

(19)



URZĄD
PATENTOWY
RZECZYPOSPOLITEJ
POLSKIEJ

(10) **PL 245396 B1**

(12)

Opis patentowy

(21) Numer zgłoszenia: **422416**

(22) Data zgłoszenia: **2017.07.31**

(43) Data publikacji o zgłoszeniu: **2019.02.11 BUP 04/2019**

(45) Data publikacji o udzieleniu patentu: **2024.07.15 WUP 29/2024**

(51) MKP:

F01K 7/00 (2006.01)

(73) Uprawniony z patentu:

KOSOWSKI KRZYSZTOF, Gdańsk, PL

(72) Twórca(-y) wynalazku:

KRZYSZTOF KOSOWSKI, Gdańsk, PL

MARIAN PIWOWARSKI, Gdańsk, PL

ROBERT STĘPIEŃ, Gdynia, PL

WOJCIECH WŁODARSKI, Gdańsk, PL

(54) Tytuł:

Sposób zwiększenia sprawności obiegu cieplnego siłowni, zwłaszcza dla tzw. „suchych” czynników roboczych

PL 245396 B1

Opis wynalazku

Dziedzina techniki. Przedmiotem wynalazku jest sposób zwiększenia sprawności obiegu cieplnego siłowni przeznaczonej do pracy z różnymi czynnikami, a szczególnie z tzw. „suchymi” czynnikami roboczymi.

Stan techniki. Współczesne siłownie cieplne charakteryzują się stosunkowo niewysoką sprawnością, gdy porównuje się ją do maksymalnej sprawności możliwej do uzyskania w danych granicach górnej i dolnej temperatury obiegu, tj. sprawności obiegu Carnota (lub tzw. uogólnionych obiegów Carnota). Siłownie parowe z reguły realizują, mniej lub bardziej zmodyfikowany, obieg Rankine’a, a sprawności tych siłowni zwiększa się głównie poprzez podniesienie parametrów początkowych pary i rozbudowanie obiegu. Turbozespoły gazowe realizują natomiast mniej lub bardziej złożony cykl Braytona, przy czym w przypadku turbin gazowych trwają intensywne prace nad zrealizowaniem układu pracującego według obiegu Ericssona. Idealny obieg tego typu (Rys. 1) to cykl następujących po sobie przemian: izotermiczne sprężanie, izobaryczne podgrzewanie czynnika w regeneratorze o efektywności 100%, izotermiczna ekspansja w ekspanderze i izobaryczne oddawanie ciepła we wspomnianym regeneratorze. Natomiast praktyczna realizacja takiej siłowni nie zakończyła się do tej pory zadawalającym sukcesem. Główny problem stanowi przeprowadzenie przy wysokiej temperaturze izotermicznej ekspansji, w trakcie której wykonywana jest praca. Tego typu rozwiązania w zastosowaniu do turbin gazowych przedstawione są w licznych patentach, np.: US2407166, US 5473899, US4984432, US5894729, US7124585, WO 2013070704 A2 (US9482450, US20140311167, WO2013070704A3), US4984432, US7401475.

Od wielu lat prowadzone są też prace nad wykorzystaniem innych czynników roboczych, w tym czynników organicznych (obieg ORG – organiczne obiegi Rankine’a z ang. Organic Rankine Cycle). Z reguły realizacja takiego obiegu sprowadza się do prostego układu, pokazanego na rys. 2, złożonego z wytwornicy pary (górne źródło ciepła), urządzenia ekspandującego (turbiny), skraplacza (dolnego źródła ciepła) i pompy obiegowej. Dla tzw. „czynników suchych” (dla których na wykresie temperatura-entropia krzywa nasycenia dla pary spełnia relację $dT/ds > 0$) często stosuje się dodatkowo tzw. regeneratory, w którym ciepło przegrzania pary po opuszczeniu urządzenia ekspandującego wykorzystywane jest do podgrzewania cieczy czynnika przed wlotem do wytwornicy pary, co pokazano na rys. 3. W przypadku podkrytycznych parametrów czynnika roboczego para na wyjściu z wytwornicy jest z reguły parą suchą nasyconą lub lekko przegrzaną. W obiegach na nadkrytyczne parametry czynnika pompa podnosi ciśnienie do wartości nadkrytycznych. W tym przypadku proces wytworzenia pary świeżej odbywa się dzięki ciepłu przekazanemu z zewnętrznych źródeł w wytwornicy pary, z dodatkowym wykorzystaniem ciepła z regeneratora. Tego typu układy znajdują zastosowanie szczególnie w takich przypadkach, w których dysponuje się górnym źródłem ciepła o stosunkowo niewysokich temperaturach, np. ciepłem odpadowym różnych procesów technologicznych, energetycznych, itp. Z tego powodu sprawności termodynamiczne takich układów są stosunkowo niewysokie. Jednak ekspansja przy niskich temperaturach ułatwia przeprowadzenie ekspansji izotermicznej, czego do tej pory nie udało się praktycznie zrealizować w turbozespołach gazowych.

