



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

**POLI
TECH
NIKA** 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, <http://www.cns.pcz.pl>

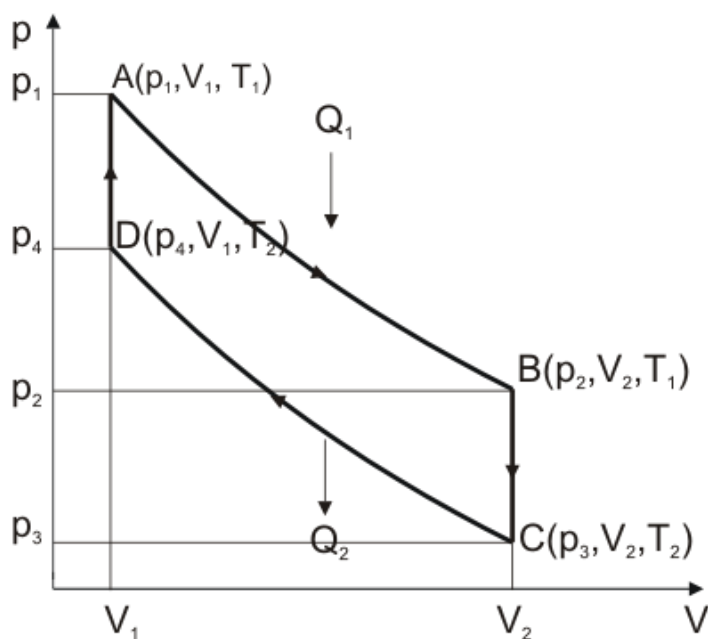
I. Zagadnienia do przystudiowania:

- 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:

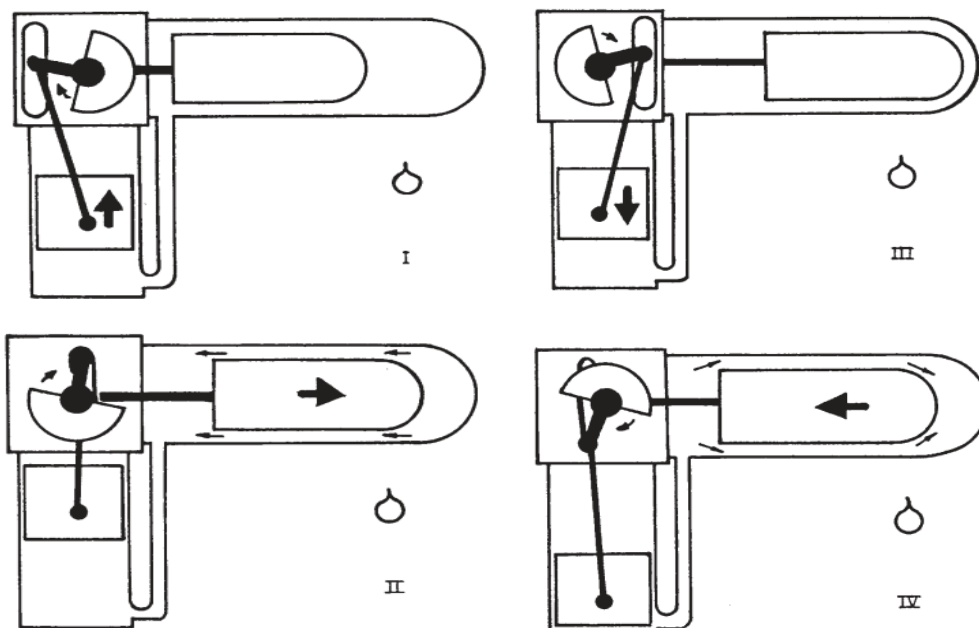
$$W = Q_1 - Q_2 \quad (6)$$

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 Stirlinga.

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 odmierzymy ΔV (około 5 ml) alkoholu i wlewamy go do palnika.
2. Mierzmy czas spalania alkoholu przy pomocy stopera.
3. Wyniki zapisujemy w tabelce:

Lp.	ΔV [ml]	Δt [s]	ρ [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:

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

5. Moc cieplną palnika obliczymy 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 $P_H = 167 W$.

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.

