

8. OBIEGI TEORETYCZNE SILNIKÓW SPALINOWYCH

Obiegi teoretyczne składające się z przemian gazów doskonałych, są stosowane w technice jako wzorcowe dla rzeczywistych przebiegów ciepłno-energetycznych. Objaśniają teoretycznie zastosowany sposób zamiany ciepła na pracę. Celem realizacji obiegu jest uzyskanie pracy, która może być przekazana na zewnątrz układu, w którym obieg jest realizowany i wykorzystana np. do napędu układów mechanicznych. Realizacja obiegu wymaga doprowadzenia i odprowadzenia ciepła.

Teoretyczne obiegi silnikowe rozważa się tak, jakby były realizowane w cylindrze zamkniętym ruchomym tłokiem, w warunkach quasistatycznych. Ciepło jest doprowadzane do czynnika znajdującego się wewnątrz cylindra przez ścianki cylindra i odprowadzane na zewnątrz również przez ścianki cylindra. Podczas realizacji obiegu gaz podlega sprężaniu, czemu towarzyszy zmniejszenie objętości gazu, oraz rozprężaniu, czemu towarzyszy zwiększenie objętości gazu. Proces sprężania jest realizowany w wyniku przyłożenia do tłoka z zewnątrz siły potrzebnej do przesunięcia tłoka w kierunku zmniejszającej się objętości gazu, czyli *doprowadzenia pracy z zewnątrz* L_z . Proces rozprężania jest realizowany w wyniku nacisku gazu w cylindrze na tłok, czego efektem jest powstanie siły przesuwej tłok w kierunku zwiększenia objętości i *wykonanie pracy przez gaz* L_w . Różnica tych prac jest równa pracy obiegu, tj. pracy przekazywanej na zewnątrz układu:

$$L_{ob} = L_w - |L_z|$$

W teorii silników spalinowych są rozważane teoretyczne obiegi Otto, Diesla i Sabathego. W rozważaniach termodynamicznych obiegi te są porównywane z obiegiem Carnota, który w danym zakresie temperatur charakteryzuje się największą sprawnością.

Dla wszystkich teoretycznych obiegów silnikowych jest charakterystyczne, że:

- proces sprężania odbywa się izentropowo,
- proces rozprężania odbywa się izentropowo,
- odprowadzenie ciepła z obiegu odbywa się izochorycznie.

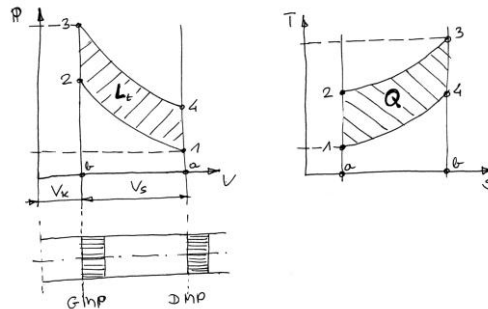
Różny jest sposób doprowadzenia ciepła. I tak:

- w obiegu Otto ciepło jest doprowadzane izochorycznie,
- w obiegu Diesla ciepło jest doprowadzane izobarycznie,
- w obiegu Sabathego ciepło jest doprowadzane w dwóch częściach – jedna część ciepła jest doprowadzana izochorycznie a druga izobarycznie.

W obiegu Carnota ciepło jest doprowadzane i odprowadzane izotermicznie, a proces sprężania i rozprężania odbywa się izentropowo, tak samo jak w teoretycznych obiegach silnikowych.

8.1. Obieg Otta

Ten teoretyczny obieg składa się z dwóch izochor i z dwóch izentrop. Po izentropowym sprężaniu 1-2 następuje izochoryczne 2-3 doprowadzenie ciepła a następnie izentropowe rozprężanie 3-4. Obieg zamyka izochoryczne 4-1 odprowadzenie ciepła.