Wykaz oznaczeń na rys. 1, rys. 2 oraz rys. 3

- I – ekspander (np. turbina),
- II – generator elektryczny,
- III – skraplacz,
- IV – pompa obiegowa,
- V – wytwornica pary roboczej,
- VI – regeneratory.

Charakterystyczne punkty obiegu na Rys. 1:

- 1 – czynnik roboczy przed sprężaniem,
- 2 – czynnik roboczy za sprężarką,
- 3 – czynnik roboczy przed ekspanderem,
- 4 – czynnik roboczy za ekspanderem.

Charakterystyczne punkty obiegu na rys. 2:

- 0 – czynnik roboczy przed ekspanderem (np. przed turbiną),
- 2 – czynnik roboczy za ekspanderem (np. za turbiną),

- 3 – czynnik roboczy w fazie ciekłej za skraplaczem,
- 4 – czynnik roboczy w fazie ciekłej za pompą,
- 5 – czynnik roboczy za regeneratorem (strumień pobierający ciepło)

Charakterystyczne punkty obiegu na rys. 3:

- 0 – czynnik roboczy przed ekspanderem (np. przed turbiną),
- 2 – czynnik roboczy za ekspanderem (np. za turbiną),
- 3 – czynnik roboczy w fazie gazowej za regeneratorem (strumień przekazujący ciepło),
- 4 – czynnik roboczy w fazie ciekłej za skraplaczem,
- 5 – czynnik roboczy w fazie ciekłej za pompą,
- 6 – czynnik roboczy za regeneratorem (strumień pobierający ciepło).

Istota wynalazku. Sposób według wynalazku polega na tym, że pompa zasilająca zwiększa ciśnienie cieczy roboczej i podaje ją do regeneratora, gdzie kosztem ciepła odbieranego od przegrzanej pary czynnika roboczego (który już przepracował w turbinie izotermicznej) następuje proces podgrzewania, odparowania i przegrzania par czynnika roboczego w przypadku parametrów podkrytycznych lub wytworzenie pary o wysokiej temperaturze w przypadku ciśnienia nadkrytycznego. Następnie para z regeneratora kierowana jest do wymiennika wysokotemperaturowego, gdzie zwiększa się jej temperatura od podgrzania zewnętrznym źródłem ciepła, a po wyjściu z wymiennika wysokotemperaturowego czynnik dopływa do turbiny izotermicznej, gdzie doprowadzane jest ciepło ze źródeł zewnętrznych, a czynnik ekspanduje przy stałej temperaturze i oddaje przy tym moc do napędu generatora elektrycznego. Następnie czynnik roboczy wypływający z ekspandera dopływa do regeneratora, w którym oddaje swoje ciepło przegrzania do podgrzewania, odparowania i przegrzania par czynnika za pompą w przypadku parametrów podkrytycznych lub do wytworzenia pary o wysokiej temperaturze w przypadku ciśnienia nadkrytycznego. Następnie po oddaniu ciepła w regeneratorze czynnik wpływa do skraplacza i skrapla się, a powstałe skropliny dopływają do pompy i cykl się powtarza.

