



Politechnika
Wroclawska

Termodynamiczne podstawy inżynierii cieplnej

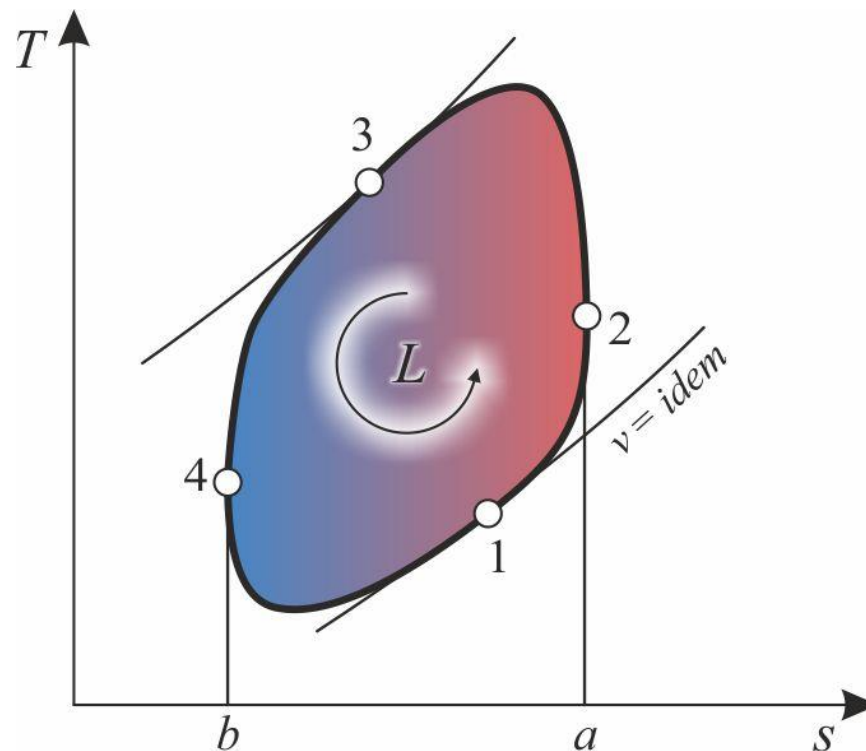
Obiegi lewobieżne.
Wykład 6.

Pojęcie obiegu termodynamicznego

Obieg termodynamiczny

Obieg jest to zespół przemian, po których stan czynnika roboczego powraca do punktu wyjścia.

Identyczny cykl odtwarza się w analogiczny sposób w kolejnych chwilach w ciągu aparatów, maszyn i urządzeń tworzących instalację, w której krąży czynnik roboczy. Czynnik roboczy posiada takie własności, które umożliwiają realizację kolejnych przemian i całego „obiegu”.



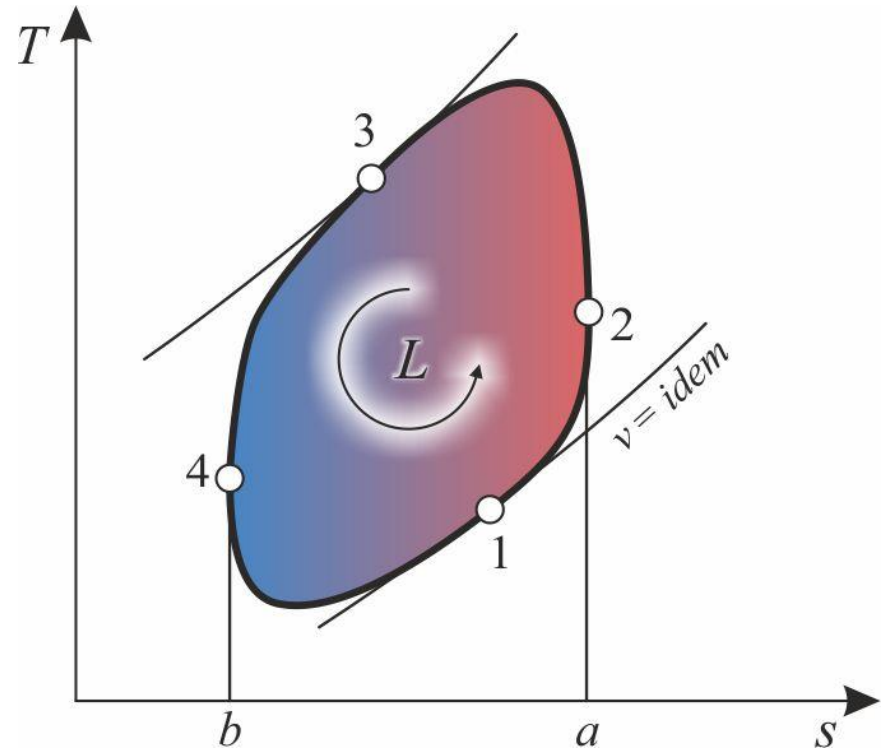
Pojęcie obiegu termodynamicznego

Obieg zamknięty

Pojęcie „obiegu” - (obieganie) czynnika przez te same stany termodynamiczne i powrót do stanu początkowego w każdym cyklu.

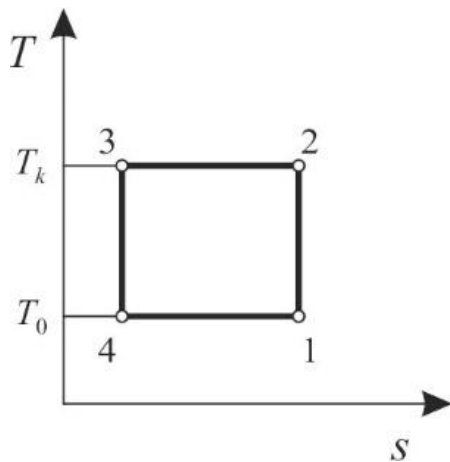
Gdy obieg jest tak realizowany to często mówimy o „**obiegu zamkniętym**”. To pojęcie informuje, że cały czas krąży ten sam czynnik, a jego ilość w obiegu nie ulega zmianie.

Odwzorowaniem graficznym obiegu na wykresie, na którego osiach odłożono parametry stanu konieczne i wystarczające do określenia stanu równowagi czynnika, jest linia zamknięta.

