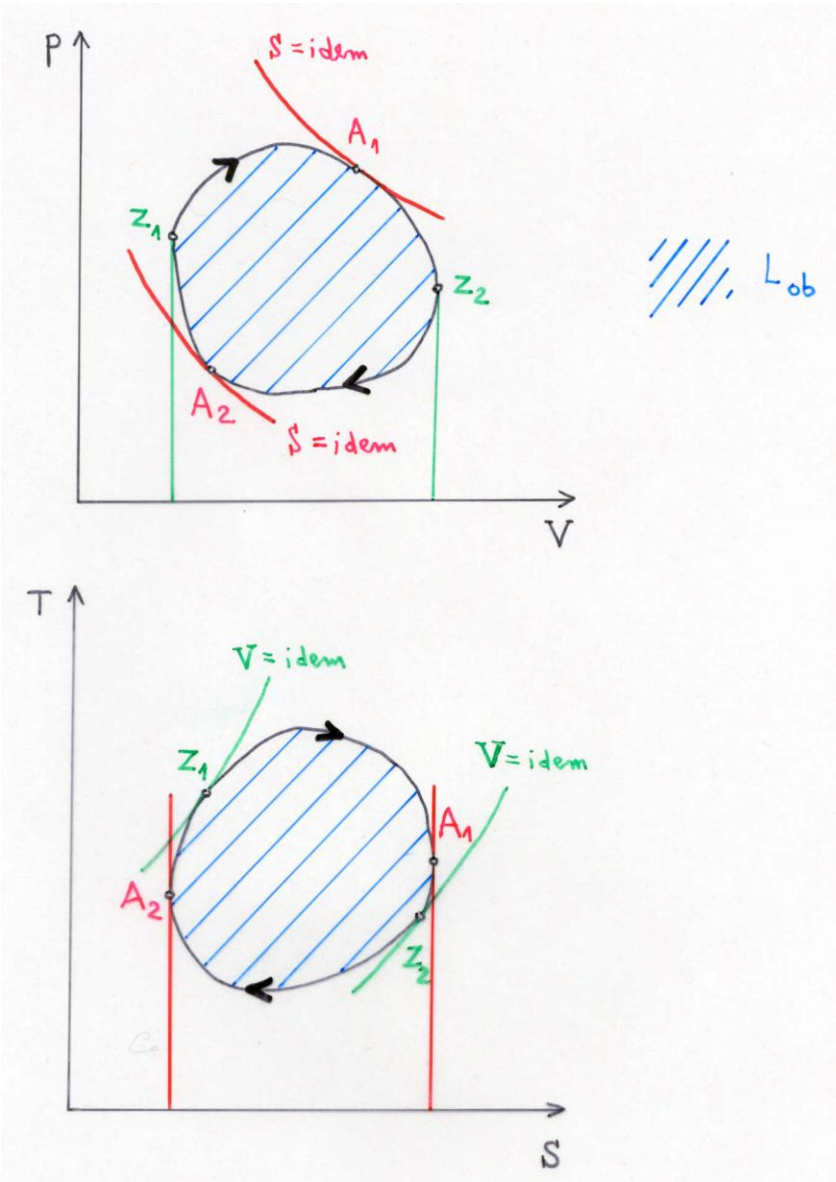
Obiegi termodynamiczne

1. Informacje ogólne

Obiegiem termodynamicznym nazywamy zespół kolejnych przemian termodynamicznych, odbywających się w układzie zamkniętym lub w zespole maszyn (turbiny, sprężarki, pompy) i urządzeń (wymienniki ciepła, kotły) przepływowych, charakteryzujących się tym, że koniec ostatniej przemiany pokrywa się z początkiem pierwszej przemiany.



Rys. 1.1.

Jeżeli na wykresie *p-v* lub *T-s* punkt odpowiadający kolejnym stanom czynnika przemieszcza się w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara, to taki obieg nazywamy *prawobieżnym*. W przeciwnym przypadku obieg nazywamy *lewobieżnym*. Zadaniem urządzenia realizującego obieg prawobieżny jest zamiana energii dostarczanej na sposób ciepła na pracę mechaniczną. Urządzenie pracujące według obiegu lewobieżnego ma za zadanie transport ciepła ze źródła o temperaturze niższej do źródła o temperaturze wyższej. Obiegi prawobieżne to obiegi silników i siłowni cieplnych, natomiast obiegi lewobieżne przedstawiają pracę chłodziarek i pomp ciepła.

