

System kontroli pracy bloku energetycznego z zastosowaniem rachunku wyrównawczego do uwiarygodnienia wyników pomiaru

Lata dziewięćdziesiąte to okres dynamicznego rozwoju cyfrowych systemów kontroli i sterowania bloków energetycznych. Automatyczna akwizycja danych pomiarowych oraz łatwość wykonywania obliczeń numerycznych umożliwiły lepszy nadzór nad systemami energetycznymi. Nastąpił dynamiczny rozwój programów do monitorowania eksploatacji. Daje się zauważyć dążenie do tworzenia, oprócz stosowanych już wcześniej metod, szerszych i bardziej skomplikowanych pakietów programów wspomagających eksploatację [6]. Wykorzystuje się przy tym mniej lub bardziej złożone modele matematyczne. Modele te mogą mieć różną formę, lecz zwykle są przekształcane do układów równań algebraicznych (liniowych, nieliniowych lub zlinearyzowanych). Za pomocą modeli matematycznych rozwiązywane są zadania symulacji lub optymalizacji.

Elektrownia Opole jest najnowszą polską elektrownią systemową opalaną węglem kamiennym. Blok czwarty został oddany do eksploatacji w 1997 roku. Zainstalowany tam system pomiarowy umożliwia sporządzenie pełnych bilansów substancji i energii, wyznaczenie sprawności energetycznej oraz obliczenie wskaźników energetycznych pracy bloku. Na dokładność obliczeń wskaźników wpływa zarówno dokładność pomiarów jak i dokładność metod obliczeniowych. W algorytmie obliczeń wykorzystuje się wybrane wyniki pomiarów, najczęściej obciążone mniejszym błędem. Błędy pomiarów przenoszą się na błędy obliczeń wskaźników energetycznych. Potrzebne są więc procedury uwiarygodnienia wyników pomiaru. Procedury takie można opracować wykorzystując rachunek wyrównawczy.

Z praw fizyki wynikają równania określające związki między wielkościami mierzonymi. Postać tych równań wynika z modelu matematycznego. W problemach energetycznych są to najczęściej równania bilansu substancji i energii oraz linii rozprężania pary w turbinie. W tradycyjnych procedurach obliczeniowych równania te wykorzystuje się do wyznaczenia wartości wielkości nie mierzonych. Często liczba równań modelu matematycznego przewyższa liczbę niewiadomych. Wówczas nadmiar informacji może zostać wykorzystany w procedurach rachunku wyrównawczego do uwiarygodnienia danych pomiarowych. Występowanie nadmiaru informacji nie powinno skłaniać do ograniczenia ilości pomiarów. Im większy nadmiar informacji, tym większej dokładności wyników można się spodziewać po uwiarygodnieniu danych pomiarowych za pomocą rachunku wyrównawczego.

W artykule przedstawiono sposób wykorzystania rachunku wyrównawczego dla uwiarygodnienia pomiarów energetycznych bloku czwartego *Elektrowni Opole*. Zastosowanie rachunku wyrównawczego umożliwiło zamknięcie bilansów substancji i energii kotła, turbozespołu, skraplacza, regeneracyjnych wymienników ciepła oraz całego bloku. Uwiarygodnione wyniki pomiarów i obliczeń wykorzystano do wyznaczenia wskaźników energetycznych pracy bloku i niepewności ich obliczeń.

Równania modelu matematycznego bloku energetycznego

Formułując równania modelu matematycznego należy mieć na uwadze:

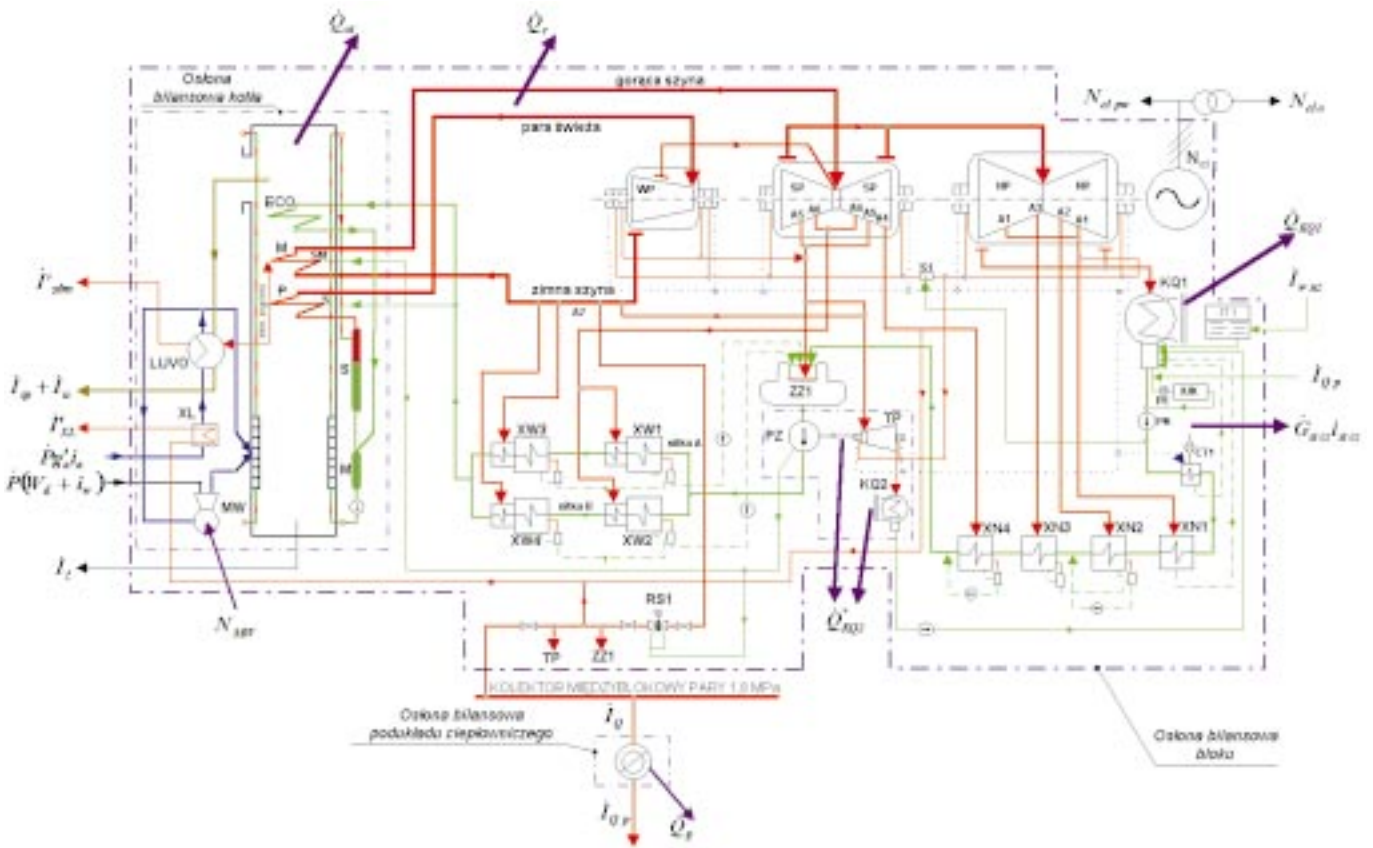
- cel, jaki zamierza się osiągnąć,
- dostępne informacje pomiarowe o obiekcie,
- narzędzia matematyczne, jakie zamierza się zastosować do rozwiązania problemu.

