

Koncepcja integracji metod wyznaczania i bilansowania energii chemicznej zużytych paliw

Autorzy: Jan Sokołowski, Krzysztof Wojas

(„Energetyka Ciepła i Zawodowa” - nr 6/2010)

W jednostkach wytwórczych zazwyczaj stosuje się równolegle kilka metod wyznaczania i bilansowania energii chemicznej zużywanych paliw, które dają różne wyniki obliczeń. Stosowanie kilku metod jest podyktowane wymogami technicznymi, potrzebą prowadzenia analiz statystycznych oraz wymogami prawa.

Dążąc do ujednoczenia końcowych wyników wykorzystywanych w sprawozdawczości w Elektrociepłowniach Wybrzeże S.A. opracowano koncepcję integracji metod, która jest jednym z etapów benchmarkingu jednostek wytwórczych oraz poszczególnych urządzeń wytwórczych należących do tych jednostek.

Ogólna charakterystyka metod rozliczania energii chemicznej stosowanych w EcW S.A.

Metody wyznaczania oraz bilansowania zużycia paliw i ich energii chemicznej dzielą się na metody bezpośrednie i metody pośrednie.

Metody bezpośrednie są wykorzystywane do rozliczeń: finansowo-księgowych, emisji CO₂, energii elektrycznej wyprodukowanej w wysokosprawnej kogeneracji oraz energii elektrycznej wyprodukowanej w odnawialnych źródłach energii.

Metody pośrednie są stosowane jako metody zastępcze, rezerwowe oraz kontrolne dla metod bezpośrednich, a także służą do oceny pracy urządzeń pod obciążeniem w krótkich odstępach czasu. Metody pośrednie umożliwiają uzyskanie informacji dotyczących zużycia energii chemicznej paliw z podziałem na poszczególne urządzenia i układy pracy urządzeń oraz – co jest bardzo ważne w elektrociepłowniach – na wyznaczenie zużycia energii chemicznej paliw na poszczególne produkty użyteczne i wskaźników technicznych.

W Elektrociepłowniach Wybrzeże S.A. stosowane są następujące metody rozliczania paliw:

- metoda bezpośrednia bez pośredniego etapu magazynowania,

Metoda ta, nazywana dalej „metodą wagową”, jest metodą podstawową w rozliczeniach węgla i biomasy. W metodzie tej energia chemiczna jest oznaczona bez indeksów ().

- metoda bezpośrednia z pośrednim etapem magazynowania,

Metoda ta, nazywana dalej „metodą geodezyjną”, jest metodą podstawową w rozliczeniach oleju opałowego. W metodzie tej energia chemiczna jest oznaczona bez indeksów ().

- metoda pośrednia oparta na wielkości ciepła z kotłów i sprawności kotłów,

W metodzie tej, nazywanej dalej „metodą wg ciepła z kotłów”, energia chemiczna jest oznaczona indeksem (°).

- metoda pośrednia oparta na wielkości produktów użytecznych z podziałem paliwa na produkty wykonane metodą fizyczną,

W metodzie tej, nazywanej dalej „metodą wg produktów”, energia chemiczna jest oznaczona indeksem (”).

Różnice wyników ww. metod są skutkiem m.in. niepewności pomiarów, zmian parametrów fizykochemicznych paliw, właściwości i niedoskonałości każdej z metod, przyjmowanych założeń oraz stosowanych charakterystyk (np. krzywych korekcyjnych, strat rozruchowych).

Integracja stosowanych metod ma na celu uniknięcie mnogości wyników obliczeń metod oraz wzajemną ich kontrolę, bez utraty szczegółowych informacji wynikających z każdej metody.

