

Ocena energetyczna eksploatacji bloku ciepłowniczego z zastosowaniem procedury zaawansowanej walidacji danych pomiarowych

Autorzy dedykują artykuł tragicznie zmarłemu śp. Michałowi Kicie, dyrektorowi ds. eksploatacji Elektrowni Jaworzno III

Rozwój systemów pomiarowych i technik komputerowych stwarza zupełnie nowe możliwości systemom kontroli eksploatacji w elektrociepłowniach. Tradycyjny system kontroli eksploatacji stosowany przede wszystkim w elektrowniach kondensacyjnych, chociaż wyposażony jest w bogaty zbiór procedur obliczeniowych, nie posiada jednak funkcji uwiarygodnienia danych pomiarowych. O potrzebie uwiarygodnienia (walidacji) wyników pomiarów piszą m.in. autorzy [3,4,5,9,12]. W pracach [6,7,13,14,16] zastosowano rachunek wyrównawczy [11] jako metodę zaawansowanej walidacji pomiarów.

Każda ocena zbioru parametrów procesu otrzymana w wyniku dokonania ciągu obserwacji zawiera błędy. Obciążenie ocen wynika głównie z błędów pomiarów. Obciążenie to można zmniejszyć wykorzystując równania modelu matematycznego procesu w obliczeniach wyrównawczych. Rachunek wyrównawczy zaliczany jest do grupy metod stochastycznych bazujących na estymacji statystycznie optymalnej [1]. U podstaw metody leży zasada maksymalizacji funkcji wiarygodności w n-wymiarowej przestrzeni błędów. Wynikający z niej estymator największej wiarygodności jest równoważny estymatorowi o minimalnej wartości błędów estymacji w metodzie najmniejszych kwadratów Gaussa [1]. Od wielu lat rachunek wyrównawczy stosowany jest w technice ciepłej [10,11]. Rozwiązywane problemy dotyczyły uzgadniania bilansów substancji i energii, wyznaczania współczynników równań empirycznych oraz zagadnień przewodzenia ciepła. Pierwszą krajową pracą z zakresu zastosowania rachunku wyrównawczego do kontroli eksploatacji elektrociepłowni opublikowano w [16].

W niniejszym artykule przedstawiono zastosowanie rachunku wyrównawczego do oceny energetycznej bloku ciepłowniczego z turbiną upustowo-kondensacyjną i kotłem fluidalnym. Opracowano model matematyczny bloku ciepłowniczego i algorytm obliczeń energetycznych kotła fluidalnego. Równania modelu matematycznego wykorzystano do uwiarygodnienia wyników pomiaru i obliczeń. Przedstawiono także przykładowe wyniki obliczeń wskaźników eksploatacyjnych bloku ciepłowniczego.

Równania modelu matematycznego bloku ciepłowniczego

Podstawowymi równaniami opracowanego modelu matematycznego są równania bilansu substancji i energii, które podlegają uzgadnianiu. Dla analizowanego bloku ciepłowniczego wykorzystano:

- bilans energii dla rurociągu pary świeżej,
- bilans substancji i energii dla turbiny,
- bilanse substancji i energii dla wysokoprężnych regeneracyjnych wymienników ciepła WP,
- bilanse substancji i energii dla niskoprężnych regeneracyjnych wymienników ciepła NP,
- bilans substancji i energii dla wymiennika ciepłowniczego WC.

Ponadto procedurze uzgadniania poddano równanie wiążące parametry nasycenia dla pary wodnej oraz zależność pomiędzy entalpią i entropią wynikającą z linii rozprężania pary w turbinie.

Przykładowo równania bilansu substancji i energii dla turbiny mają postać:

$$G_{KLBA\ 10} - G_{TMAW\ 01} - G_{TMAW\ 21} = G_{TLBQ\ 20} + G_{TLBQ\ 10} + G_{TLBS\ 70} + G_{TLBS\ 20} + G_{TNAA\ 11} + G_{TNAA\ 12} + G_{TLBS\ 10} + G_{TMAG\ 01} \quad (1)$$

$$(G_{KLBA\ 10} - G_{TMAW\ 01} - G_{TMAW\ 21})(i_{TMAA\ 11} + i_{TMAA\ 12})/2 = G_{TLBQ\ 20}i_{TLBQ\ 20} + G_{TLBQ\ 10}i_{TLBQ\ 10} + G_{TLBS\ 70}i_{TLBS\ 70} + G_{TLBS\ 20}i_{TLBS\ 20} + (G_{TNAA\ 11} + G_{TNAA\ 12} + G_{TLBS\ 10})i_{TNAA} + G_{TMAG\ 01}i_{TMAG\ 01} + N_{IT} \quad (2)$$

gdzie:

- G – strumień pary, kg/s,
- i – entalpia właściwa, MJ/kg,
- N_{IT} – moc wewnętrzna turbiny, MW.

Sprawność energetyczna kotła zdefiniowana jest w metodzie bezpośredniej jako stosunek użytecznego strumienia ciepła do energii doprowadzonej do kotła:

$$\eta_{EK} = \frac{\dot{Q}_{uz}}{\dot{P}_1 W_{d1}^* + \dot{P}_2 W_{d2}^* + \dot{Q}_{XL} + N_{pom}} \quad (6)$$

Równanie na sprawność energetyczną kotła wyznaczoną metodą pośrednią można zapisać także w postaci:

$$\eta_{EK} = \frac{1 - \sum_i S_i^*}{1 + \frac{\dot{P}_2 [g_{z2} i_z + g_{u2} i_u] + \dot{Q}_{zdm} + \dot{Q}_{ot} - (\dot{P}_2 W_{d2}^* + \dot{Q}_{XL} + N_{pom}) \sum_i S_i^*}{\dot{Q}_{uz}}} \quad (7)$$

gdzie:
 S_i^* – względne straty energii odniesione do strumienia energii spalanej pulpy.