W systemie kontroli pracy bloku energetycznego należy dążyć do uzyskania najbardziej wiarygodnych informacji o danych pomiarowych i wskaźnikach energetycznych określających warunki eksploatacji. System pomiarów eksploatacyjnych i ich rejestracja w systemie komputerowym dostarczają informacji o obiekcie. Zastosowanie metod rachunku wyrównawczego wymaga, aby model matematyczny zbudowany został z równań algebraicznych.

Podstawowymi równaniami opracowanego dla uwiarygodnienia informacji pomiarowych modelu matematycznego są równania bilansu substancji i energii. Ponadto procedurze uzgadniania poddano równanie wiążące parametry nasycenia dla pary wodnej oraz związku pomiędzy entalpią i entropią punktów linii rozprężania pary w turbinie.

Dla bloku czwartego *Elektrowni Opole* wyprowadzono następujące równania bilansowe modelu matematycznego bloku (rys.1):

- bilans substancji i energii części wysokoprężnej turbiny,
- bilans substancji dla podukładu: rurociąg pary świeżej – część WP turbiny – „zimna szyna” (upust A7) – przegrzewacz wtórny – „gorąca szyna”,
- bilans substancji i energii części średnioprężnej turbiny,
- bilans energii części niskoprężnej turbiny,



Rys. 1. Schemat bilansowy bloku energetycznego nr 4 Elektrowni Opole

- bilans substancji dla podukładu rurociąg pary świeżej – część WP turbiny – „zimna szyna” – przegrzewacz wtórny – „gorąca szyna” – część SP turbiny – część NP turbiny – rurociąg parowy do skraplacza,
- bilans mocy turbozespołu,
- bilanse energii niskoprężnych regeneracyjnych wymienników ciepła XN1–XN4,
- bilans substancji kondensatu głównego w układzie regeneracji niskoprężnej,
- bilanse energii wysokoprężnych regeneracyjnych wymienników ciepła XW1–XW4,
- bilans substancji skroplin odpływających z wymienników nitki A i B regeneracji wysokoprężnej,
- bilans substancji węzła mieszania wody zasilającej z nitki A i B regeneracji wysokoprężnej,
- bilans substancji i energii dla podukładu woda-para w kotle,
- bilans energii dla rurociągu pary świeżej, do wtórnego przegrzewu i wtórnie przegrzanej,
- bilans substancji i energii stacji redukcyjno-schładzającej RS1,
- bilanse substancji wybranych węzłów mieszania,
- równości entalpii właściwej w punktach obiegu,
- bilans energii bloku.

Dla procedury obliczeń numerycznych uzgadniania bilansów sformułowano łącznie 37 równań bilansowych, w których niewiadomymi są:

- strumień pary z przegrzewacza wtórnego kotła do części SP turbiny,
- strumień pary z części niskoprężnej turbiny do skraplacza,
- strumień kondensatu głównego do regeneracji niskoprężnej,
- strumień pary z upustu A1 do wymiennika XN1,
- strumień pary z upustu A2 do wymiennika XN2,
- strumień pary z upustu A3 do wymiennika XN3,
- strumień pary z upustu A4 do wymiennika XN4,
- strumień pary z upustu A6 do wymiennika XW1,
- strumień pary z upustu A6 do wymiennika XW2,
- strumień wody w nitce A regeneracji XW,
- strumień wody w nitce B regeneracji XW,
- strumień pary ze stacji redukcyjno-schładzającej RS1 do kolektora 1,8 MPa,
- moc wewnętrzna części WP turbiny,
- moc wewnętrzna części SP turbiny,
- moc wewnętrzna części NP turbiny,
- strumień ciepła użytecznego przekazywanego w kotle.

Niezależnie od uzgadniania bilansów substancji i energii podukładów bloku energetycznego przeprowadzono uzgadnianie parametrów nasycenia w obszarze pary mokrej oraz punktów linii rozprężania pary przegrzanej w turbinie. Związek pomiędzy parametrami nasycenia T_s oraz p_s przyjęto w postaci równania Antoine’a [3]:

$$T_s = a + \frac{b}{\ln p_s + c} \quad (1)$$

Wartości funkcji kalorycznych entalpii i oraz entropii s w kolejnych punktach linii rozprężania m oraz n w obszarze pary przegrzanej związane są z lokalną sprawnością wewnętrzną przemiany adiabatycznej η_i wg wzoru:

$$i_m(1 - \eta_{i, m-n}) + s_m a_n \eta_{i, m-n} - i_n(1 - \eta_{i, m-n}) + - s_n a_n \eta_{i, m-n} = 0 \quad (2)$$

gdzie:

$$a_n = \left(\frac{\partial i}{\partial s} \right)_{p_n}$$

Powyższą zależność zapisano dla kolejnych par punktów linii rozprężania w części SP turbiny, a uzyskane równania poddano procedurze uwiarygodnienia metodą rachunku wyrównawczego.

