



Wyznaczanie sprawności termicznej silnika Stirlinga

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z budową i zasadą działania silnika Stirlinga oraz praktyczne wyznaczenie jego sprawności termicznej.

1. WSTĘP

Silnik Stirlinga, wymyślony i opatentowany przez Roberta Stirlinga w 1816 roku, jest maszyną przetwarzającą energię cieplną na mechaniczną. Jego cechą charakterystyczną odróżniającą go od innych silników cieplnych jest to, że jest w nim zamknięta stała ilość gazu (wodór, hel, powietrze). Nie ma w nim cyklicznie spalanej mieszanki powietrza z gazowym lub ciekłym paliwem, natomiast w sposób ciągły doprowadzane jest ciepło z zewnątrz (np. ciepło pochodzące ze spalania paliwa stałego ciekłego lub gazowego, ciepło dostarczane przez kolektor słoneczny, ciepło fermentacji nawozu) do ogrzewanego czynnika roboczego, który przepływa między dwoma cylindrami z tłokami, zwanymi pompującym i roboczym bądź ciepłym i zimnym. Stąd nie ma on zaworów wydechowych przez które ulatniają się gazy pod wysokim ciśnieniem ani też nie występują spalania detonacyjne mieszanki paliwowej.

Do zalet silnika Stirlinga można zaliczyć:

- bardzo niski poziom hałasu;
- bardzo niski poziom emisji szkodliwych składników spalin przy dużej różnorodności wykorzystywanych źródeł ciepła;
- wysoka sprawność cieplna;
- brak układu zapłonowego (względnie drogiego i wysoce skomplikowanego);
- dopuszczalność luźnego pasowania gorącego tłoka, przepompowującego czynnika roboczy;
- praca (praktycznie bez żadnych zmian konstrukcyjnych) jako pompy ciepła lub urządzenia chłodniczego

Do wad silnika Stirlinga można zaliczyć:

- trudność w uzyskaniu płynnej zmiany prędkości obrotowej;
- stosunkowo duże gabaryty silnika w stosunku do uzyskiwanej mocy;
- potrzeba intensywnego schładzania czynnika roboczego przepływającego do komory nad tłokiem roboczym ze względu na sprawność silnika oraz względnie duży jego ciężar własny w przypadku gdy ciśnienie czynnika roboczego przewyższa 2 MPa [1]

Biorąc pod uwagę zalety jakie posiada silnik Stirlinga znajduje on zastosowanie w następujących obszarach¹

¹ http://www.kmciso.ps.pl/stirling/index_stirling_zastosowania.html



energetyka:

- stacjonarne i przenośne generatory energii elektrycznej,
- systemy skojarzonej produkcji ciepła i energii elektrycznej,
- systemy przetwarzania energii słonecznej,

przemysł samochodowy:

- napęd główny pojazdów samochodowych,
- hybrydowe zespoły napędowe pojazdów samochodowych,

przemysł morski:

- napęd okrętów podwodnych,
- pomocnicze zespoły napędowe i prądotwórcze,
- systemy utylizacji ciepła spalin wylotowych silników okrętowych,
- generatory do ładowania akumulatorów łodzi żaglowych,
- napęd małych robotów podwodnych,

przemysł kosmiczny:

- pomocnicze źródła energii w systemach elektroenergetycznych pojazdów kosmicznych,

medycyna:

- pompa sztucznego serca,

urządzenia chłodnicze, klimatyzacyjne i kriogeniczne,

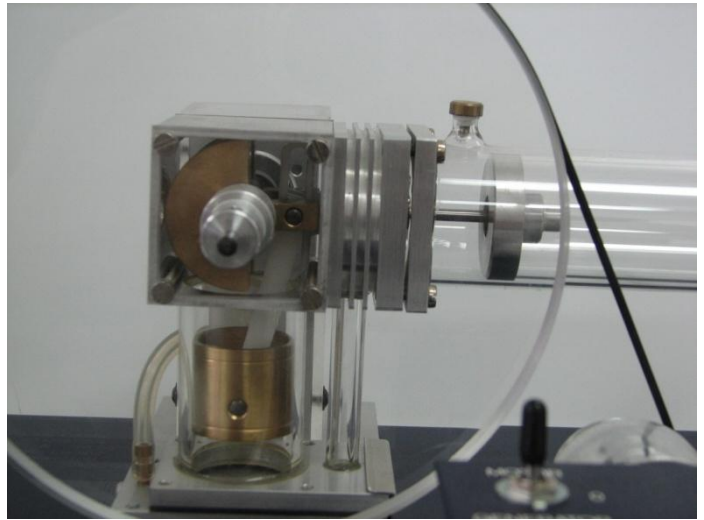
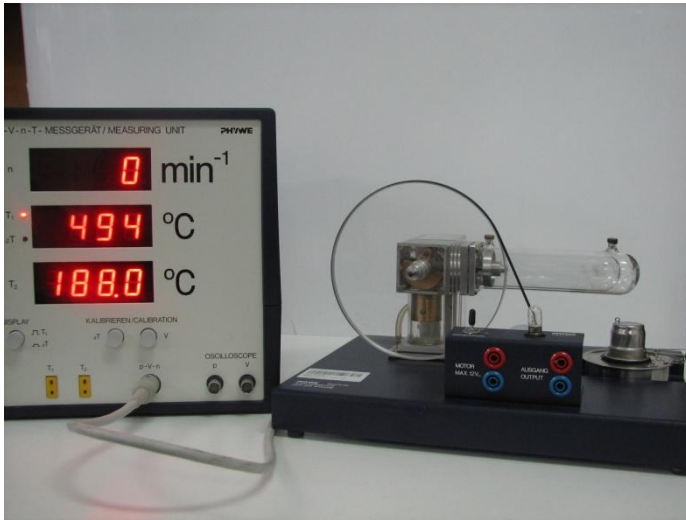
pompy ciepła i pompy wodne,

modelarstwo:

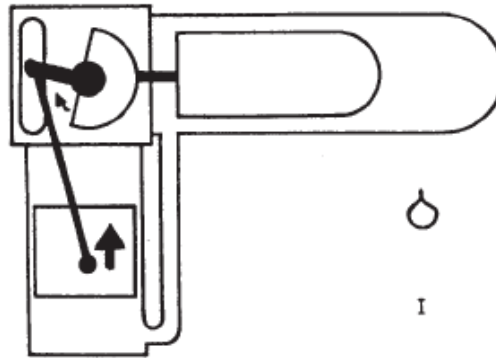
- napęd miniaturowych modeli pojazdów samochodowych,
- napęd miniaturowych modeli jednostek pływających.