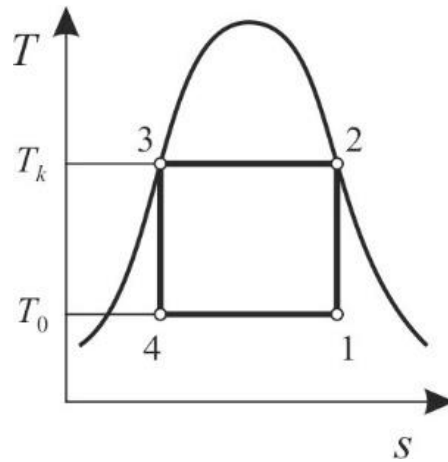


Obiegi lewobieżne

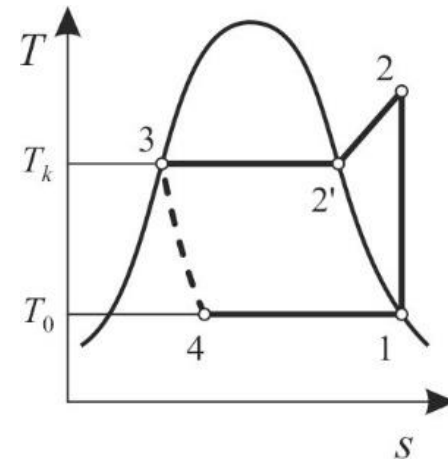
Carnota



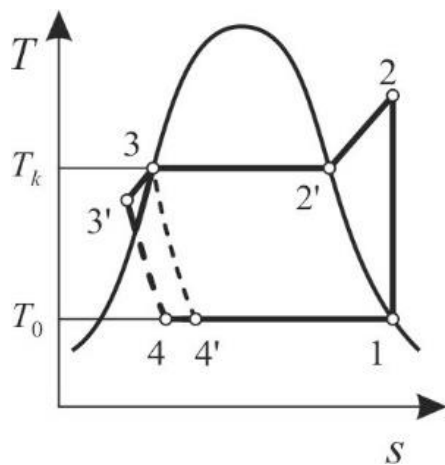
teoretyczny mokry



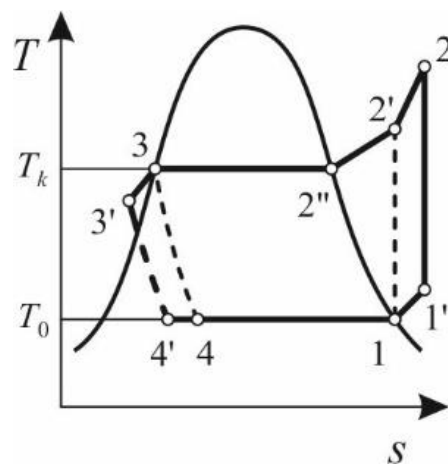
suchy Lindego



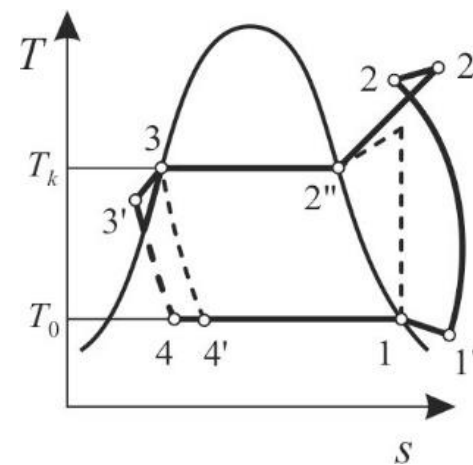
Lindego z dochładzaniem



z rekuperacją ciepła

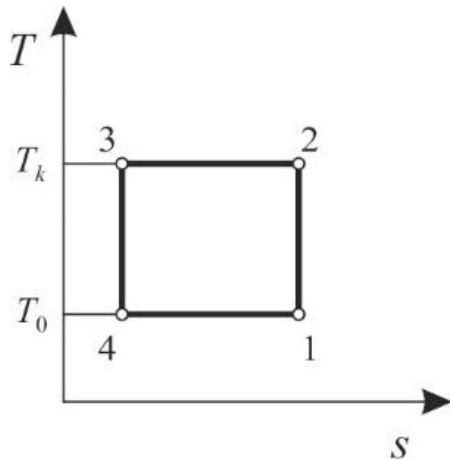


obieg rzeczywisty

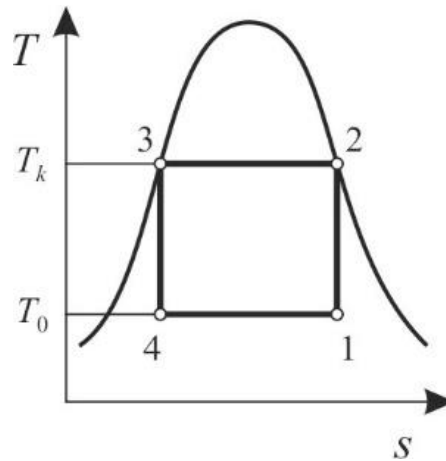


Obiegi lewobieżne

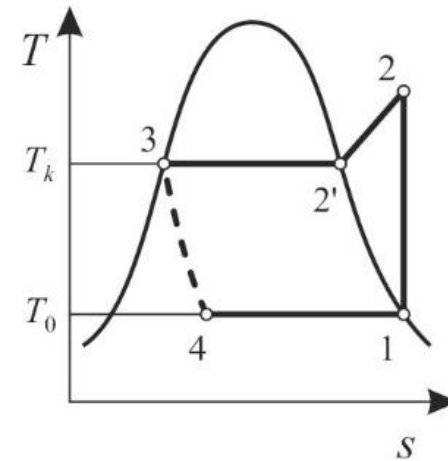
Carnota



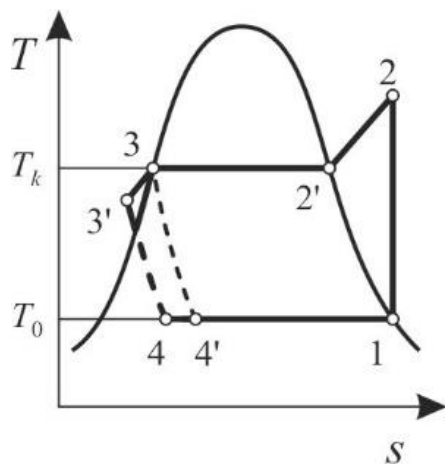
teoretyczny mokry



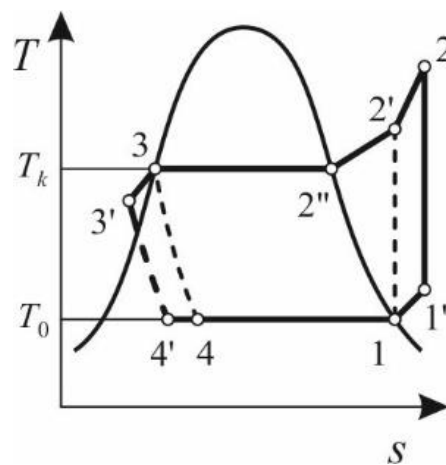
suchy Lindego



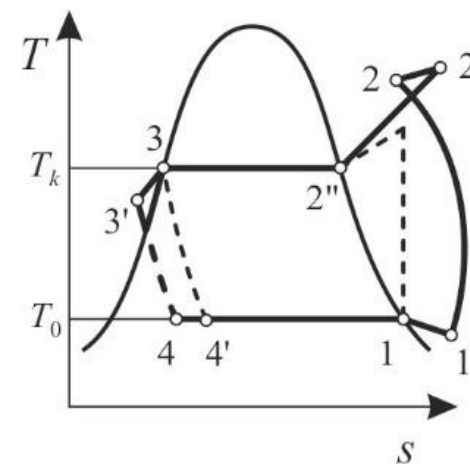
Lindego z dochładzaniem



z rekuperacją ciepła

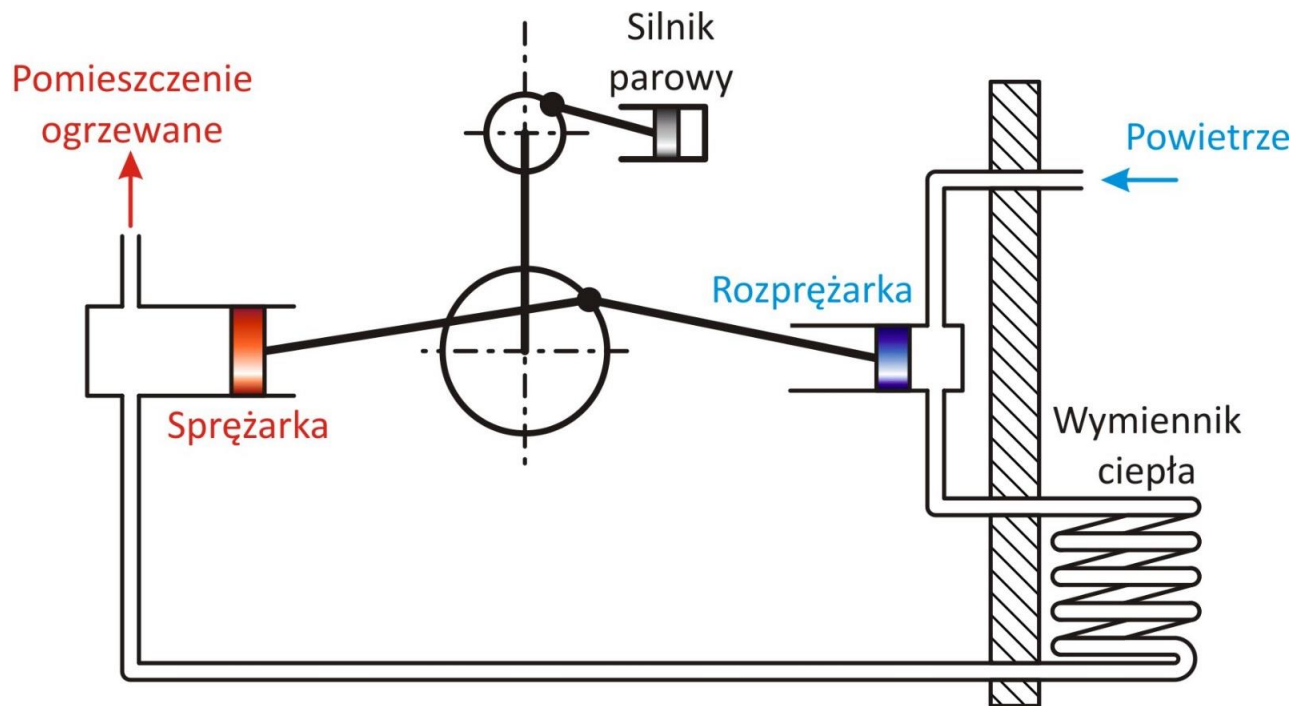


obieg rzeczywisty



Obieg Otwarty:

Może zaistnieć przypadek, że kolejnym przemianom poddawana jest nowa porcja czynnika, która nie osiągając stanu początkowego opuszcza instalację. Wtedy mówimy o „**obiegu otwartym**”, dla jednoznacznego podkreślenia, że obieg się nie „zamyka”, a stan czynnika na wylocie nie osiąga stanu na wlocie.



Pojęcie obiegu termodynamicznego

W opisie jakościowym - cztery różne formy znaczeniowe.

