako ściśle teoretyczny, objaśniający zasadę działania urządzeń, nie jako cykl porównawczy [24].

2.2 Podstawowe parametry regeneratora

Jest to najważniejszy element całego systemu. Wewnątrz regeneratora dokonuje się konwersja energii cieplnej na akustyczną. Zbudowany jest on z materiału posiadającego kanały lub pory o określonym promieniu hydraulicznym (hydraulic radius) r_h [2].

Jest wiele struktur materiału regeneratora [14]. W przypadku symetrycznych struktur regeneratora, promień hydrauliczny można przedstawić jako stosunek pola powierzchni przekroju poprzecznego do obwodu pojedynczego otworu [2]. Sposób wyliczenia parametru r_h zależy jednak od geometrii materiału regeneratora. Dla struktury typu pin-array jest to stosunek powierzchni gazu (gas area) do obwodu materiału [4].

Kolejnym ważnym parametrem jest termiczna głębokość wnikania (thermal penetration depth) δ_k określająca jak głęboko w regenerator wnika ciepło w czasie $1/\omega$ [s].

$$\delta_k = \sqrt{\frac{2K}{\omega \rho C_p}} = \sqrt{\frac{2k}{\omega}} \quad (3.1)$$

K – przewodność cieplna gazu

k – dyfuzyjność gazu

ρ – gęstość

C_p – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu

Jeżeli wartość promienia hydraulicznego użytego materiału jest porównywalna do wartości δ_k , jest to wówczas stos. Jeżeli wartość promienia hydraulicznego jest znacznie mniejsza od δ_k mamy do czynienia z regeneratorem.

Istotną długością ściśle związaną z regeneratorem jest lepka głębokość wnikania (viscous penetration depth) δ_v [5]. Jej wartość jest porównywalna lecz mniejsza od termicznej głębokości wnikania [6].

$$\delta_v = \sqrt{\frac{2\mu}{\omega \rho C_p}} \quad (3.2)$$

μ – lepkość gazu

Kwadrat ilorazu dwóch powyższych parametrów pozwala wyrugować pulsację i gęstość, pozostawiając elementy charakteryzujące dany ośrodek.

$$\left(\frac{\delta_v}{\delta_k}\right)^2 = \frac{\mu C_p}{k} = \sigma \leq 1 \quad (3.3)$$

Otrzymany w ten sposób parametr nazywany jest liczbą Prandtla (Prandtl number).

Jako, że regenerator charakteryzuje się małymi rozmiarami porów w porównaniu do termicznej głębokości wnikania, kontakt termiczny pomiędzy ośrodkiem a materiałem regeneratora jest niemal idealny. Systemy oparte na regeneratorze osiągają większą sprawność przy użyciu fali biegnącej. Ciśnienie i prędkość są wówczas w fazie. Straty spowodowane przez wąskie pory materiału regeneratora powodują zwiększenie rozprożeń związanych z lepkością, co znacząco obniża sprawność układu.

Dla silników termoakustycznych sprawność definiowana jest zależnością:

$$\eta = \frac{W}{Q_H} \leq \eta_C = \frac{T_H - T_C}{T_H} \quad (3.4)$$

T_H – temperatura gorącego źródła

T_C – temperatura zimnego źródła

Q_H – ciepło doprowadzone

Najwyższa sprawność η_C możliwa do osiągnięcia przez silnik zwana jest sprawnością Carnota. Sprawność pomp ciepła przedstawiona jest za pomocą parametru COP (coefficient of performance):

$$COP = \frac{Q_H}{W} \leq COP_C = \frac{T_H}{T_H - T_C} \quad (3.5)$$

Idealny regeneratory osiąga sprawność Carnota gdy wymiana ciepła pomiędzy gazem, ośrodkiem a materiałem regeneratory jest bez żadnych strat. Wówczas ciśnienie wewnątrz regeneratory pozostaje stałe [8]. Należy dążyć do uzyskania jak największej sprawności poprzez dobór ośrodka propagacji fali dźwiękowej oraz materiału regeneratory. Głównym źródłem strat jest niedoskonała wymiana ciepła zarówno pomiędzy gazem i regeneratory jak również w samym regeneratory, w układzie występuje niezerowa entalpia. Straty występujące w regeneratory związane z rozproszonymi oraz spadkiem ciśnienia spowodowane są przez tarcie oraz lepkość. Niestety nie można wyeliminować obu przyczyn utraty sprawności ponieważ są one odwrotnie proporcjonalne. Poprawa wymiany ciepła między gazem a regeneratory powoduje zwiększenie strat związanych z lepkością. Parametrem związanym z obiema przyczynami strat jest konduktancja. Należy ustalić jej optymalny poziom będący kompromisem dla strat termicznych (thermal losses) i lepkości (viscous losses). Zwiększenie konduktancji powoduje wzrost strat termicznych.

Parametrem charakteryzującym regenerację, określającym wymianę ciepła pomiędzy gazem a materiałem regeneratora jest termiczna stała czasowa τ_T (thermal time constant) [9]. Zmienna ta w danym przypadku opisuje czas potrzebny na przyswojenie przez gaz przenikający przez kanały wzdłuż regeneratora lokalnej temperatury występującej w materiale. Posługując się równaniem konwersji energii, możemy wyznaczyć τ_T .

$$\frac{Q}{P_{ac}} = \frac{1}{1+(\omega\tau_T)^2} + \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{\Delta T c_0}{T_0 L_{Reg}} \cdot \frac{\tau_T}{1+(\omega\tau_T)^2} \quad (3.6)$$

Q	– przepływ ciepła (heat flow)
P_{ac}	– moc akustyczna
$\gamma = C_p/C_V$	– współczynnik ciepła
C_p, C_V	– ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu i objętości
ω	– pulsacja
c_0	– prędkość dźwięku
T_0	– średnia temperatura
ΔT	– różnica temperatur (T_1-T_2)
L_{reg}	– długość regeneratora

Wartość termicznej stałej czasowej powinna być znacznie mniejsza od okresu fali akustycznej. W warunkach idealnych powinna wynosić zero, wymiana ciepła następuje natychmiast. Wówczas stosunek energii Q/P_{ac} wynosi jeden. Dla odwrotnie skrajnej sytuacji gdy Q/P_{ac} wynosi zero, równanie (3.6) sprowadza się do prostszej postaci:

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{\Delta T c_0}{T_0 L_{Reg}} \cdot \frac{\tau_T}{1+(\omega\tau_T)^2} \approx 1 \quad (3.7)$$

Z równania (3.6) możemy również zauważyć, że wartość Q / P_{ac} , przy określonych parametrach materiału regeneratora zależy od różnicy temperatur oraz długości regeneratora.

Parametrem odnoszącym się do wymiany ciepła pomiędzy gazem a materiałem jest również termiczny czas relaksacji τ (thermal relaxation time).

$$\tau = \frac{r^2}{\delta_k^2 \omega} \quad (3.8)$$

r – charakterystyczny promień kanałów

Zmienna ta zależy od termicznej głębokości wnikania, jest więc zależna od zastosowanego ośrodka propagacji fali akustycznej.

W celu zmniejszenia strat związanych z lepkością materiału regeneratora należy zwiększyć jego charakterystyczną impedancję akustyczną. Jest to parametr wyrażony przez stosunek ciśnienia akustycznego do akustycznej cząstkowej prędkości przez przekrój poprzeczny regeneratora [10] [13].

$$Z = \frac{P}{V A} \quad (3.9)$$

P – ciśnienie akustyczne

V – prędkość cząstek

A – przekrój poprzeczny