



Silnik Stirlinga

1. Zagadnienia

I i II prawo termodynamiki, przemiany termodynamiczne, cykle termodynamiczne, sprawność procesów termodynamicznych, wydajność, silnik termodynamiczny

2. Opis

Silnik Stirlinga (silnik cieplny) służy do przemiany energii cieplnej w mechaniczną. Napędzany mechanicznie funkcjonuje jako pompa cieplna lub chłodziarka. W bardzo poglądowy sposób przedstawia odwracalność procesów termodynamicznych. Tłok roboczy i wypierający (tłoczący) są zamontowane w układzie 90° . Tłok roboczy jest wykonany z metalu i dokładnie wpasowany w rurkę szklaną. Tłok wypierający wykonany ze szkła przejmuje jednocześnie ważną dla pracy silnika funkcję regeneratora: chłodzi przepływające obok niego gorące powietrze, magazynuje jego energię i oddaje je z powrotem do płynącego w przeciwnym kierunku zimnego powietrza.

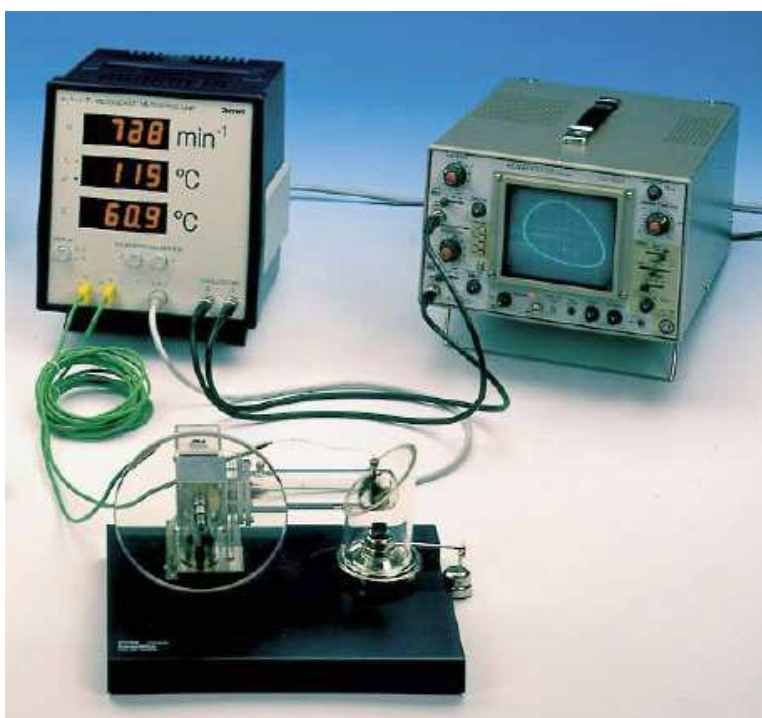
Z pomocą podzespołu Silnik/Prądnica wytworzona przez silnik Stirlinga energia mechaniczna jest przetwarzana na energię elektryczną (żarówka). Silnik można także napędzać odwrotnie, mechanicznie przez zmagazynowaną energię elektryczną.

Przy użyciu miernika momentu obrotowego silnik Stirlinga może być obciążony określonym momentem obrotowym. Jeśli ponadto mierzona jest jego prędkość obrotowa wówczas można z niej obliczyć oddawaną energię mechaniczną.

Koło zamachowe jest na stałe zamocowane na osi. Może być z luzem z pomocą klucza imbusowego. Po ponownym nałożeniu koła zamachowego oś winna być lekko pociągnięta na zewnątrz a między kołem i obudową silnika winna być szczelina grubości kartki papieru, aby oś nie miała zbytniego luzu. W cylindrze tłoczącym znajdują się dwa punkty pomiaru temperatury. Otwory w metalowych gilzach mają średnicę 0,6 mm do wkładania termoelementów NiCr-Ni.

Podzespół Silnik/Prądnica posiada dwie różne tarcze napędowe z pomocą, których można demonstrować wpływ wielkości przełożenia na moc i obroty silnika. Do połączenia z kołem zamachowym służy pasek skórzany. Z pomocą przełącznika wybiera się tryb pracy Silnik/Prądnica.