W obszarze pary mokrej wartości entalpii i entropii poszukiwano w punktach przecięcia linii rozprężania z odpowiednimi izobarami. Linię rozprężania aproksymowano równaniem kwadratowym wykorzystując punkty w obszarze pary przegrzanej oraz punkt odpowiadający wypływowi pary z turbiny do skraplacza.

Algorytm obliczeń kotła parowego

Obliczenia bilansu substancji i energii kotła przeprowadzono na podstawie normy DIN 1942 [1]. Granice przestrzeni bilansowej powinny pokrywać się z granicami doprowadzonych i odprowadzonych strumieni energii oraz umożliwiać jednoznaczne określenie parametrów czynników na osłonie bilansowej. W bilansowanym kotle BP-1150 granice układu bilansowego wyznaczają:

- rurociągi doprowadzające wodę zasilającą, wodę wtryskową do schładzaczy pary oraz parę do przegrzewu wtórnego,
- rurociągi pary świeżej i wtórnie przegrzanej,
- podajnik młynowy węgla,
- rurociągi powietrza przed parowymi podgrzewaczami,
- przewody spalinowe za obrotowymi podgrzewaczami powietrza.

W tak określonym układzie bilansowym w granicach układu znajdują się: młyny oraz parowe i obrotowe podgrzewacze powietrza. Układ ten nie obejmuje wentylatorów powietrza i spalin oraz elektrofiltrów.

Przy obliczaniu strumieni energii doprowadzonej i wyprowadzonej z kotła wymagane jest określenie poziomu odniesienia dla entalpii. Dla układu wodno-parowego kotła poziom odniesienia przyjmuje się zgodnie z międzynarodowymi ustaleniami (zerowa wartość energii wewnętrznej dla wody w punkcie potrójnym). Dla substratów i produktów procesu spalania poziom odniesienia określony jest przyjętymi przy wyznaczaniu wartości opałowej parametrami termicznymi dla zerowej wartości entalpii. Ponieważ gazy traktujemy jako półdoskonałe, wystarcza przyjęcie temperatury odniesienia. Zgodnie z tablicami wartości opałowej oraz zaleceniami normy DIN przyjęto temperaturę odniesienia $t_o = 25^\circ\text{C}$.

Zgodnie z normą DIN sprawność energetyczną kotła parowego wyznacza się metodą pośrednią ze wzoru:

$$\eta_{EK} = \frac{1 - \sum S_i^*}{1 + \frac{\dot{Q}_{ot} + \dot{Q}_{zdm} - (\dot{Q}_{XL} + N_{MW}) \sum S_i^*}{\dot{Q}_{uz}}} \quad (3)$$

gdzie:

\dot{Q}_{zdm} – strumień ciepła przekazanego w kotle na wytworzenie pary do zdmuchiwaczy popiołu,

\dot{Q}_{ot} – strumień strat ciepła do otoczenia w kotle,

\dot{Q}_{XL} – strumień ciepła przekazany w parowych podgrzewaczach powietrza,

N_{MW} – moc napędowa młynów węglowych,

S_i^* – względne straty energii w kotle odniesione do strumienia doprowadzonej energii, proporcjonalnego do zużycia węgla.

Sprawność energetyczna kotła obliczona ze wzoru (3) odniesiona jest do całkowitej energii doprowadzonej do kotła (rys. 1.):

$$\eta_{EK} = \frac{\dot{Q}_{uz}}{\dot{P}(W_d + i_w + g'_a i'_a) + \dot{Q}_{XL} + N_{MW}} \quad (4)$$

gdzie:

\dot{Q}_{uz} – użyteczny strumień ciepła przekazanego w kotle,

W_d, i_w – wartość opałowa i entalpia właściwa węgla,

g'_a, i'_a – jednostkowa ilość i entalpia właściwa powietrza do spalania.

Dla algorytmu obliczeń wskaźników energetycznych dogodnie jest posługiwać się sprawnością energetyczną odniesioną do energii chemicznej paliwa. Można ją obliczyć ze wzoru:

$$\eta_{EK}^* = \eta_{EK} \frac{W_d + i_w + g'_a i'_a}{W_d} \frac{1 - \eta_{EK} \frac{\dot{Q}_{XL} + N_{MW}}{\dot{Q}_{uz}}} \quad (5)$$

Algorytm wyznaczania niepewności pomiaru i obliczeń

Pomiar jest zawsze operacją niedokładną. Estymata uzyskana na drodze pomiarowej na ogół różni się od wartości prawdziwej. Miarą niedokładności pomiaru, zgodnie z opracowanym – z inicjatywy Międzynarodowego Komitetu Miar – Przewodnikiem [13], jest niepewność pomiaru, zdefiniowana jako parametr, związany z wynikiem pomiaru, charakteryzujący rozrzut wartości, które można w uzasadniony sposób przypisać wielkości mierzonej. Szacowanie niedokładności pomiarów i obliczeń w prezentowanej pracy oparto na wyznaczeniu ich niepewności, korzystając z opracowań dotyczących tej problematyki [2, 4, 10, 13].

Dokładność stosowanego przyrządu pomiarowego determinuje minimalną wartość niepewności pomiaru [7]. Dla wielu przyrządów pomiarowych produkowanych seryjnie używa się pojęcia klasy. Klasa przyrządu pomnożona przez jego zakres określa przedział ufności zmiennej pomiarowej. Zakładając, że rozkład błędów można opisać rozkładem

Gausa, to zgodnie z normą DIN [1] ten przedział ufności należy uważać za przedział dwusigmowy (2σ), a odpowiadające mu prawdopodobieństwo wynosi około 95%. Niepewność standardowa stanowi wówczas połowę przedziału dwusigmowego.

