

LESZEK ROSTOCKI*

ENERGETYCZNE WSKAŹNIKI UKŁADÓW MIKROKOGENERACYJNYCH

Streszczenie

W artykule przedstawiono w zarysie podstawowe wskaźniki służące do analizy i oceny energetycznej pracy układów mikrokogeneracyjnych. W pierwszej części artykułu wprowadzono również w zagadnienia mikrokogeneracji, ze szczególnym uwzględnieniem stosowania tych urządzeń w budownictwie mieszkaniowym.

Słowa kluczowe: mikrokogeneracja gazowa, wskaźniki sprawności, system ciepłowniczy, analiza energetyczna

WPROWADZENIE

Sprawność energetyczna układu produkującego energię elektryczną lub ciepłą to sprawność przetwarzania (konwersji) energii pierwotnej paliwa. W przypadku produkcji ciepła osiągnięcie sprawności układu powyżej 90% nie jest problemem, zwłaszcza przy spalaniu paliw gazowych i płynnych, natomiast przy produkcji tylko energii elektrycznej osiągane są sprawności maksymalnie na poziomie 50-60%.

W nowoczesnych technologicznie, konwencjonalnych elektrowniach kondensacyjnych przeciętna sprawność wynosi ok. 38-42%, a więc straty energii w postaci ciepła są na poziomie ok. 60%. W układzie elektrownia – odbiorca energii sprawność dodatkowo zmniejsza się o straty przesyłowe wynoszące ok. 5-10%.

Proces technologiczny produkcji energii elektrycznej i ciepła w tzw. skojarzeniu – kogeneracji (CHP – Combined Heat and Power) wykorzystywano już pod koniec XIX w. w Europie i USA. Wraz z rozwojem sieci energetycznej i spadkiem cen energii stopniowo malał udział energii uzyskiwanej w kogeneracji w jej całkowitej produkcji osiągając najniższy poziom na początku lat 70-tych ubiegłego wieku. Wtedy też wystąpił światowy kryzys paliwowy, który

* doktorant w Instytucie Inżynierii Środowiska, Uniwersytetu Zielonogórskiego

wymusił szereg działań mających na celu oszczędzanie energii. Od tego momentu datuje się także szybki rozwój systemów kogeneracyjnych.

KOGENERACJA W BUDOWNICTWIE MIESZKANIOWYM

W Polsce produkcja energii w kogeneracji jeszcze do niedawna realizowana była głównie w parowych elektrociepłowniach zawodowych, zasilających w ciepło komunalne systemy ciepłownicze oraz w elektrociepłowniach przemysłowych pracujących na potrzeby technologiczne zakładów. Spalany był w nich najczęściej węgiel kamienny, a paliwa gazowe i płynne wykorzystywane były w niewielkim stopniu.

W latach 80-tych ubiegłego wieku w krajach rozwiniętych zaczęto budować elektrociepłownie wykorzystujące paliwa gazowe, w tym głównie gaz ziemny. Oprócz dużych elektrociepłowni gazowo – parowych zaczęto także budować układy średniej i małej mocy. Szybki rozwój układów kogeneracyjnych małej mocy – minikogeneracyjnych i mikrokogeneracyjnych umożliwiających dopasowanie produkcji energii do potrzeb małych odbiorców nastąpił pod koniec ubiegłego wieku i stał się główną przyczyną urynkowania sektora energetycznego. Układy te oparte są obecnie najczęściej na silnikach tłokowych, a rozwijane nowe technologie wykorzystują głównie mikroturbiny, ogniwa paliwowe i silniki Stirlinga.

Dzisiejsze implementacje skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w skali mikro i mini dotyczą głównie budynków biurowych lub użyteczności publicznej, w których istnieje stałe zapotrzebowanie na energię elektryczną na potrzeby technologiczne procesów, bądź innego stałego wyposażenia budynku np. serwerowni czy układów chłodzenia lub klimatyzacji precyzyjnej.

