

JAN SZARCUT, RYSZARD PETELA  
Katedra Energetyki Ciepłej

SPRAWNOŚĆ EGZERGETYCZNA  
ELEKTROWNI I ELEKTROCIEPŁOWNI PAROWYCH

Streszczenie. Omówiono pozycje bilansu egzergetycznego elektrowni parowych. Podano wzory dla obliczania egzergetycznej sprawności elektrowni kondensacyjnej i elektrociepłowni. Wielkości niektórych pozycji bilansu egzergetycznego obliczono szacunkowo. Porównano wartości sprawności egzergetycznej i termicznej elektrowni.

1. Wstęp

Doskonałość elektrowni parowej powinno się oceniać za pomocą sprawności egzergetycznej. Sprawność egzergetyczna uwzględnia bowiem zróżnicowanie jakości różnych nośników energii [1]. W celu zdefiniowania sprawności egzergetycznej należy wziąć pod uwagę bilans egzergetyczny elektrowni. Każda z wielkości występujących w bilansie egzergetycznym urządzenia działającego w sposób ustalony powinna być zaliczona do jednej z trzech grup: do grupy egzergii napędowej, do grupy użytecznych efektów, bądź też do grupy strat egzergii. Egzergia napędowa występuje tylko po stronie przychodowej bilansu, straty zaś egzergii tylko po stronie rozochodu. Efekt użyteczny może wynikać z różnicy niektórych wielkości występujących po stronie rozochodu i niektórych wielkości występujących po stronie przychodu [2]. W bilansie egzergetycznym elektrowni jako pozycje przychodowe występują: egzergia paliwa oraz egzergia wody uzupełniającej straty czynnika obiegowego i straty wody ochładzającej. W świetle przeprowadzonych wyżej rozważań egzergia wody uzupełniającej powinna być zaliczona do egzergii napędowej procesu.

## 2. Sprawność egzergyjna elektrowni kondensacyjnej

Z rozważań przeprowadzonych powyżej wynika następująca definicja sprawności egzergyjnej elektrowni kondensacyjnej:

$$\eta_{b\text{ el}} = \frac{N}{\dot{P} b_p + \dot{G}_d b_d + \dot{G}_w b_w} \quad (1)$$

gdzie:

- $N$  - moc elektryczna oddawana do sieci (z odliczeniem mocy zużywanej przez wszystkie urządzenia pomocnicze),
- $\dot{P}$  - ilość paliwa zużywanego przez elektrownię w jednostce czasu,
- $b_p$  - właściwa egzergia paliwa zużywanego przez elektrownię,
- $\dot{G}_d, b_d$  - natężenie przepływu i właściwa egzergia wody uzupełniającej straty czynnika obiegowego,
- $\dot{G}_w, b_w$  - natężenie przepływu i właściwa egzergia wody uzupełniającej straty wody chłodzącej.

Wyrażenie  $\dot{G}_d b_d$  występujące we wzorze (1) ma na ogół małą wartość w porównaniu z wyrażeniem  $\dot{P} b_p$ . Wykorzystując pojęcie sprawności termicznej brutto  $\eta_{t\text{ kB}}$  kotła parowego można stosunek tych wyrażeń obliczyć szacunkowo w sposób następujący

$$\frac{\dot{G}_d b_d}{\dot{P} b_p} = \frac{0,07 b_d W_d \eta_{t\text{ kB}}}{(i_p - i_w) b_p} = \frac{0,07 \cdot 40 \cdot 0,9}{2 \cdot 400 \cdot 1,08} = 0,00097$$

Dla szacunkowego określenia powyższego stosunku przyjęto, że ilość wody  $\dot{G}_d$  stanowi 7% wody zasilającej, przyrost właściwej entalpii czynnika obiegowego w kotle wynosi  $i_p - i_w = 2 \cdot 400$  kJ/kg, właściwa egzergia wody uzupełniającej  $b_d = 40$  kJ/kg, stosunek egzergii paliwa do jego wartości opałowej  $b_p/W_d = 1,08$  oraz sprawność  $\eta_{t\text{ kB}} = 0,9$ . Wyrażenie  $\dot{G}_d b_d$  stanowi około 0,1% wielkości  $\dot{P} b_p$ .