Pierwsza - nawiązuje do **kierunku pracy** – doprowadzanej lub odprowadzanej z obiegu.

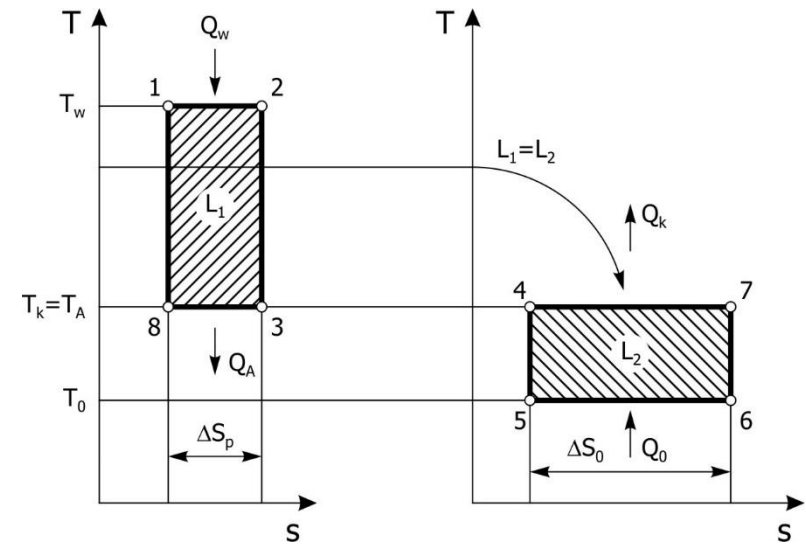
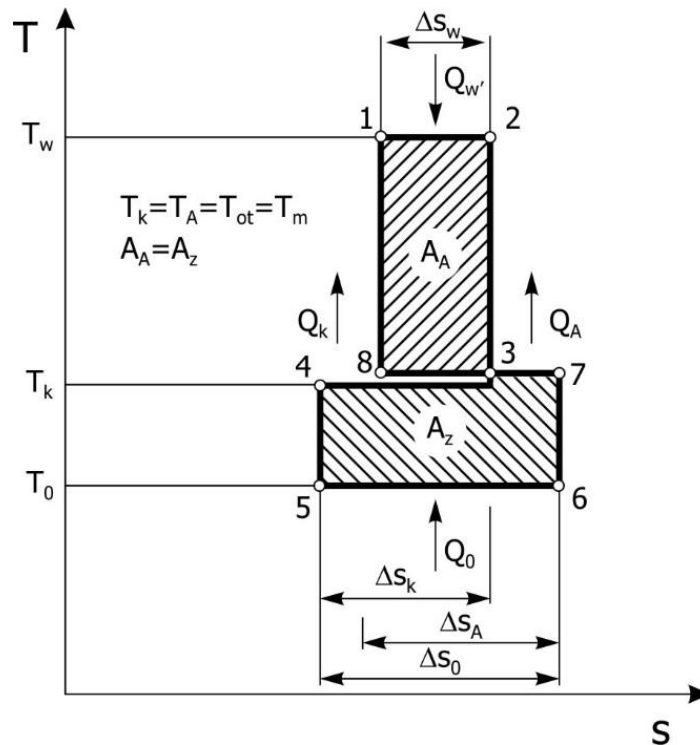
Uzyskanie efektu ziębienia czyli realizacja obiegu ziębniczego wymaga doprowadzenia pracy do obiegu. Obieg utworzony jest w ciągu przemian przebiegających (np. we współrzędnych $T-s$) w kierunku przeciwnym do prawobieżnego ruchu wskazówek zegara. Wtedy mówimy o **obiegu lewobieżnym**, obiegu ziębniczym lub obiegu pompy ciepła.

Obiegiem przeciwnym jest obieg silnika, od którego praca jest odprowadzana, a przemiany następują po sobie w takiej kolejności, że można mówić o **obiegu prawobieżnym** lub obiegu silnika cieplnego.



Pojęcie obiegu termodynamicznego

Druga - w ziębiarkach napędzanych energią cieplną mamy obiegi podwójne: obieg silnika cieplnego i obieg właściwy ziębiarki. Pojęcie „Obieg” – będzie dotyczyło tych dwóch podobiegów.



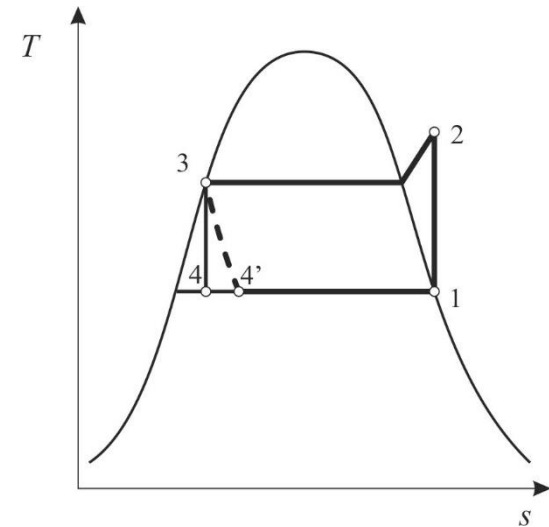
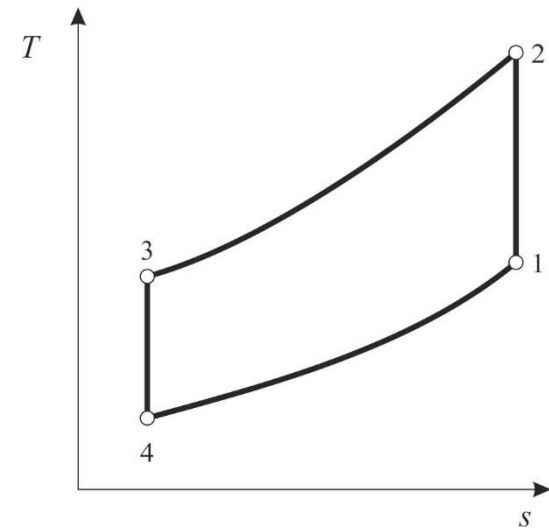
Pojęcie obiegu termodynamicznego

Trzecia - związana jest z rodzajem czynnika obiegowego.

Możemy więc rozpatrywać

- **obieg gazowy**, kiedy czynnikiem jest gaz, a jeszcze dokładniej obieg powietrzny;
- **obieg parowy**, kiedy czynnikiem obiegowy zmienia stan skupienia: ciecż-para.

Obieg parowy jest tak powszechny w sorpcyjnych i sprężarkowych systemach ziębienia, że gdy wymienia się termin „obieg ziębiarki sprężarkowej” lub „obieg ziębiarki absorpcyjnej” to z góry wiadomo, że jest to obieg parowy.

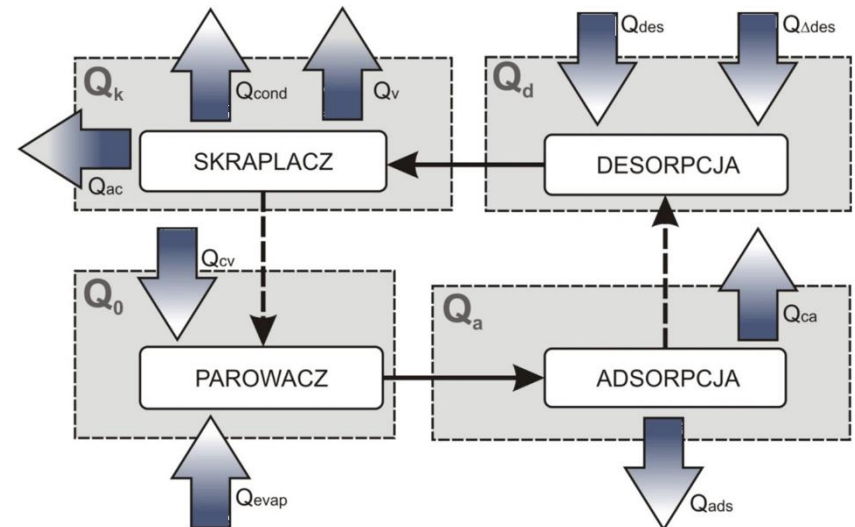


Pojęcie obiegu termodynamicznego

Czwarta - utożsamia pojęcie obiegu z zasadą działania systemu ziębienia. Dlatego słowo obieg, uzupełnione w niezbędne informacje dotyczące sposobu realizacji procesu, w znacznym stopniu określa zasadę działania urządzenia ziębniczego (ziębiarki).