Obieg siłowni składa się z:

- regeneratora oraz wymiennika wysokotemperaturowego, które razem pełnią funkcję wytwornicy pary,
- urządzenia ekspandującego (np. turbiny izotermicznej), w którym przebiega izotermiczna ekspansja i wykonywana jest praca,
- skraplacza,
- pompy zasilającej.

Wykonywanie pracy odbywa się w ekspanderze podczas ekspansji izotermicznej, a proces sprężania czynnika odbywa się w pompie, której praca jest bardzo mała w porównaniu z pracą sprężarki (w tych samych granicach przyrostu ciśnienia). W przypadku obiegu rzeczywistego nie można zrealizować wymiennika o efektywności równej 100% i dlatego para jest dalej podgrzewana w wymienniku wysokotemperaturowym (V) dzięki ciepłu ze źródeł zewnętrznych.

Ciepło dostarczane jest do obiegu w zakresie wysokich temperatur (w wymienniku wysokotemperaturowym i ekspanderze izotermicznym), oddawanie ciepła z obiegu odbywa się w skraplaczu przy niskiej temperaturze, przy czym przyrost ciśnienia czynnika roboczego odbywa się w pompie, co wymaga stosunkowo niedużej pracy sprężania. W stosunku do stosowanych wcześniej obiegów zaproponowano wykonywanie pracy w trakcie ekspansji izotermicznej zamiast typowej ekspansji adiabatycznej, co pozwoliło na rozszerzenie funkcji regeneratora, który pełni rolę wytwornicy pary o wysokich parametrach, a nie tylko funkcję podgrzewacza, jak w stosowanych do tej pory rozwiązaniach.

Dzięki tym zabiegom układ według wynalazku odznacza się znacznie wyższą sprawnością od stosowanych obecnie odpowiednich obiegów turbinowych.

W alternatywnych rozwiązaniach wariantowo można:

- rozbudować obieg przez zastosowanie dodatkowych elementów, np. podnoszących sprawność obiegu, jak dodatkowe przegrzewy pary, sprężarki, zaczepy regeneracyjne, upusty itp.,
- tworzyć obiegi kombinowane z innymi obiegami (także innych typów),
- tworzyć układy kogeneracyjne i poligeneracyjne.

Zaletami rozwiązania według wynalazku są:

- Wykorzystanie możliwie maksymalnie ciepła przegrzania czynnika wypływającego z ekspandera do podgrzania i wytwarzania pary czynnika roboczego za pompą powoduje zmniejszenie ciepła odprowadzanego z obiegu i zmniejszenie dolnej temperatury obiegu oraz zmniejszenie ciepła doprowadzonego do obiegu i zwiększenie górnej temperatury obiegu, co wyraźnie zwiększa sprawność obiegu.

- Przyrost ciśnienia czynnika roboczego odbywa się całkowicie w pompie (w fazie cieczy), co wpływa na zmniejszenie pracy sprężania obiegu.
- Obieg według wynalazku ma wyższą sprawność cieplną od stosowanych obecnie rozwiązań siłowni ORC dla tych samych zakresów temperatur.

Objaśnienie figur na rysunku. Przedmiot wynalazku pokazano na przykładzie wykonania na rysunku, na którym fig. 1 przedstawia układ siłowni cieplnej, a odpowiadającą mu interpretację w układzie temperatura-entropia dla przykładowych parametrów projektowych dla siloksanu MM przedstawiono na fig. 2 dla podkrytycznych i na fig. 3 dla nadkrytycznych parametrów czynnika.

Przykład wykonania wynalazku. Przykładowe rozwiązanie pokazano na fig. 1. Układ składa się z ekspandera izotermicznego (I) (np. turbiny izotermicznej) napędzającego generator elektryczny (II), skraplacza (III), pompy obiegowej (IV), podgrzewacza wysokotemperaturowego (V), regeneratora (VI).

Charakterystyczne punkty obiegu:

- 0 – czynnik roboczy za wymiennikiem wysokotemperaturowym (przed ekspanderem izotermicznym, np. przed turbiną izotermiczną),
- 2 – czynnik roboczy za ekspanderem (np. za turbiną),
- 3 – czynnik roboczy za wytwornicą pary (strumień przekazujący ciepło),
- 4 – czynnik roboczy w fazie ciekłej za skraplaczem,
- 5 – czynnik roboczy w fazie ciekłej za pompą,
- 6 – czynnik roboczy przed wymiennikiem wysokotemperaturowym.