Rys. 8.1. Obieg Otta

V_s – objętość skokowa, V_k – objętość komory spalania, GMP – górne martwe położenie tłoka, DMP – dolne martwe położenie tłoka

Obieg Otta charakteryzuje:

- stopień wzrostu ciśnienia:

$$\alpha = \frac{p_3}{p_2}$$

- stopień sprężania:

$$\varepsilon_s = \frac{V_1}{V_2}$$

- stopień rozprężania:

$$\varepsilon_r = \frac{V_4}{V_3}$$

Ponieważ: $V_2 = V_3$, $V_1 = V_4$

to:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_r = \varepsilon$$

Wykorzystanie zapisu izentropy sprężania i rozprężania w następującej postaci:

$$T_1 \cdot V_1^{k-1} = T_2 \cdot V_2^{k-1}$$

$$T_3 \cdot V_3^{k-1} = T_4 \cdot V_4^{k-1}$$

pozwała ujawnić zależności zachodzące pomiędzy temperaturami w charakterystycznych punktach obiegu Otta:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = \varepsilon^{k-1}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{k-1} = \varepsilon^{k-1}$$

Stąd:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = \varepsilon^{k-1} \quad \text{oraz} \quad \frac{T_1}{T_4} = \frac{T_2}{T_3}$$

Ciepło jest doprowadzone do obiegu izochorycznie w przemianie 2-3 (na wykresie T - S przedstawia je pole a -2-3- b):

$$Q_d = M \cdot c_v \cdot (T_3 - T_2)$$

a odprowadzone izochorycznie z obiegu w przemianie 4-1 (na wykresie T - S przedstawia je pole a -1-4- b):

$$Q_o = M \cdot c_v \cdot (T_1 - T_4)$$

Ciepło obiegu (na wykresie T - S przedstawia je pole 1-2-3-4):

$$Q = Q_d - |Q_o|$$

Praca obiegu teoretycznego (na wykresie p - V przedstawia ją pole 1-2-3-4):

$$L_t = L_{A3,4} - |L_{A1,2}|$$

gdzie:

- $L_{A3,4}$ – praca absolutna wykonana przez gaz (oddana na zewnątrz) w przemianie izentropowej 3-4

$$L_{A3,4} = \frac{M \cdot R}{1-k} (T_4 - T_3)$$

- $L_{A1,2}$ – praca absolutna wykonana nad gazem (dostarczona z zewnątrz) w przemianie izentropowej 1-2

$$L_{A1,2} = \frac{M \cdot R}{1-k} (T_2 - T_1)$$

Zgodnie z I Z.T.:

$$L_t = Q = Q_d - |Q_o|$$

Sprawność teoretyczna obiegu Otta:

z definicji sprawności:

$$\eta_t = \frac{L_{ob}}{Q_d} = \frac{Q}{Q_d} = \frac{Q_d - |Q_o|}{Q_d} = 1 - \frac{|Q_o|}{Q_d}$$

podstawiając do powyższej zależności wyrażenia właściwe dla obiegu Otta otrzymuje się:

$$\eta_t = 1 - \frac{M \cdot c_v \cdot (T_4 - T_1)}{M \cdot c_v \cdot (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_4}{T_3} \cdot \frac{1 - \frac{T_1}{T_4}}{1 - \frac{T_2}{T_3}}$$

ponieważ:

$$\frac{T_1}{T_4} = \frac{T_2}{T_3},$$

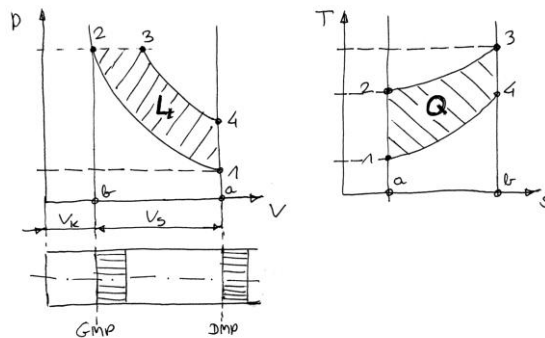
to:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_4}{T_3} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} = 1 - \varepsilon^{1-k}$$

8.2. Obieg Diesla

Jest to obieg, w którym doprowadzenie ciepła odbywa się przy stałym ciśnieniu, a odprowadzenie ciepła przy stałej objętości. Po izentropowym sprężaniu 1-2 następuje izobaryczne 2-3 doprowadzenie ciepła a następnie izentropowe rozprężanie 3-4. Obieg zamyka izochoryczne 4-1 odprowadzenie ciepła.

W tym obiegu sprężanie izentropowe 1-2 trwa cały suw, natomiast część 2-3 suwu roboczego zajmuje izobara doprowadzenia ciepła i na izentropowe rozprężanie pozostaje tylko część 3-4 suwu.



