



**KAPITAŁ LUDZKI**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Projekt „Plan rozwoju Politechniki Częstochowskiej”  
współfinansowany ze środków UNII EUROPEJSKIEJ w ramach EUROPEJSKIEGO FUNDUSZU SPOŁECZNEGO  
Numer Projektu: POKL.04.01.01-00-59/08

## ***KATEDRA FIZYKI***

***WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI  
I TECHNOLOGII MATERIAŁÓW  
POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA***



## ***LABORATORIUM Z FIZYKI TECHNICZNEJ***

### **ĆWICZENIE NR 9**

## ***WYZNACZENIE SPRAWNOŚCI SILNIKA STIRLINGA***



Politechnika Częstochowska, Centrum Promocji i Zastosowań Nauk Ścisłych  
ul. Dąbrowskiego 73 pok. 178, 42-200 Częstochowa  
tel./ fax. +343250324, e-mail: [imi@imi.pcz.pl](mailto:imi@imi.pcz.pl), <http://www.cns.pcz.pl>

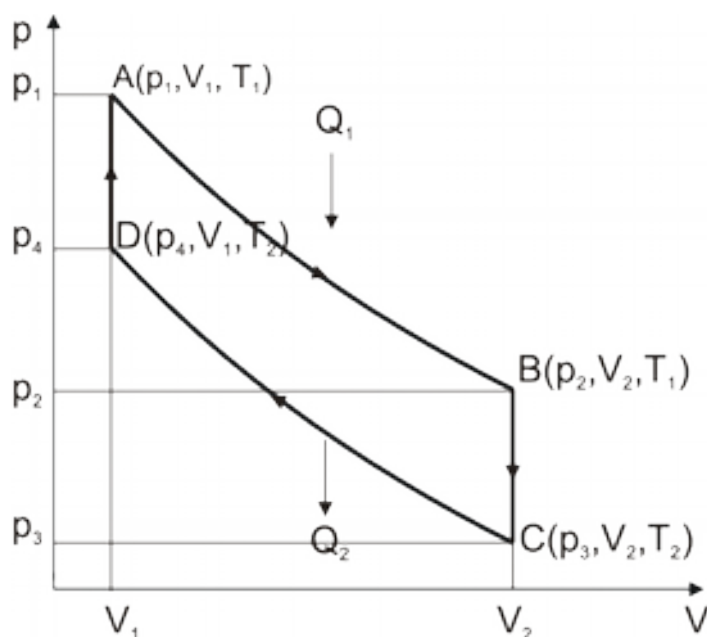
## I. Zagadnienia do przestudiowania:

- Teoria kinetyczno – molekularna gazów,
- Równanie Clapeyrona,
- Przemiany gazowe,
- Pierwsza i druga zasada termodynamiki,
- Procesy kołowe, definicja sprawności silnika, cykl Carnota.

## II. 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:

*Ćwiczenie 9: Wyznaczanie sprawności silnika Stirlinga*

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

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:

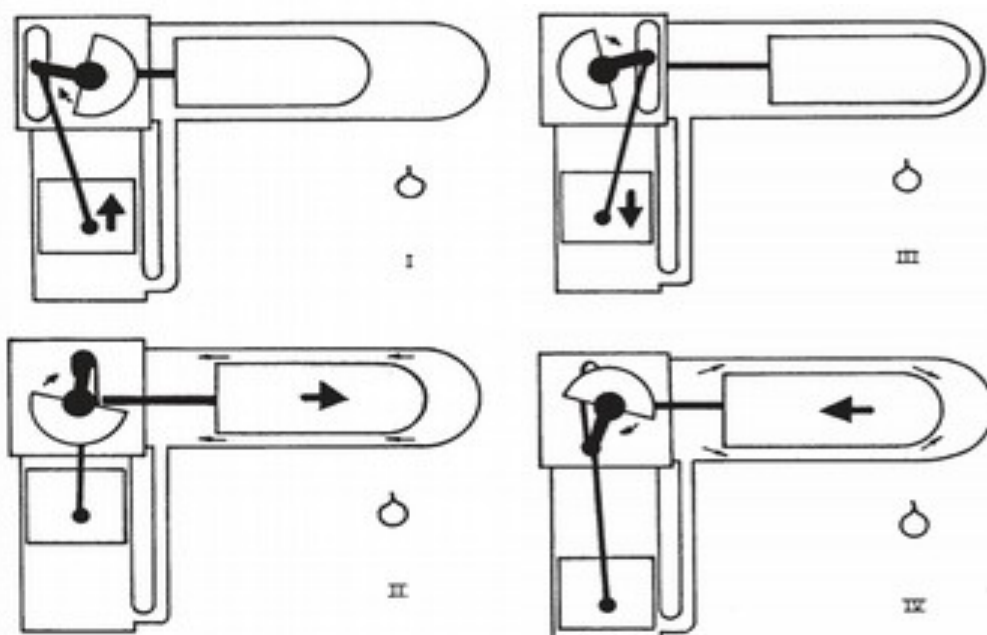
$$W = Q_1 - Q_2 \quad (6)$$

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.

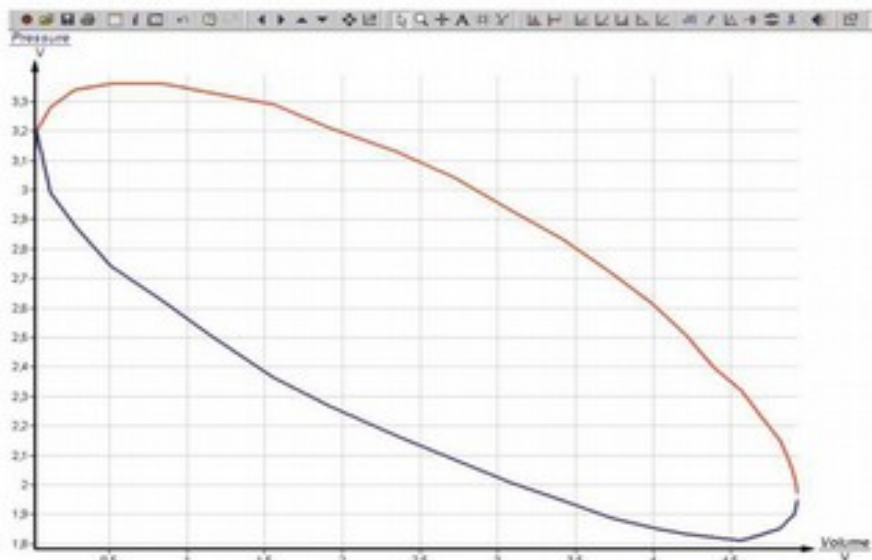
Schemat rzeczywistego silnika Stirlinga pokazane jest na rys. 2.



Rys.2 Zasada działania dwucylindrowego silnika Sterlinga.

### Ćwiczenie 9: Wyznaczanie sprawności 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.

W doświadczeniu wyznaczamy:

- współczynnik sprawności cieplnej palnika (zewnętrznego źródła ciepła),
- pracę całkowitą wykonaną przez silnik w jednym cyklu,
- pracę mechaniczną ruchu obrotowego i moc mechaniczną jako funkcję częstotliwości obrotowej, przy wykorzystaniu miernika momentu siły,
- sprawność silnika

Do wyznaczania sprawności cieplnej palnika potrzebna jest znajomość mocy cieplnej palnika.

### III. Wyznaczanie mocy cieplnej palnika

Przebieg pomiarów

1. Przy pomocy menzurki odmierzamy  $\Delta V$  (około 5 ml) alkoholu i wlewamy go do palnika.
2. Mierzmy czas spalania alkoholu przy pomocy stopera.
3. Wyniki zapisujemy w tabelce:

Lp	$\Delta V [ml]$	$\Delta t [s]$	$\rho [g/ml]$	$H [kJ/g]$	$\Delta m = \rho \cdot \Delta V [g]$	$u = \Delta m / \Delta t$	$P_H [W]$
1			0.83	25			

4. Masę spalonego alkoholu wyznaczamy ze wzoru:

$$\Delta m = \rho \cdot \Delta V \text{ a szybkość spalania } u = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (8)$$

### Ćwiczenie 9: Wyznaczanie sprawności silnika Strlinga

5. Moc cieplną palnika obliczmy z zależności:

$$P_H = u \cdot H, \quad (9)$$

gdzie  $H$  jest ciepłem spalania alkoholu.

