

Silniki tłokowe

Analiza obiegu

Dr inż. Robert JAKUBOWSKI

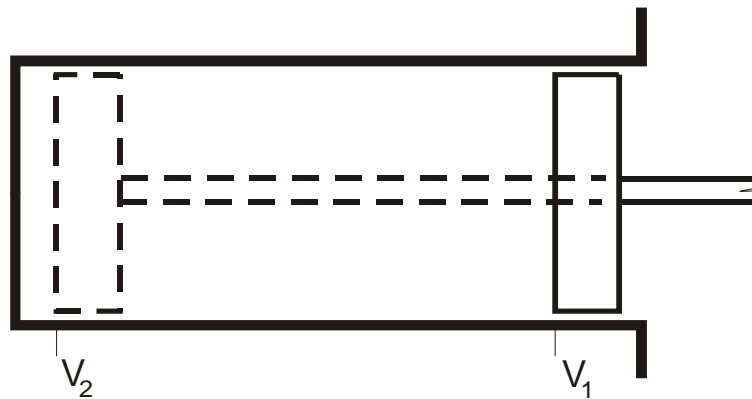
Katedra Inżynierii Lotniczej i Kosmicznej
POLITECHNIKA RZESZOWSKA

Literatura przedmiotu:

- *Dzierżanowski P. i.in:* **Silniki Tłokowe** z serii Napędy lotnicze, WKŁ. Warszawa 1981
- *Borodzik F.:* **Budowa silnika** z serii Aeroklub polski szkolenie samolotowe, WKŁ Warszawa 1973
- *Ambrozik A.:* **Wybrane zagadnienia procesów cieplnych w tłokowych silnikach spalinowych**, Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2003
- *Cheda W., Malski M.:* **Techniczny poradnik lotniczy, Silniki**, WKŁ, Warszawa 1984
- Wender J. Wajand J.: **Silniki spalinowe małej mocy**, WNT, Warszawa 1983

Silniki tłokowe

Obieg silnika tłokowego



V_1 - objętość maksymalna

V_2 - objętość minimalna

$V_s = V_1 - V_2$ - objętość skokowa

$\varepsilon = V_1/V_2$ - stopień sprężania

Procesy w silniku spalinowym są bardzo złożone, albowiem w trakcie pracy silnika mamy do czynienia z szeregiem zjawisk, które są trudne do opisanego w formie prostych formuł matematycznych dających możliwość szybkiego rozwiązania oraz łatwej interpretacji.

Dlatego na etapie opracowywania nowych konstrukcji, jak i doskonalenia już istniejących powszechnie wykorzystuje się uproszczone modele obiegu pracy silnika tłokowego.

Obiegi silnika

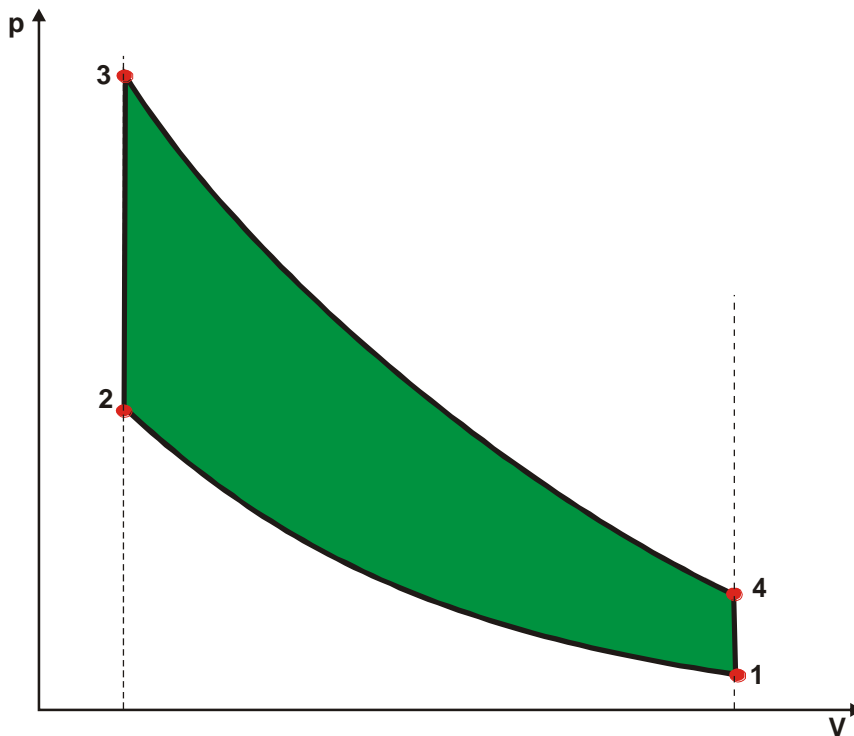
- Teoretyczny – jest wzorcem przedstawiającym przy pomocy przemian idealnych obieg energii w silniku. Czynniki robocze opisane są za pomocą modelu gazu doskonałego (Carnota, Joula, Brytona, Otto)
- Porównawczy - obieg bardziej dostosowany ze względu na analizę silników spalinowych, wykorzystujący opis zachodzących przemian jako odwracalne, przy czym model czynnika roboczego traktuje się jako gaz półdoskonały lub rzeczywisty oraz uwzględnia się suwy wymiany ładunku
- Rzeczywisty – ujmujący najpełniej ogół zjawisk występujących w silniku, bazujący na możliwie jak najdokładniejszym opisie rzeczywistych zjawisk zachodzących w silniku spalinowym. Obieg można otrzymać na podstawie wykresu indykatorowego

Obieg teoretyczny

- Przemiany w obiegu są przemianami odwracalnymi
- Czynnik roboczy jest traktowany jako gaz idealny (c_p , c_v , k , R – stałe)
- Pomija się zmianę ilości czynnika w obiegu
- Proces spalania traktuje się jako równoważny mu proces doprowadzenia ciepła
- Proces wymiany ładunku przyjmuje się jako proces odprowadzenia ciepła z układu

Obiegi teoretyczne silnika tłokowego – Obieg Otto

Obieg Otto

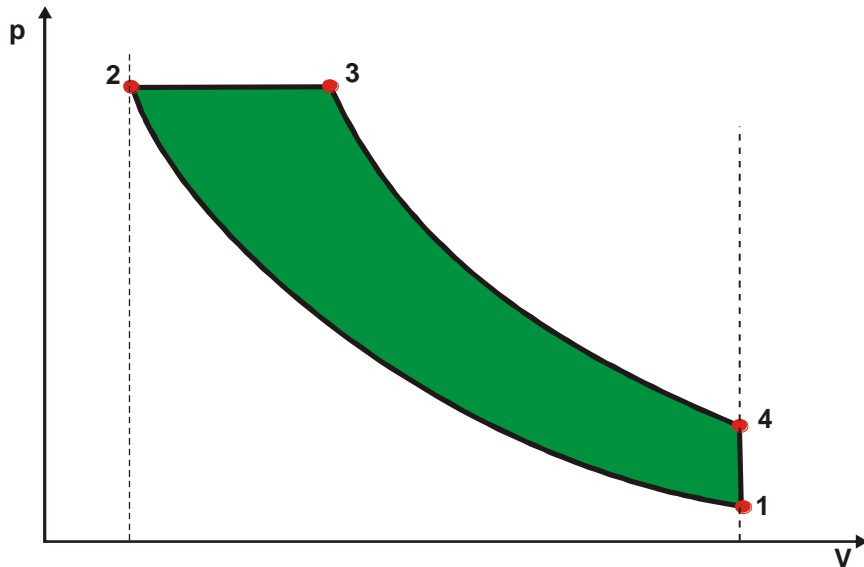


- 1-2 izentropowe sprężanie
- 2-3 izochoryczne doprowadzenie ciepła
- 3-4 izentropowe rozprężanie
- 4-1 izochoryczne odprowadzenie ciepła

**Przybliżony model pracy silnika o
zapłonie iskrowym**

Obiegi teoretyczne silnika tłokowego – Obieg Diesla

Obieg Diesla

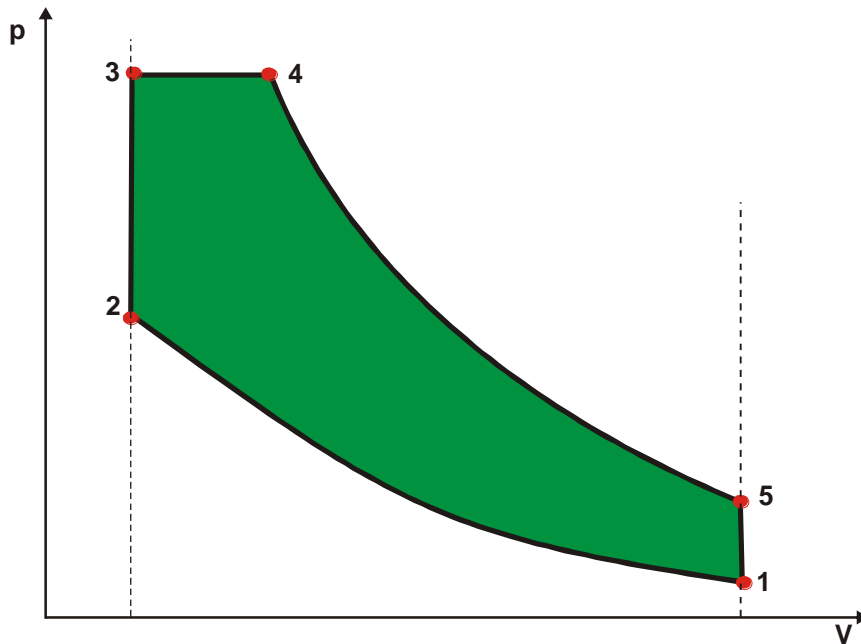


- 1-2 izentropowe sprężanie
- 2-3 izobaryczne doprowadzenie ciepła
- 3-4 izentropowe rozprężanie
- 4-1 izochoryczne odprowadzenie ciepła

**Przybliżony model pracy wolnossącego
silnika o zapłonie samoczynnym**

Obiegi teoretyczne silnika tłokowego – Obieg Sabathe

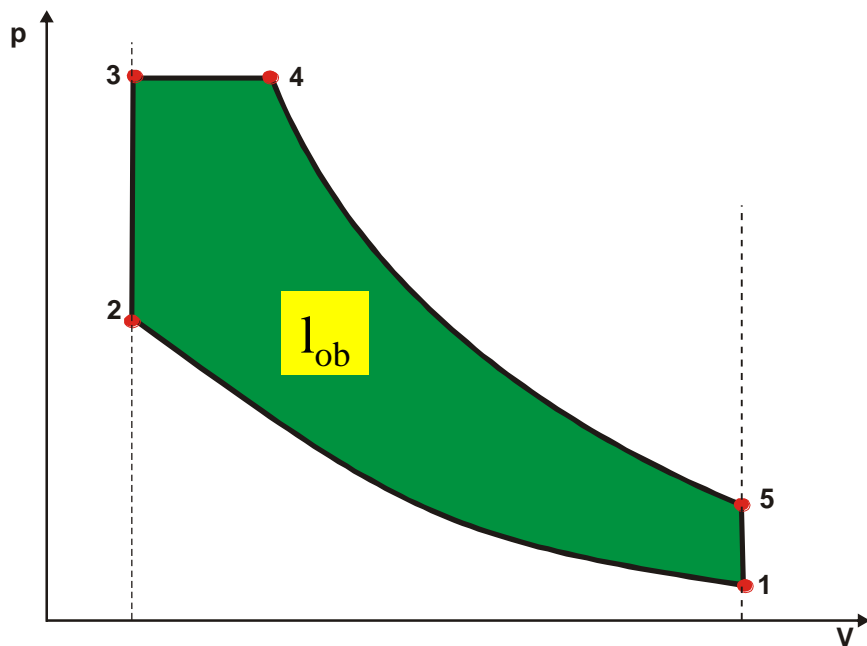
Obieg Sabathe



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

**Przybliżony model pracy współczesnych
silników o zapłonie samoczynnym**

Praca obiegu i sprawność cieplna obiegu silnika



PRACA OBIEGU

$$l_{ob} = q_{dop} - q_{odp}$$

CEPŁO DOPROWADZONE

$$q_{dop} = q_{2-3} + q_{3-4} = c_v (T_3 - T_2) + c_p (T_4 - T_3)$$

CEPŁO ODPROWADZONE

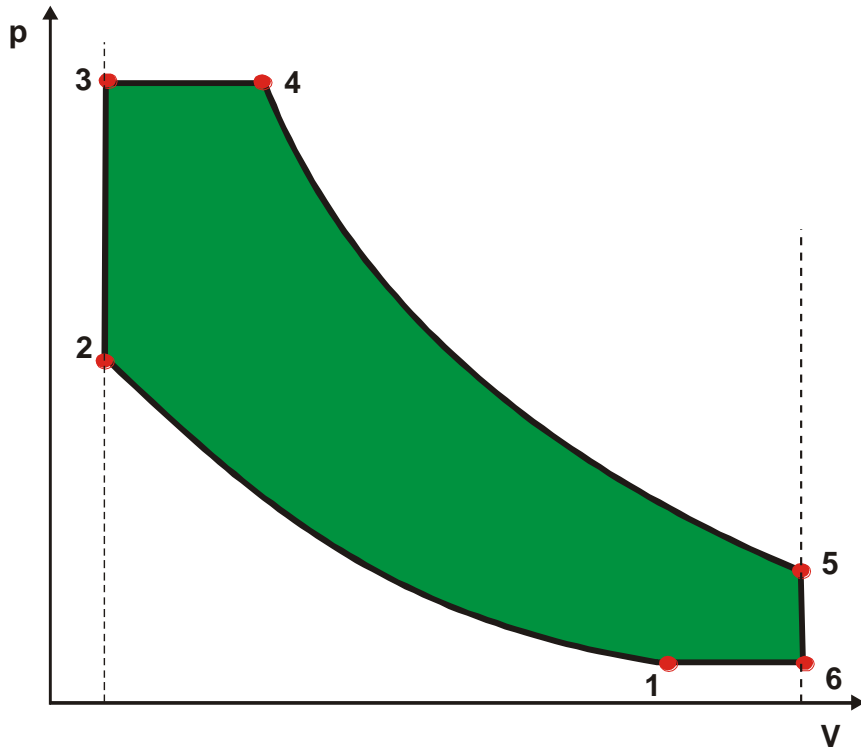
$$q_{odp} = q_{5-1} = c_v (T_5 - T_1)$$

SPRAWNOŚĆ CIEPLNA OBIEGU

$$\eta_c = \frac{l_{ob}}{q_{dop}} = 1 - \frac{q_{odp}}{q_{dop}}$$

Sprawność obiegu jest tym większa im większa jest praca obiegu uzyskiwanego z tej samej ilości doprowadzonego ciepła