Obliczenia bilansu energii i sprawności energetycznej kotła wymagają wcześniejszego przeprowadzenia obliczeń stechiometrycznych, dla których wymagana jest znajomość zużycia pulpy w kotle. W związku z tym obliczenia realizowane są iteracyjnie.

Uwiarygodnienie danych pomiarowych w obliczeniach wyrównawczych

Modele matematyczne procesów fizycznych zawierają dane pochodzące bezpośrednio lub pośrednio z pomiarów. Gdy znany jest model matematyczny zjawiska i znane są wyniki pomiarów wielkości tworzących opis matematyczny zjawiska może wystąpić nadmiar informacji o zjawisku. Nadmiar informacji objawia się tym, że liczba niewiadomych staje się mniejsza aniżeli liczba niezależnych równań modelu. Nadmiar informacji o procesie można wykorzystać do wyznaczenia bardziej wiarygodnych wartości zarówno wielkości niewiadomych, jak i mierzonych. Opis matematyczny procesu sprowadza się najczęściej do układu równań nieliniowych:

$$\hat{\Lambda}_k : F_k(l_1, \dots, l_i, \dots, l_n, x_1, \dots, x_j, \dots, x_n) = 0 \quad (8)$$

gdzie:
 l_i – oznaczenie wielkości mierzonej,
 x_j – oznaczenie wielkości poszukiwanej (niewiadomej).

Równanie (8) może w ogólnym przypadku zawierać n wielkości mierzonych l_i , oraz u wielkości niemierzonych (poszukiwanych) x_j . Dokładne wartości zarówno wielkości niewiadomych, jak i wielkości mierzonych są nieznanne. Znane są natomiast wyniki pomiarów l_i^0 , które są zawsze obarczone błędami ε_i wynikającymi z niedoskonałości eksperymentu pomiarowego.

Nieuniknione błędy pomiarów uniemożliwiają więc dokładne wyznaczenie wartości wielkości mierzonych. Stosując zasadę estymacji średniokwadratowej ważoną funkcję ryzyka [1,10] można zapisać w postaci:

$$(\mathbf{L} - \mathbf{L}^0)^T \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{L} - \mathbf{L}^0) \rightarrow \min \quad (9)$$

gdzie: \mathbf{L} – wektor wielkości mierzonych, \mathbf{L}^0 – wektor wyników pomiaru, \mathbf{M} – macierz kowariancji wielkości mierzonych. Jeżeli wyniki pomiarów są od siebie niezależne macierz \mathbf{M} jest macierzą diagonalną zawierającą na przekątnej wariancje wyników pomiaru. Wyprowadzone równania modelu matematycznego bloku ciepłowniczego w teorii uzgadniania nazywane są równaniami warunków. Jeżeli w miejsce wielkości mierzonych l_i oraz niewiadomych x_j podstawią się wyniki pomiarów l_i^0 oraz oszacowane wstępnie wartości niewiadomych x_j^0 to w ogólnym przypadku równanie więzów nie jest spełnione:

$$F_k(l_1^0, \dots, l_i^0, \dots, l_n^0, x_1^0, \dots, x_j^0, \dots, x_u^0) = -w_k \quad (10)$$

Jeżeli funkcje F_k są różniczkowalne, to można je zlinearyzować poprzez rozwinięcie w szereg Taylora w otoczeniu znanych wartości L^0 i X^0 i pominięcie wyrazów wyższych rzędów:

$$F_k(\mathbf{L}, \mathbf{X}) = f_k(\mathbf{L}^0, \mathbf{X}^0) + \sum_{i=1}^n l \frac{\partial F_k}{\partial l_i} J^0(l_i - l_i^0) + \sum_{j=1}^u l \frac{\partial F_k}{\partial x_j} J^0(x_j - x_j^0) \quad (11)$$

Minimum formy kwadratowej (9) przy równaniach więzów w postaci zlinearyzowanych równań warunków (11) rozwiązuje się metodą mnożników Lagrange'a uzyskując zależności na estymatę wielkości mierzonych i niewiadomych w postaci [10,11]:

$$\hat{\mathbf{L}} = \mathbf{L}^0 + \mathbf{M} \mathbf{A}^T \mathbf{F}^{-1} [\mathbf{W} - \mathbf{B} (\mathbf{B}^T \mathbf{F}^{-1} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{F}^{-1} \mathbf{W}] \quad (12)$$

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}^0 + (\mathbf{B}^T \mathbf{F}^{-1} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{F}^{-1} \mathbf{W} \quad (13)$$

gdzie:
 \mathbf{A} – macierz współczynników $a_{ki} = l \frac{\partial F_k}{\partial l_i} J^0$,
 \mathbf{B} – macierz współczynników $b_{kj} = l \frac{\partial F_k}{\partial x_j} J^0$,
 \mathbf{X}^0 – wektor oszacowanych wartości wielkości niewiadomych,
 \mathbf{W} – wektor niezgodności równań warunków (10),
 \mathbf{F} – pomocnicza macierz kwadratowa o postaci:

$$\mathbf{F} = \mathbf{A} \mathbf{M} \mathbf{A}^T \quad (14)$$

Macierz kowariancji estymaty wielkości mierzonych $cov(\hat{L})$ oraz wielkości niewiadomych $cov(\hat{X})$ można obliczyć z zależności [8]:

$$cov(\hat{X}) = (B^T F^{-1} B)^{-1} \quad (15)$$

$$cov(\hat{L}) = M - M A^T F^{-1} A M + M A^T F^{-1} B cov(\hat{X}) B^T F^{-1} A M \quad (16)$$

Średni błąd wielkości mierzonych i niewiadomych po uzgodnieniu oblicza się jako pierwiastek kwadratowy odpowiednich elementów zawartych na przekątnych macierzy kowariancji.