Ze względów czasowych można tą część eksperymentu pominąć przyjmując w dalszej części ćwiczenia moc cieplną palnika  $P_H = 167W$ .

## IV. Wyznaczanie pracy całkowitej wykonanej przez silnik w jednym cyklu.

Sprawdzić połączenia:

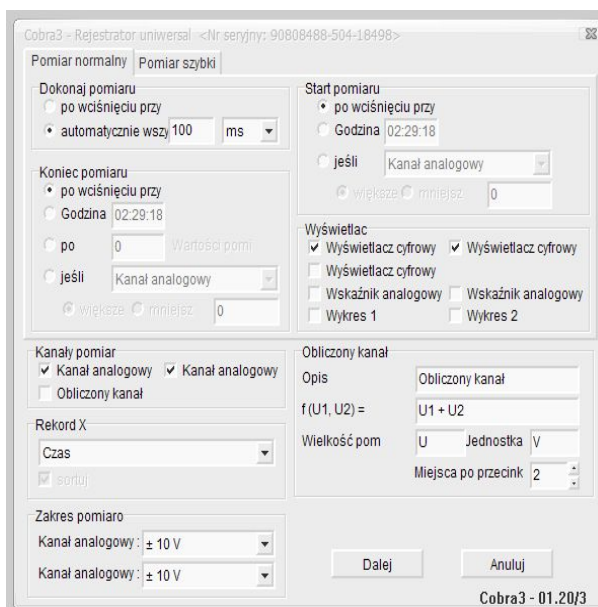
-Termopara mierząca temperaturę gorącego końca silnika powinna być połączona z gniazdem  $T_1$ , a termopara mierząca temperaturę chłodnicy z gniazdem  $T_2$  miernika p-V-n-T.  
-Przetwornik ciśnienia i objętości przy silniku powinien być połączony z odpowiednim gniazdem miernika.

-Wyjście „V” miernika połączyć z wejściem „Analog In1/S1” interfejsu Cobra3.

-Wyjście „p” miernika połączyć z wejściem „Analog In2/S2 interfejsu.

-Podłączyć zasilanie Cobra3 oraz wyjście USB z komputerem. W pierwszej kolejności należy przeprowadzić kalibrację przetworników objętości i ciśnienia w napięcie elektryczne. W tym celu należy:

1. Włączyć miernik p-V-n-T, wcisnąć przycisk kalibracji „ $\Delta T$ ”.
2. Ustawić tłok w cylindrze pionowym silnika w pozycji najmniejszej objętości (najniższe położenie tłoka mosiężnego).
3. Wcisnąć na mierniku przycisk „Kalibracja V”. Miernik wskaże liczbę obrotów  $n=0$ , temperaturę  $T_1$  i  $T_2$ .
4. Uruchomić program „measure”
5. Wybrać przycisk „miernik”

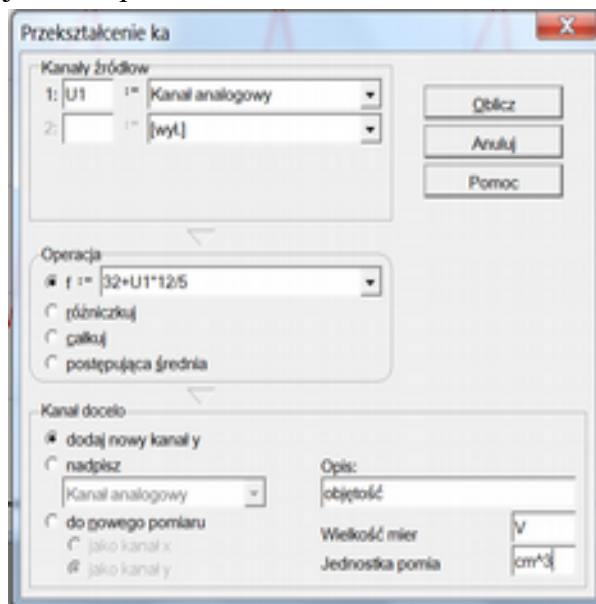


Rys.4 Ustawienie pomiaru kalibracyjnego

6. Wybrać „Cobra3 Rejestrator uniwersal”
7. Wybrać „pomiar normalny, wcisnąć „Dalej” i następnie „Uruchomić pomiar”.
8. Obracać koło zamachowe silnika ręcznie ruchem jednostajnym obrotowym z taką prędkością kątową, aby przemiana gazu w silniku mogła być traktowana jako izotermiczna.

