

Termodynamika

Część 5

- **Procesy cykliczne**
- **Maszyny cieplne**

Procesy cykliczne

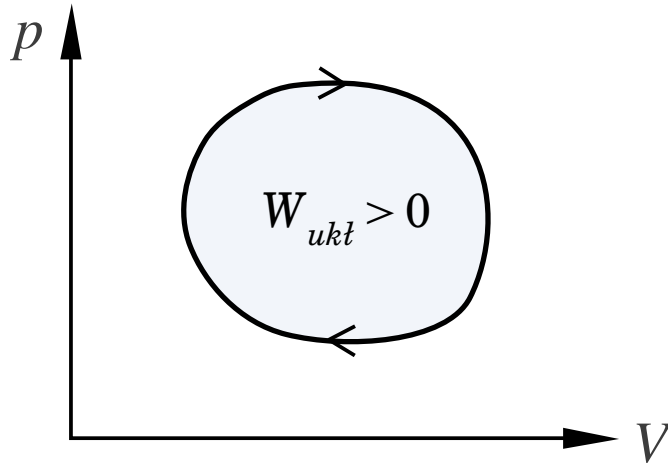
Z pierwszej zasady termodynamiki:

$$\oint dU = \oint Q_{el} + \oint W_{el} = 0$$

W cyklu odwracalnym (złożonym z procesów kwazistatycznych) wykonującym pracę objętościową:

$$\oint dU = \oint \delta Q - \oint p dV = 0$$

Cykl prosty
(obieg prawobieżny)

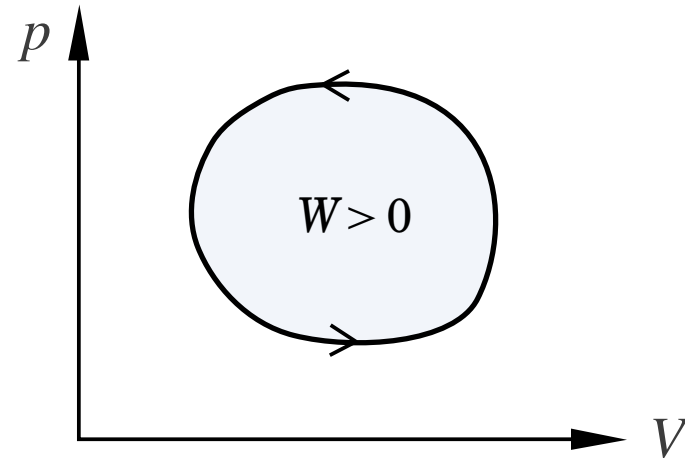


$$W = - \oint p dV < 0$$

$$W_{ukt} = -W = \oint p dV > 0$$

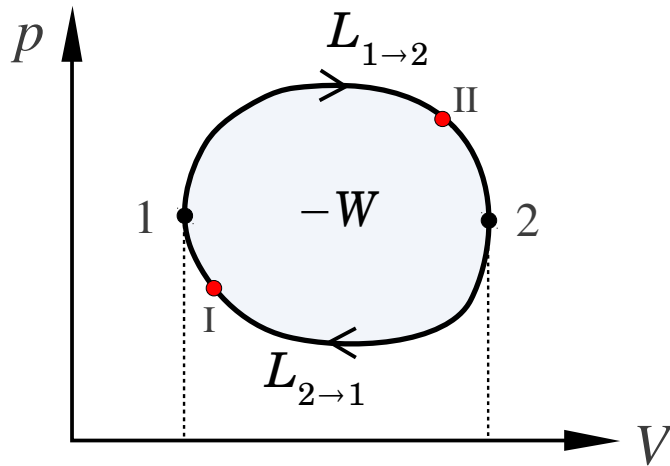
$$Q = \oint \delta Q = -W > 0$$

Cykl odwrotny
(obieg lewobieżny)



$$W > 0$$

$$Q = -W < 0$$



W cyklu wyróżniamy procesy

- ekspansji ($L_{1 \rightarrow 2}$)
- kompresji ($L_{2 \rightarrow 1}$).

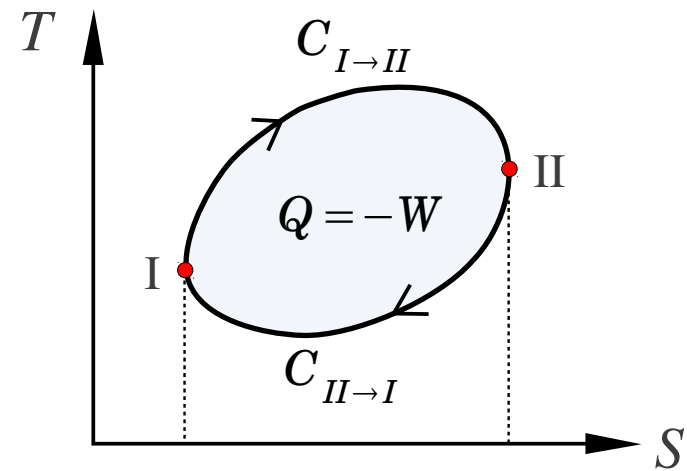
Podczas ekspansji układ wykonuje pracę, czyli praca wykonana na układzie ma wartość ujemną:

$$W^{(-)} = - \int_{L_{1 \rightarrow 2}} p dV < 0$$

Podczas kompresji praca wykonana na układzie ma wartość dodatnią:

$$W^{(+)} = - \int_{L_{2 \rightarrow 1}} p dV > 0$$

Sumaryczna praca: $W = W^{(+)} + W^{(-)}$



W cyklu wyróżniamy procesy

- pobierania ciepła ($C_{I \rightarrow II}$)
- oddawania ciepła ($C_{II \rightarrow I}$).

