ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1989

Seria: ENERGETYKA z. 107 Nr kol. 1041

Andrzej ZIĘBIK
Krzysztof PRESZ

Instytut Techniki Cieplnej
Politechnika Śląska

METODYKA KOMPUTEROWEGO WSPOMAGANIA PROJEKTOWANIA GOSPODARKI ENERGETYCZNEJ ZAKŁADU PRZEMYSŁOWEGO[x)]

Streszczenie. W artykule omówiono metodę systemową doboru optymalnej struktury gospodarki energetycznej zakładu przemysłowego w fazie projektu wstępnego. Przedstawiono algorytmy tworzenia wariantów układu gospodarki energetycznej i macierzy binarnych powiązań międzygałęziowych. Omówiono model matematyczny bilansu energetycznego na potrzeby projektu wstępnego gospodarki energetycznej.

1. PODEJŚCIE SYSTEMOWE W FAZIE PROJEKTU WSTĘPNEGO GOSPODARKI ENERGETYCZNEJ

Nowoczesny proces projektowania gospodarki energetycznej zakładu przemysłowego powinien być oparty na przeglądzie, w fazie projektu wstępnego, wszystkich możliwych do realizacji wariantów układu energetycznego. Zadanie to nie jest możliwe do zrealizowania przy zastosowaniu tradycyjnej metody projektowania. Tradycyjna metoda heurystyczna ogranicza się do analizy kilku wybranych wariantów i może dać poprawne wyniki, jeżeli projektuje się powtarzalne układy gospodarki energetycznej. Przy projektowaniu nowych technologicznie układów (np. gospodarki energetycznej z wykorzystaniem ciepła z reaktorów jądrowych wysokotemperaturowych) doświadczenie projektantów jest niewystarczające. Błędy zaś popełnione przy doborze wariantów w fazie projektu wstępnego są główną przyczyną zawyżonych nakładów inwestycyjnych i późniejszych kosztów eksploatacji. Wymiar zadania doboru optymalnej struktury gospodarki energetycznej zwiększa się wielokrotnie, jeżeli uwzględni się niepewność danych wejściowych [1]. Wynika stąd potrzeba sformalizowanej metody doboru optymalnej struktury gospodarki energetycznej w fazie projektu wstępnego. Tę metodę winno cechować podejście systemowe umożliwiające zastosowanie wspomagania komputerowego.

x) Praca wykonana w ramach CPBP nr 02.18, kierunek 2, zad. 2.3.2.2.

Gospodarka energetyczna (podsystem energetyczny) zakładu przemysłowego należy do systemów sztucznych, stale rozwijających się, w których ludzie są organicznie związani ze sterującą lub sterowaną częścią systemu. Podsystem energetyczny zakładu przemysłowego cechuje zarówno duża wymiarowość jak również zwartość wynikająca z istnienia powiązań sieciowych i rurociągowych. Charakterystyczną cechą podsystemu energetycznego jako systemu zorganizowanego jest struktura hierarchiczna. Cecha hierarchiczności jest wykorzystywana w procesie projektowania gospodarki energetycznej dla dekompozycji globalnego zadania optymalizacyjnego doboru struktury gospodarki energetycznej.

Dobór struktury podsystemu energetycznego w fazie projektu wstępnego polega na utworzeniu optymalnego zestawienia maszyn i urządzeń energetycznych oraz na określeniu powiązań pomiędzy nimi wynikających z przepływu nośników energii. W pierwszej kolejności dokonuje się wyboru metod produkcji nośników energii. Jest to związane z tworzeniem scenariusza gospodarki energetycznej. Wynikiem opracowanego scenariusza jest uniwersalna lista nośników energii utworzona na podstawie zapotrzebowania podsystemu technologicznego na nośniki energii z uwzględnieniem tych nośników energii, których wytwórczość wynika z powiązań międzygałęziowych w podsystemie energetycznym.

Procedura obliczeniowa ujmuje następujące zadania cząstkowe:

a) tworzenie wariantów podsystemu energetycznego,
b) dobór struktury macierzy powiązań międzygałęziowych,
c) analiza strukturalna macierzy powiązań międzygałęziowych,
d) sporządzenie wykresów uporządkowanych sumarycznego zapotrzebowania na każdy z nośników energii,
e) wyznaczenie wartości elementów macierzy powiązań międzygałęziowych,
f) dobór mocy nominalnych urządzeń wytwórczości podstawowej, szczytowej i dostaw zewnętrznych.

Trzy ostatnie zadania są ściśle ze sobą powiązane. Ich rozwiązanie wymaga dekompozycji globalnego zadania optymalizacyjnego i zastosowania procedury iteracyjnej.

Faza projektu wstępnego gospodarki energetycznej zakładu przemysłowego jest związana z analizą wielu wariantów układu gospodarki energetycznej. Powoduje to konieczność wielokrotnego sporządzania bilansu energetycznego projektowanego zakładu przemysłowego, szczególnie przy uwzględnieniu warunków niepewności danych wejściowych. Dlatego celowe jest zastosowanie w procesie projektowania modelu matematycznego bilansu energetycznego [3, 6] przystosowanego do wykorzystania w praktyce projektowej wspomagania komputerowego.

