

Prof. dr hab. inż. Ryszard Bartnik, dr inż. Zbigniew Buryn, dr inż. Anna Hnydiuk-Stefan
Katedra Zarządzania Energetyką, Wydział Inżynierii Produkcji i Logistyki, Politechnika Opolska

Sprawność energetyczna oraz wskaźnik emisji dwutlenku węgla

z bloku gazowo-parowego dwupaliwowego
w układzie równoległym

Układy gazowo-parowe dwupaliwowe, szczególnie układ równoległy, obok budowy nowych bloków energetycznych stanowią również duży potencjał modernizacyjny dla już istniejących elektrociepłowni i elektrowni węglowych [1-6]. Układy dwupaliwowe mogą bowiem powstawać w wyniku nadbudowy już istniejących cieplnych struktur węglowych turbiną gazową. Bardzo istotną zaletą takich modernizacji obok zwiększenia mocy elektrycznych bloków jest także znaczne zwiększenie sprawności wytwarzania w nich energii elektrycznej oraz znaczne zmniejszenie emisji dwutlenku węgla na megawatogodzinę wyprodukowanej energii elektrycznej netto.



Wysokość tych zmian zależy od mocy zastosowanego turbosespołu gazowego. Co ważne, jednostkowe nakłady inwestycyjne na takie modernizacje są małe, wynoszą jedynie ok. 2,5-2,7 mln zł na megawat zainstalowanej mocy.

Na rysunku 1 pokazano przykładowy schemat cieplny bloku gazowo-parowego dwupaliwowego w układzie równoległym. Możliwych jest oczywiście wiele innych rozwiązań technicznych układu para-woda w kotle odzyskowym sprzęgającym część gazową bloku (turbosespół gazowy) z obiegiem parowym (kotłem opalonym węglem i turbiną parową).

Na rysunku 2 przedstawiono bilans energii bloku gazowo-parowego dwupaliwowego w układzie równoległym. Bilans ten jest słuszny dla wszystkich sposobów połączenia części gazowej z parową.

Wykorzystując bilans energii przedstawiony na rys. 2 sprawność brutto wytwarzania energii elektrycznej w bloku gazowo-parowym dwupaliwowym w układzie równoległym wyraża się wzorem:

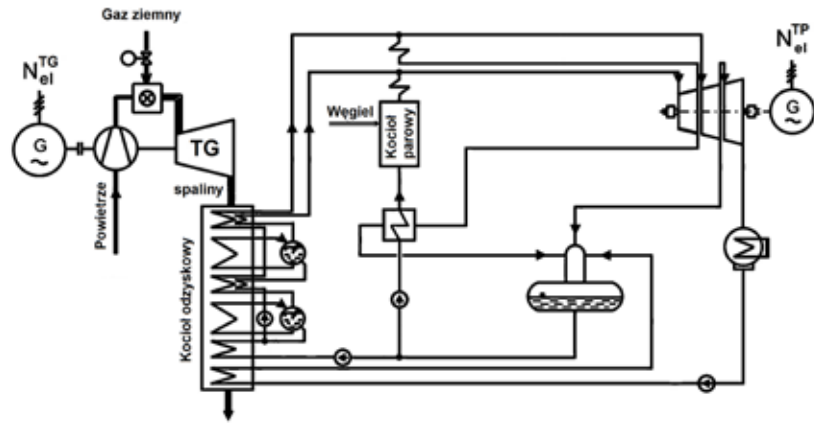
$$\eta_{el}^{GP} = \frac{E_{el}^{TG} + E_{el}^{TP}}{E_{ch}^{gaz} + E_{ch}^{weg}} = \frac{q_{row} \eta_{TG} + [q_{row}(1-\eta_{TG})\eta_{KO} + \eta_K] \eta_{kol} \eta_{TP} \eta_{me}}{1 + q_{row}}$$

przy czym stosunek energii chemicznej gazu spalonego w turbinie gazowej do energii chemicznej węgla spalonego w kotle parowym w przybliżeniu wyraża stosunek mocy turbosespołu gazowego do mocy turbosespołu parowego:

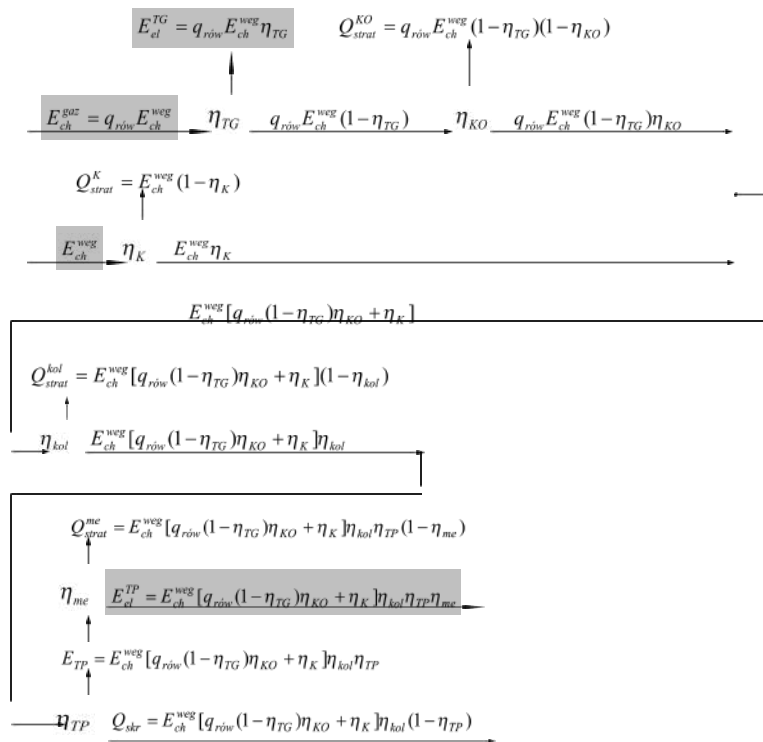
$$q_{row} = \frac{E_{ch}^{gaz}}{E_{ch,w}} \cong \frac{N_{el}^{TG}}{N_{el}^{TP}}$$

Istotnym wskaźnikiem charakteryzującym pracę bloków energetycznych jest wskaźnik emisji z nich dwutlenku węgla

EF_{CO_2} . Wskaźnik ten wyraża ilość kilogramów wyemitowanego CO_2 na megawatogodzinę wyprodukowanej w bloku energii elektrycznej E_{el} netto z ilości E_{ch} energii chemicznej spalonego paliwa. Zgodnie z unijną polityką klimatyczną wartość tego wskaźnika powinna



Rys. 1. Przykładowy schemat idealny bloku gazowo-parowego dwupaliwowego w układzie równoległym



gdzie:

- E_{el}^{TP} – energia elektryczna brutto wyprodukowana w turbospoście parowym,
- E_{el}^{TG} – energia elektryczna brutto wyprodukowana w turbinie gazowej,
- E_{ch}^{gaz} – energia chemiczna gazu spalonego w turbinie gazowej,
- E_{ch}^{weg} – energia chemiczna węgla spalonego w kotle,
- Q_{skr} – ciepło skraplania pary w skraplaczu,
- η_K – sprawność energetyczna brutto kotła,
- η_{kol} – sprawność energetyczna układu kolektorowego doprowadzającego parę do turbiny,
- $\eta_{TP} = \eta_{cr} \eta_l$ – sprawność energetyczna obiegu turbiny parowej (iloczyn sprawności energetycznej

Rys. 2. Bilans energii bloku gazowo-parowego dwupaliwowego w układzie równoległym

wynosić co najwyżej

$$EF_{CO_2} = 750 \text{ kg}_{CO_2} / \text{MWh}$$

(już się jednak mówi o wartościach wskaźnika na poziomie

$$EF_{CO_2} = 500 \text{ kg}_{CO_2} / \text{MWh}$$

a nawet mniejszych). Jak już wyżej zaznaczono, w układach gazowo-parowych dwupaliwowych wskaźnik ten, co ważne, jest istotnie mniejszy od wskaźnika dla bloku, w którym spalany jest wyłącznie węgiel. Wynika to z mniejszej emisji CO_2 pochodzącej ze spalania gazu ziemnego.