Iloczyn  $\dot{G}_w b_w$  występujący we wzorze (1) ma na ogół również małą wartość w porównaniu z wyrażeniem  $\dot{P} b_p$ . Dla szacunkowego określenia stosunku tych wartości można przyjąć, że ilość wody  $\dot{G}_w$  stanowi 2% wody chłodzącej skraplacz, zaś stosunek ilości wody chłodzącej do ilości pary skraplanej wynosi około 50. Przyjmując następnie  $b_w = b_d$  otrzymuje się

$$\frac{\dot{G}_w b_w}{\dot{P} b_p} = \frac{0,02 \cdot 50 b_w W_d \eta_t k B}{(i_p - i_w) b_p} = \frac{40 \cdot 0,9}{2 \cdot 400 \cdot 1,08} = 0,0139$$

Wyrażenie  $\dot{G}_w b_w$  stanowi około 1,4% wielkości  $\dot{P} b_p$ .

Jeżeli więc we wzorze (1) pominię się wielkości  $\dot{G}_d b_d$  i  $\dot{G}_w b_w$  jako małe otrzymuje się uproszczony wzór

$$\eta_{b\ e1} = \frac{N}{\dot{P} b_p} \quad (2)$$

Posługując się wzorem (2) można obliczyć stosunek sprawności ekonomicznej (termicznej) elektrowni  $\eta_{t\ e1} = N/(\dot{P} W_d)$  do sprawności egzergetycznej  $\eta_{b\ e1}$

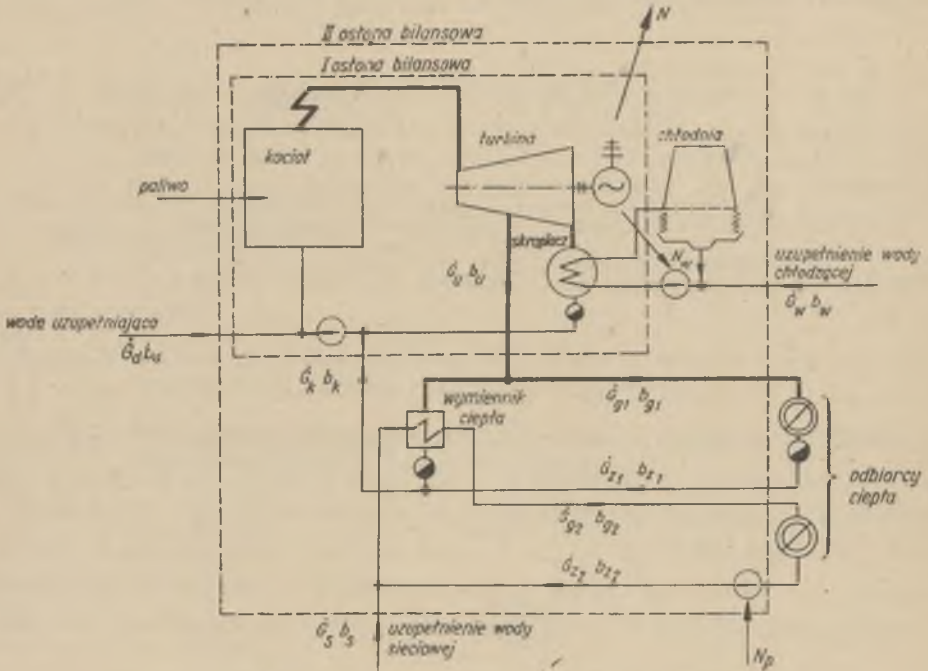
$$\frac{\eta_{t\ e1}}{\eta_{b\ e1}} = \frac{b_p}{W_d} \quad (3)$$

Stosunek powyższy dla paliwa ustalonego typu zależy głównie od zawartości wilgoci [3]. Dla typowych węgla kamiennych energetycznych ma on wartość  $1,06 \div 1,09$ . Dla węgla brunatnych stosunek ten mieści się na ogół w przedziale  $1,1 \div 1,2$ . Widać stąd że sprawność egzergetyczna elektrowni kondensacyjnej jest nieco mniejsza od sprawności ekonomicznej.

