

1

Wprowadzenie

Niepodobna znać rzeczy tego świata,
jeśli się nie zna ich matematycznie

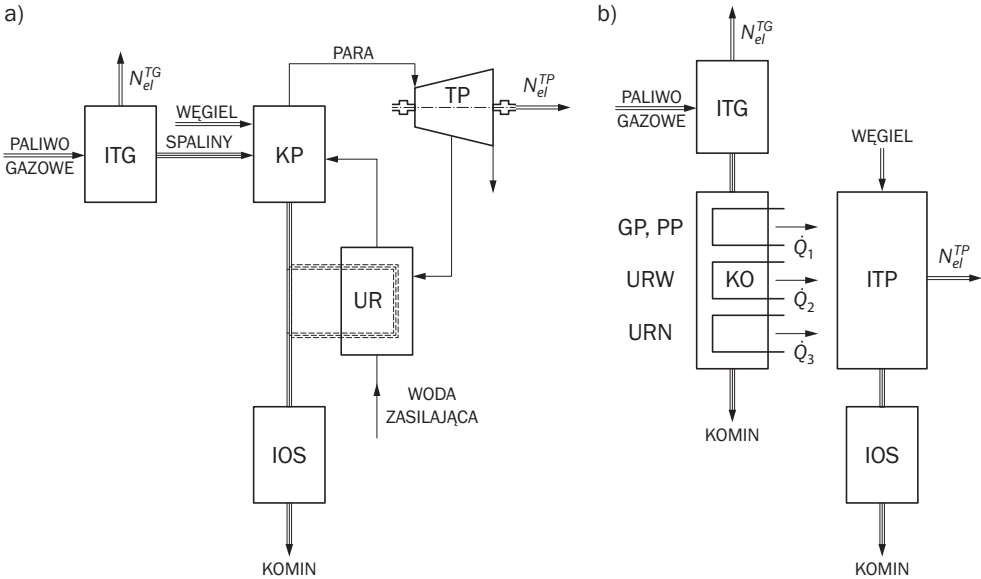
*For the things of this world cannot be made
known without a knowledge of mathematics*

(Roger Bacon, 1214-1294)

Zasoby węgla na świecie, również w Polsce, są duże i można spodziewać się, że będzie on jeszcze długo wykorzystywany w energetyce. By robić to racjonalnie technologicznie, należy spalać go, korzystając z tzw. czystych technologii węglowych. Jedną z nich jest technologia gazowo-parowa dwupaliwowa, polegająca na sprzężeniu obiegu *Joule'a* turbiny gazowej z obiegiem *Clausiusa-Rankine'a* turbiny parowej [1, 2, 3].

Spośród możliwych standardowych układów gazowo-parowych dwupaliwowych, węglowo-gazowych, można wyróżnić dwie podstawowe ich konfiguracje [1, 2, 3]:

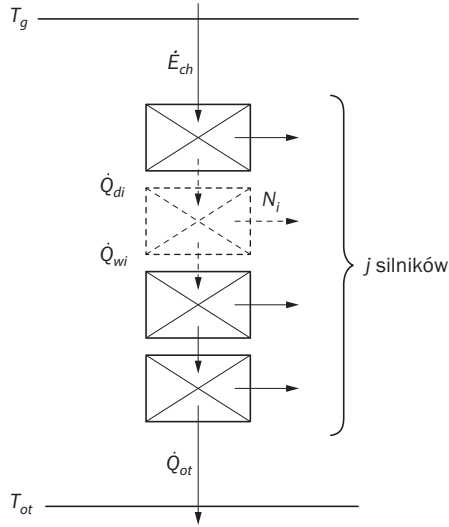
- układy szeregowe, tzw. układy Hot Windbox (rys. 1.1a), w których sprzężenie odbywa się za pomocą spalin wylotowych z turbiny gazowej (spaliny te są kierowane jako utleniacz do komory spalania kotła węglowego; w układzie nie ma, co istotne, kotła odzyskowego, który jest podstawowym urządzeniem układów sprzężonych równolegle);
- układy równoległe (rys. 1.1b, 1.4, 1.5), w których sprzężenie odbywa się poprzez układ para-woda w kotle odzyskowym, w którym jest wykorzystywana niskotemperaturowa entalpia spalin wylotowych z turbiny gazowej (sprzężenie polega np. na produkcji w kotle odzyskowym pary zasilającej turbinę parową, i(lub) przegrzewaniu np. pary międzystopniowej w kotle odzyskowym, i(lub) podgrzewie wody zasilającej w wymiennikach ciepła spaliny-woda zabudowanych w kotle odzyskowym, a tym samym na eliminowaniu z obiegu parowego częściowo lub całkowicie regeneracyjnych wymienników ciepła; w przypadku modernizacji istniejących układów węglowych do układów dwupaliwowych kocioł odzyskowy zasilany spalinami wylotowymi z turbiny gazowej zastępuje wówczas w elektrowni lub elektrociepłowni – przynajmniej częściowo – wymagające najczęściej remontów i modernizacji istniejące kotły węglowe).



