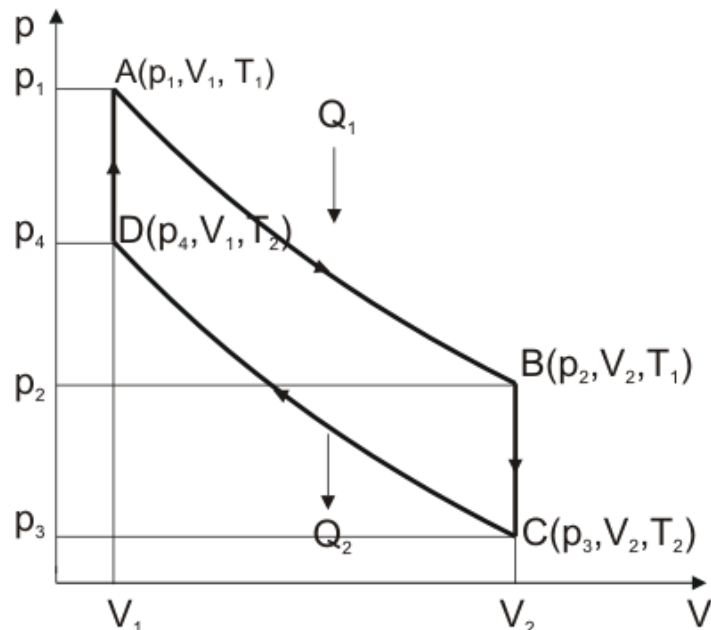


## Ćwiczenie G3: Wyznaczanie mocy elektrycznej silnika Stirlinga

### Wstęp teoretyczny

Substancją roboczą, zbudowanego w 1816 roku, silnika Stirlinga jest gaz, np. powietrze. Silnik pobiera ciepło z zewnętrznego źródła, bez spalania wewnętrznego i dlatego zyskuje w ostatnich latach zainteresowanie ze względów ekologicznych.

Gaz doskonały w idealnym silniku Stirlinga podlega procesowi kołowemu, który składa się z dwóch przemian izotermicznych i dwóch izochorycznych (rys.1).



Rys.1. Cykl zamknięty idealnego silnika Stirlinga.

Proces AB jest izotermicznym rozprężaniem  $p_1 \rightarrow p_2$ ,  $V_1 \rightarrow V_2$  przy stałej temperaturze  $T_1 = \text{const}$ . Ciśnienie i objętość spełnia równanie:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2. \quad (1)$$

Pracę wykonuje silnik kosztem pobranego ciepła bez zmiany energii wewnętrznej gazu. Zgodnie z pierwszą zasadą termodynamiki praca  $W_1$  jest równa pobranemu ciepłu ze źródła  $Q_1$ . Pracę wykonano przez gaz w procesie AB można wyznaczyć z zależności:

$$W_1 = \int_{V_1}^{V_2} p dV. \quad (2)$$

Z równania Clapeyrona wynika, że przy stałej temperaturze  $T$  ciśnienie  $p$  zależy od objętości  $V$  zgodnie z równaniem:

$$p = \frac{nRT}{V}, \quad (3)$$

gdzie:  $n$  jest liczbą moli gazu a  $R$  stałą gazową. Po podstawieniu do równania (2) mamy:

$$Q_1 = W_1 = nRT_1 \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = nRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (4)$$

Proces BC jest izochorycznym ochładzaniem w objętości  $V_2$ . Ciśnienie maleje od  $p_2$  do  $p_3$ , temperatura od  $T_1$  do  $T_2$ . Wydzielone ciepło jest akumulowane wewnątrz silnika i jest „odzyskiwane” w procesie DA, który jest izochorycznym ogrzewaniem od temperatury  $T_2$  do temperatury  $T_1$  przy wzroście ciśnienia od  $p_4$  do  $p_1$  w stałej objętości  $V_1$  (rys.1). Proces CD jest izotermicznym sprężaniem w temperaturze  $T_2$ . Praca wykonana nad gazem  $W_2$ , równa ciepłu oddanemu przez gaz,  $Q_2$ , zgodnie z powyższymi wzorami może być dana wyrażeniem:

$$Q_2 = W_2 = nRT_2 \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = nRT_2 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (5)$$

Efektywna praca wykonana przez silnik w jednym zamkniętym cyklu jest różnicą ilości ciepła pobranego i oddanego przez silnik:

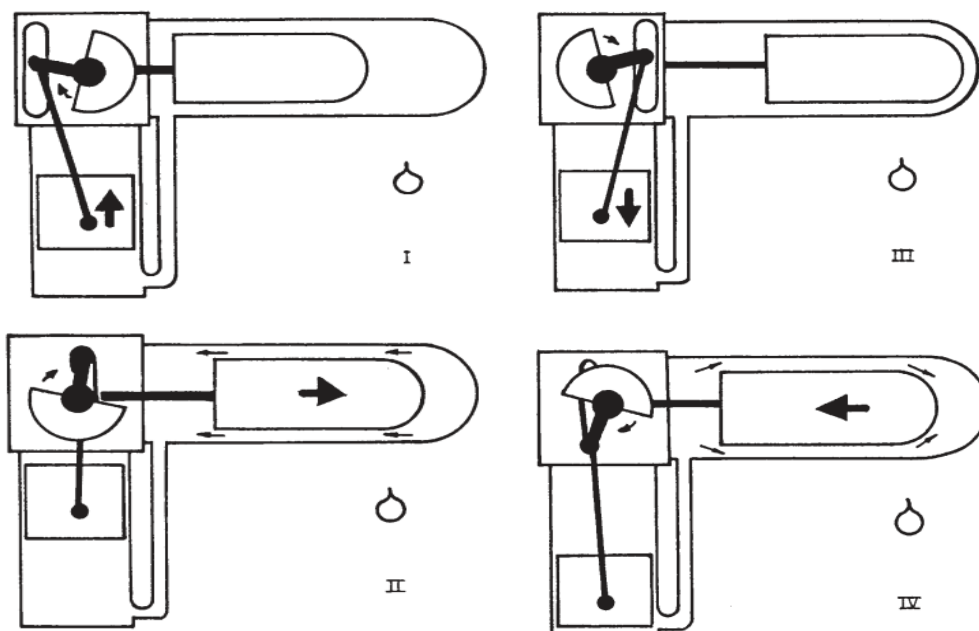
$$W = Q_1 - Q_2 \quad (6)$$

Sprawność zdefiniowana jako wyrażony w procentach stosunek wykonanej w jednym cyklu pracy do pobranego przez silnik w tym cyklu ciepła może być wyrażona w postaci:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100\% = \frac{nR(T_1 - T_2) \ln \frac{V_2}{V_1}}{nRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}} \cdot 100\% = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\% \quad (7)$$

Powyższy wzór jest identyczny ze wzorem na sprawność silnika pracującego według idealnego cyklu Carnota.

Schemat rzeczywistego silnika Stirlinga pokazane jest na rys. 2.



Rys.2 Zasada działania dwucylindrowego silnika Stirlinga.

Substancją roboczą jest stała masa gazu zamknięta w dwóch cylindrach z dwoma tłokami połączonymi wałem korbowym tak, aby tłok w cylindrze „ciepłym” (poziomym) wyprzedzał tłok w cylindrze „zimnym” o  $\frac{1}{4}$  cyklu ruchu. Podstawowe etapy pracy silnika to: rozprężanie (I), ochładzanie (II) – akumulacja ciepła, sprężanie (III) oraz ogrzewanie „odzysk” ciepła (IV). Silnik pobiera ciepło z zewnętrznego źródła (etap I) i oddaje ciepło do otoczenia (etap III). Wykres pV rzeczywistego, zamkniętego cyklu pracy silnika Stirlinga różni się od idealnego cyklu pokazanego na rys.1 i jest przedstawiony na rys.3.



Rys.3 Ciśnienie w funkcji objętości w rzeczywistym, zamkniętym cyklu Stirlinga.

Pole pod krzywą zamkniętą pV jest równe pracy wykonanej przez silnik w czasie jednego cyklu.

## I. Literatura

1. Instrukcje firmy Phywe „Physics-Laboratory Experiments”
2. R. Resnick, D. Halliday, Fizyka tom 1., PWN Warszawa 2001.
3. J. Orear, Fizyka, PWN Warszawa 1998
4. [http://pl.wikipedia.org/wiki/Silnik\\_Stirlinga](http://pl.wikipedia.org/wiki/Silnik_Stirlinga)
5. [http://noweenergie.org/index.php?page=artykuly&a\\_id=20](http://noweenergie.org/index.php?page=artykuly&a_id=20)