W każdym obiegu można wyróżnić dwie pary charakterystycznych punktów (lub odcinków): punkty *zwrotne* i punkty *adiatermiczne*. Punkty zwrotne dzielą obieg na linię ekspansji i linię kompresji. Ekspansja związana jest z przekazywaniem pracy przez czynnik, natomiast kompresja z pobieraniem pracy. Punkty adiatermiczne (izentropowe) dzielą obieg na część, w której ciepło jest pobierane przez czynnik oraz część, w której ciepło jest oddawane przez czynnik.

Obieg jest odwracalny, jeżeli wszystkie przemiany wchodzące w jego skład są odwracalne.

2. Bilans energetyczny obiegu

Równanie bilansu energii – pierwszej zasady termodynamiki

$$E_d = \Delta E_u + E_w \quad [\mathrm{J}] \qquad (2.1)$$

gdzie: E_d – energia doprowadzona do układu [J], E_w – energia wyprowadzona z układu [J], ΔE_u – przyrost energii układu [J].

Dla całkowitej liczby cykli stan końcowy układu, którym jest najczęściej czynnik realizujący obieg, pokrywa się z jego stanem początkowym, stąd

$$\Delta E_u = E_{konc} - E_{pocz} = 0 \qquad (2.2)$$

Po podstawieniu (2.2) do (2.1) otrzymujemy

$$\boxed{E_d = E_w} \tag{2.3}$$

Energia doprowadzona do układu jest równa sumie ciepła doprowadzonego Q_d i pracy doprowadzonej, czyli pracy kompresji L_{kom}.

$$E_d = Q_d + |L_{kom}| \tag{2.4}$$

Energia wyprowadzona z układu jest równa sumie pracy wyprowadzonej, czyli pracy ekspansji L_{eks}, i ciepła wyprowadzonego Q_w.

$$E_w = L_{eks} + |Q_w| \tag{2.5}$$

Po podstawieniu zależności (2.4) i (2.5) do równania (2.3) otrzymujemy

$$Q_d = L_{eks} - |L_{kom}| + |Q_w| \tag{2.6}$$

Różnica prac ekspansji i kompresji daje pracę obiegu

$$L_{eks} - |L_{kom}| = L_{ob} \tag{2.7}$$

(2.7) do (2.6)

$$\boxed{Q_d = L_{ob} + |Q_w|} \tag{2.8}$$

Dla obiegów prawobieżnych

$$\begin{matrix} Q_d > |Q_w| \\ L_{ob} > 0 \end{matrix} \tag{2.9}$$

Dla obiegów lewobieżnych

$$\begin{matrix} |Q_w| > Q_d \\ L_{ob} < 0 \end{matrix} \tag{2.10}$$

Sprawność termiczna obiegu

$$\text{sprawn. termicz.} = \frac{\text{energetyczny efekt użyteczny}}{\text{koszt energetyczny}} \tag{2.11}$$

<u>Obieg prawobieżny</u>

- silnik i siłownia

$$\eta_{ob} = \frac{L_{ob}}{Q_d} < 1 \qquad (2.12)$$

<u>Obieg lewobieżny</u>

- chłodziarka

$$\varepsilon_z = \frac{Q_d}{|L_{ob}|} \qquad (2.13)$$

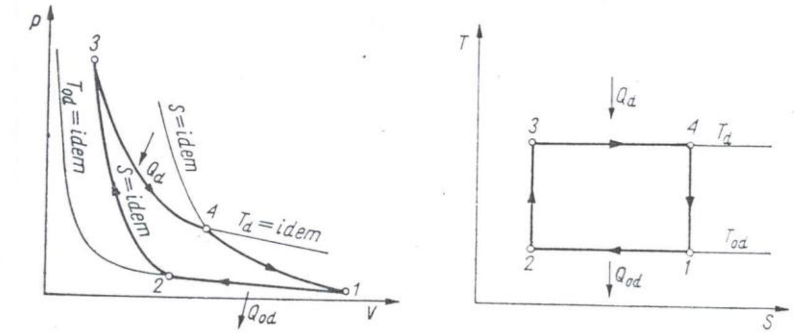
- pompa ciepła

$$\varepsilon_g = \frac{|Q_w|}{|L_{ob}|} > 1 \qquad (2.14)$$

3. Obieg Carnota

Obieg Carnota jest odwracalnym obiegiem zrealizowanym pomiędzy dwoma źródłami ciepła o stałych temperaturach. Obieg ten składa się z dwóch izoterm i dwóch izentrop.