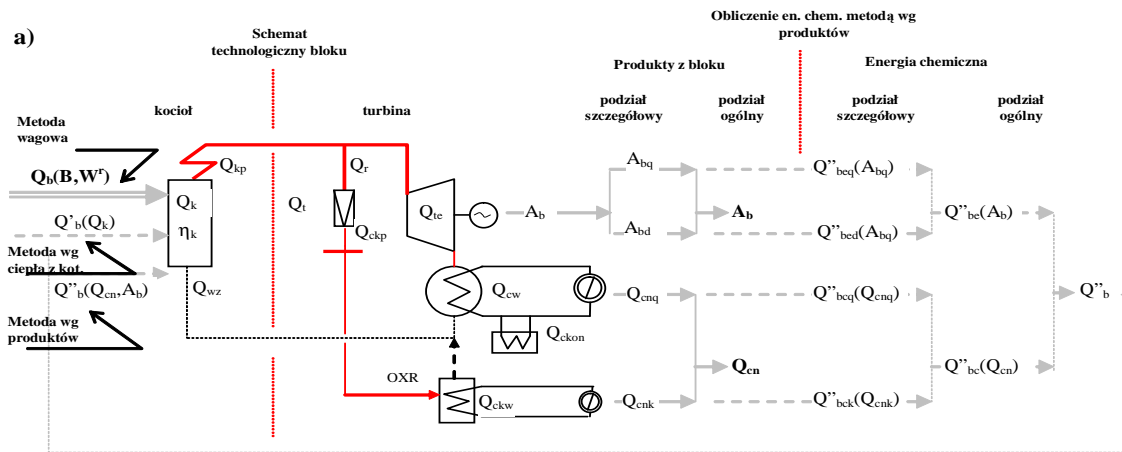
Uniwersalny model bloku i jego charakterystyka energetyczna

Produkcja energii na bloku może odbywać się w następujących układach pracy: w skojarzeniu, w pracy mieszanej (skojarzeniu i dociążeniu kondensacją), w pełnej pseudokondensacji oraz w każdym wymienionym układzie, z jednoczesnym poborem pary z kotła przez stacje redukcyjno-schładzające z pominięciem turbiny. W modelu podziału energii chemicznej na bloku wykorzystuje się charakterystykę energetyczną bloku w układzie *strumień energii chemicznej w funkcji mocy elektrycznej*. Zakłada się, że w określonych przedziałach czasu (np. co 1 godz.) blok pracuje w stanie ustalonym, co umożliwia wyznaczenie na charakterystyce jego punktu pracy (wartości średnich za okres).