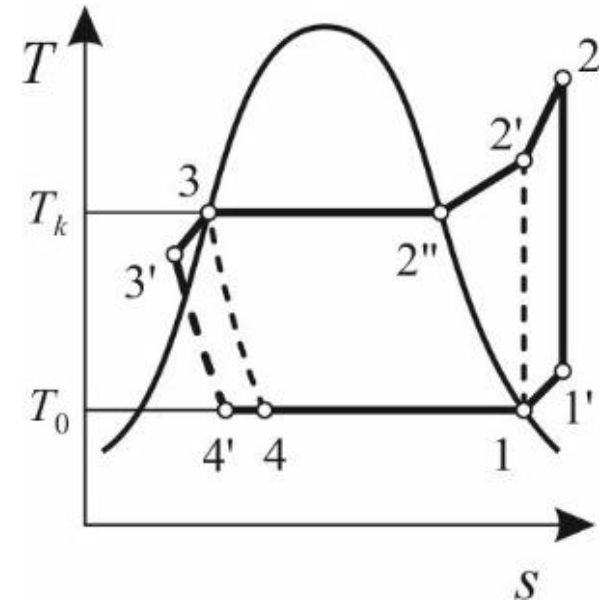
A więc występują obiegi:

- ziębiarki sprężarkowej,
- ziębiarki absorpcyjnej,
- ziębiarki gazowej,
- ziębiarki resorpcyjnej,
- ziębiarki adsorpcyjnej.



Pojęcie obiegu termodynamicznego

W celu ułatwienia ilościowego opisu obiegów wykorzystuje się pojęcie obiegu porównawczego. Są to różnego rodzaju obiegi, o różnym stopniu uproszczeń, które można obliczyć na podstawie analizy teoretycznej bez konieczności badań eksperymentalnych. Jest ich wiele, a różnica wynika ze stopnia przybliżenia do obiegu realizowanego w rzeczywistej ziębiarce lub pompie ciepła.



Pojęcie obiegu termodynamicznego

W termodynamice obiegów wprowadzone są pojęcia **obiegów odwracalnych** i **obiegów nieodwracalnych**. Dotyczą one w takim samym stopniu obiegów lewobieżnych jak i obiegów silników cieplnych.

Obieg można nazwać **odwracalnym** wtedy, gdy wszystkie przemiany składowe są odwracalne, czyli przebiegają bez strat, a wymiana ciepła pomiędzy źródłami dolnym i górnym a czynnikiem obiegowym zachodzi przy nieskończonej małej różnicy temperatur $\Delta T = 0$.

Jeżeli warunki te nie są spełnione obieg jest **nieodwracalny**.

Przyczyny nieodwracalności :

(nieodwracalność wewnętrzna): tarcie wewnętrzne cząstek czynnika, opory przepływu, reakcje chemiczne, mieszanie, niespełnienie warunków równowagi termodynamicznej;

(nieodwracalność zewnętrzna): wymiana ciepła przy skończonej różnicy temperatur.

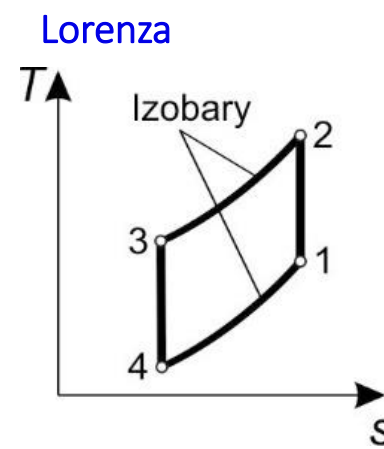
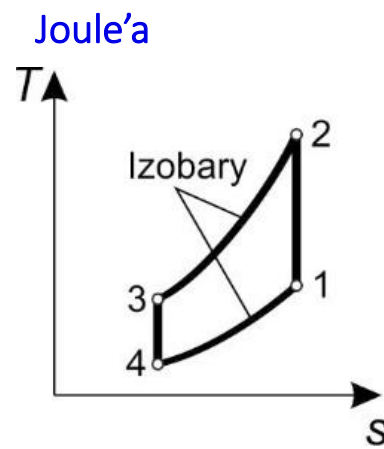
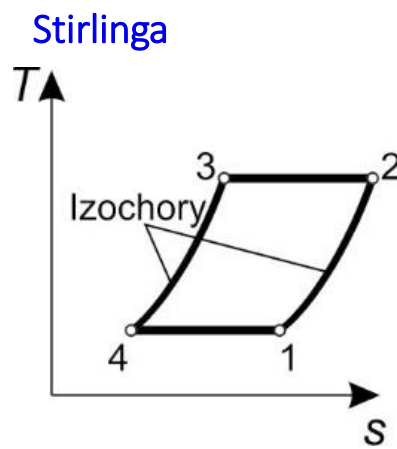
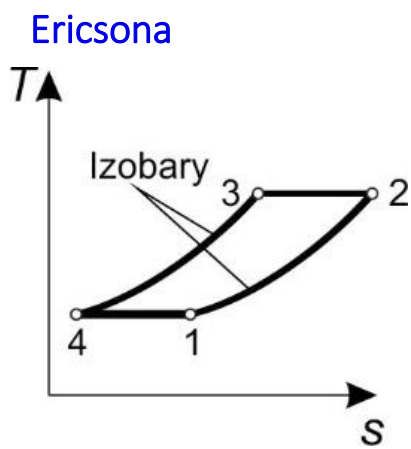
Wszystkie obiegi realizowane w urządzeniach rzeczywistych są obiegami nieodwracalnymi.

Pojęcie obiegu termodynamicznego

Podstawowym obiegiem dla opisu termodynamicznego jest obieg **Carnota**. Jest to tzw. **obieg idealny**, a więc ze wszystkimi przemianami odwracalnymi. Do tej samej grupy obiegów idealnych można zaliczyć obięgi: **Ericsona**, **Stirlinga**, **Joule'a**, **Lorenza**.

Przyczyną szerokiego stosowania obiegu **Carnota** jako obiegu porównawczego jest fakt, że może on być opisany za pomocą dwóch parametrów intensywnych: temperatury źródła górnego T_g i temperatury źródła dolnego T_d .

Obięgi idealne mają też swoje niedogodności np. nie opisują wystarczająco dokładnie obiegów rzeczywistych realizowanych w urządzeniach ziębiących.

