

Jan SZARGUT

Instytut Techniki Ciepłej
Politechniki ŚląskiejSKUMULOWANA SPRAWNOŚĆ ENERGETYCZNA
DOSTAWY CIEPŁA Z ELEKTROCIEPŁOWNI

Streszczenie. Za pomocą skumulowanej sprawności wytwarzania energii elektrycznej i skumulowanej sprawności dostawy paliwa sformułowano wzór określający skumulowaną oszczędność energii chemicznej, wynikającą ze skojarzonej gospodarki ciepło-elektrycznej. Wzór ten wykorzystano do wyznaczenia skumulowanej sprawności energetycznej dostawy ciepła z elektrociepłowni. Uzyskany wzór jest zgodny ze wzorem wynikającym z podziału zużycia paliwa w elektrociepłowni za pomocą metody elektrowni równoważnej.

1. WPROWADZENIE

Wpływ procesów energetycznych na całość gospodarki energetycznej kraju można badać za pomocą wskaźników skumulowanego zużycia energii. Wyrażają one sumaryczne zużycie energii w całej sieci procesów technologicznych prowadzących od surowców zaczerpniętych z przyrody do rozpatrywanego produktu [1,2,5]. Jeżeli końcowy efekt użyteczny można wyrazić w jednostkach energii, to można wprowadzić pojęcie skumulowanej sprawności energetycznej [7]. Jest to stosunek użytecznego efektu energetycznego do skumulowanego zużycia energii obciążającego ten efekt. Sprawność energetyczna jest wskaźnikiem czysto ilościowym, nie uwzględnia zróżnicowanej jakości różnych postaci energii. Informację o stopniu doskonałości termodynamicznej sieci procesów technologicznych można uzyskać za pomocą analizy skumulowanej egzergetyżonności, pozwalającej obliczyć skumulowaną sprawność egzergetyczną wytwarzania materiałów i nośników energii [6]. Przy rozpatrywaniu skojarzonej gospodarki ciepło-elektrycznej analizowanie skumulowanej sprawności egzergetycznej wytwarzania ciepła jest utrudnione przez występowanie kilku poziomów temperatury przy przekazywaniu ciepła (średnia temperatura nośnika ciepła wytwarzanego w elektrociepłowni jest wyższa niż średnia temperatura nośnika ciepła w ogrzewanym budynku, ta zaś jest wyższa niż średnia temperatura ogrzewanego pomieszczenia). Bardziej jednoznaczne wyniki daje obliczenie skumulowanej sprawności energetycznej wytwarzania lub dostawy ciepła.

Przy wyznaczaniu skumulowanej sprawności energetycznej produkcji ciepła w elektrociepłowni można oprzeć się na odpowiedniej metodzie podziału zużycia energii chemicznej na produkcję ciepła i energii elektrycznej. Zagadnienie to jest od wielu lat przedmiotem dyskusji [3,4,5,9]. Często stosowana jest tzw. metoda fizyczna, zakładająca, że sprawność wytwarzania pracy i ciepła w obiegu elektrociepłowni przeciwprężnej jest jednako- wa i równa 100%. Metoda ta stanowi np. podstawę obliczania wskaźników energetycznych elektrociepłowni w Rocznikach Statystycznych GUS. Metoda fizyczna nie uwzględnia wpływu gospodarki skojarzonej na zużycie paliwa w elektrowniach kondensacyjnych, korzyści zaś gospodarki skojarzonej prze- rzuca w całości na produkcję energii elektrycznej w elektrociepłowni. Poprawna metoda podziału zużycia energii chemicznej polega na wprowadze- niu pojęcia elektrowni kondensacyjnej równoważnej, zastąpionej przez elektrociepłownię w zakresie produkcji energii elektrycznej. Poprawność tej metody wprowadzonej przez J. Wagnera [9] została uzasadniona np. w [5]. W niniejszej pracy wykazano, że za pomocą oczywistego wzoru na skumulowa- ną oszczędność energii chemicznej uzyskuje się taki sam wzór na skumulo- waną sprawność produkcji ciepła, jak za pomocą metody elektrowni równo- ważnej.