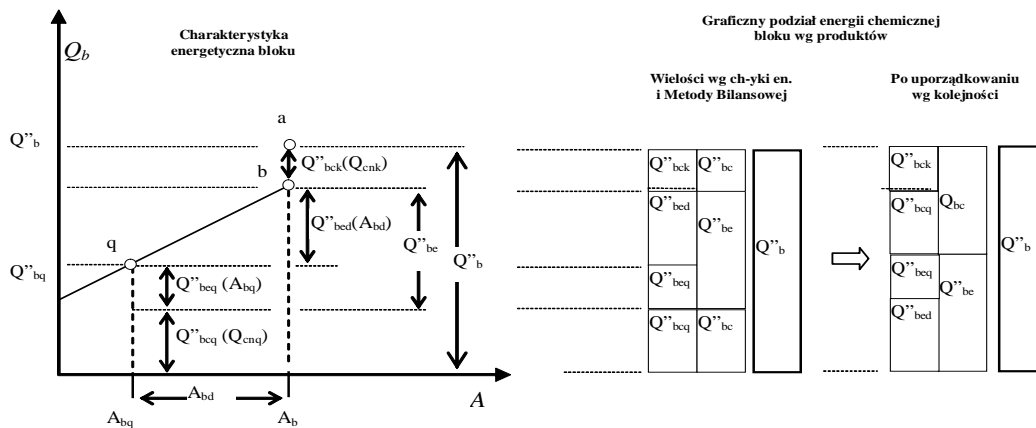
Uproszczony model bloku przedstawiono na rys. 1. W modelu tym przyjęto, że ciepło w kotle Q_k wytwarzane jest na skutek zużycia energii chemicznej paliw Q''_b . Część ciepła z kotła Q_k kierowana jest bezpośrednio, z pominięciem turbiny, do reduktorów Q_r , skąd pobierane jest ciepło poza skojarzeniem Q_{ckw} . Energia chemiczna paliw przypadająca na produkcję Q_{ckw} oznaczona jest Q''_{bck} . Pozostała część ciepła Q_k kierowana jest do turbiny w celu produkcji energii elektrycznej brutto A_b i ciepła w wodzie Q_{cw} . Część ciepła Q_{cw} wykorzystywana jest do produkcji ciepła użytecznego w skojarzeniu Q_{cnq} , natomiast nadwyżka ciepła oddawana jest np. do chłodni Q_{ckon} . Produkcji ciepła w skojarzeniu Q_{cnq} odpowiada energia chemiczna paliw Q''_{bcq} , a produkcji energii elektrycznej w skojarzeniu A_{bq} - energia chemiczna paliw Q''_{beq} . Na strumieniu ciepła Q_{ckon} produkuje się energię elektryczną w dociążeniu pseudokondensacją A_{bd} , której odpowiada energia chemiczna paliw Q''_{bed} . Na produkcję energii elektrycznej brutto bloku A_b zużywana jest energia chemiczna paliw Q''_{be} (suma Q''_{beq} i Q''_{bed}), natomiast na produkcję sumarycznego ciepła użytecznego wysyłanego na zewnątrz Q_{cn} zużywana jest energia chemiczna paliw Q''_{bc} .

Na rys. 1a) podano ogólny schemat technologiczny bloku z podziałem energii na poszczególne produkty. Natomiast na rys.1b) przedstawiono charakterystykę energetyczną, na podstawie której w metodzie wg produktów są wyznaczane poszczególne wielkości ze schematu a). Po prawej stronie charakterystyki pokazano te same wielkości w formie „prostokątów” przedstawiających podział całkowitej energii chemicznej bloku na energie cząstkowe przypadające na poszczególne produkty.

OGÓLNY MODEL WYZNACZANIA I PODZIAŁU ENERGII CHEMICZNEJ BLOKU METODĄ BILANSOWĄ WG PRODUKTÓW
(blok pracuje bez produkcji pary technologicznej upustowej)



b)



Wariant układu pracy mieszanej bloku (skj+doc) z równoczesną pracą reduktorów, gdy część ciepła z bloku kierowana jest do rzeki (chłodzi) a część ciepła z kotła omija turbinę i kierowana jest do stacji redukcyjnej (np. do OXR)
Legenda: Energia chemiczna przypadająca na
a – obciążenie kotła, b- obciążenie turbiny, q – obciążenie w skojarzeniu

Rys. 1. Ogólny uniwersalny model bloku z podziałem energii chemicznej na poszczególne produkty (wg metody wg produktów) i jego charakterystyka energetyczna z zaznaczonym podziałem energii cząstkowych. Źródło: Jan Sokotowski.

W tabeli 1 zamieszczono zestawienie produktów bloku i odpowiadającej im cząstkowej energii chemicznej oraz ich wskaźników dla różnych układów pracy bloku oraz łącznie dla grup urządzeń.

Tabela 1.