Rys. 8.1. Obieg Diesla

V_s – objętość skokowa, V_k – objętość komory spalania, GMP – górne martwe położenie tłoka, DMP – dolne martwe położenie tłoka

Obieg Diesla charakteryzuje:

- stopień wzrostu objętości (stopień obciążenia):

$$\varphi = \frac{V_3}{V_2}$$

- stopień sprężania:

$$\varepsilon_s = \frac{V_1}{V_2}$$

- stopień rozprężania:

$$\varepsilon_r = \frac{V_4}{V_3}$$

$$\varepsilon_s > \varepsilon_r$$

Relacja pomiędzy stopniem sprężania a stopniem rozprężania:

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_r} = \frac{\frac{V_1}{V_2}}{\frac{V_4}{V_3}} = \frac{V_1}{V_2} \cdot \frac{V_3}{V_4} = \frac{V_3}{V_2} = \varphi$$

$$\varepsilon_s = \varphi \cdot \varepsilon_r$$

Ciepło jest doprowadzone do obiegu w przemianie izobarycznej 2-3 (na wykresie $T-S$ przedstawia je pole $a-1-3-b$):

$$Q_d = M \cdot c_p \cdot (T_3 - T_2)$$

a odprowadzone izochorycznie z obiegu w przemianie 4-1 (na wykresie $T-S$ przedstawia je pole $a-1-4-b$):

$$Q_o = M \cdot c_v \cdot (T_1 - T_4)$$

Ciepło obiegu (na wykresie $T-S$ przedstawia je pole 1-2-3-4):

$$Q = Q_d - |Q_o|$$

Praca obiegu teoretycznego (praca teoretyczna, na wykresie $p-V$ przedstawia ją pole 1-2-3-4):

$$L_t = L_{A2,3} + L_{A3,4} - |L_{A1,2}|$$

gdzie:

- $L_{A2,3}$ – praca absolutna wykonana przez gaz (oddana na zewnątrz) w przemianie izobarycznej 2-3:

$$L_{A2,3} = p_2(V_3 - V_2)$$

- $L_{A3,4}$ – praca absolutna wykonana przez gaz (oddana na zewnątrz) w przemianie izentropowej 3-4:

$$L_{A3,4} = \frac{M \cdot R}{1 - k} (T_4 - T_3)$$

- $L_{A1,2}$ – praca absolutna wykonana nad gazem (dostarczona z zewnątrz) w przemianie izentropowej 1-2:

$$L_{A1,2} = \frac{M \cdot R}{1 - k} (T_2 - T_1)$$

Zgodnie z I Z.T.:

$$L_t = Q = Q_d - |Q_o|$$

Sprawność obiegu teoretycznego Diesla (sprawność teoretyczna) :

$$\eta_t = \frac{L_{ob}}{Q_d} = \frac{Q}{Q_d} = \frac{Q_d - |Q_o|}{Q_d} = 1 - \frac{|Q_o|}{Q_d} = 1 - \frac{M \cdot c_v \cdot (T_4 - T_1)}{M \cdot c_p \cdot (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k \cdot (T_3 - T_1)} = 1 - \frac{1}{k} \cdot \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1} \quad (8.2.1)$$

z równania izentropy sprężania 1-2 wyznacza się T_1/T_2 :

$$T_1 \cdot V_1^{k-1} = T_2 \cdot V_2^{k-1} \Rightarrow \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k-1} = \left(\frac{1}{\varepsilon_s}\right)^{k-1} = \varepsilon_s^{1-k}$$

z równania izobary 2-3 wyznacza się T_3/T_2 :

$$\frac{V_3}{V_2} = \frac{T_3}{T_2} \Rightarrow \frac{T_3}{T_2} = \frac{V_3}{V_2} = \varphi$$

z równania izentropy rozprężania 3-4 wyznacza się temperaturę T_4 :

$$T_3 \cdot V_3^{k-1} = T_4 \cdot V_4^{k-1} \Rightarrow T_4 = T_3 \cdot \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{k-1} = T_3 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_r}\right)^{k-1} = T_3 \cdot \varepsilon_r^{1-k}$$

T_4/T_1 wyznacza się następująco:

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3 \cdot \varepsilon_r^{1-k}}{T_2 \cdot \varepsilon_s^{1-k}} = \varphi \cdot \left(\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_s}\right)^{1-k} = \varphi \cdot \left(\frac{1}{\varphi}\right)^{1-k} = \varphi^k$$