Pompa zasilająca (IV) zwiększa ciśnienie cieczy roboczej (od punktu (4) do punktu (5)) i podaje ją do regeneratora (VI), gdzie kosztem ciepła (od punktu (2) do punktu (3)) odbieranego od przegrzanej pary czynnika roboczego (który już przepracował w ekspanderze) następuje proces podgrzewania czynnika roboczego (od punktu (5) do punktu (6)). Para z wytwornicy (VI) kierowana jest do wymiennika wysokotemperaturowego (V), gdzie zwiększa się jej temperatura kosztem ciepła przekazanego od czynnika grzewczego (np. spalin) (od punktu (6) do punktu (0)). Po wyjściu z wymiennika wysokotemperaturowego (V) czynnik dopływa do ekspandera izotermicznego (I) (np. turbiny izotermicznej), gdzie ekspanduje przy stałej temperaturze (od punktu (0) do punktu (2)) i oddaje przy tym moc do napędu generatora elektrycznego (II). Następnie czynnik roboczy dopływa do regeneratora (VI), w którym oddaje swoje ciepło (od punktu (2) do punktu (3)) do podgrzewania czynnika roboczego (od punktu (5) do punktu (6)). Z regeneratora (VI) czynnik wpływa do skraplacza (III) i wykrapla się (od punktu (3) do punktu (4)), a powstałe skropliny dopływają do pompy (IV) i cykl się powtarza.

Przykładowe obieg z siloksanem MM jako czynnikiem roboczym przedstawiony na fig. 2 dla podkrytycznych i na fig. 3 dla nadkrytycznych parametrów czynnika udowadniają fizyczną możliwość realizacji poszczególnych przemian i procesów termodynamicznych.

WYKAZ OZNACZEŃ NA RYSUNKU

- I – ekspander izotermiczny (np. turbina izotermiczna),
- II – generator elektryczny,
- III – skraplacz,
- IV – pompa obiegowa,
- V – podgrzewacz wysokotemperaturowy,
- VI – regenerator/wytwornica pary roboczej.

Charakterystyczne punkty obiegu:

- 0 – czynnik roboczy za wymiennikiem wysokotemperaturowym (przed ekspanderem izotermicznym, np. przed turbiną izotermiczną),
- 2 – czynnik roboczy za ekspanderem (np. za turbiną),
- 3 – czynnik roboczy za wytwornicą pary (strumień przekazujący ciepło),
- 4 – czynnik roboczy w fazie ciekłej za skraplaczem,
- 5 – czynnik roboczy w fazie ciekłej za pompą,
- 6 – czynnik roboczy przed wymiennikiem wysokotemperaturowym.

Zastrzeżenie patentowe

1. Sposób zwiększenia sprawności obiegu cieplnego siłowni, zwłaszcza dla tzw. „suchych” czynników roboczych, **znamienny tym**, że pompa zasilająca (IV) zwiększa ciśnienie cieczy roboczej i podaje ją do regeneratora (VI), gdzie kosztem ciepła odbieranego od przegrzanej pary czynnika roboczego (który już przepracował w turbinie izotermicznej) następuje proces podgrzewania, odparowania i przegrzania par czynnika roboczego w przypadku parametrów podkrytycznych lub wytworzenie pary o wysokiej temperaturze w przypadku ciśnienia nadkrytycznego, a następnie para z regeneratora (VI) kierowana jest do wymiennika wysokotemperaturowego (V), gdzie zwiększa się jej temperatura od podgrzania zewnętrznym źródłem ciepła, a po wyjściu z wymiennika wysokotemperaturowego (V) czynnik dopływa do turbiny izotermicznej (I), gdzie doprowadzane jest ciepło ze źródeł zewnętrznych, a czynnik ekspanduje przy stałej lub prawie stałej temperaturze i oddaje przy tym moc do napędu generatora elektrycznego (II), a następnie czynnik roboczy dopływa do regeneratora (VI), w którym oddaje swoje ciepło przegrzania do podgrzewania, odparowania i przegrzania par czynnika za pompą w przypadku parametrów podkrytycznych lub do wytworzenia pary o wysokiej temperaturze w przypadku ciśnienia nadkrytycznego, a następnie po oddaniu ciepła w regeneratorze (VI) czynnik wpływa do skraplacza (III) i skrapla się, a powstałe skropliny dopływają do pompy (IV) i cykl się powtarza.