Urządzenie i rodzaj układu pracy		Energia chemiczna, produkty i wskaźniki						
		podział szczegółowy					ogólny	
		Q _{bck}	Q _{bcq}	Q _{beq}	Q _{bed}	Q _{bek}	Q _{bc}	Q _{be}
		Q _{cnk}	Q _{cnq}	A _{bq}	A _{bd}	A _{bk}	Q _{cn}	A _b
		b _{ck}	b _{cq}	b _{eq}	b _{ed}	b _{ek}	b _c	b _e
k.w. / k.p.	Praca kotła wodnego/parowego	x					x	
blok	Praca kotła wyłącznie na reduktory	x					x	
	Pełne skojarzenie		x	x			x	x
	Skojarzenie + reduktory	x	x	x			x	x
	Pełna praca mieszana		x	x	x		x	x
	Praca mieszana + reduktory	x	x	x	x		x	x
	Pełna pseudokondensacja					x		x
	Razem kotły wodne/parowe	x					x	
	Razem bloki	x	x	x	x	x	x	x
	Razem elektrociepłownia	x	x	x	x	x	x	x

Opis metod i wzory na energię chemiczną

Spis najważniejszych symboli stosowanych we wzorach i na rysunkach przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2 – oddzielny plik

Metoda wg produktów

Metoda ta, oparta na wytycznych normy PN-93/M-35500 [1], pozwala na wyznaczenie energii chemicznej paliw zużywanych na produkcję poszczególnych produktów użytecznych wraz z podziałem na układy pracy urządzeń. Szczegółowy schemat rozdziału energii chemicznej paliw zgodnie z normą [1] przedstawiono na rysunku nr 2.

Wykres Sankeya – oddzielny plik

Rys. 2. Rozpływ energii na bloku w układzie pracy skojarzonej z zaznaczonymi wielkościami do obliczania zużycia energii chemicznej wg trzech metod (metody wagowej, metody wg ciepła z kotłów oraz metody wg produktów). Źródło: Jan Sokółowski

Energję chemiczną paliw zużytych przez bloki ciepłownicze wyznacza się m.in.:

- a) dla pracy w układzie pełnego skojarzenia, podczas której wyznaczana jest energia chemiczna paliw zużywanych na produkcję energii elektrycznej w skojarzeniu Q''_{beq} i na produkcję ciepła w skojarzeniu Q''_{bcq} ,

$$Q''_{beq} = \left(\frac{3,6 \cdot A_{bq}}{\eta_m \cdot \eta_g} \cdot 10^4 + Q_{peq} \right) \cdot \frac{10^4}{\eta_k \cdot \eta_r} \quad [\text{GJ}] \quad (1)$$

$$Q''_{bcq} = (Q_{cnq} \cdot f_{sc} + Q_{pcq}) \cdot \frac{10^4}{\eta_k \cdot \eta_r} + Q_{brozc} \quad [GJ] \quad (2)$$

- b) dla pracy w układzie pełnej pseudokondensacji, podczas której wyznaczana jest energia chemiczna paliw zużywanych wyłącznie na produkcję energii elektrycznej w kondensacji Q''_{bek} ,

$$Q''_{bek} = (A_{bk} \cdot q_{tk} \cdot k_t \cdot 10^{-3} + Q_{pek}) \cdot \frac{10^4}{\eta_k \cdot \eta_r} + Q_{broze} \quad [GJ] \quad (3)$$

- c) dla pracy w układzie mieszanym (skojarzenia z dociążeniem pseudokondensacją), podczas której wyznaczana jest energia chemiczna paliw zużywanych na produkcję energii elektrycznej w skojarzeniu Q''_{beq} (1), produkcję ciepła w skojarzeniu Q''_{bcq} (2) oraz na produkcję energii elektrycznej w dociążeniu Q''_{bed} ,

$$Q''_{bed} = (A_{bd} \cdot q_{td} \cdot k_t) \cdot \frac{10}{\eta_k \cdot \eta_r} \quad [GJ] \quad (4)$$