2. SKUMULOWANA OSZCZĘDNOŚĆ ENERGII CHEMICZNEJ

Skumulowaną oszczędność energii chemicznej uzyskaną dzięki skojarzeniu wytwarzania ciepła i energii elektrycznej można obliczyć przez odjęcie skumulowanego zużycia występującego w gospodarce skojarzonej od skumulo- wanego zużycia w gospodarce rozdzielonej (tj. w zastąpionej elektrowni kondensacyjnej i zastąpionej ciepłowni). W elektrociepłowni tylko człon przeciwprężny zapewnia oszczędność energii chemicznej i dlatego oblicze- nia przeprowadzono dla elektrociepłowni przeciwprężnej. Dla elektrociep- łowni i równoważnego zespołu elektrownia-ciepłownia uzyskuje się nastę- pujące wzory na skumulowane zużycie energii chemicznej:

$$\dot{E}_{ch\ ec} = \frac{1}{\eta_{dp}^* \eta_{E\ k}} \left(\frac{N_{el}}{\eta_{me} \eta_{tp}} + \frac{\dot{Q}_g}{\eta_{pc}} \right), \quad (1)$$

$$\dot{E}_{ch} = \frac{\dot{Q}_g}{\eta_{dp}^* \eta'_{E\ k} \eta'_{pc}} + \frac{N_{el}}{\eta_{E\ el}^*} \quad (2)$$

gdzie:

\dot{Q}_g , N_{el} - strumień ciepła i moc elektryczna dostarczone odbiorcy z elektrociepłowni,

- η_{dp}^* - skumulowana sprawność dostawy paliwa [8], $\eta_{dp}^* \approx 0,93$,
 $\eta_{E\ el}^*$ - skumulowana sprawność dostawy energii elektrycznej z elektrowni kondensacyjnej [8], $\eta_{E\ el}^* \approx 0,25$,
 $\eta_{E\ k}, \eta'_{E\ k}$ - sprawność energetyczna kotła elektrociepłowni i kotła zastąpionej ciepłowni rejonowej,
 η_{pc}, η'_{pc} - sprawność przesyłania ciepła z elektrociepłowni i ciepłowni rejonowej,
 η_{ms} - sprawność elektromechaniczna turboszespołu elektrociepłowni,
 η_{tp} - sprawność transformacji i przesyłania energii elektrycznej z elektrociepłowni.

Ze wzorów (1) i (2) wynika oszczędność energii chemicznej w jednostce czasu w skali kraju

$$\begin{aligned}
 \Delta \dot{E}_{ch} = N_{el} & \left(\frac{1}{\eta_{E\ el}^*} - \frac{1}{\eta_{dp}^* \cdot \eta_{E\ k} \cdot \eta_{me} \cdot \eta_{tp}} \right) - \\
 & - \dot{Q}_g \frac{1}{\eta_{dp}^*} \left(\frac{1}{\eta_{E\ k} \cdot \eta_{pc}} - \frac{1}{\eta'_{E\ k} \cdot \eta'_{pc}} \right)
 \end{aligned} \quad (3)$$

Zwykle sprawność energetyczne kotłów jest większa w elektrociepłowni niż w ciepłowni rejonowej, natomiast sprawność przesyłania ciepła jest mniejsza dla elektrociepłowni ze względu na bardziej rozległą sieć. Omawiane wpływy częściowo kompensują się i dlatego drugi składnik wzoru (3) ma stosunkowo małą wartość,

Do wzoru (3) można wprowadzić stosunek $\mu = N_{el} b / \dot{Q}_g b$ mocy elektrycznej brutto oddawanej z elektrociepłowni do strumienia ciepła brutto:

$$\frac{N_{el}}{\dot{Q}_g} = \frac{N_{el} b}{\dot{Q}_g b} \frac{\eta_{tp}}{\eta_{pc}} = \mu \frac{\eta_{tp}}{\eta_{pc}}. \quad (4)$$

Otrzymuje się:

$$\begin{aligned}
 \Delta \dot{E}_{ch} = \dot{Q}_g & \left[\frac{\mu}{\eta_{pc}} \left(\frac{\eta_{tp}}{\eta_{E\ el}^*} - \frac{1}{\eta_{dp}^* \cdot \eta_{E\ k} \cdot \eta_{me}} \right) - \right. \\
 & \left. - \frac{1}{\eta_{dp}^*} \left(\frac{1}{\eta_{E\ k} \cdot \eta_{pc}} - \frac{1}{\eta'_{E\ k} \cdot \eta'_{pc}} \right) \right]
 \end{aligned} \quad (5)$$

Wzór (5) obowiązuje bez względu na sposób wytwarzania szczytowej ilości ciepła. Jeżeli np. ciepło to wytwarza się w kotłach wodnych, to do wzoru należy wprowadzić średnią ważoną sprawność kotłów elektrociepłowni czynnych przy danym obciążeniu.

3. SKUMULOWANA SPRAWNOŚĆ ENERGETYCZNA DOSTAWY CIEPŁA

Oszczędność energii chemicznej można obliczyć również za pomocą skumulowanej sprawności energetycznej dostawy ciepła z ciepłowni zastąpionej i z elektrociepłowni:

$$\Delta \dot{E}_{ch} = \dot{Q}_g \left(\frac{1}{\eta_{dp}^* \eta_{Ek} \eta'_{pc}} - \frac{1}{\eta_{Eg ec}^*} \right), \quad (6)$$

gdzie $\eta_{Eg ec}^*$ wyraża skumulowaną sprawność energetyczną dostawy ciepła z elektrociepłowni.