Niepewność pomiaru jest geometryczną sumą niepewności poszczególnych niedokładności pomiarowych:

$$u = \sqrt{u_m^2 + u_p^2 + u_i^2} \quad (6)$$

gdzie:

u_m – niepewność metody pomiarowej (np. niedokładność zabudowy czujnika, poboru próby),

u_p – niepewność przyrządu pomiarowego,

u_i – niepewności odczytu, transformacji i przesyłu sygnału pomiarowego (np. niedokładność przetwornika).

Powyższe niepewności określone są:

- ze znanej dokładności przyrządu (np. elektryczne przyrządy pomiarowe, przyrządy do pomiarów ciśnienia),
- z zasad określania błędów dla wybranych pomiarów (np. pomiary natężenia przepływu),
- na podstawie wyników kalibracji przeprowadzonych z użyciem przyrządów pomiarowych o znanej dokładności,
- na podstawie doświadczeń ze stosowania techniki pomiarowej.

Pomiary cieplne w energetyce są z reguły złożone. Wartości wielu wielkości fizycznych nie można zmierzyć bezpośrednio. Oblicza się je z wykorzystaniem algorytmów na podstawie wyników pomiarów bezpośrednich. Należą do nich m.in. takie funkcje kaloryczne, jak: entalpia i entropia właściwa. Wartości entalpii oblicza się wykorzystując wyniki pomiaru temperatury i ciśnienia $i=i(t, p)$. Z równania propagacji niepewności wynika zależność na niepewność obliczeń entalpii właściwej:

$$u_i = \sqrt{\left[\frac{\partial i}{\partial t} u_t\right]^2 + \left[\frac{\partial i}{\partial p} u_p\right]^2} \quad (7)$$

Względna niepewność obliczeń entalpii właściwej wynosi:

$$\varepsilon_i = \frac{u_i}{i} = \sqrt{(A_t \varepsilon_t)^2 + (A_p \varepsilon_p)^2} \quad (8)$$

gdzie:

$\varepsilon_t, \varepsilon_p$ – względne niedokładności pomiaru temperatury i ciśnienia.

Wartości współczynników A_t i A_p wyznaczono na podstawie normy DIN [1].

Również związek pomiędzy obliczonymi wartościami sprawności energetycznej kotła oraz wskaźnikami charakteryzującymi pracę bloku energetycznego a wielkościami mierzonymi jest na tyle złożony, że nie można podać matematycznej zależności na niepewność obliczeń. Jeżeli sprawność energetyczna kotła η_{EK} jest funkcją n zmiennych (wielkości pomiarowych i obliczeniowych), czyli może być zapisana wzorem:

$$\eta_{EK} = f(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

to wówczas:

$$\varepsilon_\eta = \frac{u_\eta}{\eta_{EK}} = \sqrt{\sum_i \left[\frac{x_i}{\eta_{EK}} \frac{\partial \eta_{EK}}{\partial x_i} \frac{u_{x_i}}{x_i} \right]^2} = \sqrt{\sum_i (A_i \varepsilon_i)^2} \quad (9)$$

Po zastąpieniu we współczynniku korekcyjnym A_i pochodnej cząstkowej ilorazem różnicowym otrzymuje się:

$$A_i = \frac{\eta_{EK}(1,01x_i) - \eta_{EK}(0,99x_i)}{0,02\eta_{EK}(x_i)} \quad (10)$$

W analogiczny sposób określono niepewności obliczeń podstawowych wskaźników energetycznych bloku.

Algorytm obliczeń wyrównawczych

Równania określające związki między wielkościami mierzonymi nazywane są w algorytmie rachunku wyrównawczego równaniami warunków. Procedura uzgadniania polega na takim dopasowaniu poprawek wielkości mierzonych i wstępnych wartości niewiadomych, aby spełniony był układ równań warunków:

$$\Delta : F_k(l_i + v_i, \dots, l_n + v_n, x_j + y_j, \dots, x_u + y_u) = 0 \quad (11)$$

gdzie:

- l_i – wynik pomiaru i -tej wielkości mierzonej,
- v_i – poprawka i -tej wielkości mierzonej,
- x_j – wynik wstępnych obliczeń j -tej niewiadomej,
- y_j – poprawka wartości j -tej niewiadomej,
- k – numer równania warunków.

Algorytm obliczeniowy poszukiwania poprawek wyników pomiaru i wielkości niewiadomych wynika z rozwiązania ekstremum warunkowego. Ekstremum opisane jest jako maksimum funkcji wiarygodności i ograniczeniami wynikającymi z równań warunków [5, 9]. Rozwiązanie ekstremum warunkowego jest najprostsze, jeżeli równania warunków można z dostateczną dokładnością zlinearyzować w otoczeniu punktów wyznaczonych przez wyniki pomiarów i wstępnie dobrane wartości niewiadomych. W takim przypadku rozwiązanie można wyrazić za pomocą układu algebraicznych równań liniowych. Jeżeli linearyzacja równań warunków pociąga za sobą zbyt duże błędy, konieczne jest zastosowanie metod programowania nieliniowego.

Przeprowadzenie obliczeń wyrównawczych pozwala osiągnąć następujące cele:

- 1) jednoznaczne obliczenie najbardziej prawdopodobnych wartości niewiadomych,
- 2) dokonanie oceny dokładności skorygowanych wyników pomiarów oraz obliczonych wartości niewiadomych,
- 3) zmniejszenie niedokładności ocen wielkości mierzonych,
- 4) dokonanie kontroli dotrzymania założonej dokładności pomiarów.