Praca w tym układzie może występować na blokach z turbinami ciepłowniczymi lub przeciwprężnymi (czyli tam, gdzie ciepło jest produktem podstawowym) w sytuacji, gdy zwiększenie mocy elektrycznej turbosespołu wymaga uruchomienia urządzeń oddających ciepło do otoczenia, np. chłodni wentylatorowych. Pracę w tym układzie można podzielić na pracę „wymuszoną” minimum technicznym bloku (tj. gdy zapotrzebowanie na ciepło jest zbyt niskie do zapewnienia pracy bloku na minimum technicznym) oraz na pracę, gdy wykorzystuje się rezerwę wirującą bloku i jego moc elektryczna zwiększa się powyżej mocy wynikającej z aktualnego zapotrzebowania na ciepło w skojarzeniu. Powstałą nadwyżkę ciepła kieruje się do chłodni, a dodatkowo uzyskana energia elektryczna jest tzw. energią elektryczną w dociążeniu pseudokondensacyjnym. Układ pracy w dociążeniu został zdefiniowany specjalnie na potrzeby elektrociepłowni i nie opiera się na normie [1]. Definicja zarówno energii Q_{bed} , jak i definicja wskaźnika b_{ed} została opracowana i wdrożona w Elektrociepłowniach Wybrzeże S.A. przez współautora niniejszego artykułu - Jana Sokołowskiego.

Przedstawione powyżej zasady obliczeń dla układu mieszanego (skojarzenia z dociążeniem pseudokondensacją) eliminują problem nieciągłości obliczeń Q''_b wykonywanych w oparciu o wytyczne normy [1] przy przejściu z pracy w układzie pełnego skojarzenia na pracę w układzie mieszanym (czyli skojarzenia z minimalną produkcją energii elektrycznej w pseudokondensacji).

- d) dla pracy w układzie produkcji ciepła poza skojarzeniem (tj. pracy wyłącznie na stacji redukcyjno-schładzającej), podczas której wyznaczana jest energia chemiczna paliw zużywanych na produkcję ciepła poza skojarzeniem Q''_{bck} ,

$$Q''_{bck} = (Q_{cnk} \cdot f_{sc} + Q_{pck}) \cdot \frac{10^4}{\eta_k \cdot \eta_r} + Q_{brozc} \quad [GJ] \quad (5)$$

W metodzie wg produktów wyznaczone są następujące wskaźniki zużycia energii chemicznej paliwa na:

- produkcję energii elektrycznej łącznie b''_e , w układzie pełnego skojarzenia b''_{eq} , pełnej kondensacji b''_{ek} oraz w dociążeniu pseudokondensacją b''_{ed} :

$$b''_e = \frac{Q''_{be}}{A_b} \cdot 10^3, \quad b''_{eq} = \frac{Q''_{beq}}{A_{bq}} \cdot 10^3, \quad b''_{ek} = \frac{Q''_{bek}}{A_{bk}} \cdot 10^3, \quad b''_{ed} = \frac{Q''_{bed}}{A_{bd}} \cdot 10^3$$

[kJ/kWh], (6)

- produkcję ciepła wysyłanego na zewnątrz łącznie b''_c , wyprodukowanego w skojarzeniu b''_{cq} i poza skojarzeniem b''_{ck} :

$$b''_c = \frac{Q''_{bc}}{Q_{cn}} \cdot 10^3; \quad b''_{cq} = \frac{Q''_{bcq}}{Q_{cnq}} \cdot 10^3; \quad b''_{ck} = \frac{Q''_{bck}}{Q_{cnk}} \cdot 10^3 \quad [\text{MJ/GJ}]. \quad (7)$$

Metoda wg ciepła z kotłów

Energię chemiczną zużywanych paliw wyznacza się wg zależności:

$$Q'_b = \frac{Q_k}{\eta_k} \cdot 10^2 + \sum_r Q_{brozr} \quad [\text{GJ}] \quad (8)$$

Metoda wagowa

Energia chemiczna zużywanych paliw wyznaczana jest na podstawie bezpośredniego pomiaru masy lub objętości zużywanego i-tego paliwa oraz wyznaczonej wartości opałowej paliwa pobranego w miejscu pomiaru masy lub objętości tego paliwa:

$$Q_{bz} = \sum_i B_{zi} \cdot Q_{izi}^r \cdot 10^{-3} \quad [\text{GJ}] \quad (9)$$