Opisaną metodę opartą na rachunku wyrównawczym zastosowano jako zaawansowaną metodę walidacji danych pomiarowych w komputerowym systemie kontroli eksploatacji bloku ciepłowniczego.

Algorytm obliczeń wskaźników energetycznych bloku ciepłowniczego

W dotychczasowej praktyce eksploatacyjnej wskaźniki energetyczne bloku ciepłowniczego oblicza się według obowiązującej normy PN-93/M-35500 [18]. Norma ta zaleca błędny sposób podziału zużycia paliwa między ciepło i energię elektryczną. Stosowana w niej metoda podziału energii chemicznej paliwa jest analogiczna jak błędna metoda fizyczna podziału kosztów, która w rozporządzeniach taryfowych została zastąpiona przez poprawną metodę kosztów unikniętych (metodę elektrowni równoważnej). Efektem stosowania metody fizycznej podziału paliwa jest niespójność wyników podziału zużycia paliwa i podziału kosztów oraz nielogiczne wyniki obliczeń sprawności cząstkowych wytwarzania ciepła i energii elektrycznej. W artykule przedstawiono algorytm obliczeń wskaźników energetycznych bloku ciepłowniczego według zasady unikniętych nakładów paliwowych. Rezultaty obliczeń porównano z wynikami uzyskanymi według algorytmu metody fizycznej bazującego na normie PN-93/M-35500. W zapisach algorytmów obliczeniowych zastosowano częściowo indeksy, których objaśnienia można znaleźć na rysunku 1.

Algorytm obliczeń efektów użytecznych

Strumień ciepła przekazanego w wymienniku ciepłowniczym:

$$\dot{Q}_{WC} = \dot{G}_{TND A10} (i_{TND A14} - i_{TND A10}) \quad (17)$$

Moc elektryczną turbosespołu upustowo-kondensacyjnego rozbito na składowe wynikające z produkcji energii elektrycznej na strumieniu ciepłowniczym i kondensacyjnym oraz na strumieniach regeneracyjnych:

$$N_{el} = N_{el WC} + N_{el k} + N_{el r} \quad (18)$$

Moc elektryczna wytworzona na strumieniu ciepłowniczym:

$$N_{el WC} = \dot{G}_{TNAB00} (i_0 - i_5) \eta_{me} \quad (19)$$

przy czym:

$$i_0 = \frac{i_{TMAA11} + i_{TMAA12}}{2}$$

$$i_5 = i_{TNA A11} = i_{TNA A12}$$

Moc elektryczna wytworzona na strumieniu kondensacyjnym:

$$N_{el k} = N_{el k min} + \Delta N_{el k} \quad (20)$$

przy czym

$$N_{el k min} = \dot{G}_{k min} (i_0 - i_6) \eta_{me} \quad (21)$$

$$\dot{G}_{k min} = \alpha \dot{G}_{nom} \quad (22)$$

gdzie:

- $\dot{G}_{k min}$ – minimalny strumień pary niezbędny do chłodzenia niskoprężnej części turbiny,
- \dot{G}_{nom} – strumień pary na dopływie do turbiny przy obciążeniu nominalnym,
- i_6 – entalpia pary wylotowej do skraplacza,
- $\Delta N_{el k}$ – nadwyżka mocy elektrycznej wytwarzanej na strumieniu kondensacyjnym ponad minimum kondensacji,
- α – wskaźnik określający minimum kondensacji.

Moc elektryczną wytworzoną na strumieniach regeneracyjnych ujmuje równanie, w którym uwzględnia się, że w wymienniku NP1 podgrzewa się wyłącznie kondensat ze skraplacza:

$$N_{el r} = N_{el NP1} + \sum_{k=1}^4 N_{el r k} \quad (23)$$

gdzie:

- $N_{el NP1}$ – moc elektryczna wytwarzana na strumieniu pary regeneracyjnej z upustu 5,
- $N_{el r k}$ – moc elektryczna wytwarzana na strumieniach pary z upustów regeneracyjnych 1,2,3,4.

