

SILNIKI SPALINOWE

INSTRUKCJA LABOLATORYJNA

**BADANIE PRZEBIEGÓW CIŚNIENIA W KOMORZE
SPALANIA DLA WYBRANEJ CHARAKTERYSTYKI
OBCIĄŻENIOWEJ**

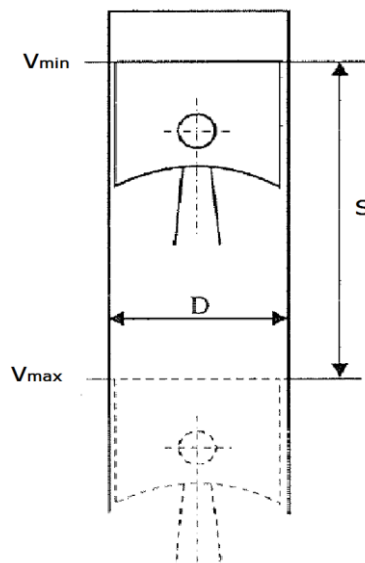
1. Wstęp teoretyczny

Jedną z głównych cech tłokowych silników spalinowych są cykliczne zmiany przestrzeni roboczej. Ten fakt pozwala na zdiagnozowanie nieprawidłowych parametrów pracy silnika. W celu scharakteryzowania silnika spalinowego należy precyzyjnie określić parametry jego pracy, aby móc je jednoznacznie zinterpretować i porównać dla różnych silników [1,2]. Opisując silnik pod **względem konstrukcyjnym oraz jego działania** można rozróżnić podział parametrów na trzy grupy:

- **parametry geometryczne**- charakterystyka silnika pod względem jego rozmiarów. Są to niezmiennie parametry silnika ustalone w procesie jego konstruowania jak średnica cylindra D , skok tłoka S , następnie wynikowa z nich pojemność skokowa cylindra V_s oraz objętość komory spalania ε .

$$V_s = \pi D^2 \frac{S}{4} \quad (1)$$

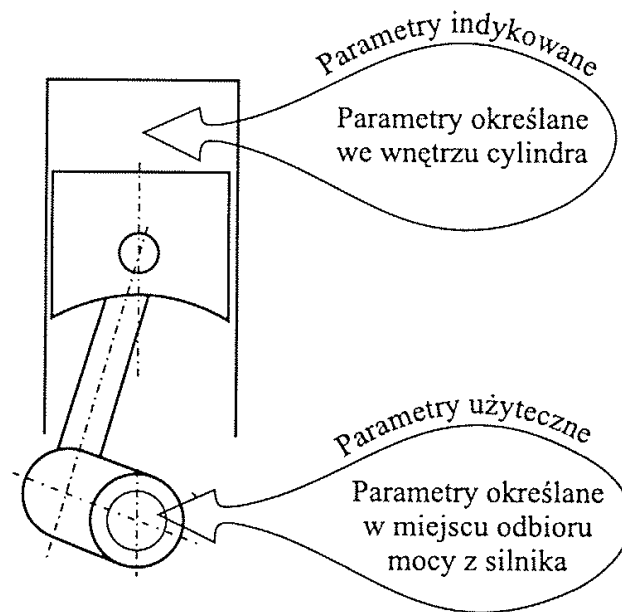
$$\varepsilon = \frac{V_{max}}{V_{min}} \quad (2)$$



Rys. 1 Podstawowe parametry geometryczne silnika spalinowego [1]

- **Parametry operacyjne** określają osiągi silnika czyli wynikowe wskaźniki pracy, jak moc, moment obrotowy, sprawność silnika oraz skład gazów spalinowych.
- **Parametry lokalne** opisują stan termodynamiczny oraz gazodynamiczny czynnika roboczego, np. temperatura spalin na wylocie cylindra czy stopień zawirowania ładunku w cylindrze [1].

Kolejną klasyfikacją podstawowych parametrów silnika tłokowego **jest podział na parametry użyteczne, teoretyczne oraz indykowane.**



Rys. 2 Przypisanie parametrów silnika do miejsc ich określania [1]

Parametry użyteczne obejmują parametry mierzone (czasami obliczane) na wale silnika, z którego moc jest przekazana do odbiornika mocy. Wartości parametrów użytecznych mierzone są na hamowniach silnikowych, zawierają straty tarcia w mechanizmach silnika [1].

Parametry teoretyczne to grupa parametrów obliczeniowych, które zazwyczaj odnoszą się do obiegów czysto teoretycznych. Obiegi teoretyczne zbudowane są wyłącznie z przemian termodynamicznych. Mają na celu przedstawienie idealnego przebiegu zachodzącej w silniku przemiany energii cieplnej w energię mechaniczną.