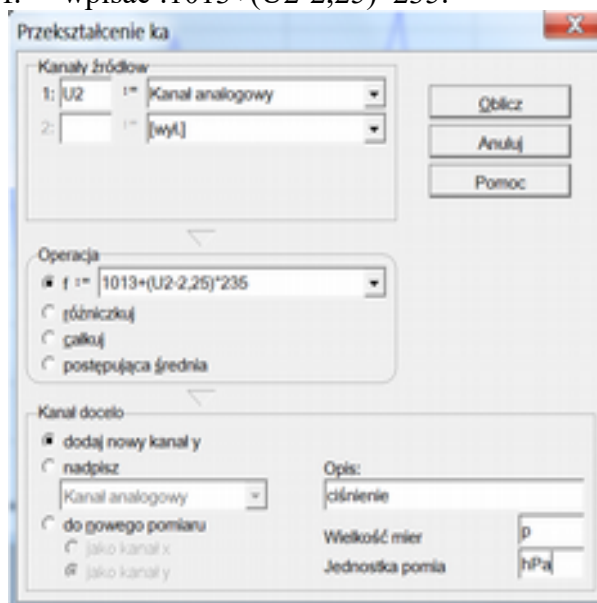
*Ćwiczenie 9: Wyznaczanie sprawności silnika Strlinga*

9. Po wykonaniu kilku pełnych obrotów wcisnąć przycisk „Zakończ pomiar”
10. Na ekranie zostaną wyświetlone dwa wykresy: czerwony przedstawiający napięcie odpowiadające objętości i niebieski przedstawiający napięcie odpowiadające ciśnieniu w funkcji czasu.
11. Kliknąć na krzywą oznaczoną kolorem czerwonym.
12. Nacisnąć przycisk „Przekształcenie kanału”.
13. W miejscu „Operacja f:=” wpisać:  $32+U1*12/5$ .



Rys.5 Kalibracja przetwornika objętości

14. W opisie zamiast „kanał analogowy” wpisać „Objętość”, wielkość mierzona „V”, jednostka pomiarowa „cm<sup>3</sup>”
15. Kliknąć przycisk „Oblicz”. Na ekranie pojawi się wykres objętości w funkcji czasu w kolorze zielonym.
16. Kliknąć krzywą oznaczoną kolorem niebieskim. Zmienia się opis osi pionowej. Napięcie U2 w woltach zależne od ciśnienia gazu w silniku.
17. Kliknąć przycisk „Przekształcanie kanału”.
18. W pozycji „Operacja f:=” wpisać : $1013+(U2-2,25)*235$ .