Skorygowane wartości wielkości mierzonych \hat{l}_i oraz nieświadomych \hat{x}_j wyznacza się dodając do wartości przed uzgodnieniem obliczone poprawki:

$$\begin{aligned}\hat{l}_i &= l_i + v_i \\ \hat{x}_j &= x_j + y_j\end{aligned}\quad (12)$$

Kontrolę dokładności pomiarów można przeprowadzić porównując obliczone poprawki v_i z niepewnością standardową wyników pomiaru m_i . Przyjmuje się, że poprawka nie powinna (co do bezwzględnej wartości) przekraczać potrójnej niepewności standardowej pomiaru:

$$v_i \leq 3 |m_i| \quad (13)$$

Kontrola warunku (13) stanowi fazę wstępną oceny wyników obliczeń wyrównawczych. Nierówność (13) nie jest warunkiem wystarczającym dotrzymania założonej dokładności pomiarów. Wystąpienie zbyt licznych poprawek v_i o wartości bezwzględnej nie przekraczającej $3 |m_i|$, lecz zbliżonych do niej może świadczyć albo o przekroczeniu dopuszczalnej niedokładności pomiarów, albo o nadmiernym uproszczeniu równań modelu matematycznego. Dlatego wektor uzgodnionych wyników pomiaru \hat{L} należy poddać analizie statystycznej.

Dany wektor L wyników pomiaru należy do populacji o rozkładzie normalnym scharakteryzowanym przez macierz kowariancji M i nieznaną wektor wartości oczekiwanych μ . Wektor wyników pomiaru po uzgodnieniu \hat{L} można uznać za dobrą ocenę nieznanego wektora μ , przy założonym poziomie istotności γ jeżeli [5]:

$$\sum_{i=1}^n \left[\frac{l_i - \hat{l}_i}{m_i} \right]^2 < \chi_{\gamma, n}^2 \quad (14)$$

gdzie:

- n – liczba stopni swobody (równa liczbie zmiennych pomiarowych),
 - γ – poziom istotności,
 - χ^2 – wartość krytyczna testu χ^2 .
- Najczęściej zakłada się poziom istotności $\gamma = 0,05$.

Jeżeli wartość sumy ważonej poprawek wyników pomiaru jest mniejsza niż wartość testu χ^2 określona dla n stopni swobody przy poziomie istotności γ , to nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy, że wektor ocen \hat{L} wyników pomiaru po uzgodnieniu daje dobrą ocenę wektora wartości oczekiwanych μ . Wynik negatywny testu χ^2 może świadczyć o nadmiernie optymistycznej ocenie dokładności pomiarów.

Algorytm obliczeń wskaźników energetycznych brutto pracy bloku

Sprawność energetyczną bloku brutto wyznacza się ze wzoru:

$$\eta_E = \frac{N_{el} + \dot{Q}_g}{\dot{P}W_d} \quad (15)$$

gdzie:

- N_{el} – moc elektryczna generatora,
- \dot{Q}_g – strumień ciepła przekazywany w układzie ciepłowniczym,
- $\dot{P}W_d$ – zużycie energii chemicznej węgla w kotle.

Zużycie energii chemicznej paliwa w kotle można opisać wzorem (rys.1):

$$\begin{aligned}\dot{P}W_d &= \frac{N_{el}}{\eta_m \eta_g} + \dot{Q}_{KQ1} + \dot{Q}_{KQ2} + \dot{Q}_g + \\ &+ N_{TP} \left[\frac{1 - \eta_{mTP}}{\eta_{mTP}} + (1 - \eta_{mPZ}) \right] + \dot{Q}_{str} \\ &\quad \eta_{EK}^*\end{aligned}\quad (16)$$

gdzie:

- $\dot{Q}_{KQ1}, \dot{Q}_{KQ2}$ – strumienie ciepła przekazywane w skraplaczach turbiny głównej i pomocniczej,
- \dot{Q}_g – strumień ciepła przekazywany w układzie ciepłowniczym,
- N_{TP} – moc mechaniczna na wale turbiny pomocniczej,
- $\eta_{mT}, \eta_{mTP}, \eta_{mPZ}$ – sprawność mechaniczna turbiny głównej, pomocniczej oraz pompy zasilającej,
- η_g – sprawność generatora elektrycznego,
- \dot{Q}_{str} – strumień strat ciepła i energii,
- η_{EK}^* – sprawność energetyczna kotła odniesiona do energii chemicznej paliwa.

Pozycja \dot{Q}_{str} w równaniu (16) obejmuje:

- straty ciepła w rurociągach pary świeżej, pary do wtórnego przegrzewu i pary wtórnie przegrzanej,
- strumień ciepła na podgrzanie w układzie regeneracji ciepła wody uzupełniającej pokrywającej straty pary w zdmuchiwaczach popiołu,
- strumień ciepła na podgrzanie wody uzupełniającej związany ze stratami kondensatu w parowych podgrzewaczach powietrza,
- strumień ciepła na pokrycie innych strat energii w obiegu.

Wprowadzając oznaczenia:

$$\dot{Q}_{KQ2}^* = \dot{Q}_{KQ2} + N_{TP} \left[\frac{1 - \eta_{mTP}}{\eta_{mTP}} + (1 - \eta_{mPZ}) \right] \quad (17)$$

$$\eta_r = \frac{\dot{Q}_{uż} - \dot{Q}_{str}}{\dot{Q}_{uż}} \quad (18)$$

równanie (16) można zapisać w postaci:

$$\dot{P}W_d = \frac{N_{el} + \dot{Q}_{KQ1} + \dot{Q}_{KQ2}^* + \dot{Q}_g}{\eta_m \eta_g \eta_r} \quad (19)$$

Moc generatora można rozdzielić na moc wytwarzaną w skojarzeniu N_{elS} oraz moc wytwarzaną w kondensacji $N_{el} - N_{elS}$, zaś równanie (19) zapisać w postaci:

$$\dot{P}W_d = \frac{\frac{N_{el} - N_{elS}}{\eta_m \eta_g} + \dot{Q}_{KQ1} + \alpha \dot{Q}_{KQ2}^*}{\eta_{EK}^* \eta_r} + \frac{\frac{N_{elS}}{\eta_m \eta_g} + \dot{Q}_g + (1 - \alpha) \dot{Q}_{KQ2}^*}{\eta_{EK}^* \eta_r} \quad (20)$$

gdzie:

$$\alpha = \frac{N_{el} - N_{elS}}{N_{el}}$$

Pierwszy składnik równania opisuje zużycie energii chemicznej paliwa w kotle obciążający układ kondensacyjny, drugi obciążający układ skojarzony.