Uogólniony termodynamiczny obieg silnika tłokowego



$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} \quad \text{Sto\pie\en sp\reżania}$$

$$\lambda_p = \frac{p_3}{p_2} \quad \text{Sto\pie\en wzrostu ci\snienia podczas doprowadzania ciep\l\ przy } V=\text{const.}$$

$$\rho = \frac{V_4}{V_2} \quad \text{Sto\pie\en wst\epnego rozpr\ezania podczas doprowadzania ciep\l\ przy } p=\text{const.}$$

$$\sigma = \frac{V_5}{V_4} \quad \text{Sto\pie\en dalszego procesu rozpr\ezania}$$

$$\rho' = \frac{V_5}{V_1} \quad \text{Sto\pie\en wst\epnego sp\reżania podczas oddawania ciep\l\ przy } p=\text{const.}$$

oraz

$$\rho' \varepsilon = \sigma \rho \Leftrightarrow \varepsilon / \sigma = \rho / \rho'$$

Określanie parametrów użytkowych na podstawie analizy obiegu silnika

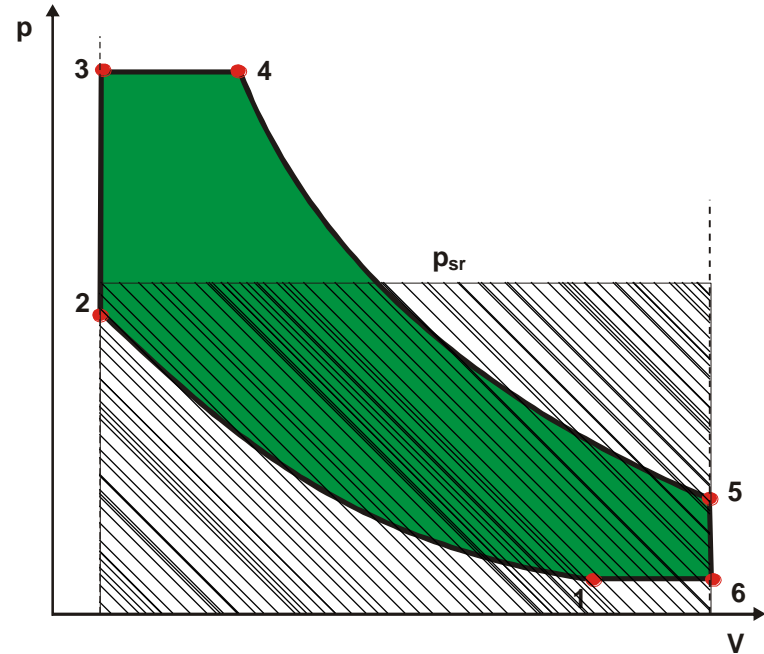
ŚREDNIE CIŚNIENIE OBIEGU

$$p_{sr} = L_{ob}/V_s = l_{ob}/v_s$$

MAKSYMALNE CIŚNIENIE OBIEGU

$$p_3 = \lambda_p p_2 = \lambda_p p_1 \varepsilon^k$$

$$\lambda_p = \frac{q_v}{c_v T_2} + 1 = \frac{q_v}{c_v T_a \varepsilon^{k-1}} + 1$$

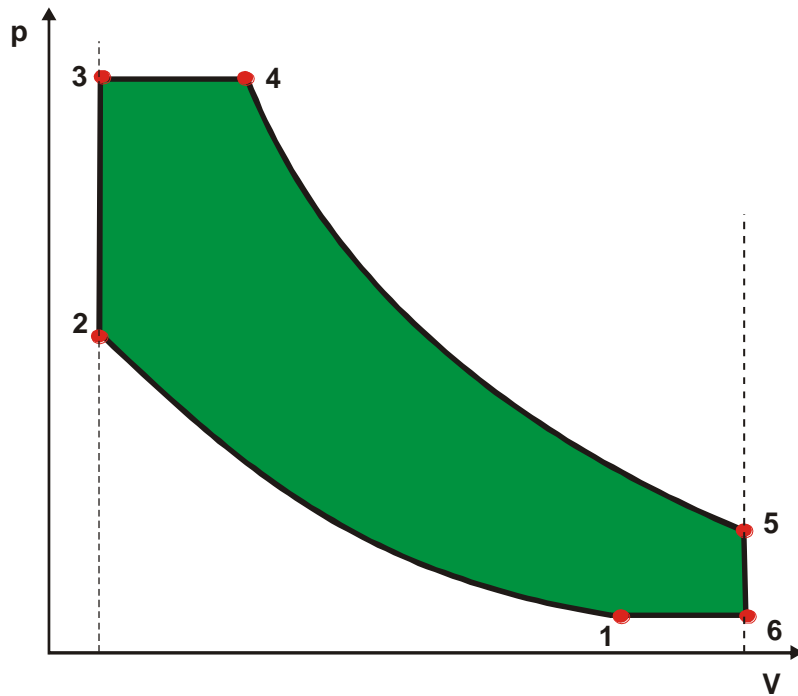


MAKSYMALNA TEMPERATURA OBIEGU

$$T_4 = T_1 \varepsilon^{k-1} \lambda_p \rho$$

$$\rho = \frac{q_p}{c_p T_3} + 1 = \frac{q_p}{c_p T_a \varepsilon^{k-1} \lambda_p} + 1$$

Parametry termodynamiczne obiegu porównawczego



ciśnienie	objętość	temperatura
$p_2 = p_1 \varepsilon^k$	$V_2 = V_1 / \varepsilon$	$T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1}$
$p_3 = p_1 \varepsilon^k \lambda_p$	$V_3 = V_2$	$T_3 = T_1 \varepsilon^{k-1} \lambda_p$
$p_4 = p_3$	$V_4 = V_1 \rho / \varepsilon$	$T_4 = T_1 \varepsilon^{k-1} \lambda_p \rho$
$p_5 = p_1 \varepsilon^k \lambda_p / \rho^k$	$V_5 = V_1 / \sigma'$	$T_5 = T_1 \varepsilon^{k-1} \lambda_p \rho / \sigma'^{k-1}$
	$V_5 = V_1 \sigma \rho / \varepsilon$	
$p_6 = p_1$	$V_6 = V_1 / \sigma'$	$T_6 = T_1 \rho'$

oraz

$$\rho' \varepsilon = \sigma \rho \Leftrightarrow \varepsilon / \sigma = \rho / \rho'$$

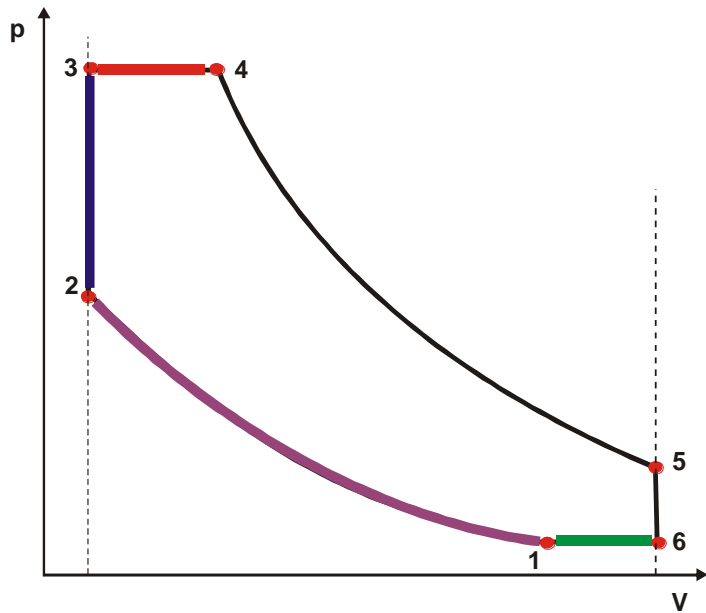
Praca obiegu

$$l_{ob} = q_{dop} - q_{odp} = c_v (T_3 - T_2) + c_p (T_4 - T_3) - [c_v (T_5 - T_6) + c_p (T_6 - T_1)] =$$

$$c_v [(T_3 - T_2) + k(T_4 - T_3)] - c_v [(T_5 - T_6) + k(T_6 - T_1)]$$

Po podstawieniu:

$$l_{ob} = T_1 c_v \left\{ \varepsilon^{k-1} [(\lambda_p - 1) + k\lambda_p (\rho - 1)] - \left[\lambda_p \rho \left(\frac{\varepsilon}{\sigma} \right)^{k-1} + \frac{\sigma \rho}{\varepsilon} (k-1) - k \right] \right\}$$



Dla obiegu Sabathe $\rho' = 1, \varepsilon = \rho\sigma$

$$l_{ob} = T_1 c_v \left\{ \varepsilon^{k-1} [(\lambda_p - 1) + k\lambda_p (\rho - 1)] - [\lambda_p \rho^k - 1] \right\}$$

Dla obiegu Otto $\rho' = 1, \rho = 1, \varepsilon = \sigma$

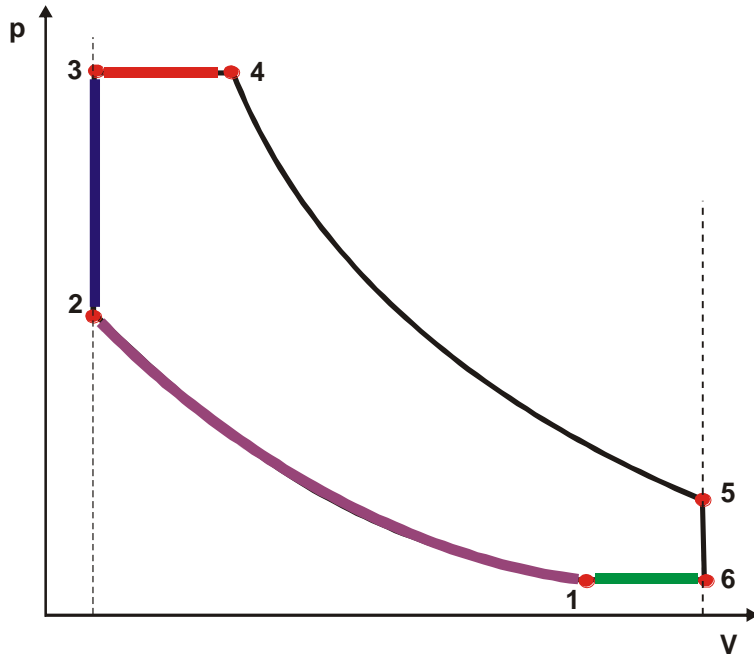
$$l_{ob} = T_1 c_v (\lambda_p - 1) (\varepsilon^{k-1} - 1)$$

Dla obiegu Diesla $\rho' = 1, \lambda_p = 1, \varepsilon = \rho\sigma$

$$l_{ob} = T_1 c_v \left\{ \varepsilon^{k-1} [k(\rho - 1)] - [\rho^k - 1] \right\}$$

Sprawność cieplna obiegu

$$\eta_{ob} = \frac{l_{ob}}{q_{dop}} = 1 - \frac{q_{odp}}{q_{dop}} = 1 - \frac{\lambda_p \rho \left(\frac{\varepsilon}{\sigma} \right)^{k-1} + \frac{\sigma \rho}{\varepsilon} (k-1) - k}{\varepsilon^{k-1} \left[(\lambda_p - 1) + k \lambda_p (\rho - 1) \right]}$$



Dla obiegu Sabathe $\rho' = 1, \varepsilon = \rho\sigma$

$$\eta_{ob} = 1 - \frac{\lambda_p \rho^k - 1}{\varepsilon^{k-1} \left[(\lambda_p - 1) + k \lambda_p (\rho - 1) \right]}$$

Dla obiegu Otto $\rho' = 1, \rho = 1, \varepsilon = \sigma$

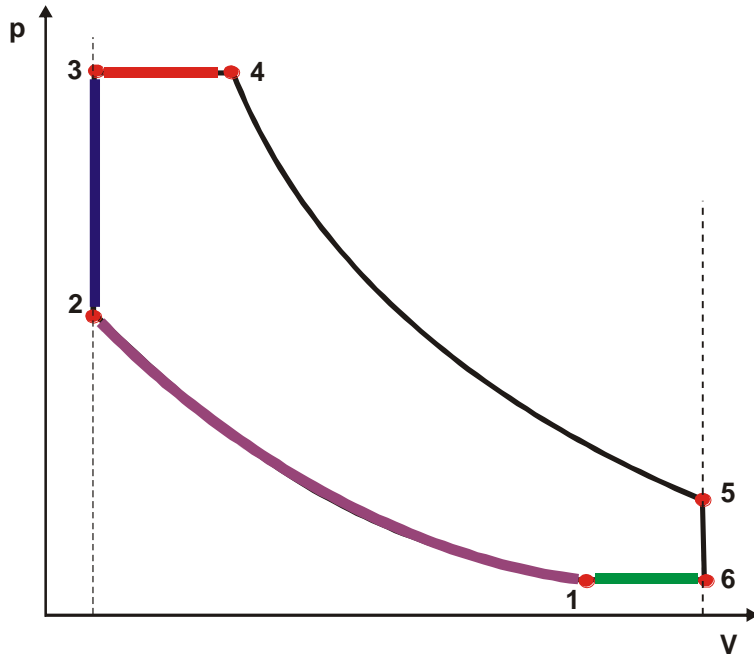
$$\eta_{ob} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