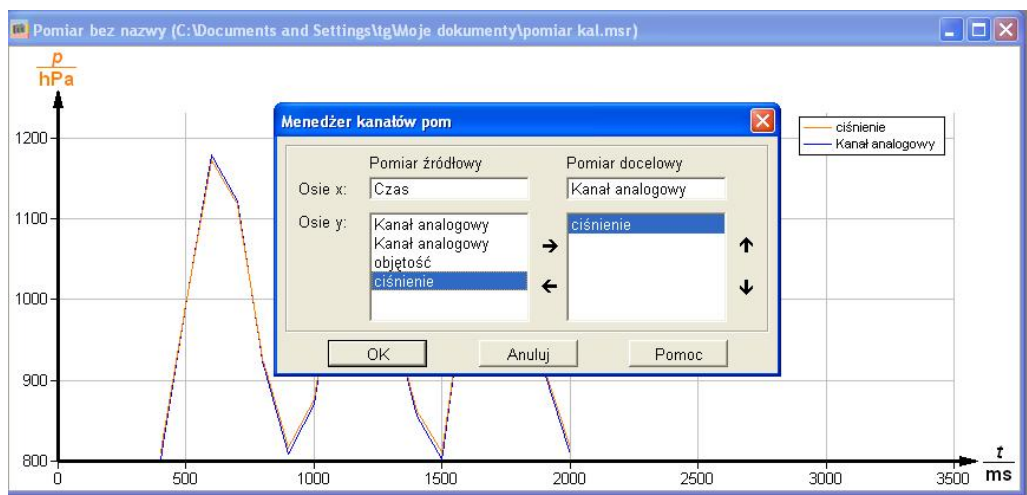


Rys.6 Kalibracja przetwornika ciśnienia

19. W opisie zamiast „Kanał analogowy” wpisać „Ciśnienie”, wielkość mierzona „p”, jednostka pomiarowa „hPa”.

*Ćwiczenie 9: Wyznaczanie sprawności silnika Strlinga*

20. Kliknąć „Oblicz”. W oknie pojawi się czerwony wykres ciśnienia w funkcji czasu.
21. Przy pomocy przycisków „Zaznaczenie” i „Wycięcie” wybrać obszar monotonicznych zmian napięcia  $U_2$  i ciśnienia  $p$  w funkcji czasu. Przyciskami „U1” i „V” można usunąć fragmenty wykresów  $U_1(t)$  i  $V(t)$ .
22. Wybrać „Pomiar” i z menu rozwijanego „Manager kanałów pomiarowych”
23. Drugi kanał analogowy  $U_2(t)$  wybrać jako oś X, ciśnienie jako oś Y.

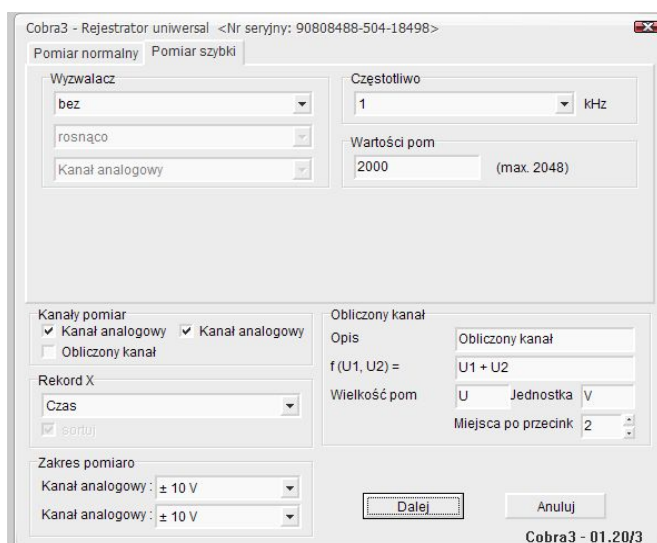


Rys.7 Tworzenie zależności napięcia  $U_2$  od ciśnienia

24. Kliknąć przycisk „OK.”
25. Pojawi się okno „Konwertuj relację na funkcję”. Kliknij wybór „Zachowaj tylko wartości do pierwszego zakłócenia monotoniczności”
26. Kliknij „OK.” W oknie pojawi się wykres zależności ciśnienia od  $U_2$ .
27. Wybrać przycisk „Dopasuj krzywą”
28. Wybierz linię prostą  $y = a \cdot x + b$ .
29. Kliknij „Oblicz”
30. Zapisz wartości  $a$  i  $b$ . Jest to koniec kalibracji układu.

Zapał palnik i podsuń pod cylinder poziomy. Gdy różnica temperatur  $T_1$  i  $T_2$  będzie około 70K uruchom silnik ręcznie przekręcając koło zamachowe zgodnie z ruchem wskazówek zegara. Odczytaj ustalone wartości liczby obrotów  $n$  i temperatur  $T_1$  i  $T_2$ . Wyniki zanotuj w tabelce.

Kliknij przycisk „Miernik”.

