

Prof. WSTE dr hab. inż. Benedykt Julian LITKE

Wyższa Szkoła Techniczno-Ekonomiczna w Szczecinie, Wydział Systemów Automotive (*Prof. em.*)
Higher School of Technology and Economics in Szczecin, Faculty of Automotive Systems (*Prof. em.*)

OBIEGI TERMODYNAMICZNE. DRUGA ZASADA TERMODYNAMIKI

Streszczenie

Wstęp i cele: W pracy opisano obieg termodynamiczny silnika cieplnego, Carnota, chłodziarki i pompy grzewczej, Ponadto przedstawiono sprawność termiczną obiegu silnika oraz sprawność energetyczną obiegu chłodniczego i obiegu grzewczego. Omówiono różne sformułowania drugiej zasady termodynamiki. Celem pracy jest przedstawienie graficzne obiegów termodynamicznych silnika, chłodziarki i pompy grzewczej oraz analiza teoretyczna sprawności energetycznej omawianych obiegów termodynamicznych.

Materiał i metody: Materiał stanowią źródła z literatury z zakresu termodynamiki. W pracy zastosowano metodę analizy teoretycznej.

Wyniki: Rezultatem pracy jest przedstawienie graficzne i omówienie obiegów termodynamicznych silnika cieplnego, chłodziarki i pompy grzewczej. Ponadto w pracy przedstawiono analizę teoretyczną sprawności termicznej obiegu silnika, sprawności energetycznej obiegu chłodniczego i grzewczego.

Wniosek: Aby zrealizować obieg silnika nie wystarczy tylko dostarczać ciepło, lecz konieczne jest też odprowadzanie ciepła. Obieg chłodniczy lub obieg grzewczy jest lewobieżny i może składać się z równych przemian termodynamicznych. Sprawność termiczna silnika może być zwiększona poprzez podniesienie temperatury ciepła doprowadzanego i obniżenie temperatury ciepła odprowadzanego.

Słowa kluczowe: Obiegi termodynamiczne, silnik cieplny, chłodziarka, pompa grzewcza, sprawność termiczna i energetyczna, druga zasada termodynamiki.

(Otrzymano: 05.06.2018; Zrecenzowano: 15.06.2018; Zaakceptowano: 20.06.2018)

THERMODYNAMIC CYCLES. THE SECOND PRINCIPLE OF THERMODYNAMICS

Abstract

Introduction and aim: The paper describes the thermodynamic cycle of the heat engine, Carnot, refrigeration and transient pump. In addition, the thermal efficiency of the motor cycle and the energy efficiency of the refrigeration cycle and heating circuit have been presented. Different definitions of the second law of thermodynamics have been discussed. The aim of this paper is graphic representation of thermodynamic cycles of the engine, refrigerator and heating pump as well as theoretical analysis of energy efficiency of the discussed thermodynamic cycles.

Material and methods: Material covers some sources based on the literature in the field of thermodynamics. The method of theoretical analysis has been shown in the paper.

Results: The result of the work is a graphic representation and discussion of the thermodynamic cycles of the heat engine, the refrigerator and the heating pump. In addition, the work presents the thermodynamic analysis of the thermal efficiency of the motor cycle, the energy efficiency of the cooling and heating circuits.

Conclusion: In order to realize the motor cycle, it will not only provide heat, but also heat removal. The refrigeration circuit or heating circuit is left-handed and may consist of even thermodynamic transformations. The thermal efficiency of the motor can be increased by raising the temperature of the heat supplied and reducing the temperature of the heat dissipated.

Keywords: Thermodynamic cycles, heat engine, refrigeration, heating pump, thermal and energy efficiency, second law of thermodynamics.

(Received: 05.06.2018; Revised: 15.06.2018; Accepted: 20.06.2018)

1. Wstęp

Maszyny i urządzenia energetyczne jak np. silniki cieplne, sprężarki, chłodziarki, pompy cieplne i inne, pracują według jednoznacznie określonych zasad. Podczas pracy takiego układu termodynamicznego powtarzany jest cyklicznie zespół określonych przemian, nazywany obiegiem.