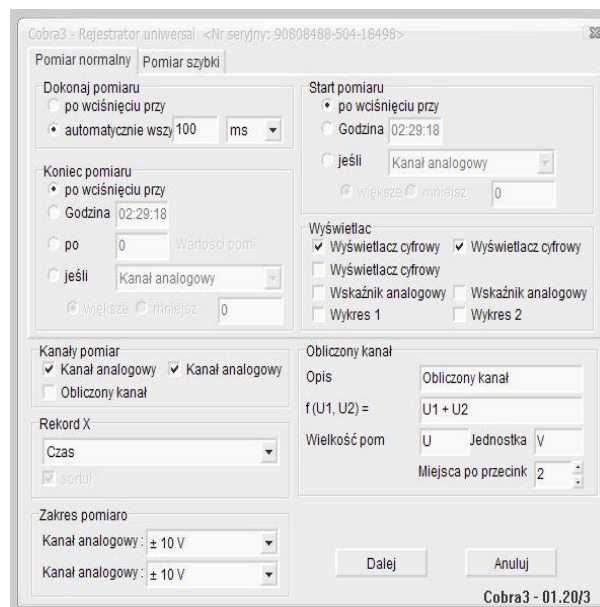
-Wyjście „V” miernika połączyć z wejściem „Analog In1/S1” interfejsu Cobra3.

-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 „ ΔT ”.
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”

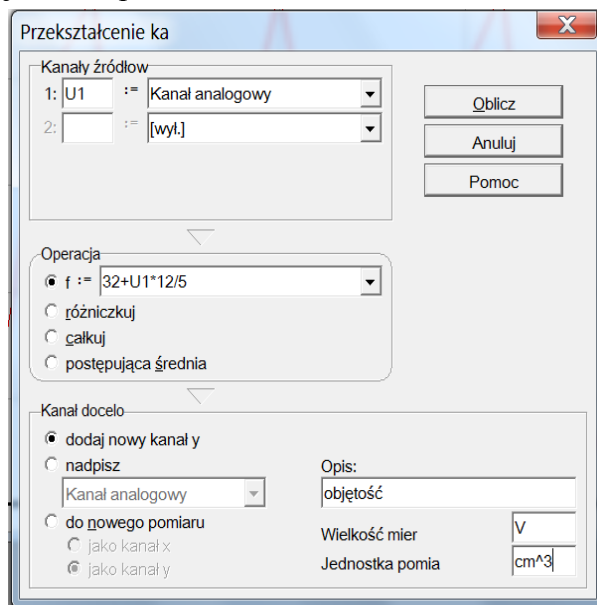


Rys.4 Ustawienie pomiaru kalibracyjnego

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.
9. Po wykonaniu kilku pełnych obrotów wcisnąć przycisk „Zakończ pomiar”

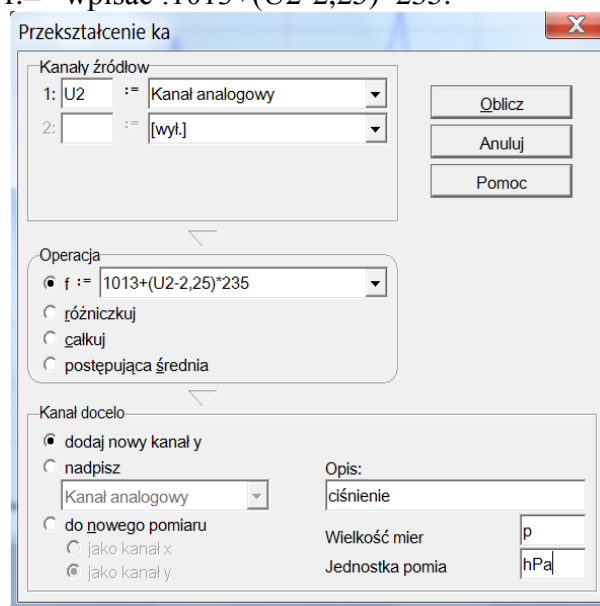
Ćwiczenie 9: Wyznaczanie sprawności silnika Stirlinga

- Na ekranie zostaną wyświetlone dwa wykresy: czerwony przedstawiający napięcie odpowiadające objętości i niebieski przedstawiający napięcie odpowiadające ciśnieniu w funkcji czasu.
- Kliknąć na krzywą oznaczoną kolorem czerwonym.
- Nacisnąć przycisk „Przekształcenie kanału”.
- W miejscu „Operacja f:=” wpisać: $32+U1*12/5$.