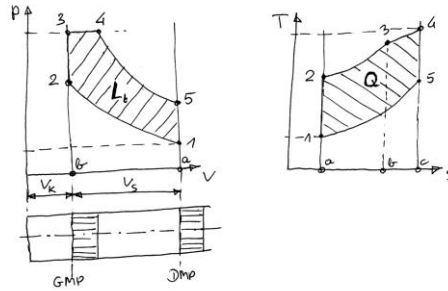
Po uwzględnieniu powyższych zależności w równaniu (8.2.1) otrzymuje się:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{k} \cdot \varepsilon_s^{1-k} \cdot \frac{\varphi^k - 1}{\varphi - 1} = 1 - \frac{\varepsilon_s^{1-k}}{k} \cdot \frac{\varphi^k - 1}{\varphi - 1}$$

Powyższa zależność pozwala stwierdzić, że wraz ze wzrostem stopnia obciążenia obiegu Diesla maleje sprawność teoretyczna obiegu.

8.3. Obieg Sabathego

Jest to obieg, w którym ciepło doprowadza się częściowo przy stałej objętości i częściowo przy stałym ciśnieniu, a odprowadza przy stałej objętości. Po izentropowym sprężaniu 1-2 następuje izochoryczne 2-3 doprowadzenie ciepła, potem izobaryczne 3-4 a następnie izentropowe rozprężanie 4-5. Obieg zamyka izochoryczne 5-1 odprowadzenie ciepła.



Rys. 8.1. Obieg Sabathego

V_s – objętość skokowa, V_k – objętość komory spalania, GMP – górne martwe położenie tłoka, DMP – dolne martwe położenie tłoka

Obieg Sabathego charakteryzuje:

- stopień izochorycznego wzrostu ciśnienia:

$$\alpha = \frac{p_3}{p_2}$$

- stopień wzrostu objętości (stopień obciążenia):

$$\varphi = \frac{V_4}{V_3}$$

- stopień sprężania:

$$\varepsilon_s = \frac{V_1}{V_2}$$

- stopień rozprężania:

$$\varepsilon_r = \frac{V_5}{V_4}$$

$$\varepsilon_s > \varepsilon_r$$

Relacja pomiędzy stopniem sprężania a stopniem rozprężania:

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_r} = \frac{V_2}{V_5} = \frac{V_1}{V_2} \cdot \frac{V_4}{V_5} = \frac{V_4}{V_2} = \frac{V_4}{V_3} = \varphi$$

$$\varepsilon_s = \varphi \cdot \varepsilon_r$$

Ciepło doprowadzone do obiegu (na wykresie $T-S$ przedstawia je pole $a-2-3-4-c$) jest sumą ciepła doprowadzonego izochorycznie w przemianie 2-3 (na wykresie $T-S$ przedstawia je pole $a-2-3-b$) i ciepła doprowadzonego izobarycznie w przemianie 3-4 (na wykresie $T-S$ przedstawia je pole $b-3-4-c$).

$$Q_d = Q_{dv} + Q_{dp}$$

$$Q_{dv} = M \cdot c_v \cdot (T_3 - T_2)$$

$$Q_{dp} = M \cdot c_p \cdot (T_4 - T_3)$$

Ciepło odprowadzone (na wykresie T - S przedstawia je pole a - 1 - 5 - c):

$$Q_o = M \cdot c_v \cdot (T_1 - T_5)$$

Ciepło obiegu (na wykresie T - S przedstawia je pole 1 - 2 - 3 - 4 - 5):

$$Q = Q_d - |Q_o|$$

Praca obiegu teoretycznego (praca teoretyczna, na wykresie p - V , przedstawia ją pole 1 - 2 - 3 - 4 - 5):

$$L_t = L_{A3,4} + L_{A4,5} - |L_{A1,2}|$$

gdzie:

- $L_{A3,4}$ – praca absolutna wykonana przez gaz (oddana na zewnątrz) w przemianie izobarycznej 3 - 4 :

$$L_{A3,4} = p_3(V_4 - V_3)$$

- $L_{A4,5}$ – praca absolutna wykonana przez gaz (oddana na zewnątrz) w przemianie izentropowej 4 - 5 :

$$L_{A4,5} = \frac{M \cdot R}{1 - k} (T_5 - T_4)$$

- $L_{A1,2}$ – praca absolutna wykonana nad gazem (dostarczona z zewnątrz) w przemianie izentropowej 1 - 2 :

$$L_{A1,2} = \frac{M \cdot R}{1 - k} (T_2 - T_1)$$

Zgodnie z I Z.T.:

$$L_t = Q = Q_d - |Q_o|$$

Sprawność obiegu teoretycznego Sabathego (sprawność teoretyczna):

$$\eta_t = \frac{L_{ob}}{Q_d} = \frac{Q}{Q_d} = \frac{Q_d - |Q_o|}{Q_d} = 1 - \frac{|Q_o|}{Q_d} = 1 - \frac{M \cdot c_v \cdot (T_5 - T_1)}{M \cdot c_v \cdot (T_3 - T_2) + M \cdot c_p \cdot (T_4 - T_3)} = 1 - \frac{T_5 - T_1}{T_3 - T_2 + k \cdot (T_4 - T_3)} \quad (8.3.1)$$

Temperatury w powyższym równaniu wyznacza się z równań przemian tworzących obieg Sabathego:

- z równania izentropy 1 - 2 wyznacza się temperaturę T_2 :

$$T_1 \cdot V_1^{k-1} = T_2 \cdot V_2^{k-1} \quad \Rightarrow \quad T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = T_1 \cdot \varepsilon_s^{k-1}$$

- z równania izochory 2 - 3 wyznacza się temperaturę T_3 :

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2} \quad \Rightarrow \quad T_3 = T_2 \cdot \frac{p_3}{p_2} = T_2 \cdot \alpha = \alpha \cdot \varepsilon_s^{k-1} \cdot T_1$$

- z równania izobary 3-4 wyznacza się temperaturę T_4 :

$$\frac{V_4}{V_3} = \frac{T_4}{T_3} \quad \Rightarrow \quad T_4 = T_3 \cdot \frac{V_4}{V_3} = T_3 \cdot \varphi = \varphi \cdot \alpha \cdot \varepsilon_s^{k-1} \cdot T_1$$

- z równania izentropy 4-5 wyznacza się temperaturę T_5 :

$$T_4 \cdot V_4^{k-1} = T_5 \cdot V_5^{k-1} \quad \Rightarrow$$

$$T_5 = T_4 \cdot \left(\frac{V_4}{V_5}\right)^{k-1} = T_4 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_r}\right)^{k-1} = T_4 \cdot \left(\frac{\varphi}{\varepsilon_s}\right)^{k-1} = \varphi \cdot \alpha \cdot \varepsilon_s^{k-1} \cdot T_1 \cdot \left(\frac{\varphi}{\varepsilon_s}\right)^{k-1} = \varphi^k \cdot \alpha \cdot T_1$$

Po uwzględnieniu powyższych zależności we wzorze (8.3.1) otrzymuje się:

$$\eta_t = 1 - \frac{\alpha \cdot \varphi^k \cdot T_1 - T_1}{\alpha \cdot \varepsilon_s^{k-1} \cdot T_1 - T_1 \cdot \varepsilon_s^{k-1} + k(\varphi \cdot \alpha \cdot \varepsilon_s^{k-1} \cdot T_1 - \alpha \cdot \varepsilon_s^{k-1} \cdot T_1)} =$$

$$= 1 - \frac{\alpha \cdot \varphi^k - 1}{\varepsilon_s^{k-1} \cdot [(\alpha - 1) + k \cdot \alpha \cdot (\varphi - 1)]} = 1 - \varepsilon_s^{1-k} \cdot \frac{\alpha \cdot \varphi^k - 1}{(\alpha - 1) + k \cdot \alpha \cdot (\varphi - 1)} \quad (5.3.2)$$

$$\eta_t = 1 - \varepsilon_s^{1-k} \cdot \frac{\alpha \cdot \varphi^k - 1}{(\alpha - 1) + k \cdot \alpha \cdot (\varphi - 1)}$$

Obieg Sabathego może przejść w obieg Otta, jeśli $\varphi = 1$ lub w obieg Diesla, jeśli $\alpha = 1$.
Stosownie do tego zależność (8.3.2) przyjmie postać:

- dla $\varphi = 1$

$$\eta_t = 1 - \varepsilon_s^{1-k} \quad \text{- sprawność obiegu teoretycznego Otta,}$$