Dla obiegu Diesla $\rho' = 1, \lambda_p = 1, \varepsilon = \rho\sigma$

$$\eta_{ob} = 1 - \frac{\rho^k - 1}{\varepsilon^{k-1} \left[k (\rho - 1) \right]}$$

Średnie ciśnienie obiegu

$$p = l_{ob}/V_s = \frac{p_1}{(k-1)} \frac{\varepsilon^k}{(\varepsilon\rho'-1)} \left[\lambda_p - 1 + k\lambda_p(\rho-1) \right] \eta_{ob}$$



Dla obiegu Sabathe $\rho' = 1, \varepsilon = \rho\sigma$

$$p = \frac{p_1 \varepsilon^k}{(k-1)(\varepsilon-1)} \left[\lambda_p - 1 + k\lambda_p(\rho-1) \right] \eta_{ob}$$

Dla obiegu Otto $\rho' = 1, \rho = 1, \varepsilon = \sigma$

$$p = \frac{p_1 \varepsilon^k}{(k-1)(\varepsilon-1)} (\lambda_p - 1) \eta_{ob}$$

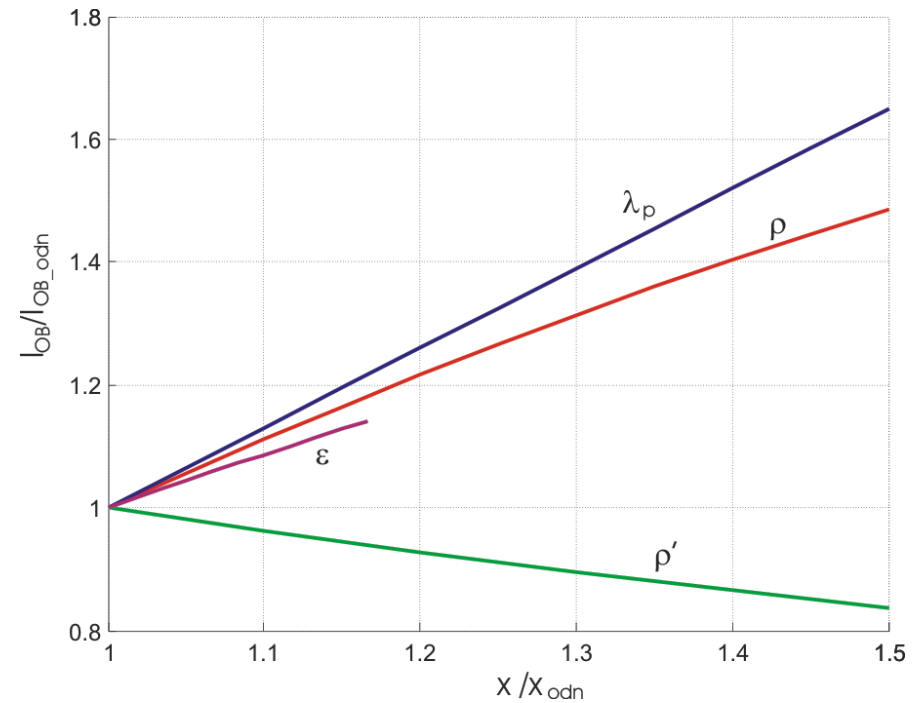
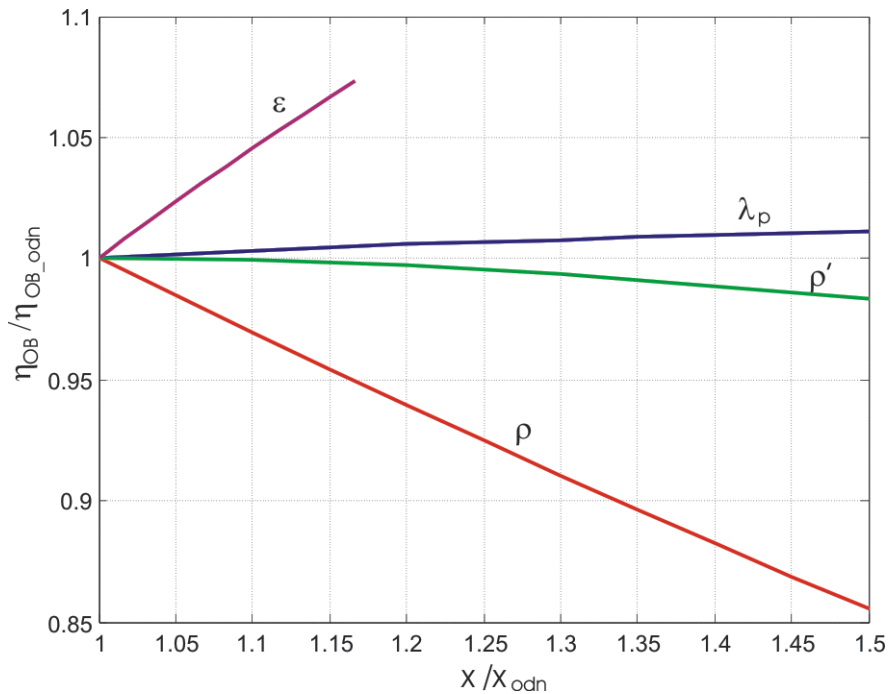
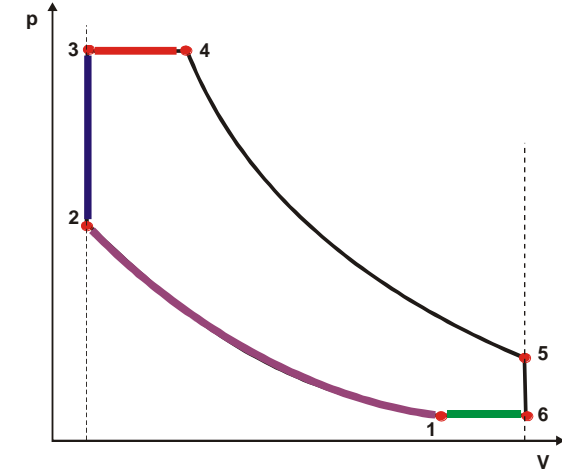
Dla obiegu Diesla $\rho' = 1, \lambda_p = 1, \varepsilon = \rho\sigma$

$$p = \frac{p_1 \varepsilon^k}{(k-1)(\varepsilon-1)} k(\rho-1) \eta_{ob}$$

Wpływ wybranych parametrów na parametry obiegu

Parametry wyjściowe przyjęte do analizy

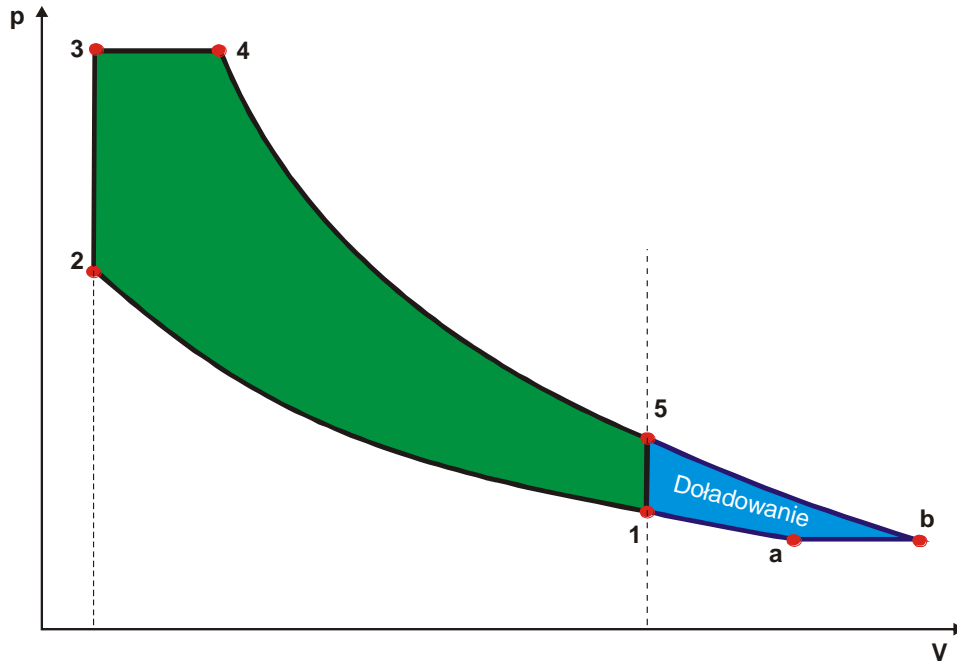
$$\varepsilon = 6, \lambda_p = 2, \rho = 2, \rho' = 1$$



Podsumowanie analizy obiegu silnika porównawczego

- Najkorzystniej pracę obiegu silnika można podnosić poprzez zwiększanie ilości ciepła dostarczonego w procesie izochorycznym a następnie w procesie izobarycznym
- Na podnoszenie sprawności cieplnej silnika (zmniejszanie zużycia paliwa) wpływa podnoszenie stopnia sprężania w silniku
- Stosunkowo niekorzystny wpływ na sprawność cieplną obiegu ma zwiększanie pracy obiegu poprzez izobaryczne doprowadzanie ciepła

Obieg teoretyczny silnika doładowanego



Stopień sprężania w sprężarce:

$$\varepsilon_{spr} = p_1 / p_a$$

Całkowity stopień sprężania:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{spr} \varepsilon$$

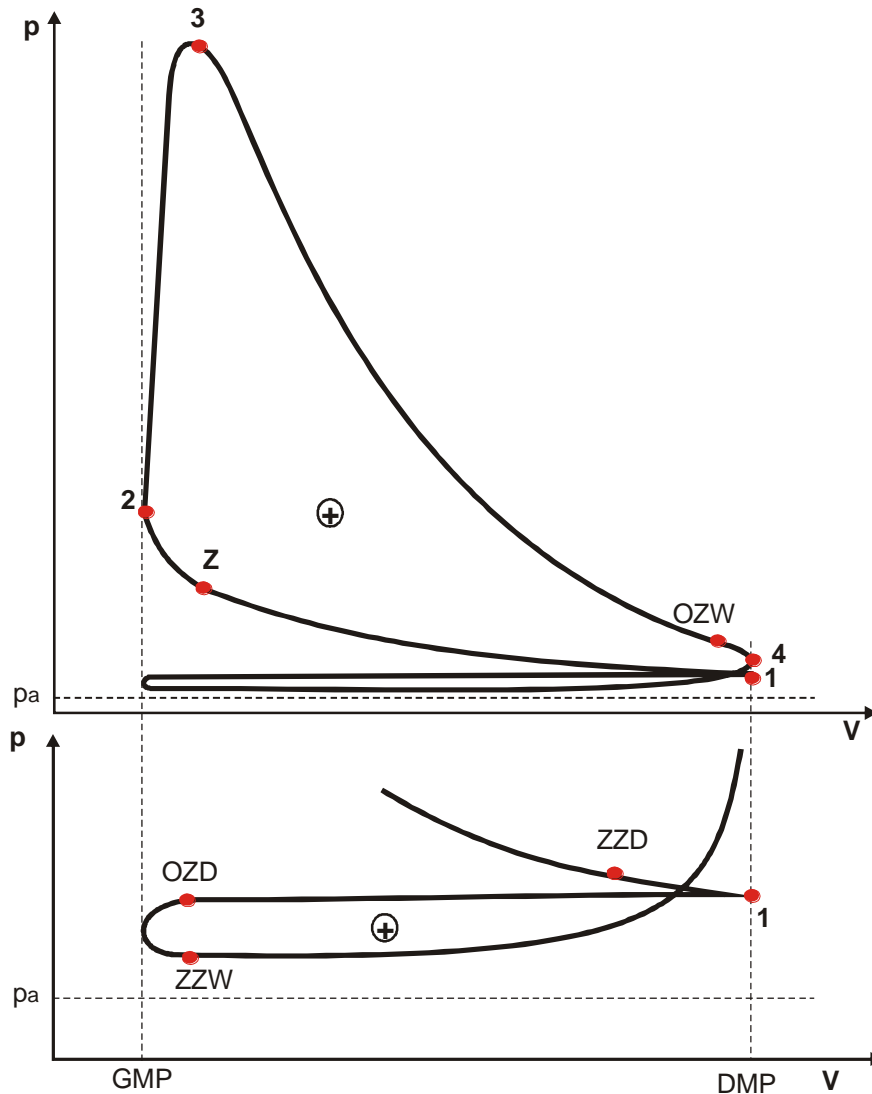
Zastosowanie doładowania zwiększa ciśnienie maksymalne w obiegu a także podnosi temperatury obiegu. W odniesieniu do silnika bez doładowania zwiększa sprawność obiegu poprzez zwiększenie całkowitego stopnia sprężania

$$\eta_{ob} = \frac{l_{ob}}{q_{dop}} = 1 - \frac{q_{odp}}{q_{dop}} = 1 - \frac{kc_v (T_b - T_a)}{c_v (T_3 - T_2) + kc_v (T_4 - T_3)} = 1 - \frac{k(\rho \lambda_p^{1/k} - 1)}{\varepsilon_c^{k-1} \left[(\lambda_p - 1) + k \lambda_p (\rho - 1) \right]}$$