Przy obliczaniu mocy elektrycznej wytworzonej w skjarzeniu uwzględnia się również energię elektryczną wytworzoną na minimalnym strumieniu pary do skraplacza oraz na strumieniach regeneracyjnych podgrzewających kondensat z wymiennika ciepłowniczego i z minimum kondensacji:

$$N_{el sk} = N_{el WC} + N_{el k min} + N_{el NP1} \cdot \frac{N_{el k min}}{N_{el k min} + \Delta N_{el k}} + \cdot + \frac{\dot{G}_{TNAB00} + \dot{G}_{k min}}{\dot{G}_{TNAB00} + \dot{G}_{TLCA40}} \cdot \sum_{i=1}^4 N_{el r k} \quad (24)$$

przy czym

$$N_{el NP1} = \dot{G}_{TLBS10} (i_0 - i_5) \eta_{me} \quad (25)$$

Moc elektryczna wytworzona na strumieniu kondensacyjnym:

$$N_{elk} = \Delta N_{elk} + N_{elNPI} \frac{\Delta N_{elk}}{N_{elkmin} + \Delta N_{elk}} + \frac{\dot{G}_{TMAG01} - \dot{G}_{kmin}}{\dot{G}_{TNAB00} + \dot{G}_{TLCA40}} \cdot \sum_{k=1}^4 N_{elrk} \quad (26)$$

przy czym:

$$\Delta N_{elk} = (\dot{G}_{TMAG01} - \dot{G}_{kmin}) (i_0 - i_6) \eta_{me} \quad (27)$$

Uwzględnienie mocy elektrycznej wytworzonej na minimalnym strumieniu pary doprowadzanej do skraplacza jest logicznym następstwem wymagań technicznych narzucających minimum strumienia pary przepływającej przez część niskoprężną w celu chłodzenia układu łopatkowego. Pobór pary z upustu do celów ciepłowniczych, czyli realizacja gospodarki skojarzonej ciepłnoelektrycznej, nie byłaby możliwa bez minimalnego przepływu pary do skraplacza.

Algorytm obliczeń sprawności energetycznych

Sprawność energetyczna brutto bloku ciepłowniczego:

$$\eta_{EecB} = \frac{\dot{Q}_{WC} + N_{el}}{\dot{P}W_d} \quad (28)$$

Sprawność energetyczna netto bloku ciepłowniczego:

$$\eta_{EecN} = \frac{\dot{Q}_{WC} (1 - \varepsilon_c) + N_{el} (1 - \varepsilon_{el})}{\dot{P}W_d} \quad (29)$$

gdzie: $\varepsilon_c, \varepsilon_{el}$ oznaczają wskaźniki potrzeb własnych na ciepło i energię elektryczną.

Sprawność cząstkową wytwarzania energii elektrycznej wyznacza się według zasady unikniętych nakładów paliwowych. Założono, że zastępowanie energii elektrycznej wytworzonej w elektrowni systemowej przez wytworzoną w skojarzeniu energią elektryczną ma miejsce we wspólnym węźle oddawania elektryczności do systemu elektroenergetycznego. Można więc napisać:

$$N_{el sk N} \cdot \eta_{tp} = N_{el k N} \cdot \eta'_{tp} \quad (30)$$

gdzie:

$N_{el sk N}, N_{el k N}$ – moc elektryczna netto wytworzona w skojarzeniu oraz moc netto z elektrowni kondensacyjnej,

η_{tp}, η'_{tp} – sprawność transformacji i przesyłania energii elektrycznej z elektrociepłowni i elektrowni systemowej do systemu elektroenergetycznego.

Według zasady unikniętych nakładów paliwowych można napisać:

$$\dot{P}W_{del sk} = \frac{N_{el k N}}{\eta_{Eek N}} \quad (31)$$

Równość (31) oznacza, że przy spełnieniu zależności (30) oznaczającej równość efektów użytecznych, energię elektryczną produkowaną w elektrociepłowni należy obciążyć takim zużyciem energii chemicznej paliwa, jakie wystąpiłoby w zastępczej (równoważnej) elektrowni kondensacyjnej.

Sprawność cząstkową netto wytwarzania energii elektrycznej w elektrociepłowni ujemuje relacja:

$$\eta_{Eel sk N} = \frac{N_{el sk N}}{\dot{P}W_{del sk}} \quad (32)$$

Wykorzystując równania (30) i (31) otrzymuje się:

$$\eta_{Eel sk N} = \eta_{Eek N} \frac{\eta'_{tp}}{\eta_{tp}} \quad (33)$$

lub brutto:

$$\eta_{Eel sk B} = \eta_{Eek N} \frac{\eta'_{tp}}{(1 - \varepsilon_{el}) \eta_{tp}} \quad (34)$$

Sprawność cząstkowa brutto wytwarzania ciepła w elektrociepłowni wynika z relacji:

$$\eta_{Ecsk B} = \frac{\dot{Q}_{WC}}{\dot{P}W_d - (\dot{P}W_d)_{el sk} - (\dot{P}W_d)_{el k}} \quad (35)$$

przy czym:

$$(\dot{P}W_d)_{el k} = \frac{N_{el k B}}{\eta_{Eel k B}} \quad (36)$$

gdzie:

- $(\dot{P}W_d)_{el k}$ – zużycie energii chemicznej obciążające produkcję energii elektrycznej w kondensacji,
- $\eta_{Eel k B}$ – sprawność energetyczna brutto wytwarzania energii elektrycznej w kondensacji.

Wprowadzając do (35) zależności (32), (34), (36) otrzymuje się:

$$\eta_{Ecsk B} = \frac{\eta_{Eec B}}{1 - \frac{N_{el sk B}}{\dot{Q}_{WC}} \left[\frac{\eta_{Eec B} (1 - \varepsilon_{el}) \eta_{tp} - 1}{\eta_{Eek N} \eta'_{tp}} \right] - \frac{N_{el k B}}{\dot{Q}_{WC}} \left(\frac{\eta_{Eec B}}{\eta_{Eel k B}} - 1 \right)} \quad (37)$$

Sprawność energetyczna brutto układu skojarzonego:

$$\eta_{Esk B} = \frac{\dot{Q}_{WC} + N_{el sk}}{\dot{P}W_d - \frac{N_{el k}}{\eta_{Eel k B}}} \quad (38)$$

Sprawność cząstkową wytwarzania energii elektrycznej w cztonie kondensacyjnym należy przyjmować według wyników pomiarów gwarancyjnych turbozespołu przy pracy wyłącznie kondensacyjnej.