W trybie prądnicy świeci żarówka. Równoległe do oprawy żarówki znajdują się dwa gniazda wyjściowe do których można dołączyć nastawny rezystor. W położeniu przełącznika "0" prądnica jest nieobciążona. Do pracy w trybie silnikowym do gniazd wejściowych należy dołączyć napięcie stałe.

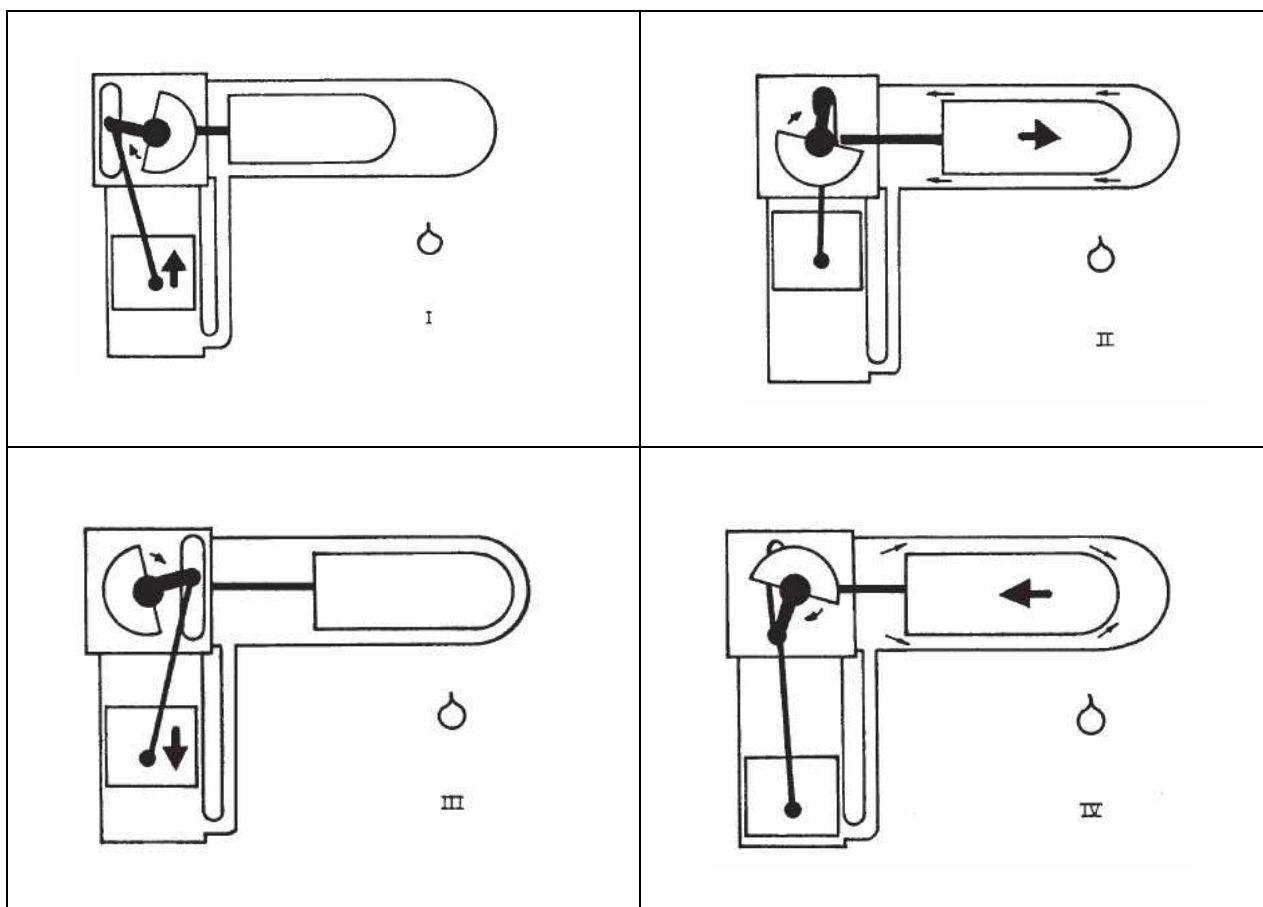
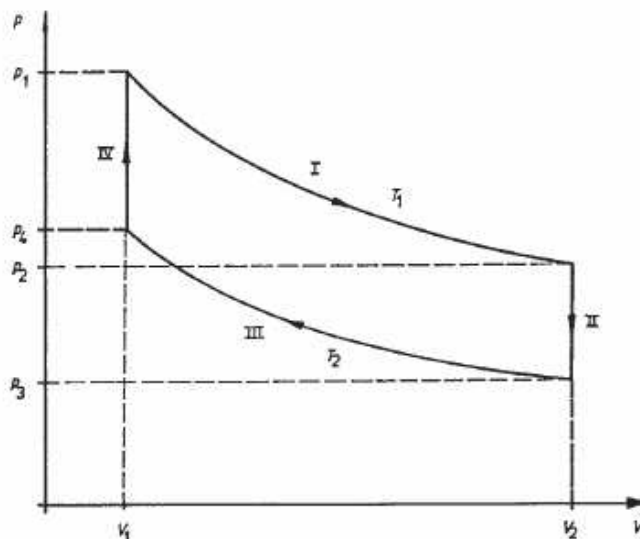