Zużycie oraz wskaźnik jednostkowego zużycia energii chemicznej paliwa brutto w układzie kondensacyjnym można zapisać wzorem:

$$(\dot{P}W_d)_K = \frac{\frac{N_{el} - N_{elS}}{\eta_m \eta_g} + \dot{Q}_{KQ1} + \alpha \dot{Q}_{KQ2}^*}{\eta_{EK}^* \eta_r} \quad (21)$$

$$b_K = \frac{(\dot{P}W_d)_K}{N_{el} - N_{elS}} \quad (22)$$

Stosując metodę elektrowni równoważnej [9] uzyskuje się następujące wzory na podział zużycia paliwa pomiędzy ciepło i energię elektryczną w układzie skojarzonym:

$$(\dot{P}W_d)_{Sel} = \frac{N_{elS}}{\eta_{Eel}^r} \quad (23)$$

gdzie:

η_{Eel}^r — sprawność energetyczna brutto elektrowni równoważnej

$$b_{Sel} = \frac{(\dot{P}W_d)_{Sel}}{N_{elS}} \quad (24)$$

$$(\dot{P}W_d)_{SQ} = \frac{\frac{N_{elS}}{\eta_m \eta_g} + \dot{Q}_g + (1 - \alpha) \dot{Q}_{KQ2}^*}{\eta_{EK}^* \eta_r} - \frac{N_{elS}}{\eta_{Eel}^r} \quad (25)$$

$$b_{Qel} = \frac{(\dot{P}W_d)_{SQ}}{\dot{Q}_g} \quad (26)$$

W tradycyjnie stosowanej metodzie podział zużycia paliwa pomiędzy energię elektryczną i ciepło oraz wskaźniki jednostkowego zużycia przyjęło się obliczać ze wzorów:

— na wytworzenie energii elektrycznej brutto

$$(\dot{P}W_d)_{el} = \frac{N_{el} + \dot{Q}_{KQ1} + \dot{Q}_{KQ2}^*}{\eta_{EK}^* \eta_r} \quad (27)$$

$$b_{el} = \frac{(\dot{P}W_d)_{el}}{N_{el}} \quad (28)$$

— na wytworzenie ciepła brutto

$$(\dot{P}W_d)_Q = \frac{\dot{Q}_g}{\eta_{EK}^* \eta_r} \quad (29)$$

$$b_Q = \frac{1}{\eta_{EK}^* \eta_r} \quad (30)$$

W równaniach na wskaźnik jednostkowego zużycia energii chemicznej paliwa pominięto współczynnik liczbowy wynikający z dopasowania jednostek.

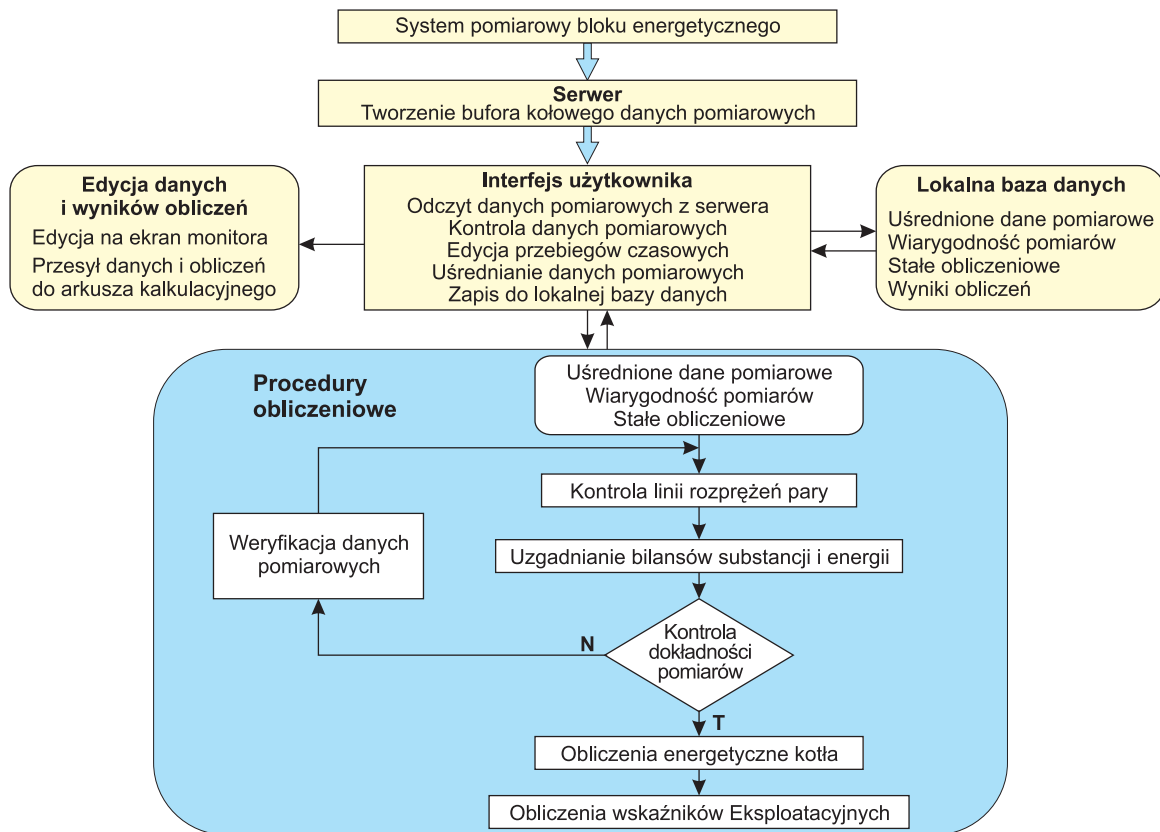
Pakiet programów komputerowych

Opracowany pakiet programów komputerowych bilansu bloku energetycznego z uwiarygodnieniem wyników pomiarów zawiera (rys. 2):

