

Andrzej ZIEBIK

Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Śląska

## **ANALIZA SYSTEMOWA GOSPODARKI ENERGETYCZNEJ ZAKŁADU PRZEMYSŁOWEGO**

**Streszczenie.** Analiza systemowa gospodarki energetycznej zakładu przemysłowego opiera się na modelu matematycznym bilansu energetycznego zakładu. Model matematyczny tworzy układ równań bilansowych nośników energii: nieliniowych w przypadku bilansowania krótkookresowego (dobowego) i liniowych w przypadku bilansowania długoterminowego (miesiąc, rok). Do zastosowań modelu należą: wielowariantowa analiza planu bilansu energetycznego zakładu przemysłowego, analiza bilansów energii i egzergii, obliczanie kosztów jednostkowych nośników energii i wskaźników skumulowanego zużycia energii, analiza systemowa racjonalizacji gospodarki energetycznej i ocena systemowa zasobów energii odpadowej.

## **SYSTEM ANALYSIS OF INDUSTRIAL ENERGY MANAGEMENT**

**Summary.** The system analysis of industrial energy management is based on a mathematical model of the energy balance of an industrial plant. The mathematical model consists of a set of balance equations of energy carriers: nonlinear in the case of a short-term balance plan and linear in the case of a long-term balance plan. Applications of this model: analysis of the variants of the energy balance plan, analyses of energy and exergy balances, calculations of the unit costs of energy carriers and cumulative energy indices, system analysis of the improvement of energy processes, system evaluation of industrial waste energy resources.

## **СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ХОЗЯЙСТВА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

**Резюме.** Системный анализ энергетического хозяйства промышленного предприятия базируется на математической модели энергетического баланса предприятия. Математическая модель состоит из системы уравнений балансов энергии: нелинейных для краткосрочных балансов и линейных для долгосрочных балансов. Рассматриваются следующие

применения модели: многовариантный анализ плана энергетического баланса промышленного предприятия, анализ балансов энергии и эксергии, матричный метод определения стоимости единицы энергоносителей и показателей кумулированного расхода энергии, системный анализ рационализации энергетического хозяйства и системная оценка вторичных энергоресурсов.

## 1. GOSPODARKA ENERGETYCZNA ZAKŁADU PRZEMYSŁOWEGO JAKO SYSTEM

W zakładzie przemysłowym wyróżnia się zespół procesów technologicznych (podsystem technologiczny) oraz podsystem energetyczny. Produkcja gałęzi energetycznych jest przede wszystkim przeznaczona na potrzeby gałęzi technologicznych, w części zaś na potrzeby własne podsystemu energetycznego. Złożoność powiązań między gospodarką energetyczną a wydziałami technologicznymi oraz wzajemne powiązania między gałęziami energetycznymi powodują, że całość gospodarki energetycznej zakładu przemysłowego to więcej aniżeli suma jej części rozpatrywanych każda oddzielnie. To ostatnie zdanie, jeżeli wyłączy się z niego terminologię energetyczną, stanowi najstarszą – bo pochodzącą od Arystotelesa – definicję systemu [1]. Gospodarka energetyczna zakładu przemysłowego stanowi więc system zdefiniowany jako zbiór urządzeń i maszyn energetycznych oraz powiązań (relacji) zachodzących między nimi oraz powiązań zewnętrznych z otoczeniem, których celem jest wytwarzanie, przetwarzanie, przesyłanie i rozdział nośników energii użytkowanych w zakładzie przemysłowym. Na skutek występowania powiązań gospodarka energetyczna, traktowana jako system, ma właściwości, których nie wykazują jej części (poszczególne gałęzie wytwórcze nośników energii).

Podsystem energetyczny zakładu przemysłowego wykazuje cechy zarówno systemów technicznych typu cybernetycznego, jak i systemów ekonomicznych [3]. O charakterze technicznym podsystemu energetycznego świadczy materialny (energetyczny) charakter powiązań między elementami. O charakterze ekonomicznym zaś decyduje przede wszystkim aktywna rola człowieka w elementach sterujących i sterowanych podsystemu.

Podsystem energetyczny ma decydujący wpływ na działanie podsystemu technologicznego mimo spełniania przez gospodarkę energetyczną roli usługowej w stosunku do podsystemu technologicznego.

Charakterystyczną cechą podsystemu energetycznego jest struktura hierarchiczna. Elementy podsystemu energetycznego (poszczególne gałęzie energetyczne) stanowią podsystemy rzędu niższego, a gospodarka energetyczna, rozpatrywana jako kompleks, występuje jako element systemu wyższego rzędu. Gospodarka energetyczna zakładu przemysłowego stanowi bowiem podsystem w dużym krajowym systemie energetycznym.

Podsystem energetyczny zakładu przemysłowego należy do systemów otwartych wymieniających z otoczeniem materię, energię i informację. Powiązania z otoczeniem należą do powiązań zewnętrznych. Są to powiązania z innymi systemami znajdującymi się hierarchicznie na wyższych lub równych poziomach.

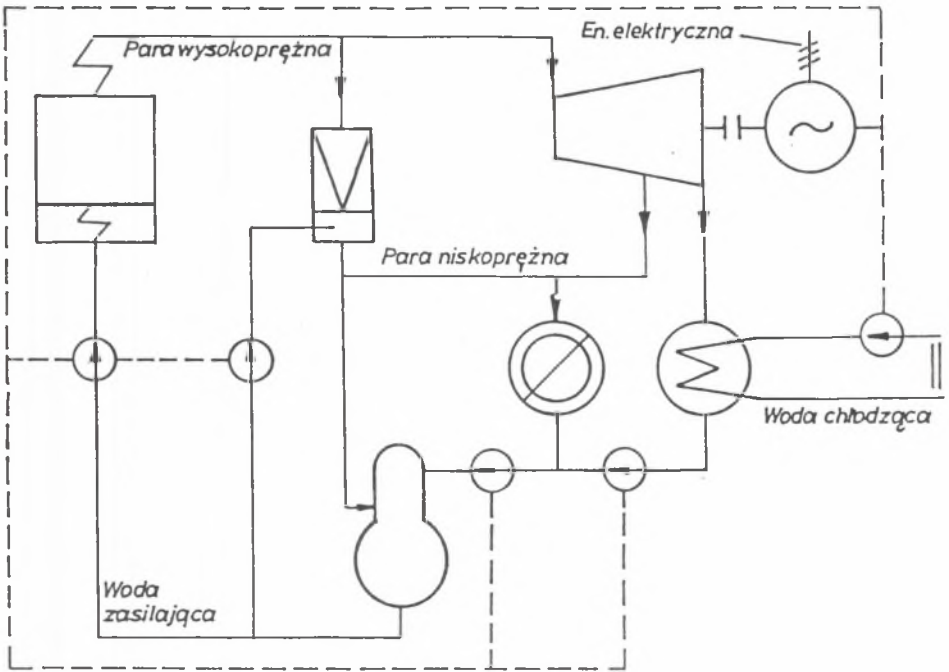
Wśród powiązań zewnętrznych podsystemu energetycznego zakładu przemysłowego można wyróżnić następujące grupy:

- powiązania wynikające z przepływów międzygałęziowych między podsystemem energetycznym i podsystemem technologicznym w zakładzie przemysłowym,
- powiązania między podsystemem energetycznym zakładu przemysłowego i krajowym systemem energetycznym,
- powiązania o charakterze ograniczeń dotyczące nakładów inwestycyjnych, dostaw maszyn, materiałów, paliw i energii,
- powiązania ze środowiskiem naturalnym człowieka.