Nie istnieją przebadane rozwiązania zastosowania agregatów μ CHP w budownictwie mieszkaniowym, które zapewniłyby optymalną eksploatację urządzeń z punktu widzenia kosztów, sprawności oraz okresu zwrotu poniesionych inwestycji. Wynika to głównie z sezonowości zapotrzebowania na ciepło do celów grzewczych oraz wynikających z tego przestoju w pracy agregatów kogeneracyjnych, bądź konieczności rozpraszania ciepła za pośrednictwem chłodnic wentylatorowych, co znacząco obniża roczną sprawność całego układu.

ENERGETYCZNE WSKAŹNIKI UKŁADÓW KOGENERACYJNYCH

Małe systemy mini i mikrokogeneracyjne, określane, także jako elektrociepłownie blokowe, kontenerowe itp., wytwarzają energię elektryczną i ciepłą wodę do celów grzewczych. Wytwarzanie energii elektrycznej jest pierwotną

funkcją układu, natomiast energia cieplna odbierana jest z obiegów chłodzenia silnika i spalin lub ogniwa paliwowego. Podstawowymi elementami układu są:

- silnik tłokowy (spalinowy SI i CI, Stirlinga) lub mikroturbina z generatorem prądu, bądź ogniwo paliwowe,
 - system wymienników ciepła z automatyką regulacyjną,
- a więc układ znacznie prostszy w stosunku do zawodowych i komunalnych elektrociepłowni parowych.

W układach wytwarzających dodatkowo czynnik chłodniczy na potrzeby instalacji klimatyzacyjnych budynków, tj. w systemach trójgeneracyjnych BCHP (Building Cooling Heat and Power) dodatkowym podstawowym elementem jest bromolitowa chłodziarka absorpcyjna.

Podstawowe energetyczne wskaźniki pracy układów kogeneracyjnych charakteryzują sprawność konwersji energii i należą do podstawowych danych w analizach techniczno-ekonomicznych i oddziaływania na środowisko.

Wskaźniki te definiowane są następująco:

- sprawność wytwarzania energii elektrycznej (sprawność elektryczna):

$$\eta = \frac{N_e}{E_{CH}} = \frac{N_e}{G_p \cdot w_d}$$

gdzie:

N_e – wytwarzana w kogeneracji moc elektryczna,

E_{CH} – strumień energii chemicznej paliwa,

G_p – strumień paliwa,

w_d – wartość opałowa paliwa,

- wskaźnik skojarzenia (stopień skojarzenia):

$$\delta = \frac{E_{el}}{\dot{Q}}$$

gdzie:

E_{el} – wytwarzana w kogeneracji moc elektryczna,

\dot{Q} – wytwarzana moc cieplna,

- sprawność wytwarzania użytkowej energii cieplnej (sprawność cieplna):

$$\eta_q = \frac{Q_u}{E_{CH}} = \frac{Q_u}{G_p \cdot w_d}$$

gdzie:

Q_u – użytkowa moc energii cieplnej z kogeneracji,

E_{CH} – strumień energii chemicznej paliwa,

G_p – strumień paliwa,

w_d – wartość opałowa paliwa,

- sprawność całkowita η_c (wskaźnik wykorzystania energii chemicznej paliwa EUF):

$$\eta_c = EUF = \frac{N_e + Q_u}{E_{CH}} = \frac{N_e + Q_u}{G_p \cdot w_d}$$

gdzie:

N_e – wytwarzana w kogeneracji moc elektryczna,

Q_u – użytkowa moc energii cieplnej z kogeneracji,

E_{CH} – strumień energii chemicznej paliwa,

G_p – strumień paliwa,

w_d – wartość opałowa paliwa,

- sprawność egzergetyczna η_b :

$$\eta_b = \frac{N_e + \Delta B_q}{G_p \cdot b_{CH}}$$

gdzie:

N_e – wytwarzana w kogeneracji moc elektryczna,

ΔB_q – przyrost egzergii czynnika grzewczego,

G_p – strumień paliwa,

b_{CH} – egzergia właściwa paliwa,

- redukcja zużycia energii chemicznej paliwa ΔE_{CH} (oszczędność energii chemicznej paliwa):

$$\Delta E_{CH} = E_{CH}^R - E_{CH} = N_e^O \cdot \left(\frac{1}{\eta_e^E \cdot \eta_{pe}^E} - \frac{1}{\eta_c \cdot \eta_{pe}} \right) + Q_u^O \cdot \left(\frac{1}{\eta_q^C \cdot \eta_{pq}^C} - \frac{1}{\eta_c \cdot \eta_{pq}} \right)$$

gdzie:

E_{CH}^R – zużycie energii chemicznej paliwa w rozdzielonej produkcji energii (w elektrowni i ciepłowni/kotłowni),

E_{CH} – zużycie energii chemicznej paliwa w układzie kogeneracyjnym,

N_e^O – zapotrzebowanie na energię elektryczną u odbiorcy/iłość dostarczonej energii elektrycznej z układu kogeneracyjnego,

Q_u^O – zapotrzebowanie na energię cieplną u odbiorcy/iłość dostarczonej energii cieplnej z układu kogeneracyjnego,

η_e^E – sprawność energetyczna netto elektrowni,

η_{pe}^E – sprawność transformacji i przesyłu energii elektrycznej z elektrowni do odbiorcy,

η_c – całkowita sprawność wytwarzania energii w układzie kogeneracyjnym,

η_{pe} – sprawność transformacji i przesyłu energii elektrycznej z układu kogeneracyjnego do odbiorcy,

η_q^C – sprawność wytwarzania użytkowej energii cieplnej (sprawność energetyczna netto) kotłów w ciepłowni/kotłowni,

η_{pq}^C – sprawność przesyłania ciepła z ciepłowni/kotłowni do odbiorcy,

η_q – sprawność wytwarzania użytkowej energii cieplnej w układzie kogeneracyjnym,

η_{pq} – sprawność przesyłania energii cieplnej z układu kogeneracyjnego do odbiorcy,

W przypadku układów mikrokogeneracyjnych (moduł kogeneracyjny w budynku lub kontenerze obok budynku) można przyjąć pomijalną wielkość strat energii na przesył i brak strat transformacji energii elektrycznej, tj.

$$\eta_{pe} = \eta_{pq} = 1$$

w takim przypadku wzór uprości się do postaci:

$$\Delta E_{CH} = E_{CH}^R - E_{CH} = N_e^O \cdot \left(\frac{1}{\eta_e^E \cdot \eta_{pe}^E} - \frac{1}{\eta_c} \right) + Q_u^O \cdot \left(\frac{1}{\eta_q^C \cdot \eta_{pq}^C} - \frac{1}{\eta_c} \right)$$

– wskaźnik względnej oszczędności energii chemicznej paliwa FESR:

$$FESR = \frac{\Delta E_{CH}}{E_{CH}^R}$$

gdzie:

ΔE_{CH} – redukcja zużycia energii chemicznej paliwa,

E_{CH}^R – zużycie energii chemicznej paliwa w rozdzielonej produkcji energii (w elektrowni i ciepłowni/kotłowni),

- wskaźnik oszczędności energii chemicznej pierwotnej PES (wg Dyrektywy 2004/8/WE z 11.02.2004 r.):

$$PES = \left[1 - \frac{1}{\frac{\eta_q}{\eta_{refq}} + \frac{\eta_e}{\eta_{refe}}} \right] \cdot 100 \quad [\%]$$

gdzie:

η_q – sprawność wytwarzania cząstkowej energii cieplnej w kogeneracji,

η_e – sprawność wytwarzania energii elektrycznej w kogeneracji,

η_{refq}, η_{refe} – odpowiednio referencyjna wartość sprawności rozdzielonego wytwarzania energii cieplnej i elektrycznej,

Kryterium to jest wykorzystywane do obliczania ilości energii elektrycznej z kogeneracji przypisywanej na świadectwie pochodzenia z kogeneracji.