2. ZASTOSOWANIE MODELU MATEMATYCZNEGO BILANSU GOSPODARKI ENERGETYCZNEJ ZAKŁADU PRZEMYSŁOWEGO W FAZIE PROJEKTU WSTĘPNEGO

Model matematyczny bilansu gospodarki energetycznej stanowi układ równań liniowych wynikających z bilansów nośników energii [3, 6]. Nośniki energii mogą być produktami głównymi lub ubocznymi (np. ciepło grzejne i energia elektryczna w elektrociepłowni). W niektórych przypadkach nośniki energetyczne są wytwarzane w urządzeniach podstawowych i szczytowych. Rozróżnia się wówczas część podstawową i część szczytową produkcji (np. para upustowa i para ze stacji redukcyjno-schładzającej). Nośnik energii, wytwarzany jako produkt uboczny jednej gałęzi, może uzupełniać produkcję główną innej gałęzi. Przykładem może być para z instalacji chłodzenia wyparkowego lub z kotłów odzyskowych. W innym przypadku nośnik energii, wytwarzany jako produkt uboczny, może stanowić indywidualne paliwo (np. gaz wielkopiecowy i gaz koksowniczy w hucie żelaza). W niektórych przypadkach własna produkcja nośnika energii jest uzupełniana dostawami z zewnątrz (np. energia elektryczna). Pewne nośniki energii sprowadza się wyłącznie z zewnątrz. Należą do nich przede wszystkim paliwa. Część produkcji nośników energii jest niekiedy sprzedawana zewnętrznym odbiorcom (np. ciepło grzejne, ciepła woda użytkowa).

Równanie bilansu dla i-tego nośnika energii ma postać:

$$G_i + P_i + \sum_{j=1}^{n} (f_{ij}^{G} G_j + f_{ij}^{P} P_j + Q_{ij}) + \sum_{k=1}^{p} (\bar{f}_{ik} \bar{G}_k + \bar{Q}_{ik}) + D_i =$$

$$= \sum_{j=1}^{n} (a_{ij}^{G} G_j + a_{ij}^{P} P_j + X_{ij}) + \sum_{k=1}^{p} (\bar{a}_{ik} \bar{G}_k + \bar{X}_{ik}) + Y_i + V_i + K_i \qquad (1)$$

gdzie:

G_i, P_i, $\bar{G}_k$ – produkcja szczytowa i podstawowa i-tej gałęzi energetycznej oraz produkcja całkowita k-tej gałęzi technologicznej,

f_{ij}^{G}, f_{ij}^{P}, $\bar{f}_{ik}$ – wskaźniki ubocznej produkcji i-tego nośnika energii przy wytwarzaniu części szczytowej i podstawowej j-tego nośnika energii przy produkcji k-tej gałęzi technologicznej,

Q_{ij}, $\bar{Q}_{ik}$ – uboczne wytwarzanie i-tego nośnika energii niezależne od wielkości produkcji odpowiednio j-tej gałęzi energetycznej i k-tej gałęzi technologicznej,

a^G_{ij}, a^P_{ij}, $\bar{a}_{ik}$ – wskaźniki zużycia i-tego nośnika energii na wytwarzanie odpowiednio części szczytowej i części podstawowej produkcji i-tego nośnika energii oraz k-tego produktu technologicznego,

X_{ij}, $\bar{X}_{ik}$ – zużycie i-tego nośnika energii niezależne od wielkości produkcji odpowiednio j-tej gałęzi energetycznej oraz k-tej gałęzi technologicznej,

D_i, K_i – dostawa uzupełniająca oraz produkcja końcowa (sprzedaż) i-tego nośnika energii,

Y_i, V_i – zużycie ogólnozakładowe oraz straty i-tego nośnika energii,

n, p – liczba gałęzi energetycznych i technologicznych,

$i, j = 1, 2, \ldots, n$,

$k = 1, 2, \ldots, p$.

Wprowadzając do równania (1) straty względne δ_i (stosunek wielkości V_i do lewej strony równania (1)) oraz stosując zapis macierzowy dla układu równań bilansowych, otrzymuje się:

$$\mathbf{G} + \mathbf{P} + \mathbf{F}_G\mathbf{G} + \mathbf{F}_P\mathbf{P} + \bar{\mathbf{F}}\,\bar{\mathbf{G}} + \mathbf{Q}\,\mathbf{E}_1 + \bar{\mathbf{Q}}\,\mathbf{E}_2 + \mathbf{D} =$$

$$= \mathbf{S}\,(\mathbf{A}_G\mathbf{G} + \mathbf{A}_P\mathbf{P} + \bar{\mathbf{A}}\,\bar{\mathbf{G}} + \mathbf{X}\,\mathbf{E}_1 + \bar{\mathbf{X}}\,\mathbf{E}_2 + \mathbf{Y} + \mathbf{K}) \qquad (2)$$

gdzie:

$\mathbf{G}$, $\mathbf{P}$, $\bar{\mathbf{G}}$ – wektory kolumnowe produkcji szczytowej i podstawowej gałęzi energetycznych oraz produkcji całkowitej gałęzi technologicznych,

$\mathbf{F}_G$, $\mathbf{F}_P$, $\bar{\mathbf{F}}$ – macierze powiązań międzygałęziowych ujmujące wskaźniki ubocznego wytwarzania nośników energii w gałęziach energetycznych i w gałęziach technologicznych,

$\mathbf{Q}$, $\bar{\mathbf{Q}}$ – macierze wytwórczości ubocznej nośników energii niezależnej od wielkości produkcji odpowiednio w gałęziach energetycznych i technologicznych,