Powiązania zewnętrzne cechuje inercyjność. Oznacza to, że zapotrzebowanie podsystemu technologicznego zakładu przemysłowego na dodatkowe ilości nośników energii, a podsystemu energetycznego na maszyny i urządzenia nie może być zrealizowane natychmiast. Szczególną uwagę należy zwrócić na powiązania ze środowiskiem naturalnym człowieka, które w przeważającej części wywołują ujemne skutki ekologiczne.

## 2. MODEL MATEMATYCZNY BILANSU GOSPODARKI ENERGETYCZNEJ ZAKŁADU PRZEMYSŁOWEGO

Nośniki energii przeznaczone do procesów technologicznych są wytwarzane w sieci wzajemnie ze sobą powiązanych procesów energetycznych. Szczególną złożonością powiązań cechuje się gospodarka cieplnoelektryczna. Część z tych powiązań ma charakter sprzężeń zwrotnych, co szczególnie utrudnia zamknięcie bilansu energetycznego za pomocą bilansów cząstkowych. Można to wykazać na podstawie elektrociepłowni, której schemat i tablicę powiązań międzygałęziowych przedstawiono na rys. 1. Zwiększone zapotrzebowanie na energię elektryczną z własnego turbogeneratora powoduje konieczność zwiększenia produkcji pary wysokoprężnej, a co za tym idzie – również zwiększenie zapotrzebowania własnego na energię elektryczną (zasilanie paliwem, pompy zasilające). To z kolei wywołuje dalszy przyrost zapotrzebowania na parę wysokoprężną i dalsze zwiększenie poboru energii elektrycznej na potrzeby własne. W metodzie bilansów cząstkowych tę procedurę kolejnych przybliżeń kończy się z chwilą osiągnięcia założonej dokładności bilansowania. Podany przykład powiązania między procesem wytwarzania energii elektrycznej i pary wysokoprężnej jest przykładem istnienia pętli sprzężenia zwrotnego.



	Energia elektryczna	Woda zasilająca	Para wysokoprężna	Para niskoprężna	Woda chłodząca
Energia elektryczna	1	1	1	1	1
Woda zasilająca	0	0	1	1	0
Para wysokoprężna	1	0	0	1	0
Para niskoprężna	0	1	0	0	0
Woda chłodząca	1	0	0	0	0

Rys. 1. Schemat i tablica powiązań międzygałęziowych przykładowej elektrociepłowni

Fig. 1. Schematic diagram and table of interbranches flows on example of heat-and-power generating plant

Niedogodnej, przybliżonej metody bilansów cząstkowych można uniknąć przez zastosowanie modelu matematycznego bilansu gospodarki energetycznej zakładu przemysłowego [4, 7, 10]. Model matematyczny stanowi układ równań bilansów nośników energii. Dla długich okresów bilansowych (rok, kwartał, miesiąc) stosuje się model liniowy. Dla okresów krótkich (doba, zmiana) model jest nieliniowy. Model może być podstawą mikrokomputerowego systemu bilansowania gospodarki energetycznej zakładu przemysłowego.

Zasady modelu matematycznego bilansu gospodarki energetycznej zakładu przemysłowego opierają się na teorii przepływów międzygałęziowych [2]. Proces wytwórczy zakładu jest podzielony na gałęzie produkcyjne: energetyczne i technologiczne. Gałąź produkcyjną tworzy zespół urządzeń służących do wytwarzania określonego produktu, który nosi nazwę produktu głównego. W niektórych gałęziach energetycznych nośniki energii są wytwarzane w urządzeniach szczytowych i podstawowych. W tym przypadku rozróżnia się część szczytową oraz część podstawową produkcji nośnika energii (przykładem może być para ze stacji redukcyjno-schładzającej oraz para upustowa lub przeciwprężna). W niektórych przypadkach własna produkcja nośnika energii jest uzupełniana dostawami z zewnątrz (np. energia elektryczna). Niektóre nośniki energii są sprowadzane wyłącznie z zewnątrz. Są to przede wszystkim paliwa. Ponadto nośniki energii mogą być wytwarzane w procesach skojarzonych energetycznych i energotechnologicznych jako produkty uboczne. Nośnik energii, wytwarzany jako produkt uboczny jednej gałęzi, może uzupełniać produkcję główną innej gałęzi. Przykładem może być para wodna otrzymywana z kotłów odzyskowych.

Po stronie odbioru nośnik energii jest zużywany w gałęziach energetycznych oraz technologicznych, a także może być zużywany na cele ogólnozakładowe (np. ogrzewanie, oświetlenie). W sporadycznych przypadkach może być również sprzedawany poza zakład przemysłowy (np. ciepło grzejne lub woda z ujęć zakładowych). W bilansie uwzględnia się też straty bilansowe.

Układ równań bilansowych nośników energii w zapisie uogólnionym (model długookresowy i krótkookresowy) ma postać:

$$\begin{aligned} \wedge : G_i + P_i + \sum_{j=1}^n [U_{ij}(G_j) + U_{ij}(P_j)] + \sum_{k=1}^p U_{ik}(\bar{G}_k) + D_i = \\ = \sum_{j=1}^n [Z_{ij}(G_j) + Z_{ij}(P_j)] + \sum_{k=1}^p Z_{ik}(\bar{G}_k) + Y_i + \Delta C_i + K_i + V_i \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

$G_i, P_i$  – szczytowa i podstawowa część produkcji  $i$ -tego nośnika energii,

$U_{ij}, \bar{U}_{ik}$  – produkcja uboczna i-tego nośnika energii odpowiednio w j-tej gałęzi energetycznej i w k-tej gałęzi technologicznej,

$\bar{G}_k$  – wielkość produkcji k-tej gałęzi technologicznej,

$D_i$  – dostawa uzupełniająca i-tego nośnika energii,

$Z_{ij}, Z_{ik}$  zużycie i-tego nośnika energii odpowiednio w j-tej gałęzi energetycznej i w k-tej gałęzi technologicznej,

$Y_i$  – zużycie i-tego nośnika energii na cele ogólnozakładowe,

$\Delta C_i$  – przyrost ilości i-tego nośnika energii w urządzeniu akumulacyjnym,

$K_i, V_i$  – sprzedaż i wielkość strat i-tego nośnika energii,

$i, j = 1, 2, \dots, n$  – kolejny numer nośnika energii,

$k = 1, 2, \dots, p$  – kolejny numer gałęzi technologicznej,

$n$  – liczba nośników energii,

$p$  – liczba gałęzi technologicznych.

W przypadku sporządzania bilansów krótkoterminowych (dobowych, zmianowych) składanych z bilansów godzinowych, zależności  $Z_{ij}, Z_{ik}, U_{ij}, \bar{U}_{ik}$  stanowią charakterystyki energetyczne i energotechnologiczne urządzeń lub zespołów urządzeń. Zależności  $Z_{ik}$  i  $U_{ik}$  mogą być również zadane w postaci dobowych wykresów rzeczywistych [7, 10, 11].

Długookresowe bilanse (roczne, kwartalne lub miesięczne) sporządza się przy założeniu liniowości związków między zużyciem i ubocznym wytwarzaniem nośników energii a wielkością produkcji:

$$Z_{ij} = a_{ij}G_j + X_{ij}, \quad (2)$$

$$Z_{ik} = \bar{a}_{ik}\bar{G}_k + \bar{X}_{ik}, \quad (3)$$

$$U_{ij} = f_{ij}G_j + Q_{ij}, \quad (4)$$

$$U_{ik} = \bar{f}_{ik}\bar{G}_k + \bar{Q}_{ik}, \quad (5)$$

gdzie:

$a_{ij}, \bar{a}_{ik}$  – wskaźniki jednostkowego zużycia i-tego nośnika energii odpowiednio w j-tej gałęzi energetycznej i w k-tej gałęzi technologicznej,

$X_{ij}, \bar{X}_{ik}$  – zużycie i-tego nośnika niezależnie od wielkości produkcji,

$f_{ij}, \bar{f}_{ik}$  – wskaźniki ubocznego wytwarzania i-tego nośnika energii odpowiednio w j-tej gałęzi energetycznej i w k-tej gałęzi technologicznej,

$Q_{ij}, \bar{Q}_{ik}$  – produkcja uboczna i-tego nośnika energii niezależnie od wielkości produkcji.