Obieg rzeczywisty silnika czterosuwowego

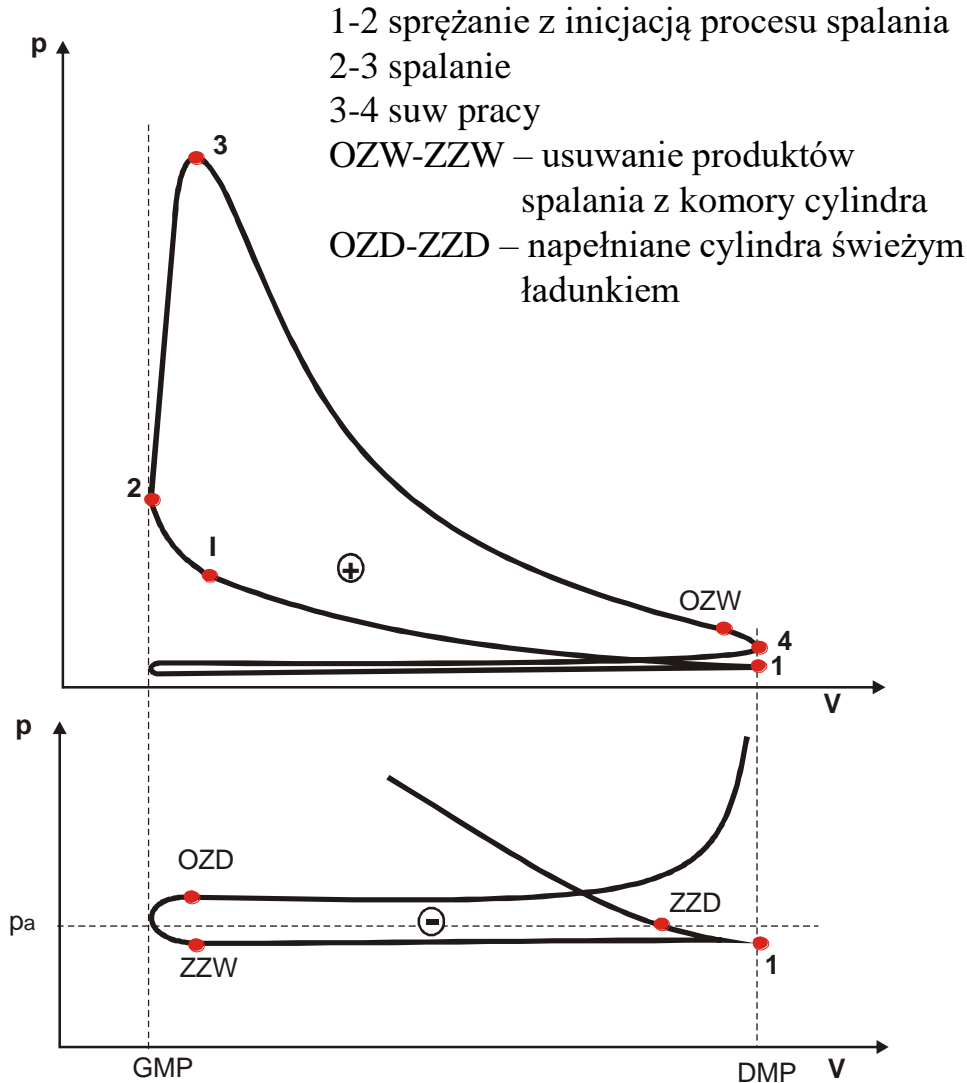
- Procesy zachodzące podczas pracy silnika nie są odwracalne
- Doprowadzenie ciepła odbywa się poprzez spalanie, a nie doprowadzenie ciepła,
- W silniku rzeczywistym uwzględnia się wymianę ciepła między ładunkiem, a ściankami silnika,
- Uwzględnia się straty przepływowe występujące w trakcie napełniania i opróżniania cylindra,
- W cylindrze po zakończeniu wydechu pozostaje pewna ilość spalin, stąd w czasie pracy silnika czynnik roboczy jest mieszkanką świeżego ładunku i pozostałych spalin
- Ilość czynnika roboczego biorąca udział w obiegu jest zmienna

Obieg silnika tłokowego czterosuwowego doładowanego



- 1-2 sprężanie z inicjacją procesu spalania
- 2-3 spalanie
- 3-4 suw pracy
- OZW-ZZW – usuwanie produktów spalania z komory cylindra
- OZD-ZZD – napełnianie cylindra świeżym ładunkiem przy ciśnieniu wyższym od atmosferycznego

Obieg silnika tłokowego czterosuwowego niedoładowanego



Praca indykowana

$$L_i = \int p dV = A_i a_p a_v$$

Ciśnienie indykowane

$$p_i = \frac{\int p dV}{V_s} = \frac{L_i}{V_s}$$

Moc indykowana

$$P_i = \frac{L_i n}{2} \quad n[\text{obr} / \text{s}]$$

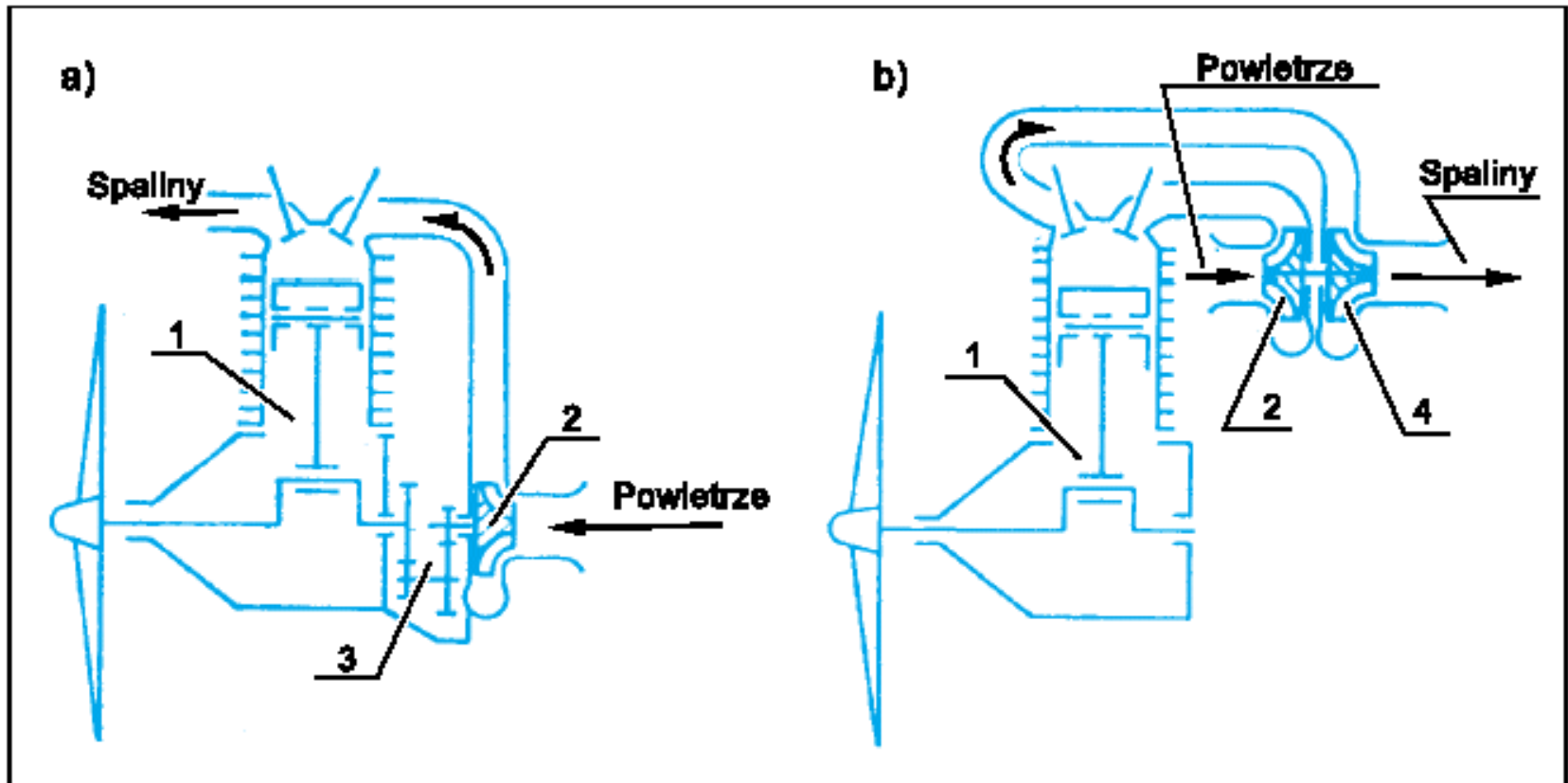
Moc efektywna

$$P = P_i - P_{str}$$

Moment obrotowy

$$M_o = P / \omega$$

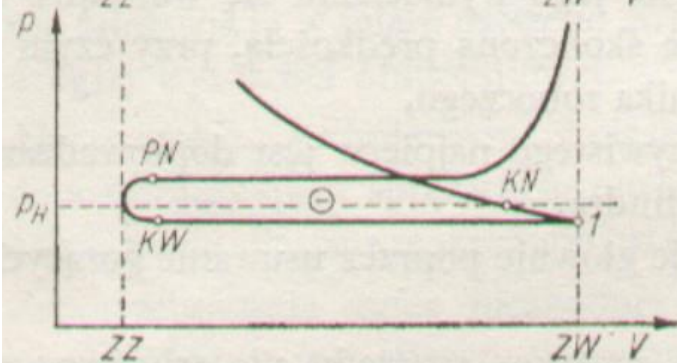
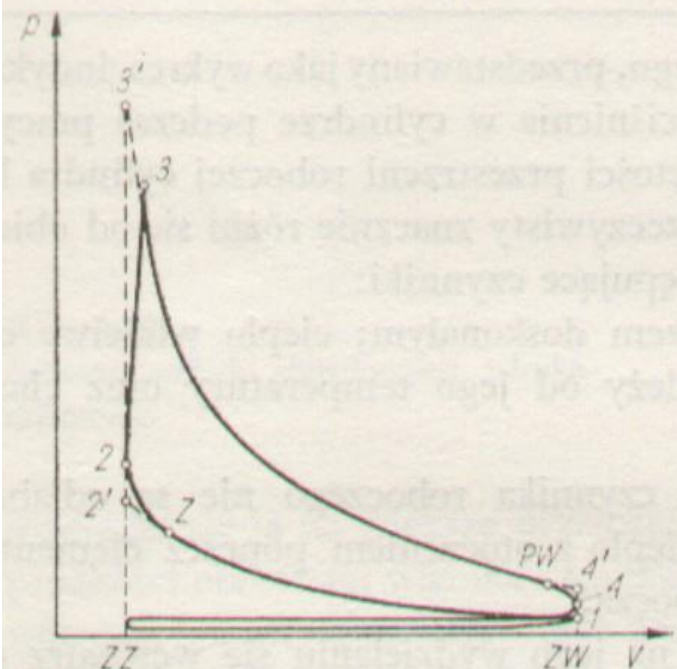
Metody doładowania silnika



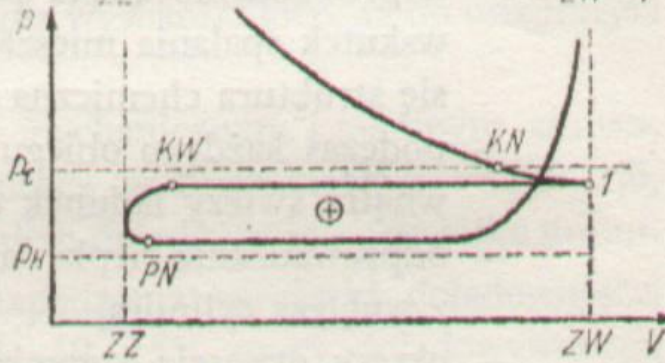
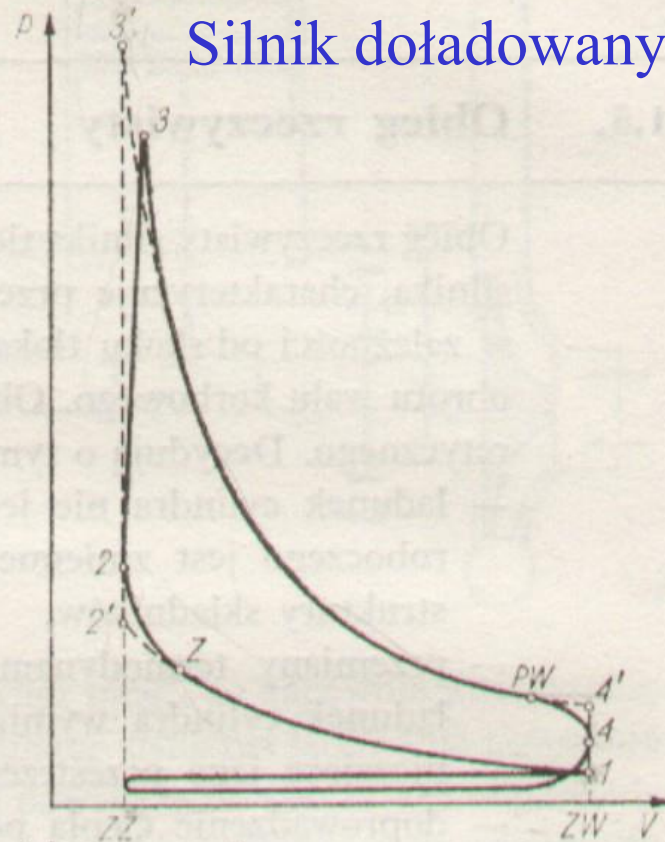
Sposoby doładowania lotniczych silników tłokowych: a – doładowanie mechaniczne, b – turbodoładowanie, 1 – silnik, 2 – sprężarka, 3 – przekładnia, 4 – turbina pracująca na odprowadzanych spalinach silnika, napędzająca sprężarkę