### 3. Sprawność egzergetyczna elektrociepłowni

Na rysunku 1 przedstawiono ideowy schemat elektrociepłowni wraz z obiegiem wody grzewczej i obiegiem wody chłodzącej. Przy ocenie doskonałości elektrociepłowni można przyjąć różne umowy

określające zakres układu objętego rozważaniami. Osłona bilansowa I wyodrębnia właściwą elektrociepłownię. Sprawność egzergetyczna układu objętego tą osłoną określa stopień doskonałości przemian termodynamicznych zachodzących w obrębie właściwej elektrociepłowni (wraz z silnikami elektrycznymi napędzającymi wszystkie urządzenia pomocnicze właściwej elektrociepłowni).



Rys. 1. Schemat elektrociepłowni

Sprawność egzergetyczną tego układu można by nazwać sprawnością brutto  $\eta_{b\ ec\ B}$  elektrociepłowni

$$\eta_{b\ ec\ B} = \frac{N + N_w + \sum_i (\dot{G}_u b_u - \dot{G}_k b_k)_i}{\dot{P} b_p + \dot{G}_d b_d} \quad (4)$$

gdzie:

$N$  - moc elektryczna oddana do sieci,

$N_w$  - moc elektryczna oddana do napędu pompy wody chłodzącej,

$\dot{G}_u, b_u$  - natężenie przepływu i właściwa egzergia pary upustowej odpływającej z turbiny,

$\dot{G}_k, b_k$  - natężenie przepływu i właściwa egzergia kondensatu powstałego z pary upustowej.

(Przyjęto, że pompy wody chłodzącej pobierają moc napędową  $N_w$  od turbozespołu elektrociepłowni, pompy zaś wody sieciowej pobierają moc napędową  $N_p$  z sieci elektroenergetycznej).

W sumie  $\sum_1$  występującej we wzorze (4) indeks "1" oznacza kolejny numer czynnego upustu turbiny (z pominięciem upustów regeneracyjnych). W bilansie egzergyjnym układu określonego osłoną bilansową I potraktowano przyrost egzergii wody chłodzącej w skraplaczu jako zewnętrzną stratę egzergii.

Jeżeli we wzorze (4) pominie się wyrażenie  $\dot{G}_d b_d$  jako małe (patrz punkt 2), wówczas otrzymuje się uproszczony wzór:

$$\eta_{b\ e\ o\ B} = \frac{N + N_w + \sum_1 (\dot{G}_u b_u - \dot{G}_k b_k)_1}{\dot{P} b_p} \quad (5)$$

Osłoną bilansową II (rys. 1) obejmuje wszystkie urządzenia elektrociepłowni aż do miejsca oddania czynnika grzejjego odbiorcy ciepła. Układ objęty osłoną bilansową II zawiera więc oprócz urządzeń I, pompy wody chłodzącej i wody sieciowej, wymienniki ciepła do produkcji gorącej wody sieciowej, przewody pary grzejjnej i wody sieciowej. W układzie tym występują dodatkowo straty egzergii w wymiennikach ciepła wytwarzających czynnik grzejjny dla zewnętrznych odbiorców, straty egzergii przy przesyle pary i wody grzejjnej, ponadto zaś straty wody chłodzącej i grzejjnej. Sprawność egzergyjną układu objętego osłoną II można by nazwać sprawnością egzergyjną netto  $\eta_{b\ e\ o\ N}^e$  elektrociepłowni

$$\eta_{b\ e\ o\ N}^e = \frac{N - N_p + \sum_1 (\dot{G}_s b_s - \dot{G}_u b_u)_1}{\dot{P} b_p + \dot{G}_d b_d + \dot{G}_w b_w + \dot{G}_s b_s} \quad (6)$$

gdzie:

$\dot{G}_g, b_g$  - natężenie przepływu i właściwa energia czynnika grzejącego (wody lub pary) dostarczanego odbiorcy,

$\dot{G}_z, b_z$  - natężenie przepływu i właściwa energia zwrotnej wody grzejącej lub kondensatu zwracanej przez odbiorcę ciepła,

$\dot{G}_s, b_s$  - natężenie przepływu i właściwa energia wody uzupełniającej straty w sieci grzejącej,

$N_p$  - napędowa moc elektryczna pompy wody sieciowej.

W sumie  $\sum_j$  występującej we wzorze (6) indeks "j" oznacza kolejny numer odbiorcy ciepła.