Wskaźnik EF_{CO_2} dla układów gazowo-parowych dwupaliwowych w funk-

cji $q_{rów}$ wyraża się wzorem:

$$E_{CO_2} = \frac{E_{CO_2}^{net} + E_{CO_2}^{gross}}{(E_{el}^{net} + E_{el}^{gross})(1 - \epsilon_{el})} = \frac{\dot{m}_{CO_2}^{net} + q_{CO_2} \dot{m}_{CO_2}^{gross}}{q_{CO_2} (1 - \eta_{el}) \eta_{el} + \eta_{el} \eta_{el} + q_{CO_2} \eta_{el} (1 - \epsilon_{el})} \quad \left[\frac{\text{kg}_{CO_2}}{\text{MWh}} \right]$$

gdzie wyrażone w kilogramach emisje CO_2 z jednostki energii chemicznej spalonego węgla i gazu odpowiednio wynoszą:

$$\rho_{CO_2}^{weg} \cong 95 \text{ kg}_{CO_2} / \text{GJ}$$

$$\rho_{CO_2}^{gaz} \cong 55 \text{ kg}_{CO_2} / \text{GJ}$$

Dla bloku, w którym spalane jest tylko jedno paliwo wskaźnik emisji wyraża się wzorem:

$$EF_{CO_2} = \frac{E_{ch} \rho_{CO_2}}{E_{el}} = \frac{\rho_{CO_2}}{\eta_{el}}$$

gdzie:

η_{el} - sprawność netto wytwarzania energii elektrycznej w bloku, i na przykład dla bloku węglowego na parametry nadkrytyczne o sprawności netto $\eta_{el} = 45,6\%$ (sprawność taka jest do osiągnięcia w blokach na parametry nadkrytyczne o wartościach co najmniej 28 MPa, 600/620°C; jednostkowe nakłady inwestycyjny na takie bloki wynoszą $i \approx 6,5$ mln zł/MW) wartość tego wskaźnika wynosi

$$EF_{CO_2} = 750 \text{ kg}_{CO_2} / \text{MWh}$$

a dla bloku gazowo-parowego hierarchicznego o sprawności netto $\eta_{el} = 55\%$ przyjmuje wartość tylko

$$EF_{CO_2} = 360 \text{ kg}_{CO_2} / \text{MWh}$$

W układzie gazowo-parowym dwupa-

liwowym wskaźnik EF_{CO_2} będzie zatem w tym większym stopniu bliższy wartości wskaźnika emisji CO_2 dla układu hierarchicznego, w im większym stopniu będzie w nim spalany gaz w stosunku do spalane go w kotle parowym węgla, a więc im większa będzie war-

tość $q_{rów}$. Należy zaznaczyć, że układ gazowo-parowy dwupaliwowy nie jest układem hierarchicznym, bowiem do każdego z obiegów, zarówno obiegu Joule'a turbiny gazowej i obiegu Clausiusa-Rankine'a turbiny parowej, dostarczane jest paliwo rys. 1, gdy natomiast w układach hierarchicznych paliwo jest doprowadzane wyłącznie do obiegu pracującego w zakresie najwyższych temperatur. Układy hierarchiczne są zatem układami jednopaliwowymi. Do każdego z kolejnych

” Jeszcze wyższa sprawność, także w układzie wyłącznie jednopaliwowym, bo przewyższająca nawet 60%, jest możliwa w hierarchicznym układzie gazowo-parowym

obiegów w układzie hierarchicznym, pracujących w coraz to niższych zakresach temperatur, doprowadzone do nich ciepło napędowe jest ciepłem wprowadzonym z obiegów znajdujących się w hierarchii zaraz powyżej nich. Jak do tej pory technicznie możliwe są układy hierarchiczne dwuobiegowe, reali-