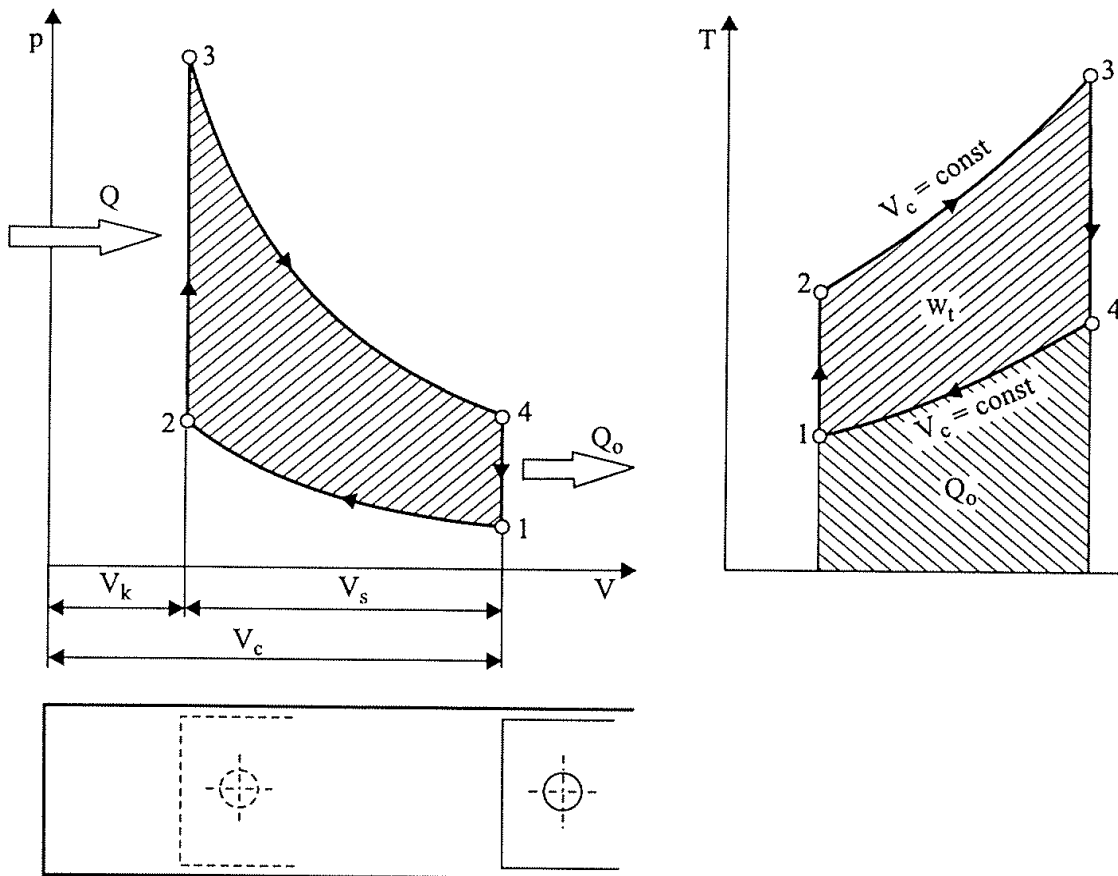
Rozpatrując obiegi teoretyczne należy wprowadzić pewne uproszczenia:

- czynnikiem roboczym jest gaz doskonały o niezmięnionej ilości, pomijane są straty związane z napełnianiem, sprężaniem, rozprężaniem oraz opróżnianiem cylindra,
- adiabaticzne procesy sprężania i rozprężania czynnika, nie następuje wymiana ciepła między czynnikiem, a ściankami cylindra,
- ciepło dostarczane do czynnika następuje poprzez izochoryczne lub izobaryczne podgrzewanie, przy czym skład chemiczny czynnika nie ulega zmianie,
- odprowadzanie ciepła poprzez izochoryczne oziębianie gazu,

- brak strat przepływu, zakłada się, że przemiany odbywają się nieskończenie, a zatem prędkość czynnika równa się zero [1,2].

