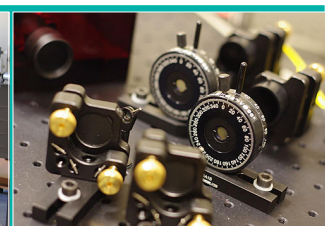
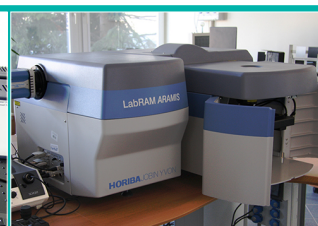


## Ćwiczenie 9

# Wyznaczanie parametrów technicznych silnika Stirlinga (wersja z Cobrą)

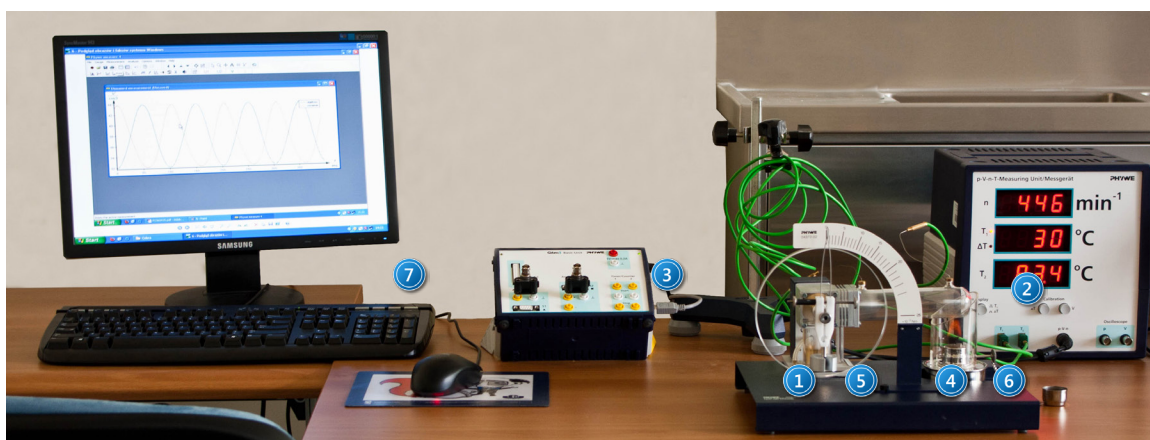


## I. Zagadnienia do opracowania.

1. Ruch obrotowy jednostajny:
  - a) prędkość kątowna;
  - b) prędkość liniowa;
  - c) moment obrotowy;
  - d) moc w ruchu obrotowym;
  - e) moment bezwładności.
2. Pomiar temperatury i skale termometryczne.
3. Budowa i zastosowanie termopar.
4. Ciepło właściwe, parowania, spalania cieczy.
5. Przemiany stanu gazów:
  - a) równanie stanu gazu doskonałego;
  - b) przemiana izotermiczna;
  - c) przemiana izochoryczna;
  - d) przemiana izobaryczna.
6. Pierwsza i druga zasada termodynamiki.
7. Cykl Carnota:
  - a) równanie adiabaty;
  - b) równanie izotermy;
  - c) energia wewnętrzna ciała roboczego;
  - d) twierdzenie Carnota.
8. Silniki cieplne.
9. Silniki Stirlinga:
  - a) budowa i zasada działania;
  - b) wady i zalety silnika Stirlinga;
  - c) zastosowanie silników Stirlinga.

## II. Zadania doświadczalne.

1. Zapoznać się z układem pomiarowym przedstawionym na *Zdjęciu 1*.



Zdjęcie 1. Układ pomiarowy z silnikiem Stirlinga i modułem Cobra 3: 1 – model silnika Stirlinga; 2 – miernik p-V-n-T; 3 – moduł pomiarowy Cobra 3; 4 – skala miernika momentu obrotowego; 5 – miernik momentu obrotowego; 6 – palnik z nałożonym kominem; 7 – zestaw komputerowy.

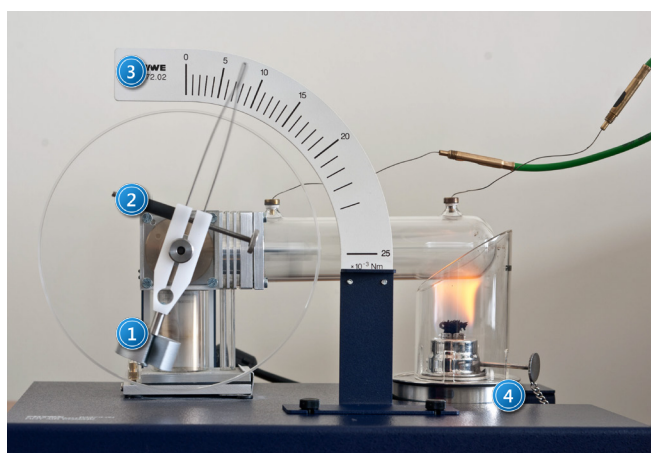
2. Przygotować układ do rozpoczęcia pomiarów zgodnie z opisem w *Dodatku A*.
3. Wyznaczyć moc  $P_H$  palnika. W tym celu zważyć palnik z metanolem przed rozpoczęciem pomiarów. Zapalić palnik, założyć komin oraz rozpocząć pomiar czasu. Po zakończeniu wszystkich pomiarów i zgaszeniu palnika, niezwłocznie zanotować wskazanie stopera i ponownie zważyć palnik.