Metoda geodezyjna

Ilość zużywanego paliwa wyznaczana jest na podstawie bilansu masy:

$$B_{zi} = \sum_j B_{dij} + B_{msi} - B_{mei} - B_{oi} \quad [\text{Mg}] \text{ lub } [\text{m}_n^3] \quad (10)$$

Energia chemiczna zużywanych paliw wyznaczana jest zgodnie z zależnością:

$$Q_{bz} = \left[\sum_j (B_{dij} \cdot Q_{idij}^r) + B_{msi} \cdot Q_{imsi}^r - B_{mei} \cdot Q_{imei}^r - B_{oi} \cdot Q_{ioi}^r \right] \cdot 10^{-3} \quad [\text{GJ}] \quad (11)$$

Koncepcja integracji metod

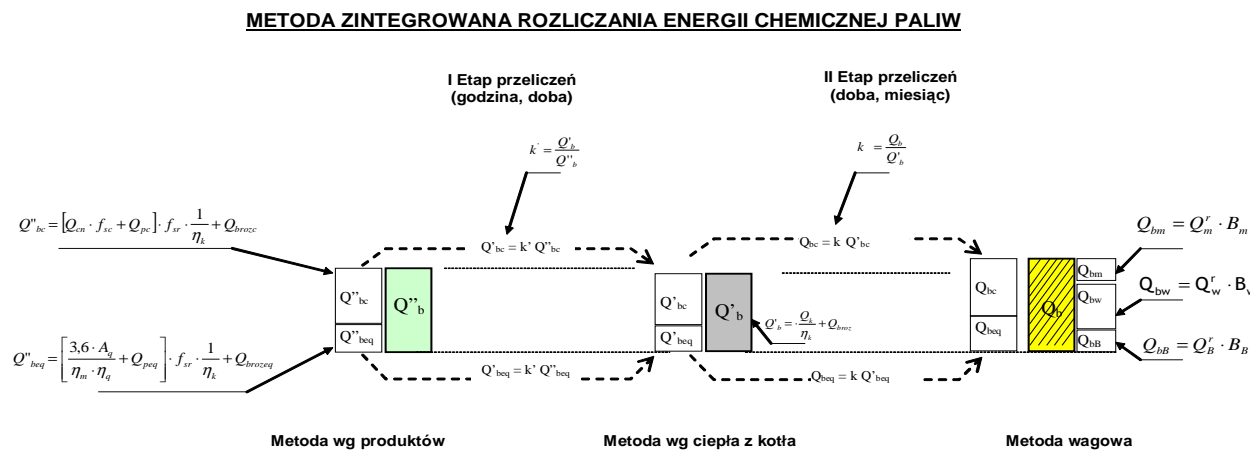
W ramach integracji metod ilość energii chemicznej zużywanych paliw i wyznaczone wskaźniki techniczne są przeliczane (korygowane) na wyniki obliczeń metod zdefiniowanych jako podstawowe.

Odstępstwo od tej zasady występuje jedynie wówczas, gdy można z pewnością stwierdzić, że wyniki obliczeń metod podstawowych nie są poprawne.

Korekta wyznaczanych wielkości i wskaźników technicznych wykonywana jest w okresach dobowych, a dla przeliczeń wyników metod pośrednich na wyniki metod bezpośrednich (podstawowych) – w okresach miesięcznych.