Zasada działania

W 1816 roku Robert Stirling złożył patent na działanie silnika cieplnego, który do dziś nosi jego nazwę. W dzisiejszych czasach silnik Stirlinga jest doskonałym modelem służącym poznaniu zasad działania silnika cieplnego zamiany procesów termicznych w energię mechaniczną. Silnik pracuje bardzo cicho i gładko. Może być zasilany wieloma, różnymi źródłami ciepła co czyni go potencjalnie ekologicznym napędem.

Teoretycznie praca silnika składa się z czterech cykli. Dwa z nich to przemiany izotermiczne, dwie izochoryczne.



I – izotermiczny proces rozprężania gazu $V_1 \rightarrow V_2$, $p_1 \rightarrow p_2$, $T_1 = \text{const.}$, w którym ciepło jest dostarczane a praca wykonywana przez silnik. Objętość rośnie a ciśnienie maleje.



II – izochoryczny proces ochładzający gaz przepływający pomiędzy szklanymi cylindrami $T_1 \rightarrow T_2$, $p_2 \rightarrow p_3$, $V_2 = \text{const}$

III – izotermiczny proces sprężania $V_2 \rightarrow V_1$, $p_3 \rightarrow p_4$, $T_2 = \text{const}$, którym ciepło jest wytwarzane a praca wykonywana. Objętość maleje a ciśnienie rośnie.

IV – izochoryczna przemiana $T_2 \rightarrow T_1$, $p_4 \rightarrow p_1$, $V_1 = \text{const}$, w którym ciepło jest dostarczane do systemu.

Korzystając z pierwszego prawa termodynamiki, ciepło dostarczone do układu równe jest wykonanej pracy i wzrostowi energii wewnętrznej.

$$dQ = dU + pdV$$

W silniku Stirlinga energia cieplna produkowana podczas izochorycznego ochładzania jest zmagazynowana do czasu użycia jej ponownie podczas fazy ogrzewania. Dlatego też podczas IV przemiany ilość energii cieplnej uwolnionej w przemianie II jest z powrotem zaabsorbowana. To znaczy, że w silniku tylko wymieniana jest energia cieplna. Praca mechaniczna jest dostarczana jedynie podczas I i III przemiany. Biorąc pod uwagę fakt, że energia wewnętrzna się nie zmienia podczas izotermicznej przemiany, praca w tej fazie jest odpowiednio równa zaabsorbowanemu i oddanemu ciepłu.

Ilość pracy w fazie I i III równa się odpowiednio:

$$W_1 = nRT_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad W_3 = -nRT_2 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Praca $|W_1| > W_3$ ponieważ $T_1 > T_2$. Całkowita praca równa się sumie algebraicznej obu prac.

$$W_t = nR(T_1 - T_2) \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Tylko część tej całkowitej pracy może zostać użyta efektywnie poprzez dołączenie zewnętrznego odbiornika, reszta to straty energii samego silnika.

Maksymalna sprawność procesu odwracalnego w silniku cieplnym równa się stosunkowi uzyskanej pracy W_t do pracy włożonej w układ W_1 . i jest tym większa im większa jest różnica temperatur ΔT .