## UWAGA!

Zapalenie palnika może się odbyć tylko w obecności prowadzącego ćwiczenie.

4. Uruchomić model silnika Stirlinga. W tym celu przełączyć miernik p-V-n-T w tryb różnic temperatur i odczekać, aż  $\Delta T$  wyniesie  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , po czym zainicjować ruch silnika, lekko popychając ręką koło silnika w prawą stronę.  
Przed rozpoczęciem pomiarów odczekać około 5 minut na stabilizację układu.
5. Wyznaczyć pracę  $W_{pV}$  wykonywaną przez silnik w jednym cyklu pracy.  
W tym celu użyć aplikacji *Phywe Measure 4* zgodnie z opisem w *Dodatku B*.  
Stosowane przeliczniki:
  - przelicznik ciśnienia:  $1\text{ V} = 329\text{ hPa}$ ;
  - przelicznik objętości:  $1\text{ V} = 2,4\text{ cm}^3$ .
6. Wykonać pomiary momentu obrotowego  $M$  silnika od wartości  $0$  do  $18\text{ Nm}\cdot 10^{-3}$  na jego skali (3 na *Zdjęciu 2*) co jedną podziałkę. W tym celu ostrożnie założyć na silnik miernik momentu obrotowego (1 na *Zdjęciu 2*) tak, aby nie wpadł w oscylacje po czym stopniowo zwiększać moment obrotowy, zwiększając zacisk miernika (2 na *Zdjęciu 2*).  
Notować wartości częstotliwości  $f$  oraz temperatur  $T_1$  i  $T_2$  dla każdej wartości momentu obrotowego.



Zdjęcie 1. Uruchomiony silnik Stirlinga: 1 – miernik momentu obrotowego; 2 – śruba zaciskowa miernika; 3 – skala miernika; 4 – palnik z kominem.

7. Obliczyć pracę  $W_m$  i moc mechaniczną  $P_m$  silnika, a także pracę siły tarcia  $W_{fr}$  podczas jednego cyklu pracy silnika.

Wyniki pomiarów i obliczeń ująć w tabeli umieszczonej poniżej.

Tabela 1: Przykładowa tabela do wykonania obliczeń w ćwiczeniu.

lp.	$f$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	$f$ [ $\text{s}^{-1}$ ]	$M$ [ $\text{Nm} \times 10^{-3}$ ]	$T_1$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_2$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$\Delta T$ [K]	$W_m$ [mJ]	$P_m$ [mW]	$W_{fr}$ [mJ]

8. Wykreślić na wspólnym wykresie zależność pracy mechanicznej i pracy siły tarcia w funkcji częstotliwości oraz zależność mocy mechanicznej w funkcji częstotliwości. Wyciągnąć wnioski z otrzymanych zależności.
9. Na podstawie wyników pomiarowych dla maksymalnej wartości mocy mechanicznej obliczyć:
- liczbę moli gazu roboczego (do obliczeń przyjmując  $p = 1013 \text{ hPa}$ ,  $V = 38 \text{ cm}^3$ );
  - sprawność mechaniczną;
  - sprawność całkowitą;
  - sprawność Carnota.

### III. Zestaw przyrządów.

- Model silnika Stirlinga.
- Miernik p-V-n-T.
- Miernik momentu obrotowego ze skalą.
- Dwie termopary.
- Palnik z nakładanym kominem.
- Moduł pomiarowy Cobra 3.
- Zestaw komputerowy.
- Stoper.

### IV. Literatura.

- I. W. Sawieliew – „Kurs fizyki”, T.1 „Mechanika. Fizyka cząsteczkowa”, PWN, Warszawa 2000.
- R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands – „Feynmana wykłady z fizyki”, T. 1.2., PWN, 2004.
- A. K. Wróblewski, J. A. Zakrzewski – „Wstęp do fizyki”. T. 2., Cz. 2., PWN, Warszawa 1990.
- S. Żmudzi – „Silniki Stirlinga” – WNT, Warszawa 1993.
- F. Wolańczyk – „Termodynamika”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2007.
- Cz. Bobrowski – „Fizyka – krótki kurs”, Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 1998.
- J. Kociński – „Wstęp do fizyki współczesnej”, T.1., PWN Warszawa 1977.
- A.N. Matwiejew – „Fizyka cząsteczkowa”, PWN, Warszawa 1989.
- J. Orear – „Fizyka”, T.1, Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 1998.
- L.N. Cooper – „Istota i struktura fizyki”, PWN, Warszawa 1975
- B. Jaworski, A. Dietłaf, L. Miłkowska, G. Siergiejew – „Kurs fizyki”, T.1., PWN, Warszawa 1974.
- PHYWE Handbook “Laboratory Experiments Physics”, P2360415 „Stirling Engine”.
- R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands – “The Feynman Lectures on Physics”, Wesley 2005.
- J. Orear – “Physics”, Macmillan Publishing Co., Inc., 1979.
- L.N. Cooper – “An Introduction to the Meaning and Structure of Physics”, Harper & Row, 1968.