Wskaźniki  $a_{ij}$ ,  $\bar{a}_{ik}$ , zużycia energii oraz wskaźniki  $f_{ij}$ ,  $\bar{f}_{ik}$ , ubocznego wytwarzania nośników energii są wartościami średnimi obowiązującymi dla rozpatrywanego okresu bilansowego (roku, kwartału, miesiąca).

Uwzględniając zależności liniowe (2) ÷ (5) w układzie równań (1) oraz wprowadzając do rozważań względną stratę  $\epsilon_1$  nośników energii obliczoną w stosunku do części przychodowej bilansu otrzymuje się następujący zapis macierzowy układu równań (1):

$$\mathbf{G} + \mathbf{FG} + \mathbf{D} = \mathbf{S}(\mathbf{AG} + \mathbf{K}) + \mathbf{T} \quad (6)$$

przy czym:

$$\mathbf{T} = (\overline{\mathbf{SA}} - \mathbf{F})\overline{\mathbf{G}} + (\mathbf{SX} - \mathbf{Q})\mathbf{E}_1 + (\mathbf{SX} - \overline{\mathbf{Q}})\mathbf{E}_2 + \mathbf{SY} - \mathbf{P}, \quad (7)$$

gdzie:

- $\mathbf{G}, \mathbf{P}$  – wektory kolumnowe szczytowej i podstawowej części produkcji nośników energii,
- $\mathbf{F}, \overline{\mathbf{F}}$  – macierze wskaźników ubocznego wytwarzania nośników energii w gałęziach energetycznych i technologicznych,
- $\mathbf{D}, \mathbf{K}$  – wektory kolumnowe dostaw zewnętrznych i sprzedaży nośników energii,
- $\mathbf{A}, \overline{\mathbf{A}}$  – macierze wskaźników jednostkowego zużycia nośników energii w gałęziach energetycznych i technologicznych,
- $\mathbf{X}, \overline{\mathbf{X}}$  – macierze zużycia nośników energii niezależnie od wielkości produkcji,
- $\mathbf{Q}, \overline{\mathbf{Q}}$  – macierze ubocznego wytwarzania nośników energii niezależnie od wielkości produkcji,
- $\overline{\mathbf{G}}, \mathbf{Y}$  – wektory kolumnowe produkcji globalnej gałęzi technologicznych i zużycia nośników energii na cele ogólnozakładowe,
- $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2$  – wektory kolumnowe o elementach jedynkowych,
- $\mathbf{S}$  – macierz diagonalna o elementach ujmujących straty względne nośników energii.

Równania macierzowe (6) i (7) stanowią model matematyczny liniowy długookresowego bilansu gospodarki energetycznej zakładu przemysłowego. Wszystkie wielkości wchodzące w skład prawej strony równania (7) należą do bazy danych. Do bazy danych należą także macierze wskaźników  $\mathbf{A}, \overline{\mathbf{F}}$  oraz zazwyczaj wektor  $\mathbf{K}$  sprzedaży nośników energii. Wielkościami poszukiwanymi są z reguły elementy wektorów produkcji głównej  $\mathbf{G}$  i dostaw zewnętrznych  $\mathbf{D}$ . Jeżeli w rozpatrywanej gałęzi energetycznej nie występuje podział na urządzenia podstawowe i szczytowe, wówczas  $\mathbf{G}_1$  oznacza produkcję całkowitą.

W przypadku poszukiwania wektora  $\mathbf{G}$  równanie (6) przyjmuje postać:

$$\mathbf{G} = (\mathbf{E} - \mathbf{SA} + \mathbf{F})^{-1}(\mathbf{T} + \mathbf{SK} - \mathbf{D}). \quad (8)$$

Elementy macierzy odwrotnej  $(\mathbf{E} - \mathbf{SA} + \mathbf{F})^{-1}$ , zwane współczynnikami pełnych nakładów, ujmują powiązania wewnętrzne bezpośrednio i pośrednio. Pozwalają one na ocenę kompleksowych (systemowych) zmian wywołanych zmianami wektora  $\Pi$  (zmiany wielkości produkcji gałęzi technologicznych lub wskaźników energotechnologicznych).

### 3. ZASTOSOWANIA LINIOWEGO MODELU MATEMATYCZNEGO BILANSU GOSPODARKI ENERGETYCZNEJ ZAKŁADU PRZEMYSŁOWEGO

#### 3.1. Analiza wielowariantowa planu bilansu energetycznego

Jest to najprostszy sposób zastosowania liniowego modelu matematycznego gospodarki energetycznej. Dla narzuconego wektora  $\mathbf{G}$  planu produkcyjnego podsystemu technologicznego z równania (8) wyznacza się wektor  $\mathbf{G}$  produkcji gałęzi energetycznych. W tym przypadku są narzucone te elementy wektora  $\mathbf{D}$ , które należą do tzw. dostaw uzupełniających. Również wektor  $\mathbf{K}$  sprzedaży nośników energii jest zadany. Można w ten sposób analizować za pomocą równania (8) różne warianty planu produkcyjnego podsystemu energetycznego, a w szczególności można badać, jak zmiana wybranej pozycji planu produkcji podsystemu technologicznego wpłynie na zapotrzebowanie nośników energii i czy nie spowoduje przekroczenia zdolności produkcyjnych urządzeń energetycznych.

#### 3.2. Analiza bilansów energii i egzergii

Układ równań bilansowych nośników energii może być zapisany przy użyciu jednostek naturalnych (np. bilans pary o ustalonych parametrach w Mg, bilans sprężonego powietrza w  $m^3$ ). Można również wszystkie wielkości fizyczne wyrazić konsekwentnie w jednostkach energii lub egzergii. Wielkość energii lub egzergii doprowadzonej uzyskuje się przez sumowanie odpowiednich kolumn w równaniach macierzowych (6) i (7) modelu. Efekt użyteczny działania danej gałęzi produkcyjnej stanowi energia lub egzergia odprowadzana w produkcji głównym (część szczytowa i podstawowa) oraz w produktach ubocznych. Na rys. 2 przedstawiono przykładowo bilans egzergii dla j-tej gałęzi energetycznej.

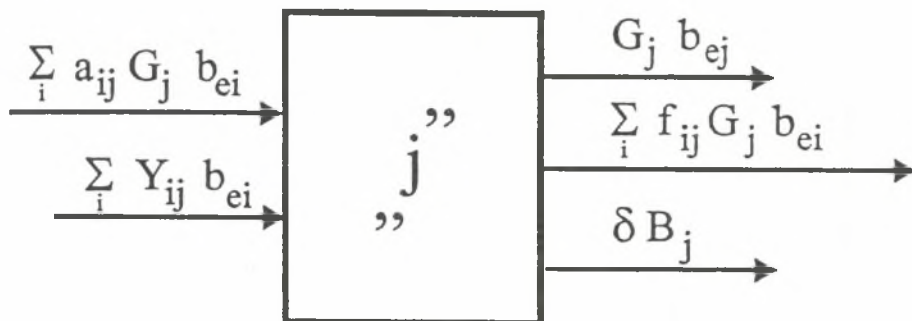
Po zastosowaniu zapisu macierzowego otrzymuje się następującą relację na wektor strat egzergii:

$$\delta\mathbf{B} = [(\mathbf{A}^T - \mathbf{F}^T - \mathbf{E})\mathbf{G}^D - \mathbf{P}^D + \mathbf{X}^T - \mathbf{Q}^T]\mathbf{b}_E \quad (9)$$

gdzie:

$\delta\mathbf{B}$  – wektor strat egzergii w podsystemie energetycznym,





Rys. 2. Bilans egzergii gałęzi energetycznej

Fig. 2. Exergy balance for energy branch

$\mathbf{b}_E$  – wektor egzergii właściwych nośników egzergii,  
 $\mathbf{G}^D, \mathbf{P}^D$  – macierze diagonalne utworzone z wektorów  $\mathbf{G}$  i  $\mathbf{D}$ .