Sprawność termiczna prawobieżnego obiegu Carnota - silnika



Rys. 3.17. Obieg silnikowy Carnota na wykresie o współrzędnych p-V dla gazów doskonałych, na wykresie T-S dla substancji dowolnych

Rys. 2.1.

Sprawność termiczną obiegu dowolnego silnika, w tym obiegu *Carnota*, można wyznaczyć ze wzoru

$$\eta_C = \frac{L_{ob}}{Q_d} = \frac{Q_d - |Q_w|}{Q_d} = 1 - \frac{|Q_w|}{Q_d} \qquad (3.1)$$

Dla obiegu *Carnota* jest

$$Q_d = T_I \cdot \Delta S_{3-4}; \qquad (3.2a)$$

$$Q_w = T_{II} \cdot \Delta S_{1-2} \qquad (3.2b)$$

gdzie

$$\Delta S_{3-4} = \left|\Delta S_{1-2}\right| = \Delta S_{2-1} \tag{3.3}$$

$$\eta_C = 1 - \frac{T_{II} \cdot \Delta S_{2-1}}{T_I \cdot \Delta S_{3-4}} = 1 - \frac{T_{II}}{T_I} \tag{3.4}$$

$$\boxed{\eta_C = 1 - \frac{T_{II}}{T_I}} \tag{3.5}$$

Sprawność obiegu Carnota jako <u>odwracalnego</u> obiegu zrealizowanego pomiędzy dwoma źródłami ciepła o stałych temperaturach

Zgodnie z drugą zasadą termodynamiki dla obiegu odwracalnego jest

$$\Pi = \Delta S_u + \Delta S_{ot} = 0 \tag{3.6}$$

Ponieważ koniec ostatniej przemiany obiegu pokrywa się z początkiem pierwszej przemiany obiegu, przyrost entropii dla pełnego cyklu jest równy

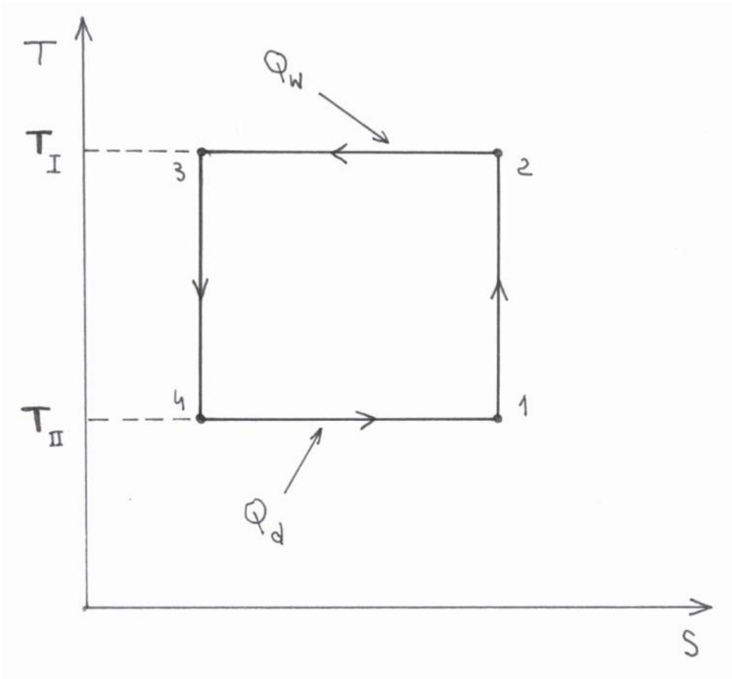
$$\Delta S_u = 0 \tag{3.7}$$

Otoczenie przekazuje obiegowi ciepło Q_d w temperaturze T_I i pobiera od obiegu ciepło w temperaturze T_{II}, stąd

$$\Delta S_{ot} = \frac{-Q_d}{T_I} + \frac{\left|Q_w\right|}{T_{II}} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\left|Q_w\right|}{Q_d} = \frac{T_{II}}{T_I} \tag{3.8}$$

$$\eta_C = 1 - \frac{\left|Q_w\right|}{Q_d} = 1 - \frac{T_{II}}{T_I} \tag{3.9}$$

Sprawność termiczna lewobieżnego obiegu Carnota – chłodziarki, pompy ciepła



Rys. 3.1.