Ciepło pobrane:

$$Q^{(+)} = \int_{C_{I \rightarrow II}} T dS > 0$$

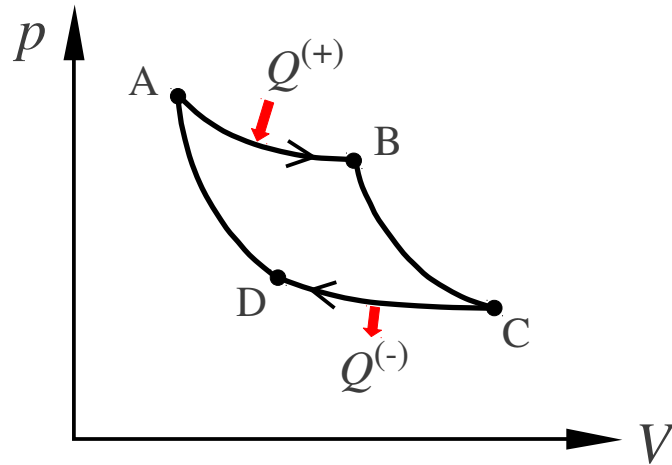
Ciepło oddane:

$$Q^{(-)} = \int_{C_{II \rightarrow I}} T dS < 0$$

Sumaryczne ciepło:

$$Q = Q^{(+)} + Q^{(-)}$$

Cykl Carnota



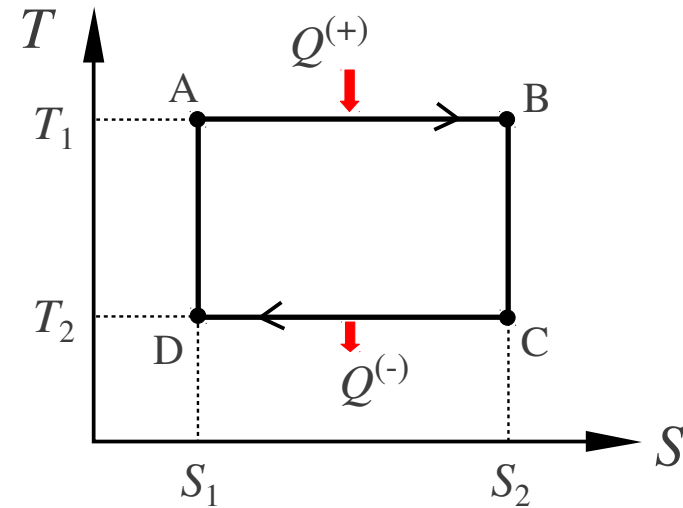
Składa się z następujących procesów:

A-B Izotermiczne rozprężanie.

B-C Adiabatyczne rozprężanie.

C-D Izotermiczne sprężanie.

D-A Adiabatyczne sprężanie.



$$Q^{(+)} = T_1 (S_2 - S_1)$$

$$Q^{(-)} = T_2 (S_1 - S_2)$$

Sprawność odwracalnego cyklu Carnota:

$$\eta \equiv \frac{|W|}{Q^{(+)}} = \frac{Q}{Q^{(+)}} = 1 - \frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}}$$

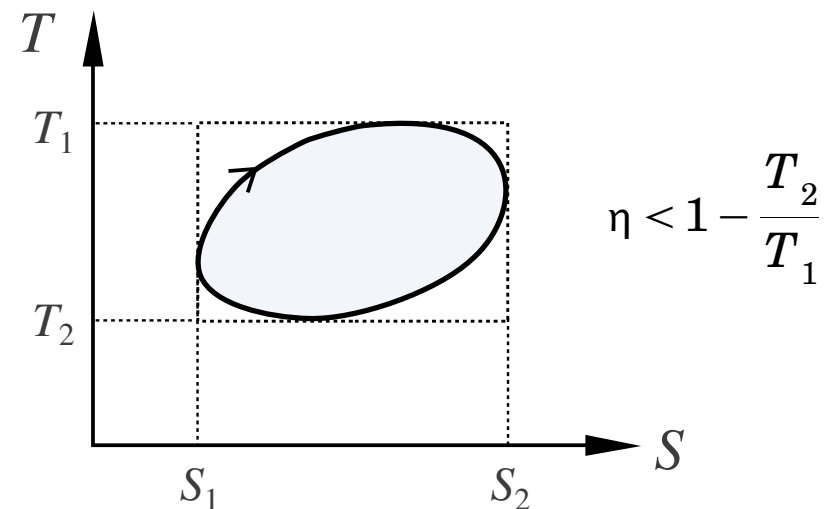
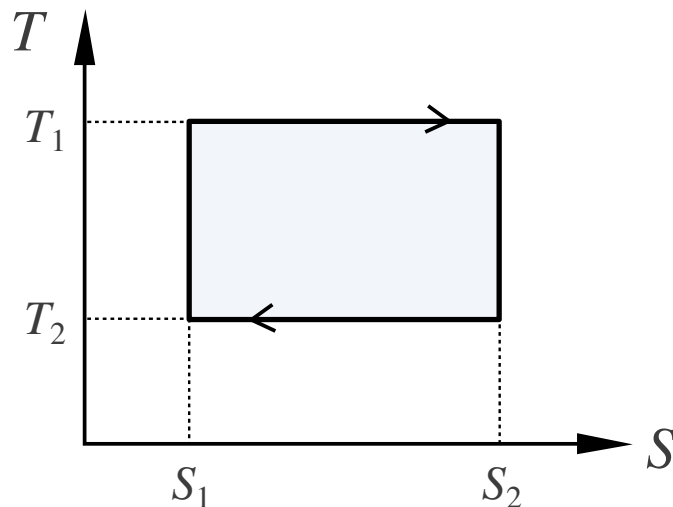
$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Pierwsze twierdzenie Carnota