2. BUDOWA I ZASADA DZIAŁANIA SILNIKA STIRLINGA

Rysunek 1 przedstawia widok zakupionego silnika Stirlinga w firmie PHYWE. W podstawowej konfiguracji (Rys. 1) silnik ten składa się z dwóch cylindrów (ciepłego i zimnego). Cylinder ciepły (poziomy) jest podgrzewany w sposób ciągły w wyniku spalania spirytusu w metalowym palniku a zimny (pionowy) jest chłodzony powietrzem atmosferycznym. Komory obydwu cylindrów są połączone tak, że gaz swobodnie przepływa pomiędzy nimi (przez pionową szklaną rurkę – Rys. 1). Widoczny na końcu tej rurki radiator ułatwia odprowadzanie ciepła do otoczenia. Tłoki są połączone wałem korbowym w taki sposób, aby tłok w cylindrze ciepłym (nieszczelny) wyprzedzał ruch tłoka w cylindrze zimnym (szczelny) o kąt 90° . W celu podtrzymania ruchu tłoków, gdy silnik nie generuje siły napędowej korbowód jest połączony z kołem zamachowym (Rys. 2). Na przedłużeniu osi obrotu przymocowane

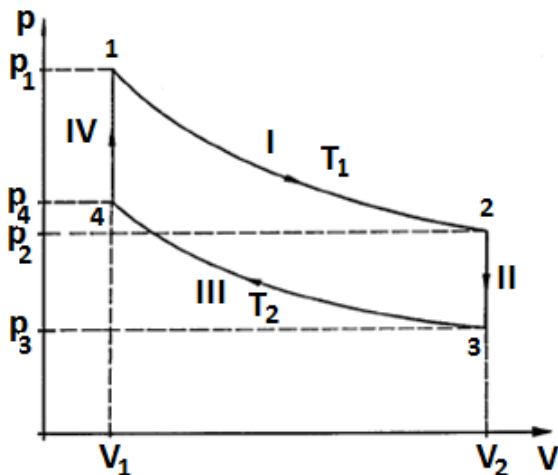


Rys. 1. Widok silnika Stirlinga firmy PHYWE

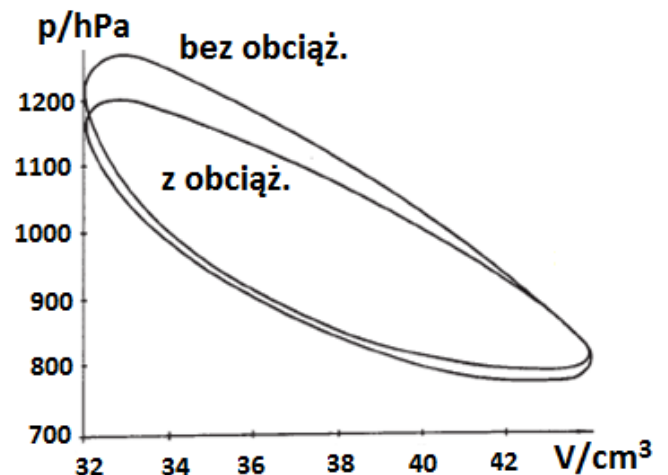


Rys. 2. Schemat silnika Stirlinga widocznego na Rys. 1

jest tarcza cylindryczna wykonana z pleksi połączona paskiem gumowym z generatorem prądu i licznikiem obrotów. Dodatkowo na powierzchni zew. cylindra ciepłego (Rys. 1) znajdują się miejsca mocowania gorących końców termoelementów płaszczowych typu K do pomiaru temperatury T_1 i T_2 . Teoretyczny oraz rzeczywisty cykl pracy silnika Stirlinga przedstawia (Rys. 3).



Rys. 3a. Teoretyczny obieg Stirlinga



Rys. 3b. Rzeczywisty obieg silnika Stirlinga

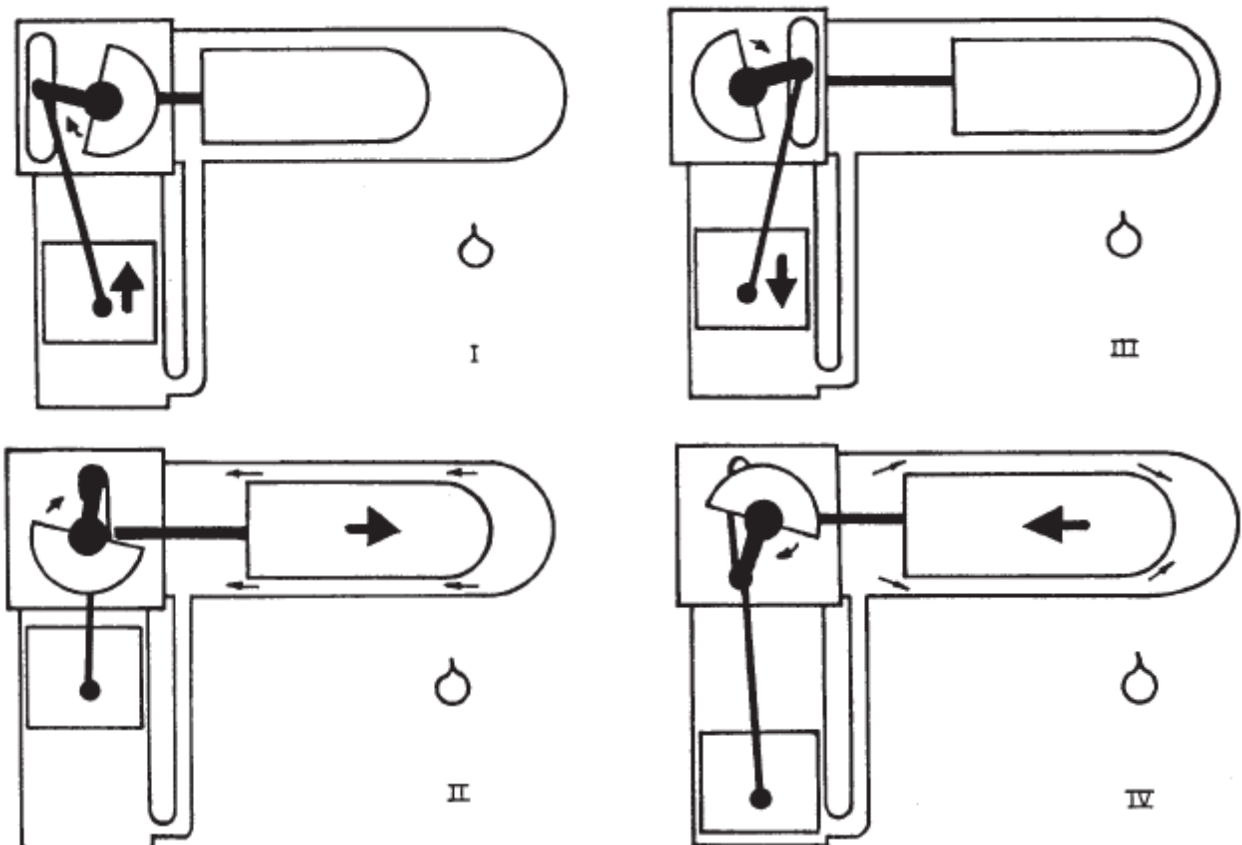
Obieg Stirlinga jest realizowany w wyniku wykonania następujących przemian:

- I. przemiana izotermiczna ($T_1 = \text{idem}$) podczas której dostarczane jest ciepło (z zewnątrz) do układu oraz wykonywana jest praca zmiany objętości (Rys. 4_I)
- II. przemiana izochoryczna ($V_2 = \text{idem}$) w której następuje ochłodzenie czynnika roboczego w wyniku gwałtownego spadku ciśnienia (Rys. 4_II)
- III. przemiana izotermiczna ($T_2 = \text{idem}$) podczas której dostarczana jest praca i odprowadzane jest ciepło do otoczenia (Rys. 4_III)
- IV. przemiana izochoryczna ($V_1 = \text{idem}$) w której następuje ogrzewanie czynnika roboczego w wyniku gwałtownego wzrostu ciśnienia (Rys. 4_IV)

Zgodnie z pierwszą zasadą termodynamiki energia dostarczona z zewnątrz na sposób ciepła dQ do nieruchomego układu zamkniętego jest zużywana na wzrost jego energii wewnętrznej dU oraz na wykonanie pracy zewnętrznej dL , która równa jest pracy zmiany objętości pdV

$$dQ = dU + pdV \quad (1)$$

W trakcie realizacji obiegu Stirlinga (silnik f-my PHYWE) silnik w sposób cykliczny podgrzewa i chłodzi czynnik roboczy uzyskując energię w trakcie jego ekspansji i kompresji.