Obliczenia wskaźników jednostkowego zużycia energii chemicznej paliwa na produkcję ciepła i energii elektrycznej

Wskaźnik jednostkowego zużycia energii chemicznej paliwa na produkcję ciepła:

$$\beta_{ch c B} = \frac{1}{\eta_{E c s k B}} \quad (39)$$

lub

$$q_{ch c B} = \frac{1000}{\eta_{E c c c B}}, \left[\frac{MJ}{GJ} \right] \quad q_{ch c} = \frac{3600}{\eta_{E c c c B}}, \left[\frac{MJ}{MWh} \right]$$

Wskaźnik jednostkowego zużycia energii chemicznej paliwa na produkcję energii elektrycznej w skojarzeniu brutto:

$$\beta_{ch el sk B} = \frac{1}{\eta_{E el sk B}} \quad (40)$$

lub

$$q_{ch el sk B} = \frac{3600}{\eta_{E el sk B}}, \left[\frac{MJ}{MWh} \right]$$

Wskaźnik jednostkowego zużycia energii chemicznej paliwa na produkcję energii elektrycznej w cztonie kondensacyjnym brutto:

$$\beta_{ch el kB} = \frac{1}{\eta_{E el kB}} \quad (41)$$

lub

$$q_{ch el kB} = \frac{3600}{\eta_{E el kB}}, \left[\frac{MJ}{MWh} \right]$$

Wskaźnik jednostkowego zużycia energii chemicznej paliwa w odniesieniu do całkowitej produkcji energii elektrycznej brutto:

$$\beta_{ch el B} = \frac{(\dot{P}W_d)_{el sk} + (\dot{P}W_d)_{el k}}{N_{el}}$$

$$\beta_{ch el B} = \beta_{ch el k} - \frac{N_{el sk}}{N_{el}} (\beta_{ch el k} - \beta_{ch el sk}) \quad (42)$$

lub

$$q_{ch el B} = q_{ch el k B} - \frac{N_{el sk}}{N_{el}} (q_{ch el k B} - q_{ch el sk B})$$

Do przedstawionych równań należy podstawić obliczone według wzorów podanych w poprzednich dwóch punktach efekty użyteczne oraz sprawności energetyczne.

Obliczenia wskaźników jednostkowego zużycia energii chemicznej paliwa i sprawności energetycznych wg normy PN-93/M-35500

Strumień energii chemicznej paliwa obciążający produkcję ciepła oblicza się według wzoru:

$$(\dot{P}W_d)_{c sk} = \frac{\dot{Q}_{wc}}{\eta_{E k} \eta_{E r}} \quad (43)$$

gdzie:

$\eta_{E k}, \eta_{E r}$ – sprawność energetyczna kotła i rurociągów.

Oznacza to, że sprawność energetyczna cząstkowa wytwarzania ciepła w elektrociepłowni wynosi:

$$\eta_{E c s k B} = \eta_{E k} \eta_{E r} \quad (44)$$

Wskaźnik jednostkowego zużycia energii chemicznej paliwa na produkcję ciepła:

$$\beta_{ch c s k B} = \frac{1}{\eta_{E k} \eta_{E r}} \quad (45)$$

Strumień energii chemicznej paliwa obciążający produkcję energii elektrycznej:

$$(\dot{P}W_d)_{el} = (\dot{P}W_d) - (\dot{P}W_d)_{c sk} \quad (46)$$

Sprawność energetyczna brutto wytwarzania energii elektrycznej:

$$\eta_{E el B} = \frac{N_{el}}{(\dot{P}W_d) - (\dot{P}W_d)_{c sk}} \quad (47)$$

Wskaźnik jednostkowego zużycia energii chemicznej paliwa na produkcję energii elektrycznej:

$$\beta_{ch el B} = \frac{1}{\eta_{E el B}} \quad (48)$$

Moc elektryczna wytwarzana w skojarzeniu:

$$N_{el sk} = N_{el wc} + \frac{\dot{G}_{TNAB00}}{\dot{G}_{TNAB00} + \dot{G}_{TLCA40}} \sum_{k=1}^4 N_{el r k} \quad (49)$$

Strumień energii chemicznej obciążający produkcję energii elektrycznej w skojarzeniu:

$$(\dot{P}W_d)_{el sk} = \frac{N_{el sk}}{\eta_{E k} \eta_{E r} \eta_{me}} \quad (50)$$

Zatem sprawność cząstkowa wytwarzania energii elektrycznej w skojarzeniu:

$$\eta_{el\ sk\ B} = \eta_{Ek} \eta_{Er} \eta_{me} \quad (51)$$

Wskaźnik jednostkowego zużycia energii chemicznej paliwa na produkcję elektryczną w skojarzeniu:

$$\beta_{ch\ el\ k\ B} = \frac{1}{\eta_{Ek} \eta_{Er} \eta_{me}} \quad (52)$$

Strumień energii chemicznej paliwa obciążający produkcję energii elektrycznej w czlonie kondensacyjnym:

$$(\dot{P}W_d)_{el\ k} = (\dot{P}W_d)_{el} - (\dot{P}W_d)_{el\ sk} \quad (53)$$

Wskaźnik jednostkowego zużycia energii chemicznej paliwa na produkcję energii elektrycznej w czlonie kondensacyjnym:

$$\beta_{ch\ el\ k\ B} = \frac{N_{el} - N_{el\ sk}}{(\dot{P}W_d)_{el} - (\dot{P}W_d)_{el\ sk}} \quad (54)$$

Wyniki obliczeń wskaźników wg metody fizycznej i ich porównanie ze wskaźnikami wyznaczonymi metodą „elektrowni równoważnej” przedstawiono w następnym punkcie.