$\mathbf{A}_G$, $\mathbf{A}_P$, $\bar{\mathbf{A}}$ – macierze powiązań międzygałęziowych ujmujące wskaźniki jednostkowego zużycia nośników energii w gałęziach energetycznych i technologicznych,

$\mathbf{X}$, $\bar{\mathbf{X}}$ – macierze zużyć niezależnych od wielkości produkcji gałęzi energetycznych i technologicznych,

$\mathbf{D}$, $\mathbf{K}$, $\mathbf{Y}$ – wektory dostaw zewnętrznych, wielkości sprzedaży nośników energii oraz zużyć ogólnozakładowych,

$\mathbf{S} = \left[\frac{1}{1-\varepsilon_i}\right]$ - macierz diagonalna uwzględniająca straty nośników energii,

$\mathbf{E}_1$, $\mathbf{E}_2$ - wektory kolumnowe o elementach jedynkowych.

W procesie projektowania do wielkości zadanych na podstawie założeń projektowych należą:

- wektor $(\bar{\mathbf{A}}\,\bar{\mathbf{G}} + \bar{\mathbf{X}}\,\mathbf{E}_2)$ zapotrzebowanie nośników energii przez podsystem technologiczny,
- wektor $(\mathbf{F}\,\bar{\mathbf{G}} + \bar{\mathbf{Q}}\,\mathbf{E}_2)$ ubocznego wytwarzania nośników energii w gałęziach technologicznych,
- wektory $\mathbf{Y}$, $\mathbf{K}$ oraz macierz $\mathbf{S}$.

W fazie projektu wstępnego są tworzone macierze $\mathbf{A}_G$, $\mathbf{A}_P$, $\mathbf{F}_G$, $\mathbf{F}_P$, $\mathbf{X}$ oraz $\mathbf{Q}$. Wektory $\mathbf{G}$, $\mathbf{P}$ i $\mathbf{D}$ wyznacza się na drodze optymalizacji. Pierwszy etap w procedurze tworzenia macierzy $\mathbf{A}_G$, $\mathbf{A}_P$, $\mathbf{F}_G$ i $\mathbf{F}_P$ stanowi dobór ich struktury [4].

3. ALGORYTMY TWORZENIA WARIANTÓW I DOBORU STRUKTURY MACIERZY POWIĄZAŃ MIĘDZYGAŁĘZIOWYCH

Każdemu nośnikowi energii należącemu do produktów głównych odpowiada temat projektowy. Z tematem projektowym związany jest podzbiór rozwiązań projektowych ujmujący wszystkie technicznie możliwe i ekonomicznie uzasadnione sposoby wytwarzania danego nośnika energii. Każde p-te rozwiązanie projektowe jest opisane za pomocą macierzy binarnych $\mathbf{A}_p^b = \left[a_{p\,ij}^b\right]$ i $\mathbf{F}_p^b = \left[f_{p\,ij}^b\right]$ zdefiniowanych następująco:

$$a_{p\,ij}^b \text{ lub } f_{p\,ij}^b = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli i-ty nośnik energii jest zużywany lub ubocznie wytwarzany w p-tym rozwiązaniu projektowym przy produkcji j-tego nośnika energii,} \\ 0, & \text{w przeciwnym razie.} \end{cases}$$

gdzie:

$p = 1,2,\ldots,m$ - numer rozwiązania projektowego,
$i = 1,2,\ldots,n$ - numer nośnika energii,
$j = 1,2,\ldots,n_1$ - numer nośnika energii wytwarzanego jako produkt główny.

Jeżeli w p-tym rozwiązaniu projektowym występują urządzenia podstawowe i szczytowe, wówczas macierze binarne $\mathbf{A}_p^b$ i $\mathbf{F}_p^b$ wyznacza się z relacji:

$$\mathbf{A}_p^b = \mathbf{A}_{pP}^b + \mathbf{A}_{pG}^b \tag{3}$$

$$\mathbf{F}_p^b = \mathbf{F}_{pP}^b + \mathbf{F}_{pG}^b \tag{4}$$

gdzie indeksy "P" oraz "G" oznaczają odpowiednio urządzenie podstawowe i szczytowe. W równaniach (3) i (4) obowiązuje sumowanie według zasad algebry Boole'a.

Z rozwiązań projektowych tworzy się zbiór wszystkich możliwych wariantów struktury gospodarki energetycznej wybierając po jednym rozwiązaniu z każdego tematu projektowego. Liczba N wszystkich możliwych wariantów wynika ze wzoru:

$$N = \prod_{t=1}^{s} m_t , \tag{5}$$

$$\sum_{t=1}^{s} m_t = m , \tag{6}$$

gdzie:

t - kolejny numer tematu projektowego,
m_t - liczba rozwiązań projektowych w t-tym temacie projektowym,
s - liczba tematów projektowych.

Dla każdego wariantu struktury gospodarki energetycznej tworzy się m-wektor kolumnowy $\mathbf{W}_l = \left[w_{pl}\right]$ zdefiniowany następująco:

$$w_{pl} = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli p-te rozwiązanie projektowe należy do l-tego wariantu struktury gospodarki energetycznej,} \\ 0, & \text{w przeciwnym razie,} \end{cases}$$

gdzie $l = 1,2,\ldots,N$ oznacza kolejny numer wariantu struktury gospodarki energetycznej.