Rys. 4. Kolejne fazy cyklu Stirlinga (por. Rys. 3a)



LABORATORIUM TERMODYNAMIKI

Silnik Stirlinga (opracował J. Zmywaczyk, P. Sapiński)

Biorąc pod uwagę fakt, że energia wewnętrzna nie ulega zmianie w trakcie przemiany izotermicznej (dlaczego?) praca przemiany izotermicznej odbywa się kosztem ciepła doprowadzonego lub odprowadzonego (faza I oraz III).

Analizując kolejne fazy cyklu Stirlinga (Rys. 4) możemy zauważyć, że:

Faza I: Ogrzany gaz w cylindrze ciepłym (poziomy cylinder, nieszczelny tłok) rozszerza się i przechodzi (możliwa jest w tym miejscu opcja z wykorzystaniem regeneratora w postaci skręconej siatki drucianej, która to czasowo przechowuje ciepło) do cylindra zimnego (pionowy cylinder, szczelny tłok) wypierając go do góry. Wykonywana jest w tym czasie praca izotermiczna zmiany objętości $L_{T,I}$ o wartości

$$L_{T,I} = -n\bar{R}T_1 \ln(V_2/V_1) = -n\bar{R}T_1 \ln(p_1/p_2), \quad \bar{R} = 8314,3 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1} \quad (2)$$

gdzie n – liczba kilomoli gazu zawartego w układzie, a znak (—) oznacza, że praca jest dostarczana do układu

Faza II: Tłok w cylindrze zimnym pozostaje prawie w spoczynku, ponieważ znajduje się w swym górnym położeniu zwrotnym. Gaz wypełnia niemal całą objętość cylindra zimnego i zaczyna się ochładzać. To powoduje spadek ciśnienia w warunkach zbliżonych do izochorycznych. W trakcie zachodzącej przemiany izochorycznej ilość oddawanego ciepła przy założeniu niezależności ciepła właściwego przy stałej objętości od temperatury wynosi

$$Q_{v,II} = n\bar{C}_v(T_2 - T_1) = n\frac{\bar{R}}{\kappa - 1}(T_2 - T_1) \quad (3)$$

gdzie $\kappa = c_p/c_v$ wykładnik izentropii (dla powietrza $\kappa = 1,4$)

Faza III: Ruch koła zamachowego i kurczenie się gazu powodują przemieszczenie się tłoka zimnego w dół, przy czym, tłok ciepły znajduje się w swym prawym położeniu zwrotnym (prawie w bezruchu) gdzie ogranicza on dopływ ciepła z palnika. Gaz ciepły i zimny (pod wpływem ruchu tłoka zimnego) mieszają się i oddają ciepło przez radiator otoczeniu a dodatkowo zostaje wykonana praca izotermiczna zmiany objętości $L_{T,III}$ o wartości

$$L_{T,III} = +n\bar{R}T_2 \ln(V_2/V_1) = n\bar{R}T_2 \ln(p_1/p_2) \quad (4)$$

przy czym zachodzi relacja $L_{T,III} < |L_{T,I}|$ ponieważ $T_2 < T_1$

Faza IV: Tłok w cylindrze zimnym dochodzi do swojego dolnego zwrotnego położenia, a tłok ciepły przesuwał się w lewo powoduje sprężanie gazu w warunkach niemal izochorycznych, a zatem następuje wzrost temperatury gazu w związku z wydzielaniem się ciepła i powrót do fazy I. Ilość ciepła wydzielonego w trakcie przemiany izochorycznej IV jest ciepłem dostarczoną do układu o wartości

$$Q_{v,IV} = n\bar{C}_v(T_1 - T_2) = n\frac{\bar{R}}{\kappa - 1}(T_1 - T_2) \quad (5)$$

Pamiętając ogólnie przyjętą konwencję co do znaków ciepła i pracy w przypadku ich dostarczania lub odprowadzania od układu możemy ciepło doprowadzone do układu zapisać jako

$$Q_d = Q_{T,I} + Q_{v,IV} = n\bar{R}T_1 \ln(V_2/V_1) + n\bar{R}\frac{1}{\kappa - 1}(T_1 - T_2) \quad (6)$$

a ciepło odprowadzone od układu w postaci

$$Q_{od} = Q_{T,III} + Q_{v,II} = -n\bar{R}T_2 \ln(V_2/V_1) - n\bar{R}\frac{1}{\kappa - 1}(T_1 - T_2) \quad (7)$$

Zgodnie z definicją sprawności termicznej silnika cieplnego mamy

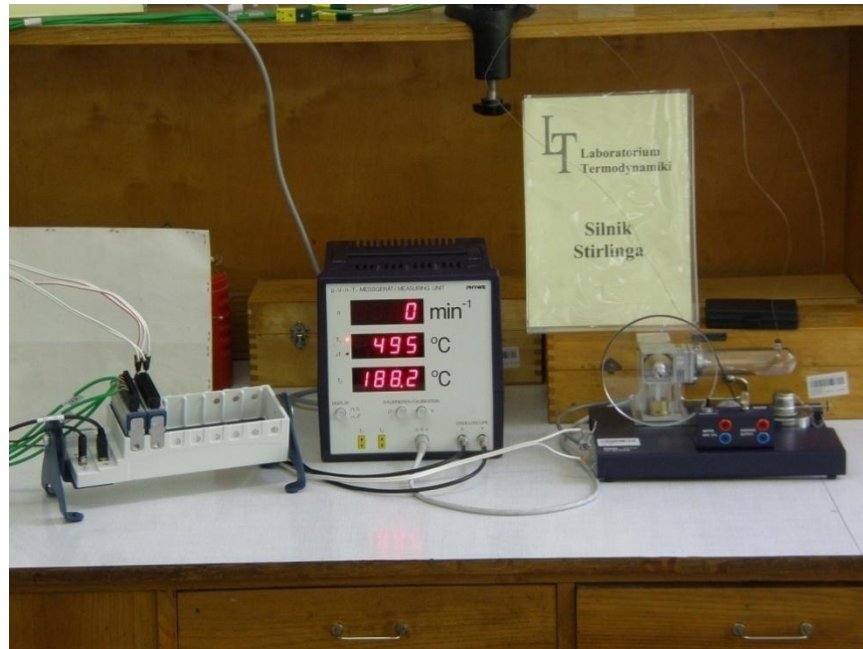
$$\begin{aligned} \eta_{ts} &= \frac{L_{ob}}{Q_d} = \frac{Q_d - |Q_{od}|}{Q_d} = 1 - \frac{|Q_{od}|}{Q_d} = 1 - \frac{n\bar{R}\left[T_2 \ln(V_2/V_1) + \frac{1}{\kappa - 1}(T_1 - T_2)\right]}{n\bar{R}\left[T_1 \ln(V_2/V_1) + \frac{1}{\kappa - 1}(T_1 - T_2)\right]} = \\ &= 1 - \frac{T_2[(\kappa - 1)\ln(V_2/V_1) + (T_1/T_2 - 1)]}{T_1[(\kappa - 1)\ln(V_2/V_1) + (1 - T_2/T_1)]} < 1 - \frac{T_2}{T_1} = \eta_{tc} \end{aligned} \quad (8)$$

a zatem sprawność termiczna obiegu Stirlinga jest mniejsza od sprawności termicznej obiegu Carnota. W przypadku obiegu Stirlinga należy mieć jednak na uwadze, że tylko część całkowitej pracy L_{ob} jest wykonywana efektywnie poprzez zadane silnikowi obciążenie a dodatkowo należy uwzględnić bezpowrotne straty energii zużywane na pokonanie sił tarcia.