Wyniki praktycznego zastosowania procedury zaawansowanej walidacji danych pomiarowych na bloku ciepłowniczym

Opracowany system umożliwia bilansowanie i ocenę eksploatacji w przedziałach krótkookresowych (np.: zmiana, doba) oraz miesięcznych.

Po wczytaniu z serwera pomiarowego eksploatacyjnych danych pomiarowych przeprowadzana jest ich weryfikacja i uśrednianie dla zadanego przez użytkownika okresu bilansowania. Dane te wykorzystywane są w obliczeniach wyrównawczych w celu ich uwiarygodnienia. Uwiarygodnione wyniki pomiarów i obliczeń wykorzystywane są do wyznaczania wskaźników energetycznych charakteryzujących pracę bloku [15].

Na rysunku 3. przedstawiono okno programu komputerowego z przykładowymi wynikami obliczeń dla analizowanego kotła fluidalnego CFB 260 Compact, natomiast na rysunku 4 przedstawiono okno z wynikami uzgadniania strumieni paliw do kotła.

Nazwa	Jednostka	Wartość
Użyteczna moc cieplna kotła	kW	165220,8
Strumień ciepła przekazywany w podgrzewaczach parowych	kW	1405,01
Sprawność energetyczna kotła	%	91,04
Błąd bezwzględny sprawności kotła	s%	0,42
Stosunek nadmiaru powietrza	-	1,26
Staty węglane ogółem w tym:	%	8,96
- wyłotowa fizyczna	%	7,04
- wyłotowa chemiczna	%	0,01
- wyłotowa fizyczna i chemiczna w popiele dennym	%	0,29
- wyłotowa fizyczna i chemiczna w popiele lotnym	%	0,68
- przez korulkę i promieniowanie do otoczenia	%	0,66
- nie wyłm. pary do zdmuchawcy popiołu	%	0,26
Strumień popły	kg/s	0,74
Strumień węgla	kg/s	5,19
Całkowity strumień energii chemicznej paliwa w tym:	kW	178139,46
- strumień energii chemicznej popły	kW	74327,56
- strumień energii chemicznej węgla	kW	103811,90
- strumień energii chemicznej oleju	kW	0,00
Stosunek nadmiaru węgla	-	0,64
Stopień odciążania	-	0,02

Rys. 3. Okno wyników obliczeń kotła fluidalnego

Nazwa	Jedn.	Wartość pomiarowa	Wartość obliczona
Strumień węgla	t/h	18,42	18,69
Strumień mułu węglowego	t/h	23,80	27,16
Strumień popły	t/h	27,58	31,47
Strumień oleju	t/h	0,00	0,00

Rys. 4. Okno wyników uzgadniania strumieni paliw do kotła

Przedstawione wyniki odnoszą się do uśrednionych za okres doby wyników pomiarów eksploatacyjnych.

W tabeli 1 przedstawiono wyniki obliczeń dla uśrednionych za okres doby parametrów eksploatacji bloku ciepłowniczego nr 2.

Tabela 1

Przykładowe wyniki obliczeń parametrów eksploatacji bloku ciepłowniczego

Wielkość	Symbol	Jedn.	Wartość przed uzgodnieniem	Wartość po uzgodnieniu
Moc elektryczna generatora	N_{el}	MW	59,48	59,39
Moc cieplna wymiennika ciepłowniczego	\dot{Q}_{wc}	MW	44,92	44,36
Strumień wody sieciowej podgrzewanej w wymienniku ciepłowniczym	\dot{G}_{ws}	t/h	1420,1	1419,3
Moc cieplna kotła	\dot{Q}_k	MW	165,22	
Sprawność energetyczna kotła	η_{Ek}	%	91,04	
Całkowity strumień energii chemicznej paliwa	$\dot{P}W_d$	MW	181,13	
Strumień węgla	\dot{P}_w	t/h	18,43	18,69
Strumień mułu węglowego	\dot{P}_m	t/h	23,80	27,16

Na obliczone zużycie energii chemicznej paliwa istotny wpływ mają wyniki pomiaru strumienia i parametrów wody zasilającej oraz pary świeżej za kotłem. Pomiaru te mają również istotny wpływ na zamknięcie równań bilansów substancji i energii dla turbiny oraz wymiennika ciepłowniczego.

W obliczeniach cieplnych kotłów dwupaliwowych wg normy DIN [17] zakłada się znajomość zużycia jednego z paliw. Zużycie drugiego paliwa obliczane jest z bilansu energii. W niniejszym artykule w wyniku zastosowania rachunku wyrównawczego [6] korygowane są zużycia obydwu paliw w proporcjach wynikających z przyjętych do obliczeń błędów pomiaru.