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

3. Przebieg ćwiczenia

Silnik Stirlinga powinien być podłączony do jednostki pomiarowej za pomocą dwóch przewodów termopar umieszczonych w dwóch gniazdach szklanego cylindra oraz czujnika częstotliwości. Należy również podłączyć dwoma przewodami jednostkę pomiarową z oscyloskopem. Objętość z rejestracją na osi X, a ciśnienie na osi Y. Po włączeniu miernika na wyświetlaczu pojawi się napis „cal” oznaczający konieczność kalibracji termopar. Obie końcówki termopar muszą być w tej samej temperaturze. Po upewnieniu się, że termopary mają tę samą temperaturę wciskamy przycisk „Calibration ΔT ”. Górny wyświetlacz pokazuje teraz „OT”, co oznacza ustawienie dolnego martwego punktu tłoka w silniku. W tym punkcie objętość jest najmniejsza $V_{\min} = 32$ ml. Należy tłok ustawić tak, aby znalazł się w najniższym dolnym położeniu i nacisnąć przycisk „Calibration V”. Nieprawidłowa kalibracja spowoduje pojawieniem się przesunięcia fazowego napięcia zewnętrznego, a tym samym uzyska się nieprawidłowy diagram pV. Teraz trzy wyświetlacze powinny być włączone pokazując 0 revs/min i aktualne temperatury.

A. Wyznaczenie mocy cieplnej palnika

Wykonujemy pomiar ilości alkoholu przed i po ćwiczeniu za pomocą menzurki (ΔV) lub wagi (Δm) oraz rejestrujemy czas trwania palącego się palnika w trakcie eksperymentu Δt . Znając gęstość alkoholu ρ [g/ml] i wartość opałową h [kJ/g] możemy wyznaczyć prędkość spalania i moc palnika.



$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{\rho \cdot \Delta V}{\Delta t}$$
$$P_H = \frac{E}{\Delta t} = \frac{h \cdot \Delta m}{\Delta t}$$

Dla przykładowych wartości:

$$\Delta t = 60 \text{ min}$$

$$\Delta V = 29 \text{ ml}$$

$$\rho = 0,83 \text{ g/ml}$$

$$h = 25 \text{ kJ/g}$$

prędkość spalania równa się $\frac{\Delta m}{\Delta t} = 6,69 \cdot 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{s}}$, a moc palnika $P_H = 167,2 \text{ W}$.

B. Kalibracja czujnika ciśnienia

Aby uzyskać poprawny diagram pV czujnik ciśnienia musi być wykalibrowany. Tłok powinien być ustawiony górnym martwym położeniu, dla którego objętość jest maksymalna $V_0 = V_{\max} = 44 \text{ ml}$. Elastyczny przewód odłącza się od podstawy silnika i za pomocą oscyloskopu wyznacza się napięcie U_0 odpowiadające ciśnieniu odniesienia – ciśnieniu atmosferycznemu p_0 . Oscyloskop powinien pracować na napięcie stałe DC i w trybie Y_t z wyskalowaną osią Y. Plamkę na oscyloskopie ustawiamy w pozycji środkowej. Następnie podłączamy ponownie elastyczny przewodu.

Czujnik ciśnienia mierzy względne ciśnienie odniesione do ciśnienia atmosferycznego p_0 . Zmiana objętości gazu roboczego umożliwia wyznaczenie zmiany ciśnienia uwzględniając przemianę izotermiczną gazu ($pV = \text{const}$). Dla objętości początkowej V_0 ciśnienie równa się ciśnieniu atmosferycznemu $p_0 = 1013 \text{ hPa}$. Zależność zmiany napięcia wyjściowego czujnika jest proporcjonalna również do zmiany ciśnienia i zmienia się liniowo.

Obracając energicznie kołem pasowym silnika sprężamy powietrze rejestrując maksymalne wychylenie plamki na oscyloskopie i odpowiadające jej napięcie U_{\max} .

Znając wartość ciśnienia atmosferycznego p_0 wzrost ciśnienia można obliczyć z równania:

$$p_0 V_0 = (p_0 + \Delta p)(V_0 - \Delta V)$$

stąd

$$\Delta p = \left(\frac{V_0}{V_0 - \Delta V} - 1 \right) p_0 = 0,375 \cdot p_0$$

Ostatecznie możemy obliczyć zmianę ciśnienia w silniku znając zmianę rejestrowanego napięcia.

$$\frac{\Delta p}{\Delta U} = \frac{0,375 \cdot p_0}{U_{\max}} \cdot \left[\frac{\text{hPa}}{\text{V}} \right]$$