3. PRZYGOTOWANIE STANOWISKA LABORATORYJNEGO DO PRACY

Stanowisko pomiarowe (Rys. 5) składa się z modelu silnika Stirlinga (Rys. 1) oraz bloku pomiarowego zakupionego od firmy PHYWE. W skład stanowiska wchodzi także wyposażenie związane z modułem akwizycji danych firmy National Instruments.

Stanowisko wyposażone jest także w komputer klasy PC, na którym zainstalowane jest środowisko LabVIEW wraz z programem wspomagającym eksploatację stanowiska laboratoryjnego do badań silnika Stirlinga. Na wstępie dokonujemy montażu kart pomiarowych NI 9205 (karta do pomiaru napięcia) oraz NI 9211 (karta do pomiaru temperatury) w module NI cDAQ-9172 (Rys.6).



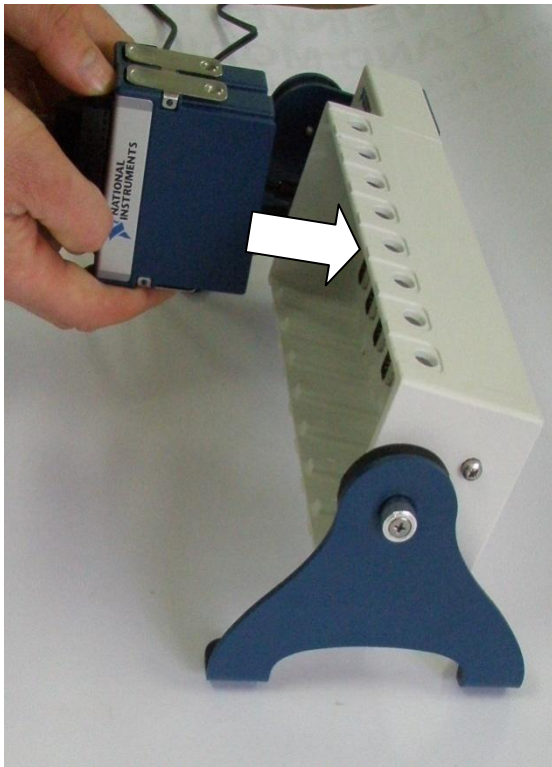
Rys. 5. Stanowisko pomiarowe do badań silnika Stirlinga.

Karta NI 9205 wyposażona jest w gniazda umożliwiające podłączenie do niej wcześniej specjalnie przygotowanych przewodów na potrzeby stanowiska laboratoryjnego zakończonych pinami (Rys. 7-9). Piny przewodów podłączamy do karty w następującej kolejności:

- Piny przewodu I – ACH 0 na karcie pomiarowej
- Piny przewodu II – ACH 1 na karcie pomiarowej
- Piny przewodu III – ACH 2 na karcie pomiarowej

Przewody zakończone pinami, na których widnieje różowy pasek, przeznaczone są dla wartości „+” przesyłanego sygnału (Rys. 8) dlatego piny tych przewodów podłączamy do gniazd znajdujących się od strony numeracji kanałów, czyli po lewej stronie patrząc na kartę od góry (Rys. 9). Przewody białe (bez widocznego różowego paska) wpinamy w odpowiednie gniazda

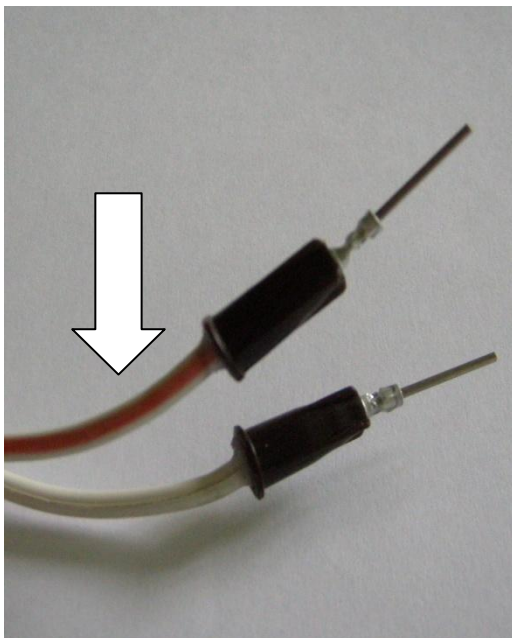
Dwa z przygotowanych przewodów (czarne) zakończone są na drugim końcu wtyczkami oscyloskopowymi, które podpinamy do odpowiednich gniazd oscyloskopowych p i V znajdujących się na bloku pomiarowym firmy PHYWE (Rys. 10) . Pozostały biały przewód zakończony jest wtyczką w postaci szybko-złączki, którą podpinamy do przewodu wychodzącego bezpośrednio z podzespołu czujników znajdującego się na silniku Stirlinga (Rys. 11). Do bloku pomiarowego podpinamy także 8-pinową wtyczkę typu DIN, którą zakończone są przewody poprowadzone we wspólnej osłonie, odpowiedzialne za przesyłanie sygnałów z podzespołu czujników, ale także stanowiące źródło zasilania czujnika obrotów i czujnika ciśnienia



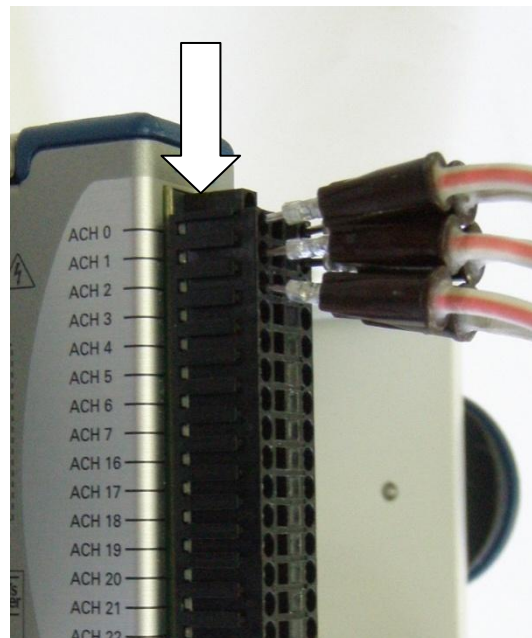
Rys. 6. Montaż kart pomiarowych NI 9205 i NI9211 w module NI cDAQ-9172