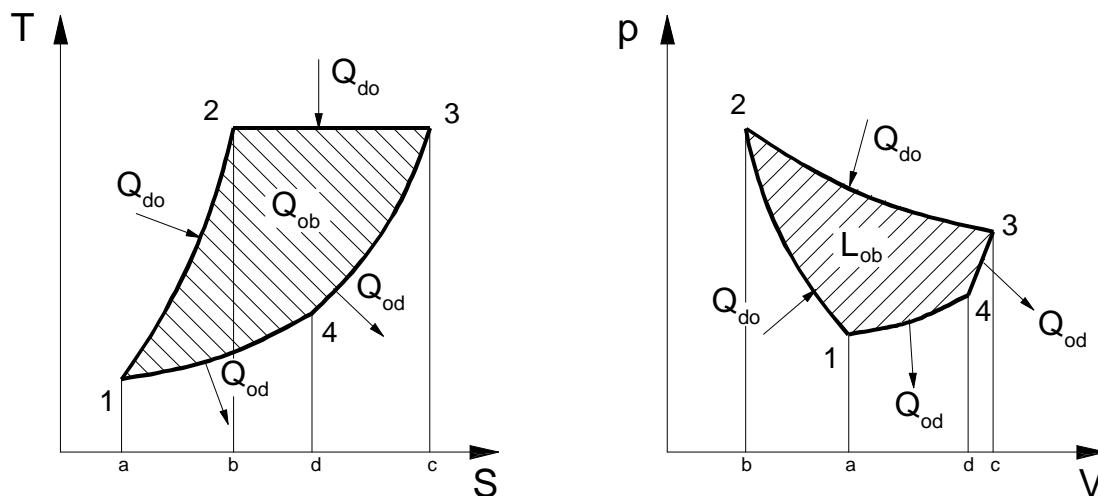
Obieg termodynamiczny jest to zespół następujących po sobie, zawsze w tej samej kolejności, przemian termodynamicznych, w układzie zamkniętym, w którym stan końcowy ostatniej przemiany jest początkowym przemiany pierwszej. Każdy rodzaj urządzenia pracuje według obiegu, który jest adekwatny do teoretycznego, nazywanego obiegiem porównawczym.

Obieg może być zrealizowany również w układzie przepływowym (otwartym), gdy powietrze doprowadzane do układu i odprowadzane z układu ma parametry powietrza atmosferycznego. Obieg termodynamiczny może dotyczyć też układu złożonego z zespołu różnych maszyn przepływowych, jak np. w siłowniach turbinowych [1]-[14].

2. Obieg silnika cieplnego

Na rysunku 1 przedstawiony jest przykładowy obieg silnika, na wykresach o współrzędnych T-S oraz p-V, składający się z czterech przemian. Podczas przemian 1-2 oraz 2-3 entropia czynnika wzrasta, co oznacza, że w czasie tych przemian doprowadzane jest ciepło:

$$dS = \frac{dQ_{do}}{T_g} \quad (1)$$



Rys. 1. Obieg termodynamiczny silnika na wykresach w układach o współrzędnych T-S i p-V

Źródło: Opracowanie Autora

Fig. 1. The thermodynamic cycle of the engine on the graphs in co-ordinate systems T-S and p-V

Source: Elaboration of the Author

W wyniku kolejnych przemian 3-4 i 4-1 entropia maleje aż do stanu początkowego 1

$$dS = \frac{-dQ_{od}}{T_d}, \quad (2)$$

to znaczy, w tym okresie ciepło jest odprowadzane od czynnika. Pole 1-2-3-c-a-1 przedstawia ciepło doprowadzone Q_{do} do czynnika, a pole 3-c-a-1-4-3 ciepło odprowadzone (oddane) Q_{od} przez układ.