C. Diagram pV

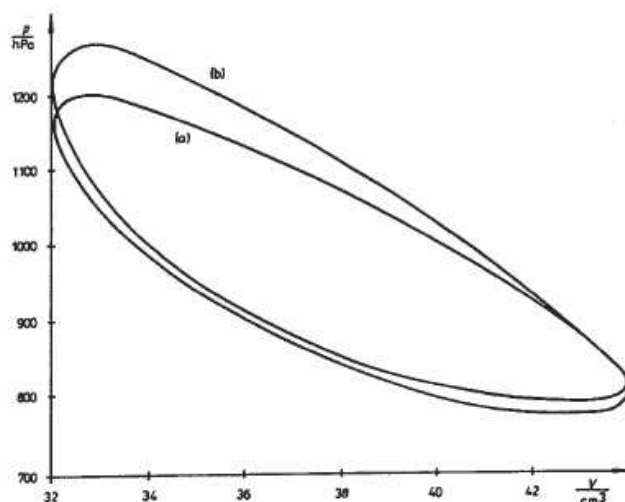
Diagram pV możemy zarejestrować za pomocą oscyloskopu. Zapalony palnik umieszczamy pod szklanym cylindrem. W momencie, gdy różnica temperatur na końcach szklanego cylindra osiągnie wartość około 80 K, lekko wprawiamy w ruch koło silnika. W niedługim czasie silnik powinien osiągnąć stałą prędkość obrotową. Cykl silnika Stirlinga można obserwować na oscyloskopie. Przed wykonywaniem jakichkolwiek pomiarów należy odczekać, aż temperatury oraz obroty silnika będą w przybliżeniu stałe. Niższa temperatura powinna być równa około 70 °C. Zapisujemy wartości temperatur i częstotliwość silnika. Wartości napięcia odpowiadające maksymalnej i minimalnej wartości ciśnienia odczytujemy z oscyloskopu. Przerysowujemy diagram pV z oscyloskopu za pomocą przezroczystego papieru wraz z osiami i podziałkami. Zapisujemy wartości podziałki, aby można było obliczyć powierzchnię przemiany termodynamicznej.



Pomiary objętości na skali X oscyloskopu są w zakresie 0,5 V/div. Skrajne wartości objętości wynikają z konstrukcji samego silnika Stirlinga i wynoszą odpowiednio $V_{min} = 32 \text{ cm}^3$, $V_{max} = 44 \text{ cm}^3$, $\Delta V = 12 \text{ cm}^3$.

Pomiary ciśnienia na skali Y oscyloskopu są w zakresie 0,2 V/div.

Na rysunku obok zamieszczono przykładowy wykres pV otrzymany za pomocą oscyloskopu w dwóch przypadkach: bez zewnętrznego obciążenia (a) i z obciążeniem (b).



D. Efektywna energia mechaniczna

W celu wyznaczenia momentu obrotowego silnika montujemy najpierw skalę do pomiaru momentu obrotowego. Siła tarcia pomiędzy wskaźnikiem a metalową tulejką może być regulowana za pomocą śrubki mocującej. Należy regulować siłę tarcia precyzyjnie, aby wskazówka nie wykonywała drgań. Wykonujemy pomiary momentu obrotowego oraz diagramy pV dla coraz większej siły tarcia, w momencie, gdy temperatury i częstotliwość będą miały stałą wartość.

Efektywna energia mechaniczna oraz moc wyznaczona za pomocą momentu siły równa się:

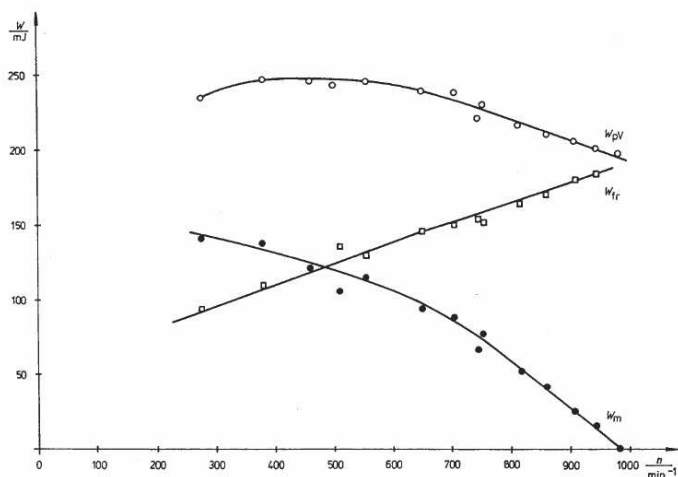
$$W_m = 2\pi \cdot M$$

$$P_m = W_m \cdot f$$

Energia zużyta podczas pracy silnika równa się efektywnej pracy mechanicznej oraz energii poświęconej na tarcie. Znając pracę mechaniczną i pracę wyznaczoną z diagramu pV można wyznaczyć energię poświęconą na tarcie.