Rysunki

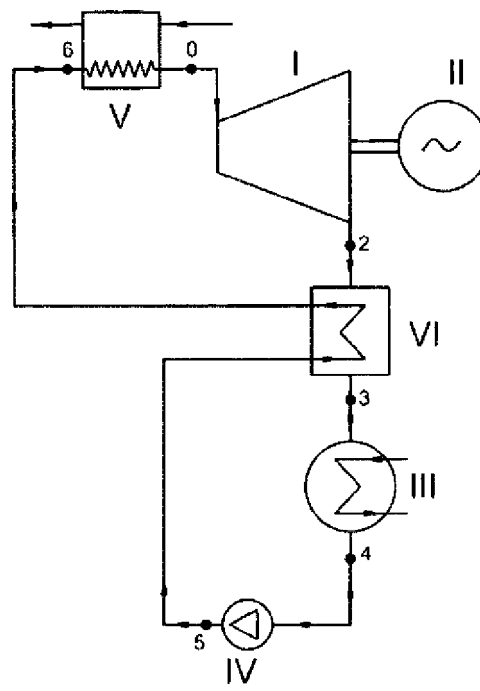


Fig. 1

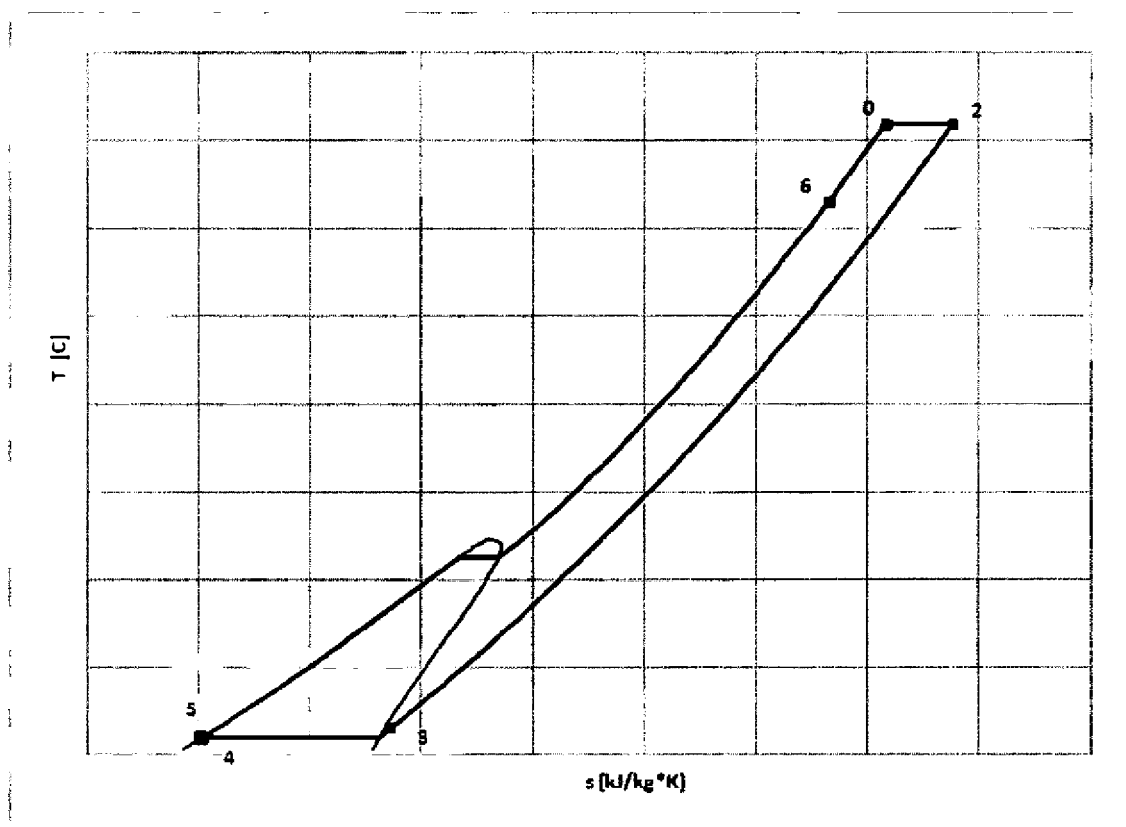


Fig. 2