Różnica $Q_{do} - Q_{od}$ jest ciepłem obiegu. W przypadku obiegu według rysunku 1, otrzymamy

$$Q_{do} = Q_{1-2} + Q_{2-3}, \quad (3)$$

$$Q_{od} = Q_{3-4} + Q_{4-1}. \quad (4)$$

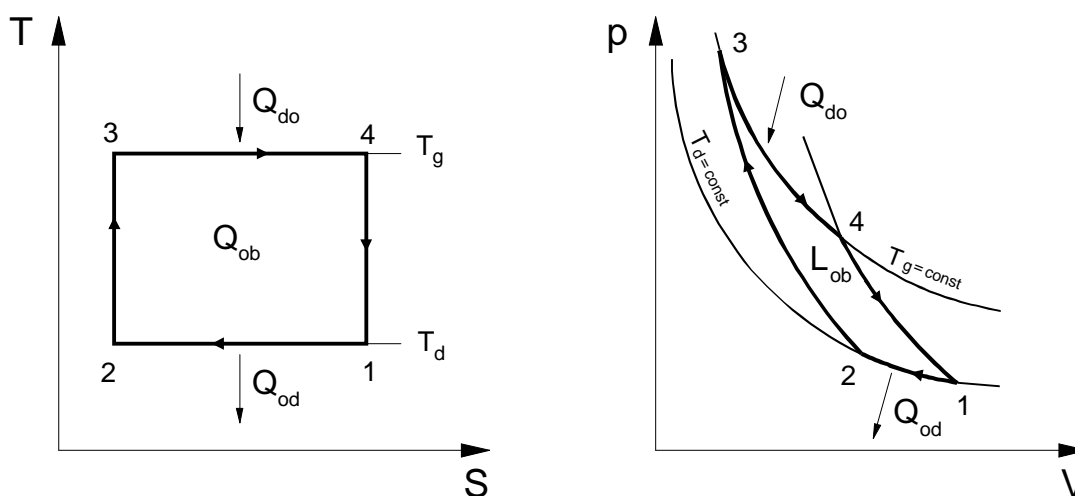
Po zrealizowaniu obiegu stan czynnika roboczego jest taki sam jak na początku obiegu, a więc przyrost entropii czynnika jest równy zero. Chcąc uzyskać stan początkowy obiegu konieczne jest odprowadzenie ciepła w takiej ilości, aby entropia czynnika zmniejszyła się do stanu wyjściowego.

Z powyższego wynika wniosek, że aby zrealizować obieg silnika nie wystarczy tylko dostarczać ciepło, lecz konieczne jest też odprowadzanie ciepła. Pierwsza zasada termodynamiki nie wnosi takiego warunku do możliwości realizacji obiegu, więc konieczne było sformułowanie drugiej zasady termodynamiki, która uwzględnia powyższe zastrzeżenia. Mikołaj Leonard Sadi Carnot sformułował ją następująco: silnik cieplny nie może pracować nie pobierając ciepła ze „źródła ciepła” i nie oddając go do „źródła zimna”.

Obieg składający się z przemian odwracalnych jest również odwracalny, natomiast gdy w obiegu jest chociaż jedna przemiana nieodwracalna cały obieg jest nieodwracalny.

Przykładem obiegu odwracalnego jest obieg Carnota składający się z dwóch przemian izotermicznych i dwóch przemian izentropowych (Rys. 2).

Odwracalność obiegu wynika z tego, że przemiany izentropowe są odwracalne a przemiany izotermiczne odbywają się w ten sposób, że podczas doprowadzania ciepła temperatura czynnika jest równa temperaturze T_g górnego źródła ciepła (nie ma spadku temperatury) oraz w czasie odprowadzania ciepła czynnika ma temperaturę T_d dolnego źródła ciepła. Wszystkie przemiany tego obiegu są, więc odwracalne.



Rys. 2. Obieg silnikowy Carnota na wykresach o współrzędnych p-V oraz T-S

Źródło: Opracowanie Autora

Fig. 2. Carnot engine cycle on the graphs in co-ordinate systems p-V and T-S

Source: Elaboration of the Author

W obiegach silników przemiany przebiegają zgodnie z ruchem wskazówek zegara, co widać na rysunkach 1 i 2.