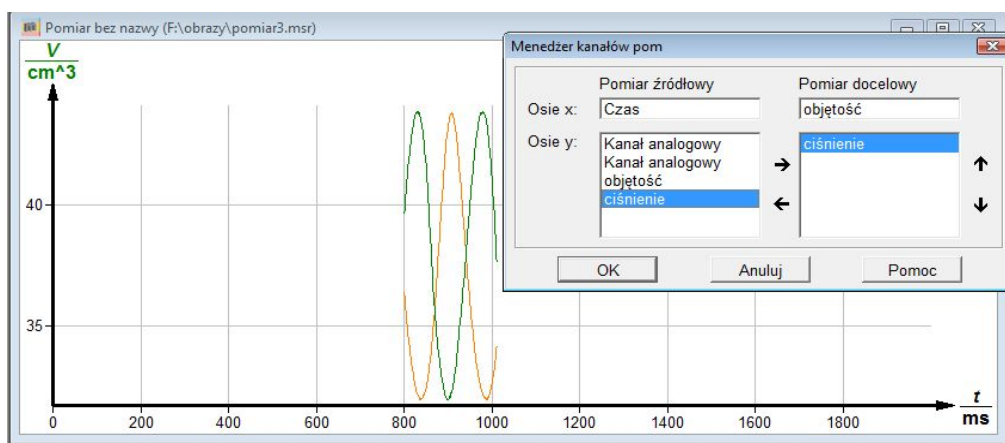


Rys.8 Parametry pomiaru



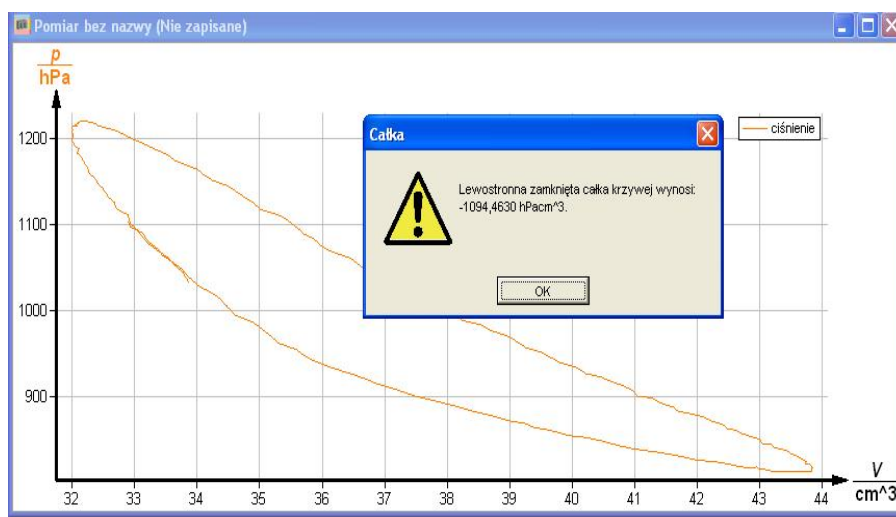
*Ćwiczenie 9: Wyznaczanie sprawności silnika Strlinga*

31. Wybrać „Cobra3 Rejestrator uniwersal”
32. Kliknąć „Szybki pomiar”.
33. Wybrać 2000 punktów pomiarowych.
34. Rozpocząć pomiar
35. Po zakończeniu pomiaru w oknie pojawią się dwa wykresy  $U_1(t)$  i  $U_2(t)$ .
36. Dokonać przekształcenia kanału  $U_1(t)$  w  $V(t)$  zgodnie z punktami 11 – 15
37. Dokonać przekształcenia kanału  $U_2(t)$  w  $p(t)$ . W pozycji „Operacja f:=”  $a*U_2+b$ , gdzie  $a$  i  $b$  są wartościami uzyskanymi w punkcie 30.
38. Przy pomocy przycisków „Zaznaczanie” i „Wycięcie” wybrać obszar zmian  $V(t)$  i  $p(t)$  nieznacznie przewyższający jeden okres.
39. Wybrać „Pomiar” i z menu rozwijanego „Manager kanałów pomiarowych”.
40. „Objętość” wybrać jako oś X, „Ciśnienie” wybrać jako oś Y.
41. Kliknąć przycisk „Porzuć pomiar w trybie relacji”.