W tłokowych silnikach spalinowych ciepło może być doprowadzone i odprowadzone na kilka sposobów, świadczy to o rodzaju obiegu teoretycznego:

- **obieg Otto** z doprowadzaniem ciepła przy stałej objętości (rys. 3)

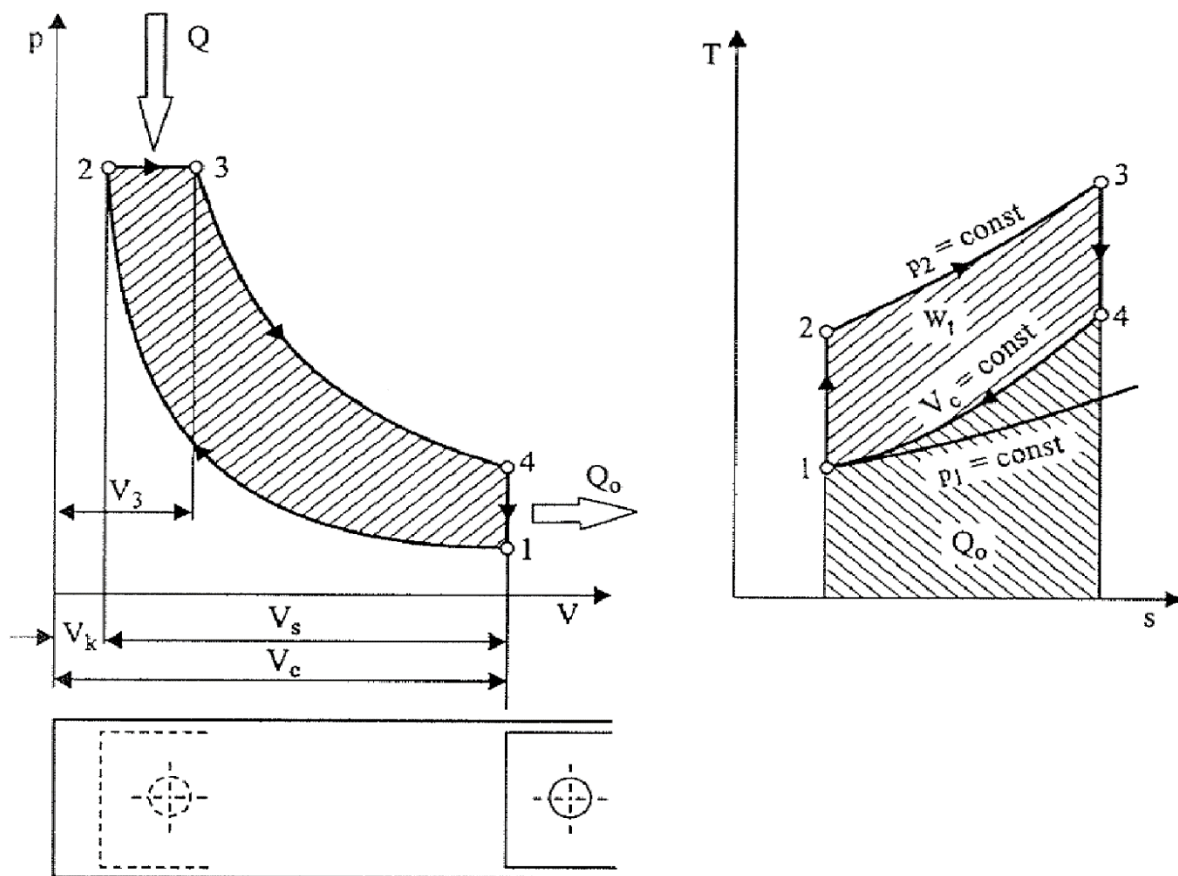


Rys. 3 Obieg Otto z doprowadzeniem ciepła przy $V=\text{const}$, wykres pracy ($p-V$) oraz wykres ciepła ($T-s$) [1]

Przemiany zachodzące w obiegu Otto:

- 1-2 sprężanie izentropowe
- 2-3 izochoryczne doprowadzanie ciepła
- 3-4 rozprężanie izentropowe
- 4-1 izochoryczne odprowadzanie ciepła

- **obieg Diesla** z doprowadzaniem ciepła przy stałym ciśnieniu (rys. 4)