Górny indeks T oznacza operację transpozycji macierzy.

W analogiczny sposób można zapisać relację na wektor strat energii.

### 3.3. Metoda macierzowa wyznaczania kosztów jednostkowych nośników energii oraz wskaźników skumulowanego zużycia energii

Złożoność gospodarki energetycznej zakładu przemysłowego, ze względu na występowanie sprzężeń zwrotnych powoduje, że tradycyjna metoda obliczeń kosztów jednostkowych nośników energii jest procedurą iteracyjną. Na przykład do wyznaczenia kosztu jednostkowego energii elektrycznej wytworzonej w elektrociepłowni niezbędna jest znajomość kosztów jednostkowych pary wysokoprężnej, wody przemysłowej, sprężonego powietrza, które zależą z kolei od poszukiwanego kosztu energii elektrycznej.

W oparciu o zasady budowy modelu matematycznego bilansu gospodarki energetycznej zakładu przemysłowego opracowano metodę macierzową obliczania kosztów jednostkowych nośników energii [8, 10, 11], która może efektywnie zastąpić tradycyjną metodę kolejnych przybliżeń. W algorytmie wyróżniono koszty jednostkowe produkcji podstawowej, szczytowej i ubocznej nośników energii. Na rys. 3 przedstawiono bilans kosztów dla przykładowej j-tej gałęzi energetycznej.

Układ równań bilansowych kosztów produkcji dla wszystkich rozpatrywanych nośników energii przyjmuje w zapisie macierzowym postać:

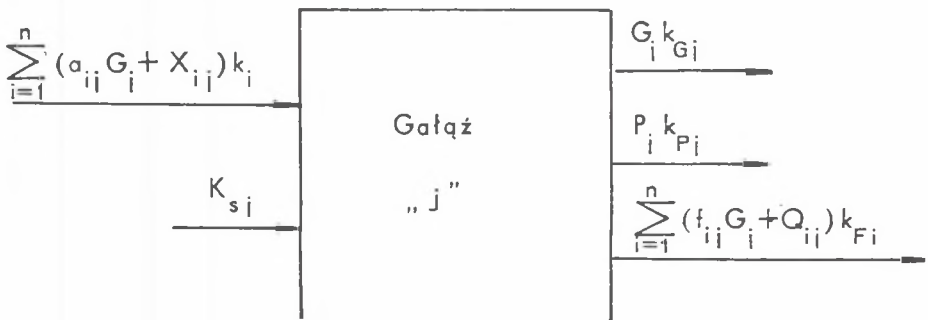
$$(\mathbf{A}\mathbf{G}^D + \mathbf{X})^T \mathbf{k} + \mathbf{K}_s = \mathbf{G}^D \mathbf{k}_G + \mathbf{P}^D \mathbf{k}_P + (\mathbf{F}\mathbf{G}^D + \mathbf{Q})^T \mathbf{k}_U \quad (10)$$

gdzie:

- $\mathbf{k}$  – wektor kolumnowy średnich kosztów jednostkowych nośników energii,
- $\mathbf{K}_s$  – wektor kolumnowy kosztów stałych,
- $\mathbf{k}_G$  – wektor kolumnowy kosztów jednostkowych części szczytowej produkcji nośników energii,
- $\mathbf{k}_P$  – wektor kolumnowy kosztów jednostkowych części podstawowej produkcji nośników energii,
- $\mathbf{k}_U$  – wektor kolumnowy kosztów jednostkowych produkcji ubocznej nośników energii.

Równanie (10) uzupełnia się zależnością na średnioważony koszt jednostkowy nośnika energii oraz zależnościami pomiędzy wektorami kosztów  $\mathbf{k}_P(\mathbf{k}_G)$  i  $\mathbf{k}_U(\mathbf{k}_G)$  [8]. Warunkiem koniecznym do zastosowania algorytmu metody macierzowej jest znajomość wyników obliczeń bilansu gospodarki energetycznej wykonanego za pomocą modelu matematycznego bilansu energetycznego.

Na podobnych zasadach bazuje metoda macierzowa wyznaczania wskaźników skumulowanego zużycia energii dla nośników energii i produktów technologicznych wytwarzanych w zakładzie przemysłowym [9]. Wskaźniki te są wyznaczane na osłonie kontrolnej zakładu. Uwzględniają więc zużycia pośrednie i straty nośników energii w sieci wewnętrznych powiązań energetycznych i energotechnologicznych zakładu przemysłowego. Warunkiem zastosowania algorytmu jest znajomość wskaźników skumulowanego zużycia energii dla paliw, surowców i półwyrobów dostarczanych do zakładu przemysłowego z zewnątrz.



Rys. 3. Bilans kosztów gałęzi energetycznej

Fig. 3. Balance of costs for energy branch

#### 4. ANALIZA SYSTEMOWA RACJONALIZACJI GOSPODARKI ENERGETYCZNEJ ZAKŁADU PRZEMYSŁOWEGO

##### 4.1. Algorytm analizy systemowej

Analiza systemowa wpływu racjonalizacji energotechnologicznej na kompleks gospodarki energetycznej zakładu przemysłowego jest oparta na modelu matematycznym gospodarki energetycznej zakładu przemysłowego. Realizacja przedsięwzięć racjonalizujących gospodarkę energetyczną powoduje zmiany elementów macierzy  $\mathbf{A}$ ,  $\bar{\mathbf{A}}$ ,  $\mathbf{F}$ ,  $\bar{\mathbf{F}}$ ,  $\mathbf{X}$ ,  $\bar{\mathbf{X}}$ ,  $\mathbf{Q}$ ,  $\bar{\mathbf{Q}}$ , charakteryzujących przepływy międzygałęziowe nośników energii w podsystemie energetycznym zakładu przemysłowego. Typowym przykładem przedsięwzięcia racjonalizującego gospodarkę energetyczną zakładu przemysłowego jest wykorzystanie energii odpadowej.

Wykorzystanie wewnętrznej energii odpadowej (rekuperacja) wpływa na zmiany elementów macierzy  $\mathbf{A}$ ,  $\bar{\mathbf{A}}$ ,  $\mathbf{X}$  i  $\bar{\mathbf{X}}$  wskaźników jednostkowego zużycia energii. Na przykład, podgrzanie gazu odpadowego w autonomicznym podgrzewaczu przed kotłem dwupaliwowym pyłowo-gazowym prowadzi do zmiany wskaźników jednostkowego zużycia w macierzy  $\mathbf{A}$ . Znacznie częściej przypadki wewnętrznej wykorzystania energii odpadowej występują w podsystemie technologicznym. Zwiększenie stopnia wykorzystania spalin odlotowych w rekuperatorach za piecami grzejnymi (zwiększenie zakresu rekuperacji) wpływa przede wszystkim na zmiany elementów macierzy  $\bar{\mathbf{A}}$ . Zmiany te dotyczą przede wszystkim paliwa, którego oszczędność stanowi zasadniczy efekt użyteczny rekuperacji. Jeżeli paliwo stanowi dostawę zewnętrzną, to ocena efektów rekuperacji w zakresie oszczędności paliwa jest równoznaczna z oceną wpływu rekuperacji na gospodarkę energetyczną zakładu. Jeżeli jednak w piecach jest spalane paliwo wytwarzane w zakładzie (np. gaz koksowniczy i gaz wielkopiecowy w hucie żelaza), wówczas oszczędność paliwa uzyskana w efekcie rekuperacji wpływa na gospodarkę gazoenergetyczną zakładu i w dalszej konsekwencji, na skutek istniejących wewnętrznych powiązań, na całą gospodarkę energetyczną zakładu.