Rys.9 Konwersja  $U_1, U_2$  w pętlę pV

42. W oknie zobaczymy pętlę pV. Pole tej pętli jest pracą wykonaną przez silnik w jednym cyklu. W celu obliczenia tej pracy kliknąć przycisk „Pokaż całkę”. Wartość bezwzględna liczby w oknie jest oczekiwaną pracą  $W_{pV}$ . Wyniki zapisujemy w tabeli.



Rys.10 Cykl Stirlinga w układzie p-V



### Ćwiczenie 9: Wyznaczanie sprawności silnika Strlinga

43. Obciążamy silnik momentem mechanicznym  $M$  dokręcając śrubę wskazówki w celu zwiększenia siły tarcia na osi.
44. Po ustaleniu się szybkości obrotów silnika notujemy jej wartość wraz z temperaturami  $T_1$  i  $T_2$  oraz wyznaczamy pole pętli  $pV$  (punkty 35-43).
45. Zwiększamy moment mechaniczny średnio co  $2 \times 10^{-3}$  Nm aż do zatrzymania silnika. Po ustaleniu wartości momentu siły (eliminacja niewielkich drgań wskazówki) powtarzamy procedurę określania pola powierzchni pętli  $pV$ . Regulacje momentu należy przeprowadzać ostrożnie aby nie „zdławić” silnika.

## V. Tabela pomiarowa

L.p.	M [ $10^{-3}$ Nm]	n [ $\text{min}^{-1}$ ]	$T_1$ [K]	$T_2$ [K]	$W_m$ [mJ]	f [Hz]	$P_m$ [mW]	$W_{pV}$ [mJ]	$W_{fr}$ [mJ]

## VI. Opracowanie wyników

Pracę mechaniczną wykonaną przez silnik w jednym cyklu (jednym pełnym obrocie),  $W_m$ , obliczamy ze wzoru:

$$W_m = 2\pi \cdot M \quad (10)$$

gdzie  $M$  jest momentem mechanicznym obciążającym silnik.

Po przeliczeniu liczby obrotów  $n$  na częstotliwość  $f$  moc mechaniczną silnika można wyrazić wzorem:

$$P_m = W_m \cdot f \quad (11)$$

Praca silnika wykonana w celu pokonania wszelkich sił tarcia w jednym cyklu będzie dana wyrażeniem:

$$W_{fr} = W_{pV} - W_m \quad (12)$$

1. Obliczyć pracę mechaniczną,  $W_m$ , częstotliwość  $f$ , moc mechaniczną  $P_m$  i pracę silnika na pokonanie sił tarcia,  $W_{fr}$  zgodnie z wzorami (10) – (12) i wpisać do tabelki.
2. Sporządzić na jednym rysunku wykresy  $W_{pV}(f)$ ,  $W_m(f)$  i  $W_{fr}(f)$
3. Dla maksymalnej mocy mechanicznej silnika,  $P_m$ , obliczamy: sprawność palnika, sprawność termiczną cyklu i sprawność mechaniczną silnika.

Sprawność palnika definiujemy wzorem:

$$\eta = \frac{W_m}{W_H} \cdot 100\% \quad (13)$$

gdzie  $W_H$  jest energią dostarczoną przez palnik w jednym cyklu pracy silnika.  $W_H$  może być obliczona z zależności:

$$W_H = \frac{P_H}{f}, \quad (14)$$

### Ćwiczenie 9: Wyznaczanie sprawności silnika Strlinga

gdzie  $P_H$  jest mocą palnika określoną na początku eksperymentu ( $P_H = 167W$ ),  
 $f$  częstotliwością obrotów silnika.  
Sprawność termiczną cyklu obliczamy ze wzoru:

$$\eta_T = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\% \quad (15)$$

Sprawność mechaniczną określa wzór:

$$\eta_m = \frac{W_m}{W_{pV}} \cdot 100\% \quad (16)$$

Zestawić i przedyskutować uzyskane wyniki sprawności

## **VII. 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://www.kmciso.ps.pl/stirling>
6. [http://noweenergie.org/index.php?page=artykuly&a\\_id=20](http://noweenergie.org/index.php?page=artykuly&a_id=20)