Część 2

1. PODSTAWOWE WIADOMOŚCI O SILNIKACH
2. ŹRÓDŁA NAPĘDÓW

NA PODSTAWIE ZAMIESZCZONEGO NIŻEJ MATERIAŁU ODPOWIEDZ NA PYTANIA:

1. Opisz cykl pracy silnika czterosuwowego o zapłonie iskrowym ZI.
2. Wymień parametry silników spalinowych charakteryzujących ich konstrukcję.

ODPOWIEDZI WYŚLIJ NA ADRES: aglanc@ckz.swidnica.pl

Termin: 30 kwiecień 2020

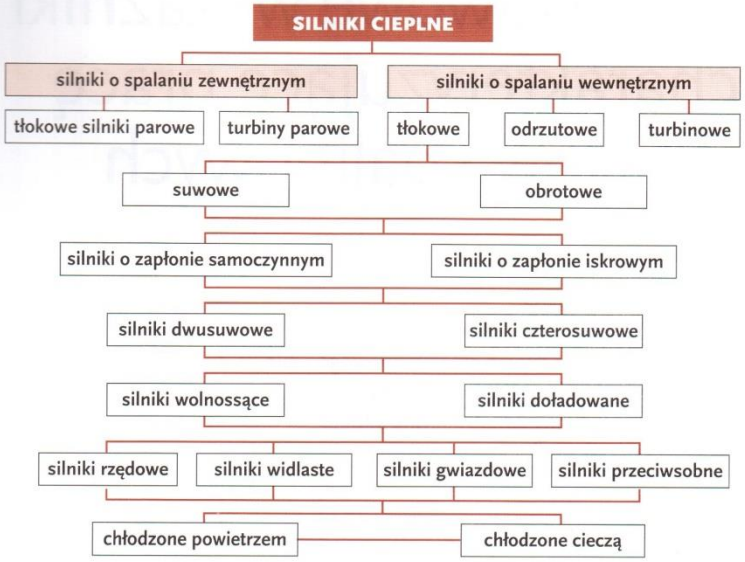
2.1 Klasyfikacja silników

W TYM ROZDZIALE DOWIESZ SIĘ:

- jakie są rodzaje silników
- jak dochodzi do zapłonu mieszanki paliwowo-powietrznej
- co ma wspólnego ruch tłoka z obrotem wału korbowego
- co to jest doładowanie

2.1.1. Wprowadzenie

Silnikami cieplnymi nazywamy maszyny, które pozwalają na zamianę zawartej w paliwie energii chemicznej na energię mechaniczną za pośrednictwem przemiany cieplnej, czyli spalania. Podczas spalania wydziela się dużo ciepła, co w rezultacie powoduje albo przyrost objętości czynnika roboczego (w silnikach turbinowych i odrzutowych), albo przyrost

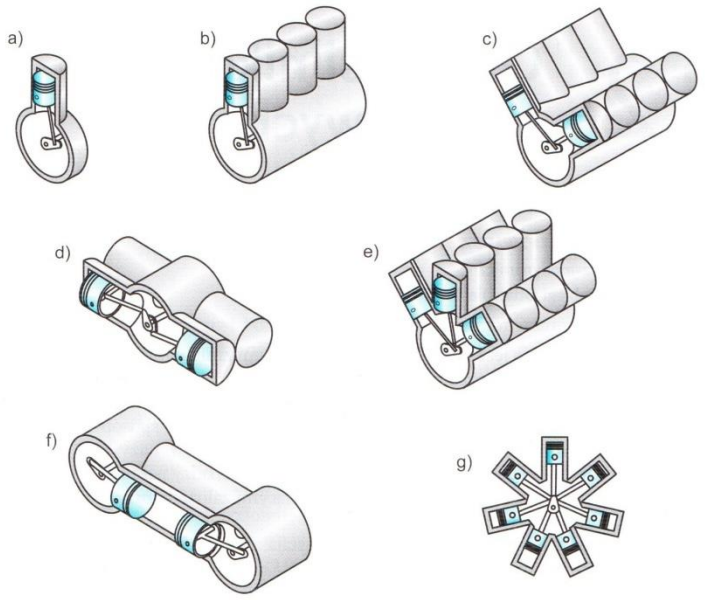


Rys. 2.1. Klasyfikacja silników
[Źródło: L. Szczęch]

ciśnienia czynnika ro
a w konsekwencji wy
W zależności od m
na silniki o spalaniu
Silniki o spalaniu ze
kategorią są tzw. silni
nego odbywa się w
kątem prostym. Czy
nieważ w komorze „
tłoki są napędzane, a
czynnikiem roboczy
do komory roboczej (
odbywa się poza silni

Rys. 2.2. Silnik Stirling
[Źródło: Wikipedia]

Silniki o spalaniu
Czynnikiem roboczy
wietrznej. Ponieważ s
komory spalania nad
temperatury ładunku
w ograniczonej objęt
nienia ładunku. Ciśni
korbowodowi i wałow
mieniana na energię



Rys. 2.4. Układy konstrukcyjne silników tłokowych: *a*) jednocylindrowy, *b*) rzędowy, *c*) widlasty, *d*) przeciwbieżny, *e*) trójrzędowy typu W, *f*) przeciwsobny, *g*) gwiazdowy
[Źródło: W.W. Pulkrabek, *Engineering fundamentals of the internal combustion engines*, Prentice Hall, New Jersey 2003]

W pojazdach silnik często musi być ukryty pod podłogą. Wykonywany jest on wtedy jako rzędowy, poziomy (leżący) lub rozwidlony pod kątem 180° (rys. 2.4*d*) i nazywany czasem silnikiem z tłokami przeciwbieżnymi.

Silniki przeciwsobne (rys. 2.4*f*) mają po dwa tłoki w każdym z cylindrów. Są one silnikami dwusuwowymi, w których jeden z tłoków steruje dolotem, a drugi wylotem czynnika roboczego.

PYTANIA I POLECENIA

1. Co to są silniki cieplne?
2. Jakie maszyny zaliczamy do silników o spalaniu zewnętrznym?
3. Jak dzielimy silniki o spalaniu wewnętrznym?
4. Co to są punkty zwrotne?
5. Wymień zalety i wady silnika Wankla.
6. Jakie są różnice zapłonu mieszanki paliwowej w silniku o ZI i w silniku o ZS?
7. Omów pełny cykl pracy silnika czterosuwowego i silnika dwusuwowego.
8. Na czym polega doładowanie?
9. Jakie znasz silniki wielocylindrowe?

1

1.2. Klasyfikacja silników tłokowych i ich konstrukcja

Na podstawie tworzenia mieszanki i spalania

- **Silniki o zapłonie iskrowym**. Silniki przede wszystkim zasilane benzyną, mieszanka palna jest tworzona zarówno na zewnątrz, jak i wewnątrz komory spalania. Zapłon mieszanki jest inicjowany zewnętrznie (świeca zapłonowa).
- **Silniki o zapłonie samoczynnym.** Tworzenie mieszanki palnej następuje wewnątrz komory spalania, a silniki są zasilane przede wszystkim olejem napędowym. Spalanie w komorze spalania jest efektem samozapłonu.