W literaturze spotkać można określenia obieg prawobieżny lub prawy. W maszynach i urządzeniach energetycznych nie będących silnikami obiegi są lewobieżne, to znaczy, przemiany przebiegają w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara.

2. Obieg chłodziarki i pompy grzewczej

Oprócz silników stosowane są urządzenia działające odwrotnie. Do takich urządzeń doprowadzana jest energia, przeważnie w formie pracy, po to aby pobierać ciepło ze źródła o niskiej temperaturze T_d i odprowadzać ciepło do przestrzeni o wyższej temperaturze T_g . Do tego typu urządzeń zalicza się m.in. chłodziarki (ziębiarki) i pompy grzewcze (cieplne).

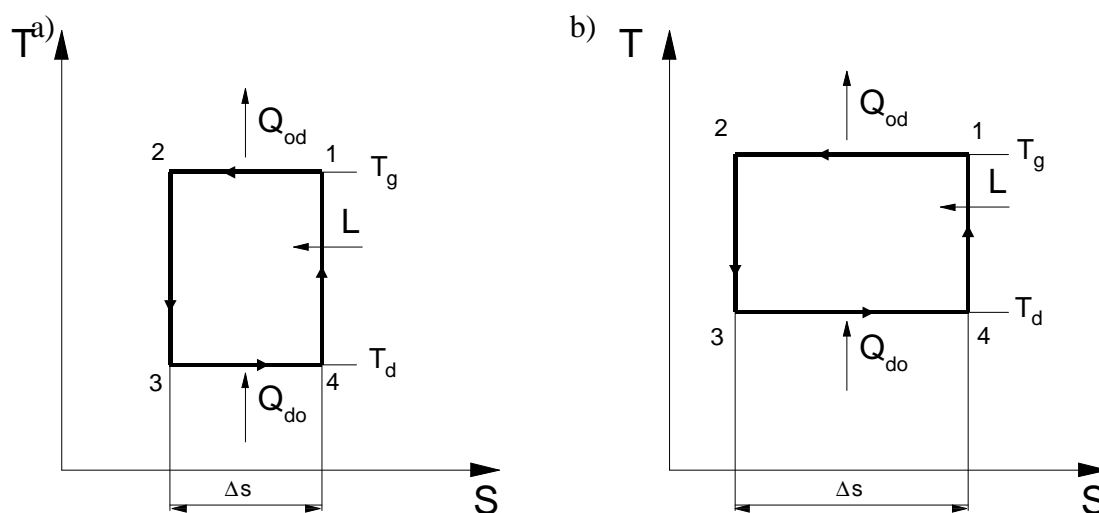
Zastosowanie chłodziarek jest obecnie bardzo rozpowszechnione, a ich rola polega na pobieraniu ciepła z miejsca chłodzenia i odprowadzanie go do otoczenia o wyższej temperaturze.

Pompy grzewcze służą do ogrzewania pomieszczeń lub urządzeń przemysłowych. Działanie pompy grzewczej polega na tym, że doprowadzana praca powoduje pobieranie ciepła z otoczenia o niskiej temperaturze (w praktyce minimum kilka stopni Celsjusza powyżej zera) i dostarczanie ciepła do przestrzeni ogrzewanej, mającej wyższą temperaturę.

Z punktu widzenia przepływu ciepła działanie chłodziarki i pompy grzewczej jest identyczne a różnica występuje tylko w wartościach temperatury T_d dolnego źródła ciepła.

Obieg chłodniczy lub obieg grzewczy jest lewobieżny i może składać się z różnych przemian termodynamicznych.

Najlepsze efekty pracy tych urządzeń można by uzyskać w przypadku zastosowania obiegu odwracalnego Carnota, pokazanego na rysunku 3.



Rys. 3. Obiegi Carnota na wykresach o współrzędnych T-S: a - chłodziarki, b - grzewczej

Źródło: Opracowanie Autora

Fig. 3. Carnot cycles on graphs with T-S coordinates system: a - cooling, b - heating

Source: Elaboration of the Author

Na tym rysunku widoczne są różnice temperatur T_d dolnego źródła ciepła chłodziarki i pompy grzewczej. Na ogół w chłodziarkach temperatura dolnego źródła ciepła jest znacznie niższa od temperatury T_{ot} otoczenia tzn. $T_d < T_{ot}$, natomiast w pompach grzewczych na ogół temperatura $T_d = T_{ot}$.