Z porównania wzorów (5) i (6) wynika wzór na skumulowaną sprawność energetyczną dostawy ciepła z elektrociepłowni:

$$\eta_{Eg ec}^* = \frac{\eta_{dp}^* \eta_{Ek} \eta_{pc}}{1 - \mu \left(\frac{\eta_{dp}^* \eta_{Ek} \eta_{tp}}{\eta_{Eel}^*} - \frac{1}{\eta_{me}} \right)} \quad (7)$$

Uwzględniając wg [8] przybliżoną zależność

$$\eta_{Eel}^* \approx \eta_{dp}^* \eta_{Eel} \eta'_{tp}, \quad (8)$$

można wzór (7) przedstawić w postaci:

$$\eta_{Eg ec}^* \approx \frac{\eta_{dp}^* \eta_{Ek} \eta_{pc}}{1 - \mu \left(\frac{\eta_{Ek} \eta_{tp}}{\eta_{Eel}} - \frac{1}{\eta_{me}} \right)} \quad (9)$$

gdzie:

η_{Eel} - bezpośrednia sprawność elektrowni kondensacyjnej (stosunek oddanej do sieci energii elektrycznej do zużytej energii chemicznej paliwa),

η'_{tp} - sprawność transformacji i przesyłania energii elektrycznej z elektrowni kondensacyjnej.

Skumulowana sprawność dostawy ciepła z elektrociepłowni jest często większa od jedności. Wynik ten nie jest sprzeczny z zasadami termodynamiki. Wystarczy przypomnieć, że sprawność energetyczna pompy grzewczej jest zawsze większa od jedności.

4. PODZIAŁ ZUŻYCIA ENERGII CHEMICZNEJ W ELEKTROCIĘPŁOWNI

Ciepło jest produktem głównym elektrociepłowni, gdyż zapotrzebowanie na ciepło determinuje jej moc i lokalizację. Energia elektryczna jest produktem ubocznym zastępującym częściowo produkt główny procesu wyspecjalizowanego, tj. zastąpionej elektrowni kondensacyjnej [5,9]. Wytwarzanie energii elektrycznej w elektrociepłowni wpływa w ten sposób na całość gospodarki energetycznej kraju, że zmniejsza produkcję energii elektrycznej i zużycie paliwa w zastąpionej elektrowni kondensacyjnej. Produkcję ciepła w elektrociepłowni obciąża więc zużycie energii chemicznej w elektrociepłowni pomniejszone o spadek zużycia w elektrowniach kondensacyjnych.

$$\begin{aligned} \dot{E}_{ch\ g\ ec} &= \dot{E}_{ch\ ec} - \frac{N_{el}}{\eta_{E\ el}^*} = \\ &= \left(\frac{1}{\eta_{dp}^* \eta_{E\ k} \eta_{me} \eta_{tp}} - \frac{1}{\eta_{E\ el}^*} \right) N_{el} + \frac{\dot{Q}_g}{\eta_{dp}^* \eta_{E\ k} \eta_{pc}} \quad (10) \end{aligned}$$

W celu obliczenia skumulowanej sprawności energetycznej dostawy ciepła z elektrociepłowni należy podzielić wielkość \dot{Q}_g przez $\dot{E}_{ch\ g\ ec}$. Otrzymuje się wzór zgodny ze wzorem (7). Ze wzoru na oszczędność energii chemicznej wynika więc taki sam wzór na skumulowaną sprawność energetyczną dostawy ciepła jak z podziału zużycia paliwa według metody elektrowni równoważnej.

5. SKUMULOWANA SPRAWNOŚĆ EGZERGETYCZNA DOSTAWY CIEPŁA

Stopień doskonałości termodynamicznej dostawy ciepła z elektrociepłowni można określić za pomocą skumulowanej sprawności egzergetycznej. Sprawność tę można wyrazić za pomocą skumulowanej sprawności energetycznej wprowadzając dodatkowo czynnik Carnota oraz stosunek w_d/b_{ch} wartości opałowej do egzergii chemicznej paliwa

$$\eta_{E\ g\ ec}^* = \eta_{E\ ec}^* \frac{T_m - T_{ot}}{T_m} \frac{w_d}{b_{ch}} \quad (11)$$

gdzie:

T_m - średnia temperatura zmierzona na osłonie kontrolnej wyodrębniającej rozpatrywany układ,

T_{ot} - temperatura otoczenia.