Porównanie wykresów obiegu silnika

a Silnik bez doładowania

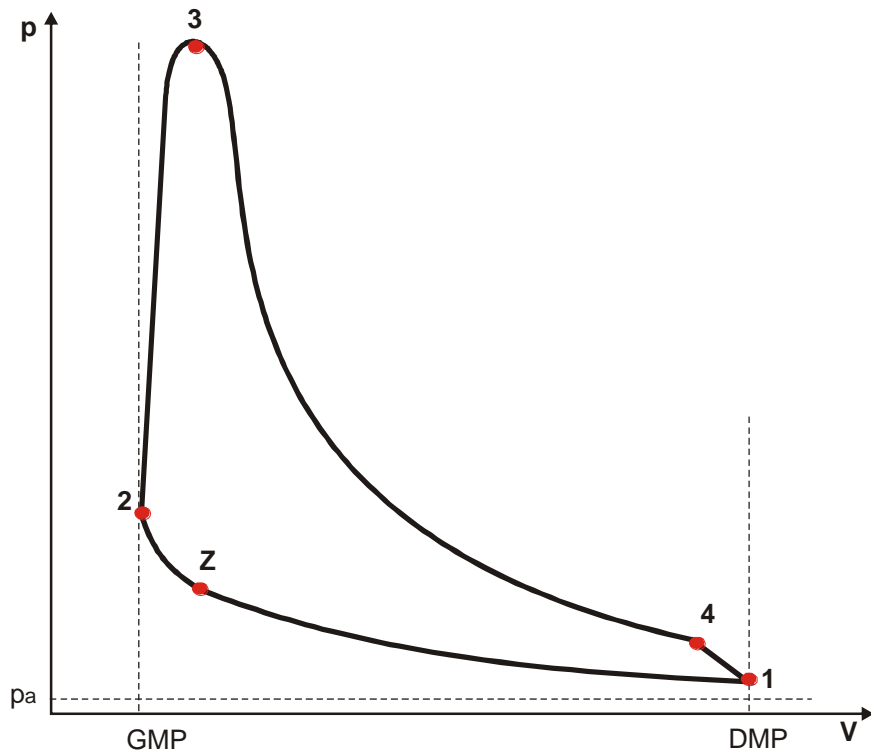


Silnik doładowany



Obieg silnika dwusuwowego

- 1-2 sprężanie z inicjacją procesu spalania
- 2-3 spalanie
- 3-4 suw pracy
- 4-1 przepłukiwanie cylindra



Praca indykowana

$$L_i = \int p dV = A_i a_p a_v$$

Ciśnienie indykowane

$$p_i = \frac{\int p dV}{V_s} = \frac{L_i}{V_s}$$

Moc indykowana

$$P_i = L_i n \quad n[\text{obr} / \text{s}]$$

Moc efektywna

$$P = P_i - P_{str}$$

Moment obrotowy

$$M_o = P / \omega$$

Zużycie paliwa

ZUŻYCIE PALIWA NA JEDEN CYKL PRACY SILNIKA

$$m_{pal} = Q_{dop} / \eta_{spal} W_u$$

W_u - wartość opałowa paliwa

η_{spal} - sprawność cieplna procesu spalania

SEKUNDOWE ZUŻYCIE PALIWA

$$\dot{m}_{pal} = m_{pal} n \quad \text{lub} \quad \dot{m}_{pal} = m_{pal} n/2$$

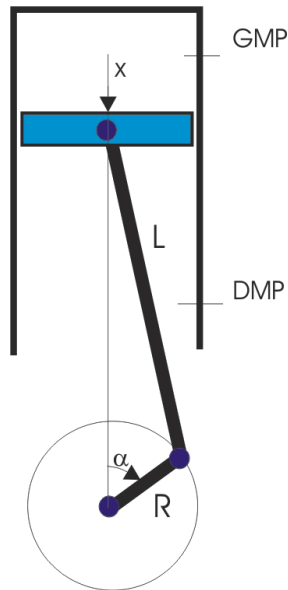
JEDNOSTKOWE ZUŻYCIE PALIWA

$$b_j = \dot{m}_{pal} / P$$

SILNIK TŁOKOWY

Analiza kinematyki układu korbowego

relacja pomiędzy objętością a kątem obrotu wału korbowego



$$x = R + L - R \cos \alpha - \sqrt{L^2 - (R \sin \alpha)^2}$$

Po wyłączeniu R i oznaczeniu przez $\lambda = \frac{R}{L}$

$$x = R \left[1 + \lambda - \cos \alpha - \frac{1}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda \sin \alpha)^2} \right]$$

Z dwumianu Newtona po odrzuceniu wyrazów o mniejszym znaczeniu

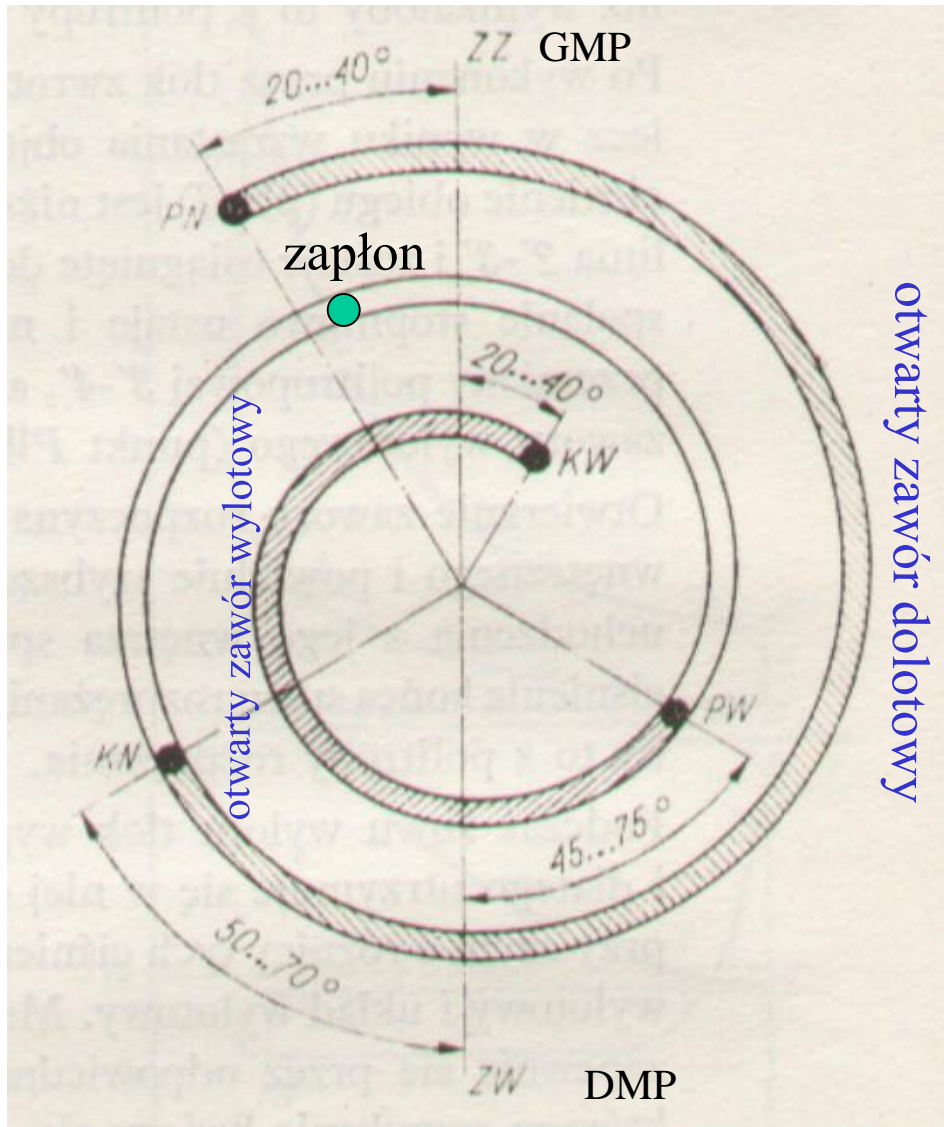
$$\sqrt{1 - (\lambda \sin \alpha)^2} \approx 1 - \frac{\lambda^2 \sin^2 \alpha}{2} \quad \text{oraz} \quad \sin^2 \alpha = \frac{1 - \cos 2\alpha}{2}$$

$$x = R \left[1 - \cos \alpha - \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\alpha) \right]$$

$$V = V_2 + \frac{V_s}{2R} x = V_2 + \frac{V_s}{2} \left[1 - \cos \alpha - \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\alpha) \right]$$

Gdzie: $V_2 = V_{GMP}$

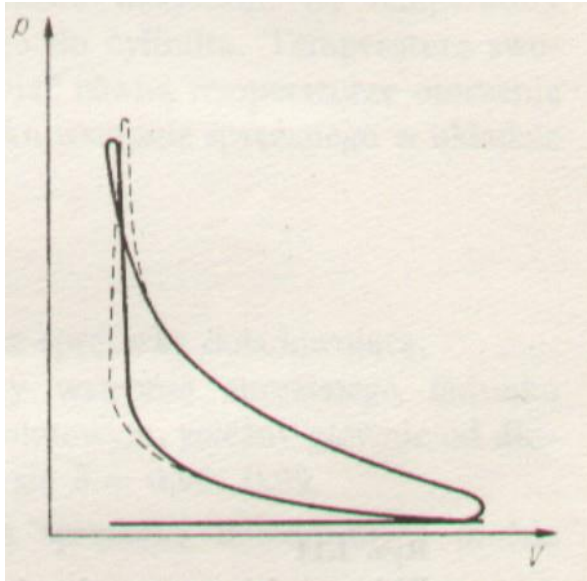
Fazy pracy rozrządu silnika czterowuwowego



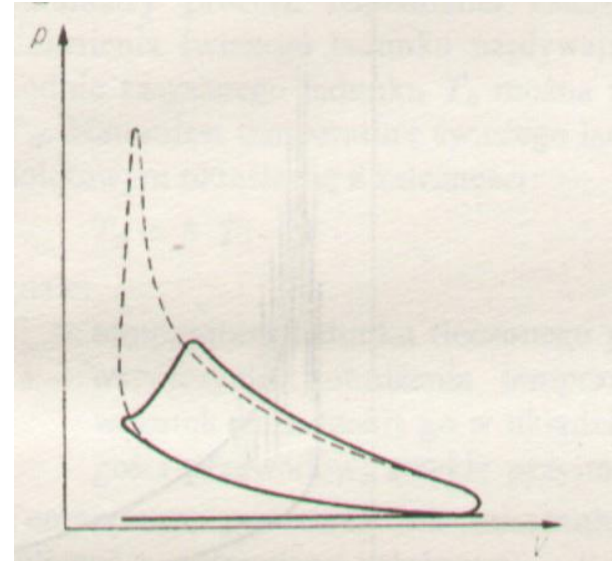
Otwarcie zaworów dolotowego i wylotowego odbywa się nie bezpośrednio w GMP lub DMP, ale nieco wcześniej (otwarcie) i później (zamknięcie), aby zwiększyć efektywność wymiany ładunku uwzględniając prędkość rychy zaworów oraz bezwładność gazów w cylindrze

Zapłon mieszanki także ma miejsce przed GMP w celu efektywnego przeprowadzenia procesu spalania, aby największy przyrost ciśnienia w cylindrze nastąpił po osiągnięciu przez tłok GMP

Źle dobrany zapłon silnika

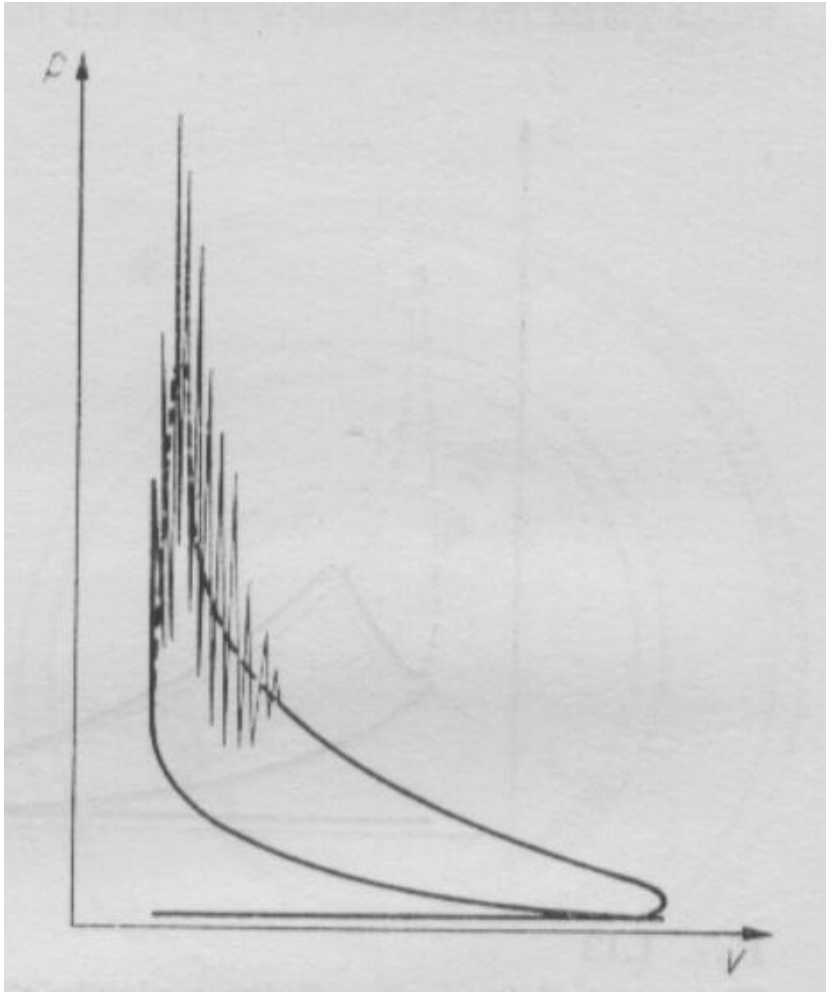


zapłon zbyt wczesny – powoduje przyrost ciśnienia jeszcze przed osiągnięciem GMP, co stawia dodatkowy opór dla poruszającego się tłoka. Zwiększa obciążenia mechaniczne układu korbowego, co niekorzystnie wpływa na żywotność silnika, obniża także moc silnika