W przypadku układów trójgeneracyjnych z absorpcyjną chłodziarką – równoczesnym wytwarzaniem energii elektrycznej, ciepła i chłodu energetyczne wskaźniki pracy układu definiowane są następująco:

- sprawność całkowita układu trójgeneracyjnego (wskaźnik wykorzystania energii chemicznej paliwa w trójgeneracji EUFT):

$$\eta_{cT} = EUF_T = \frac{N_{en} + Q_{un} + Q_{CH}}{G_p \cdot w_d}$$

$$N_{en} = N_e - (N_p + N_w)$$

$$Q_{un} = Q_u - Q_N$$

gdzie:

N_{en} – wytworzona moc elektryczna netto (na wyjściu z układu),

N_e – wytworzona moc elektryczna w układzie,

N_p – moc elektryczna napędu pompy chłodziarki absorpcyjnej,

N_w – moc elektryczna na potrzeby własne układu,

Q_{un} – wytworzona użyteczna moc cieplna na wyjściu z układu,

Q_N – napędowa moc cieplna wężownika chłodziarki absorpcyjnej,

Q_{CH} – wytworzona moc chłodnicza,

Q_N – napędowa moc cieplna wężownika chłodziarki absorpcyjnej,

G_p – strumień paliwa,

w_d – wartość opałowa paliwa,

- redukcja zużycia energii chemicznej paliwa (oszczędność energii chemicznej paliwa) w trójgeneracji.

Podobnie jak w przypadku układów mikrokogeneracyjnych można przyjąć pomijalną wielkość strat energii na przesyle z układu trójgeneracyjnego do budynku i brak strat transformacji energii elektrycznej, tj.

$$\eta_{pe} = \eta_{pq} = 1$$

Oszczędność energii chemicznej paliwa ΔE_{CH}^T dla takiego przypadku jest równa:

$$\Delta E_{CH}^T = N_{en} \cdot \left(\frac{1}{\eta_e^E \cdot \eta_{pe}^E} - \frac{1}{EUF_T} \right) + Q_{un} \cdot \left(\frac{1}{\eta_q^C \cdot \eta_{pq}^C} - \frac{1}{EUF_T} \right) + Q_{CH} \cdot \left(\frac{1}{(EER_s) \cdot \eta_e^E \cdot \eta_{pe}^E} - \frac{1}{EUF_T} \right)$$

gdzie:

N_{en} – wytworzona moc elektryczna netto (na wyjściu z układu),

Q_{un} – wytworzona użyteczna moc cieplna na wyjściu z układu,

Q_{CH} – wytworzona moc chłodnicza,

η_e^E – sprawność energetyczna netto elektrowni,

η_{pe}^E – sprawność transformacji i przesyłu energii elektrycznej z elektrowni do odbiorcy,

- η_q^C – sprawność wytwarzania użytkowej energii cieplnej (sprawność energetyczna netto) kotłów w ciepłowni/kotłowni,
 η_{pq}^C – sprawność przesyłania ciepła z ciepłowni/kotłowni do odbiorcy,
 η_{pq} – sprawność przesyłania energii cieplnej z układu kogeneracyjnego do odbiorcy,
 EER_S – współczynnik efektywności energetycznej chłodziarki sprężarkowej,
 ΔE_{CH} – redukcja zużycia energii chemicznej paliwa,
 E_{CH}^R – zużycie energii chemicznej paliwa w rozdzielonej produkcji energii (w elektrowni i ciepłowni/kotłowni),
- współczynnik efektywności energetycznej wytwarzania chłodu (efektywności chłodniczej) EER:

$$EER = \frac{Q_{CH}}{Q_N + N_p}$$

gdzie:

