

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*

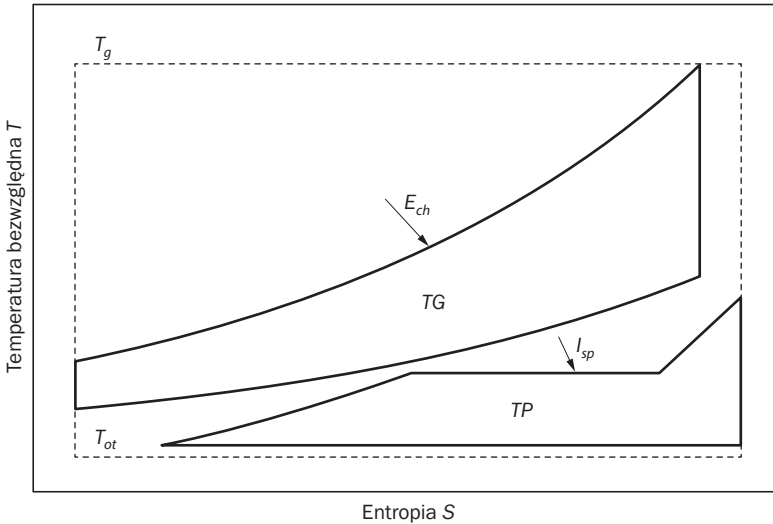
(Roger Bacon, 1214–1294)

Układy hierarchiczne (rys. 2.3, 2.4, 3.1–3.3) są układami wieloobiegowymi, prawolub lewobieźnymi. Prawobieźne są oczywiście silniki cieplne, lewobieźne – robocze maszyny cieplne (ziębiarki lub pompy ciepła; są to urządzenia napędzane pracą lub równoważną jej energią elektryczną). Fundamentalną właściwością układów hierarchicznych jest to, że doprowadzanie do nich ciepła z zewnętrznego źródła ma miejsce wyłącznie do jednego obiegu. W przypadku silnika jest to obieg znajdujący się w hierarchii najwyżej, tj. obieg pracujący w zakresie temperatur najwyższych, a w przypadku roboczej maszyny cieplnej jest to obieg znajdujący się w hierarchii najniżej, tj. obieg pracujący w zakresie temperatur najniższych. Do każdego z pozostałych obiegów ciepło jest doprowadzane ciepłem wyprowadzanym z obiegów znajdujących się w przypadku silnika w hierarchii zaraz powyżej nich, a w przypadku ziębiarki lub pompy ciepła – z obiegów znajdujących się w hierarchii bezpośrednio poniżej (rys. 2.3, 2.4).

Co najważniejsze, w silnikach hierarchicznych sprawność konwersji energii chemicznej paliwa na pracę mechaniczną jest zdecydowanie większa od sprawności uzyskiwanej w silnikach jednoobiegowych. Jest tak dlatego, że w układach tych jest wykorzystywany znacznie większy zakres temperatur z przedziału $\langle T_g; T_{ot} \rangle$, tj. z przedziału między temperaturą górnego źródła ciepła T_g a temperaturą otoczenia T_{ot} , które stanowi dolne źródło ciepła. W najdoskonalszym termodynamicznie, teoretycznym *silniku Carnota* o największej teoretycznie możliwej mocy jest wykorzystywany cały zakres $\langle T_g; T_{ot} \rangle$. Moc silnika Carnota obrazuje pole prostokąta narysowanego linią kreskową na rysunku 1.1. Im większa będzie zatem w układzie hierarchicznym liczba obiegów j (rys. 2.3) mających różne temperaturowe zakresy pracy, w tym większym stopniu będzie wykorzystywany w nim zakres $\langle T_g; T_{ot} \rangle$. Tym samym mniejsze będą w układzie straty strumienia egzergii, a więc tym większa będzie jego moc (podrozdz. 2.2). W granicy,

gdy $j \rightarrow \infty$, różnica między sprawnością teoretycznego silnika Carnota (wzór (2.5)) a sprawnością silnika hierarchicznego η_{1-j} (wzór (2.22)) zanika, $\eta_c - \eta_{1-j} \rightarrow 0$, i moc mechaniczna silnika hierarchicznego równa się mocy teoretycznego silnika Carnota (wzór (2.4)), a więc mocy maksymalnej możliwej dzięki wykorzystywaniu, tak jak w silniku Carnota, całego zakresu temperatur $\langle T_g; T_{ot} \rangle$.

Całkowicie odwrotna sytuacja ma miejsce w roboczej maszynie cieplnej, ziębiarce lub pompie ciepła (podrozdz. 2.3, rys. 2.4). Zwiększanie w niej realizowanych obie- gów ponad jeden zwiększa straty egzergii, a tym samym zwiększa się moc napędowa maszyny. Najmniejszą teoretycznie możliwą moc napędową ma maszyna, w której reali- zowany jest teoretyczny lewobieżny *obieg Carnota*.



Rys. 1.1. 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 doprowadzana do TG , I_{sp} – entalpia spalin wylotowych z turbiny gazowej doprowadzana do TP za pomocą kotła odzyskowego; linie kreskowe przedstawiają obieg Carnota dla skrajnych temperatur T_g, T_{ot}

Obecnie w praktyce są stosowane *silniki hierarchiczne dwuobiegowe gazowo-parowe* [1] (rys. 1.1). Są to silniki, które aktualnie mają największą sprawność konwersji energii chemicznej paliwa na pracę mechaniczną i w konsekwencji, zgodnie z *prawem Faradaya*, w generatorze elektrycznym na energię elektryczną, najszlachetniejszą, najcenniejszą, we wszystkich znaczeniach tego słowa, postać energii. Wykorzystywany w nich jest bowiem, jak do tej pory, największy zakres temperatur z przedziału $\langle T_g; T_{ot} \rangle$. W zakresie temperatur wysokich realizowany jest *obieg Joule'a* turbiny gazowej, a w zakresie temperatur niskich – *obieg Clausiusa-Rankine'a* turbiny parowej. Sprzężenie obiegów Joule'a i Clausiusa-Rankine'a w układ hierarchiczny odbywa się poprzez układ spaliny-para-woda w kotle odzyskowym, w którym jest wykorzystywana nisko-temperaturowa entalpia spalin wylotowych z turbiny gazowej do produkcji pary zasilającej turbinę parową [1]. Moc silnika gazowo-parowego obrazuje suma pól obiegów