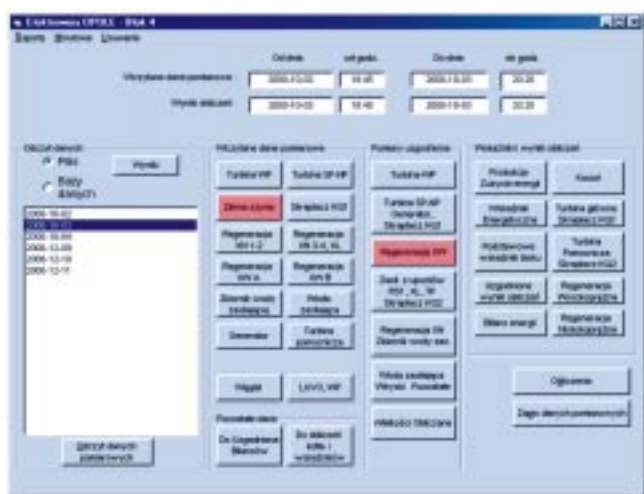
A: Program generujący pliki z danymi pomiarowymi, zainstalowany i uruchomiony na serwerze połączonym z systemem pomiarowym bloku energetycznego. Pliki zawierające dane pomiarowe generowane są w formie bufora kołowego. Program generujący pliki korzysta z opracowanego pliku konfiguracyjnego zawierającego listę symboli pomiarów oraz ich format. Generowanie plików na serwerze z danymi pomiarowymi jest procesem ciągłym, niezależnym od użytkownika.

B: Program obliczeniowy z interfejsem pracujący w systemie operacyjnym Windows zainstalowany na końcówce użytkownika i realizujący następujące funkcje (rys. 3):

- połączenie z serwerem zawierającym pliki z danymi pomiarowymi za pomocą sieci lokalnej,
- kopiowanie wybranych plików z serwera do komputera użytkownika,
- edycję przebiegów czasowych danych pomiarowych,
- weryfikację danych pomiarowych ze względu na poprawność zapisu i zakres pomiarowy,
- uśrednianie danych pomiarowych w zadanym przedziale czasu,
- wywołanie procedur obliczeniowych,
- zapis wyników obliczeń do lokalnej bazy danych,
- edycję na ekran monitora uśrednionych danych pomiarowych i wyników obliczeń,
- przesył danych pomiarowych i wyników obliczeń do arkusza kalkulacyjnego w celu ich dalszego przetwarzania.



Rys. 2. Struktura oprogramowania komputerowego



Rys. 3. Okno główne programu obliczeniowego

Na końcówce użytkownika zainstalowana jest ponadto lokalna baza danych zawierająca, oprócz uśrednionych danych pomiarowych i wyników obliczeń, dane dotyczące wiarygodności pomiarów oraz zestaw stałych obliczeniowych.

Procedury obliczeniowe zostały napisane w języku Fortran standard F95 i skompilowane jako biblioteki DLL. Do wyznaczania parametrów kalorycznych pary przegrzanej (entalpia i entropia właściwa) posłużono się zależnościami Wukałowicza, Aleksandrowa i Trachtiengerca [12]. Parametry pary i cieczy na linii nasycenia wyznaczono z zależności Meyera-Pitroffa, Vespera i Grigulla [11].

Procedury interfejsu użytkownika: wizualizacja danych i wyników obliczeń na ekranie monitora, kopiowanie, filtracja i przetwarzanie danych pomiarowych oraz komunikacji z procedurami obliczeniowymi (biblioteki DLL) i lokalną bazą danych (MS Access) zostały napisane w języku Visual Basic.

Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń sprawności energetycznej i względnych strat energii w kotle, zaś na rysunku 5 wyniki i niepewność obliczeń podstawowych wskaźników eksploatacji. W algorytmie obliczeń wykorzystuje się wyniki około 200 pomiarów eksploatacyjnych. Błędy pomiarów wynikające z miejsca zainstalowania czujników i ich klasy dokładności, z błędów przetworników i liczników wpływają na wiarygodność wyników obliczeń wskaźników eksploatacyjnych bloku. Istotny wpływ mają błędy pomiaru strumieni wody i pary. Dlatego niezbędna jest kontrola równań bilansu substancji i energii turbozespołu i regeneracyjnych wymienników ciepła. Taką kontrolę równań bilansowych umożliwia rachunek wyrównawczy. Wartości wskaźników energetycznych obliczone na podstawie uzgodnionych wyników pomiaru charakteryzują się wysoką wiarygodnością. Uzyskuje się ponadto gwarancję zamknięcia równań bilansowych oraz dotrzymania założonej dokładności pomiarów.

Dużą niepewność obliczeń wykazuje zużycie paliwa w kotle. Decydujący wpływ w tym przypadku ma niepewność wyznaczenia wartości opałowej paliwa. W wyniku obliczeń wg normy DIN [1], w przypadku jednorazowego

Nazwa	Jednostka	Wartość
Stwierdzona moc cieplego kocioła	GJ/h	2007,1
Strumień pary zasilającej w wymiennikach NL	GJ/h	0,1
Spełnność energetyczna kocioła	%	93,03
Spełnność dostarczenia ciepła do kocioła	%	93,34
Współczynnik niedoboru ciepła (LW0)		1,13
Współczynnik niedoboru ciepła (LW1)		1,26
Strata wodoparna w kotle opłoni, w tym	%	0,37
- strata wodoparna fizyczna	%	0,30
- strata wodoparna chemiczna	%	0,07
- strata fizyczna i chemiczna w buli	%	0,25
- strata fizyczna i chemiczna w pale	%	0,57
Strata ciepła kumulacji i pojemności ciepl. okładzin	%	0,25
Strata ciepła w procesie parowania	%	0,25
Niezużycie ciepła podgrzewania powietrza w ciągu LW1	%	0,3
Niezużycie ciepła podgrzewania powietrza w ciągu LW1	%	4,5
Przebieg powietrza w ciągu LW1	%	1,0
Przebieg powietrza w ciągu LW1	%	0,8
Spalanie ciepła opał w wodopowoszu 1	MJ/h	0,6
Spalanie ciepła opał w wodopowoszu 2	MJ/h	0,8
Spalanie ciepła opał w wodopowoszu 3	MJ/h	0,8