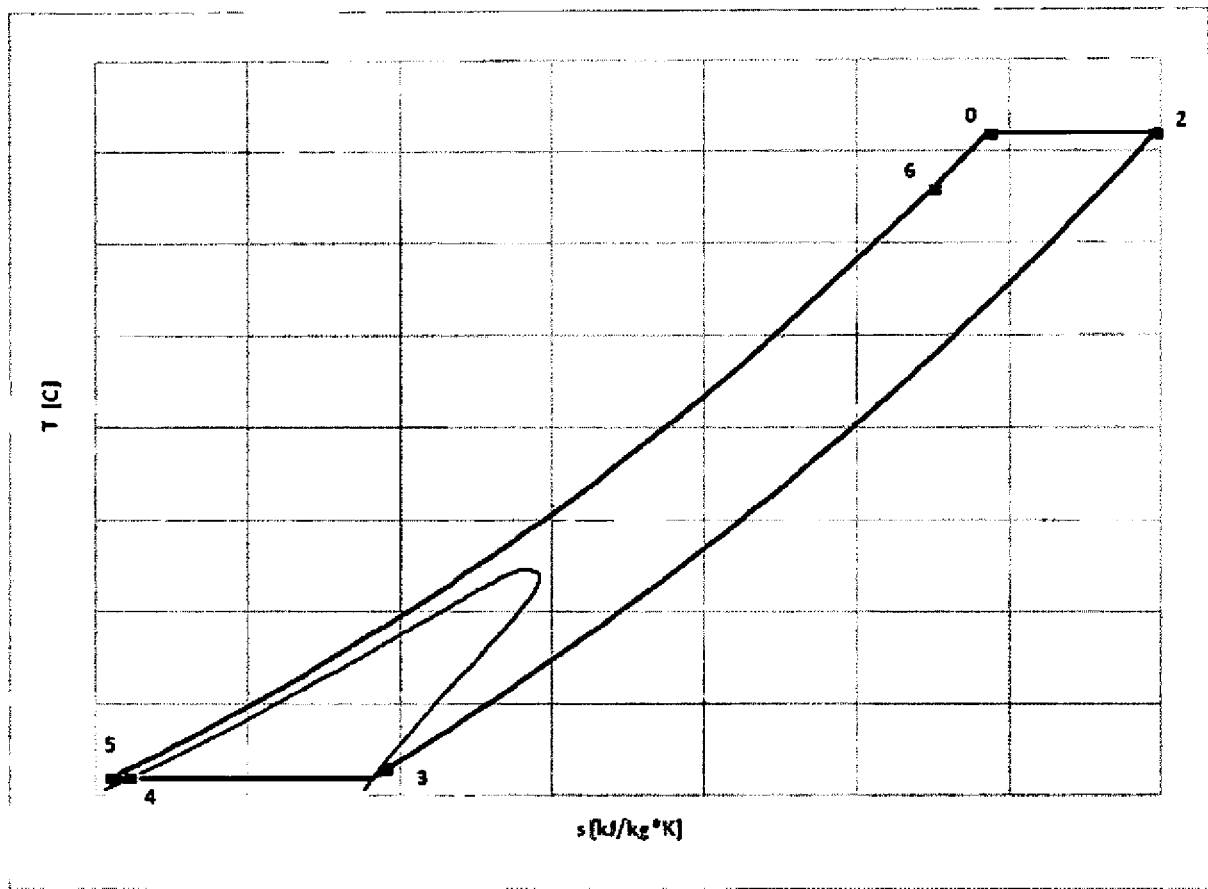
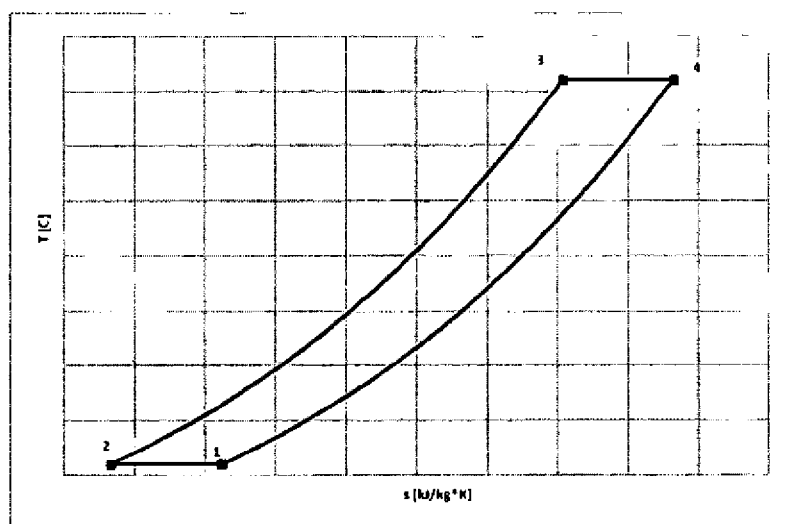
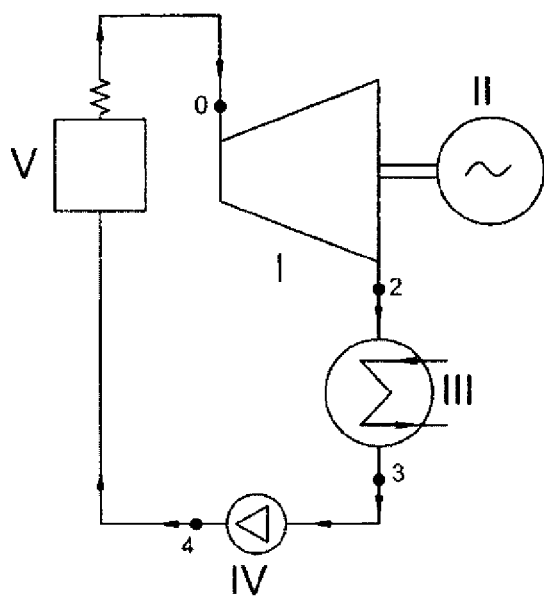