Na podstawie zasady działania

- **Silniki czterosuwowe.** Mają zamknięty (rozdzielony) obieg czynnika roboczego i do wykonania pełnego cyklu roboczego potrzebne są cztery suwy tłoka, czyli dwa obroty wału korbowego
- **Silniki dwusuwowe.** Mają otwarty obieg czynnika roboczego, a do wykonania pełnego cyklu roboczego potrzebne są dwa suwy tłoka, czyli jeden obrót wału korbowego.

Na podstawie wzajemnego usytuowania cylindrów **(rys. 1)**

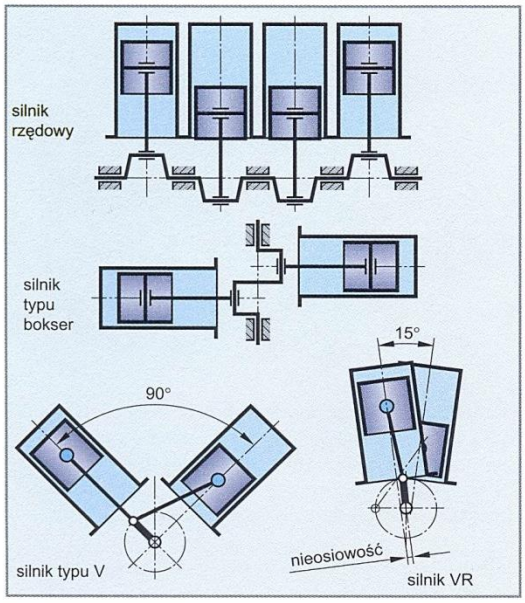
- Silniki rzędowe
- Silniki typu V
- Silniki typu bokser
- Silniki VR

Na podstawie wykonywanego ruchu tłoka

- Silniki o tłokach wykonujących ruch postępowo-zwrotny
- Silniki o tłokach wykonujących ruch obrotowy

Na podstawie sposobu chłodzenia

- Silniki z pośrednim układem chłodzenia
- Silniki z bezpośrednim układem chłodzenia



Rys. 1. Podział silników według wzajemnego usytuowania cylindrów

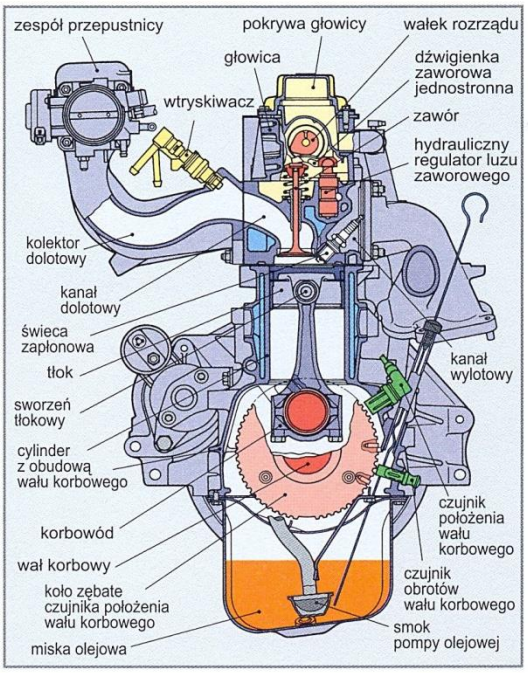
1.2.1. Silnik o zapłonie iskrowym

Silnik o zapłonie iskrowym jest to maszyna spalania wewnętrznego, która w wyniku spalania paliwa zamienia zawartą w nim energię chemiczną na energię mechaniczną, wykorzystując w tym celu tłok.

Budowa

Silnik o zapłonie iskrowym **(rys.2)** składa się z czterech głównych zespołów i układów dodatkowych.

- **Blok silnika:** pokrywa głowicy, głowica, cylinder, obudowa wału korbowego, miska olejowa
- **Mechanizm korbowy:** tłok, korbowód, wał korbowy
- **Układ rozrządu:** zawory, sprężyny zaworowe, dźwigienka zaworowa dwustronna, oś dźwigienek zaworowych, wałek rozrządu, koło napędowe rozrządu, łańcuch rozrządu, pasek zębaty rozrządu
- **Układ zasilania:** układ wtryskowy lub gaźnik, kolektor dolotowy
- **Układy dodatkowe:** układ zapłonowy, układ smarowania, układ chłodzenia, układ wylotowy, wariantowo układ doładowania



Rys. 2. Budowa czterosuwowego silnika o zapłonie iskrowym

1

1.6. Fazy rozrządu silnika czterosuwowego

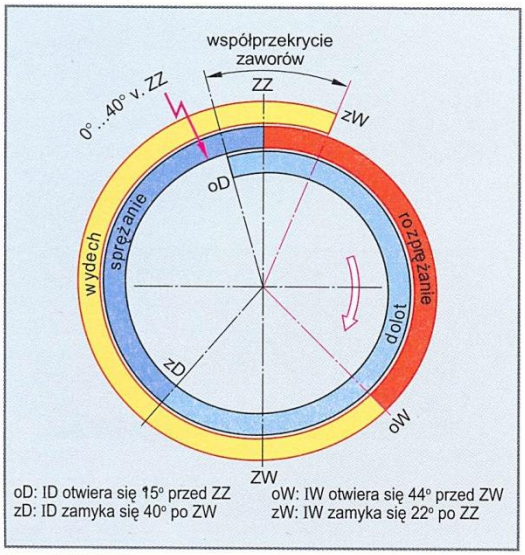
1.6.1. Wykres faz rozrządu

Wykres faz rozrządu jest wykresem kołowym przedstawiającym jednocześnie fazy rozrządu i kąt współprzykrycia zaworów.

Zagadnienie to dotyczy kątów otwarcia i zamknięcia zaworów dolotowego i wylotowego wyrażonych w stopniach obrotu wału korbowego (°OWK) **(rys. 1)**. Kąt otwarcia zaworów i kształt krzywki wałka rozrządu jest ustalony w wyniku badań każdego typu silnika tak prowadzonych, aby jego moc była możliwie jak największa. Dobrany kąt otwarcia zaworów jest optymalny tylko w pewnym zakresie obrotów, dlatego, aby zwiększyć stopień napełnienia silnika w całym zakresie obrotów, stosuje się przestawne wałki rozrządu zaworów dolotowych, w których kąty otwarcia i zamknięcia zaworów dolotowych mogą się zmieniać o pewien określony kąt OWK (zmienne fazy rozrządu). Kąty faz rozrządu poszczególnych silników różnią się od siebie do tego stopnia, że do każdego typu silnika jest tworzony inny wykres tzw. koła faz rozrządu, przykładowo taki jak na **rys. 1**. Z reguły kąt pomiędzy otwarciem i zamknięciem zaworów jest tym większy, im większe są obroty użyteczne silnika.