## Dodatek A

### Przygotowanie stanowiska doświadczalnego do pomiarów

#### I. Przygotowanie stanowiska do rozpoczęcia pomiarów obejmuje:

1. uzupełnienie zawartości paliwa w zbiorniku;
2. zamontowanie skali miernika momentu obrotowego;
3. podłączenie przewodów w układzie;
4. uruchomienie i kalibrację miernika p-V-n-T.

#### II. Uzupełnienie zawartości paliwa w zbiorniku

1. Wlać paliwo do pojemnika (2 na Zdjęciu 3).



Zdjęcie 3. Palnik wraz z kominem: 1 – nakrętka palnika;  
2 – zbiornik palnika; 3 – komin.

2. Założyć i dobrze zakręcić nakrętkę.

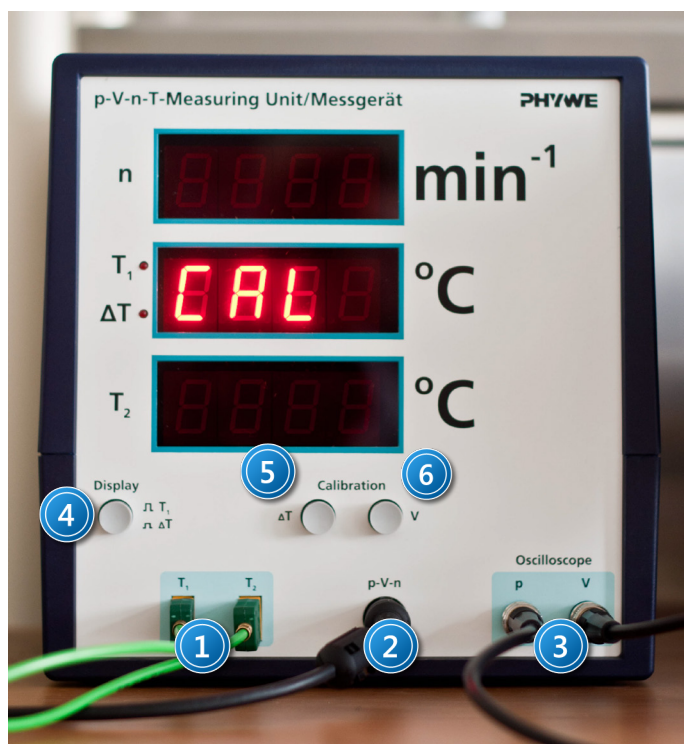


### Wskazówka

50 ml metanolu wystarcza na około godzinę pomiarów.

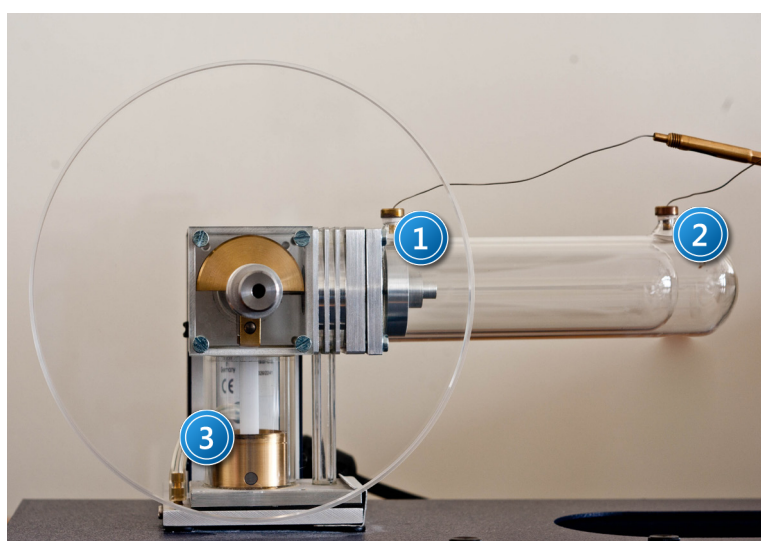
### III. Podłączenie przewodów w układzie.

1. Podłączyć do wejść miernika p-V-n-T obie termopary  $T_1$  i  $T_2$  (1 na Zdjęciu 4) oraz kabel p-V-n (2 na Zdjęciu 4), a także przewody BNC do wyjść pomiarowych ciśnienia i objętości (3 na Zdjęciu 4).