Macierze binarne $\mathbf{A}_P^b$, $\mathbf{A}_G^b$, $\mathbf{F}_P^b$, $\mathbf{F}_G^b$ opisujące strukturę macierzy $\mathbf{A}_P$, $\mathbf{A}_G$, $\mathbf{F}_P$, $\mathbf{F}_G$ wyznacza się na podstawie relacji:

$$\mathbf{A}_P^b = \left[\mathbf{A}_{1P}^b, \ldots, \mathbf{A}_{pP}^b, \ldots, \mathbf{A}_{mP}^b\right] \left[\mathbf{W}_l\right] , \tag{7}$$

$$\mathbf{A}_G^b = \left[\mathbf{A}_{1G}^b, \ldots, \mathbf{A}_{pG}^b, \ldots, \mathbf{A}_{mG}^b\right] \left[\mathbf{W}_l\right] , \tag{8}$$

$$\mathbf{F}_P^b = \left[\mathbf{F}_{1P}^b, \ldots, \mathbf{F}_{pP}^b, \ldots, \mathbf{F}_{mP}^b\right] \left[\mathbf{W}_l\right] , \tag{9}$$

$$\mathbf{F}_G^b = \left[\mathbf{F}_{1G}^b, \ldots, \mathbf{F}_{pG}^b, \ldots, \mathbf{F}_{mG}^b\right] \left[\mathbf{W}_l\right] , \tag{10}$$

przy czym sumowanie odbywa się według zasad algebry Boole'a.

4. ANALIZA STRUKTURALNA MACIERZY POWIĄZAŃ MIĘDZYGAŁĘZIOWYCH

Celem analizy strukturalnej jest przekształcenie macierzy powiązań międzygałęziowych do postaci jak najlepiej przystosowanej do dalszych obliczeń iteracyjnych. W procesie projektowania układ równań bilansowych nośników energii rozwiązuje się oddzielnie dla każdej gałęzi według kolejności ustalonej w wyniku analizy strukturalnej. Należy więc dążyć do przekształcenia macierzy powiązań międzygałęziowych do postaci jak najbardziej zbliżonej do trójkątnej górnej. Obliczenia rozpoczyna się wówczas od ostatniej gałęzi. Analizę strukturalną przeprowadza się za pomocą macierzy binarnej $(\mathbf{A}^b + \mathbf{F}^b)$ powiązań międzygałęziowych, którą wyznacza się z relacji:

$$\mathbf{A}^b + \mathbf{F}^b = \mathbf{A}^b_G + \mathbf{A}^b_P + \mathbf{F}^b_G + \mathbf{F}^b_P , \tag{11}$$

przy czym sumowanie odbywa się zgodnie z zasadami algebry Boole'a.

W pierwszym etapie analizy strukturalnej przeprowadza się sortowanie gałęzi energetycznych wydzielając wśród nich trzy grupy gałęzi. Nośniki energii zużywane wyłącznie na potrzeby podsystemu technologicznego lub na pokrycie zapotrzebowania ogólnozakładowego niezależnego od wielkości produkcji (np. ciepło grzejne lub ciepła woda użytkowa) tworzą grupę gałęzi typu "wyjście". W macierzy powiązań międzygałęziowych gałęziom należącym do tego bloku odpowiadają zerowe wiersze. Dostawy wyłączne nośników energii (głównie paliwa) oraz ubocznie wytwarzane nośniki energii nie uzupełniające produkcji głównej należą do bloku typu "wejście". Gałęzie typu "wejście" charakteryzują się tym, że nie są w nich zużywane nośniki energii. W macierzy powiązań międzygałęziowych gałęziom należącym do tego bloku odpowiadają zerowe kolumny. Pozostałe gałęzie energetyczne należą do bloku typu "centrum". Gałęzie należące do bloku "centrum" charakteryzują się wzajemnymi powiązaniami między sobą wynikającymi ze zużycia i ubocznego wytwarzania. W gałęziach należących do tej grupy występują powiązania o charakterze sprzężeń zwrotnych. Ustalenie następującej kolejności obliczeń bilansowych: gałęzie typu "wyjście", blok "centrum", gałęzie typu "wejście" powoduje, że problem sprowadzenia macierzy $(\mathbf{A}^b + \mathbf{F}^b)$ do postaci zbliżonej do trójkątnej górnej dotyczy jedynie gałęzi należących do bloku "centrum".

W następnym etapie analizy strukturalnej wyróżnia się wśród gałęzi należących do bloku "centrum" podsystemy silnie spójne [1]. Zbiór gałęzi tworzy podsystem silnie spójny, jeżeli dowolna gałąź zbioru jest powiązana z każdą z pozostałych gałęzi zbioru. W wyniku tego podmacierz "centrum" ujmująca wzajemne powiązania między gałęziami należącymi do tego bloku zostaje przekształcona do postaci macierzy blokowej trójkątnej górnej. Powiązania między gałęziami należącymi do różnych podsystemów silnie spójnych mają charakter powiązań szeregowych. Powiązania o charakterze sprzężeń

zwrotnych występują wyłącznie pomiędzy gałęziami należącymi do tego samego podsystemu silnie spójnego.