Wytwarzanie wtórnych nośników energii (pary, gorącej wody, energii elektrycznej) w urządzeniach odzyskowych (kotły odzyskowe, instalacje chłodzenia wyparkowego, turbiny odzyskowe) wpływa przede wszystkim na zmiany elementów macierzy  $\mathbf{F}$  i  $\bar{\mathbf{F}}$  (rzadziej  $\mathbf{Q}$  i  $\bar{\mathbf{Q}}$ ) współczynników ubocznego wytwarzania nośników energii. Urządzenia odzyskowe są najczęściej instalowane w procesach technologicznych i stąd najczęściej zmiany te dotyczą macierzy  $\mathbf{F}$  i  $\bar{\mathbf{Q}}$ . Wykorzystanie zewnętrznej energii odpadowej i produkcja wtórnego nośnika energii wpływają także na dodatkowe zużycie energii (np. wody uzdatnionej dla kotłów odzyskowych i instalacji chłodzenia wyparkowe-

go, energii elektrycznej na potrzeby własne kotła odzyskowego). Zmianie ulegają więc również elementy macierzy  $\bar{\mathbf{A}}$  i  $\bar{\mathbf{X}}$ .

Racjonalizacja energetyczna procesów technologicznych wpływa również na zmiany elementów macierzy przepływów międzygałęziowych. Przykładem może być analiza procesowa wpływu podwyższenia parametrów termodynamicznych dmuchu (temperatury, ciśnienia, wzbogacenia dmuchu w tlen) i dodatku paliw zastępczych na wskaźniki energetyczne zespołu wielkopiecowego. Wyniki analizy procesowej można rozszerzyć badając za pomocą modelu matematycznego bilansu gospodarki energetycznej zakładu przemysłowego wpływ zmian bezpośrednich na kompleks gospodarki energetycznej całego zakładu.

Jeżeli racjonalizacja energetyczna ma miejsce w procesie technologicznym, wówczas zmianie ulegają elementy macierzy  $\bar{\mathbf{A}}$ ,  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{X}$ ,  $\bar{\mathbf{Q}}$  zużycia i ubocznego wytwarzania nośników energii. Wpływają one na zmianę wektora  $\mathbf{T}$ . Jeżeli przedsięwzięcie racjonalizujące dotyczyło gałęzi, wówczas zmiana wektora spowodowana zmianą procesową w gałęzi jest obliczana z równania:

$$\Delta \mathbf{T}_k = [(\bar{\mathbf{S}}\bar{\mathbf{A}} - \bar{\mathbf{F}})_k^* - (\bar{\mathbf{S}}\bar{\mathbf{A}} - \mathbf{F})_k^*] \bar{\mathbf{G}}_k \quad (11)$$

gdzie:

$\Delta \mathbf{T}_k$  – zmiana wektora na skutek racjonalizacji energetycznej w k-tej gałęzi technologicznej,

$(\bar{\mathbf{S}}\bar{\mathbf{A}} - \mathbf{F})_k^*$  – wektor kolumnowy wyjęty z macierzy  $(\bar{\mathbf{S}}\bar{\mathbf{A}} - \mathbf{F})$  i dotyczący k-tej gałęzi technologicznej, ujmujący wartości elementów macierzy po racjonalizacji energetycznej,

$(\bar{\mathbf{S}}\bar{\mathbf{A}} - \mathbf{F})_k^*$  – analogicznie jak poprzednio, ale ujmujący wartości elementów macierzy przed racjonalizacją energetyczną,

$\bar{\mathbf{G}}_k$  – produkcja k-tej gałęzi technologicznej.

Zmiana wektora  $\mathbf{T}$  o  $\Delta \mathbf{T}_k$  powoduje zmianę wektora  $\mathbf{G}$  o  $\Delta \mathbf{G}_k$ :

$$\Delta \mathbf{G}_k = (\mathbf{E} - \mathbf{S}\mathbf{A} + \mathbf{F})^{-1} \Delta \mathbf{T}_k \quad (12)$$

Wykorzystując równanie (8) otrzymuje się:

$$\Delta \mathbf{G}_k = (\mathbf{E} - \mathbf{S}\mathbf{A} + \mathbf{F})^{-1} [(\bar{\mathbf{S}}\bar{\mathbf{A}} - \bar{\mathbf{F}})_k^* - (\bar{\mathbf{S}}\bar{\mathbf{A}} - \mathbf{F})_k^*] \bar{\mathbf{G}}_k \quad (13)$$

Znajomość macierzy odwrotnej  $(\mathbf{E} - \mathbf{S}\mathbf{A} + \mathbf{F})^{-1}$  pozwala na wyznaczenie ze wzoru (13) pełnych zmian (bezpośrednich i pośrednich) w produkcji nośników energii. Zastosowanie w równaniu (13) macierzy odwrotnej  $(\mathbf{E} - \mathbf{S}\mathbf{A} + \mathbf{F})^{-1}$  eliminuje metodę kolejnych przybliżeń przy obliczaniu zmian kompleksowych (systemowych) w całej gospodarce energetycznej zakładu.

Po wyznaczeniu skorygowanego wektora produkcji głównej nośników energii wyznacza się na podstawie równania macierzowego (6) te elementy wektora **D**, które należą do dostaw wyłącznych (przede wszystkim paliwa).

#### 4.2. Przykład analizy systemowej intensyfikacji procesu wielkopiecowego

Rozpatrywane w przykładzie wielkie piece są zasilane dmuchem o temperaturze  $t_D \equiv 1100^\circ\text{C}$ , wzbogaconym w tlen do  $O_{2D} = 26\%$ . Do dysz wielkich pieców wdmuchuje się jako paliwo zastępcze gaz ziemny w ilości  $F = 3 \text{ GJ/t sur}$ . W celu intensyfikacji procesu planuje się podwyższenie udziału tlenu w dmuchu do 27,5 % i zwiększenie ilości wdmuchiwanego gazu ziemnego do 4 GJ/t sur.

Zmiana udziału tlenu w dmuchu i dodatku paliw zastępczych wpływa na zużycie koksu, dmuchu, tlenu technicznego, na ilość i energię chemiczną wytwarzanego gazu wielkopiecowego, na produkcję energii elektrycznej w turbinie odzyskowej, na zużycie gazu wielkopiecowego w nagrzewnicach oraz na ilość gazu wielkopiecowego oddawanego do podsystemu gazoenergetycznego huty. Wielkości te, odniesione do jednostkowej ilości surówki, noszą nazwę *wskaźników energetycznych zespołu wielkopiecowego* [5]. Są to zmiany bezpośrednie. Wywołują one w dalszej kolejności zmiany w produkcji pary, energii elektrycznej, dmuchu do tlenowni, wody zdemineralizowanej, wody przemysłowej, tlenu technicznego, powietrza sprężonego oraz w dostawach węgla kamiennego, gazów ziemnego i koksowniczego.