Tabela 2
Przykładowe wyniki obliczeń efektów użytecznych

Wielkość	Wartość
Moc elektryczna wytwarzana na strumieniu ciepłowniczym, MW	17,82
Moc elektryczna wytwarzana na minimalnym strumieniu kondensacyjnym, MW	8,15
Moc elektryczna dodatkowa wytwarzana na strumieniu kondensacyjnym, MW	24,32
Moc elektryczna wytwarzana na strumieniu do NP1, MW	1,78
Moc elektryczna wytwarzana na pozostałych strumieniach regeneracyjnych, MW	7,32
Moc elektryczna wytwarzana w skojarzeniu, MW	30,51
Moc elektryczna wytwarzana na strumieniu kondensacyjnym, MW	28,88
Moc elektryczna generatora, MW	59,39
Moc cieplna wymiennika, MW	44,36

Tabela 3
Przykładowe wyniki obliczeń wskaźników energetycznych obliczonych według metody „elektrowni równoważnej”

Wskaźnik energetyczny	Wartość
Sprawność energetyczna brutto bloku ciepłowniczego łącznie z członem kondensacyjnym	0,5728
Sprawność energetyczna netto bloku ciepłowniczego łącznie z członem kondensacyjnym	0,5306
Sprawność energetyczna cząstkowa brutto wytwarzania energii elektrycznej w skojarzeniu	0,3933
Sprawność energetyczna cząstkowa brutto wytwarzania ciepła	1,93
Sprawność energetyczna brutto układu skojarzonego (bez członu kondensacyjnego)	0,7798
Wskaźnik jednostkowego zużycia energii chemicznej paliwa na produkcję ciepła, MJ/GJ	518,3
Wskaźnik jednostkowego zużycia energii chemicznej paliwa na produkcję energii elektrycznej w skojarzeniu brutto, MJ/MWh	9154,3
Wskaźnik jednostkowego zużycia energii chemicznej paliwa na produkcję energii elektrycznej w członie kondensacyjnym, brutto, MJ/MWh	10041,9
Wskaźnik jednostkowego zużycia energii chemicznej paliwa w odniesieniu do całkowitej produkcji energii elektrycznej brutto, MJ/MWh	9585,9
Wskaźnik skojarzenia	0,6878

Przeprowadzono obliczenia efektów użytecznych i wskaźników energetycznych dla średnich parametrów pracy turbiny ciepłowniczej bazując na rzeczywistych danych eksploatacyjnych poddanych procedurze uzgadniania. Wyniki obliczeń zamieszczono w tabelach 2 i 3.

Wskaźnik skojarzenia obliczony tradycyjnie, bez dodawania mocy elektrycznej wytwarzanej na minimalnym strumieniu pary do kondensacji, wynosi 0,49.

Wynik uzyskany dla cząstkowej sprawności energetycznej brutto wytwarzania ciepła jest poprawny, ponieważ ideą elektrociepłowni jest skojarzenie silnika cieplnego i pompy grzejnej, dla której wskaźnik efektywności (sprawność energetyczna) jest większy od 1.

Dla porównania według metody fizycznej uzyskano:

- sprawność energetyczną cząstkową brutto wytwarzania energii elektrycznej – 0,847;
- sprawność energetyczną cząstkową brutto wytwarzania ciepła – 0,892.

Wyniki uzyskane za pomocą metody fizycznej są nielogiczne, ponieważ sprawność cząstkowa wytwarzania energii elektrycznej jest blisko dwa i pół razy wyższa niż w elektrowni systemowej, a sprawność cząstkowa wytwarzania ciepła jest niższa niż sprawność kotła.

Uwiarygodnione wyniki obliczeń stanowią dane wyjściowe w algorytmie obliczeń wskaźników energetycznych. Wskaźniki te obliczono według metody unikniętych nakładów paliwowych i według metody fizycznej. Metoda fizyczna opiera się na błędnym założeniu, że jednostka ciepła i energii elektrycznej jest obciążona jednakowym zużyciem energii chemicznej paliwa. Nie uwzględnia się więc różnej jakości produktów użytecznych. Stosowanie metody fizycznej prowadzi do nielogicznego wyniku bardzo wysokiej sprawności cząstkowej wytwarzania energii elektrycznej w elektrociepłowni. To oczywiście rzutuje na sprawność cząstkową wytwarzania ciepła, która jest na poziomie sprawności kotła. Nie stanowi to zachęty do inwestowania w układy gospodarki skojarzonej ciepłno – elektrycznej. Stosowana przez lata metoda fizyczna podziału kosztów doprowadziła do zahamowania rozwoju skojarzonej gospodarki ciepłno – elektrycznej w Polsce.

Metoda fizyczna jest niezgodna z rozporządzeniami Ministra Gospodarki w sprawie taryf na ciepło i energię elektryczną. Rozporządzenia nie mówią wprawdzie o podziale paliwa, lecz o podziale kosztów sankcjonując metodę kosztów unikniętych. Należy jednak pamiętać, że w kosztach ciepła i energii elektrycznej koszt paliwa jest przeważający. Dlatego nie może być niespójności między metodami podziału nakładów paliwowych i finansowych. Z tego powodu przedstawiony algorytm obliczeń sprawności energetycznych i wskaźników jednostkowego zużycia energii oparty na zasadzie unikniętych nakładów paliwowych jest jedynie poprawną metodą.