Sprawność odwracalnego cyklu (maszyny) Carnota przebiegającego między temperaturami T_1 i T_2 nie zależy od substancji roboczej i konstrukcji maszyny, lecz tylko od temperatury T_1 (temperatury źródła) oraz temperatury T_2 (temperatury chłodnicy).

Cykl Carnota jest jedynym możliwym cyklem roboczym dla maszyny, która ma jedno źródło ciepła i jedną chłodnicę o stałych temperaturach, ponieważ przy braku innych termostatów przejście od temperatury chłodnicy i odwrotnie może być tylko adiabatyczne.

Sprawność odwracalnego cyklu Carnota jest większa od sprawności dowolnego innego cyklu odwracalnego, w którym temperatury maksymalna i minimalna są równe odpowiednio temperaturom źródła i chłodnicy cyklu Carnota (dowód - ćwiczenia).



Nierówność Clausiusa

Druga zasada termodynamiki

$$\Delta S - \int_C \frac{Q_{el}}{T_o} \geq 0$$

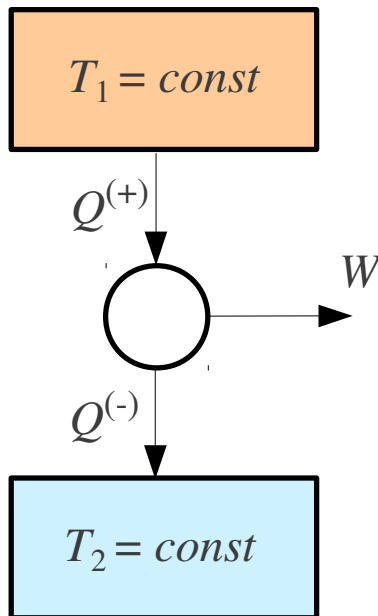
Dla cyklu

$$\Delta S = 0$$

$$\oint \frac{Q_{el}}{T_o} \leq 0$$

Drugie twierdzenie Carnota

Sprawność silnika cieplnego nieodwracalnego (cyklu nieodwracalnego) pracującego między temperaturami T_1 i T_2 jest zawsze mniejsza niż sprawność silnika pracującego według odwracalnego cyklu Carnota między tymi samymi temperaturami.



Z nierówności Clausiusa

$$\oint \frac{Q_{el}}{T_o} = \frac{Q^{(+)}}{T_1} + \frac{Q^{(-)}}{T_2} \leq 0$$

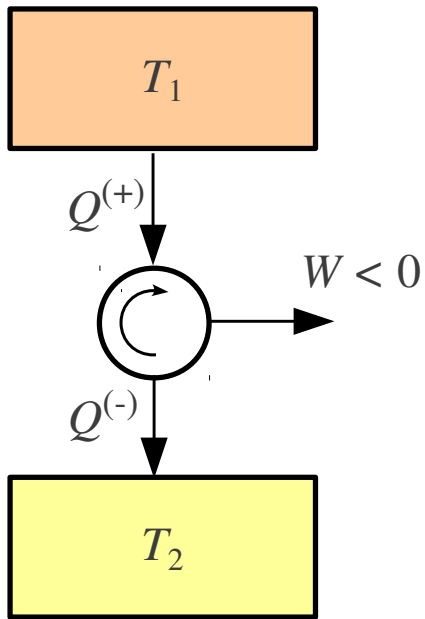
$$\frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}} < -\frac{T_2}{T_1}$$

stąd sprawność

$$\eta = 1 + \frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}} \leq 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

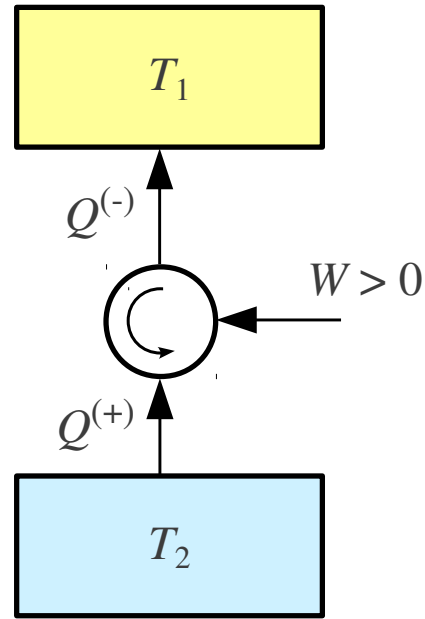
(Równość dla cyklu odwracalnego)