W celu wydzielenia w bloku "centrum" podsystemów silnie spójnych wyznacza się w pierwszej kolejności binarną macierz pełnych powiązań [1]:

$$\mathbf{C} = \sum_{s=1}^{r} (\mathbf{A}^b + \mathbf{F}^b)_c^s \quad , \tag{12}$$

przy czym sumowanie kolejnych potęg macierzy $(\mathbf{A}^b + \mathbf{F}^b)_c$ odbywa się aż do spełnienia warunku, gdy dla dowolnego $r \leqslant n_c$ zachodzi:

$$\sum_{s=1}^{r} (\mathbf{A}^b + \mathbf{F}^b)_c^s = \sum_{s=1}^{r+1} (\mathbf{A}^b + \mathbf{F}^b)_c^s = \ldots = \sum_{s=1}^{n_c} (\mathbf{A}^b + \mathbf{F}^b)_c^s \quad , \tag{13}$$

gdzie:

$(\mathbf{A}^b + \mathbf{F}^b)_c$ - macierz binarna wzajemnych powiązań gałęzi należących do bloku centrum",

n_c - liczba gałęzi należących do bloku "centrum".

W równaniach (12) i (13) obowiązują zasady algebry Boole'a.

Macierz $\mathbf{C}$ pełnych powiązań przedstawia zbiór relacji bezpośrednich i pośrednich na zbiorze elementów podsystemu energetycznego. W macierzy $\mathbf{C}$ element c_{ij} jest równy jedności, jeżeli pomiędzy gałęziami i oraz j bloku "centrum" występuje powiązanie bezpośrednie lub pośrednie.

W następnym kroku wyznacza się macierz binarną przecięć:

$$\mathbf{W} = \mathbf{C} \cap \mathbf{C}^T \quad . \tag{14}$$

Macierz przecięć posiada elementy niezerowe tylko w tych miejscach, gdzie niezerowe elementy posiadała zarówno macierz $\mathbf{C}$, jak i $\mathbf{C}^T$. W macierzy $\mathbf{W}$ ulegają wyzerowaniu powiązania jednostronne. Macierz $\mathbf{W}$ jest macierzą blokowo-diagonalną. Poszczególne bloki na głównej przekątnej reprezentują podsystemy silnie spójne.

Wyodrębnienie podsystemów silnie spójnych sprowadza macierz $(\mathbf{A}^b + \mathbf{F}^b)_c$ do macierzy blokowo-diagonalnej. Dalsze przekształcenia polegają na wykorzystaniu znanych w literaturze algorytmów minimalizacji liczby sprzężeń zwrotnych [1] w odniesieniu do poszczególnych podsystemów silnie spójnych. Struktura podsystemu energetycznego zakładu przemysłowego jest uzależniona od struktury zapotrzebowania nośników energii przez podsystem technologiczny. Dlatego celowe jest wyodrębnienie tzw. kompleksów nośników energii ujmujących powiązania głównie między podsystemem technologicznym i energetycznym. Powiązania te wynikają z istnienia pomiędzy gałęziami

technologicznymi i energetycznymi zależności typu "sterowania - podporządkowania". Gałąź technologiczna k steruje gałęzią energetyczną i, jeżeli produkcja wyróżnionej gałęzi energetycznej jest uzależniona od zapotrzebowania i-tego nośnika energii w k-tej gałęzi technologicznej. Gałąź i jest wówczas gałęzią podporządkowaną, natomiast gałąź k jest gałęzią sterującą. Wyróżnia się bezpośrednie i pośrednie zależności "sterowania - podporządkowania". Na przykład w podsystemie energetycznym huty żelaza wielkie piece sterują wielkością produkcji energii elektrycznej pośrednio przez jej zapotrzebowanie do napędu silników elektrycznych dmuchaw wielkopiecowych.

Kompleksem nośnika energii nazywa się podzbiór gałęzi, które sterują jego sumarycznym zapotrzebowaniem. Strukturę kompleksu nośnika energii przedstawia się za pomocą grafu skierowanego. Wierzchołkami grafu są gałęzie energetyczne i technologiczne. Krawędzie grafu reprezentują zależności "sterowania - podporządkowania". W wyniku analizy kompleksów można wyróżnić zbiory gałęzi wzajemnie niezależnych sterujących sumarycznym zapotrzebowaniem rozważanego nośnika energii. Zbiory te noszą nazwę zbiorów stabilnych. Elementy zbioru stabilnego spełniają następujące kryteria:

- wierzchołki reprezentujące gałęzie sterujące zbioru stabilnego nie są powiązane,
- wszystkie drogi skierowane od wierzchołków, do których nie dochodzą krawędzie, do wierzchołka reprezentującego rozważany w kompleksie nośnik energii przechodzą przez wierzchołki należące do zbioru stabilnego.

Elementami zbiorów stabilnych są gałęzie technologiczne sterujące zapotrzebowaniem nośników energii oraz gałęzie energetyczne, których wytwórczość jest niezależna od produkcji podsystemu technologicznego zakładu przemysłowego (np. ciepło grzejne).

Wyniki analizy strukturalnej są wykorzystywane do:

- organizacji obliczeń doboru struktury gospodarki energetycznej,
- wyznaczania sumarycznych wykresów uporządkowanych zapotrzebowania nośników energii.