zujące obieg Joule'a turbiny gazowej i Clausiusa-Rankine'a turbiny parowej. a więc w układzie, w którym realizowane są, tak samo jak w układzie dwupaliwowym, dwa obiegi, obieg Joule'a turbiny gazowej oraz Clausius-Rankine'a turbiny parowej (optymalne ciśnienie pary świeżej dla układów hierarchicznych, co bardzo istotne, wynosi zaledwie ok. 10 MPa [2]). Co więcej, nakłady jednostkowe (na jednostkę mocy) na hierarchiczne bloki gazowo-parowe są najniższe w porównaniu ze wszystkimi technologiami wytwarzania energii elektrycznej. Są ok. dwa razy mniejsze od nakładów na nowo budowany układ gazowo-parowy dwupaliwowy [4]. Niestety, wysoka, nawet 3 razy wyższa jednostkowa (na jednostkę energii) cena gazu ziemnego od jednostkowej ceny węgla powoduje nieopłacalność ekonomiczną pracy tych układów.

Na rysunku 3 przedstawiono krzywe obrazujące zmianę wartości wskaźnika

emisji dwutlenku węgla EF_{CO_2} z bloku gazowo-parowego dwupaliwowego w układzie równoległym na megawatogodzinę wyprodukowanej energii elektrycznej (wzór (3)) oraz krzywe

sprawności brutto $\eta_{el}^{GP,dp}$ wytwarzania energii elektrycznej (wzór (1)). Do obliczeń przyjęto następujące wartości danych wejściowych:

$$\eta_{TG} = 0,35, \eta_{KO} = 0,85, \eta_K = 0,9,$$

$$\eta_{kol} = 0,98, \eta_{me} = 0,98, \epsilon_{el} = 0,04.$$

Wartość sprawności energetycznej obiegu Clausiusa-Rankine'a turbiny parowej przyjęto raz dla parametrów podkrytycznych pary świeżej równą

$$\eta_{TP} = 0,45, \text{ i dwa, dla parametrów nad-}$$

krytycznych równą $\eta_{TP} = 0,55$.

Jak wynika z przebiegu krzywych na rys. 3 im większa jest moc turbiny gazowej tym większa jest sprawność

energetyczna bloku $\eta_{el}^{GP,dp}$ oraz tym mniejsza jest wartość wskaźnika emisji EF_{CO_2} . Oczywiście jest przy tym, że im większa

jest sprawność energetyczna η_{TP} części parowej bloku gazowo-parowego

dwupaliwowego, tym wskaźnik EF_{CO_2} przyjmuje wartości mniejsze, a sprawność

$\eta_{el}^{GP,dp}$ wartości większe. Sprawność ta ze wzrostem mocy turbiny gazowej może przewyższać nawet 50%. Należy zaznaczyć, że tak wysoka sprawność brutto bloku wyłącznie jednopaliwowego i jednoobiegowego, w którym realizowany jest obieg Clausiusa-Rankine'a, jest możliwa tylko w sytuacji, gdy pracuje on z relatywnie

wysokimi nadkrytycznymi parametrami pary świeżej (28 MPa, 600/620°C). Jeszcze wyższa sprawność, także w układzie wyłącznie jednopaliwowym, bo przewyższająca nawet 60%, jest możliwa w hierarchicznym układzie gazowo-parowym.