Przykładowo można rozważyć, jak zmiana w produkcji dmuchu wpłynie na zapotrzebowanie energii elektrycznej. Zmieni się bezpośrednio zużycie energii elektrycznej w stacji dmuchaw. W sposób pośredni zmiany zużycia pary wysokoprężnej i wody przemysłowej w stacji dmuchaw wywołują również zmianę w produkcji energii elektrycznej. Zmiana w produkcji pary wysokoprężnej wywołuje z kolei zmianę w zapotrzebowaniu wody zdemineralizowanej, powietrza sprężonego, energii elektrycznej i pary średnioprężnej w kotłowni. Te zmiany oddziałują także na zapotrzebowanie energii elektrycznej. Ulega wreszcie zmianie zużycie własne energii elektrycznej w maszynowni.

W tabelicy 1 zamieszczono wartości wskaźników energetycznych zespołu wielkopiecowego przed i po racjonalizacji polegającej na podwyższeniu udziału tlenu w dmuchu i zwiększeniu ilości wdmuchiwanego gazu ziemnego. Stanowią one wynik analizy procesowej. Wartości wskaźników  $K$ ,  $D$ ,  $E$  i  $E_N$  (objaśnienia w tabelicy 1) wyznaczono za pomocą metody bilansowej prognozowania wskaźników energetycznych zespołu wielkopiecowego [5].

**Tablica 1**

**Wskaźniki energetyczne zespołu wielkopieczowego przed i po racjonalizacji**

Wskaźnik energetyczny	Jednostka	Przed racjonalizacją	Po racjonalizacji
Jednostkowe zużycie koksu K	kg/t sur.	503,9	479,5
Jednostkowe zużycie dmuchu suchego D	kmol/t sur.	54,4	52,6
Jednostkowa produkcja energii chemicznej gazu wielkopieczowego E	GJ/t sur.	7,978	8,147
Jednostkowe zużycie energii chemicznej gazu w nagrzewnicach E <sub>N</sub>	GJ/t sur.	2,552	2,342

W tablicy 2 przedstawiono wyniki analizy systemowej wykonanej za pomocą modelu matematycznego bilansu gospodarki energetycznej zakładu przemysłowego. Pełny przykład bilansu gospodarki energetycznej przykładowej huty żelaza znajduje się w [7, 11]. Numeracja nośników energii w tablicy 2 jest zgodna z tym przykładem [7, 11]. Zmianie uległa produkcja dmuchu i gazu mieszkankowego 1 zużywanego do opalania nagrzewnic. Są to zmiany bezpośrednie.

W pozostałych gałęziach zmiany w produkcji są bardziej złożone ze względu na powiązania międzygałęziowe, z których część ma charakter sprzężeń zwrotnych. Zwiększenie produkcji tlenu z bloków jest następstwem zwiększonego udziału tlenu w dmuchu. Wpływa to z kolei na zwiększone zapotrzebowanie na dmuch do tlenowni. Zmianie ulega także produkcja uboczna azotu i argonu. Zmianę w produkcji pary wysokoprężnej wywołują przede wszystkim zmiany w zapotrzebowaniu pary do napędu dmuchaw i turbosprężarek. Wpływ zwiększonej produkcji energii elektrycznej na przyrost produkcji pary wysokoprężnej jest efektem oddziaływania w pętli sprzężenia zwrotnego. Zwiększenie produkcji pary wysokoprężnej powoduje przyrost produkcji wody zdemineralizowanej. To z kolei przyczynia się do wzrostu zużycia pary niskoprężnej w stacji demineralizacji wody. Jest to także przykład oddziaływania powiązania o charakterze sprzężenia zwrotnego. Zmiany w bilansach wody przemysłowej wynikają głównie ze zmian w produkcji turbodmuchaw i turbosprężarek.

Zmiany w dostawach paliw stanowią efekt wypadkowy bezpośrednich i pośrednich powiązań w gospodarce energetycznej rozpatrywanej huty. Zmniejszenie zużycia koksu jest bezpośrednią zmianą spowodowaną podwyższeniem udziału tlenu w dmuchu i zwiększeniem dodatku paliw zastępczych (gazu ziemnego wysokometanowego). Zmniejszenie dostaw gazu ziemnego zaazotowanego i gazu koksowniczego wynika ze zmniejszenia udziałów gazów bogatych w gazach mieszkankowych na skutek zwiększenia wartości opałowej gazu wielkopieczowego. Zwiększenie dostaw węgla energetycznego jest następ-

ptstwem zmiany w produkcji pary wysokoprężnej, która jest wypadkową zmian w złożonej sieci powiązań w elektrociepłowni huty.

**Tablica 2**

**Wyniki analizy systemowej zastosowania dodatku paliw zastępczych i wzbogacenia dmuchu w tlen w procesie wielkopiecowym**

i	Nośnik energii	Zmiany w produkcji głównej, ubocznej i dostawach nośników energii spowodowane zastosowaniem dodatku paliw zastępczych i wzbogacenia dmuchu w tlen w procesie wielkopiecowym			
		Jednostka	Prod. główna	Prod. uboczna	Dostawa
...	...	...	...	...	...
3	Dmuch wielkopiecowy	kmol/t sur.	-2,24	-	-
4	Gaz mieszkankowy 1	GJ/t sur.	-0,21	-	-
...	...	...	...	...	...
10	Tlen z bloków	kmol/t sur.	+1,42	-	-
11	Dmuch dla tlenowni	kmol/t sur.	+8,55	-	-
...	...	...	...	...	...
13	Para niskoprężna	kg/t sur.	+10,59	-	-
14	Para średnioprężna	kg/t sur.	+14,25	-	-
15	Para wysokoprężna	kg/t sur.	+61,91	-	-
16	Woda zdeminalizowana	kg/t sur.	+18,88	+10,29	-
17	Powietrze sprężone	kmol/t sur.	+0,012	-	-
18	Woda przemysłowa dodatkowa	t/t sur.	+4,29	-	-
19	Woda przemysłowa niesprężona	t/t sur.	+0,09	+4,20	-
20	Woda przemysłowa świeża	t/t sur.	+4,20	-	-
21	Energia elektryczna	kWh/t sur.	+1,20	-	-
22	Azot niskociśnieniowy	kmol/t sur.	-	+6,67	-
23	Argon oczyszczony	kmol/t sur.	-	+0,041	-
24	Gaz wielkopiecowy	GJ/t sur.	-	+0,189	-
...	...	...	...	...	...
26	Gaz koksowniczy	GJ/t sur.	-	-	-0,014
27	Gaz ziemny zaazotowany	GJ/t sur.	-	-	-0,043
28	Gaz ziemny wysokometanowy	GJ/t sur.	-	-	+1,0
29	Węgiel energetyczny	GJ/t sur.	-	-	+0,103
30	Koks wielkopiecowy	t/t sur.	-	-	-0,024

### 4.3. Analiza systemowa zastosowania chłodzenia wyparkowego w piecach grzejnych

Zamiana tradycyjnego chłodzenia wodnego bez odparowania na chłodzenie wyparkowe przynosi bezpośrednie korzyści energetyczne ze względu na zmniejszenie zużycia wody przemysłowej i produkcję użytecznego nośnika energii (pary nasyconej suchej). Pewne zwiększenie nakładów energetycznych na przygotowanie wody zmiękczonej jest z nadwyżką kompensowane przez efekty użyteczne chłodzenia wyparkowego. W tabelicy 3 zamieszczono wartości wskaźników jednostkowego zużycia i ubocznego wytwarzania nośników energii przed i po wprowadzeniu chłodzenia wyparkowego.