<u>Chłodziarka</u>

$$\varepsilon_{zC} = \frac{Q_d}{|L_{ob}|} = \frac{Q_d}{|Q_w| - Q_d} \tag{3.10}$$

$$Q_d = T_{II} \cdot \Delta S_{4-1}; \tag{3.11a}$$

$$Q_w = T_I \cdot \Delta S_{2-3} \tag{3.11b}$$

gdzie (patrz rys. 3.1.)

$$\Delta S_{4-1} = |\Delta S_{2-3}| = \Delta S_{3-2} \tag{3.12}$$

Po podstawieniu prawych stron równań (3.11a) oraz (3.11b) do prawej strony równania (3.10) otrzymujemy

$$\varepsilon_{zC} = \frac{T_{II} \cdot \Delta S_{4-1}}{T_I \cdot \Delta S_{3-2} - T_{II} \Delta S_{4-1}} = \frac{T_{II}}{T_I - T_{II}} \tag{3.13}$$

$$\boxed{\varepsilon_{zC} = \frac{T_{II}}{T_I - T_{II}}} \tag{3.14}$$

Pompa ciepła

$$\varepsilon_{gC} = \frac{|Q_w|}{|L_{ob}|} = \frac{|Q_w|}{|Q_w| - Q_d} \qquad (3.15)$$

Q_d oraz Q_w definiują wzory (3.11a)-(3.12). Po podstawieniu dostajemy

$$\varepsilon_{gC} = \frac{T_I \cdot \Delta S_{3-2}}{T_I \cdot \Delta S_{3-2} - T_{II} \Delta S_{4-1}} = \frac{T_I}{T_I - T_{II}} \qquad (3.16)$$

$$\boxed{\varepsilon_{gC} = \frac{T_I}{T_I - T_{II}}} \qquad (3.17)$$

***OBIEG CARNOTA JEST NAJSPRAWNIEJSZYM OBIEGIEM CIEPLNYM SILNIKA**, który można zrealizować pomiędzy dwoma źródłami ciepła o stałych temperaturach*

Równanie drugiej zasady termodynamiki, które można zastosować dla dowolnego procesu, w tym dla dowolnego obiegu cieplnego, ma postać

$$\Pi = \Delta S_u + \Delta S_{ot} \geq 0 \qquad (3.18)$$

gdzie

$$\Delta S_u = 0 \qquad (3.19)$$

$$\Delta S_{ot} = \frac{-Q_d}{T_I} + \frac{|Q_w|}{T_{II}} \qquad (3.20)$$

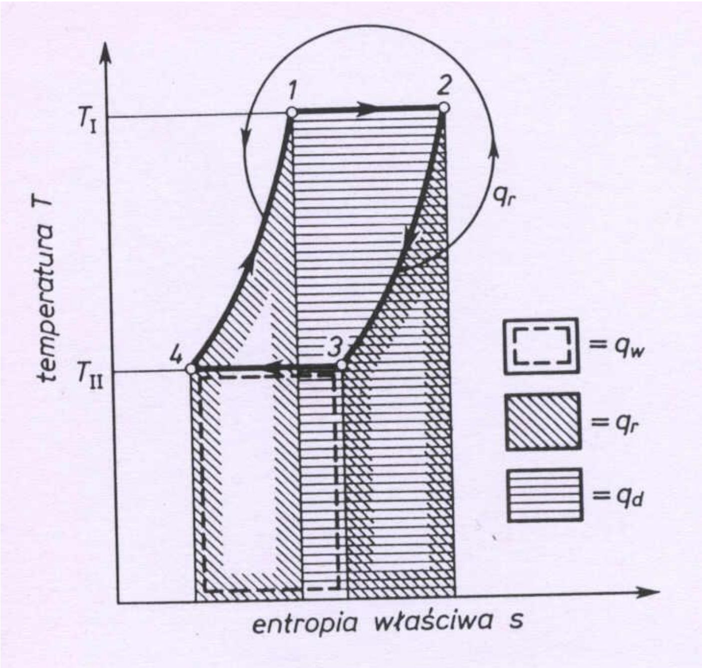
Po podstawieniu zależności (3.19) i (3.20) do równania (3.18) otrzymujemy

$$\frac{-Q_d}{T_I} + \frac{|Q_w|}{T_{II}} \geq 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{|Q_w|}{Q_d} \geq \frac{T_{II}}{T_I} \qquad (3.21)$$