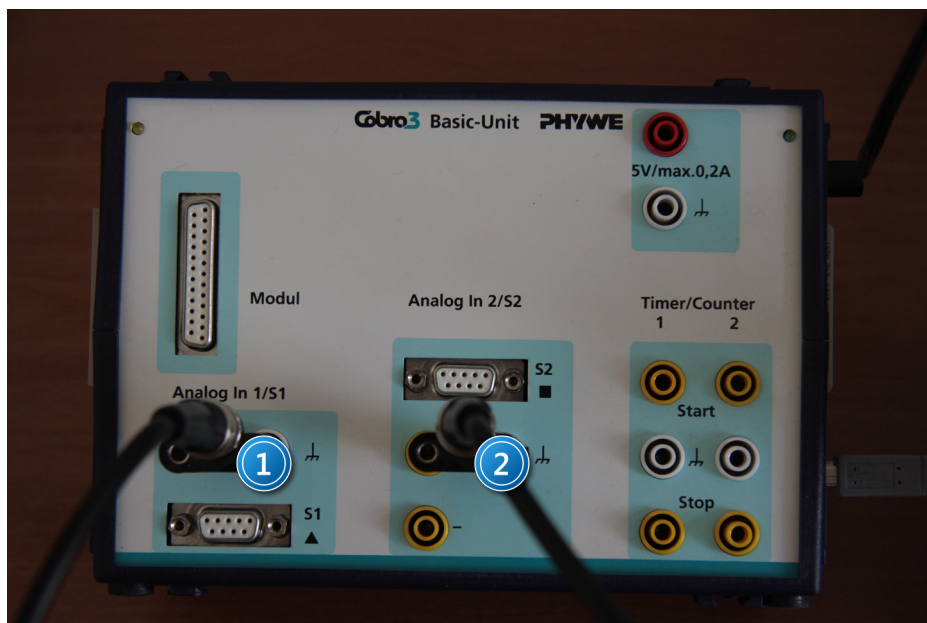
Zdjęcie 4. Widok przedniego panela miernika p-V-n-T: 1 – wejścia termopar  $T_1$ ,  $T_2$ ; 2 – wejście do miernika p-V-n; 3 – wyjścia oscyloskopowe p i V; 4 – przełącznik zmiany trybu wyświetlania temperatury; 5 – przyciski kalibracji temperatury i objętości.

2. Delikatnie wetknąć końcówki termopar do metalowych wypustek na poziomym cylindrze silnika, zgodnie z kolejnością pokazaną na Zdjęciu 5.



Zdjęcie 5: Model silnika Stirlinga z pionowym tłokiem ustawionym w dolnej pozycji : 1 i 2 – wtyki termopar odpowiednio  $T_1$  i  $T_2$ ; 3 – pionowy tłok silnika (w dolnym położeniu).

- Podłączyć przewody BNC z modułem pomiarowym Cobra 3.  
Kanał pomiaru objętości na jednostce p-V-n-T podłączyć do Analog In 1/S1 (1 na Zdjęciu 6) a kanał pomiaru ciśnienia do wejścia Analog In 2/S2 (2 na Zdjęciu 6) na module Cobra 3.



Zdjęcie 6. Widok modułu Cobra3: 1 – wejście Analog In 1; 2 – wejście Analog In 2.

#### IV. Uruchomienie i kalibracja miernika p-V-n-T.



### UWAGA!

**Kalibracji miernika p-V-n-T należy dokonywać w temperaturze pokojowej. Jeśli silnik jest ciepły odczekać aż ostygnie.**

- Ustawić silnik tak, aby pionowy tłok (3 na Zdjęciu 5) znajdował się w najniższym położeniu.
- Włączyć miernik p-V-n-T ( włącznikiem znajdującym się na tyle obudowy).
- Dokonać kalibracji temperatury poprzez kliknięcie przycisku  $\Delta T$  na panelu miernika p-V-n-T (5 na Zdjęciu 4), a następnie kalibracji objętości, klikając przycisk  $\Delta V$  (6 na Zdjęciu 4).

## Dodatek B

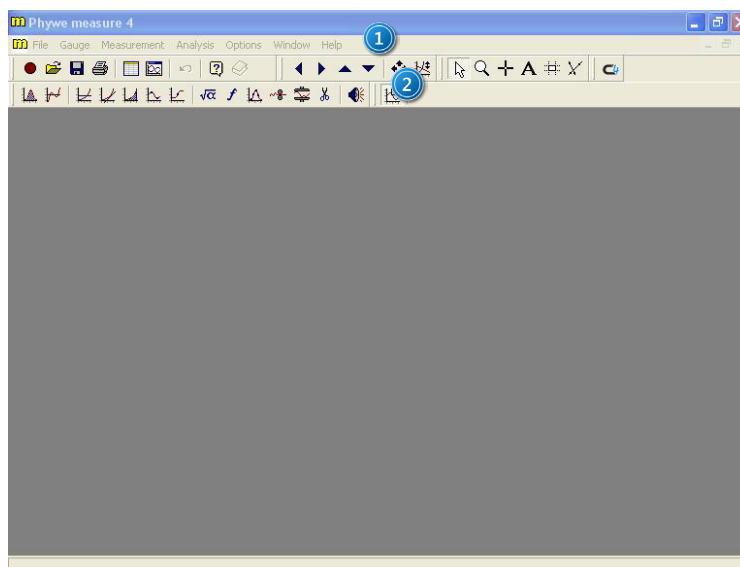
### Obsługa oprogramowania sterującego modułem Cobra 3

#### I. Zapis wyników pomiaru w komputerze.

1. Uruchomić program Cobra 3, klikając podwójnie na ikonę *measure* na pulpicie (Zdjęcie 7).  
Na ekranie pojawi się program *Phywe Measure 4* (Zdjęcie 8).