Sprawność maszyn cieplnych



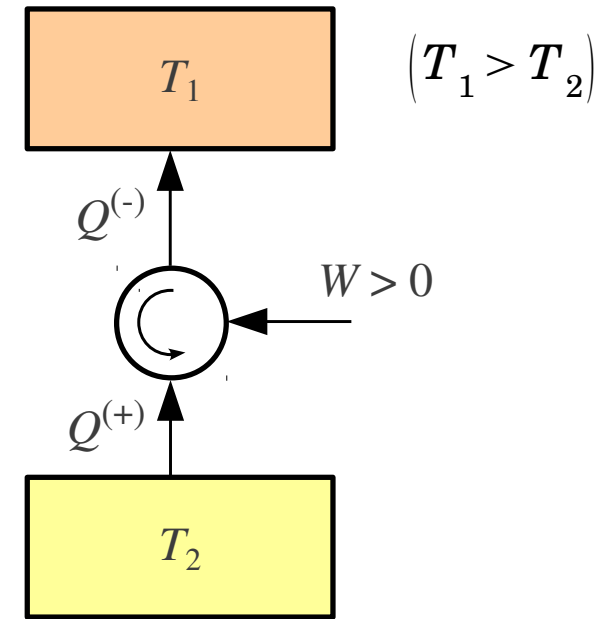
Silnik cieplny

$$\eta \equiv \frac{-W}{Q^{(+)}} = 1 + \frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)}}$$



Chłodziarka

$$\eta \equiv \frac{Q^{(-)}}{W} = \frac{-Q^{(+)}}{Q^{(+)} + Q^{(-)}}$$

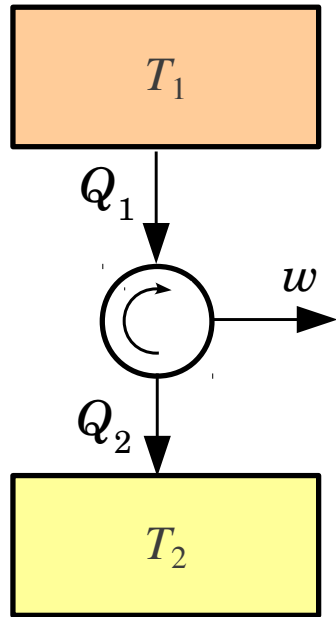


Pompa ciepła

$$\eta \equiv \frac{-Q^{(-)}}{W} = \frac{Q^{(-)}}{Q^{(+)} + Q^{(-)}}$$

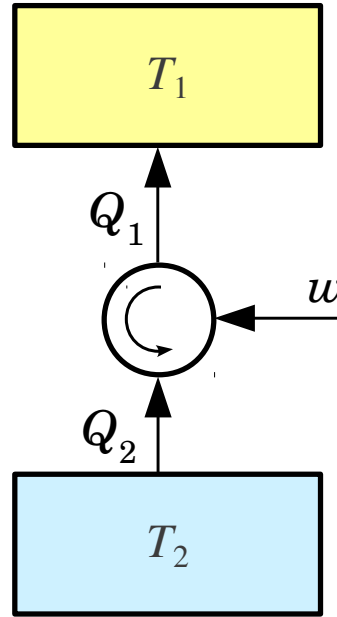
Sprawność maszyn cieplnych

Wyrażenie sprawności maszyn cieplnych przez wielkości, które są dodatnie.



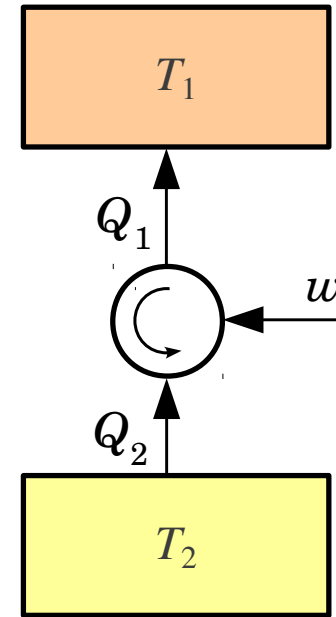
Silnik cieplny

$$\eta \equiv \frac{w}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$



Chłodziarka

$$\eta \equiv \frac{Q_2}{w} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$



Pompa ciepła

$$\eta \equiv \frac{Q_1}{w} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2}$$

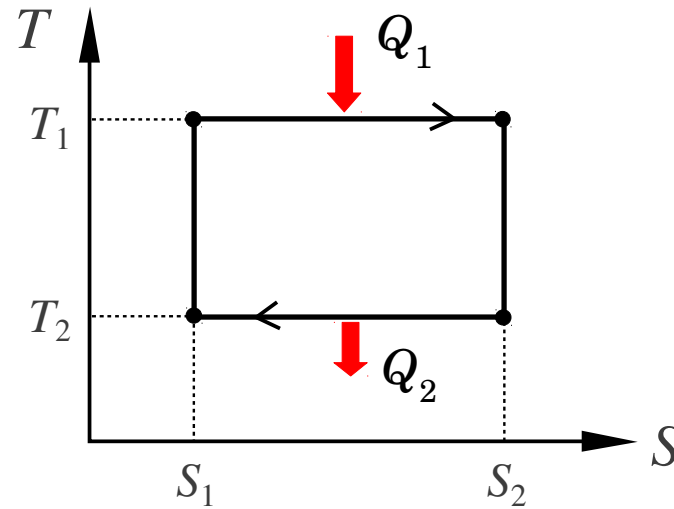
Obiegi porównawcze (idealne)

Procesy w rzeczywistych maszynach cieplnych są nieodwracalne. Część pracy zostaje zużyta na pokonanie sił tarcia oraz kompresję otoczenia. W analizie pracy tych urządzeń wykorzystuje się wyidealizowane obiegi (cykle) złożone z przemian odwracalnych. Są one bardzo użyteczne, ponieważ umożliwiają określenie maksymalnej sprawności maszyn cieplnych oraz wskazują sposoby ich udoskonalenia.