5. METODYKA SPORZĄDZANIA WYKRESÓW UPORZĄDKOWANYCH SUMARYCZNEGO ZAPOTRZEBOWANIA NOŚNIKÓW ENERGII

Wykres uporządkowany sumarycznego zapotrzebowania nośników energii jest tworzony z wykresów cząstkowych, przy czym wyróżnia się:

- zapotrzebowanie przez podsystem technologiczny,
- zużycie ogólnozakładowe oraz sprzedaż,
- zużycie wewnętrzne w podsystemie energetycznym.

Uwzględnia się ponadto uboczne wytwarzanie nośników energii w urządzeniach do odzyskiwania energii odpadowej w podsystemie technologicznym.

O zapotrzebowaniu nośników energii przez podsystem technologiczny decyduje ta grupa gałęzi, która spełnia rolę sterujących w stosunku do pozostałych gałęzi technologicznych i do podsystemu energetycznego. Wykresy uporządkowane zapotrzebowania nośników energii przez podsystem technologiczny wyznacza się na podstawie wykresów uporządkowanych produkcji gałęzi sterujących i współczynników wzmocnień ujmujących powiązania międzygałęziowe w podsystemie technologicznym i energetycznym. Wykresy uporządkowane zapotrzebowania nośników energii na cele ogólnozakładowe oraz na sprzedaż na zewnątrz zakładu, po zastosowaniu jako mnożników współczynników wzmocnień wynikających z powiązań w podsystemie energetycznym służą do wyznaczenia cząstkowych wykresów uporządkowanych sumarycznego zapotrzebowania nośników energii. Zużycia wewnętrzne nośników energii w podsystemie energetycznym oraz produkcja uboczna nośników energii są uwzględniane za pomocą współczynników wzmocnień.

W podsystemie technologicznym wyróżnia się zespoły technologiczne grupujące oddzielnie gałęzie, w których zachodzą procesy ciągłe i oddzielnie gałęzie, gdzie zachodzą procesy okresowe [7].

Procedura sporządzania wykresów uporządkowanych sumarycznego zapotrzebowania nośników energii bazuje na równaniu modelu matematycznego bilansu energetycznego w przekształconej formie oraz na zasadach kompozycji wykresów uporządkowanych [3]. Przekształcone na potrzeby sporządzania sumarycznych wykresów uporządkowanych równanie macierzowe (2) ma postać:

$$\mathbf{\Omega} = (\mathbf{S}\,\mathbf{A} - \mathbf{F})\mathbf{\Omega} + (\mathbf{S}\,\bar{\mathbf{A}} - \bar{\mathbf{F}})\,\bar{\mathbf{G}} + \mathbf{\Pi} \tag{15}$$

Wektory $\mathbf{\Omega}$ i $\mathbf{\Pi}$ ujmują równania:

$$\mathbf{\Omega} = \mathbf{P} + \mathbf{G} + \mathbf{D}\,, \tag{16}$$

$$\mathbf{\Pi} = (\mathbf{S}\,\mathbf{X} - \mathbf{Q})\mathbf{E}_1 + (\mathbf{S}\,\bar{\mathbf{X}} - \bar{\mathbf{Q}})\mathbf{E}_2 + \mathbf{S}(\mathbf{Y} + \mathbf{K})\,, \tag{17}$$

Elementy macierzy $\mathbf{A}$ i $\mathbf{F}$ dla gałęzi energetycznych są zdefiniowane następująco:

$$a_{ij} = \frac{a^P_{ij}\,P_j + a^G_{ij}\,G_j}{\Omega_j} \tag{18}$$

$$f_{ij} = \frac{f^P_{ij}\,P_j + f^G_{ij}\,G_j}{\Omega_j}\,. \tag{19}$$

W zespole technologicznym wyróżnia się gałąź sterującą. O sumarycznym wykresie uporządkowanym zapotrzebowania na dany nośnik energii związany z produkcją rozpatrywanego zespołu technologicznego decyduje uporządkowany wykres produkcji gałęzi sterującej. Wykres sumaryczny uzyskuje się przez przemnożenie rzędnych przez współczynnik wzmocnienia, który uwzględnia wzajemne powiązania w zespole technologicznym oraz powiązania w podsystemie energetycznym. Dla i-tego nośnika energii i r-tego zespołu technologicznego można zapisać [7]:

$$\Omega_{ir}(\tau) = W^r_{is}\,\bar{G}^r_s(\tau)\ , \tag{20}$$

gdzie:

$\Omega_{ir}(\tau)$ - uporządkowany wykres sumarycznego zapotrzebowania i-tego nośnika energii dla r-tego zespołu technologicznego,

W^r_{is} - współczynnik wzmocnienia uwzględniający zużycie bezpośrednie nośnika energii oraz zużycia pośrednie wynikające z powiązań technologicznych i energetycznych między gałęziami sterującą "s" a nośnikiem energii "i",

$\bar{G}^r_s(\tau)$ - uporządkowany wykres produkcji s-tej gałęzi sterującej w r-tym zespole technologicznym.

Współczynnik wzmocnienia W^r_{is} wyznacza się za pomocą reguły Masona przypisując układowi równań (15) graf przepływu sygnałów, którego wierzchołkami są elementy wektorów $\mathbf{\Omega}$, $\bar{\mathbf{G}}$ i $\mathbf{\Pi}$.