Symetryczne fazy rozrządu. Kąt otwarcia zaworu dolotowego (oD) przed ZZ i zamknięcia zaworu wylotowego (zW) po ZZ są podobne. Również kąt otwarcia zaworu wylotowego (oW) przed ZW i zamknięcia zaworu dolotowego (zD) po ZW są podobne.

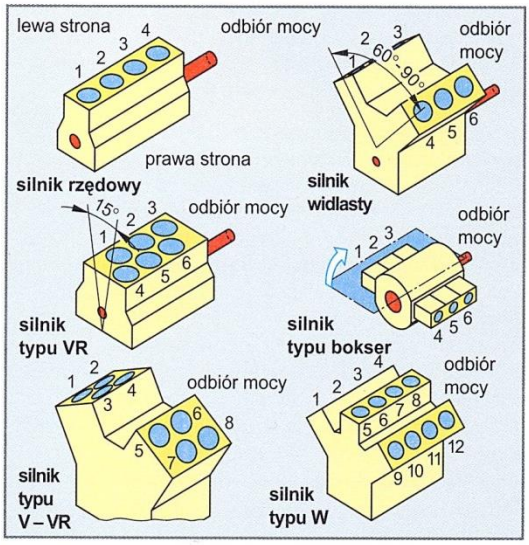
Niesymetryczne fazy rozrządu. Żadne pary kątów nie są do siebie podobne.



Rys. 1. Koło faz rozrządu czterosuwowego silnika o zapłonie iskrowym

1.6.2. Numeracja cylindrów, kolejność zapłonów

Numeracja cylindrów. Numeracja poszczególnych cylindrów silnika spalinowego jest znormalizowana. Numerowanie cylindrów rozpoczyna się po przeciwnej stronie końca zdawczego wału korbowego. W silnikach typu V, VR i bokser numeracja rozpoczyna się od lewego rzędu cylindrów **(rys. 2)**.



Rys. 2. Numeracja cylindrów

Kolejność zapłonów i ich częstość w silnikach wielocylindrowych (rys. 1 str. 17)

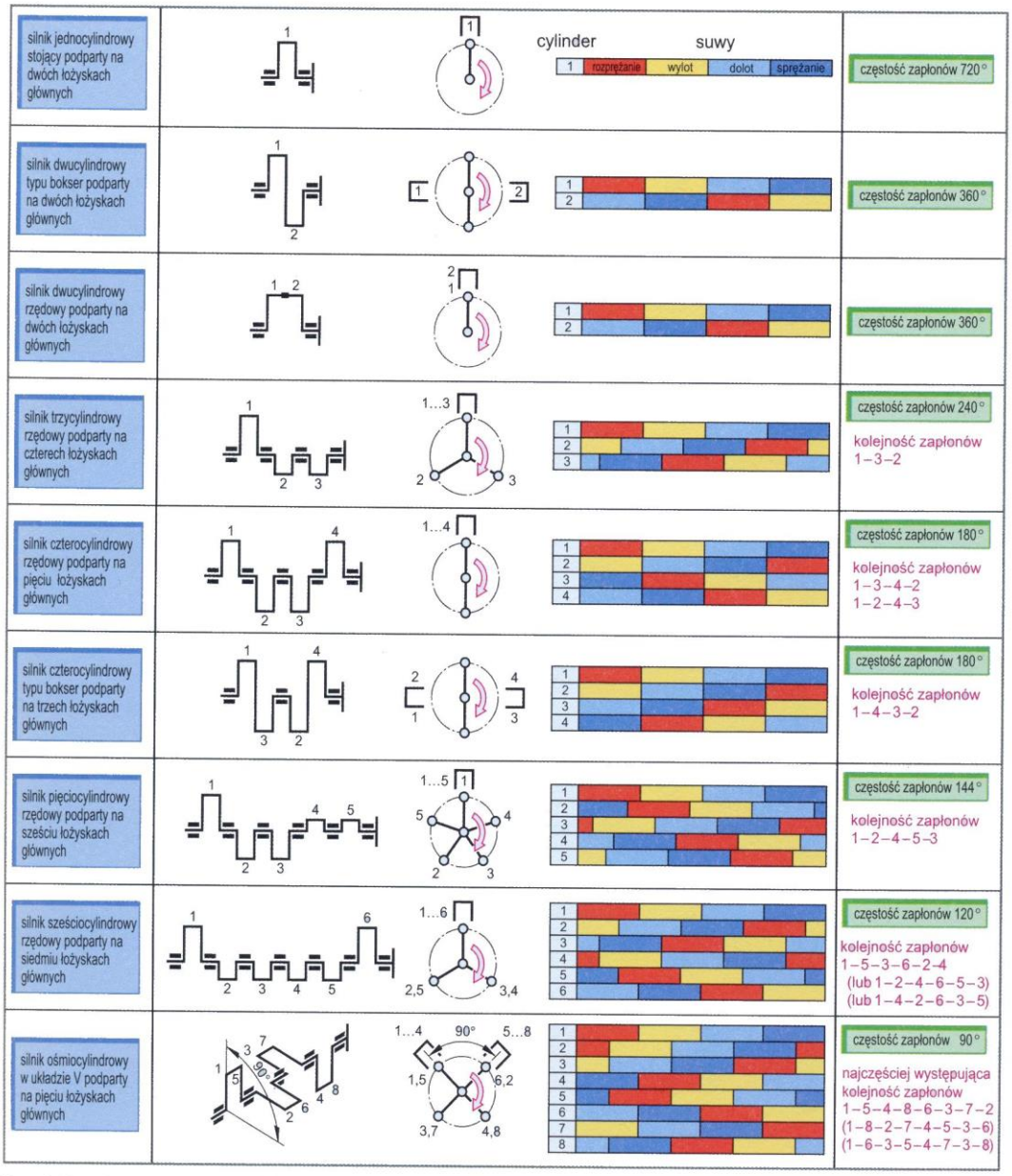
Kolejność zapłonów. Zapłony przebiegają w takiej kolejności, w jakiej następują po sobie kolejne suwy rozprężania w poszczególnych cylindrach silnika spalinowego.

Częstość zapłonów zależy od tego, w jakiej odległości od siebie (w stopniach OWK) następują po sobie cykle rozprężania w poszczególnych cylindrach silnika wielocylindrowego. Im więcej jest cylindrów, tym mniejsza jest odległość między zapłonami (większa częstość zapłonów), a w konsekwencji praca silnika jest spokojniejsza i przebieg momentu obrotowego bardziej wyrównany.

$$\text{Częstość zapłonów} = \frac{720^\circ\,\text{OWK}}{\text{liczba cylindrów}}$$

Przykład. Obliczona częstość zapłonów w silniku 5-cylindrowym jest równa: 720° OWK :5 = 144° OWK. Graficznym przedstawieniem wału korbowego jest tzw. gwiazda korbowa **(rys. 1 str. 17)**. Biorąc za punkt

wyjścia najwyższy cylinder oznaczony cyfrą 1, można ustalić następującą kolejność zapłonów 1-2-4-5-3, przeciwnie do kierunku obrotów silnika, w częstości odpowiadającej 144 °OWK. Postępując w ten sposób, za pomocą odpowiedniej gwiazdy korbowej można określić kolejność zapłonów.