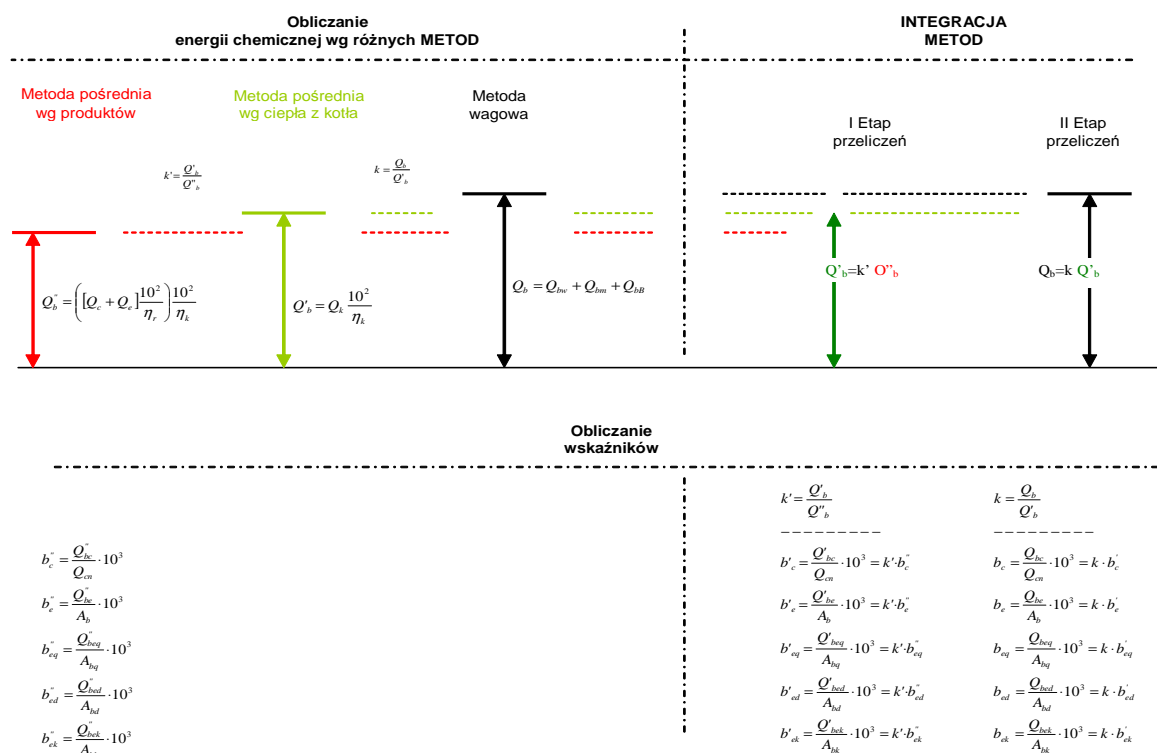
Wykonywanie obliczeń w krótszych odstępach czasu może wiązać się ze znacznym wzrostem niepewności wynikających z występowania buforów paliwa zasobników przykotłowych, strat rozruchowych itp.

Zasady integracji metod zostały przedstawione na rys. 3 i 4.



Rys. 3. Ogólna idea rozliczania energii chemicznej na poszczególne produkty (na przykładzie ciepła i en. elektrycznej w skojarzeniu) opartej na metodzie zintegrowanej opracowanej w EcW. Źródło: Jan Sokołowski.

IDEA METODY ZINTEGROWANEJ BILANSOWANIA ENERGII



Rys. 4. Idea metody zintegrowanej bilansowania energii w EcW i obliczenia wskaźników. Źródło: Jan Sokolowski.

Algorytm metody zintegrowanej zbudowany jest w oparciu o następujące kroki:

1. Wykonanie obliczeń metodą bilansową wg ciepła z kotłów.
2. Wykonanie obliczeń metodą bilansową wg produktów.
3. Wykonanie raportu wyników pierwotnych (bez przeliczeń).

Wyniki te mogą służyć do oceny poprawności działania układów pomiarowych oraz analizy różnic bilansowych w zakresie ciepła z kotłów i są szczególnie przydatne do analizy obliczeń wskaźników technicznych oraz kosztów jednostkowych produkcji energii w krótkim odstępie czasu: w obliczeniach on-line za okres godziny lub doby.