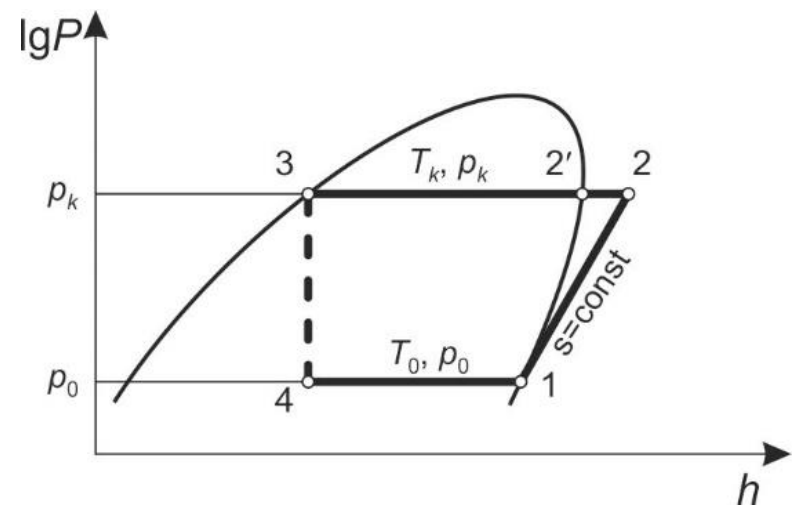


Pojęcie obiegu termodynamicznego

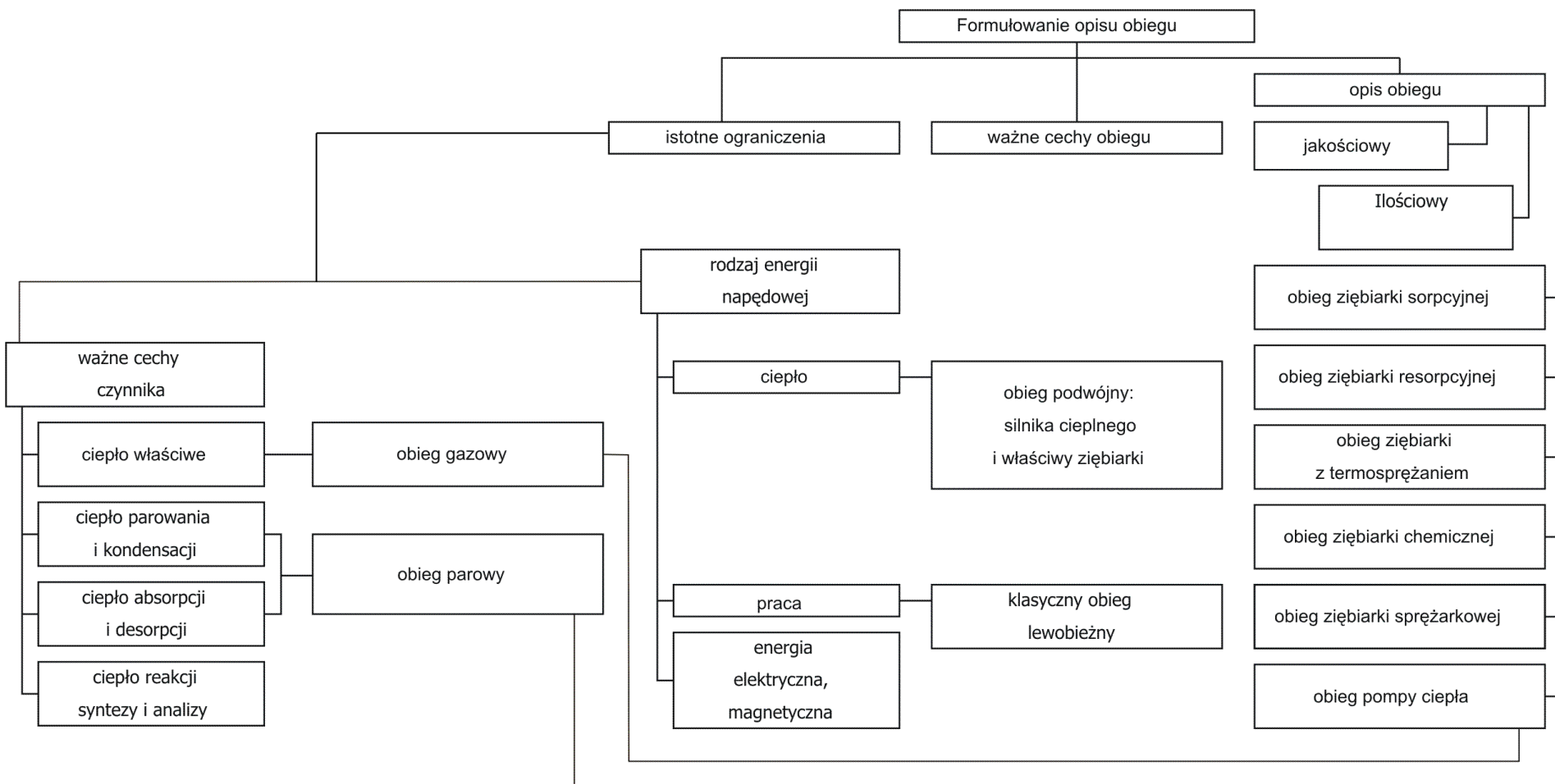
Do celów porównawczych i analitycznych tworzone są inne **obieg**, zwane **teoretycznymi**, zawierającymi jedną lub kilka przemian nieodwracalnych.

Można zatem opisać i używać pojęcia np. teoretyczny obieg ziębiarki sprężarkowej czy pompy ciepła, ale pełną jego jednoznaczność określa nazwa szczegółowa np. „obieg Lindego”, który w sposób jednoznaczny definiuje stany i przemiany termodynamiczne czynnika obiegowego.

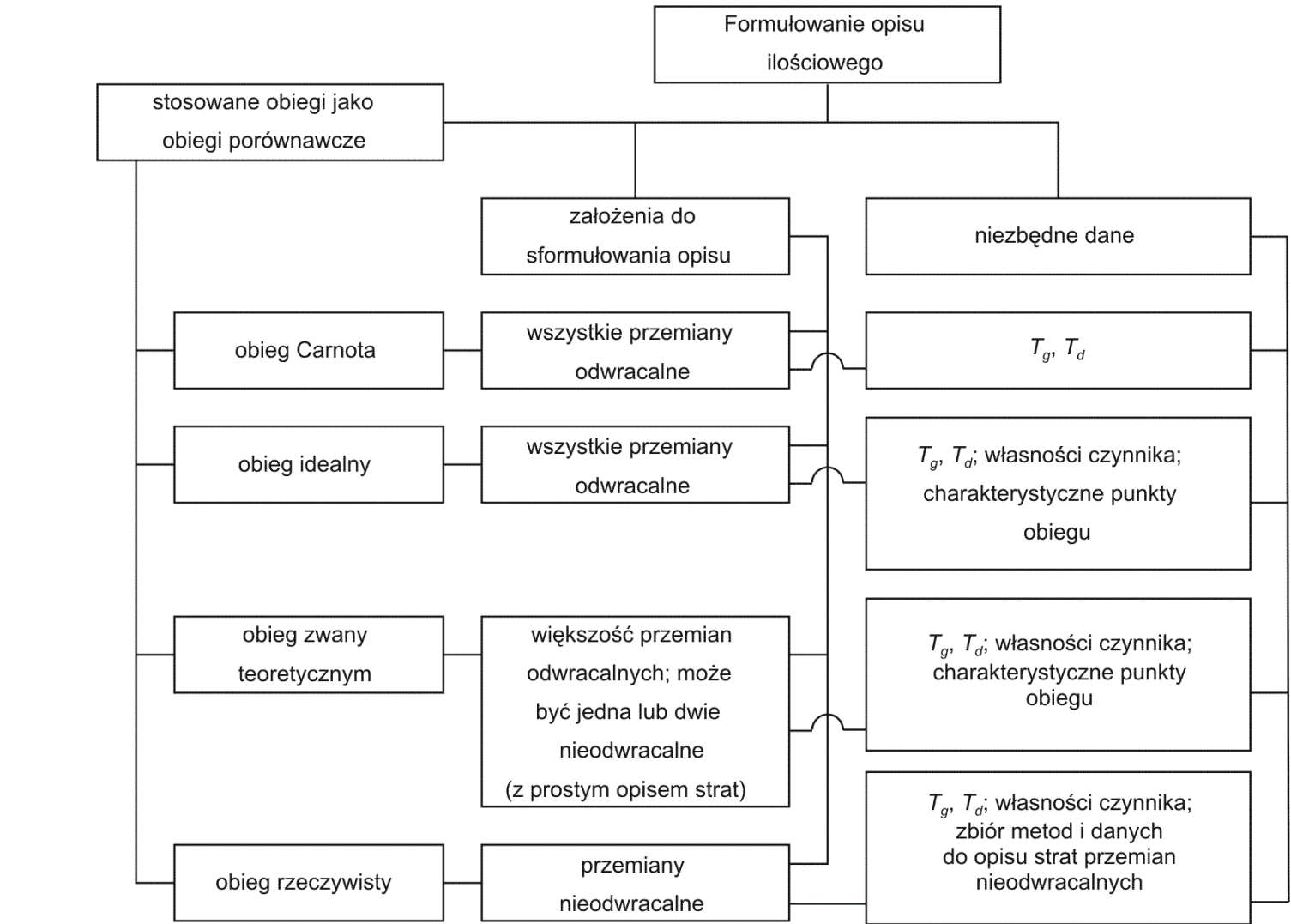
Można też używać pojęcia teoretycznego obiegu ziębiarki sorpcyjnej z izobaryczno-izotermicznymi procesami sorpcji, nieodwracalną przemianą dławienia, nieodwracalnymi procesami wymiany ciepła i związanymi z nimi stratami w regeneracyjnych wymiennikach ciepła.



Uwarunkowania i powiązania prowadzące do określenia i opisu obiegu



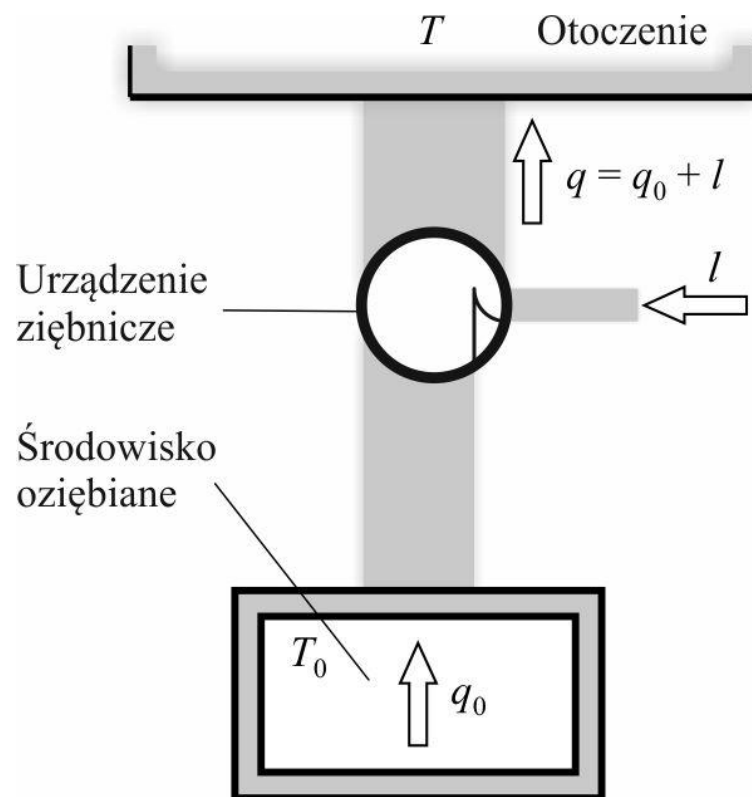
Możliwość formułowania opisu na różnych poziomach



Odwracalny obieg ziębniczy realizowany przy niezmiennej temperaturze źródeł ciepła

Ideowy schemat działania układu ziębienia, w którym może zostać zrealizowany obieg odwracalny przedstawiono na rysunku.