Cykl Carnota

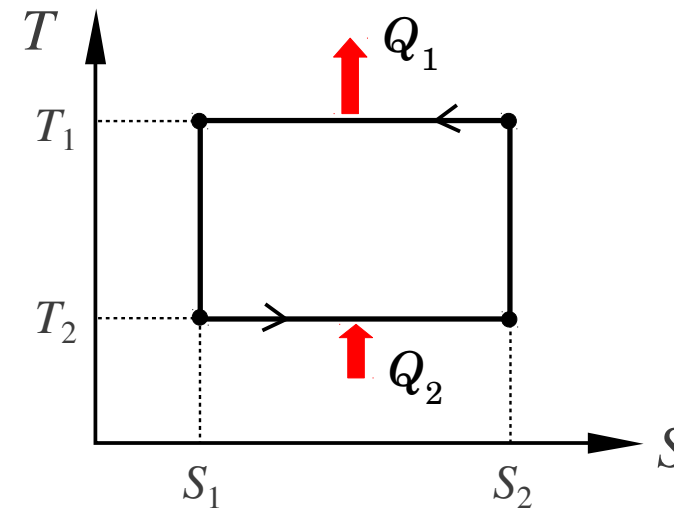
Silnik cieplny

$$\eta = \frac{w}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$



Chłodziarka

$$\eta = \frac{Q_2}{w} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$



$$Q_1 = T_1 \Delta S$$

$$Q_2 = T_2 \Delta S$$

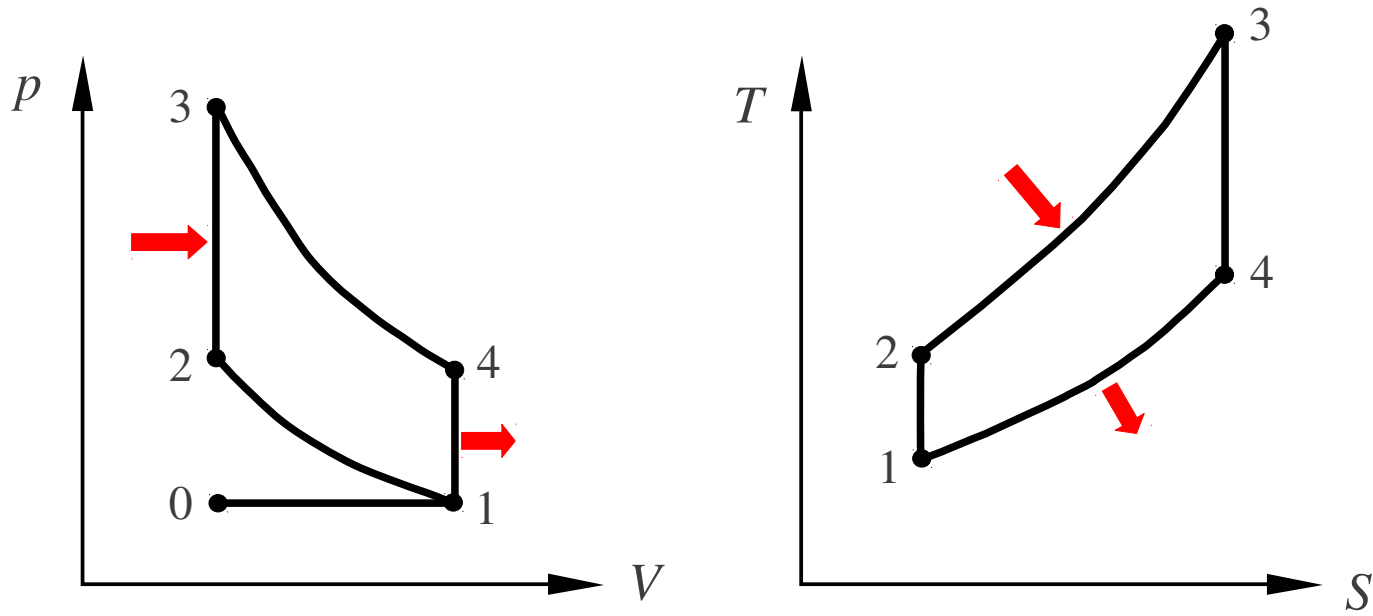
$$\Delta S = S_2 - S_1$$

Pompa ciepła

$$\eta = \frac{Q_1}{w} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

Cykl Otto

Jest to obieg porównawczy dla silników spalinowych z zapłonem iskrowym. Cykl Otto składa się z dwóch adiabat i dwóch izochor.



- 0 – 1 Zасыanie mieszanki paliwowej - ruch tłoka w dół.
- 1 – 2 Adiabatyczne sprężanie mieszanki – ruch tłoka w górę.
- 2 – 3 Izochoryczne „dostarczanie ciepła” - spalanie mieszanki.
- 3 – 4 Adiabatyczne rozprężanie - ruch tłoka w dół.
- 4 – 1 Izochoryczne „oddawanie ciepła”.
- 1 – 0 Usuwanie pozostałych spalin - ruch tłoka w górę.