- Q_{CH} – wytworzona moc chłodnicza,
- Q_N – napędowa moc cieplna wężnika chłodziarki absorpcyjnej,
- N_p – moc elektryczna napędu chłodziarki absorpcyjnej,

- średni europejski współczynnik efektywności energetycznej urządzenia chłodniczego ESEER:

$$ESEER = 0,03 \cdot EER_{100\%} + 0,33 \cdot EER_{75\%} + 0,41 \cdot EER_{50\%} + 0,23 \cdot EER_{25\%}$$

gdzie:

- $EER_{X\%}$ – współczynnik efektywności energetycznej wytworzenia chłodu przy obciążeniu X%,

Dodatkowo określane są wskaźniki charakteryzujące sprawności produkcji chłodu w układzie:

- wskaźnik zużycia energii elektrycznej w układzie trójgeneracyjnym:

$$\alpha = \frac{N_p + N_w}{N_e}$$

gdzie:

N_p – moc elektryczna napędu pompy chłodziarki absorpcyjnej,

N_w – moc elektryczna na potrzeby własne układu,

N_e – wytworzona moc elektryczna w układzie,

– wskaźnik zużycia energii elektrycznej w chłodziarce absorpcyjnej:

$$\beta = \frac{N_p}{Q_{CH}}$$

gdzie:

N_p – moc elektryczna napędu pompy chłodziarki absorpcyjnej,

Q_{CH} – wytworzona moc chłodnicza,

– wskaźnik zużycia ciepła do napędu chłodziarki absorpcyjnej:

$$\gamma = \frac{Q_{CH}}{Q_u}$$

gdzie:

Q_{CH} – wytworzona moc chłodnicza,

Q_u – wytworzona użyteczna moc cieplna,

PODSUMOWANIE

Prawidłowy dobór agregatów mikrokogeneracyjnych do pracy w powiązaniu z konkretnym obiektem lub grupą obiektów wymaga znajomości zarówno charakterystyki energetycznej budynku (budynków), jak również sposobu pracy urządzenia w powiązaniu z konkretnymi instalacjami grzewczymi i elektrycznymi. Specyfika pracy urządzeń mikrokogeneracyjnych powoduje, iż trudno bez specjalistycznych badań stwierdzić, czy optymalnym rozwiązaniem jest

dobór wielkości urządzenia w oparciu o zapotrzebowanie na moc grzewczą czy elektryczną budynku.

Z tego powodu niezwykle istotna jest znajomość metodyki obliczania podstawowych wskaźników oceny energetycznej pracy agregatów mikrokogeneracyjnych.

LITERATURA

1. BARTNIK R, Elektrownie i elektrociepłownie gazowo-parowe. Efektywność energetyczna i ekonomiczna, WNT, Warszawa 2009
2. CHMIELNIAK T., Technologie energetyczne, WNT, Warszawa 2008
3. DUŻYŃSKI A., Analiza rzeczywistych parametrów techniczno-eksploatacyjnych gazowych zespołów kogeneracyjnych, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2008
4. SKOREK J., KALINA J., Gazowe układy kogeneracyjne, PWN, Warszawa 2005
5. WOJAS K., WANATOWICZ P., Kogeneracja wysokosprawna – projektowane zmiany oraz porównanie metodologii obliczeń w Polsce i Republice Czeskiej, Rynek Energii 5/2010, Lublin 2010
6. ZAPOROWSKI B., Efektywność ekonomiczna elektrociepłowni opalanych gazem ziemnym, Rynek Energii 3/2009, Lublin 2009

THE ENERGY INDICATORS OF MICRO-COGENERATION SYSTEMS

S u m m a r y

This paper provides an overview of basic energy parameters for the analysis and assessment of micro-cogeneration systems. In the first part of the article author also introduced the issue of using a micro-cogeneration systems in residential buildings.

Key words: microcogeneration, performance indicator, district heating system, energy analysis