Tabela 3

**Wskaźniki jednostkowego zużycia i ubocznego wytwarzania nośników energii przed i po wprowadzeniu chłodzenia wyparkowego (na tonę wyrobów walcowanych)**

Wskaźniki jednostkowego zużycia i ubocznego wytwarzania nośników energii	Przed racjonalizacją	Po racjonalizacji
Wskaźnik zużycia wody chłodzącej ( $\Delta T_w = 10 \text{ K}$ ), t/t w.w.	5,658	0,258
Wskaźnik zużycia wody zmiękczonej, t/t w.w.	0	0,098
Wskaźnik produkcji ubocznej pary średnioprężnej, t/t w.w.	0	0,0833

Produkcja uboczna pary wodnej średnioprężnej w instalacji chłodzenia wyparkowego zastępuje produkcję główną pary średnioprężnej. Poprzez powiązania wzajemne w podsystemie energetycznym (w tym także powiązania o charakterze sprzężeń zwrotnych) produkcja uboczna pary wpływa na bilanse nośników energii biorących udział w procesie wytwórczym elektrociepłowni.

W tabelicy 4 zamieszczono wyniki analizy systemowej zastosowania chłodzenia wyparkowego pieców grzejnych walcowni przykładowej huty żelaza [7, 11]. Bezpośrednie efekty energetyczne to zmniejszenie zapotrzebowania na wodę przemysłową o 5,4 t/t w.w., zwiększenie produkcji (głównej i ubocznej) wody zmiękczonej o 98 kg/t w.w. i zwiększenie produkcji ubocznej pary średnioprężnej o 83,3 kg/t w.w.

Zwiększenie produkcji ubocznej pary średnioprężnej wpłynęło na zmniejszenie produkcji głównej pary średnioprężnej w stacji redukcyjno-schładzającej, przy czym zmniejszenie to przekracza o 18% przyrost produkcji ubocznej. Jest to wynik powiązań pośrednich, które wpływają na zmniejszenie zapotrzebowania na parę średnioprężną w stacji redukcyjno-schładzającej produkującej parę niskoprężną i w kotłowni.



Tablica 4

## Wyniki analizy systemowej zastosowania chłodzenia wyparkowego pieców grzejnych

i	Nośnik energii	Zmiany w produkcji głównej, ubocznej i dostawach nośników energii spowodowane zastosowaniem chłodzenia wyparkowego w odniesieniu do jednostki produkcji walcowni średniej			
		Jednostka	Produkcja główna	Produkcja uboczna	Dostawa
...	...	...	...	...	...
12	Woda zmiękczona	kg/t w.w.	+86,8	+13,2	-
13	Para niskoprężna	kg/t w.w.	-9,8	0	-
14	Para średnioprężna	kg/t w.w.	-98,9	+83,3	-
15	Para wysokoprężna	kg/t w.w.	-114,3	-	-
16	Woda zdemineralizowana	kg/t w.w.	-41,8	-22,7	-
17	Powietrze sprężone	kmol/t w.w.	-0,021	-	-
18	Woda przemysłowa dodatkowa	t/t w.w.	-7,1	-	-
19	Woda przemysłowa niesprężona	t/t w.w.	-5,5	-1,7	-
20	Woda przemysłowa świeża	t/t w.w.	-5,5	-	-
21	Energia elektryczna	kWh/t w.w.	-6,4	0	0
...	...	...	...	...	...
28	Gaz ziemny	MJ/t w.w.	-	-	-4,0
29	Węgiel kamienny	MJ/t w.w.	-	-	-380,0
...	...	...	...	...	...

Zmniejszenie produkcji pary wysokoprężnej jest w 75% wynikiem zmniejszonego zapotrzebowania w stacji redukcyjno-schładzającej. Na pozostałą część składa się przede wszystkim zmniejszone zapotrzebowanie przez turbogeneratory na skutek zmniejszenia produkcji energii elektrycznej spowodowanej głównie przez zmniejszone zapotrzebowanie na wodę przemysłową dodatkową.

Zwiększenie produkcji wody zmiękczonej wpłynęło wprawdzie na przyrost zapotrzebowania na parę niskoprężną, ale równocześnie w większym jeszcze stopniu zmniejszyło się zapotrzebowanie na parę niskoprężną w stacji demineralizacji wody (na skutek zmniejszonej produkcji pary wysokoprężnej). W rezultacie powiązań bezpośrednich i pośrednich produkcja główna pary niskoprężnej uległa zmniejszeniu o 9,8 kg/t w.w.

Zmniejszenie produkcji głównej energii elektrycznej jest zarówno rezultatem bezpośrednich, jak również pośrednich powiązań, często o charakterze sprzężeń zwrotnych (np. zużycie pary wysokoprężnej w członach kondensacyj-

nych turbozespołów, zużycie pary średnioprężnej na potrzeby własne kotłowni, zużycie wody przemysłowej i energii elektrycznej na potrzeby turbogeneratorów).

Zainstalowanie chłodzenia wyparkowego w walcowni średniej, na skutek zmian bezpośrednich i pośrednich w zużyciu nośników energii, dało jako rezultat wynikowy zmniejszenie dostawy energii chemicznej węgla kamiennego do kotłowni o 380 MJ/t w.w. Założono przy tym, że zużycie gazu wielkopiecowego w kotłowni pozostaje na stałym poziomie.

## 5. METODA SYSTEMOWA OCENY ZASOBÓW ENERGII ODPADOWEJ

W wyniku analizy systemowej wykorzystania energii odpadowej uzyskuje się informację o zmianach w dostawach nośników energii do podsystemu energetycznego. Informację tę można wykorzystać do wyznaczenia dokładnej wartości zasobów energii odpadowej. Rezultatem końcowym bowiem procesów wykorzystania energii odpadowej jest zmniejszenie dostaw nośników energii z zewnątrz (głównie paliw). Różnice w dostawach paliw do podsystemu energetycznego przed wykorzystaniem i po wykorzystaniu energii odpadowej stanowią zasoby bezpośrednie energii. Jeżeli zmianie ulegają także dostawy innych nośników energii (np. energii elektrycznej), należy uwzględnić bezpośrednią sprawność energetyczną wytwarzania rozpatrywanego nośnika energii za pomocą paliw podstawowych:

$$E_z = \sum_l (-\Delta D_l) + \sum_k \left( \frac{-\Delta D_k}{\eta_{Ek}} \right), \quad (14)$$

gdzie:

- $E_z$  – zasoby bezpośrednie energii odpadowej,
- $-\Delta D_l$  – zmniejszenie dostaw energii chemicznej l-tego paliwa pierwotnego,
- $-\Delta D_k$  – zmniejszenie dostaw k-tego przetworzonego nośnika energii,
- $\eta_{Ek}$  – bezpośrednia sprawność energetyczna wytwarzania k-tego nośnika energii za pomocą paliw pierwotnych.

Przy ocenie zasobów skumulowanych obowiązuje relacja:

$$E_z^* = \sum_i \left( \frac{-\Delta D_i}{\eta_{dpi}^*} \right), \quad (15)$$

gdzie:

- $E_z^*$  – zasoby skumulowane energii odpadowej,
- $(-\Delta D_i)$  – zmniejszenie dostawy i-tego paliwa pierwotnego,

$\eta_E^*$  – skumulowana sprawność energetyczna pozyskania i dostawy i-tego paliwa pierwotnego.

W tablicy 5 przedstawiono porównanie wyników obliczeń zasobów energii odpadowej według metody systemowej i metody przybliżonej [6]. Zastosowanie chłodzenia wyparkowego w walcowni średniej wpłynęło na zmniejszenie dostaw węgla kamiennego i gazu ziemnego (tabl. 4). Oszczędność w zużyciu tych paliw stanowi zasoby bezpośrednie energii odpadowej (tabl. 5). Obliczenia zostały wykonane przy założeniu dostaw gazu wielkopieczowego z podsystemu technologicznego i dostaw energii elektrycznej z krajowego systemu elektroenergetycznego na stałym poziomie. Zasoby skumulowane według metody systemowej wyznaczono na podstawie wzoru (15) przyjmując skumulowane sprawności energetyczne wytwarzania i dostawy węgla kamiennego oraz gazu ziemnego według [6].