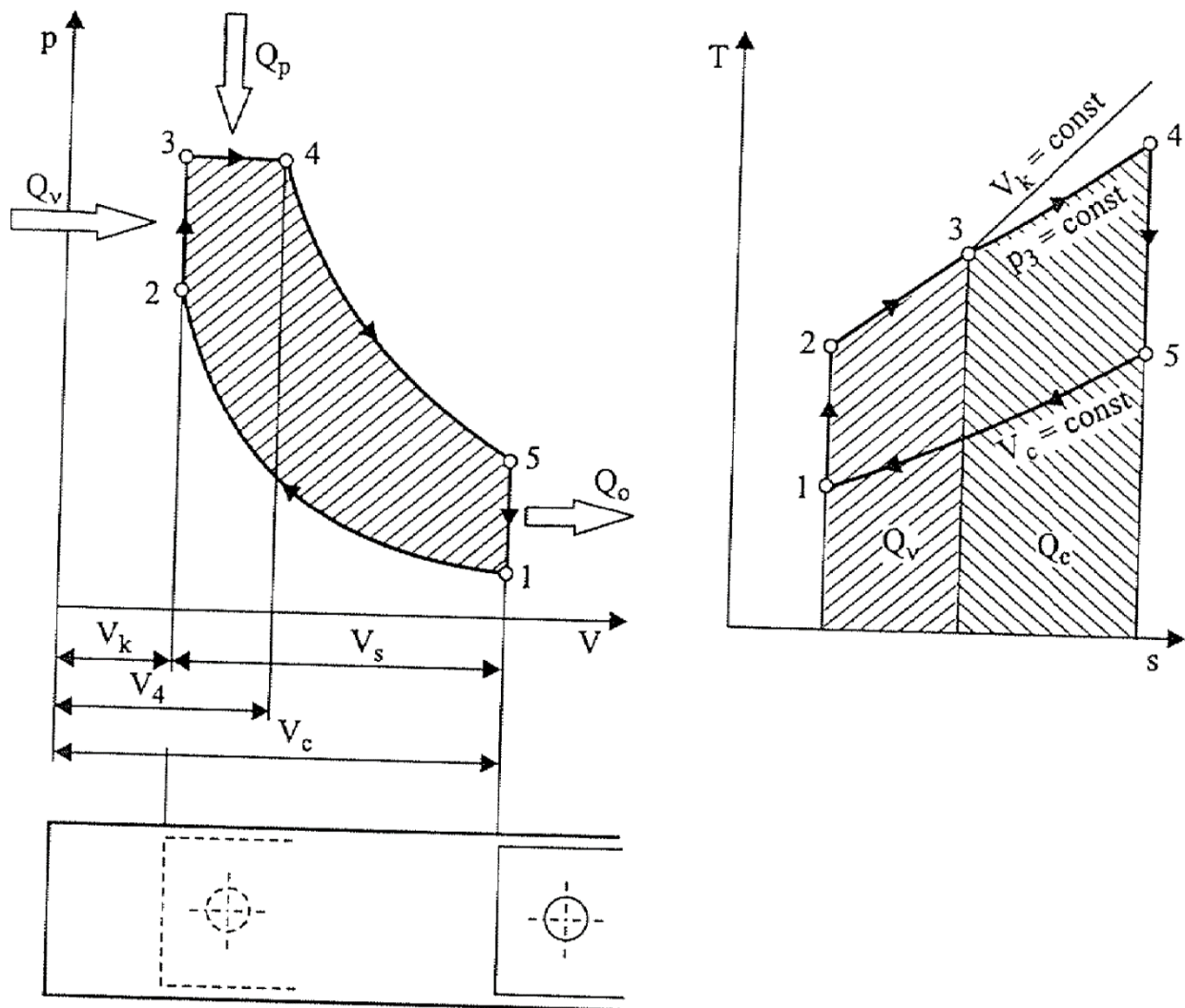
Rys. 4 Obieg Diesla z doprowadzeniem ciepła przy $p=\text{const}$, wykres pracy ($p-V$) oraz wykres ciepła ($T-s$) [1]

- **obieg Sabathiego** (Seligera)- obieg mieszany, z doprowadzeniem ciepła częściowo przy stałym ciśnieniu oraz częściowo przy stałej objętości (rys. 5). Obieg ten jest najbardziej zbliżony do procesów zachodzących w szybkoobrotowych silnikach ZI oraz ZS.

Przemiany zachodzące w obiegu Sabathe:

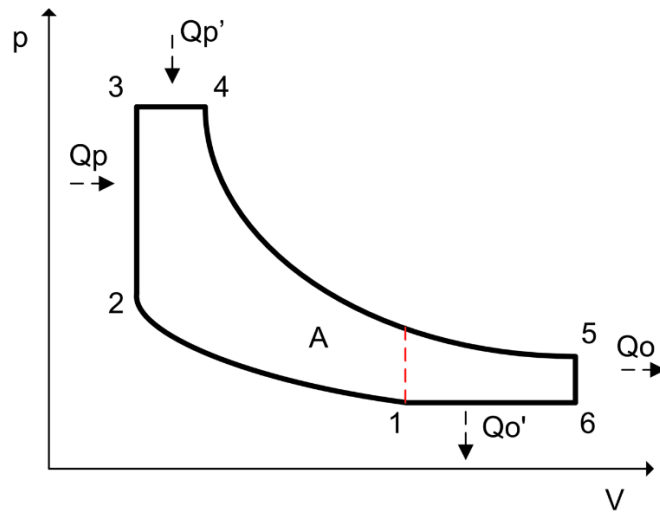
- 1-2 sprężanie izentropowe
- 2-3 izochoryczne izobaryczne doprowadzanie ciepła
- 3-4 izobaryczne doprowadzanie ciepła
- 4-5 rozprężanie izentropowe