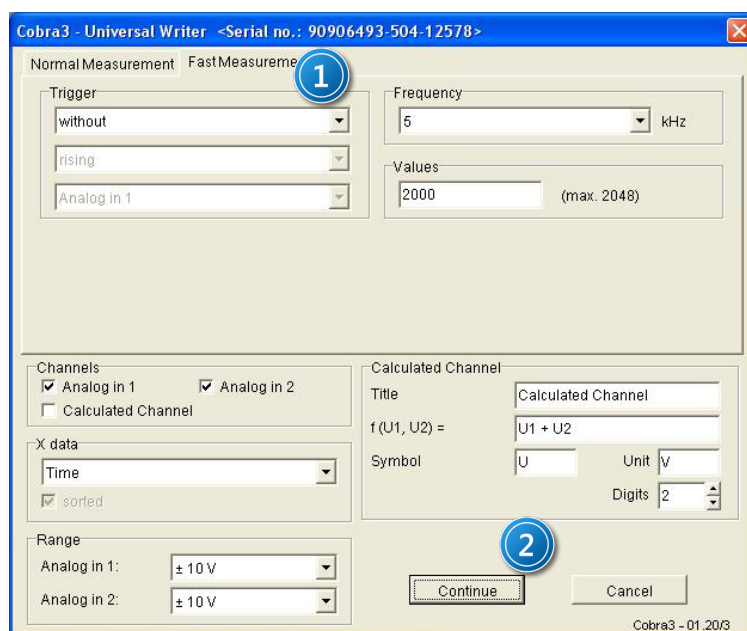
Zdjęcie 7. Widok ekranu : 1 – ikona programu *measure*.



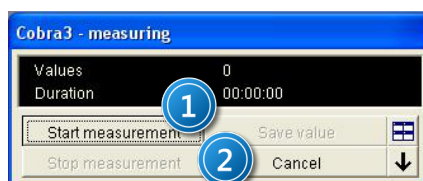
Zdjęcie 8. Okno główne programu *Phywe Measure 4*: 1 – menu programu; 2 – paski narzędziowe.



2. Włączyć kreator pomiarów, klikając w menu programu na opcję *Measurement > Universal Writer*. Na ekranie ukaże się okno o nazwie: *Cobra 3 – Universal Writer* (Zdjęcie 9).
3. W oknie *Cobra 3 – Universal Writer* (Zdjęcie 9), wybrać zakładkę *Fast Measurement* (1 na Zdjęciu 9), następnie ustawić wszystkie opcje zgodnie ze Zdjęciem 9 i zatwierdzić zmiany wciśnięciem przycisku *Continue* (2 na Zdjęciu 9). Na ekranie pojawi się okno: *Cobra 3 – measuring* (Zdjęcie 10).

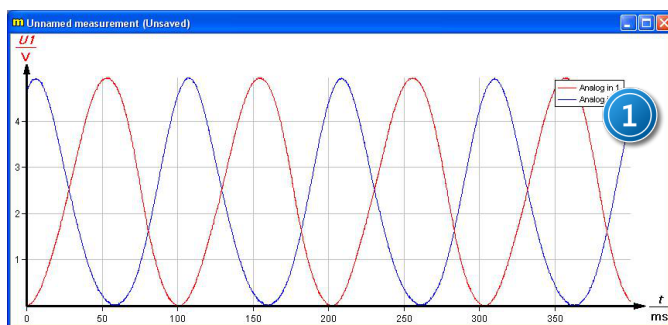


Zdjęcie 9. Okno *Cobra 3 – Universal Writer*: 1 – opcja *Fast Measurement*; 2 – zatwierdzenie zmian.



Zdjęcie 10. Okno *Cobra3 – measuring*: 1 – przycisk rozpoczynający pomiar; 2 – przycisk kończący pomiar.

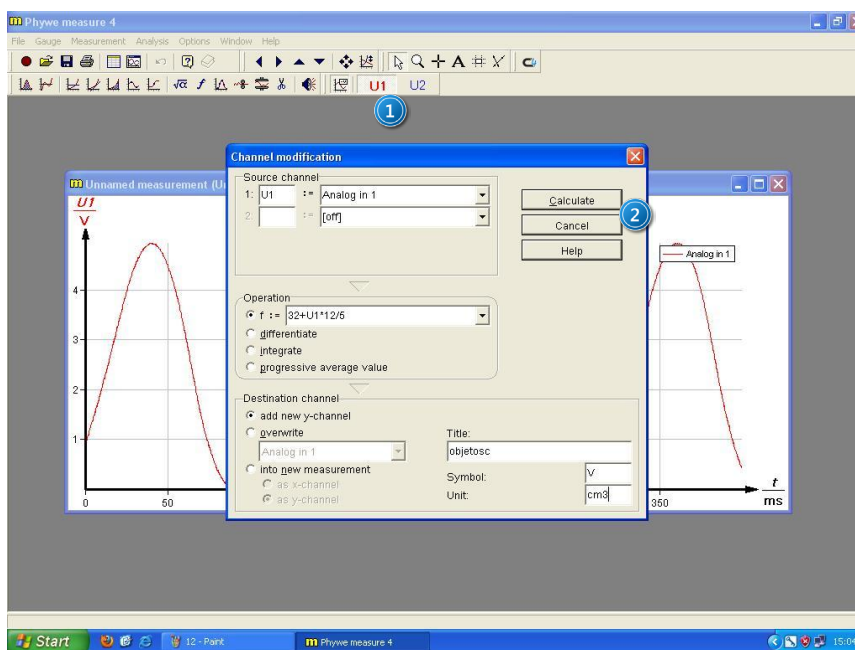
4. Rozpocząć pomiar przyciskiem *Start measurement* (1 na Zdjęciu 10).  
 Pomiar należy zakończyć po około 10 sekundach przyciskiem *Stop measurement* (2 na Zdjęciu 10). Po zakończeniu pomiarów na ekranie pojawi się okno z wykreślonymi wartościami obu kanałów (Zdjęcie 11).