**Tablica 5**  
**Porównanie wyników obliczeń zasobów energii odpadowej według metody systemowej i metody przybliżonej, GJ/a**

Rodzaj energii odpadowej i sposób jej wykorzystania	Metoda systemowa			Metoda przybliżona
	Rodzaj zaoszczędzonej energii chem. paliw	Zasoby bezpośrednie	Zasoby skumulowane	Zasoby skumulowane
Ciepło chłodzenia elementów konstrukcyjnych pieców grzejnych	węgiel kam.	337 860	355 268	151 779
	gaz ziemny	3 594	3 601	
	łącznie:	341 454	358 869	

Wyznaczono także dla przypadku chłodzenia wyparkowego zasoby skumulowane za pomocą metody przybliżonej [6]. Roczna ilość ciepła przekazywana do czynnika chłodzącego wynosi 173 210 GJ/rok. Sprawność cząstkową  $\eta_{E_c}$  wytwarzania ciepła grzejnego w układzie skojarzonym (para średnio- i niskoprężna z upustów turbosopłów) wyznaczono przyjmując następujące dane: sprawność energetyczna elektrociepłowni  $\eta_{E_{ec}} = 0,8$ ; średni stosunek ilości wyprodukowanej energii elektrycznej i ciepła  $E_{ej}/Q_g = 0,23$ ; bezpośrednia sprawność energetyczna produkcji energii elektrycznej w elektrowni kondensacyjnej zastąpionej przez elektrociepłownię  $\eta_{E_k} = 0,33$ ;  $\eta_{tp} \equiv \eta_{tp}$ . W rezultacie otrzymano  $\eta_{E_c} \equiv 1,2$ . Wartość skumulowanej sprawności energetycznej pozyskania i dostawy węgla kamiennego zaczerpnięto z [6].

Jak wynika z porównania przedstawionego w tablicy 5, metoda przybliżona daje w rozważanym przypadku rezultaty zaniżone o blisko 50%. W przypadku zainstalowania chłodzenia wyparkowego w metodzie przybliżonej nie uwzględnia się na przykład zmniejszenia zużycia nośników energii spowodowanego

wanego radykalnym obniżeniem zapotrzebowania na wodę przemysłową. Tylko zmniejszenie z tego powodu zapotrzebowania na energię elektryczną powoduje zaniżenie rezultatów obliczeń o ponad 25% w stosunku do wyniku uzyskanego metodą systemową. W obliczeniach symulacyjnych według metody systemowej założono, że zmianie ulega jedynie produkcja energii elektrycznej w członach kondensacyjnych turbin przy zachowaniu dostaw energii elektrycznej z krajowego systemu elektroenergetycznego na stałym poziomie. W praktyce przemysłowej oszczędność zużycia energii elektrycznej może powodować zarówno ograniczenie własnej produkcji energii elektrycznej, jak i dostaw zewnętrznych. Powinno się rozważyć obydwa warianty i przyjąć wariant korzystniejszy, zapewniający większą oszczędność energii paliw podstawowych. Zamieszczony w tablicy 5 wynik obliczeń zasobów skumulowanych uzyskany metodą systemową należy uznać za najkorzystniejszy. Wynik oceny zasobów uzyskany metodą przybliżoną może być znacznie zaniżony.

## 6. PODSUMOWANIE

Złożoność powiązań energetycznych i energotechnologicznych w zakładzie przemysłowym powoduje konieczność zastosowania metod analizy systemowej w zagadnieniach energetyki przemysłowej. W celu sporządzenia bilansu gospodarki energetycznej wykorzystuje się model matematyczny: liniowy w przypadku długich okresów bilansowych i nieliniowy dla okresów krótkich (dobowych). Umożliwia on analizę wielowariantową bilansów energetycznych przy zmiennym planie podsystemu technologicznego.

Model matematyczny bilansu gospodarki energetycznej jest także wykorzystywany do analizy bilansów energii i egzergii oraz do obliczania kosztów jednostkowych nośników energii i wskaźników skumulowanego zużycia energii. Również analiza systemowa racjonalizacji gospodarki energetycznej zakładu przemysłowego i metoda systemowa oceny zasobów energii odpadowej są oparte na wynikach obliczeń wielkości wyjściowych z algorytmu modelu matematycznego gospodarki energetycznej zakładu przemysłowego.

## LITERATURA

- [1] Klir G.J. (red.): Ogólna teoria systemów. WNT, Warszawa 1976.
- [2] Leontief W.W.: The Structure of American Economy 1919-1939. New York 1951.
- [3] Mielentiew L.A.: Optimizacija razwitija i uprawlenija bolszich sistem energietiki. Wyssza Szkoła, Moskwa 1982.

- [4] Szargut J., Ziębik A.: Model matematyczny liniowy bilansu materiałowo-energetycznego huty żelaza. *Archiwum Energetyki* nr 2, 1972.
- [5] Szargut J., Ziębik A.: Wpływ parametrów dmuchu i czynników paliwo-redukcyjnych na wskaźniki energetyczne zespołu wielkopieczowego. Ossolineum, Wrocław 1983.
- [6] Szargut J.: *Energetyka cieplna w hutnictwie*. Wyd. II. Wyd. Śląsk, Katowice 1985.
- [7] Ziębik A.: *Mathematical Modelling of Energy Management Systems in Industrial Plants*. Ossolineum, Wrocław 1990.
- [8] Ziębik A., Gwóźdź J.: Metoda macierzowa wyznaczania kosztów jednostkowych w gospodarce energetycznej zakładu przemysłowego. *Archiwum Energetyki* nr 1-2, 1983.
- [9] Ziębik A., Majza E., Parylak J.: Zastosowanie modelu matematycznego bilansu materiałowo-energetycznego zakładu przemysłowego do obliczania wskaźników skumulowanego zużycia energii. *Materiały XIV Zjazdu Termodynamików*, Kraków 1990.
- [10] Ziębik A.: *Systemy energetyczne*. Skrypt Politechniki Śl., Wyd. II, Gliwice 1991.
- [11] Ziębik A.: *Przykłady obliczeniowe z systemów energetycznych*. Skrypt Politechniki Śl., Gliwice 1990.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Tadeusz CHMIELNIAK

Wpłynęło do Redakcji: 10. 01. 1995 r.

## Abstract

The system analysis of industrial energy management is based on a mathematical model of the energy balance of an industrial plant. The mathematical model consist of a set of balance equations of energy carries: nonlinear in the case of the short-term balance plan and linear in the case of a long-term balance plan.

Many variants of the energy balance plan may be calculated by means of a microcomputer using the algorithm of the mathematical model of energy balance. In particular, the influence of changes of the selected element in the production of the technological subsystem on the energy balance can be considered.

All the values in this model can be expressed by energy or exergy units. In this case the losses of energy or exergy are calculated by means of the linear mathematical model of energy balance.

Basing on the principles of linear mathematical model of the energy balance the matrix methods of calculating the unit costs and cumulative energy indices in the energy management of an industrial plant have been elaborated.

Due to changes of the thermal parameters of energy and technological processes the value of elements (energy characteristics) of input–output matrices of the mathematical model must be modified. Changes of these elements may be predicted by means of thermodynamic analysis. For example, the influence of the blast parameters and injection of auxiliary fuels of the energy characteristics can be predicted by the theoretical–empirical balance method. Including new values of the energy characteristics into input–output matrix, the influence of the considered blast–furnace parameters on the complex of the energy management of ironworks can be examined.

Exterior utilization of waste energy has a very complicated influence upon the energy management of an industrial plant. In order to assess the changes in the whole energy management of an industrial plant due to the utilization of waste energy, a mathematical linear model of industrial energy management has been taken into account.