Cykl Otto

Praca wykonana przez silnik w jednym cyklu

$$W = C_V(T_3 - T_2) \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right)$$

Maksymalne ciśnienie

$$p_3 = p_1 \frac{T_3}{T_1} \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{1/(\gamma-1)}$$

Sprawność

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_4}{T_3} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$$

gdzie

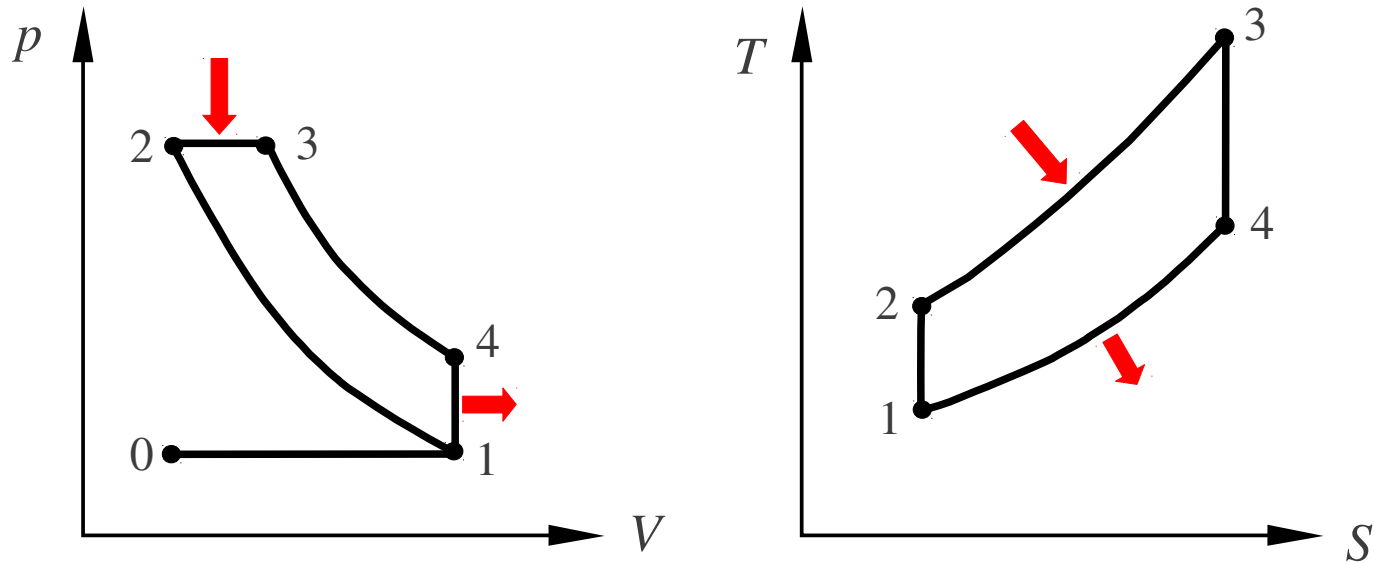
$$r = V_1/V_2 \quad (\text{stopień sprężania})$$

$$\gamma = C_p/C_V$$

Sprawność zależy od stopnia sprężania. Stopień sprężania w tego typu silnikach nie przekracza ok. 8.5. Przy większym sprężaniu następuje spalanie detonacyjne.

Cykl Diesla

Obieg porównawczy dla silników wysokoprężnych.



- 0 – 1 Zasysanie powietrza - ruch tłoka w dół.
- 1 – 2 Adiabatyczne sprężanie powietrza – ruch tłoka w górę.
- 2 – 3 Izobaryczny wtrysk i zapłon paliwa – „dostarczanie ciepła”.
- 3 – 4 Adiabatyczne rozprężanie - ruch tłoka w dół.
- 4 – 1 Izochoryczne „oddawanie ciepła”.
- 1 – 0 Usuwanie pozostałych spalin - ruch tłoka w górę.

Cykl Diesla

Sprawność

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \left[\frac{\alpha^\gamma - 1}{\gamma(\alpha - 1)} \right]$$