Ze środowiska o stałej temperaturze T_0 , które można nazwać środowiskiem oziębianym, czynnik ziębniczy – pobiera pewną ilość energii cieplnej q_0 , która zostaje odprowadzona do otoczenia o stałej temperaturze T .



Odwracalny obieg ziębniczy realizowany przy niezmienniej temperaturze źródeł ciepła

Równanie przyrostu entropii Δs , J/(kg·K), w odniesieniu do 1 kg czynnika ziębniczego można zapisać w postaci

$$\Delta s = \frac{-q_o}{T_o} + \frac{q_o}{T} + \frac{l_{\min}}{T} \geq 0$$

gdzie:

- q_o – ilość energii cieplnej pobrana ze źródła dolnego (środowiska oziębianego) odniesiona do 1 kg czynnika obiegowego, J/kg,
- T – bezwzględna temperatura źródła górnego (otoczenia), K,
- T_o – bezwzględna temperatura źródła dolnego (środowiska oziębianego), K,
- l_{\min} – minimalna jednostkowa praca obiegu, J/kg.

Przekształcając zależność pod kątem minimalnej pracy obiegu, otrzymuje się

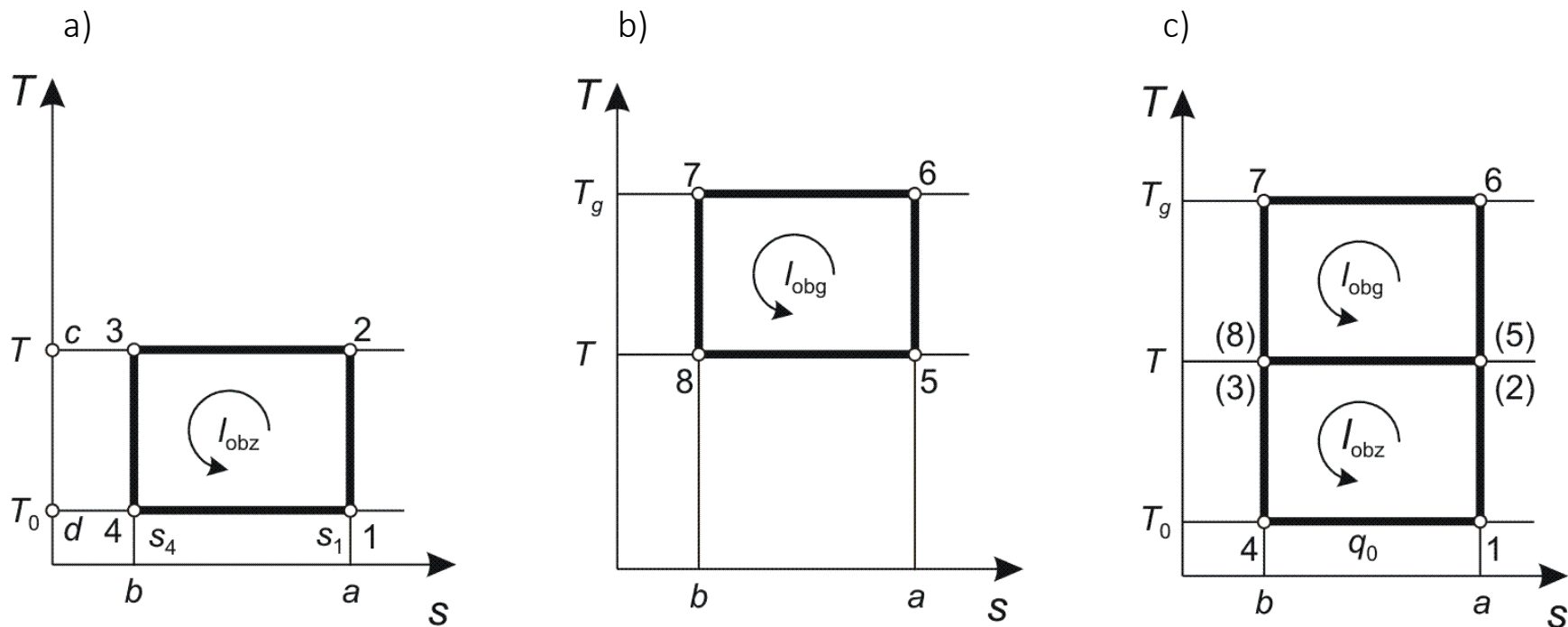
$$l_{\min} = q_o \frac{T - T_o}{T_o}$$

Jeżeli założymy, że $\Delta s = 0$, czyli dla przypadku obiegu odwracalnego nierówność ta przyjmuje postać

$$l_{\min} \geq q_o \frac{T - T_o}{T_o}$$

Zależność określa minimalną pracę obiegu, która jest równa pracy obiegu Carnota „wstecz” realizowanego w zakresie równoważnych temperatur od T_o do T .

Odwracalny obieg ziężniczy realizowany przy niezmienniej temperaturze źródeł ciepła



Obieg Carnota wstecz: a) ziężniczy, b) grzejny (pompy ciepła), c) skojarzony ziężno-grzejny

Odwracalny obieg ziębniczy realizowany przy niezmienniej temperaturze źródeł ciepła

W ciągłym obiegu odwracalnych przemian, przy których następuje przekazywanie energii cieplnej q_o ze środowiska o stałej temperaturze T_o do otoczenia o wyższej od niej stałej temperaturze T , zużyta zostaje praca obiegu równa różnicy między pracą sprężania i rozprężania czynnika ziębniczego

$$l_{obz} = l_{1-2} - l_{3-4}$$

Wartość tej pracy, najczęściej pracy mechanicznej, l_{obz} jest proporcjonalna do pola 1-2-3-4 i odpowiada pracy l_{min} . Zgodnie z zasadą zachowania energii dla układu realizującego obieg ziębniczy spełniona jest równość

$$q = q_o + l_{obz}$$

lub

$$l_{obz} = q - q_o$$

gdzie:

- q – ilość energii cieplnej przekazana do źródła górnego w odniesieniu do 1 kg czynnika ziębniczego, J/kg.

Odwracalny obieg ziębniczy realizowany przy niezmienniej temperaturze źródeł ciepła

Efektywność energetyczną obiegu ziębniczego określa tzw. współczynnik efektywności energetycznej oznaczany jako *COP* (Coefficient of Performance) lub ε . Analogicznie do pojęcia sprawności obiegów silników cieplnych współczynnik efektywności ziębniczej ε równy jest stosunkowi zamierzonego efektu ziębniczego, tj. wydajności ziębniczej, do pracy obiegu

$$\varepsilon = \frac{q_o}{l_{obz}}$$

Wydajność ziębnicza q_o odniesiona do jednostki masy czynnika ziębniczego nazywana jest jednostkową (właściwą) wydajnością ziębienia.

Dla lewobieźnego obiegu Carnota współczynnik efektywności ziębniczej wynosi

$$\varepsilon_C = \frac{T_o(s_1 - s_4)}{T(s_1 - s_4) - T_o(s_1 - s_4)} = \frac{T_o}{T - T_o}$$

Odwracalny obieg żiębniczy realizowany przy niezmienniej temperaturze źródeł ciepła

Z analizy poprzedniego wzoru wynika, że dla danej temperatury T współczynnik efektywności żiębniczej jest tym większy, im wyższa jest temperatura T_o . A dla danej temperatury T_o tym wyższa im niższa jest wartość temperatury T . Wpływ wielkości T i T_o na wartość współczynnika efektywności żiębniczej można najlepiej ocenić, różniczkując powyższe wyrażenie względem T_o i T

$$\left| \frac{\partial \varepsilon_c}{\partial T_o} \right|_T = \frac{T}{(T - T_o)^2}$$

oraz

$$\left| \frac{\partial \varepsilon_c}{\partial T} \right|_{T_o} = \frac{T_o}{(T - T_o)^2}$$