Zdjęcie 11. Zarejestrowane wyniki przedstawione w formie wykresu: 1 – nazwy kanałów.

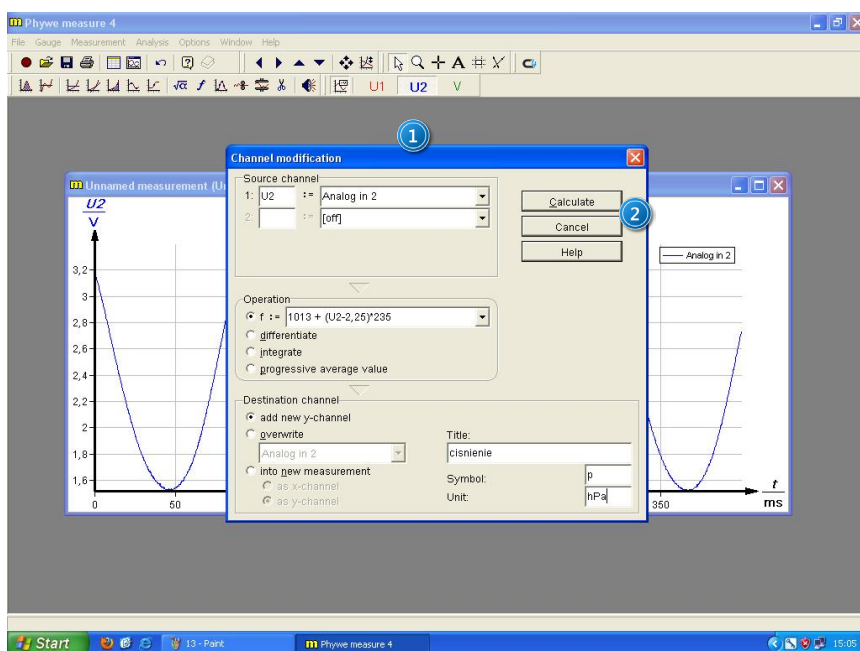
## II. Analiza pomiarów i wyznaczenie wielkości pola.

1. Klikając na listę kanałów wybrać tylko kanał  $U_1$  i korzystając z opcji *Analysis* → *Channel Modificaton*, przetransformować zmierzone napięcie na objętość cylindra silnika (zgodnie ze Zdjęciami 12 i 13).



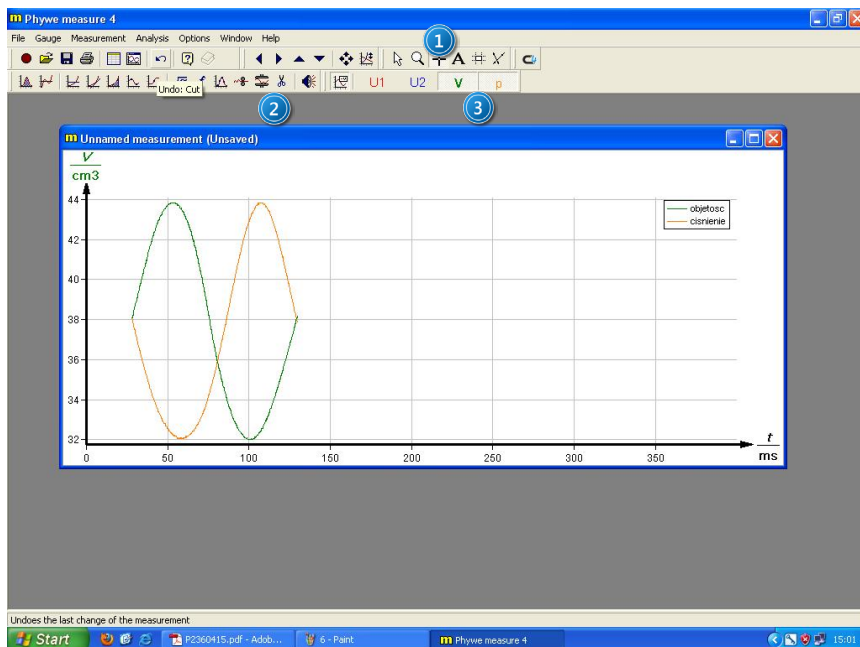
Zdjęcie 12. Okno przekształcenia napięcia na objętość: 1 – wybrany kanał  $U_1$ ; 2 – przycisk zatwierdzający zmiany.

Wprowadzone zmiany potwierdzić przyciskiem *Calculate* (2 na Zdjęciu 12).  
Powtórzyć operację dla kanału  $U_2$  reprezentującego ciśnienie (Zdjęcie 13).