gdzie

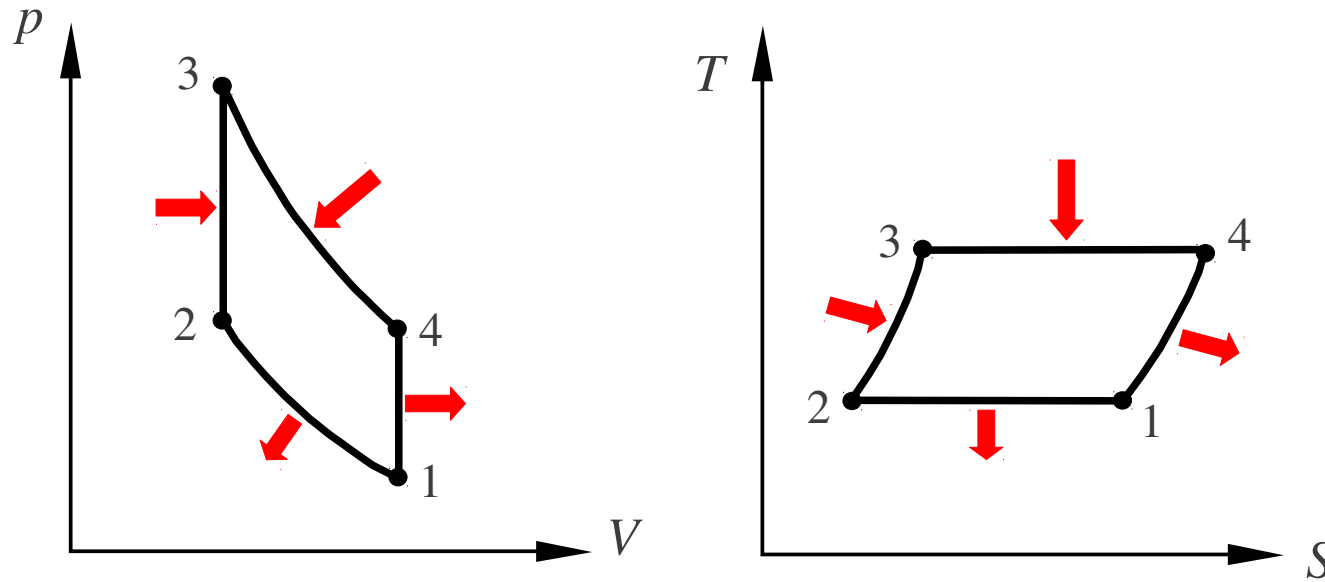
$$r = V_1/V_2$$

$$\alpha = V_3/V_2 = \frac{1}{r^{\gamma-1}} \frac{T_3}{T_1}$$

Przy tym samym stopniu sprężania sprawność cyklu Diesla jest mniejsza niż sprawność cyklu Otto. Jednakże silniki diesla osiągają większą sprawność dzięki wyższym stopniom sprężania.

Cykl Stirlinga

Obieg porównawczy dla silników Stirlinga. Składa się z dwóch izoterm i dwóch izochor.

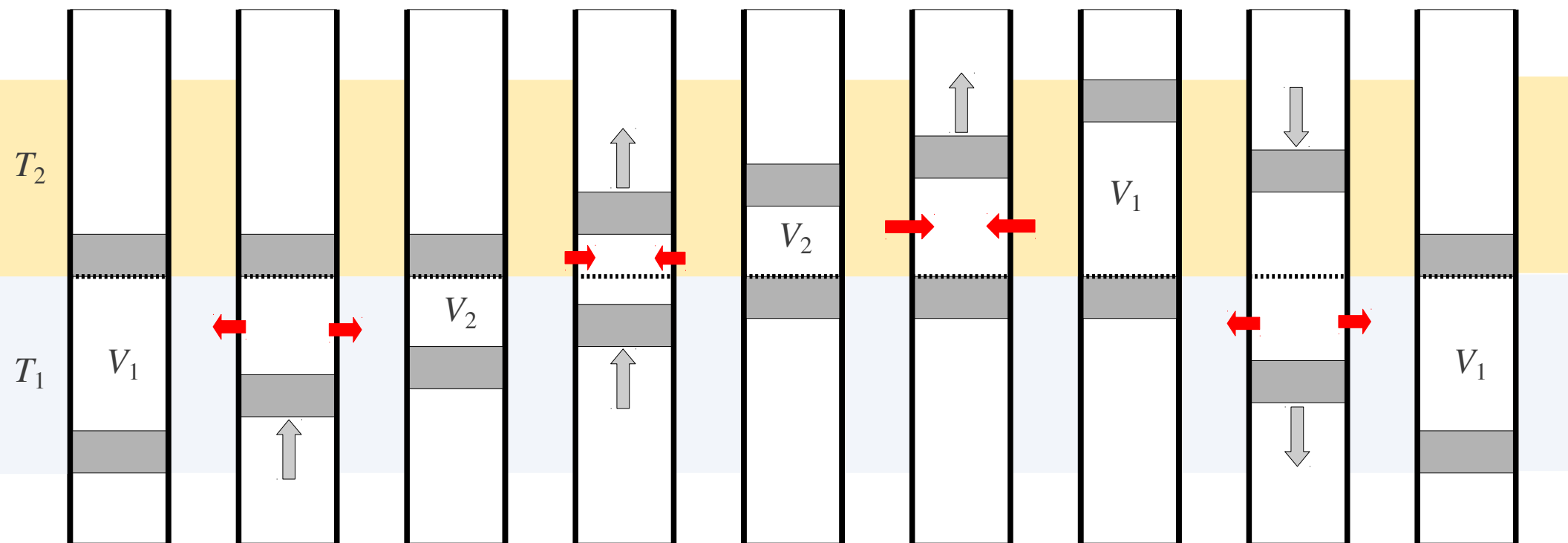


Sprawność:

$$\eta = \frac{R(T_2 - T_1) \ln(V_2/V_1)}{C_V(T_2 - T_1) + RT_2 \ln(V_2/V_1)}$$

Schemat działania silnika Stirlinga

Gaz będący substancją roboczą znajduje się w cylindrze pomiędzy dwoma tłokami. Cylinder podzielony jest na dwie części przegrodą wykonaną z porowatego materiału. Jedna część jest w kontakcie termicznym ze źródłem ciepła o temperaturze T_2 , a druga z chłodnicą o temperaturze T_1 .



1

Zimny gaz jest sprężany izotermicznie. Praca wykonana na gazie jest zamieniana na ciepło przekazywane do zimnego otoczenia.

2

Gaz utrzymywany w stałej objętości jest przepychany do „gorącej” części cylindra, w której pobiera ciepło.

3

Ekspansja izotermiczna gorącego gazu. Gaz wykonuje pracę kosztem dostarczonego ciepła.