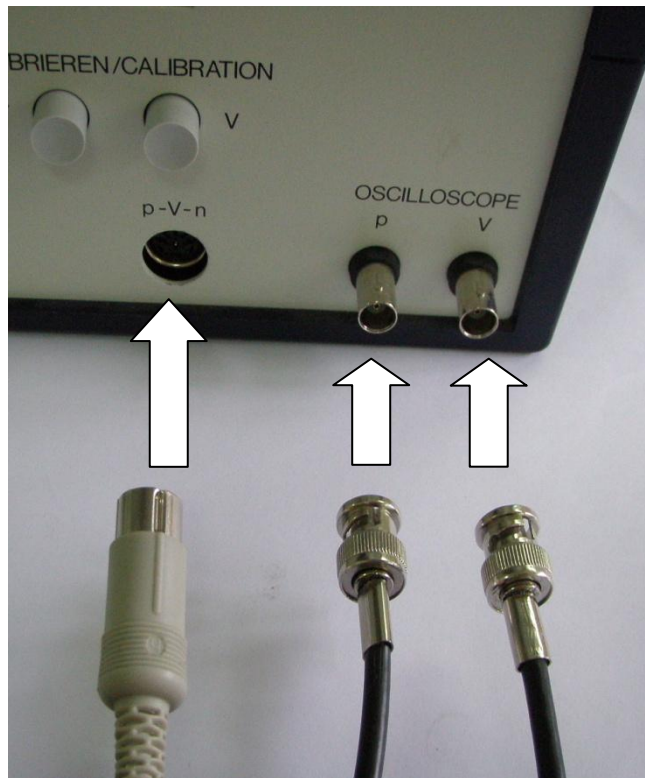
Rys. 7. Gniazda karty NI 9205 z numeracją kanałów



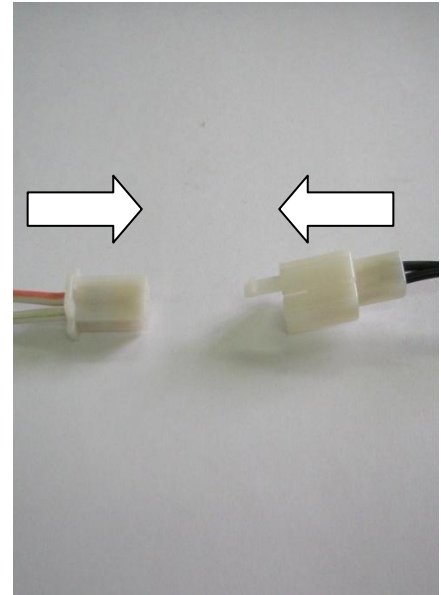
Rys. 8. Przewód z widocznym różowym paskiem przeznaczony dla wartości „+” przesyłanego sygnału



Rys. 9. Gniazda karty NI 9205 z wpiętymi odpowiednio pinami przewodów.



Rys. 10. Przewody z wtyczkami oscyloskopowymi oraz 8-pinowa wtyczka typu DIN (z lewej), w głębi gniazda bloku pomiarowego.



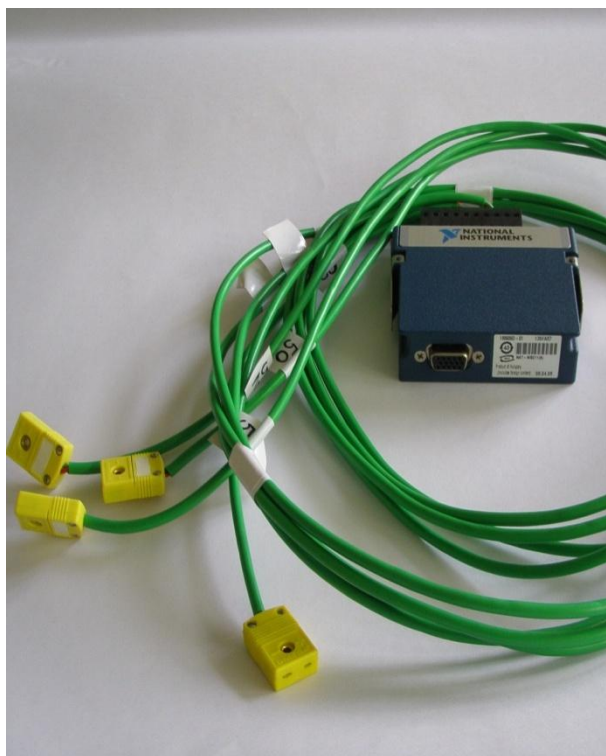
Rys. 11. Wtyczka i gniazdo w postaci szybko-złączki.

Karta do pomiaru temperatury NI 9211 posiada już przewody ze specjalnymi końcówkami umożliwiającymi podłączenie termoelementów (złącze żeńskie) (Rys. 12). Termoelementy zaopatrzone są w podobne końcówki (złącze męskie) (Rys. 13). Cztery termoelementy płaszczowe typu K (chromel/alumel) umieszczone w odpowiednich punktach pomiarowych mierzą następujące wartości temperatury:

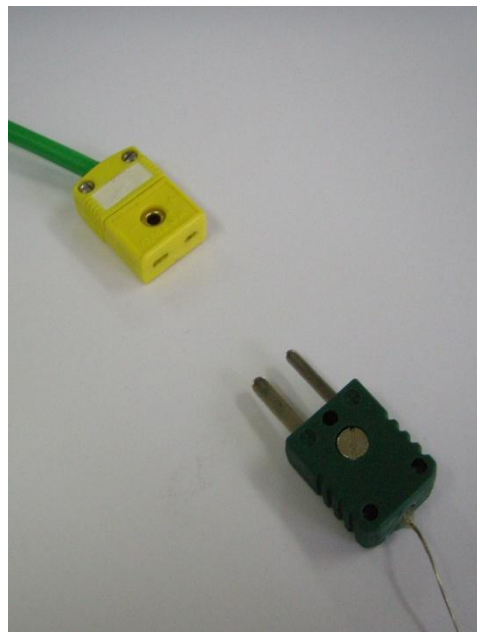
- temperaturę T_H „gorącego” końca cylindra
- temperaturę T_K „zimnego” końca cylindra
- temperaturę T_0 otoczenia
- temperaturę T_P palnika

Wtyczki przewodów są dodatkowo oznakowane. Kolejność podłączenia przewodów jest następująca:

- przewód „40” – termoelement do pomiaru temperatury T_H
- przewód „41” – termoelement do pomiaru temperatury T_K
- przewód „42” – termoelement do pomiaru temperatury T_0
- przewód „43” – termoelement do pomiaru temperatury T_P



Rys. 12. Karta NI 9211 do pomiaru temperatury wraz z przewodami zakończonymi specjalnymi końcówkami.

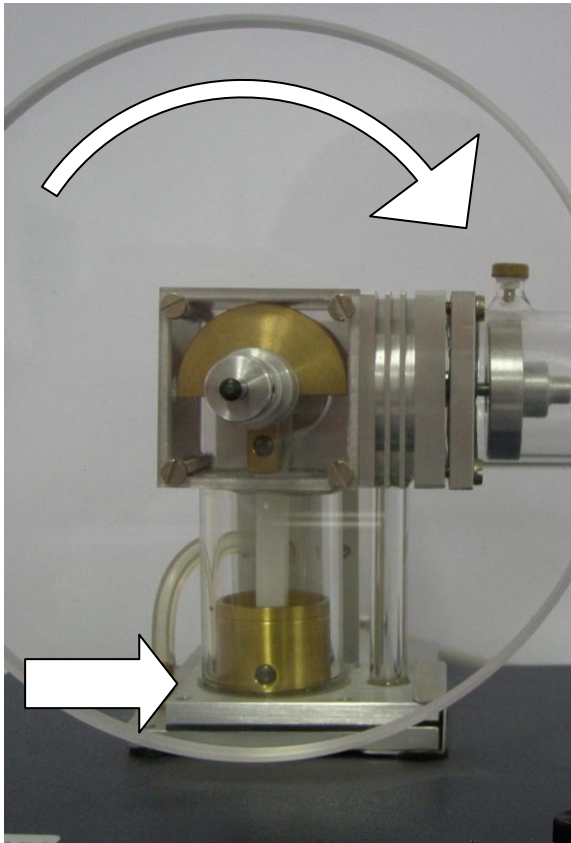


Rys. 13. Wtyczka do podłączenia termoelementów (góra – złącze „żeńskie”, dół złącze „męskie”)

Następnie podłączamy moduł NI cDAQ-9172 za pomocą zasilacza na prąd stały do sieci elektrycznej, a także za pomocą przewodu USB do komputera klasy PC. Włączamy moduł przyciskiem umieszczonym na jego panelu przednim.