i dalej

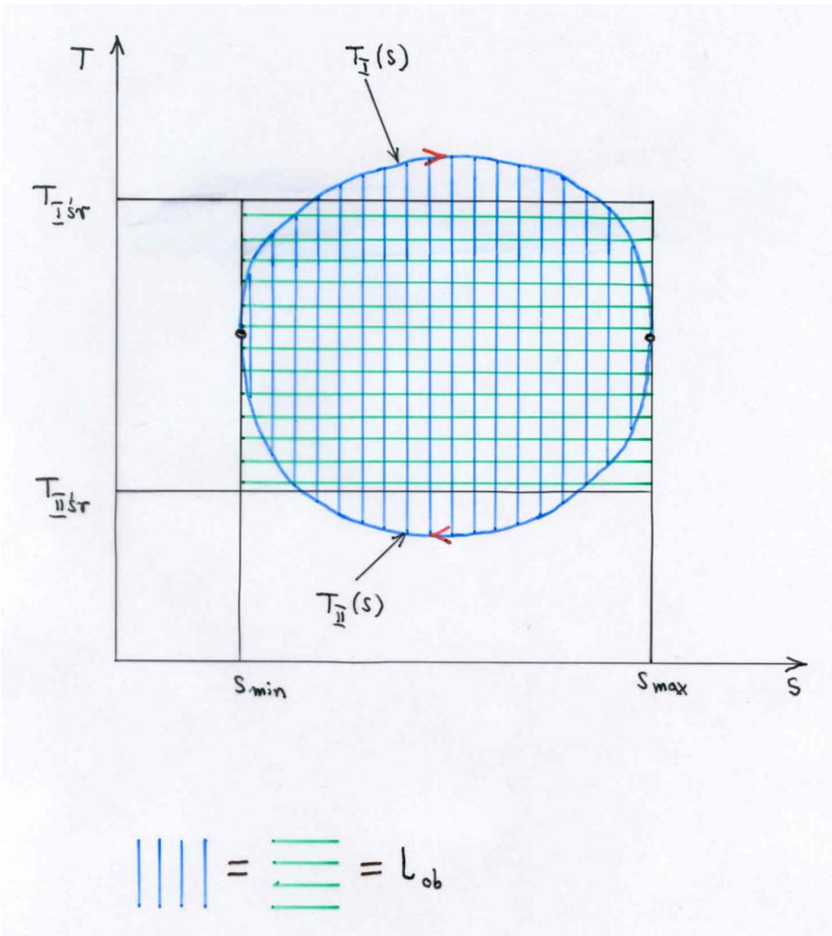
$$\eta_{td} = 1 - \frac{|Q_w|}{Q_d} \leq 1 - \frac{T_{II}}{T_I} = \eta_C \qquad (3.22)$$

Uogólniony obieg Carnota



Uogólniony obieg Carnota

Średnia temperatura termodynamiczna



$$q = \int_{s_1}^{s_2} T(s)ds = T_{sr}(s_2 - s_1) \qquad (1)$$

$$T_{sr} = \frac{\int_{s_1}^{s_2} T(s)ds}{s_2 - s_1} \qquad (2)$$

Dla obiegu termodynamicznego

$$q_d = \int_{s_{\min}}^{s_{\max}} T_I(s)ds = T_{Isr}(s_{\max} - s_{\min}) \qquad (3)$$

$$q_w = \int_{s_{\max}}^{s_{\min}} T_{II}(s)ds = T_{IIsr}(s_{\min} - s_{\max}) \qquad (4)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_w|}{q_d} = 1 - \frac{T_{IIsr}(s_{\max} - s_{\min})}{T_{Isr}(s_{\max} - s_{\min})} = 1 - \frac{T_{IIsr}}{T_{Isr}} \qquad (5)$$

Nie można zrealizować obiegu silnika pobierającego ciepło ze źródła i całkowicie zamieniającego je na pracę (sformułowanie II zasady termodynamiki M. Plancka).

Dla takiego obiegu byłoby

$$L_{ob} = Q_d \qquad (1a)$$

$$\eta_t = \frac{L_{ob}}{Q_d} = 1 \qquad (1b)$$

II zasada termodynamiki

$$\Pi = \Delta S_u + \Delta S_{ot} \geq 0 \qquad (2)$$

gdzie w rozważanym przypadku

$$\Delta S_u = 0 \qquad (3a)$$

$$\Delta S_{ot} = \frac{-Q_d}{T_I} \qquad (3b)$$

Po podstawieniu (3a) i (3b) do (2) dostajemy

$$\Pi = \frac{-Q_d}{T_I} < 0 \qquad (4)$$

co jest sprzeczne z II ZT.

Silnik, który całkowicie zamieniałby ciepło na pracę nazywany jest ***perpetuum mobile*** II rodzaju.