5-1 izochoryczne odprowadzanie ciepła



Rys. 5 Obieg Sabathe z doprowadzeniem ciepła przy $p=\text{const}$ oraz $V=\text{const}$, wykres pracy (p - V) oraz wykres ciepła (T - s) [1]

- **Obieg Atkinsona** charakteryzuje się większym skokiem tła podczas rozprężania, niż w trakcie sprężania. Suw sprężania jest w nim skrócony, ponieważ zawory zamykają się z pewnym opóźnieniem skrząc suw. Nie sprzyja to uzyskiwaniu dużej maksymalnej mocy, ale dodatkowo suw pracy jest dłuższy od suwu sprężania i w ten sposób lepiej wykorzystuje energię gazów po spaleniu, zatem silnik posiada większą sprawność zużywając mniej paliwa. Obecnie obieg Atkinsona wykorzystuje się przy zastosowaniu zmiennych faz rozrządu sterowanych elektronicznie lub hydraulicznie, zmiennej geometrii dolotu powietrza dla określonych parametrów pracy silnika [7].



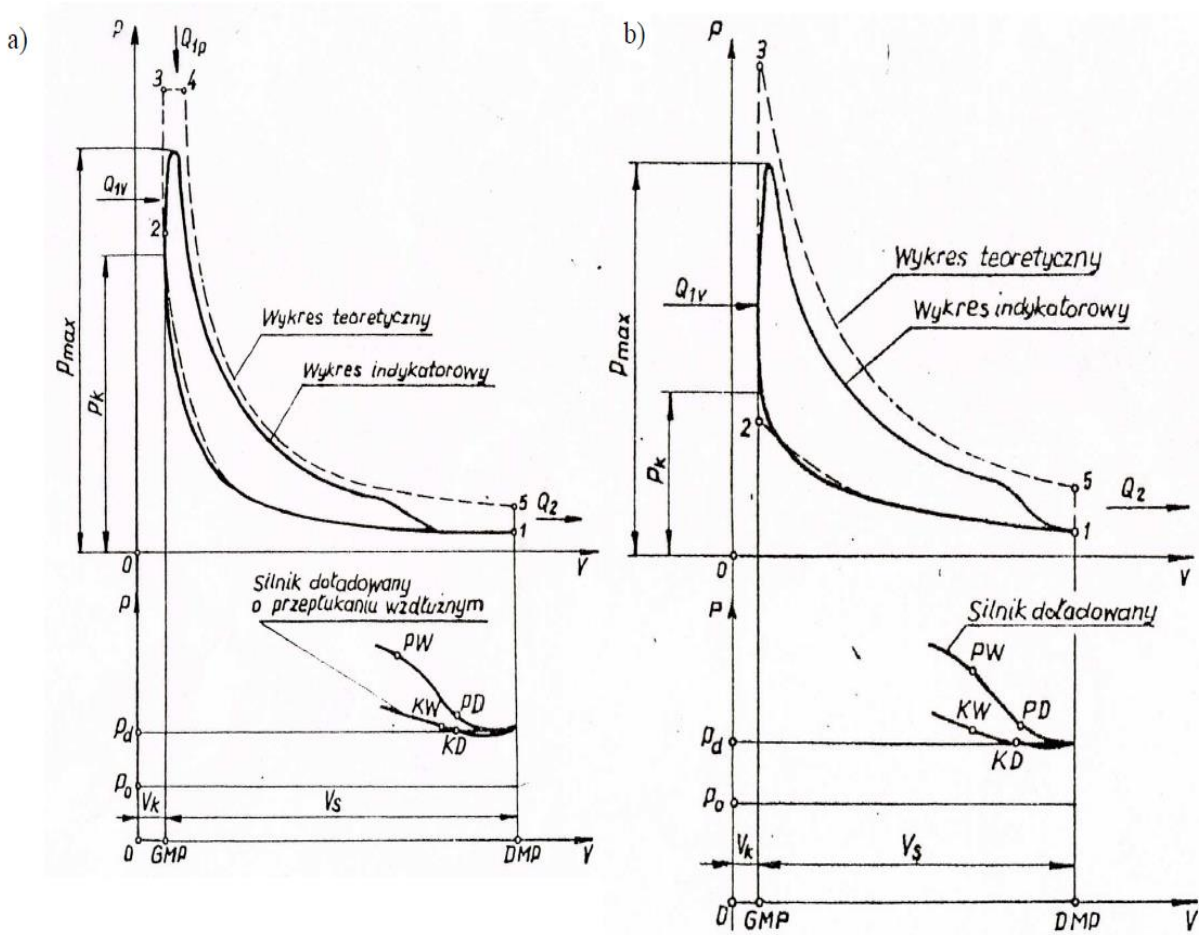
Rys. 6 Wykres pracy (p - V) obiegu Atkinsona