Podsumowanie i wnioski

Na podstawie zamieszczonego w artykule algorytmu opracowano procedury obliczeniowe stanowiące część wdrożonego komputerowego systemu kontroli eksploatacji [14] bloku ciepłowniczego w analizowanej elektrociepłowni. System zawiera procedury współpracy z systemem komputerowym monitoringu, procedury obliczeń numerycznych oraz procedury wizualizacji wyników i tworzenia raportów. Umożliwia on użytkownikowi:

- ocenę założonej dokładności systemu pomiarowego,
- dostęp do informacji o istotnych parametrach pracy bloku oraz rozptywach energii,
- wiarygodną ocenę wskaźników techniczno – ekonomicznych.

W algorytmie obliczeń wskaźników eksploatacyjnych zaproponowano wprowadzenie mocy elektrycznej wytworzonej na strumieniu pary odpowiadającym minimum kondensacji do mocy uzyskanej w skojarzeniu. Jest to logiczne następstwo warunku pracy turbiny z nieodłączalnym członem kondensacyjnym na co najmniej minimum kondensacji przy pracy ciepłownicz. Mamy tu więc przypadek wymuszonej produkcji tzw. must run.

Charakterystyczne wskaźniki eksploatacyjne wyznaczono za pomocą metody unikniętych nakładów paliwowych (tzw. metody „elektrowni równoważnej”) oraz za pomocą metody fizycznej. Wykazano nielogiczność wyników uzyskanych za pomocą metody fizycznej.

Przeprowadzone testy opracowanego oprogramowania wykazały jego pełną przydatność dla służb kontroli eksploatacji elektrociepłowni.

LITERATURA

- [1] Deutsch R.: Teoria estymacji. PWN. Warszawa 1969
- [2] Gdula S.J.: Wykres $h-s$, Wyd. Energotherm. Bielsko-Biała, 1996
- [3] Kuehn D. R., Davidson H.: Computer Control. II. Mathematical of Control. *Chemical Engineering Progress*, Vol. 57, No. 6, June 1961, pp. 44-47
- [4] Mah R.S.H., Stanley G.M., Diuning D.M.: Reconciliation and Rectification of Process Flow and Inventory Data. *Ind. Eng. Chem., Process Des. Dev.*, Vol 15, No 1, 1976
- [5] Ratschiner G., Qualitätssicherung und Qualitätsverbesserung von Messungen an energetischen Anlagen; Validierung von Meßwerten. *Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift*. Heft 1, 1999
- [6] Rusinowski H., Szega M.: Improvement of the Reliability of Evaluation of the Energy Indices of the Power Unit Using the Least Squares Adjustment Method. International Conference ECOS'2001 Efficiency, Costs, Optimization, Simu-

lation and Environmental Impact Of Energy Systems. Istanbul, Turkey, July 4-6, 2001

- [7] Rusinowski H., Szega M., Majchrzak H., Witos T., Szyszka P., Trojnar W.: System kontroli pracy bloku energetycznego z zastosowaniem rachunku wyrównawczego do uwiarygodnienia wyników pomiaru. *Energetyka* 2002, nr 3 (573)
- [8] Rusinowski H., Szega M., Szerszeń A.: Wyznaczanie sprawności energetycznej dwupaliwowego kotła fluidalnego CFB 260 Compact w systemie kontroli eksploatacji bloku ciepłowniczego. IX Konferencja „Aktualne problemy budowy i eksploatacji kotłów”. Szczyrk 2002
- [9] Stephenson G. R., Shewchuk C. F.: Reconciliation of Process Data with Process Simulation. *AIChE Journal* (Vol. 32, No. 2), February 1986, pp. 247-254
- [10] Szargut J. Analiza termodynamiczna i ekonomiczna w energetyce przemysłowej. WNT, Warszawa 1983
- [11] Szargut J. (red.) Rachunek wyrównawczy w technice cieplnej. Ossolineum, Wrocław 1984
- [12] Valero A., Correas L., Serra L.: On-Line Thermo-economic Diagnosis of Thermal Power Plants. Rozdział w książce A. Bejan and E. Mamut (eds.): *Thermodynamic Optimization of Complex Energy Systems*. Kluwer Academic Publishers 1999
- [13] Ziębik A., Szega M., Rusinowski H.: Control System of Substance and Energy Balances of Combined Heat and Power Plants Applying the Least Squares Adjustment Method. Proc. of the Conference ECOS' 99, Tokio 1999 oraz *International Journal of Applied Thermodynamics*, Vol. 2, No. 4, December 1999
- [14] Ziębik A., Rusinowski H., Szega M., Trojnar W.: System kontroli eksploatacji bloku ciepłowniczego *Elektrowni Jaworzno II w Elektrowni Jaworzno III z zastosowaniem rachunku wyrównawczego*. Praca naukowo-badawcza wykonana na zlecenie *Elektrowni Jaworzno III*. Instytut Techniki Ciepłej, 1999-2001
- [15] Ziębik A., Szega M.: Ocena energetyczna bloku ciepłowniczego z turbiną upustowo-kondensacyjną w systemie kontroli eksploatacji. XVIII Zjazd Termodynamików. Muszyzna, 2-7 września 2002
- [16] Ziębik A., Szega M., Rusinowski H. i in.: System kontroli bilansów substancji i energii elektrociepłowni z zastosowaniem rachunku wyrównawczego (na przykładzie *EC ZA Puławy SA*). Materiały II Konferencji „Problemy badawcze energetyki cieplnej”. Warszawa, 2-5 grudnia 1997
- [17] Deutsche Norm DIN 1942.: Acceptance testing of steam generators. February 1994
- [18] PN-93/M-35500: Metodyka obliczania zużycia paliw do wytwarzania energii elektrycznej, cieplnej i mechanicznej