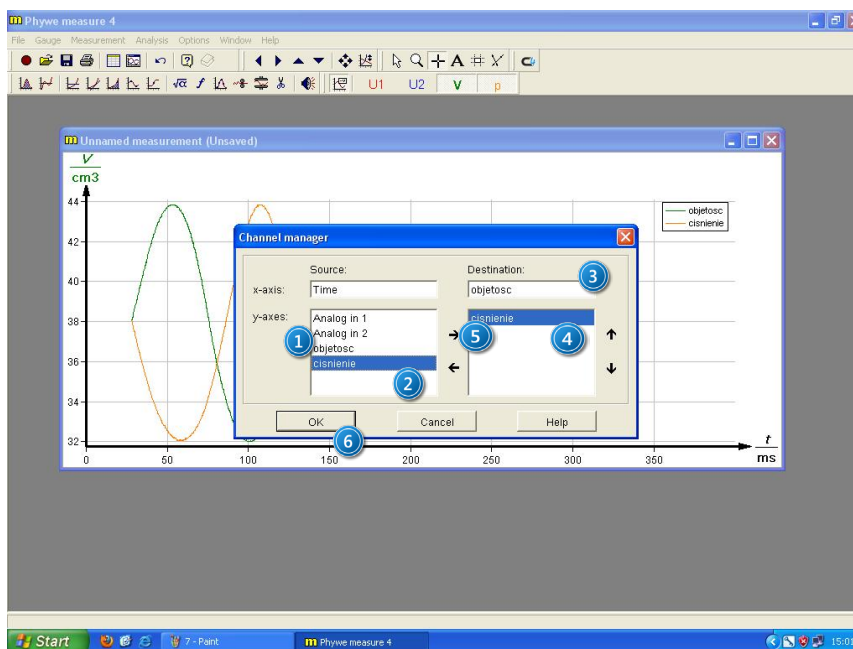
Zdjęcie 13. Okno przekształcenia napięcia na ciśnienie: 1 – wybrany kanał U2; 2 – przycisk zatwierdzający zmiany.

- Wyciąć część wykresu tak, aby pozostawić tylko jeden okres pracy silnika. W tym celu należy wybrać wyświetlanie ciśnienia i objętości (3 na Zdjęciu 14), następnie wybrać narzędzie *mark* (1 na Zdjęciu 14) z panelu narzędziowego, zaznaczyć niepotrzebne fragmenty wykresu i użyć narzędzia *cut* (2 na Zdjęciu 14).



Zdjęcie 14. Jeden cykl pracy silnika: 1 – narzędzie *Mark*; 2 – narzędzie *Cut*; 3 – zaznaczone kanały *V* i *p*.

- Przestawić wyświetlanie pomiarów na tryb XY, wybierając opcję *Analysis* → *Channel Manager*. W oknie *Chanel manager* zaznaczyć kanał odpowiadający objętości (1 na Zdjęciu 15) i kliknąć przycisk (5 na Zdjęciu 15). Objętość powinna zostać przypisana do osi X (3 na Zdjęciu 15).



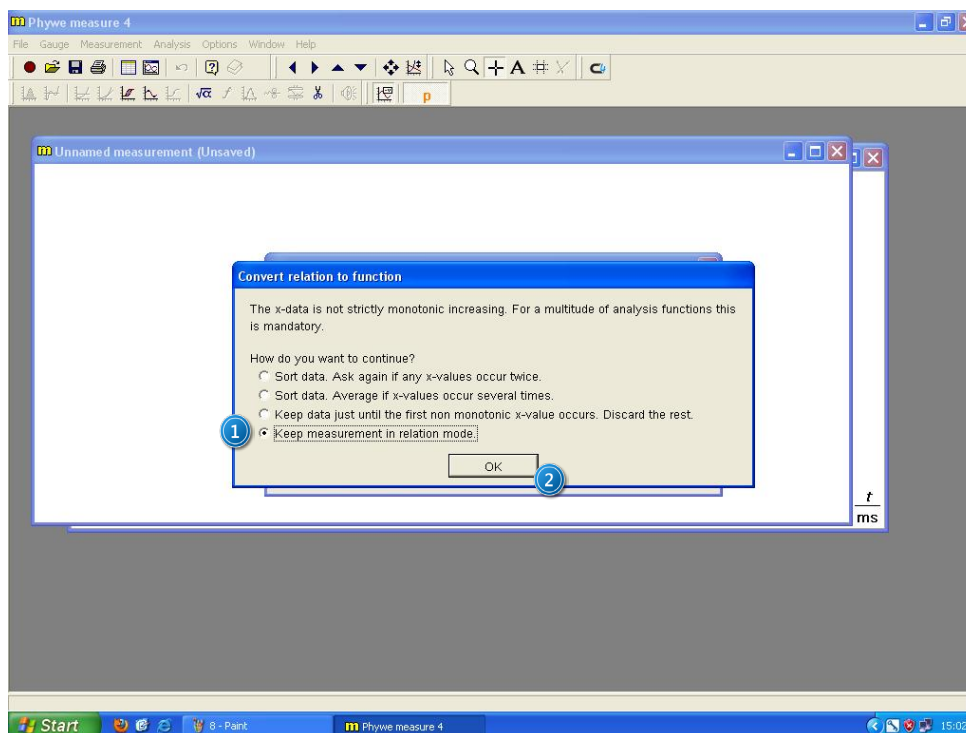
Zdjęcie 15. Transformacja wykresu w tryb XY: 1 – kanał pomiaru objętości; 2 – kanał pomiaru ciśnienia; 3 – kanał przypisany do osi X; 4 – kanał przypisany do osi Y; 5 – wybór kanału; 6 – zatwierdzenie zmian.

Następnie powtórzyć operację dla kanału reprezentującego ciśnienie (2 na Zdjęciu 15).

Poprawne przypisanie kanałów jest zaprezentowane na Zdjęciu 15.