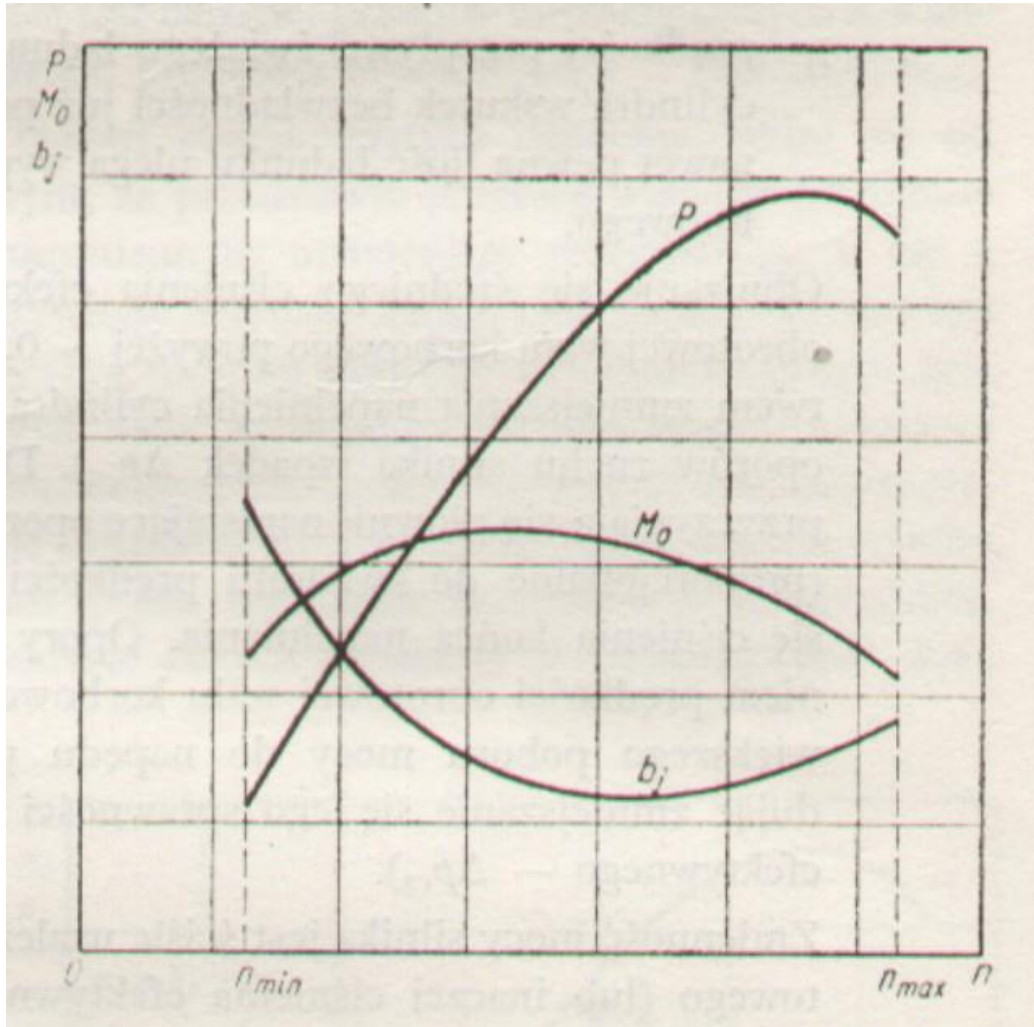
zapłon opóźniony – powoduje wzrost obciążeń cieplnych silnika i ograniczenie mocy silnika.

Spalanie stukowe



Lokalnie w silniku dochodzi do samozapłonu mieszanki, co powoduje lokalny impulsowy wzrost ciśnienia i temperatury. Proces ten jest niekontrolowany i niepożądany - występuje gdy paliwo ma zbyt małą liczbę oktanową, a stopień sprężania jest zbyt duży – problem dotyczy silników benzynowych gaźnikowych lub z wtryskiem pośrednim do kolektora dolotowego

Charakterystyka zewnętrzna silnika



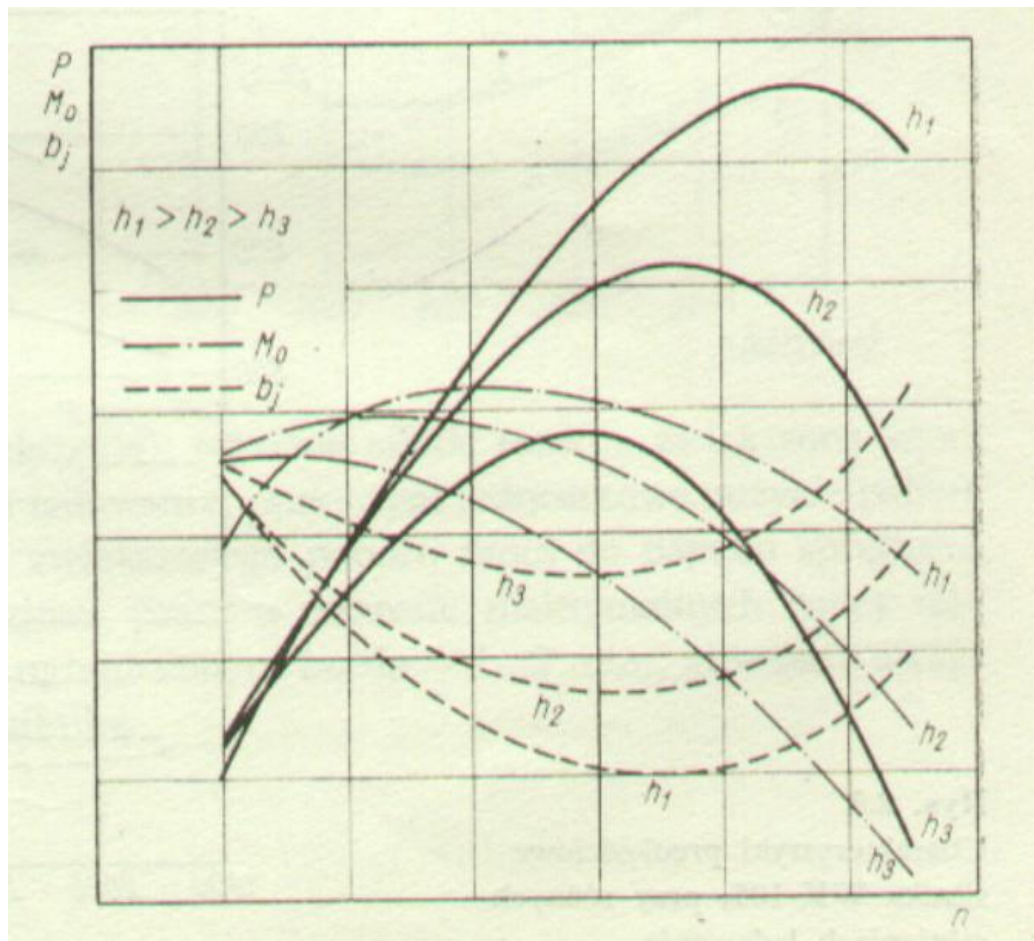
P – moc silnika

M_0 – moment obrotowy silnika

b_j – jednostkowe zużycie paliwa

Charakterystyka jest wykonywana dla pełnego otwarcia przepustnicy

Charakterystyka dławiona silnika



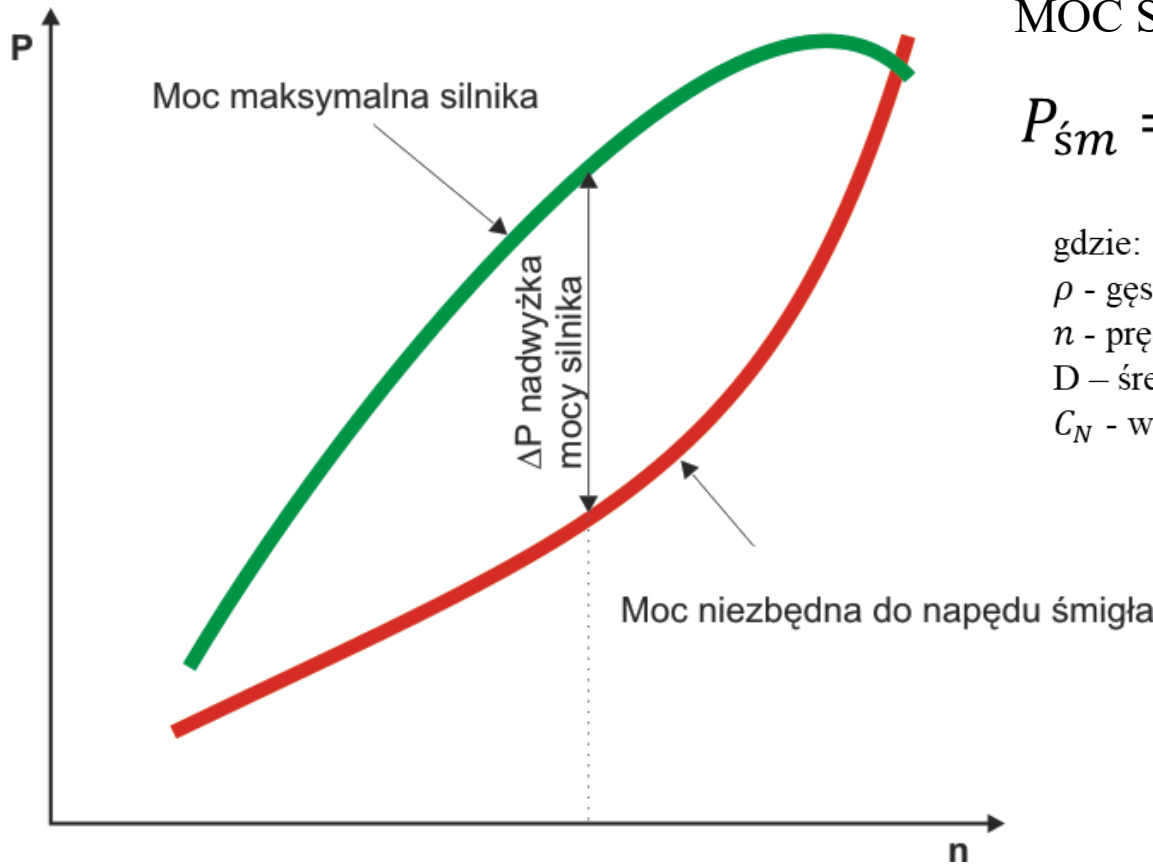
P – moc silnika

M_o – moment obrotowy silnika

b_j – jednostkowe zużycie paliwa

h – kąt otwarcia przepustnicy

Współpraca silnik śmigło



MOC ŚMIGŁA

$$P_{\acute{s}m} = \rho * n^3 * D^5 * C_N$$

gdzie:

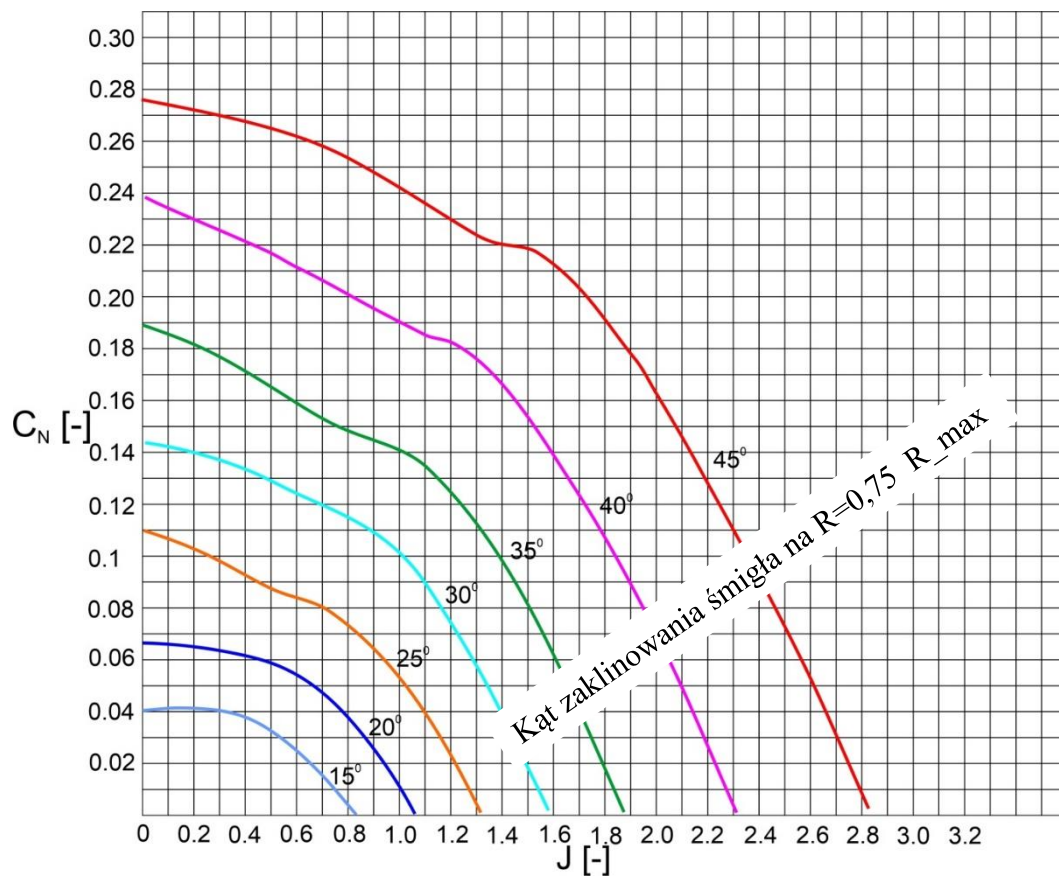
ρ - gęstość powietrza

n - prędkość śmigła 1/s

D - średnica śmigła

C_N - wsłczynnik mocy śmigła

Współczynnik mocy śmigła



Charakterystyka profilu Clark-Y

Posuw śmigła

$$J = \frac{V}{n \cdot D}$$

gdzie:

V – prędkość lotu [m/s]

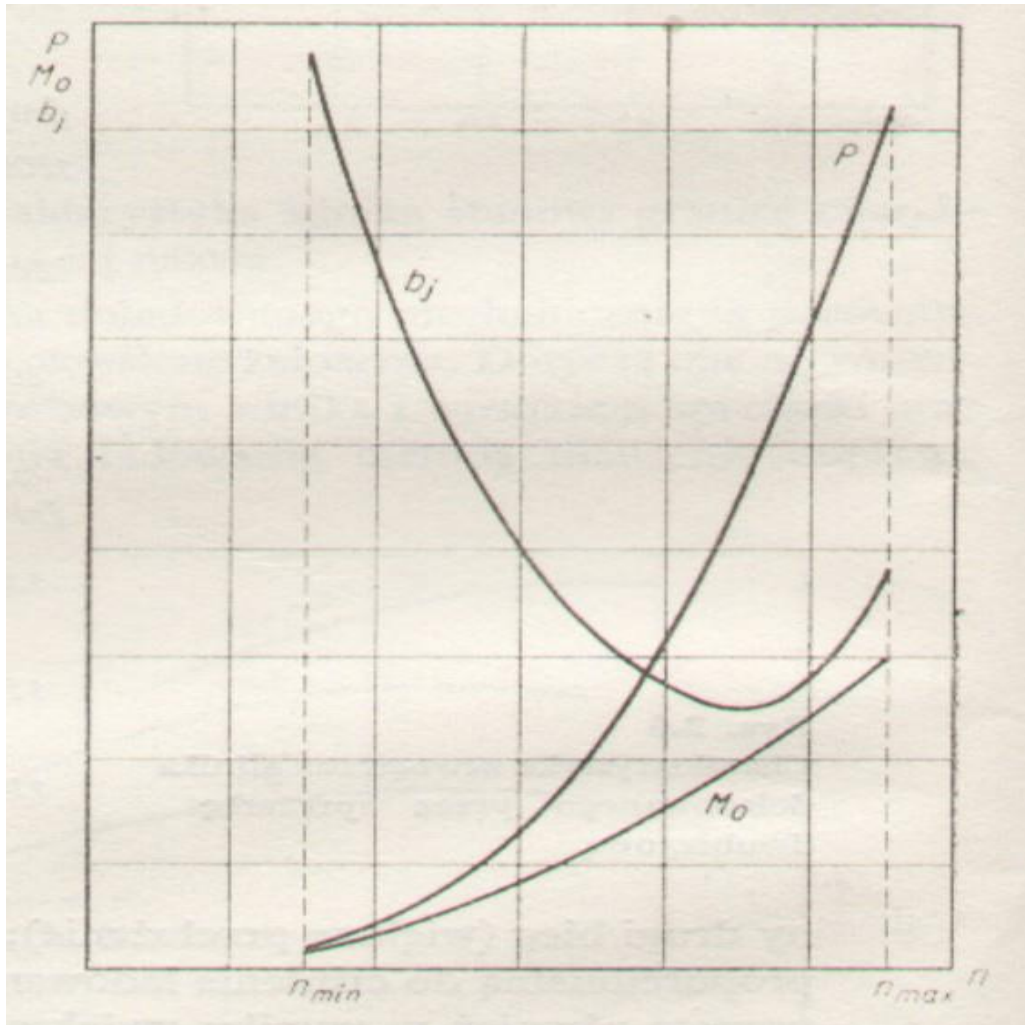
n – obroty śmigła [1/s]

D – poszukiwana średnica śmigła [m].

Zwiększając średnicę śmigła oraz prędkość obrotową zwiększa się posuw śmigła, a przez to współczynnik mocy śmigła

Drugim parametrem, przez który można wpływać na współczynnik mocy jest kąt nastawienia śmigła

Charakterystyka śmigłowa silnika dla śmigła nieprzestawialnego



Moment obrotowy

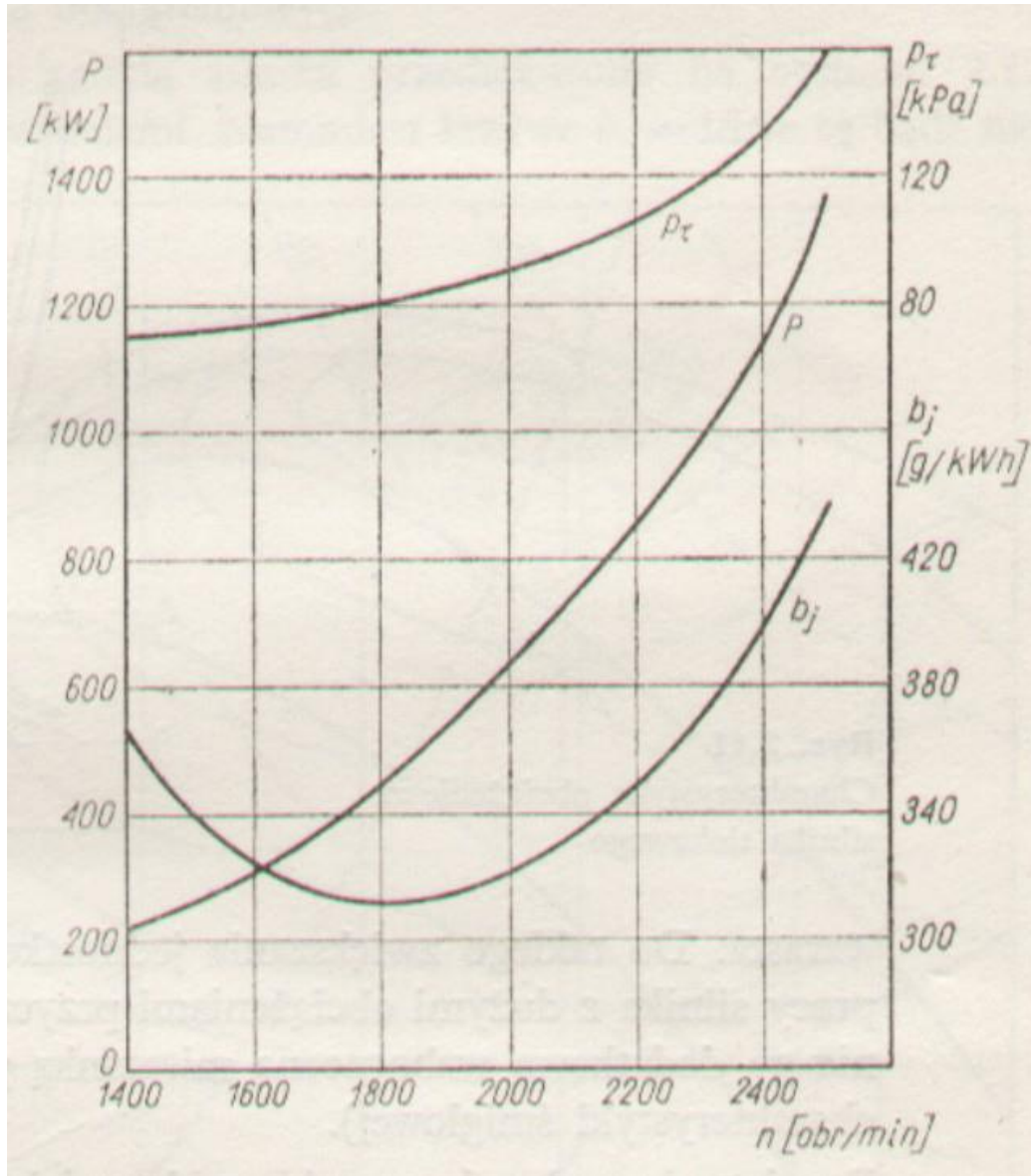
$$M_o = C_1 n^2$$

Moc

$$P = C_2 n^3$$

C_1, C_2 - stałe zależne od śmigła i kątów ustawienia łopat

Charakterystyka silnika Asz 62



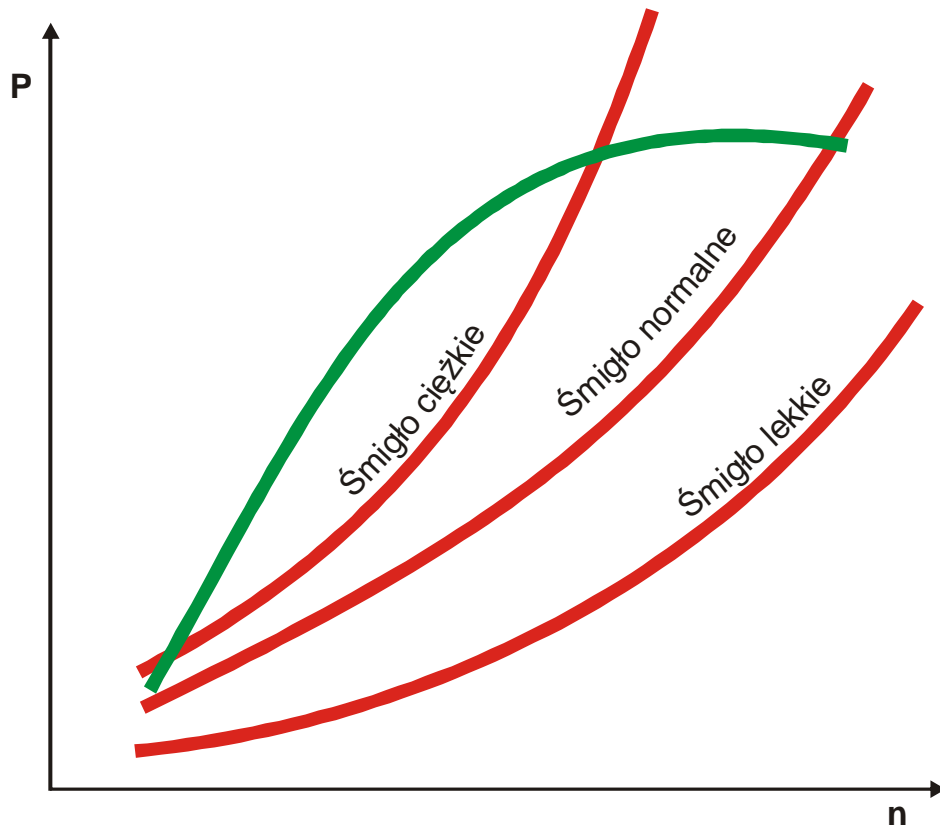
gdzie:

p_τ - ciśnienie ładowania powietrza

P - moc silnika

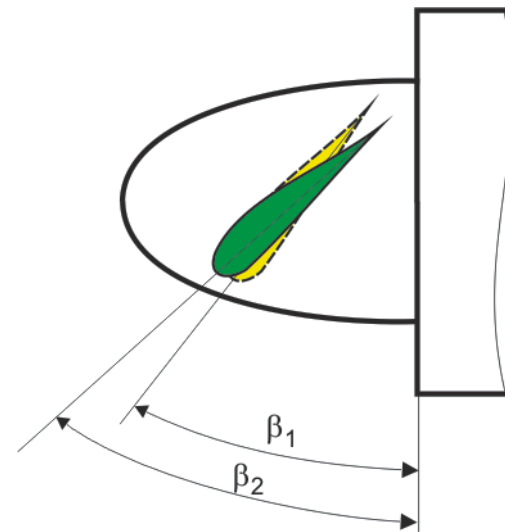
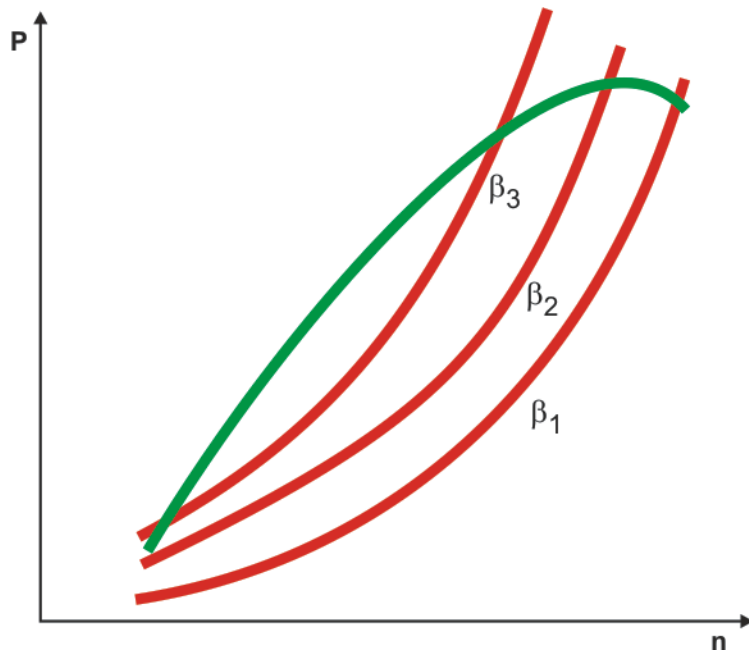
b_j - jednostkowe zużycie paliwa