Podłączamy blok pomiarowy do sieci elektrycznej, po czym włączamy go przyciskiem umieszczonym na tylnej ścianie obudowy. Na wyświetlaczu bloku pomiarowego wyświetla się napis „CAL”.

Przystępujemy do kalibracji bloku pomiarowego. Przy pomocy koła zamachowego silnika Stirlinga ustawiamy tłok w cylindrze pionowym w jego najniższym, minimalnym położeniu (Rys. 14). Wciskamy odpowiednio przyciski oznaczone „ ΔT ” oraz „V” umieszczone na panelu przednim bloku pomiarowego pod napisem „KALIBRIEREN/CALIBRIATION” (Rys. 15). Następuje kalibracja czujnika objętości po czym na wyświetlaczu bloku pomiarowego pojawiają się wartości temperatur oraz prędkości obrotowej.

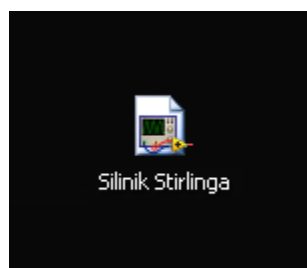


Rys. 14. Położenie minimalne tłoka w cylindrze pionowym silnika Stirlinga



Rys. 15. Przyciski „ ΔT ” i „V” na bloku pomiarowym firmy PHYWE

Włączamy komputer, po czym uruchamiamy program zatytułowany „Silnik Stirlinga” za pomocą ikony umieszczonej na pulpicie (Rys. 16).



Rys. 16. Ikona programu „Silnik Stirlinga” na pulpicie komputera

Uzupełniamy metalowy zbiorniczek palnika czystym alkoholem etylowym. Za pomocą pokrętki umieszczonego na obudowie wysuwamy knot palnika na długość $r=6$ [mm] (Rys. 17). Dokonujemy pomiaru jego masy m_{p1} za pomocą wagi laboratoryjnej MENSOR LWK 02 (Rys.18) co pozwala na późniejsze określenie zmiany masy palnika Δm_p , co za tym idzie zmiany masy spirytusu.



Rys. 17 Palcik spirytusowy z wysuniętym knotem oraz z pokrętkiem do jego regulacji



Rys. 18. Waga laboratoryjna MENSOR LWK 02

4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

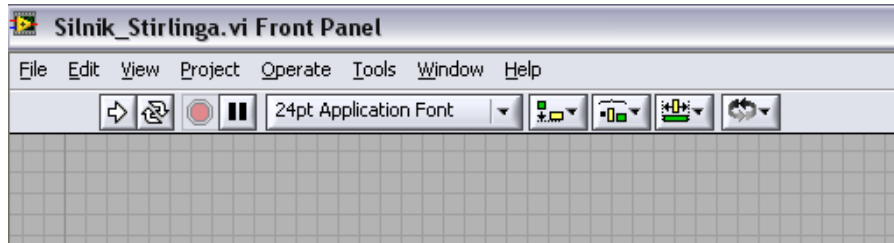
Posługując się programem w środowisku LabVIEW, wspomagającym eksploatację stanowiska laboratoryjnego do badań silnika Stirlinga, wykorzystujemy pracę w oknie programu, które nosi nazwę „Panel” (*Front Panel*). Widok okna działającego programu zatytułowanego „Silnik Stirlinga” przedstawia rysunek poniżej (Rys. 20).

„Panel” stanowi interaktywny, przejrzysty interfejs z użytkownikiem, który symuluje płytę czołową rzeczywistego przyrządu. Umieszczone są na nim zadajniki (*Controls*), takie jak różnego rodzaju przełączniki. Wskaźniki (*Indicators*), takie jak wyświetlacze, wykresy, przeznaczone są do wyprowadzania danych z programu dla użytkownika. Do obsługi elementów na panelu wykorzystywana jest „mysz” bądź klawiatura.

Okno „Panel” programu „Silnik Stirlinga” składa się z następujących komponentów (Rys.20):

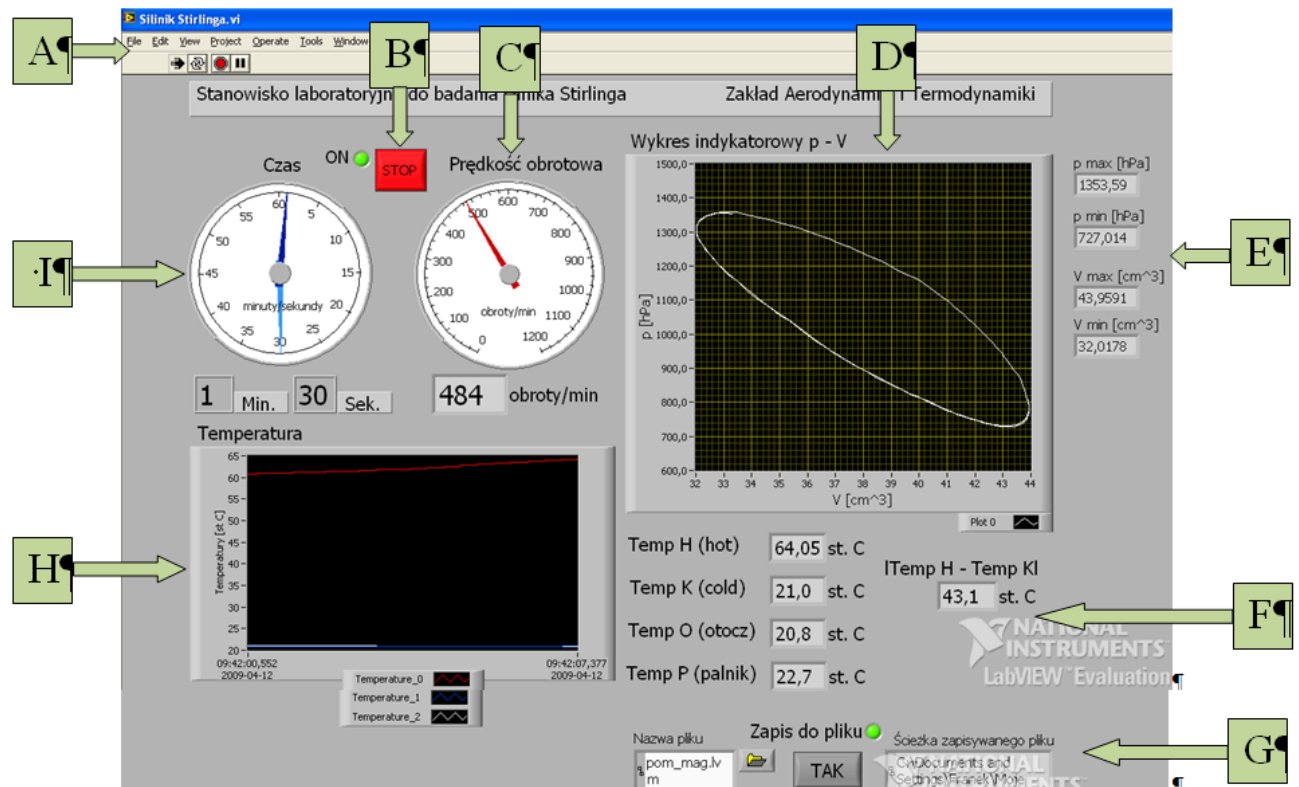
- A. Górna część okna „Panel”, w której znajduje się pasek tytułu z przyciskami minimalizacji okna na pasek zadań, maksymalizacji okna do trybu pełnoekranowego i zamknięcia okna. Na pasku tytułu znajduje się nazwa używanego przyrządu wirtualnego. Poniżej paska tytułu znajduje się menu oraz

linijka przycisków narzędziowych z przyciskiem umożliwiającym uruchomienie aplikacji. Przycisk ten jest w postaci białej strzałki (Rys.19).