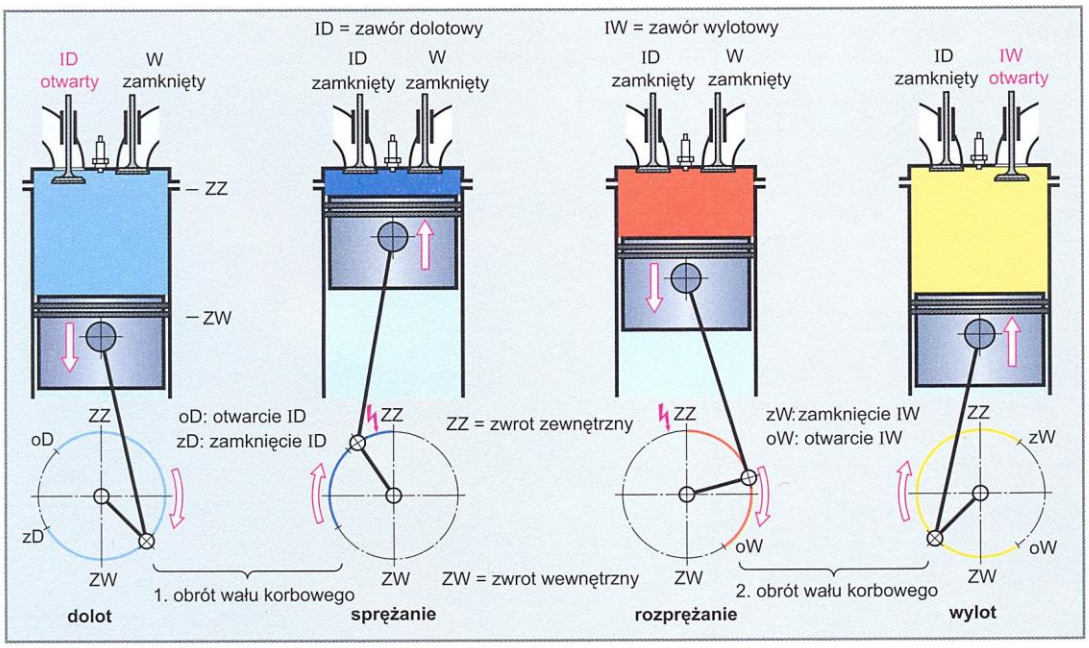
Rys. 1. Typy konstrukcyjne wałów korbowych, kolejność zapłonów i suwów rozprężania

1

1.7. Wymiana ładunku w silniku czterosuwowym

1.7.1. Cykl pracy silnika o zapłonie iskrowym

Cztery suwy cyklu pracy silnika: dolot, sprężanie, rozprężanie, wylot **(rys.1)**. Jeden cykl pracy zamyka się w ciągu dwóch obrotów wału korbowego (720° obrotu wału korbowego OWK).

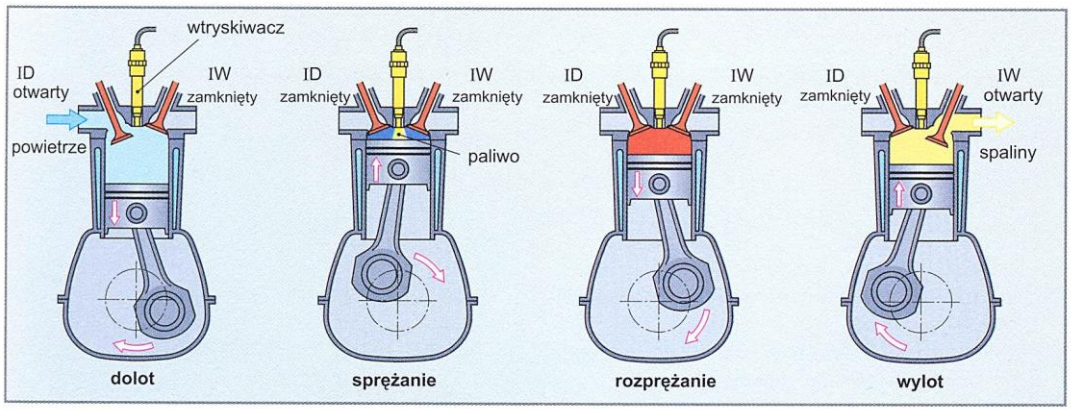


Rys. 1. Cztery suwy cyklu pracy

1. suw – dolot	2. suw – sprężanie	3. suw – rozprężanie	4. suw – wylot
Podczas powrotnego ruchu tłoka wskutek wzrostu objętości w cylindrze powstaje podciśnienie –0,01 ÷ –0,02 MPa w odniesieniu do ciśnienia zewnętrznego. Ponieważ ciśnienie na zewnątrz jest większe niż w cylindrze, więc powietrze zostaje do niego zassane. W tym czasie w kanale dolotowym lub bezpośrednio w cylindrze tworzy się zdolna do zapłonu mieszanka paliwowo-powietrzna. Aby do cylindra została zassana możliwie duża ilość powietrza lub mieszanki paliwowo-powietrznej, otwarcie zaworu dolotowego (ZD) następuje już od 45° OWK przed górnym zwrotem zewnętrznym (ZZ), a zamknięcie od 35° OWK do 90° OWK po zwrocie wewnętrznym (ZW).	Podczas nawrotnego ruchu tłoka mieszanka paliwowo-powietrzna zostaje sprężona 7–12-krotnie w stosunku do pierwotnej objętości cylindra. W wypadku wtrysku bezpośredniego sprężane jest powietrze. Wtrysk paliwa rozpoczyna się krótko przed ZZ. Gaz ulega podgrzaniu od 400 ÷ ÷ 500 °C. Ponieważ przy wysokiej temperaturze gaz nie może się rozprężyć, więc jego ciśnienie wzrasta do 1,8 MPa. Wysokie ciśnienie prowadzi do dalszego odparowania paliwa i jego wymieszania z powietrzem. Dzięki temu w trzecim suwie może zajść szybkie i pełne spalanie. Podczas suwu sprężania zawór dolotowy i wylotowy są zamknięte.	Spalanie jest możliwe dzięki przeskokowi iskry elektrycznej pomiędzy elektrodami świecy zapłonowej. Czas od przeskoku iskry zapłonowej do pełnego rozwinięcia frontu płomienia jest równy około 1/10000 sekundy przy prędkości spalania 20 m/s. Z tego powodu przeskok iskry zapłonowej musi wyprzedzać ZZ w zależności od obrotów silnika od 0° do 40° OWK. Dzięki temu jest możliwe uzyskanie maksymalnego ciśnienia spalania od 3 do 6 MPa niedługo po ZZ (4° ÷ 10° OWK). Ekspansja gazów spalinowych o temperaturze do 2500 °C powoduje ruch tłoka w kierunku ZW, a energia cieplna zamienia się w energię mechaniczną.	Zawór wylotowy otwiera się od 40° do 90° OWK przed ZW, dzięki temu strumień gazów spalinowych zmniejsza się, a układ korbowy jest odciążony. Ponieważ na końcu suwu rozprężania gazy spalinowe o temperaturze 900 °C znajdują się jeszcze pod ciśnieniem 3 ÷ 5 barów, opuszczają cylinder z prędkością dźwięku. Reszta gazów wylotowych podczas nawrotnego ruchu tłoka ulega spiętrzeniu pod ciśnieniem równym około 0,02 MPa. Aby ograniczyć działanie spiętrzające gazów wylotowych, zawór wydechowy zamyka się zaraz po ZZ, podczas gdy zawór ssący już wcześniej został otwarty. To tzw. współprzekrycie zaworów prowadzi do opróżnienia i ochłodzenia komory spalania, umożliwiając wzrost napełnienia cylindra.