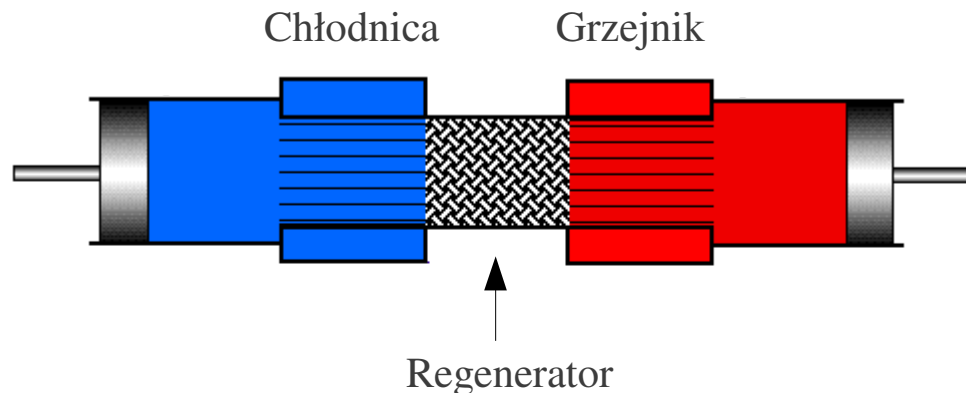
4

Gaz utrzymywany w stałej objętości jest przepychany do „zimnej” części cylindra, w której oddaje ciepło.

1

Silnik Stirlinga z akumulatorem ciepła

Ciepło pobierane ze źródła w procesie izochorycznym 2-3 jest równe ciepłu oddawanemu do chłodnicy w izochorycznym przemieszczaniu gazu 4-1. Zamiast oddawać ciepło do chłodnicy, gaz może przekazywać je do regeneratora (akumulatora ciepła) przy przechodzeniu z gorącego do zimnego sektora (4-1). Zgromadzone w regeneratorze ciepło jest spowrotem przekazywane do gazu przy jego przechodzeniu w odwrotnym kierunku. Dzięki temu można uzyskać większą sprawność silnika. W idealnym procesie byłaby ona równa sprawności cyklu Carnota.



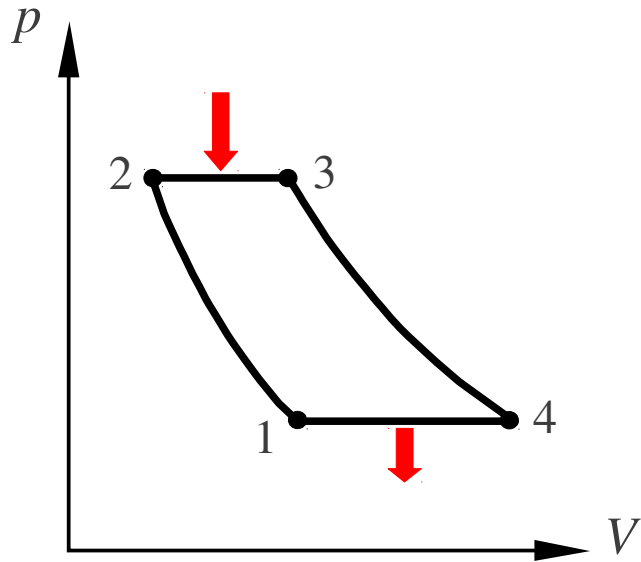
Zalety silnika Stirlinga:

- możliwość pozyskiwania ciepła z dowolnego źródła
- wysoka sprawność (do ok. 40 %)
- cicha praca.

Wadą są wysokie koszty produkcji takich silników.

Cykl Braytona

Obieg porównawczy dla turbiny gazowej i silnika odrzutowego.
Składa się z dwóch izobar i dwóch adiabat.



Sprawność:

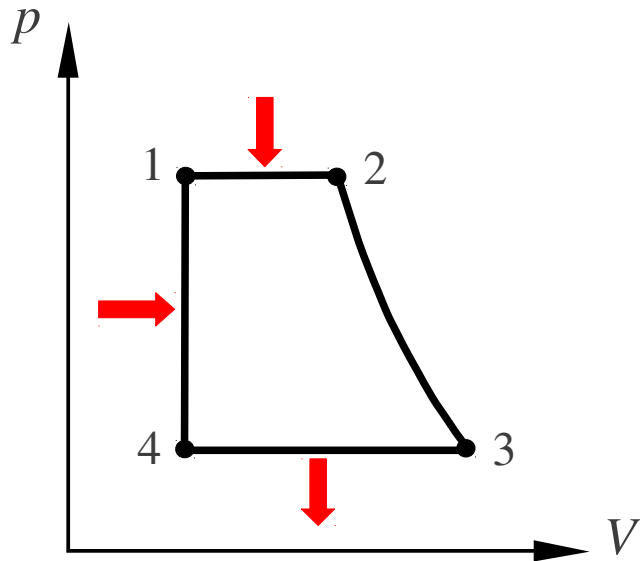
$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \frac{T_4}{T_3}$$

- 1 – 2 Wlot i adiabatyczne sprężanie powietrza przez sprężarkę.
- 2 – 3 Spalanie paliwa przy stałym ciśnieniu w komorze spalania.
- 3 – 4 Adiabatyczne rozprężanie gorącego powietrza w turbinie i dyszy wylotowej.
- 4 – 1 Wyrzucone powietrze chłodzi się do temperatury wyjściowej.

Cykl Rankine'a

Obieg porównawczy dla maszyny parowej.



- 1 – 2 Para z kotła wpuszczana do cylindra - izobara.
- 2 – 3 Adiabatyczne rozprężanie po zamknięciu dopływu pary.
- 3 – 4 Izobaryczne skraplanie pary w chłodnicy.
- 4 – 1 Woda podgrzewana w kotle i zamieniana na parę.