W przypadku zużyć nośników energii na cele niezależne od wielkości produkcji i sprzedaży na zewnątrz zakładu wielkościami danymi do obliczeń są wykresy uporządkowane $\Pi(\tau)$ zapotrzebowania nośników energii. Zużycie nośników energii wewnątrz podsystemu energetycznego uwzględnia się poprzez równanie bilansowe (15), które w tym przypadku ma postać:

$$\mathbf{\Omega}_{\Pi}(\tau) = (\mathbf{S}\,\mathbf{A} - \mathbf{F})\mathbf{\Omega}_{\Pi}(\tau) + \Pi(\tau)\ , \tag{21}$$

gdzie:

$\mathbf{\Omega}_{\Pi}(\tau)$ - wektor ujmujący sumaryczne zapotrzebowanie nośników energii na cele niezależne od wielkości produkcji i sprzedaż,

$\Pi(\tau)$ - wektor ujmujący bezpośrednie zapotrzebowanie nośników energii na cele niezależne od wielkości produkcji i sprzedaż.

Przekształcając równanie (21) ze względu na $\mathbf{\Omega}_{\Pi}(\tau)$ otrzymuje się:

$$\mathbf{\Omega}_{\Pi}(\tau) = (\mathbf{E} - \mathbf{S}\,\mathbf{A} + \mathbf{F})^{-1}\,\Pi(\tau)\ . \tag{22}$$

Sumaryczny wykres uporządkowany zapotrzebowania i-tego nośnika energii na cele niezależne od wielkości produkcji i sprzedaż ujmuje równanie:

$$\Omega_{i\Pi}(\tau) = A_{i1}\Pi_1(\tau) * A_{i2}\Pi_2(\tau) * \dots A_{ij}\Pi_j(\tau)$$

$$* \dots * A_{in}\Pi_n(\tau) \; . \tag{23}$$

gdzie: "*" oznacza operację splotu. Przyjęto założenie, że wykresy uporządkowane $\Pi_1(\tau), \dots \Pi_n(\tau)$ są wzajemnie od siebie niezależne.

Bazując na niezależności wykresów uporządkowanych zapotrzebowania nośników energii dla rozpatrywanych zespołów technologicznych oraz zużyć niezależnych od wielkości produkcji i sprzedaży można za pomocą operacji splotu (kompozycji) [2] uzyskać wykres uporządkowany sumarycznego zapotrzebowania i-tego nośnika energii według relacji:

$$\Omega_i(\tau) = \Omega_{i1}(\tau) * \dots * \Omega_{ir}(\tau) * \dots * \Omega_{iR}(\tau) * \Omega_{i\Pi}(\tau) \tag{24}$$

Jeżeli dla nośnika rozpatrywanego w grupie zużyć niezależnych od wielkości produkcji i sprzedaży występują w roku różne okresy zapotrzebowania (np. ciepło grzejne), wówczas wykres uporządkowany rozdziela się na poszczególne charakterystyczne okresy. Operację splotu przeprowadza się dla każdego okresu oddzielnie, a następnie sporządza się sumaryczny wykres uporządkowany.

6. DOBOR MOCY NOMINALNYCH URZĄDZEŃ ENERGETYCZNYCH METODĄ DEKOMPOZYCJI GLOBALNEGO ZADANIA OPTYMALIZACYJNEGO

Dla każdego z rozważanych wariantów układu gospodarki energetycznej zakładu przemysłowego przeprowadza się dobór mocy nominalnych urządzeń podstawowych i szczytowych oraz wielkości nominalnych dostaw zewnętrznych na drodze optymalizacji deterministycznej. Jako kryterium optymalizacji przyjmuje się minimalizację rocznych kosztów działania gospodarki energetycznej. Funkcja celu ma postać:

$$K_R = \varrho I + K_e \longrightarrow \min \; , \tag{25}$$

gdzie:

K_R - roczne koszty działania podsystemu energetycznego, zł/rok,
ϱ - skorygowana rata reprodukcji rozszerzonej, 1/rok,
I - nakłady inwestycyjne na podsystem energetyczny, zł,
K_e - roczne koszty eksploatacji podsystemu energetycznego, zł/rok.

Po rozpisaniu funkcji celu (25) ze względu na produkcję podstawową, szczytową i dostawy zewnętrzne oraz uwzględniając straty w produkcji technologicznej spowodowane niedostarczeniem nośników energii otrzymuje się:

$$K_R = (\varrho_P + \beta_P)\, I_P + (\varrho_G + \beta_G)\, I_G + (\varrho_D + \beta_D)\, I_D + \alpha_P\, \dot{P}_n +$$

$$+ \alpha_G\, \dot{G}_n + \alpha_D\, \dot{D}_n + \varkappa_P\, P + \varkappa_G\, G + \varkappa_D\, D + S_R \longrightarrow \min \qquad (26)$$

gdzie:

$\varrho_P, \varrho_G, \varrho_D$ - wektory wierszowe skorygowanych rat reprodukcji rozszerzonej,

$\beta_P, \beta_G, \beta_D$ - wektory wierszowe względnych strat kosztów stałych remontów i konserwacji,

I_P, I_G, I_D - wektory kolumnowe nakładów inwestycyjnych,

$\alpha_P, \alpha_G, \alpha_D$ - wektory wierszowe wskaźników płac stałych i kosztów energii nie związanych z produkcją,

$\dot{P}_n, \dot{G}_n, \dot{D}_n$ - wektory kolumnowe mocy nominalnych urządzeń podstawowych i szczytowych oraz dostaw zewnętrznych,

$\varkappa_P, \varkappa_G, \varkappa_D$ - wektory wierszowe wskaźników zmiennych kosztów eksploatacji z uwzględnieniem strat w środowisku,

P, G, D - wektory kolumnowe rocznej produkcji urządzeń podstawowych i szczytowych oraz wektor rocznych dostaw zewnętrznych nośników energii,

S_R - roczne koszty strat technologicznych spowodowanych niedostarczeniem nośników energii w wymaganej ilości.