1.7.2. Cykl pracy silnika o zapłonie samoczynnym

Cztery suwy silnika o zapłonie samoczynnym wykonują taką samą pracę, jaką wykonują suwy silnika o zapłonie iskrowym: dolot, sprężanie, rozprężanie, wylot **(rys. 1)**. Jeden cykl pracy przebiega w ciągu dwóch obrotów wału korbowego (720° obrotu wału korbowego).



Rys. 1. Czterosuwowy cykl pracy silnika ZS o wtrysku bezpośrednim

1. suw – dolot	2. suw – sprężanie	3. suw – rozprężanie	4. suw – wylot
Podczas powrotnego ruchu tłoka wskutek wzrostu objętości w cylindrze powstaje podciśnienie −0,01 ÷ −0,03 MPa w odniesieniu do ciśnienia zewnętrznego. Ponieważ ciśnienie na zewnątrz jest większe niż w cylindrze, więc powietrze zostaje do niego zassane. Napływające powietrze nie napotyka przeszkody, ponieważ nie ma tu przepustnicy. Aby możliwie najwięcej powietrza dostało się do cylindra, zawór dolotowy zostaje otwarty już od 25° OWK przed ZZ; zamyka się dopiero po 28° po ZW, aby umożliwić doładowanie dynamiczne cylindra. W cylindrze powietrze zostaje ogrzane do temperatury 70 ÷ 100 °C.	Podczas nawrotnego ruchu tłoka mieszanka paliwowo-powietrzna zostaje sprężona od 14 do 24 razy bardziej w stosunku do pierwotnej objętości cylindra. Przy tym powietrze w cylindrze ulega ogrzaniu do temperatury w granicach 600 ÷ 900 °C. Ponieważ powietrze w wysokiej temperaturze nie może ulec rozproszeniu, ciśnienie sprężania osiąga wartość 3,0 ÷ 5,5 MPa. Silniki z dzielonym systemem spalania, przykładowo z komorą wirową, muszą mieć wyższy stopień sprężania, ponieważ straty ciepła są w nich większe ze względu na większą powierzchnię ścian komory spalania. Podczas suwu sprężania zawór ssący i wylotowy są zamknięte.	Pod koniec suwu sprężania, około 15° OWK przed ZZ, do komory spalania zostaje wtryśnięty, pod wysokim ciśnieniem (205 MPa), olej napędowy. W gorącym powietrzu paliwo odparowuje i miesza się z nim. Ponieważ temperatura sprężonego powietrza jest wyższa o około 320 ÷ 380 °C od temperatury samozapłonu oleju napędowego, rozpoczyna się proces spalania. Czas, który upływa między początkiem wtrysku i początkiem spalania, to tzw. zwłoka zapłonu. W wyniku wysokiego ciśnienia spalania tłok przemieszcza się w kierunku ZW. Energia cieplna zamieniana jest w energię mechaniczną.	Zawór wylotowy otwiera się od 30° do 60° OWK przed ZW, dzięki temu strumień gazów spalinowych zmniejsza się, a układ korbowy jest odciążony. Ponieważ na końcu suwu rozprężania gazy spalinowe o temperaturze 550 ÷ 750°C pozostają jeszcze pod ciśnieniem 0,4 ÷ 0,6 MPa, opuszczają cylinder z prędkością dźwięku. Reszta gazów wylotowych podczas nawrotnego ruchu tłoka znajduje się pod ciśnieniem spiętrzenia wynoszącym około 0,02 do 0,04 MPa. Zawór wylotowy zamyka się zaraz po ZZ. Z uwagi na niższą temperaturę gazów wylotowych straty ciepła są mniejsze niż w silniku o zapłonie iskrowym (większa sprawność).

9.4. Wybrane parametry silników spalinowych

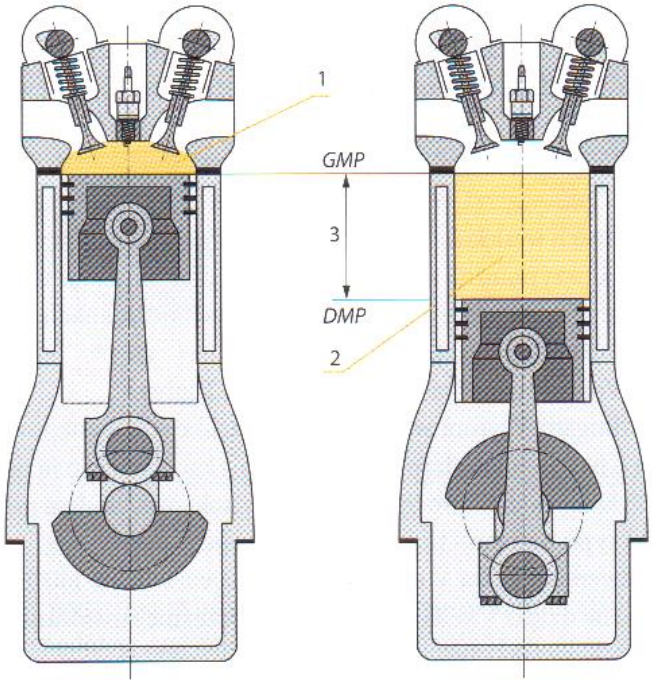
Poniżej podano najważniejsze parametry silników spalinowych charakteryzujące ich konstrukcję.

Pojemność skokowa V_{cs} [cm³] – jej wielkość zależy od średnicy cylindra oraz skoku tłoka, a jej wartość stanowi iloczyn powierzchni przekroju cylindra i skoku tłoka

$$V_{cs} = (\pi \cdot d^2 \cdot h/4) \cdot l_c$$

gdzie:
d – średnica tłoka [cm],
h – skok tłoka [cm],
l_c – liczba cylindrów.

Stopień sprężania – określa stosunek objętości przestrzeni nad tłokiem przy obu skrajnych zwrotnych położeniach tłoka w cylindrze, czyli stosunek maksymalnej objętości cylindra (tłok znajduje się w dolnym martwym położeniu) do minimalnej objętości cylindra (tłok znajduje się w górnym martwym położeniu cylindra; objętość tę stanowi sama komora spalania, zwana czasami komorą sprężania) – (ryc. 9.11).