3. Sprawność obiegu

Ogólnie sprawność jakiegoś obiegu termodynamicznego można zdefiniować jako stosunek ilości energii będącej przedmiotem zainteresowania, w celu osiągnięcia określonego efektu, do ilości energii doprowadzonej (zużytej) do realizacji tego celu. Energią może być ciepło lub praca.

3.1. Sprawność termiczna obiegu silnika

Sprawność termiczna obiegu silnika jest to stosunek pracy wykonanej przez czynnik termodynamiczny do ciepła doprowadzonego w celu wykonania tej pracy:

$$\eta_t = \frac{L_{ob}}{Q_{do}} = \frac{Q_{do} - |Q_{od}|}{Q_{do}} = 1 - \frac{|Q_{od}|}{Q_{do}}. \quad (5)$$

W celu ułatwienia obliczeń we wzorach na sprawność posługujemy się wartościami bezwzględnymi. W powyższym przypadku, zgodnie z umową, ciepło odprowadzane Q_{od} miałyby wartość ujemną.

Wykazano, że aby zrealizować obieg silnika konieczne jest odprowadzenie pewnej części ciepła do dolnego źródła.

Po podstawieniu do wzoru (5) wartości $Q_{od} > 0$, sprawność termiczna będzie zawsze mniejsza od jedności ($\eta_t < 1$).

Nierealny silnik o sprawności termicznej równej jedności nazwano perpetuum mobile drugiego rodzaju.

Uczony niemiecki W. Ostwald jest autorem stwierdzenia, że perpetuum mobile drugiego rodzaju jest niemożliwe i zostało przyjęte jako jedno ze sformułowań drugiej zasady termodynamiki.

Sprawność silnika pracującego według obiegu Carnota (Rys. 2), po podstawieniu do wzoru (5) wartości ciepła doprowadzonego i odprowadzonego określamy wzorami:

$$Q_{do} = T_g \cdot (S_4 - S_3), \quad (6)$$

$$|Q_{od}| = T_d \cdot (S_1 - S_2), \quad (7)$$

ma postać

$$\eta_t = 1 - \frac{T_d \cdot (S_1 - S_2)}{T_g \cdot (S_4 - S_3)}. \quad (8)$$

Ponieważ

$$S_1 - S_2 = S_4 - S_3 \quad (9)$$

otrzymuje się

$$\eta_t = 1 - \frac{T_d}{T_g}. \quad (10)$$

Z powyższego wzoru wynika, że sprawność termiczna silnika może być zwiększona przez podniesienie temperatury ciepła doprowadzanego (górnego) i obniżenie temperatury ciepła odprowadzanego (dolnego).

Górna temperatura czynnika ograniczona jest wytrzymałością termiczną materiałów silnika, a dolna temperatura obiegu nie może być niższa od temperatury otoczenia.

Sprawność obiegu nieodwracalnego jest mniejsza od sprawności obiegu odwracalnego, gdyż część pracy czynnika wskutek tarcia ulegnie rozproszeniu:

$$\eta_{t_n} = \frac{L_{ob} - L_f}{Q_{do}} < \frac{L_{ob}}{Q_{do}}. \quad (11)$$

3.2. Sprawność energetyczna obiegu chłodniczego

Sprawność termiczna chłodziarki lub pompy grzewczej, dla odróżnienia od sprawności silnika, nazywana jest sprawnością energetyczną obiegu lub współczynnikiem wydajności obiegu wstecznego.

Przeznaczeniem chłodziarki jest pobieranie ciepła z dolnego źródła (chłodzenie np. żywności). Realizacja tego zadania wymaga doprowadzenia pracy. Chłodziarka jest tym lepsza im więcej ciepła odprowadzi z komory chłodniczej przy wykonaniu takiej samej ilości pracy.