Poprawnie przeprowadzone zmiany należy zatwierdzić przyciskiem OK. (6 na Zdjęciu 15).

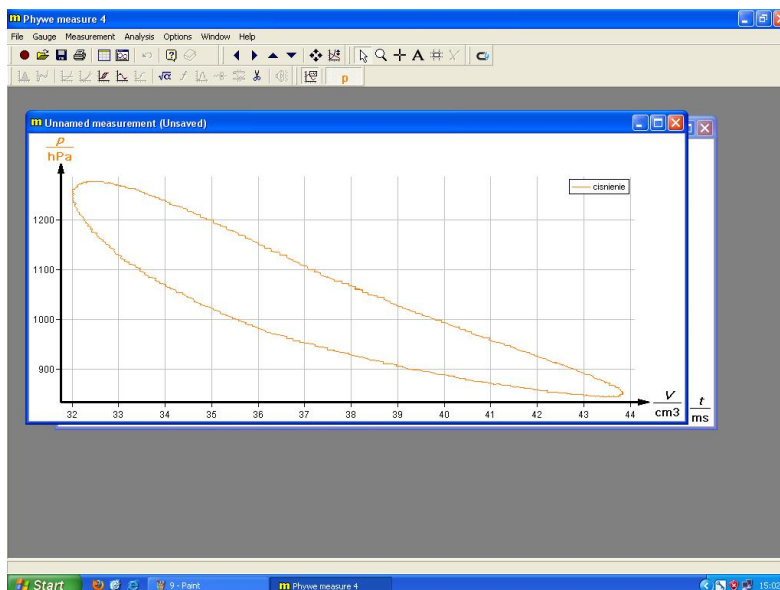
- Wybrać opcję *Keep measurement In relation mode* (1 na Zdjęciu 16) i zatwierdzić wybór klikając przycisk OK (2 na Zdjęciu 16).



Zdjęcie 16. Wybór relacji między kanałem  $U_1$  i  $U_2$ : 1 – opcja *Keep measurement in relation mode*; 2 – zatwierdzenie zmian.

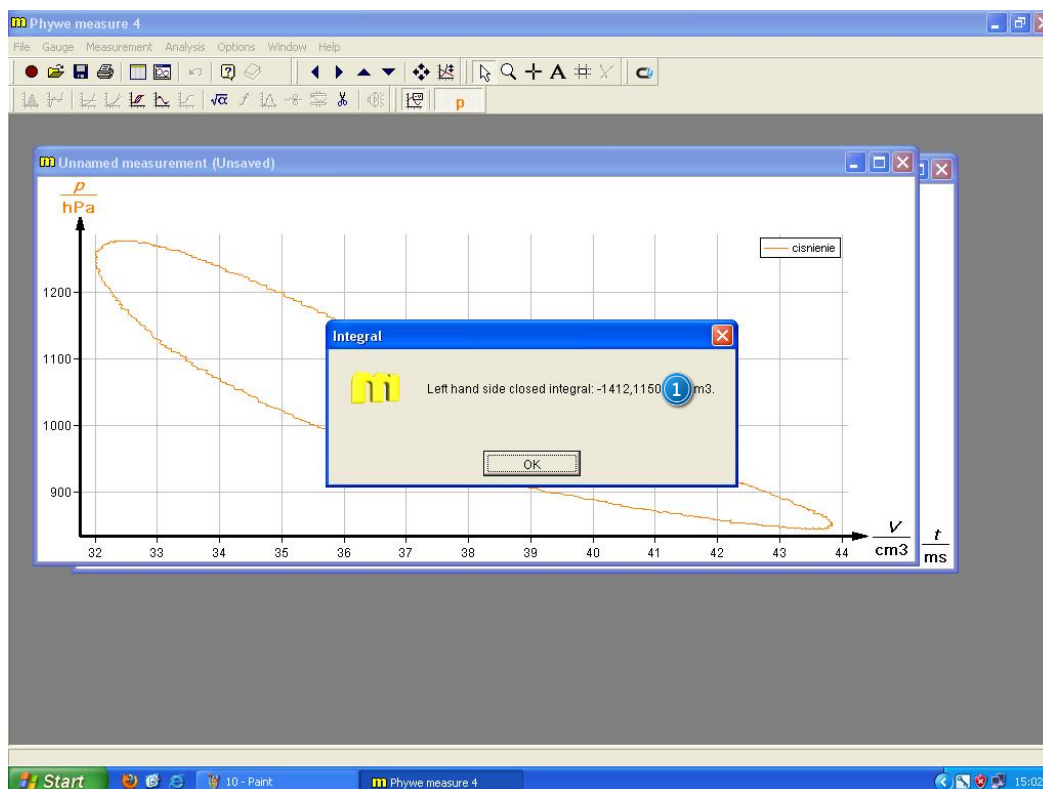


Na ekranie pojawi się wykres ciśnienia w funkcji objętości  $p = f(V)$  (Zdjęcie 17).



Zdjęcie 17. Poprawnie uzyskany wykres  $pV$ .

- Wyznaczyć pole pod wykresem  $pV$  wybierając w menu opcję *Analysis* → *Show integral*.  
Na ekranie pojawi się okno z wyznaczonym polem wykresu  $pV$  (Zdjęcie 18).



Zdjęcie 18. Wyznaczone pole pod wykresem  $pV$ : 1 – wartość pola.