4. Wykonanie etapu I przeliczeń.

W ramach etapu I przeliczeń:

- dla każdego i-tego bloku oddzielnie wyznaczany jest współczynnik k'_i , zdefiniowany jako stosunek energii Q'_{bi} do energii Q''_{bi}

$$k'_i = \frac{Q'_{bi}}{Q''_{bi}} \quad [-] \quad (12)$$

- przeliczane są cząstkowe wartości energii chemicznej paliwa i wartości wskaźników, np.

$$Q'_{bi} = k'_i \cdot Q''_{bi} \quad [\text{GJ}] \quad b'_{edi} = k'_i \cdot b''_{edi} = \frac{Q'_{bedi} \cdot 10^3}{A_{bedi}} \quad [\text{kJ/kg}] \quad (13)$$

5. Wykonanie raportu wyników etapu I.

Przeliczone wyniki mogą być podstawą do oceny technicznej urządzeń, wstępnego szacowania zużycia energii chemicznej paliw (np. w przypadku awarii wag węglowych) i są szczególnie przydatne do analizy obliczeń wskaźników technicznych oraz kosztów jednostkowych produkcji energii w krótkim odstępie czasu: w obliczeniach on-line za okres godziny lub doby.

6. Wykonanie obliczeń metodą wagową (i/lub metodą geodezyjną).

7. Wykonanie etapu II przeliczeń.

W ramach etapu II przeliczeń:

- dla każdego i-tego bloku oddzielnie wyznaczany jest współczynnik k_i , zdefiniowany jako stosunek energii sumarycznej Q_{bi} do energii sumarycznej Q'_{bi} ,

$$k_i = \frac{Q_{bi}}{Q'_{bi}} \quad [-] \quad (14)$$

- przeliczane są cząstkowe wartości energii chemicznej paliwa i wartości wskaźników, np.

$$Q_{bi} = k_i \cdot Q'_{bi} \quad [\text{GJ}] \quad b_{edi} = k_i \cdot b'_{edi} = \frac{Q_{bedi} \cdot 10^3}{A_{bedi}} \quad [\text{kJ/kg}] \quad (15)$$

8. Wykonanie raportu wyników końcowych.

Uzyskane w etapie II wyniki mogą być wykorzystane np. w sprawozdawczości i księgowości, statystyce i planowaniu oraz przy rozliczeniu energii elektrycznej wytworzonej w wysokosprawnej kogeneracji. Otrzymane w tej metodzie wyniki są wiarygodne dla długiego okresu rozliczeniowego, czyli minimum doby, miesiąca lub roku.

Reasumując

Stosowane w Elektrociepłowniach Wybrzeże S.A. metody rozliczeń oraz opracowane zasady integracji tych metod pozwalają na:

- prowadzenie obliczeń prostymi i przejrzystymi metodami pośrednimi,
- wyszczególnienie pracy bloków ciepłowniczych w układzie skojarzonym z dociążeniem pseudokondensacją - analiza tego układu pracy jest szczególnie potrzebna w elektrociepłowniach z zainstalowanymi turbozespołami ciepłowniczymi i przeciwprężnymi,

- uporządkowanie obliczeń oraz wyeliminowanie (do niezbędnego minimum) powielania różnych wartości tych samych wielkości zużycia paliw i ich energii chemicznej oraz wyznaczanych wskaźników technicznych,
- kontrolę poprawności rozliczeń wg wag oraz śledzenie różnic wyników stosowanych metod.

Przedstawione metody i zasady integracji tych metod pozwalają na względnie proste dostosowanie ich do różnych obiektów i jednostek wytwórczych, a także na ujednoczenie założeń i zasad obliczeń, co jest szczególnie ważne w przypadku prowadzenia porównań i benchmarkingu urządzeń oraz jednostek wytwórczych.

Literatura

[1] PN-93/M-35500 „Metodyka obliczania zużycia paliwa do wytwarzania energii elektrycznej, cieplnej i mechanicznej”