Fig. 3

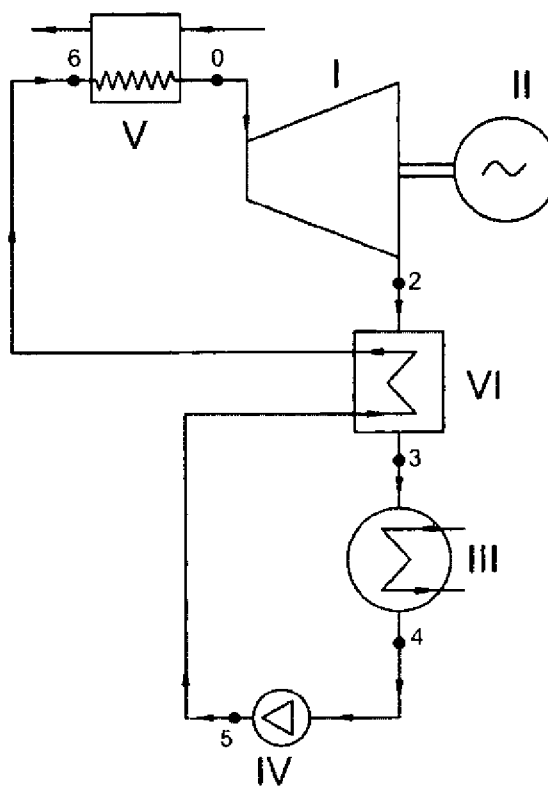
Rysunek dla określenia stanu techniki



Rys. 1



Rys. 2



Rys. 3