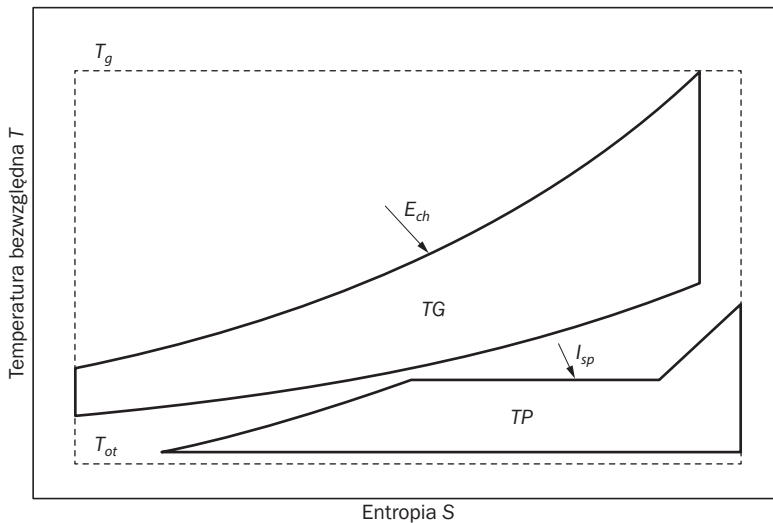
Rys. 1.1. Układ dwupaliwowy: a) szeregowy, b) równoległy; ITG – instalacja turbiny gazowej, KO – kocioł odzyskowy, KP – kocioł parowy, TP – turbina parowa, UR – układ regeneracji, IOS – instalacja oczyszczania spalin, ITP – instalacja turbiny parowej, GP – generacja pary, PP – przegrzew pary, URN, URW – regeneracja niskopiętrna i wysokopiętrna, N_{el}^{TG} , N_{el}^{TP} – moce instalacji turbiny gazowej i parowej $\dot{Q}_1, \dot{Q}_2, \dot{Q}_3$ – strumienie ciepła przekazywane przez spalinami wylotowymi z turbiny gazowej wodzie i parze

Należy zaznaczyć, że układy gazowo-parowe dwupaliwowe nie są tzw. układami hierarchicznymi (rys. 1.2), jakimi są układy gazowo-parowe jednopaliwowe [1]. W układach dwupaliwowych bowiem do każdego z obiegów jest dostarczane paliwo, natomiast w układzie hierarchicznym paliwo jest doprowadzane wyłącznie do obiegu pracującego w najwyższych zakresach temperatury. Do każdego z kolejnych obiegów w układzie hierarchicznym, pracujących w coraz to niższych zakresach temperatury, doprowadzone do nich ciepło napędowe jest ciepłem wyprowadzonym z obiegów znajdujących się w hierarchii zaraz powyżej nich. Jak do tej pory technicznie możliwe i budowane są tylko układy hierarchiczne dwuobiegowe ($j = 2$) – rys. 1.2, 1.3 [1, 2].

Hierarchiczne układy gazowo-parowe jednopaliwowe cechują się obecnie najwyższymi sprawnościami wytwarzania energii elektrycznej, ich sprawność netto przekracza już nawet 60%. Tak wysoka sprawność jest wynikiem bardzo znacznego, ok. trzykrotnego zwiększenia temperaturowego zakresu pracy bloku dzięki sprzęgnięciu w nim za pomocą kotła odzyskowego dwóch obiegów w układzie hierarchicznym: wysokotemperaturowego obiegu *Joule'a* turbiny gazowej z niskotemperaturowym obiegiem parowym *Clausiusa-Rankine'a* turbiny parowej. Warto przy tym zaznaczyć, że ciśnienie pary w hierarchicznych obiegach gazowo-parowych wynosi zaledwie ok. 10 MPa, a nie na przykład 28 MPa jak w blokach na parametry nadkrytyczne pary [1], w których jest realizowany wyłącznie obieg *Clausiusa-Rankine'a*. Sprawność dla tych nadkrytycznych obiegów *Clausiusa-Rankine'a* wynosi ok. 50%. Jeśli natomiast chodzi o sprawność układów gazowo-parowych dwupaliwowych, to może ona przekraczać



Rys. 1.2. Schemat hierarchicznego j -obiegowego silnika cieplnego; j – liczba obiegów (silników), \dot{E}_{ch} – strumień energii chemicznej paliwa, N_i – moc i -tego silnika ($i = 1, 2, \dots, j$), \dot{Q}_{di} , \dot{Q}_{wi} – strumień ciepła doprowadzonego i wyprowadzonego z i -tego obiegu (silnika), \dot{Q}_{ot} – strumień ciepła wyprowadzonego do otoczenia, T_{ot} – absolutna temperatura otoczenia, T_g – absolutna temperatura spalania paliwa



Rys. 1.3. Obieg porównawczy (teoretyczny) hierarchicznego układu gazowo-parowego (TG – obieg Joule'a turbiny gazowej, TP – obieg Clausiusa-Rankine'a turbiny parowej, E_{ch} – energia chemiczna paliwa doprowadzona do TG, I_{sp} – entalpia spalin wylotowych z turbiny gazowej doprowadzona do TP za pomocą kotła odzyskowego; linie kreskowe przedstawiają obieg Carnota dla skrajnych temperatur T_g , T_{ot})

nawet 50% dla pracy części parowej z podkrytycznymi parametrami pary świeżej. Wartość tej sprawności zależy od zastosowanej w układzie mocy turbiny gazowej (p. 5.1.1).