Bibliografia

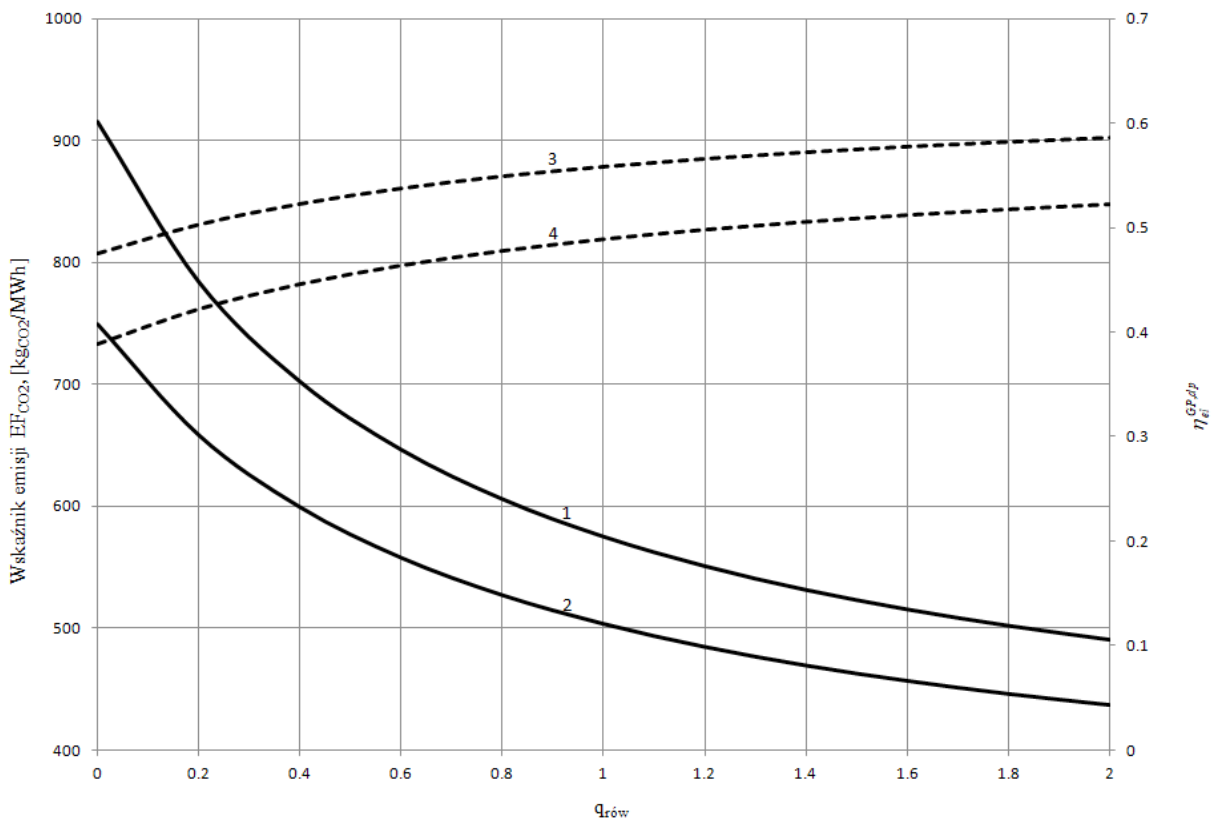
- [1] Bartnik R.: *The Modernization Potential of Gas Turbines in the Coal-Fired Power Industry. Thermal and Economic Effectiveness*, Wydawnictwo Springer, London 2013.
 [2] Bartnik R.: *Gas-steam power plants and combined heat and power plants. Energy and economic efficiency (in Polish: Elektrownie i elektrociepłownie gazowo-parowe. Efektywność energetyczna i ekonomiczna)*, WNT, Warszawa 2009 (reprint 2012 WNT, 2017 PWN)

[3] Bartnik R., Bartnik B.: *Economic calculation in the energy sector (in Polish: Rachunek ekonomiczny w energetyce)*, WNT, Warszawa 2014

[4] Bartnik R., Buryn Z., Hnydiuk-Stefan A.: *Ekonomika energetyki w modelach matematycznych z czasem ciągłym*, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa, 2017

[5] Bartnik R., Bartnik B., Hnydiuk-Stefan A.: *Optimum Investment Strategy in the Power Industry. Mathematical Models*. Wydawnictwo Springer, New York 2016

[6] Bartnik R., Buryn Z., Hnydiuk-Stefan A.: *Investment Strategy in Heating and CHP. Mathematical Models*. Wydawnictwo Springer, London 2017



Rys. 3. Wskaźnik emisji EF_{CO_2} oraz sprawność energetyczna bloku $\eta_{el}^{GP,dp}$ w funkcji q_{row} , gdzie: 1 - dotyczy wskaźnika emisji przy $\eta_{TP} = 0.45$; 2 - dotyczy wskaźnika emisji przy $\eta_{TP} = 0.55$; 3 - dotyczy sprawności przy $\eta_{TP} = 0.55$; 4 - dotyczy sprawności przy $\eta_{TP} = 0.45$