Ryc. 9.11. Oznaczenie położenia tłoka w cylindrze; 1 – objętość komory sprężania V_k, 2 – objętość skokowa V_s, 3 – skok tłoka, *GMP* – górne martwe położenie tłoka, *DMP* – dolne martwe położenie tłoka

Stopień sprężania oblicza się wg wzoru

$$\varepsilon = (V_s + V_k)/V_k$$

gdzie:
V_s – objętość skokowa cylindra,
V_k – objętość komory sprężania.

Od wartości stopnia sprężania zależą parametry procesu spalania zachodzącego w silniku. Im większa wartość stopnia sprężania, tym wyższe jest maksymalne ciśnienie sprężania, a potem maksymalne i średnie ciśnienie spalania. Wzrasta także temperatura sprężanego gazu.

Konstrukcyjnie podwyższenie stopnia sprężania silnika wymaga więc wzmocnienia jego wytrzymałości oraz odporności na zwiększone przeciążenia termiczne.

Moc silnika – w sensie fizycznym jest to ilość pracy, jaką silnik może wykonać w jednostce czasu. W praktyce jest to moc możliwa do uzyskania z zastosowanego paliwa, skorygowana o straty związane z odprowadzaniem gazów spalinowych, chłodzeniem oraz tarciem wewnętrznym. Uwzględniając tarcie powstające w układzie napędowym, można otrzymać moc uzyskaną na kołach. Moc wyraża się w watach [W], a częściej w kilowatach [kW]. Do porównywania parametrów samochodowych silników spalinowych moc wyraża się tradycyjnie w koniach mechanicznych [KM]:

1 kW = 1,36 KM 1 KM = 0,74 kW

Moc silnika wyznacza się na specjalnym stanowisku pomiarowym, czyli na hamowni silnikowej; jej wartość jest iloczynem momentu obrotowego i prędkości obrotowej wału korbowego silnika

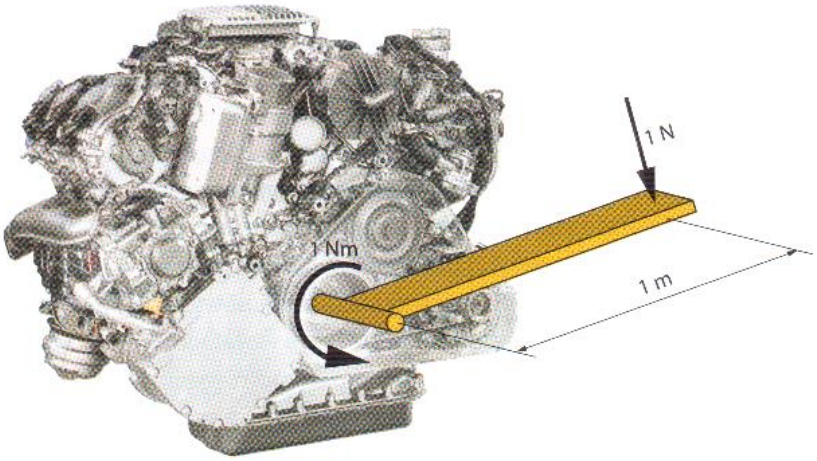
$$P = M \cdot \frac{n}{9550}$$

gdzie:
M – moment obrotowy [Nm],
n – prędkość obrotowa wału korbowego [obr/min].

Moment obrotowy *M* – moment to wielkość fizyczna będąca iloczynem siły przyłożonej do ramienia i długości tego ramienia. Moment obrotowy to wspomniana wyżej wielkość fizyczna (moment) odnosząca się do ruchu obrotowego. Jednostką momentu i momentu obrotowego jest niuton razy metr [Nm].

Działanie momentu obrotowego przedstawimy na przykładzie.

Do wyjścia wału korbowego silnika spalinowego zostaje przymocowany sztywny pręt długości 1 m (ryc. 9.12). Na koniec pręta zostaje przyłożona siła o wartości 1 N. Po przyłożeniu tej siły na wyjściu wału korbowego powstaje moment obrotowy o wartości 1 Nm. Jeżeli zwrot wektora siły momentu obrotowego wywołanego działaniem siły 1 N na ramieniu długości 1 m jest przeciwny do generowanego na wyjściu wału korbowego, to aby przeciwstawić się działaniu tej siły (aby wał korbowy się obracał), silnik musi generować moment obrotowy o wartości większej niż 1 Nm.



Ryc. 9.13. Ilustracja działania momentu obrotowego

W taki sposób mierzone są parametry silnika spalinowego na hamowniach silnikowych. Urządzenie pomiarowe mierzy siłę możliwą do uzyskania na ramieniu określonej długości, po czym oblicza moment obrotowy. Moc silnika oblicza się, mnożąc uzyskany moment przez aktualne obroty wału korbowego.

Sprawność silnika spalinowego η – parametr, który określa stopień wykorzystania wartości energetycznej paliwa. Sprawność silnika obliczana jest ze wzoru

$$\eta = P_{\text{uzyskana}}/P_{\text{dostarczona}}$$

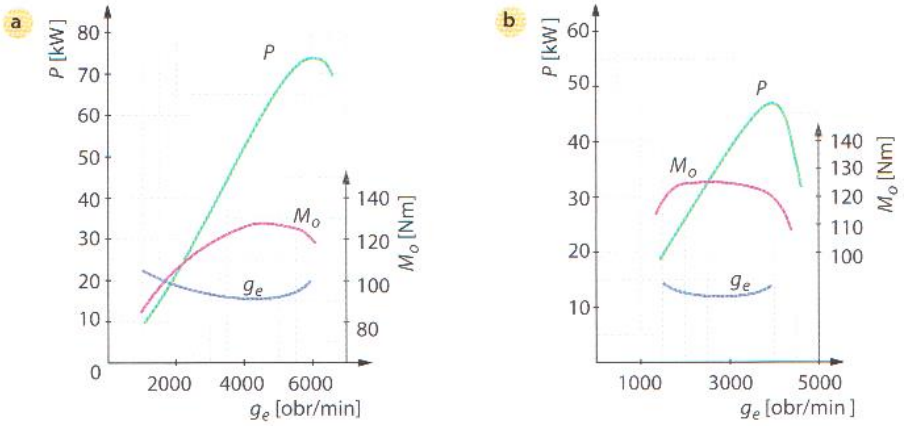
gdzie:
P_{uzyskana} – moc uzyskana na wyjściu silnika,
$P_{\text{dostarczona}}$ – moc dostarczona (wynikająca z wartości opałowej paliwa).

Sprawność nowoczesnych tłokowych silników spalinowych nie przekracza 40%, a najczęściej wynosi ok. 30%. Mówimy tu jednak o sprawności maksymalnej, uzyskiwanej przy szczególnych obrotach wału korbowego i szczególnym obciążeniu. Zakres obrotów i obciążenia, w którym sprawność silnika tłokowego wewnętrznego spalania jest bliska maksymalnej, w praktyce jest niewielki. Natomiast silnik trakcyjny pracujący w szerokim zakresie obrotów i obciążeń charakteryzuje się znacznie mniejszą średnią (czyli użyteczną) sprawnością. Jej wartość nie jest stała i zależy m.in. od doboru parametrów układu napędowego. Pozostała część energii jest tracona.