Miarą oceny jest więc stosunek ciepła Q_{do} pobranego z przestrzeni ziębionej do pracy napędowej $|L|$, nazywany sprawnością energetyczną chłodziarki:

$$\epsilon_{ch} = \frac{Q_{do}}{|L|} = \frac{Q_{do}}{|Q_{od}| - Q_{do}}. \quad (12)$$

Jeżeli obieg realizowany jest jako odwracalny według obiegu Carnota (Rys. 3a) wówczas sprawność wynosi:

$$\epsilon_{ch} = \frac{T_d \cdot \Delta S}{T_g \cdot \Delta S - T_d \cdot \Delta S} = \frac{T_d}{T_g - T_d}, \quad (13)$$

gdzie

$$S_1 - S_2 = S_3 - S_4 = \Delta S. \quad (14)$$

Sprawność chłodziarki może być większa lub mniejsza od jedności.

3.3. Sprawność energetyczna obiegu grzewczego

Zadaniem pompy grzewczej jest dostarczenie ciepła do pomieszczeń celem ich ogrzewania.

Sprawność energetyczna pompy grzewczej jest to stosunek ciepła Q_{od} oddanego do ogrzewanej przestrzeni do pracy napędowej $|L|$:

$$\epsilon_{pg} = \frac{|Q_{od}|}{|L|} = \frac{|Q_{od}|}{|Q_{od}| - Q_{do}}. \quad (15)$$

W przypadku pracy pompy grzewczej według obiegu Carnota (Rys. 3b):

$$\epsilon_{pg} = \frac{|Q_{od}|}{|Q_{od}| - Q_{do}} = \frac{T_g \cdot \Delta S}{T_g \cdot \Delta S - T_d \cdot \Delta S} = \frac{T_g}{T_g - T_d}. \quad (16)$$

Sprawność pompy grzewczej jest zawsze większa od jedności:

$$\epsilon_{pg} > 1. \quad (17)$$

W przypadku obiegów nieodwracalnych można wykazać (tak jak dla silnika), że sprawności chłodziarki i pompy grzewczej będą mniejsze niż w obiegu odwracalnym:

$$\epsilon_{ch_n} < \epsilon_{ch}, \quad (18)$$

$$\epsilon_{pg_n} < \epsilon_{pg}. \quad (19)$$

4. Sformułowania drugiej zasady termodynamiki

Zjawiska termodynamiczne przebiegają według zasad obowiązujących w przyrodzie.

W poprzednich artykułach zostały opisane pierwsza zasada termodynamiki, pewnik równowagi, zerowa zasada termodynamiki oraz zasady przebiegu innych zjawisk [1]-[7].

W niektórych procesach konieczne jest spełnienie, oprócz wyżej wymienionych, jeszcze innych warunków, aby dane zjawisko mogło być zrealizowane.

Warunki, które muszą być dodatkowo spełnione przy realizacji różnych zjawisk zostały określone eksperymentalnie i ujęte pod nazwą drugiej zasady termodynamiki.

Poniżej podano kilka sformułowań drugiej zasady termodynamiki [8]-[14]:

➤ według R. Clausiusa

Ciepło nie może samorzutnie przejść od ciała o temperaturze niższej do ciała o temperaturze wyższej.

➤ według E. Schmidta

Nie można całkowicie odwrócić przemiany w której występuje tarcie.

➤ twierdzenie ogólne

Entropia układu zamkniętego i izolowanego nie może maleć przy dowolnej przemianie i wzrasta przy przemianach nieodwracalnych.

➤ według M. Plancka

Nieemożliwe jest skonstruowanie periodycznie działającej maszyny (według obiegu zamkniętego), której działanie polegałoby tylko na podnoszeniu ciężaru i równoczesnym ochładzaniu jednego źródła ciepła.

➤ według W. Ostwalda

Perpetuum mobile drugiego rodzaju jest niemożliwe.

➤ według W. Thomsona

Nie jest możliwe działanie maszyny, która z jednego zbiornika pobiera ciepło i zamienia je na pracę, bez tego, aby biorące udział w tym ciała nie przechodziły jeszcze innych zmian.