Parametry indykowane opisują obiegi teoretyczne (porównawcze) oraz obiegi rzeczywiste silników tłokowych. Analizując obiegi teoretyczne nie rozpatruje się źródła dodawanego ciepła do obiegu. W rzeczywistym silniku, w cylindrze silnika, ciepło powstaje we wnętrzu przestrzeni roboczej podczas procesu spalania świeżego ładunku czyli mieszaniny paliwa z powietrzem. Ładunek ten jest cyklicznie wymieniany, a spaliny następnie usuwane.

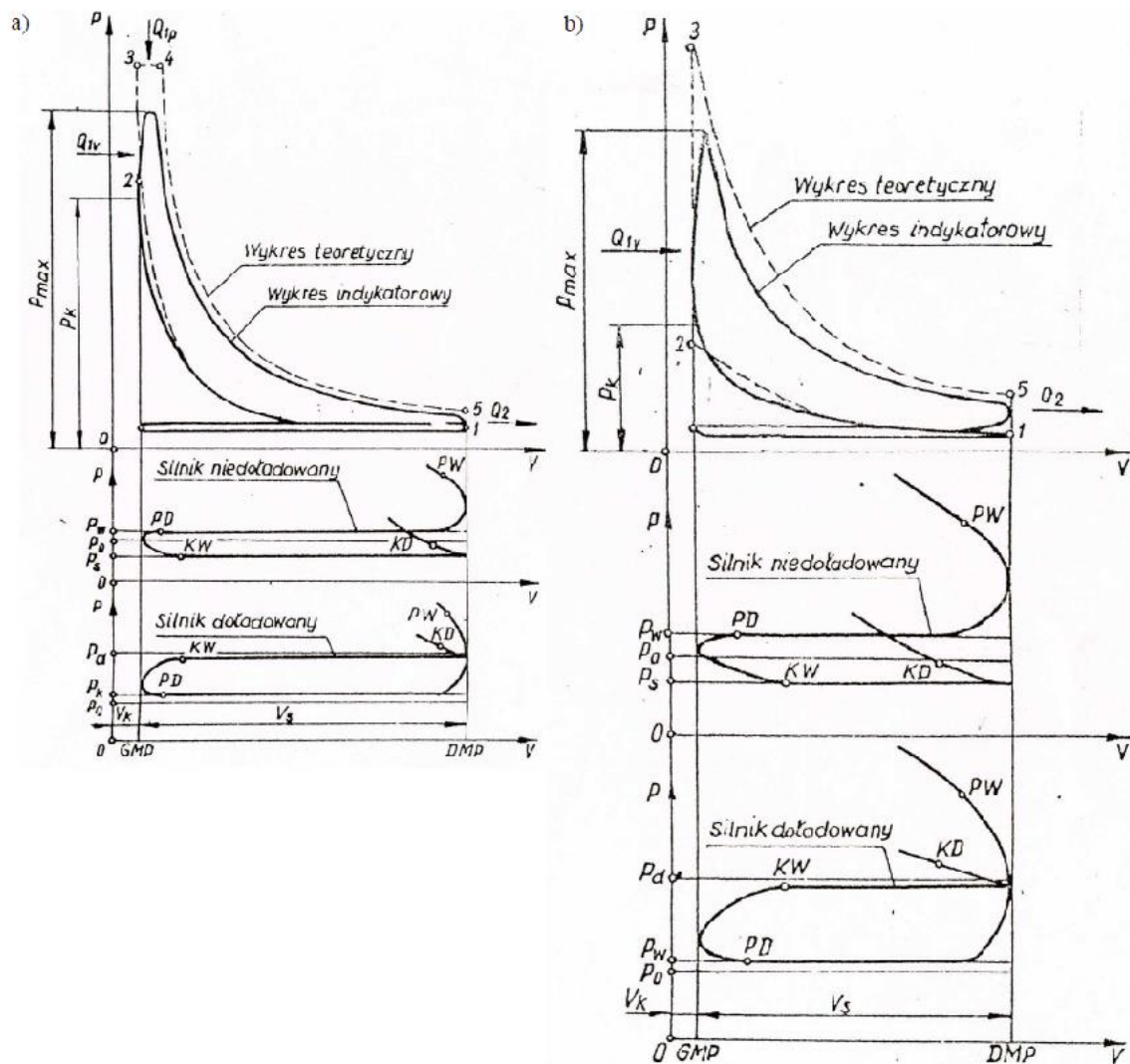
Rzeczywisty wykres pracy silnika tłokowego nazywany jest wykresem indykatorowym. Możemy rozróżnić następujące rodzaje wykresów indykatorowych:

- zamknięte (p - V), przedstawia przebieg ciśnienia w cylindrze w zależności od objętości chwilowej komory spalania lub drogi tłoka,
- otwarte (p - α), przedstawia przebieg ciśnienia pracującego silnika w cylindrze w zależności od kąta obrotu wału
 - pełne,
 - częściowe,
 - wielokrotne [3].

Zamknięte wykresy indykatorowe tworzy się w celu porównania obiegu rzeczywistego z teoretycznym. Poniżej zostały zaprezentowane zamknięte wykresy dla silnika dwusuwowego (rys. 7) oraz czterosuwowego (rys. 8).



Rys. 7 Wykres indykatorowy zamknięty rzeczywistego obiegu dwusuwowego silnika spalinowego wraz z wykresem teoretycznym a) dla silnika z zapłonem samoczynnym b) dla silnika z zapłonem iskrowym [3,4]



Rys. 8 Wykres indykatorowy zamknięty rzeczywistego obiegu czterosuwowego silnika spalinowego wraz z wykresem teoretycznym a) dla silnika z zapłonem samoczynnym b) dla silnika z zapłonem iskrowym [3,4]

Tab. 1 Punkty charakterystyczne obiegów rzeczywistych [4,5]

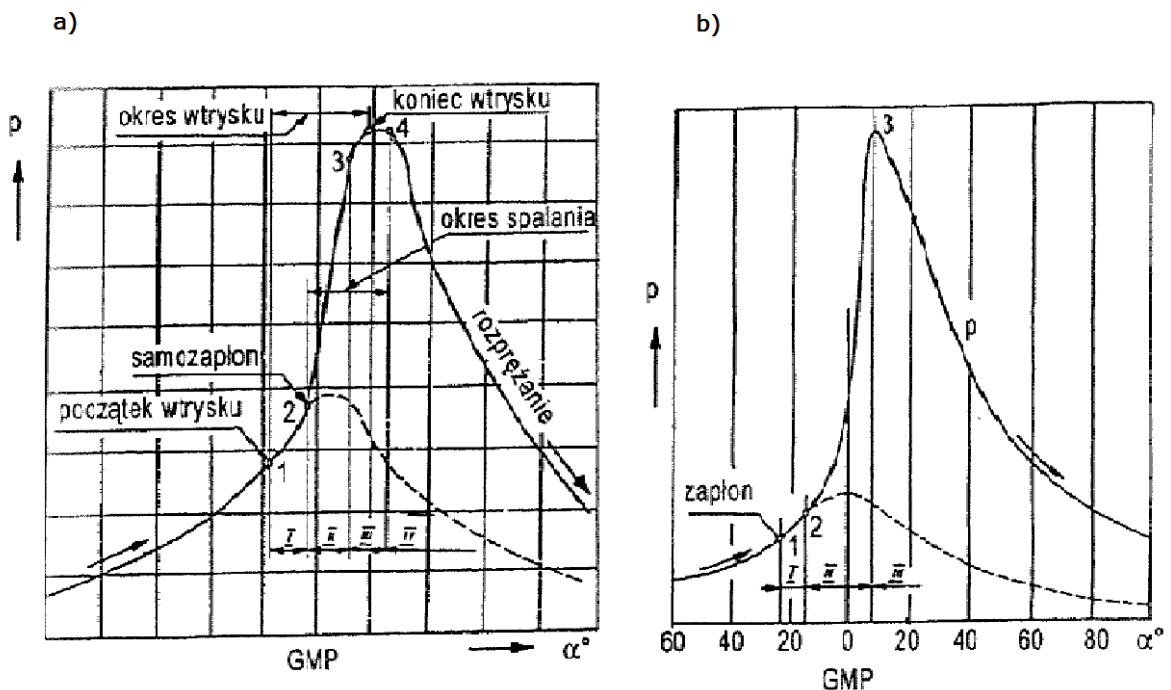
Nazwa	Oznaczenie	Określenia
Początek dolotu Inlet opening	PD	Początek otwarcia zaworu lub okna dolotowego
Koniec dolotu Inlet closing	KD	Koniec otwarcia zaworu lub okna dolotowego
Początek wylotu Outlet opening	PW	Początek otwarcia zaworu lub okna wylotowego
Koniec wylotu Outlet closing	KW	Koniec otwarcia zaworu lub okna wylotowego
Początek wtrysku paliwa Fuel injection begining	PWP	Początek wtryskiwania paliwa do cylindra
Koniec wtrysku paliwa Fuel injection end	KWP	Koniec wtryskiwania paliwa do cylindra
Wystąpienie iskry Sparking moment	WI	Początek rozwarcia styków przerywacza
Punkt zapłonu Ignition point	PZ	Początek wzrostu ciśnienia spowodowany procesem spalania