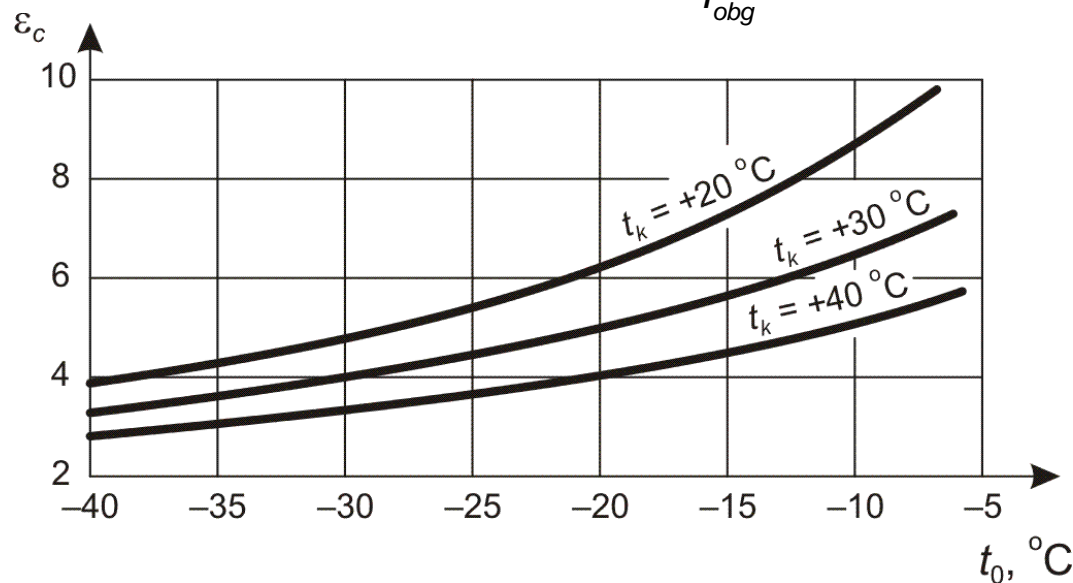
Ponieważ $T > T_o$ zatem zmiana temperatury środowiska oziębianego T_o ma większy wpływ na wielkość ε_c niż zmiana temperatury otoczenia T .

Odwracalny obieg ziębniczy realizowany przy niezmienniej temperaturze źródeł ciepła

W pompach ciepła zamierzonym efektem obiegu lewobieżnego jest odprowadzanie energii cieplnej o wyższym potencjale (przy temperaturze T_g). Pozwala to na jej użyteczne wykorzystanie, np. do grzania wody użytkowej, ogrzewania pomieszczeń itp. Efektywność energetyczną określa współczynnik efektywności grzejnej φ_g zdefiniowany jako ilość uzyskanego ciepła q_g (pole a-6-7-b) do pracy obiegu grzejnego l_{obg} (pole 5-6-7-8)

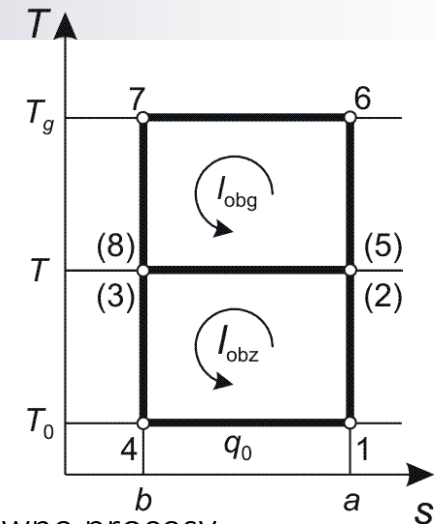
$$\varphi_g = \frac{q_g}{l_{obg}}$$

$$\varphi_g = \frac{T_g}{T_g - T}$$



Wpływ temperatury t_0 dolnego źródła ciepła na współczynnik efektywności ziębniczej ϵ_c obiegu Carnota

Odwracalny obieg ziębno- grzejny



W wielu gałęziach przemysłu chemicznego, spożywczego, hutnictwie pewne procesy technologiczne wymagają doprowadzania ciepła (ogrzewania), inne zaś odprowadzania ciepła (oziębienie). W takich przypadkach istnieją, uzasadnione ekonomicznie i termodynamicznie podstawy, stosowania skojarzonych obiegów ziębniczo – grzewczych.

Czynnik ziębniczy pobiera od środowiska oziębianego ciepło q_0 przy stałej temperaturze T_0 i oddaje do środowiska ogrzewanego ilość ciepła q_g przy stałej temperaturze T_g .

Można zauważyć, że:

$$q_g = q_0 + l_{ob}$$

gdzie:

- l_{ob} – jednostkowa praca obiegu ziębniczo-grzewczego proporcjonalna do pola, J/kg

Odwracalny obieg ziębniczy realizowany przy niezmienniej temperaturze źródeł ciepła

W obiegu ziębniczo-grzewczym można wyróżnić dwa obiegi:

- obieg ziębniczy realizowany w zakresie temperatur od T_o do T , w którym

$$q = q_o + l_{obz}$$

- obieg grzejny realizowany w zakresie temperatur od T do T_g , w którym

$$q_g = q + l_{obg}$$

gdzie:

l_{obz} – jednostkowa praca obiegu ziębniczego, J/kg,

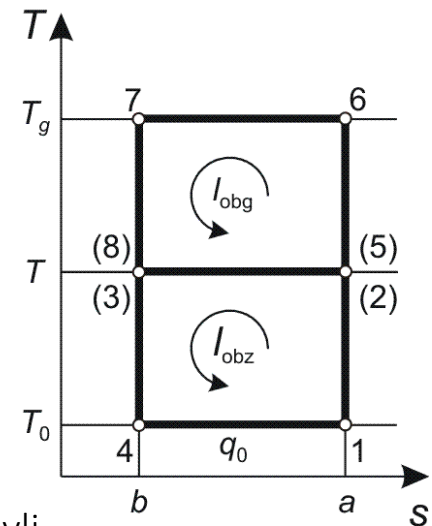
l_{obg} – jednostkowa praca obiegu grzejnego, J/kg.

Jednostkowa praca obiegu ziębniczo-grzewczego równa jest sumie l_{obz} i l_{obg} , czyli

$$l_{ob} = l_{obz} + l_{obg}$$

Dla skojarzonego obiegu ziębniczo-grzewczego bilans cieplny przyjmie postać

$$q_g = q_o + l_{obz} + l_{obg}$$



Odwracalny obieg ziębniczy realizowany przy niezmienniej temperaturze źródeł ciepła

Jeżeli uwzględnimy, że

$$\varphi_g = \frac{q_g}{I_{obg}}$$

i

$$\varepsilon_z = \frac{q_o}{I_{obz}}$$

to odpowiednio

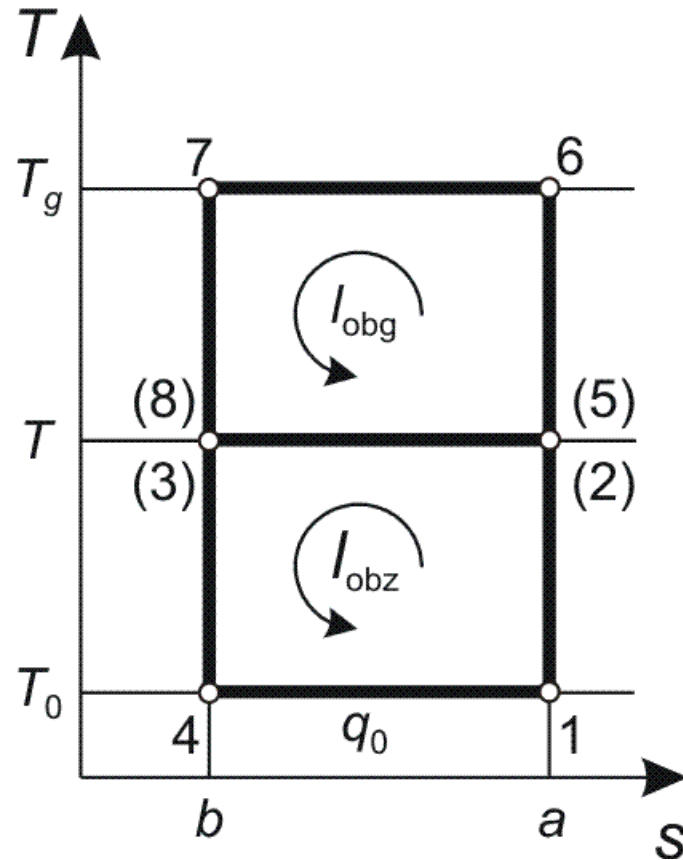
$$I_{obg} = \frac{q_g}{\varphi_g}$$

oraz

$$I_{obz} = \frac{q_o}{\varepsilon_z}$$

Po podstawieniu otrzymano

$$q_g = q_o + \frac{q_o}{\varepsilon_z} + \frac{q_g}{\varphi_g}$$



Odwracalny obieg ziębniczy realizowany przy niezmienniej temperaturze źródeł ciepła