Rys. 4. Wyniki obliczeń cieplnych kotła

Nazwa	Jedn.	Wartość przed rozruchem	Wartość po rozruchu	Niepewność
Moc elektryczna generatore	MW	200,30	206,13	0,03
Spełnność energetyczna kocioła	%	93,03	93,03	0,34
Spełnność energetyczna bloku	%	42,11	46,71	0,30
Wskaźnik zużycia energii chemicznej do wypr. an. elek. bloku	kWh/kWh	2543,75	1841,30	05,36
Wskaźnik zużycia energii chemicznej do wypr. ciepła bloku	kWh/kWh	2142,93	1496,10	10,10
Ujemność mas. opałowa kocioła	GJ/h	2002,80	2007,12	11,40
Strumień energii chemicznej paliwa	GJ/h	3075,45	2176,72	22,01
Strumień paliwa	t/h	130,30	139,93	1,23
Zużycie ciepła opałowego	GJ/h	2002,01	2007,46	11,40

Rys. 5. Wyniki i niepewność obliczeń podstawowych wskaźników eksploatacji

poboru próbki paliwa do analizy, uzyskuje się niepewność 300–500 kJ/kg w zależności od wartości opałowej i udziału gramowego popiołu w węglu.

Doświadczenie uzyskane podczas eksploatacji systemu kontroli bloku 4 w Elektrowni Opole

Wykorzystanie opracowanego pakietu programów komputerowych do kontroli eksploatacji bloku 4 w *Elektrowni Opole* pozwoliło na sformułowanie podanych niżej wniosków.

- Wdrożenie systemu kontroli eksploatacji z zastosowaniem rachunku wyrównawczego pozwoliło ocenić prawidłowość działania aparatury pomiarowej. Dokonano oceny poprawności wskazań pomiarów eksploatacyjnych. Zweryfikowane zostały pomiary mające decydujący wpływ na wyniki obliczeń wskaźników eksploatacyjnych. Nie stwierdzono większych nieprawidłowości. Kontrola pozostałych pomiarów pozwoliła wyodrębnić pomiary obciążone dużym błędem (w układzie wymienników regeneracji XW oraz odgazowywacza).

- W celu uzyskania wymaganej wiarygodności obliczeń wskaźników energetycznych, służących do kontroli pracy bloku energetycznego, podstawowe znaczenie ma wiarygodność pomiaru strumienia pary świeżej oraz strumienia wody zasilającej kocioł. Istniejąca dokładność tych pomiarów jest zbyt mała w stosunku do wymagań, jakie stawia się dokładności obliczeń wskaźników energetycznych. W związku z tym należy podjąć działania w celu zwiększenia wiarygodności tych pomiarów.
- Opracowana metoda dostarcza służbom kontroli eksploatacji znacznie więcej informacji niż wyniki metod tradycyjnych. W dobie dynamicznego rozwoju systemów pomiarowych stanowi nowoczesne narzędzie obliczeniowe dla służb inżynierskich. W celu uzyskania większej użyteczności proponuje się rozszerzenie opracowanych algorytmów i programów obliczeniowych o moduły:
 - obliczeń i analizy strat rozruchowych,
 - analizy wpływu odchyłek parametrów eksploatacji od wartości znamionowych na wskaźnik jednostkowego zużycia energii chemicznej paliwa,
 - analizy statystycznej wskaźników eksploatacyjnych w przedziałach obciążenia bloku.

LITERATURA

- [1] Deutsche Norm DIN 1942: Acceptance testing of steam generators. February 1994
- [2] Deutsche Norm DIN 51849: Prüffehler und Toleranz. April 1956
- [3] Gdula S.J.: Wykres h-s. Wyd. Energotherm, Bielsko-Biała 1996
- [4] Łukaszek W.: Podstawy statystycznego opracowania pomiarów. Skrypt Politechniki Śląskiej, Gliwice 1975
- [5] Praca zbiorowa pod red. Jana Szarguta: Rachunek wyrównawczy w technice cieplnej. Ossolineum, Wrocław 1984
- [6] Ratschiner G.: Qualitätssicherung und Qualitätsverbesserung von Messungen an energetischen Anlagen; Validierung von Meßwerten. *Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift*. Heft 1/1999
- [7] Respondowski R.: Opracowanie wyników pomiarów fizycznych. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999
- [8] Rusinowski H., Szega M. i in.: System kontroli pracy bloku energetycznego z zastosowaniem rachunku wyrównawczego. Opracowanie algorytmów i programu komputerowego w Elektrowni Opole. Praca naukowo-badawcza. ITC, Gliwice 2000
- [9] Szargut J.: Analiza termodynamiczna i ekonomiczna w energetyce przemysłowej. WNT, Warszawa 1983
- [10] Szargut J.: Graniczny błąd pomiaru i metoda różniczkowej. *PAK* nr 2, 1999
- [11] Meyer-Pitroff R., Vesper H., Grigull U.: Einige Umkehrfunktionen und Näherungsgleichungen zur '1973 IFC Formulation for Industrial use', für Wasser und Wasserdampf. *Brennstoff-Wärme-Kraft* 21, 1969, 239-242
- [12] Vukalovich M. P., Aleksandrov A. A., Trachtengerts A. S.: Equations of state for superheated steam for industrial compositions using electronic computers. *Tieploenergetika* nr 9, 1968
- [13] Przewodnik: Wyrażanie niepewności pomiaru. Główny Urząd Miar. 1999