Na rysunku 9 zostały zaprezentowane typowe wykresy ciśnienia spalania i sprężania dla silników o zapłonie samoczynnym i iskrowym. Proces spalania w silniku o zapłonie samoczynnym można podzielić na cztery charakterystyczne okresy (rys 9a):

- I- opóźnienie zapłonu, czyli zwłoka zapłonu od wtrysknięcia paliwa w punkcie 1 do wzrostu ciśnienia w punkcie 2,
- II- rozprzestrzenianie się płomienia od punktu 2 do 3, z gwałtownym wzrostem ciśnienia,
- III- spalanie właściwe (spalanie kontrolowane) od punktu 3 do 4,
- IV- okres końcowy, czyli dopalanie.

W silnikach o zapłonie iskrowym są trzy charakterystyczne okresy, zaznaczone zostały na rys 9b):

- I- wstępny, zwany okresem indukcji rozpoczyna się w punkcie 1 w momencie przeskoku iskry na świecy zapłonowej, a kończy w punkcie 2, gdy następuje widoczny wzrost ciśnienia,
- II- właściwe spalanie, które trwa od punktu 2 do 3, czyli od momentu rozpoczęcia wzrostu ciśnienia do osiągnięcia ciśnienia maksymalnego (rozprzestrzenianie się płomienia w całej objętości komory spalania),
- III- dopalanie [6].



+Rys. 9 Przebieg zmian ciśnienia w cylindrze silnika w zależności od kąta obrotu wału korbowego: a) o zapłonie samoczynnym, b) o zapłonie iskrowym [6]

Wykres indykatorowy wyznacza się za pomocą zestawu aparatury do indykowania zwanego *Indykatorem* [2]. W skład zestawu dostępnego na laboratorium wchodzi: piezoelektryczny czujnik ciśnienia umieszczony w komorze spalania, czujnik położenia kąтового wału korbowego, wzmacniacz ładunkowy, karty pomiarowe, enkoder oraz komputer wraz z akwizycją danych. Pomiar indykowania polega na pomiarze ciśnienia panującego w cylindrze silnika w zależności od kąta obrotu wału korbowego w czasie jednego cyklu pracy, w silniku czterosuwowym zakres kątowy wynosi 720° .

2. Część labolatoryjna

1. Omówienie parametrów tłokowych silników spalinowych.
2. Scharakteryzowanie teoretycznych i indykatorowych obiegów silników spalinowych.
3. Badanie przebiegów ciśnienia w komorze spalania dla wybranej charakterystyki obciążeniowej.
4. Opis i ocena procesu spalania na podstawie wykresu indykatorowego otwartego dla 3 momentów z charakterystyki obciążeniowej.
5. Analiza wyników i błędów pomiarowych.

3. Literatura:

1. Rychter T., Teodorczyk A.: Teoria silników tłokowych, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2006
2. Nagórski Z., Fudalej-Kostrzewa E.: Wybrane zagadnienia Termodynamiki Technicznej, Instrukcje do ćwiczeń labolatoryjnych, Warszawa 2012
3. PN- 81/M 01501: Silniki spalinowe tłokowe. Podstawowe wielkości i parametry- Terminologia. PKN, Warszawa 1982
4. Ustrzycki A. : Ocena procesu spalania na podstawie wykresu indykatorowego, Materiały pomocnicze. Labolatorium silników spalinowych,
5. PN- ISO 15550-1: Silniki spalinowe tłokowe. Określanie i metoda pomiaru mocy silnika- Wymagania ogólne. PKN, Warszawa 2009
6. Drozd Cz., Sroka Z.: "Silniki spalinowe laboratorium", Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998
7. Sochan A., : „Dobór parametrów pracy silnika spalinowego o zapłonie iskrowym z obiegiem Atkinsona w hybrydowym układzie napędowym, Kraków 2008