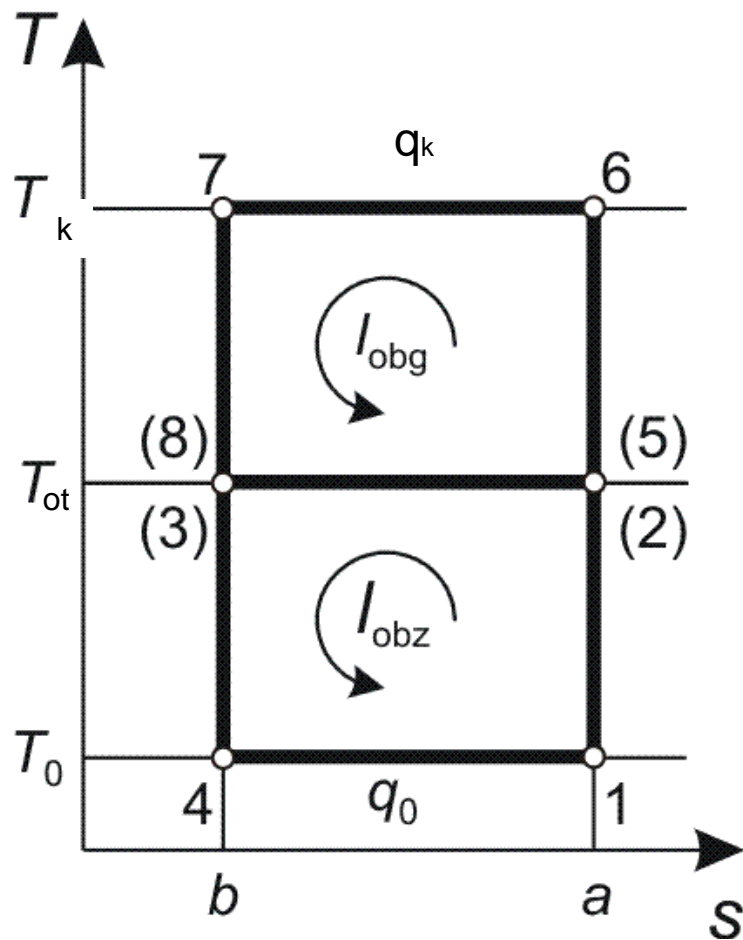
Po dalszych przekształceniach wzór przyjmuje postać

$$\frac{q_g}{q_o} = \frac{\varphi_g(\varepsilon_z + 1)}{\varepsilon_z(\varphi_g - 1)}$$

Podstawiając do powyższego wzoru wyrażenia określające wielkości φ_g i ε_z otrzymano ostatecznie

$$\frac{q_g}{q_o} = \frac{T_g}{T_o}$$

Współczynnik wydajności obiegu teoretycznego ziębno-grzewczwgo. Przypadek szczególny.



$$\varphi_z = \frac{T_o \Delta s}{(T_{ot} - T_o) \Delta s}$$

$$\varphi_{PC} = \frac{T_k \Delta s}{(T_k - T_{ot}) \Delta s}$$

$$\varphi_{Czg} = \frac{Q_o + Q_k}{L_z + L_{PC}} = \frac{T_o}{T_k - T_o} + \frac{T_k}{T_k - T_o} = \frac{T_o + T_k}{T_k - T_o}$$

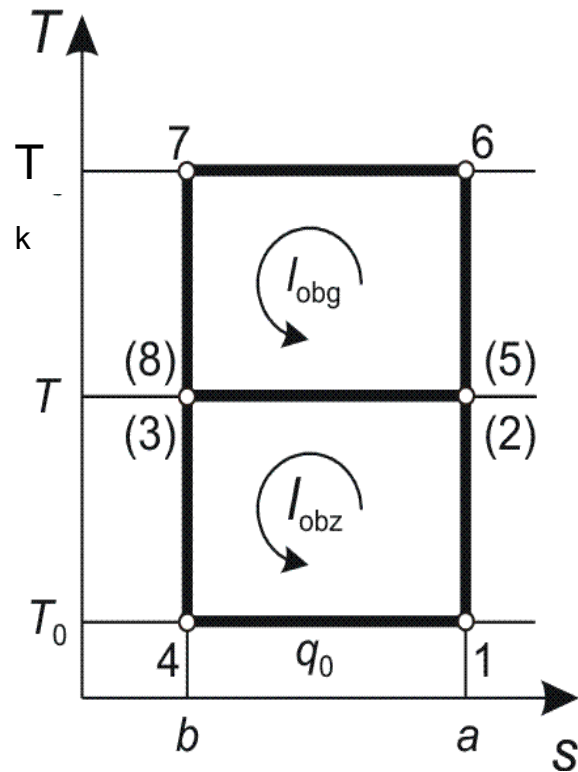
Współczynnik wydajności nie zależy od rodzaju czynnika i sposobu realizacji obiegu

Efektywność grzewcza i ziębnicza urządzenia ziębno -grzewczego

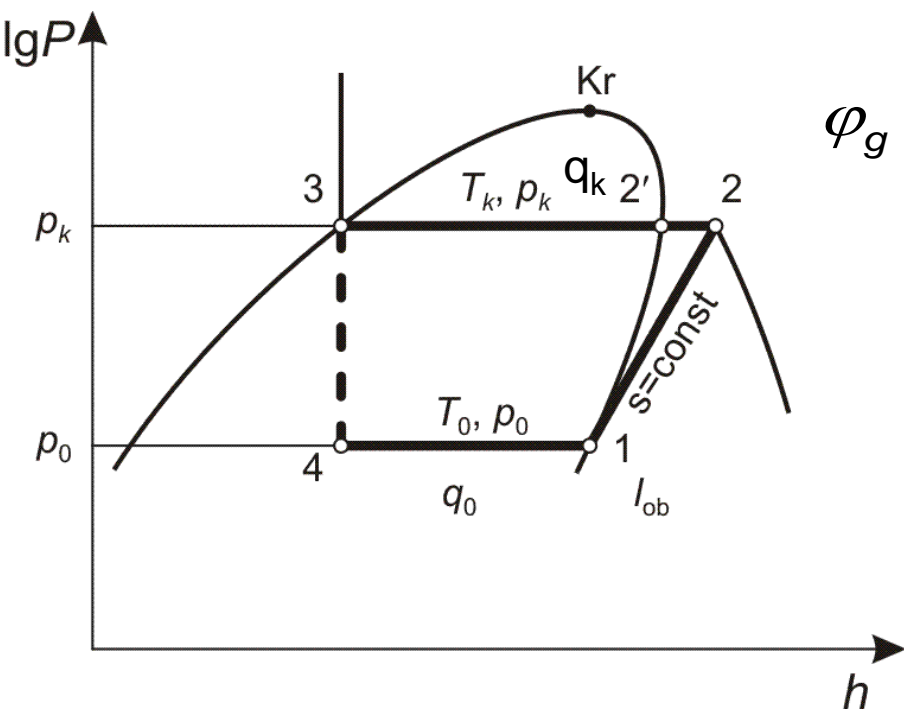
$$\varepsilon_{C,z-g} = \frac{T_k + T_0}{T_k - T_0} = \frac{T_k}{T_k - T_0} + \frac{T_0}{T_k - T_0}$$

$$\varepsilon_{C,g}^{II} = \frac{T_k}{T_k - T_0} \text{ -Efektywność grzewcza obiegu Carnota w systemie ziębno-grzewczym}$$

$$\varepsilon_{C,z}^{II} = \frac{T_0}{T_k - T_0} \text{ -Efektywność ziębnienia obiegu Carnota w systemie ziębno grzewczym}$$



Zależności pomiędzy współczynnikami wydajności grzewczej (obieg teoretyczny)Przypadek szczególny- jeżeli ziębiarka i pompa ciepła jest realizowana pomiędzy tymi samymi źródłami ciepła



$$\varphi_g = \frac{q_g}{l_{obg}}$$

czyli $\varphi_t = \frac{Q_k}{L} = \frac{Q_0 + L}{L}$

$$\varphi_z = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

$$\varphi_{PC} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

$$\varphi_{zg} = \varphi_z + \varphi_{PC} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} + \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} =$$

$$= \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} + \frac{(h_1 - h_4) + (h_2 - h_1)}{h_2 - h_1} =$$

$$= 2 \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} + 1$$

$$\varphi_{zg} = 2\varphi_z + 1$$

Pytania do wykładu 6

- 1. Co to jest obieg termodynamiczny ?
- 2. Dlaczego lewobieżny ?
- 3. Narysuj przykład obiegu otwartego ?
- 4. Obieg idealny Carnota. Przemiany, wsp. COP.
- 5. Obieg Carnota ziębiarki a pompy ciepła. Współczynniki COP ?
- 6. Jeżeli obieg ziębiarki, pompa ciepła i systemu ziębno-grzewczego jest realizowana pomiędzy tymi samymi źródłami ciepła to ile wyniesie COP ziębiarki i systemu Z-G jeżeli COP pompy ciepła = 4 ?