$$W_{fr} = W_{pV} - W_m$$

Silnik Stirlinga								
Lp	T_1 [°C]	T_2 [°C]	f [obr/min]	M 10^{-3} [Nm]	W_m [mJ]	W_{pV} [mJ]	W_{fr} [mJ]	P_m [mW]
1								
2								
...								





Na podstawie danych zebranych w tabeli można wyznaczyć zależność poszczególnych energii w funkcji prędkości obrotowej silnika. Przykładowy wykres pokazany jest na rysunku powyżej.

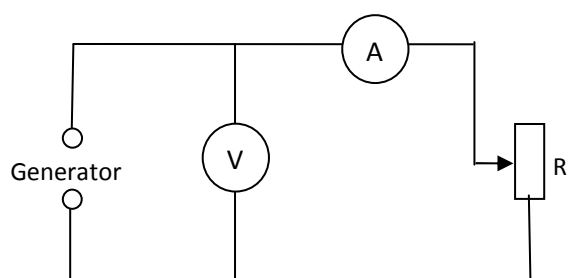
Maksymalną prędkość obrotową ok. 980 obr/min silnik osiąga bez zewnętrznego obciążenia. Prędkość obrotowa maleje wraz ze wzrostem obciążenia silnika do momentu zatrzymania silnika (150 ÷ 300 obr/min). Temperatura T_1 szybko rośnie wraz z obniżeniem się prędkości obrotowej natomiast T_2 o wiele wolniej. Ciśnienie w silniku zmienia się z temperaturą, co doskonale widoczne jest na diagramie pV.

E. Efektywna moc elektryczna

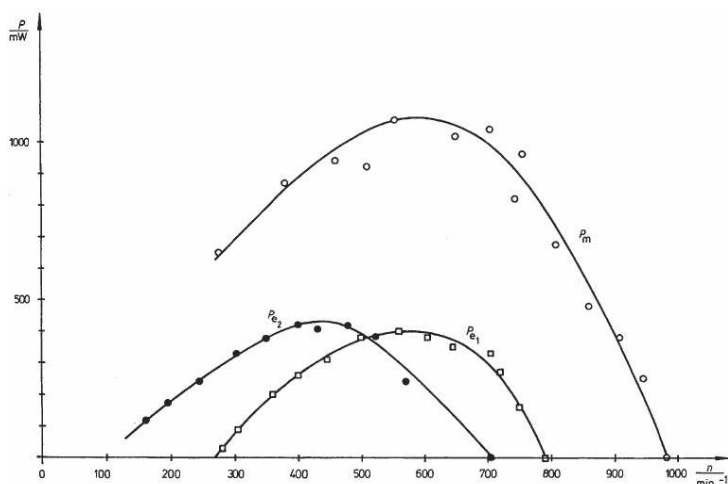
Do wyznaczenia mocy nie można używać zwykłej małej żarówki. Najlepiej jest podłączyć opornicę suwakową do generatora jako obciążenie, tak jak pokazano na rysunku. Przed przystąpieniem do pomiarów właściwych, silnik Stirlinga bez załączonego zasilania powinien mieć optymalne parametry same parametry pracy, czyli różnicę temperatur równą ok 70 K i częstotliwość 900 obr/min. Rejestrujemy różnicę temperatur częstotliwość, napięcie i natężenie prądu dla coraz mniejszych oporów obciążenia silnika.

Znając wartości pomierzonego napięcia i natężenia prądu można wyznaczyć moc elektryczną silnika równą

$$P_e = U \cdot I$$



Silnik Stirlinga							
Lp.	R [Ω]	T_1 [°C]	T_2 [°C]	f [obr/min]	U [V]	I [mA]	P_e [mW]
1							
2							
...							



Na rysunku powyżej pokazano porównanie mocy mechanicznej i elektrycznej dla dwóch wartości obciążenia silnika. Z powodu sprawności samego generatora moc elektryczna jest mniejsza od mechanicznej wyznaczonej bez obciążenia.