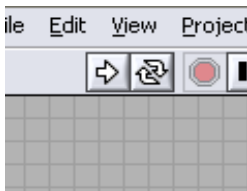
Rys. 19. Linijka przycisków narzędziowych z przyciskiem umożliwiającym uruchomienie aplikacji

- B. Przycisk „STOP”, który pozwala na wyłączenie działającego programu i jednocześnie wszystkich aplikacji w tym zapis do pliku, jeśli wcześniej został on włączony. Obok zielona dioda potwierdzająca działanie programu.
- C. Prędkość obrotowa n w oknie „Panel” zobrażowana jest w postaci zegara oraz dodatkowo pod nim w postaci cyfrowej. Prędkość ta podawana jest w jednostce [obroty /min].
- D. Wyskalowany wykres indykatorowy ciśnienia p od objętości gazu w cylindrach silnika V .
- E. Chwilowe wartości maksymalne i minimalne ciśnienia p i objętości V gazu.
- F. Wartości temperatur w czterech punktach pomiarowych w postaci wskaźników liczbowych od poszczególnych punktów pomiarowych oraz wartość bezwzględna różnicy pomiędzy temperaturą T_H gorącej części cylindra, a temperaturą T_K zimnej części cylindra.
- G. Przycisk pozwalający na włączenie lub wyłączenie możliwości zapisu do pliku podczas pracy programu. Element odpowiedzialny za zapis wszystkich wartości pomiarowych do pliku tekstowego z rozszerzeniem .txt, .lvm lub .tdm. Konfiguracja parametrów pozwala na wybranie ścieżki zapisu oraz nazwy pod jaką ma być zapisany plik. Istnieje także możliwość podejrzenia nazwy zapisywanego w danym czasie pliku w oknie obok. Potwierdzenie włączenia zapisu obrazuje świecąca się na zielono dioda.
- H. Wykres obrazujący przebieg temperatur T_H , T_K , T_0 w czasie t wykonywanego pomiaru.
- I. Licznik czasu w postaci stopera, wspomagający pracę programu. Umożliwia on po włączeniu programu głównego pomiar czasu działania tego programu, jednocześnie zostaje dokonany pomiar czasu spalania spirytusu.

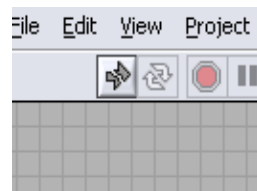


Rys. 20. Okno „Panel” działającego programu z oznaczeniami poszczególnych elementami

Wcześniej uruchomiony program jest gotowy do pracy, jeśli na linijce przycisków narzędziowych okna programu widnieje strzałka koloru białego (Rys.21a). Start programu następuje po wciśnięciu białej strzałki. Jeżeli w programie wystąpił błąd, np. nie jest podłączony do komputera moduł akwizycji danych NI cDAQ-9172, strzałka na przycisku do uruchomienia programu będzie złamana (Rys.21b). Strzałka uruchomionego programu zmienia kolor na czarny (Rys.21c).



Rys. 21a Strzałka programu gotowego do pracy.



Rys. 21b Strzałka programu z zaistniałym błędem



Rys. 21c Strzałka programu w trakcie pracy

Podpalamy knot palnika i po czym ustawiamy palnik na zewnętrznym końcu poziomego cylindra. Jednocześnie włączamy program wciskając białą strzałkę w oknie „Panel” (powinna świecić na zielono dioda z opisem „ON”). Odczekujemy około 1 min po czym próbujemy co pewien czas obracać tarczą w prawo w celu zainicjowania pracy silnika Stirlinga. W momencie kiedy silnik zacznie pracować uruchamiamy zapis danych pomiarowych do pliku przyciskiem znajdującym się w prawym dolnym rogu



okna programu [G]. Wcześniej możemy wprowadzić nazwę pod jaką ma być zapisany plik, zdefiniować rozszerzenie pliku tekstowego (.txt, .lvm lub .tdm) oraz wybrać ścieżkę zapisu na dysku twardym komputera. Jeżeli nie wprowadzimy własnej nazwy pliku, rozszerzenia oraz ścieżki, plik zostanie automatycznie zapisany na dysku twardym pod nazwą „test” z rozszerzeniem „.lvm” w katalogu „LabVIEW Data” mieszczącym się w folderze „Moje Dokumenty”. Ponowny zapis nie spowoduje jednak utraty wcześniej zapisanego pliku, którego nazwa zostanie zmieniona na „backup_X”, gdzie X oznacza kolejne numery zapisu. Pracę programu kończymy czerwonym przyciskiem „STOP”.

Czas trwania pomiaru wynosi od 10 do 15 minut w zależności od zalecenia prowadzącego ćwiczenie.

W wyniku pomiaru otrzymujemy plik tekstowy z mierzonymi wielkościami. Plik zawiera w kolejności kolumny danych pomiarowych odpowiadające wartościom: czasu t , objętości V , ciśnienia p , maksymalnego ciśnienia w danej chwili czasu p_{max} , minimalnego ciśnienia w danej chwili czasu p_{min} , prędkości obrotowej silnika n , temperatury „gorącej” części cylindra T_H , temperatury „zimnej” części cylindra T_K , temperatury otoczenia T_0 oraz temperatury palnika T_P .

Pomiary i opracowanie wyników

Zewnątrz źródło ciepła stanowi palnik w którym spalany jest czysty alkohol etylowy. Biorąc pod uwagę parametry palnika:

- pojemność zbiornika $\Delta V = 29 \text{ ml}$
- gęstość alkoholu $\rho = 0,83 \text{ g/ml}$
- moc cieplna właściwa $h = 25 \text{ kJ/g}$
- czas spalania $\Delta t = 3600 \text{ s}$

można określić jednostkowe (masowe) zużycie alkoholu

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{\rho \Delta V}{\Delta t} = \frac{0,83 \cdot 29}{3600} = 6,686 \cdot 10^{-3} \text{ g s}^{-1} \quad (9)$$

oraz ilość ciepła na sekundę (moc cieplną) wydzielaną w trakcie pracy palnika

$$P_H = \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot h = 6,686 \cdot 10^{-3} \cdot 25000 \approx 167 \text{ W}$$

- a) Na podstawie danych z pliku tekstowego wyznacz czas t pomiaru.
- b) Wyznacz ubytek masy Δm_p palnika zachodzący w trakcie spalania w czasie t zawartego w nim spirytusu znając początkową masę palnika m_{p1} z zależności:

$$\Delta m_p = -0,008 \cdot t + m_{p1} \quad (10)$$

- c) Oblicz wartości średnie temperatur T'_H oraz T'_K ze wszystkich serii pomiarowych na podstawie wzorów:



LABORATORIUM TERMODYNAMIKI

Silnik Stirlinga (opracował J. Zmywaczyk, P. Sapiński)

$$T'_H = \frac{\sum_{k=0}^i T_{Hi}}{i} \quad [\text{K}] \quad (11)$$

$$T'_K = \frac{\sum_{k=0}^i T_{Ki}}{i} \quad [\text{K}] \quad (12)$$

gdzie:

$\sum_{k=0}^i T_{Hi}$, $\sum_{k=0}^i T_{Ki}$ - sumy wszystkich temperatur T_H i T_K z danych pomiarowych,
 i – liczba serii pomiarowych;

d) Wyznacz współczynnik temperaturowy τ' dla temperatur średnich T'_H i T'_K :

$$\tau' = \frac{T'_K}{T'_H} \quad (13)$$

e) Wyznacz maksymalną V_{max} oraz minimalną V_{min} objętość uzyskaną w trakcie pomiarów ze wszystkich serii pomiarowych.

f) Wyznacz stopień sprężania dla podanych wyżej wartości V_{max} i V_{min} ze wzoru:

$$\varepsilon = \frac{V_{max}}{V_{min}} \quad (14)$$

(Uwaga! Przyjmij $V_{min} = 32 \text{ cm}^3$; $V_{max} = 44 \text{ cm}^3$; $\Delta V = 12 \text{ cm}^3$. Liczba moli powietrza zawartego w cylindrach silnika wynosi $n = 1,10 \cdot 10^{-3}$ mola)

g) Oblicz sprawność termiczną η_t obiegu silnika Stirlinga bez regeneracji (przyjmując $\kappa = 1,4$) ze wzoru:

$$\eta_t = \frac{(\kappa - 1)(1 - \tau') \ln \varepsilon}{(\kappa - 1) \ln \varepsilon + (1 - \tau')} \quad (15)$$

h) Oblicz sprawność termiczną η_t dla obiegu Carnota (w tym samym zakresie temperatur $T_{min} = T'_K$ i $T_{max} = T'_H$), czyli sprawność z doskonałą regeneracją obliczono ze wzoru:

$$\eta_t = 1 - \frac{T'_K}{T'_H} = 1 - \tau' \quad (16)$$

i) Wykonaj wykresy:

- zależności temperatur T_H , T_K , T_0 od czasu t ,
- zależności zmiany prędkości obrotowej n w czasie t ,
- zależności zmiany ciśnienia p w funkcji objętości V .

j) Na podstawie wykresu zmiany ciśnienia p w funkcji objętości V oblicz rzeczywistą pracę obiegu L_{p-v} , jako pole powierzchni ograniczonej krzywą zawierającą zbiór punktów pomiarowych uzyskanych w doświadczeniu.

Wskazówka:

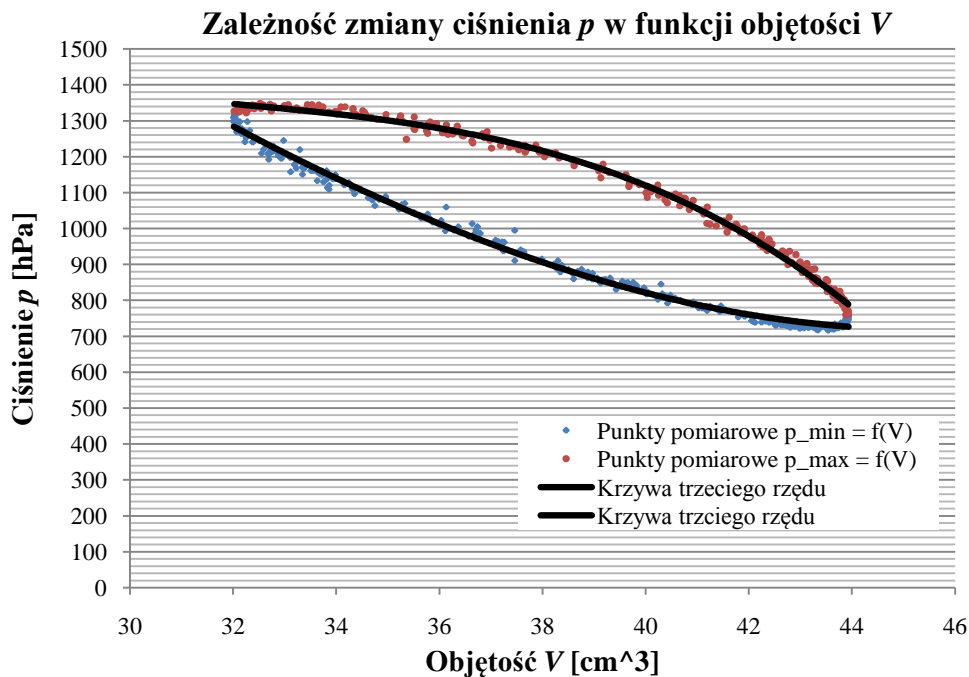
W celu wyznaczenia pola ograniczonego wykresem indykatorem zbiór punktów pomiarowych podziel na dwa rozłączne zbiory: górny zawierający zależność $p_{max} = f(V)$ oraz dolny $p_{min} = f(V)$ (Rys.22). Powyższe zależności $p_{max} = f(V)$ oraz $p_{min} = f(V)$ aproksymuj przy pomocy wielomianów 3-go stopnia postaci:

$$p_{max}(V) = A_1 + A_2V + A_3V^2 + A_4V^3 \quad (18)$$

$$p_{min}(V) = B_1 + B_2V + B_3V^2 + B_4V^3 \quad (19)$$

gdzie A_n i B_n kolejne wartości współczynników wielomianów.

(Uwaga! Do aproksymacji można wykorzystać program CurveExpert v.1.4 typu shareware dostępny na stronie internetowej <http://www.curveexpert.net/download/>)



Rys. 22. Zależność zmiany ciśnienia p w funkcji objętości V

Dokonaj porównania otrzymanego wyniku L_{pV} z wartością, która wynika z założenia, że elementarna praca ekspansji dL_{ex} jest równa $dL_{ex} = p_{max}(V)dV$, a w przypadku kompresji wynosi ona $dL_{kom} = p_{min}(V)dV$ zatem praca w zakresie zmierzonych objętości od V_{min} do V_{max} jest równa:

$$L_{ex} = \int_{V_{min}}^{V_{max}} p_{max}(V)dV \quad (20a)$$

i podobnie, praca kompresji ma w tym przypadku wartość:

$$L_{kom} = \int_{V_{min}}^{V_{max}} p_{min}(V)dV \quad (20b)$$



LABORATORIUM TERMODYNAMIKI

Silnik Stirlinga (opracował J. Zmywaczyk, P. Sapiński)

Stąd rzeczywista praca obiegu L_{p-v} badanego silnika Stirlinga wyniesie:

$$L_{p-v} = L_{ex} - L_{kom} \quad (21)$$

Wnioski do przeprowadzonego ćwiczenia laboratoryjnego

LITERATURA

1. *Teraz już w seryjnej produkcji... Silniki Stirlinga*, Gigawat energia, Nr 08/2002
2. *Instrukcja Phywe LEP 3.6.04* – INTERNET:
http://www.nikhef.nl/~h73/kn1c/praktikum/phywe/LEP/Experim/3_6_04.pdf
3. *Jak to działa* – Młody Technik, **29** 4/2005
4. INTERNET: <http://www.stirling.fc.pl/>