Rys.5 Kalibracja przetwornika objętości

- W opisie zamiast „kanał analogowy” wpisać „Objętość”, wielkość mierzona „V”, jednostka pomiarowa „cm³”.
- Kliknąć przycisk „Oblicz”. Na ekranie pojawi się wykres objętości w funkcji czasu w kolorze zielonym.
- Kliknąć krzywą oznaczoną kolorem niebieskim. Zmienia się opis osi pionowej. Napięcie U2 w woltach zależne od ciśnienia gazu w silniku.
- Kliknąć przycisk „Przekształcanie kanału”.
- W pozycji „Operacja f:=” wpisać : $1013+(U2-2,25)*235$.

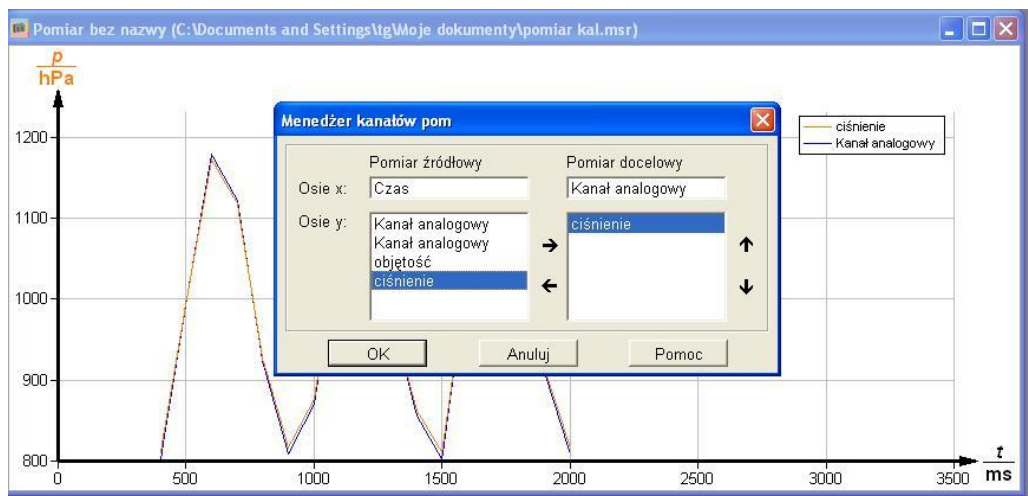


Rys.6 Kalibracja przetwornika ciśnienia

- W opisie zamiast „Kanał analogowy” wpisać „Ciśnienie”, wielkość mierzona „p”, jednostka pomiarowa „hPa”.
- Kliknąć „Oblicz”. W oknie pojawi się czerwony wykres ciśnienia w funkcji czasu.

Ćwiczenie 9: Wyznaczanie sprawności silnika Stirlinga

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.

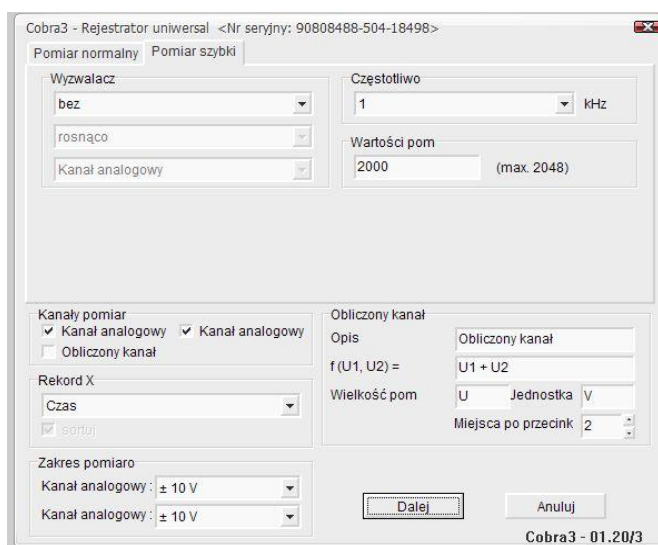


Rys.7 Tworzenie zależności napięcia U_2 od ciśnienia

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.