Dobór śmigła do silnika



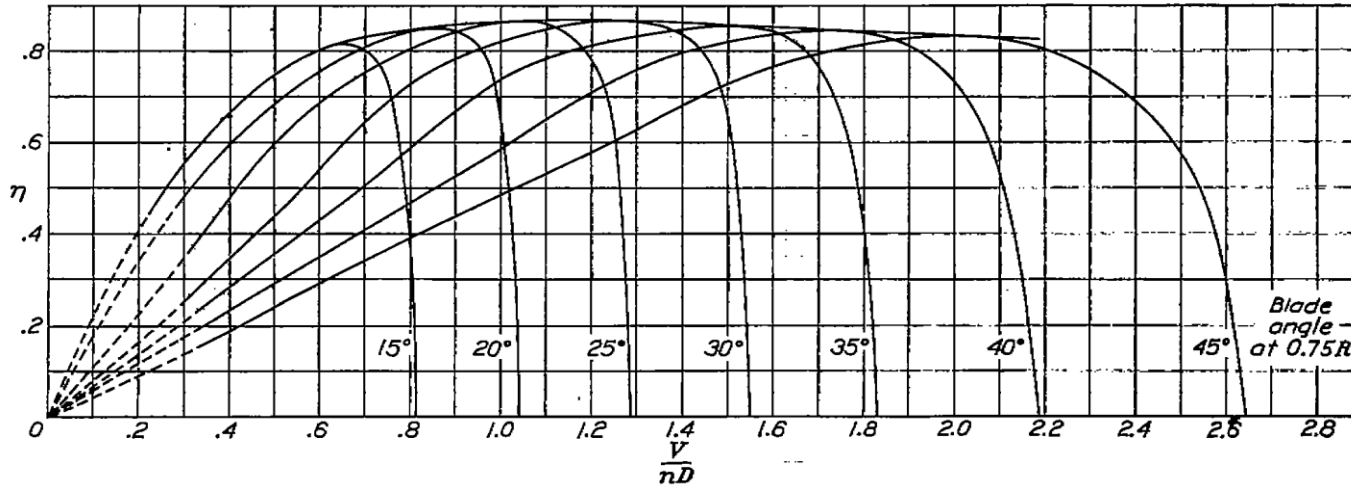
Odpowiedni dobór śmigła powinien umożliwić wykorzystanie pełnej charakterystyki mocy i prędkości obrotowej silnika

Współpraca śmigła przestawianego z silnikiem



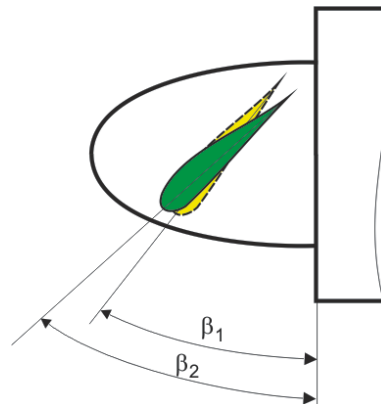
β – kąt nastawienia śmigła

Wpływ prędkości lotu na sprawność śmigła



Ciąg śmigła

$$K = \eta_{sm} \frac{P}{V_H}$$



Zmiana kąta nastawienia śmigła dla zmieniającej się prędkości lotu pozwala efektywniej wykorzystać jego właściwości napędowe

Charakterystyka prędkościowa silnika

W silnikach tłokowych przyrost prędkości lotu nieznacznie wpływa na moc silnika niedoładowanego powodując jej wzrost (dla $V=400$ km/h zwiększenie mocy wynosi ok. 6%), natomiast nie powoduje zmian mocy silnika doładowanego o stałym ciśnieniu ładowania w danym zakresie prędkości. Jednostkowe zużycie paliwa pozostaje przy tym na praktycznie stałym poziomie.

Natomiast ciąg wytwarzany przez śmigło istotnie zależy od prędkości zgodnie z zależnością:

$$K = \eta_{sm} \frac{P}{V_H}$$

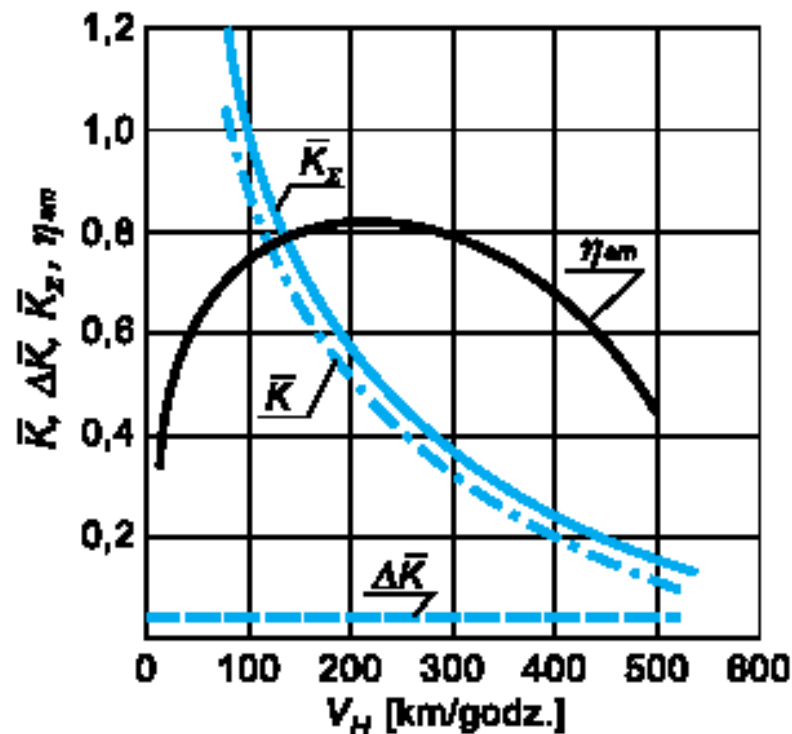
Całkowity ciąg zespołu napędowego wyraża się zależnością:

$$K_{\Sigma} = K + \Delta K$$

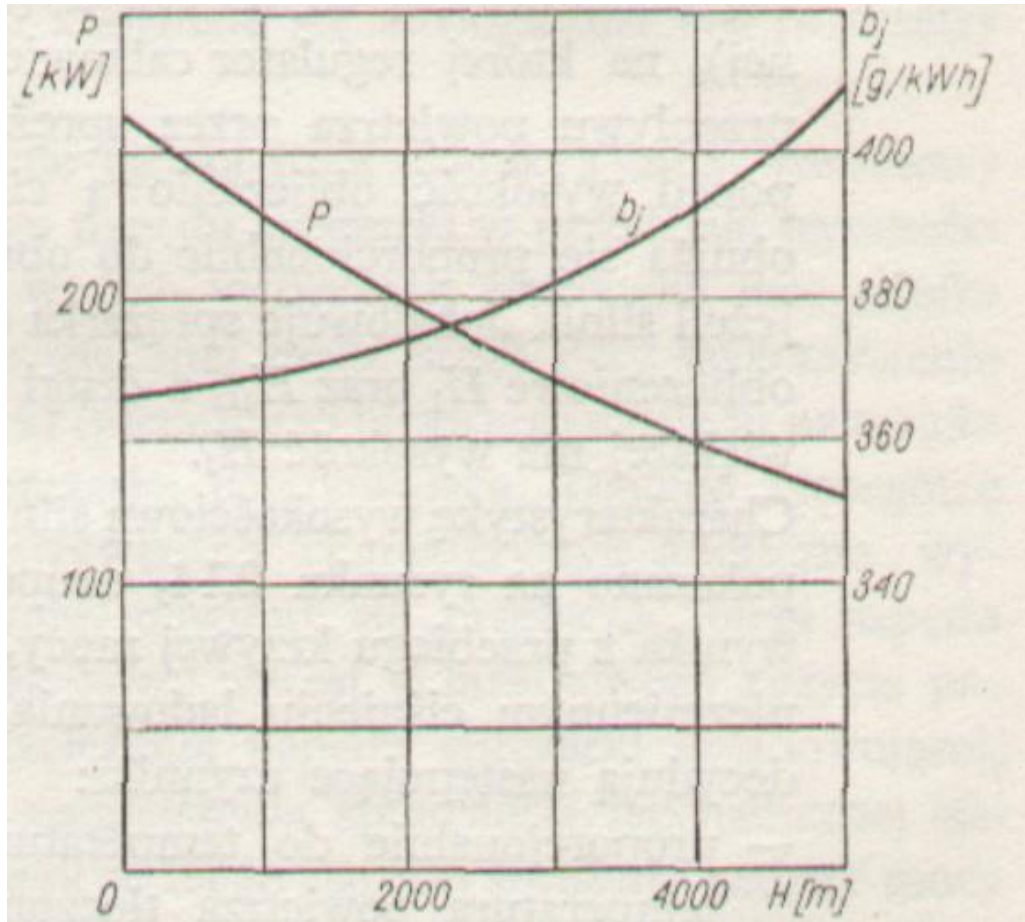
gdzie:

$$\text{ciąg dodatkowy: } \Delta K = \dot{m}_{spal} V_{spal}$$

Dla $V_H \cong 500$ km/h ciąg dodatkowy stanowi istotny udział w ciągu całkowitym zespołu napędowego w granicach 15..20% ciągu całkowitego silnika



Charakterystyka wysokościowa silnika niedoładowanego

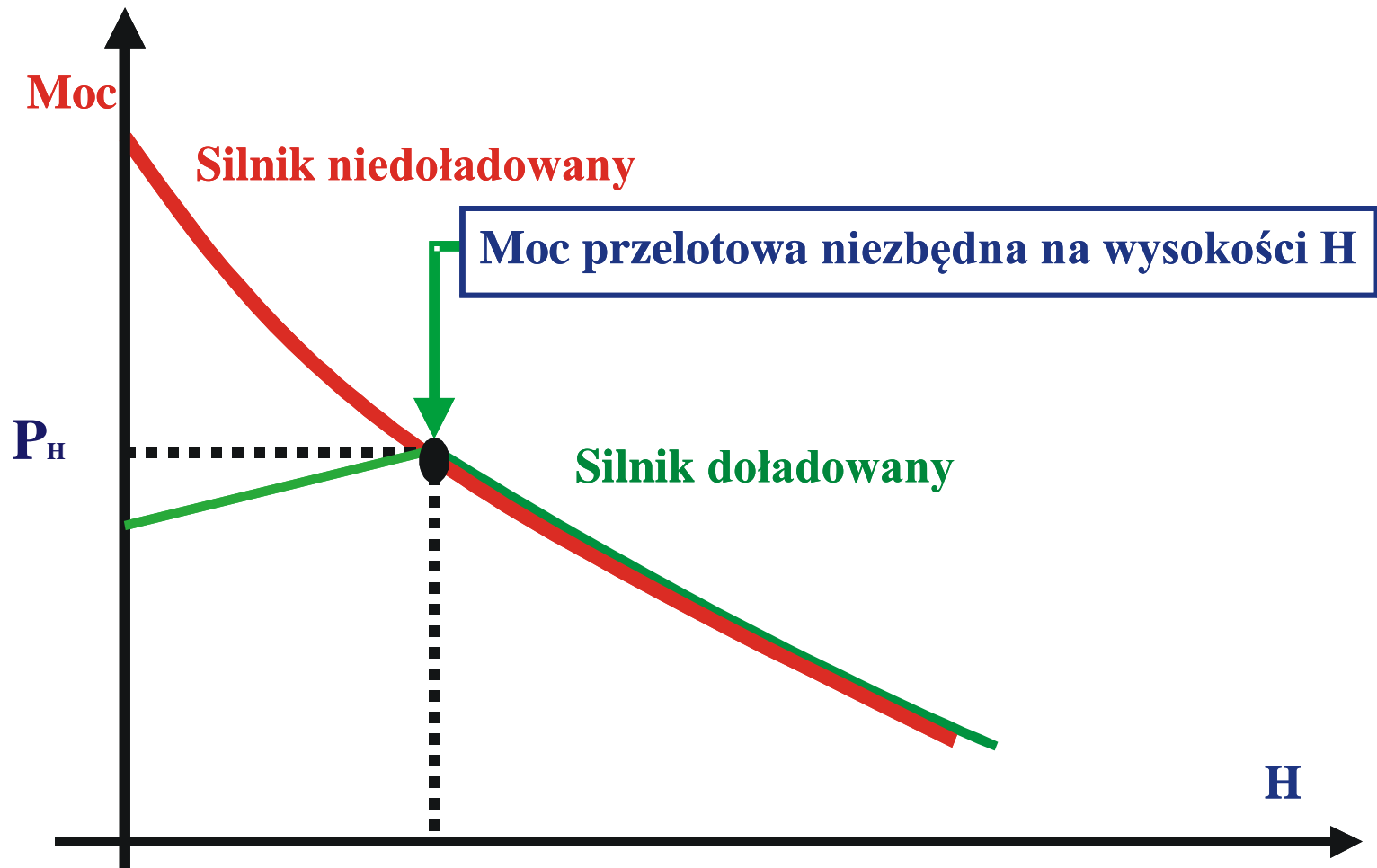


Przeliczanie parametrów pracy silnika na wysokości

$$P_H = P_0 \left(1,11 \frac{P_H}{P_0} \sqrt{\frac{T_0}{T_H}} - 0,11 \right)$$

$$b_{jH} = \frac{b_{j0}}{1,11 - 0,11 \frac{P_0}{P_H} \sqrt{\frac{T_H}{T_0}}}$$

Charakterystyka wysokościowa silnika doładowanego



Dziękuję za uwagę