Zależnie od sposobu poprowadzenia osłony kontrolnej mogą wystąpić różne wartości T_m . Jeżeli osłona kontrolna przecina sieć ciepłowniczą przed wymiennikiem ciepła zainstalowanym w budynku, to T_m wyraża średnią temperaturę wody sieciowej przy dopływie i odpływie z tego wymiennika ciepła. Jeżeli osłona kontrolna obejmuje wymiennik ciepła w budynku, to T_m wyraża średnią temperaturę wody grzejnej w wewnętrznej sieci ogrzewania. Jeżeli osłona kontrolna przebiega przez ogrzewane pomieszczenie, to T_m oznacza średnią temperaturę tego pomieszczenia. Ponadto sprawność egzergetyczna zależy wyraźnie od temperatury otoczenia. Zawsze sprawność egzergetyczna dostawy ciepła jest znacznie mniejsza od energetycznej.

6. WNIOSKI

1. Przy ocenie efektów energetycznych skojarzonej gospodarki ciepłno-elektrycznej należy uwzględnić skumulowaną sprawność dostawy paliwa, wytwarzania energii elektrycznej oraz straty przesyłania ciepła i energii elektrycznej.

2. Skumulowana sprawność dostawy ciepła z elektrociepłowni może służyć do porównania efektywności energetycznej elektrociepłowni z innymi metodami dostawy ciepła np. z pompą grzejącą.

3. Nie jest dopuszczalny podział zużycia paliwa w elektrociepłowni między ciepło i energię elektryczną za pomocą metody fizycznej zakładającej jednakową sprawność wytwarzania ciepła i pracy w obiegu przeciwnym na poziomie 100%.

4. Skumulowana sprawność energetyczna dostawy ciepła z elektrociepłowni jest często większa od jedności.

5. Skumulowana sprawność egzergetyczna dostawy ciepła z elektrociepłowni jest znacznie mniejsza od skumulowanej sprawności energetycznej. Ponadto zależy wyraźnie od przebiegu osłony kontrolnej wyodrębniającej rozpatrywany układ i od temperatury otoczenia.

LITERATURA

- [1] Bibrowski Z. (red.): Energochłonność skumulowana. PWN, Warszawa 1983.
- [2] Boustead I., Hancock G.F.: Handbook of Industrial Energy Analysis. Ellis Harwood, Chichester 1979.
- [3] Maręcki J.: Gospodarka skojarzona ciepłno-elektryczna. Wyd. II. WNT, Warszawa 1980.

- [4] Marecki J.: Gospodarka skojarzona ciepłno-elektryczna. Zeszyty Naukowe Pol. Sl. Energetyka z.106, 1989.
- [5] Szargut J.: Analiza termodynamiczna i ekonomiczna w energetyce przemysłowej. WNT, Warszawa 1983.
- [6] Szargut J.: Doskonałość termodynamiczna wytwarzania materiałów i energii użytkowej. Energetyka 1985, nr 12, ss. 485-488.
- [7] Szargut J.: Skumulowane wskaźniki energetyczne charakteryzujące dostawę ciepła z elektrociepłowni. Energetyka, 1989 nr 3, s. 77-80.
- [8] Szargut J.: Skumulowana energochłonność górnictwa węglowego. Energetyka 1989, nr 3, s. 90-91.
- [9] Wagner J.: Metoda podziału kosztów własnych elektrociepłowni między oddawaną z niej energią elektryczną i ciepłą. PAN, Komitet Elektryfikacji Polski, Materiały i Studia t. 5, PWN, Łódź, Warszawa 1962.

КУМУЛИРОВАННЫЙ КПД ДОСТАВКИ ТЕПЛА ИЗ ТЭЦ

Р е з ю м е

При помощи куммулированного кпд производства электроэнергии и куммулированного кпд доставки топлива получена формула определяющая куммулированную экономию химической энергии, являющейся эффектом комбинированной выработки тепла и электроэнергии. Эта формула использована для определения куммулированного кпд доставки тепла из ТЭЦ. Полученная формула согласуется с формулой, вытекающей из разделения расхода топлива в ТЭЦ методом эквивалентной электростанции.

CUMULATIVE ENERGY EFFICIENCY OF THE HEAT DELIVERY FROM THE HEAT - AND - POWER PLANT

S u m m a r y

By means of the cumulative energy efficiency of the delivery of electricity and of the delivery of fuel, the formula has been found determining the cumulative economy of chemical energy resulting from the combined production of heat and electricity. This formula has been used for the determination of cumulative energy efficiency of the heat delivery from the heat-and-power plant. The obtained formula agrees with the formula resulting from the fuel consumption partition in the heat-and-power plant by means of the method of equivalent power plant.