Zapal 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.

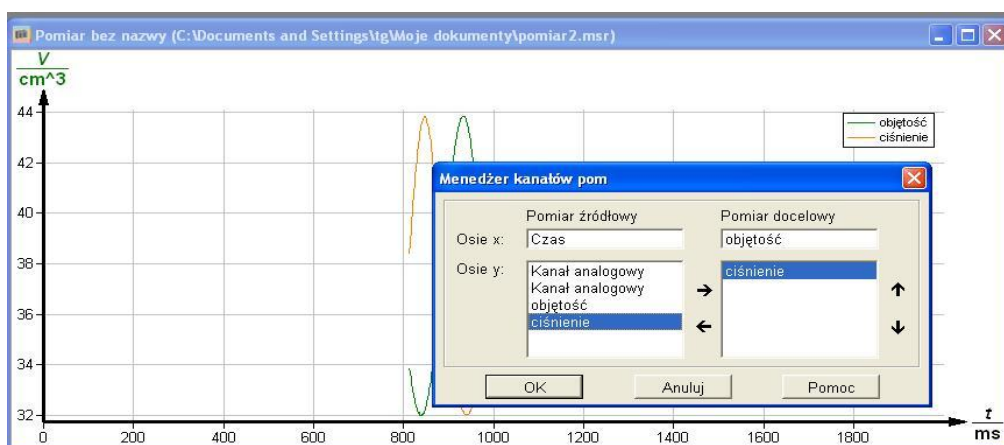
Kliknij przycisk „Miernik”.



Rys.8 Parametry pomiaru

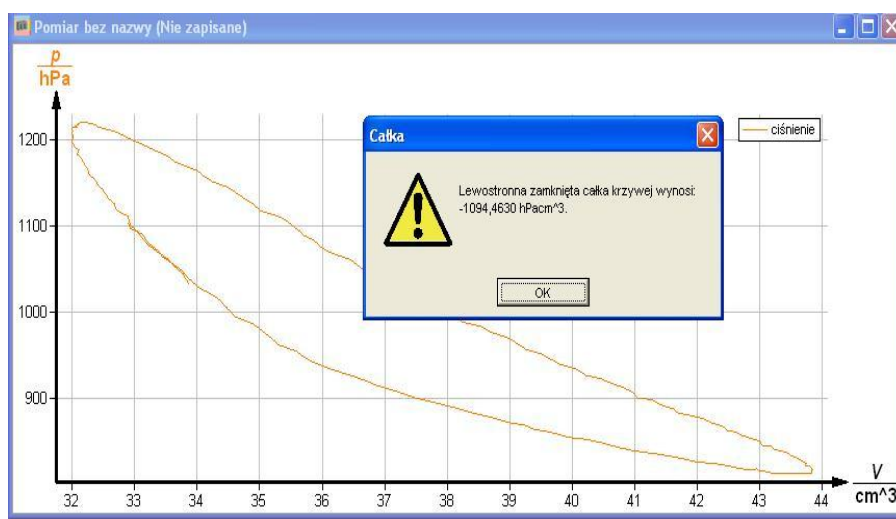
Ćwiczenie 9: Wyznaczanie sprawności silnika Stirlinga

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 Stirlinga

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 2×10^{-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 [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:

Ćwiczenie 9: Wyznaczanie sprawności silnika Stirlinga

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

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
5. <http://www.kmciso.ps.pl/stirling/>
6. http://noweenergie.org/index.php?page=artykuly&a_id=20