Można wykazać, że każde podane wyżej sformułowanie drugiej zasady termodynamiki jest równoważne z pozostałymi.

Należy zauważyć, że według drugiej zasady termodynamiki, nie można całego ciepła dostarczonego zamienić na pracę w maszynie pracującej w obiegu zamkniętym.

5. Wnioski

- Chcąc uzyskać stan początkowy obiegu konieczne jest odprowadzenie ciepła w takiej ilości, aby entropia czynnika zmniejszyła się do stanu wyjściowego.
- Aby zrealizować obieg silnika nie wystarczy tylko dostarczać ciepło, lecz konieczne jest też odprowadzanie ciepła.
- Obieg składający się z przemian odwracalnych jest również odwracalny, natomiast gdy w obiegu jest chociaż jedna przemiana nieodwracalna cały obieg jest nieodwracalny.
- Obieg chłodniczy lub obieg grzejny jest lewobieżny i może składać się z różnych przemian termodynamicznych.
- Sprawność termiczna silnika może być zwiększona przez podniesienie temperatury ciepła doprowadzanego (górnego) i obniżenie temperatury ciepła odprowadzanego (dolnego).
- Sprawność obiegu nieodwracalnego jest mniejsza od sprawności obiegu odwracalnego, gdyż część pracy czynnika wskutek tarcia ulegnie rozproszeniu.

Wykaz oznaczeń

Symbol	Opis	Jednostka
L	Praca bezwzględna	J
L _{ob}	Praca bezwzględna o danym obiegu silnika	J
L _f	Praca bezwzględna z uwzględnieniem tarcia	J
S	Entropia	J/K
S ₁	Entropia w punkcie 1	J/K
S ₂	Entropia w punkcie 2	J/K
S ₃	Entropia w punkcie 3	J/K
S ₄	Entropia w punkcie 4	J/K
T	Temperatura bezwzględna (w stopniach Kelvina)	K
T _g	Temperatura górnego źródła ciepła (w stopniach Kelvina)	K
T _d	Temperatura dolnego źródła ciepła (w stopniach Kelvina)	K
T _{ot}	Temperatura otoczenia (w stopniach Kelvina)	K
Q	Ciepło	J
Q _{do}	Ciepło dostarczone	J
Q _{od}	Ciepło oddane	J
Q _{ob}	Ciepło w danym obiegu silnika	J
Q ₁₋₂	Ciepło w danym obiegu 1-2	J
Q ₂₋₃	Ciepło w danym obiegu 2-3	J
Q ₃₋₄	Ciepło w danym obiegu 3-4	J
Q ₄₋₁	Ciepło w danym obiegu 4-1	J
S	Entropia	J/K
Δ _s , ΔS	Przyrost entropii właściwej	J/kg·K
ε _{ch}	Sprawność energetyczna chłodziarki w obiegu odwracalnym	–
ε _{pg}	Sprawność energetyczna pompy grzewczej w obiegu odwracalnym	–
ε _{ch_n}	Sprawność energetyczna chłodziarki w obiegu nieodwracalnym	–
ε _{pg_n}	Sprawność energetyczna pompy grzewczej w obiegu nieodwracalnym	–
η _t	Sprawność termiczna	–
η _{ts}	Sprawność termiczna obiegu nieodwracalnego	–

Literatura

- [1] Ochęduszko S.: *Termodynamika stosowana*. Warszawa: WNT, 1974.
- [2] Staniszewski B.: *Termodynamika*. Warszawa: PWN, 1986.
- [3] Szargut J.: *Termodynamika*. Warszawa: PWN, 2000.
- [4] Szargut J.: *Termodynamika techniczna*. Gliwice: Politechnika Śląska, 2013, w. 7.
- [5] Wiśniewski S.: *Termodynamika techniczna*. Warszawa: WNT, 2013.
- [6] Wrzesiński Zb.: *Termodynamika*. Warszawa: Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, 2008, w. 8 pop. i roz.
- [7] Zagórski J.: *Termodynamika*. Warszawa: Politechnika Warszawska, 1974, w. 4.