- dla $\alpha = 1$

$$\eta_t = 1 - \varepsilon_s^{1-k} \cdot \frac{\varphi^k - 1}{k \cdot (\varphi - 1)} \quad \text{- sprawność obiegu teoretycznego Diesla.}$$

8.4. Porównanie teoretycznych obiegów silników spalinowych

Zależności opisujące sprawność omówionych obiegów teoretycznych mają następującą postać:

obieg Otta

$$\eta_t = 1 - \varepsilon_s^{1-k}$$

obieg Diesla

$$\eta_t = 1 - \varepsilon_s^{1-k} \cdot \frac{\varphi^k - 1}{k \cdot (\varphi - 1)}$$

obieg Sabathego

$$\eta_t = 1 - \varepsilon_s^{1-k} \cdot \frac{\alpha \cdot \varphi^k - 1}{(\alpha - 1) + k \cdot \alpha \cdot (\varphi - 1)}$$

Porównanie tych zależności wskazuje, że mają one podobną postać z tym, że występujący w wyrażeniu na sprawność obiegu Otta człon ε_s^{1-k} w obiegu Diesla i Sabathego jest mnożony przez pewne dodatkowe wyrazy.

Ponieważ, zgodnie z definicją, wartości współczynników α i φ nie mogą być mniejsze od jedności, zatem te dodatkowe wyrazy są większe od jedności, co oznacza, że przy tej samej wartości stopnia sprężania sprawność obiegu Otta jest zawsze największa.

Porównując z kolei sprawność obiegu Diesla i Sabathego można stwierdzić, że przy tej samej wartości stopnia sprężania sprawność obiegu Diesla jest mniejsza od sprawności obiegu Sabathego.

A zatem, przy tej samej wartości stopnia sprężania ε_s sprawności poszczególnych obiegów dają się uszeregować następująco

$$\eta_{t \text{ Otto}} > \eta_{t \text{ Sabathe}} > \eta_{t \text{ Diesel}}$$

Wartości sprawności obiegów obliczone dla stopnia sprężania $\varepsilon_s = 10$ i założonych wartości współczynnika wzrostu ciśnienia α , stopnia obciążenia φ , oraz wykładnika izentropy k są podane w tabelce.

ε_s	α	φ	k	η_{Otto}	$\eta_{Sabathe}$	η_{Diesel}
10	1,6	2	1,4	0,602	0,548	0,534

W rzeczywistości jest jednak inaczej, gdyż należy wziąć pod uwagę warunki, jakie musi spełniać wartość stopnia sprężania ε_s .

W silniku o zapłonie iskrowym wartość ε_s nie może być zbyt wysoka ze względu na możliwość wystąpienia spalania stukowego, w silniku o zapłonie samoczynnym zaś wartość ε_s musi być dostatecznie duża, aby zapewnić wystąpienie samozapłonu.

Górna granica ε_s w silnikach o zapłonie iskrowym dochodzi do 10 -11. Wartości ε_s w silnikach o zapłonie samoczynnym wahają się w granicach 14 – 20, a więc są znacznie większe. Biorąc pod uwagę te okoliczności, sprawności silników o zapłonie samoczynnym pracujących zarówno według obiegu Sabathego jak i Diesla są wyższe od sprawności silników o zapłonie iskrowym, gdyż wzrost ε_s kompensuje z nadwyżką zmniejszenie sprawności spowodowane współczynnikami φ i α .

Wartości sprawności obiegów obliczone dla stopnia sprężania $\varepsilon_s = 18$ i takich samych jak wcześniej założonych wartości współczynników α , φ oraz wykładnika izentropy k są podane w tabelce.

ε_s	α	φ	k	$\eta_{Sabathe}$	η_{Diesel}	η_{Otto}
18	1,6	2	1,4	0,643	0,631	0,685

Tak więc pod względem koncepcyjnym obieg Otto jest korzystniejszy, gdyż przy tych samych parametrach konstrukcyjnych scharakteryzowanych wielkością ε_s pozwala osiągnąć największą sprawność. Jednak występujące zjawiska dodatkowe nie pozwalają wykorzystać tej zalety obiegu i dlatego w praktyce współczesne silniki o zapłonie samoczynnym pracujące według obiegu Sabathego mogą mieć wysoką sprawność, przewyższającą znacznie sprawność silnika o zapłonie iskrowym i osiągają w ogóle najwyższe wartości uzyskiwane przez silniki cieplne.