Wyrażenie  $\dot{G}_s b_s$  występujące we wzorze (6) ma na ogół małą wartość w porównaniu z wyrażeniem  $\dot{P} b_p$ . Wykorzystując pojęcie sprawności termicznej brutto  $\eta_t k_B$  kotła parowego można stosunek powyższych wyrażeń obliczyć szacunkowo w sposób następujący:

$$\frac{\dot{G}_s b_s}{\dot{P} b_p} = \frac{0,7 \cdot 7 \cdot 0,1 b_s W_d \eta_t k_B}{(1_p - 1_w) b_p} = \frac{0,49 \cdot 40 \cdot 0,9}{2 \cdot 400 \cdot 1,08} = 0,00679$$

Dla szacunkowego określenia powyższego stosunku przyjęto, że przez upust ogrzewniczy przepływa 70% pary produkowanej przez kocioł, stosunek natężenia przepływu wody w sieci grzejącej do natężenia przepływu pary upustowej wynosi 7, straty wody w sieci grzejącej wynoszą około 10% oraz  $b_s = 40$  kJ/kg. Pozostałe wartości przyjęto tak jak w punkcie 2. Wyrażenie  $\dot{G}_s b_s$  stanowi około 0,7% wielkości  $\dot{P} b_p$ .

Ilość  $\dot{G}_d$  wody uzupełniającej straty kondensatu jest przeważnie większa w elektrociepłowni niż w elektrowni. Dla szacunkowego określenia wyrażenia  $\dot{G}_d b_d$  występującego we wzorze (6) można przyjąć, że z ilości 70% pary upustowej 50% pary zużywa się na cele technologiczne, gdzie strata kondensatu wynosi 50%.

$$\frac{\dot{G}_d b_d}{\dot{P} b_p} = \frac{0,7 \cdot 0,5 \cdot 0,5 b_d W_d \eta_t k_B}{(1_p - 1_w) b_p} = \frac{0,175 \cdot 40 \cdot 0,9}{2 \cdot 400 \cdot 1,08} = 0,00243$$

Wyrażenie  $\dot{G}_d b_d$  stanowi około 0,24% wielkości  $\dot{P} b_p$ .

Uproszczony wzór na sprawność egzergetyczną netto elektrociepłowni

$$\eta_{b\text{ ec } N} = \frac{N - N_p + \sum_i (\dot{G}_g b_g - \dot{G}_z b_z)_i}{\dot{P} b_p} \quad (7)$$

otrzymuje się, jeżeli we wzorze (6) pominię się wyrażenie  $\dot{G}_d b_d$ ,  $\dot{G}_w b_w$  i  $\dot{G}_s b_s$  jako małe. Należy jednak zaznaczyć, że suma tych wyrażeń według szacunkowych obliczeń wynosi  $0,00243 + 0,0139 + 0,00679 = 0,02312$  a więc około 2,3% wielkości  $\dot{P} b_p$ .

Rękopis złożone w Redakcji w dniu 4 lipca 1964 r.

#### LITERATURA

- [1] Szargut J.: Bilans egzergetyczny procesów cieplnych, Energetyka Przemysłowa 9 (1961) nr 3, str. 73/79.
- [2] Szargut J.: Bilans egzergetyczny procesów hutniczych, Archiwum Hutnictwa 6 (1961) nr 1, str. 23/60.
- [3] Szargut J. Styrylska T.: Angenäherte Bestimmung der Exergie von Brennstoffen, BWK 16 (1964) nr 12, str. 591/96.

## ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ К.П.Д. ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛЕЙ

## Р е з ю м е

Рассмотрены составляющие эксергетического баланса тепловых электростанций и теплоэлектроцентралей. Даны формулы для расчета эксергетического к.п.д. Сделаны оценочные расчеты некоторых составляющих эксергетического баланса. Сравнены численные значения термического и эксергетического к.п.д.

## THE EXERGY EFFICIENCY OF STEAM POWER STATION

## S u m m a r y

The components of exergy balance have been discussed. The formulae for calculation of exergy efficiency of electric and thermal-electric power station are given. The quantities of some components of exergy balance have been estimated. The thermal and exergy efficiencies have been compared.