Jednostkowe zużycie paliwa g_e [g/kWh] – jest to ilość paliwa, którą silnik zużywa do wytworzenia energii o wartości 1 kWh; parametr ten informuje o sprawności silnika spalinowego.

Godzinowe zużycie paliwa G_e [g/h], [l/h] – określa zużycie paliwa, wyrażone w gramach lub w litrach, w ciągu jednej godziny pracy.

Charakterystyka wyjściowa silnika spalinowego stanowi zestawienie ze sobą wykresów mocy oraz momentu obrotowego silnika w funkcji prędkości obrotowej wału korbowego. Przykładowe charakterystyki dla silnika ZI oraz ZS przedstawiono na rycinie 9.13.



Ryc. 9.13. Charakterystyka wyjściowa silników spalinowych: (a) o zapłonie iskrowym, (b) o zapłonie samoczynnym

Z charakterystyki wyjściowej silnika można odczytać, w jakich zakresach prędkości obrotowej wału korbowego silnik osiąga maksymalny moment obrotowy i maksymalną moc.

Z wykresów wynika, najniższe jednostkowe zużycie paliwa (g_e), w przybliżeniu, jest osiągane w zakresie prędkości obrotowych wału korbowego, dla których moment obrotowy generowany przez silnik jest największy. W celu zmniejszenia spalania paliwa przez silnik użytkownik pojazdu powinien utrzymywać prędkość obrotową wału korbowego w zakresie obejmującym największy moment obrotowy.

Obecnie w technice motoryzacyjnej dąży się do tego, aby maksymalny moment obrotowy silnika był osiągany jak najwcześniej, a charakterystyka momentu obrotowego była jak najbardziej „płaska" w całym zakresie prędkości obrotowej wału korbowego silnika – pod tym względem lepszy jest silnik ZS.

Maksymalna prędkość obrotowa silników spalinowych jest z góry określona. Po osiągnięciu maksymalnej założonej prędkości obrotowej przez silnik ZI następuje tzw. odcięcie zapłonu, natomiast w silniku ZS – odcięcie dopływu paliwa.

Do powszechnie używanych, zarówno przez użytkowników, jak i producentów, wskaźników porównawczych silników zalicza się użyteczną maksymalną moc silnika i jego maksymalny moment obrotowy, a także wartości lub przedziały prędkości obrotowych, w których są one uzyskiwane. Dzięki temu użytkownik może ocenić, który typ silnika spalinowego będzie spełniał jego oczekiwania eksploatacyjne.

Dodatkową wartością, którą w sposób pośredni lub bezpośredni podaje producent pojazdu, jest tzw. elastyczność silnika. Zależy ona od dwóch parametrów: od wartości maksymalnego momentu obrotowego oraz od wartości momentu obrotowego osiąganego przy maksymalnej mocy. Elastyczność silnika stanowi stosunek tych dwóch wartości i świadczy o zdolności silnika do pokonywania obciążeń wynikających z warunków jazdy. Jednak producenci bardzo rzadko podają tak obliczoną wartość elastyczności silników. Posługują się natomiast porównawczym parametrem w postaci czasu przyspieszania pojazdu, np. od 100 do 120 km/h na najwyższym przełożeniu. Ma to dość luźny związek z rzeczywistą elastycznością silnika podawaną według prawidłowej definicji, ale dobrze oddaje działanie jednostki napędowej w konkretnym samochodzie.

9.5. Praca silników spalinowych

Pod względem mechanicznym działanie zarówno silników o zapłonie samoczynnym, jak i silników o zapłonie iskrowym można opisać za pomocą takich samych zależności kinematycznych jak te, które są stosowane do opisu układu korbowo-tłokowego i układu rozrządu. To samo dotyczy istoty działania obu konstrukcji. Silniki o zapłonie ZI oraz o zapłonie ZS – jako silniki tłokowe – wykorzystują zmiany parametrów gazów sprężonych do określonego ciśnienia. Gaz w silniku tłokowym w postaci ładunku (np. mieszaniny paliwowo-powietrznej lub samego powietrza) zostaje sprężony w zamkniętym cylindrze podczas ruchu tłoka w kierunku górnego martwego położenia.

Podczas sprężania gazów w silniku tłokowym są wykorzystywane właściwości wynikające z dwóch praw fizyki (termodynamiki). Pierwsze z nich mówi o tym, że objętość gazu w stałej temperaturze zmniejsza się lub

jego mocy. Aby zapewnić pracę silnika w zakresie użytecznej prędkości obrotowej (pomiędzy prędkościami maksymalnego momentu obrotowego i mocy maksymalnej), trzeba zastosować w układzie napędowym skrzynkę biegów. Powyższe zagadnienia zostały szczegółowo opisane w rozdziale 2 i 4. W celu zbliżenia się rzeczywistej charakterystyki silnika do „idealnej" można zastosować różne inne dodatkowe rozwiązania, np. doładowanie jednostki napędowej, zmienne fazy rozrządu, napęd elektryczny lub hybrydowy.

Te ostatnie rozwiązania są o tyle istotne, że wyczerpujące się powoli światowe zasoby ropy naftowej wymuszają obecnie poszukiwanie innych źródeł energii, mogących zastąpić tradycyjne paliwa płynne i przystosowane do ich spalania silniki spalinowe.

1.4. Napędy alternatywne pojazdów samochodowych

Opisane powyżej wady silników spalinowych są powodem ciągłego poszukiwania alternatywnych źródeł napędu pojazdów. Niestety, jak dotąd nie wynaleziono takiego rozwiązania, które zastąpiłoby tłokowy silnik spalinowy. Ograniczone zasoby naturalne ropy naftowej i szkodliwe oddziaływanie na środowisko produktów jej spalania przyczyniły się w ostatnich latach do intensyfikacji prac badawczych nad zastosowaniem w tradycyjnym silniku spalinowym innych paliw. Ponieważ jednak w porównaniu do benzyn i oleju napędowego mają one istotne ograniczenia, nie pozwala to obecnie na ich upowszechnienie. Skroplone paliwa gazowe (LPG – mieszanina propanu i butanu, CNG/LNG – gaz ziemny) są spalane w sposób nieodwracalny, a więc wcześniej lub później zabraknie ich, tak jak ropy naftowej. Paliwa uzyskiwane z przetworzenia produktów biologicznych (alkohole, biologiczny olej napędowy) są tańsze, ale ich produkcję ogranicza powierzchnia możliwych upraw. Najbardziej obiecującym paliwem wydaje się **wodór**. Zakłada się, że w roku 2020 będzie on stanowił 15% paliwa używanego w pojazdach samochodowych [33]. Zalety wodoru to jego praktycznie nieograniczone zasoby oraz brak szkodliwego oddziaływania na środowisko. Produktem spalania wodoru (czyli jego łączenia z tlenem) jest wydzielana do atmosfery para wodna. Niestety, obecnie na jego upowszechnienie nie pozwalają następujące wady tego paliwa: skłonność do spalania stukowego, silne oddziaływanie chemiczne na metale (szczególnie w wysokich temperaturach), inicjowanie rozkładu chemicznego środków smarnych oraz duże problemy z przechowywaniem go w stanie skroplonym (wymagana temperatura zbiornika wynosi −253°C!). Silniki wodorowe są przedmiotem badań wielu firm, np. [33]:

- wodorowy silnik Mazdy Renesis Hydrogen Rotary Engine – silnik Wankla wyposażony w dwupaliwowy układ zasilania wodorem i benzyną;
- silnik V8 Mitsubishi Nessie, o pojemności 2,5 dm^3 z roku 2005, zasilany wodorem;

- silnik spalinowy zasilany wodorem w pojeździe hybrydowym Quantum H_2Hybrid (zaadaptowana Toyota Prius) z roku 2005;
- 12-cylindrowy silnik BMW H2R z roku 2004, o pojemności 6 dm^3 i mocy 210 kW, zasilany wodorem;
- silnik zasilany wodorem w hybrydowym napędzie Forda C-Max, pozwalający na spalanie bardzo ubogiej mieszanki wodór-powietrze;
- silnik zasilany wodorem w samochodzie Toyota FCHV-adv z 2008 roku, pozwalający na uzyskanie zasięgu 830 km po jednym tankowaniu 156 litrów wodoru do zbiornika pod ciśnieniem 70 MPa [56].

Wydaje się jednak, że większe szanse na zastosowanie wodoru jako paliwa mają ***pojazdy z ogniwami paliwowymi***. Podczas pracy ogniwa paliwowego wodór łączy się z tlenem, ale jego utlenianiu nie towarzyszy spalanie w płomieniu. Nie występuje więc wydzielanie związanych z tym szkodliwych substancji.

Omawiając alternatywne źródła zasilania należy wspomnieć również o innych silnikach cieplnych, które próbowano zastosować do napędu pojazdów, jak np.:

- ***silnik parowy*** – jego wadami są mała sprawność, długi czas uruchamiania, niebezpieczeństwo wybuchu kotła i możliwość zniszczenia silnika w przypadku pozostawania kondensatu w cylindrze;
- ***silnik gazowy zewnętrznego spalania (Stirlinga)*** – jego wadami są niedostateczne możliwości uszczelnienia przestrzeni roboczej wypełnionej wodorem oraz brak właściwych rozwiązań konstrukcyjnych wymienników ciepła, za pomocą których gaz w silniku jest ogrzewany i schładzany w kolejnych cyklach pracy;
- ***silnik turbospalinowy*** – jego wadami są niska sprawność, duże zużycie paliwa i słaba dynamika (wolne zwiększanie prędkości obrotowej ze stanu biegu jałowego do prędkości użytecznych); brak układu tłokowo-korbowego wpływa za to na równomierność prędkości obrotowej, a spalanie zewnętrzne z nadmiarem powietrza umożliwia osiągnięcie małej toksyczności spalin; z kolei duże prędkości obrotowe (25 000–50 000 obr/min) i bardzo wysokie temperatury powodują znaczne trudności technologiczne, materiałowe oraz wzrost kosztów produkcji;
- ***silnik o tłoku obrotowym (Wankla)*** – jest jedynym z tej grupy, który znalazł praktyczne zastosowanie do napędu samochodów; jego niewątpliwe zalety to obrotowy tłok eliminujący skomplikowany układ tłokowo-korbowy oraz brak układu rozrządu; niestety silnik ten ma również wady – małą sprawność, problemy z uszczelnieniem tłoka i zwiększone zużycie paliwa.

Prowadzi się także próby z innymi rodzajami napędów:

- ***napędem żyroskopowym*** [47] – rozwiązanie zastosowane w autobusach komunikacji miejskiej napędzanych wirującym kołem zamachowym o dużej masie (żyrobusach firmy Oerlikon); koło zamachowe o masie 1500 kg, łożyskowane na pionowej osi, rozpędzane jest za pomocą specjalnego urządzenia na przystanku początkowym; w trakcie jazdy oddaje swoją energię na koła pojazdu, umożliwiając jazdę bez „doładowania" o zasięgu około 2 km; podczas postoju na przystankach koło jest ponownie rozpędzane

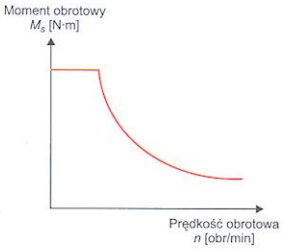
do maksymalnej prędkości obrotowej w czasie nie dłuższym niż 45 sekund; w przypadku korków ulicznych lub wydłużenia czasu przejazdu, kierowca ma możliwość uruchomienia dodatkowego silnika spalinowego umożliwiającego dojazd do przystanku końcowego; wady tego rozwiązania to mały zasięg oraz niebezpieczeństwo związane z olbrzymią masą wirującą z dużą prędkością obrotową;

- ***napędem elektrycznym*** – przy użyciu silnika elektrycznego zasilanego baterią akumulatorów lub ogniwem paliwowym;
- ***napędem hybrydowym*** – czyli połączeniem w układzie napędowym pojazdu np. silnika spalinowego z silnikiem elektrycznym.

1.4.1. Napęd elektryczny

Silnik elektryczny zasilany baterią akumulatorów

Silnik elektryczny doskonale nadaje się do napędu pojazdów samochodowych. Ruszanie z miejsca i jazda odbywają się w tym przypadku tylko przez „dodawanie gazu". Pojazd rusza łagodnie, bez wahań prędkości, które mają miejsce podczas zmiany biegów przy napędzie silnikiem spalinowym, porusza się cicho i nie wydziela spalin. Wadą tego rozwiązania jest brak dostatecznie wydajnych źródeł energii elektrycznej, przystosowanych do pracy w warunkach szybkozmiennego obciążenia – od poboru prądu o dużej mocy podczas przyspieszania do akumulowania prądu w trakcie hamowania – które mogłyby być zastosowane w pojazdach. Konstruowane w chwili obecnej samochody elektryczne są wyposażane w akumulatory o bardzo dużej masie w stosunku do gromadzonej energii. Powoduje to ograniczenie ładowności i zasięgu pojazdów. Dodatkowe utrudnienie to długotrwały proces ładowania akumulatorów. Pomimo tych istotnych mankamentów udział samochodów z napędem elektrycznym rośnie z uwagi na wymogi ochrony środowiska. Znajdują one zastosowanie w miejscach szczególnie narażonych na negatywne oddziaływanie spalin. Przykładem mogą być elektrycznie napędzane niewielkie samochody, motocykle lub motorowery doskonale spisujące się w wielkich aglomeracjach miejskich (zwłaszcza w ich centrach) lub pojazdy transportowe i wózki stosowane w zakładach produkcyjnych i zamkniętych halach.



Rys. 1.20. Charakterystyka szeregowego silnika elektrycznego prądu stałego

Do napędu pojazdów najlepiej nadaje się szeregowy silnik elektryczny prądu stałego, ze względu na bardzo korzystną charakterystykę momentu obrotowego odpowiadającą „idealnej", opisanej w rozdziale 1.3.