Indeksy "P", "G", "D" oznaczają odpowiednio część podstawową produkcji, część szczytową produkcji oraz dostawy zewnętrzne.

W przypadku dostaw zewnętrznych uwzględniono dodatkowe nakłady inwestycyjne i koszty eksploatacji związane ze zmianą parametrów i dystrybucją dostaw zewnętrznych. Formułując funkcję celu (26) uwzględniono przypadek, że może być nieopłacalne dobieranie mocy nominalnych urządzeń podstawowych, szczytowych i wielkości nominalnych dostaw zewnętrznych na maksimum zapotrzebowania na rozpatrywany nośnik energii. Straty w produkcji technologicznej spowodowane niedostarczeniem nośników energii w żądanej wysokości uwzględnia człon S_R.

W celu rozwiązania globalnego zadania optymalizacyjnego (26) konieczna jest znajomość wykresów uporządkowanych zapotrzebowania na każdy z nośników energii oraz znajomość technicznych współczynników zużycia i ubocznego wytwarzania nośników energii. Techniczne współczynniki zużycia i ubocznego wytwarzania nośników energii wyznaczone na podstawie charakterystyk energetycznych zależą od wielkości mocy nominalnych, jak również od obcią-

żenia. Zmiany obciążeń ujęte są za pomocą wykresów uporządkowanych. Do konstruowania wykresów uporządkowanych używa się z kolei technicznych współczynników produkcji. Zatem sporządzanie uporządkowanych wykresów zapotrzebowania na nośniki energii, wyznaczanie współczynników zużycia i ubocznego wytwarzania nośników energii oraz dobór mocy nominalnych urządzeń energetycznych i nominalnych wielkości dostaw są zadaniami wzajemnie ze sobą powiązanymi. Do ich rozwiązania konieczna jest dekompozycja globalnego zadania optymalizacyjnego, która wymaga sformułowania odpowiedniej procedury koordynacyjnej zapewniającej zgodność optimów lokalnych z optimum globalnym.

Zmiennymi decyzyjnymi są wektory mocy nominalnych $\dot{\mathbf{G}}_n$, $\dot{\mathbf{P}}_n$ i $\dot{\mathbf{D}}_n$. Wektory produkcji szczytowej $\mathbf{G}$ i podstawowej $\mathbf{P}$ oraz dostaw zewnętrznych $\mathbf{D}$ wynikają z doboru optymalnych mocy nominalnych urządzeń i nominalnych dostaw zewnętrznych oraz z wykresów uporządkowanych sumarycznego zapotrzebowania nośników energii.

Globalne ograniczenie równościowe stanowi równanie macierzowe (2) bilansu nośników energii. W algorytmie obliczania ekstremum według równania (26) jest ono równaniem więzów. Ograniczenia lokalne dotyczące poszczególnych gałęzi energetycznych wynikają z maksymalnego zapotrzebowania na każdy z nośników energii oraz z limitowania dostaw zewnętrznych i nakładów inwestycyjnych:

$$\dot{P}_{ni} + \dot{G}_{ni} + \dot{D}_{ni} < \dot{\Omega}_{i\,max} \tag{27}$$

lub

$$\dot{P}_{ni} + \dot{G}_{ni} + \dot{D}_{ni} \geqslant \gamma_i \dot{\Omega}_{i\,max}, \tag{28}$$

$$D_{ni} \leqslant \dot{\vartheta}_{i\,max}, \tag{29}$$

$$D_i \leqslant \vartheta_i , \tag{30}$$

$$I_{Pi} + I_{Gi} + I_{Di} \leqslant I_i, \tag{31}$$

gdzie:

$\dot{P}_{ni}$, $\dot{G}_{ni}$, $\dot{D}_{ni}$ – moce nominalne urządzeń: podstawowego i szczytowego oraz wielkość nominalnej dostawy zewnętrznej dla i-tego nośnika energii,

$\dot{\Omega}_{i\,max}$ – maksymalne zapotrzebowanie i-tego nośnika energii,

γ_i – współczynnik uwzględniający urządzenia rezerwujące,

$\dot{\vartheta}_{i\,max}$ – maksymalny strumień dostawy zewnętrznej,

D_i – roczna dostawa i-tego nośnika energii,

ϑ_i – roczny limit dostawy zewnętrznej i-tego nośnika energii,

I_{Pi}, I_{Gi}, I_{Di} - nakłady inwestycyjne związane z urządzeniem podstawowym i szczytowym oraz dostawami zewnętrznymi dla i-tego nośnika energii,

I_i - limit nakładów inwestycyjnych dotyczących i-tego nośnika energii.

Nierówność (27) obowiązuje w przypadku, gdy dopuszcza się wystąpienie strat technologicznych spowodowanych niedostarczeniem nośnika energii w wymaganej przez podsystem technologiczny ilości. Nierówność (28) dotyczy pozostałych przypadków. Współczynnik $\gamma_i > 1$ oznacza konieczność uwzględnienia dodatkowych urządzeń rezerwowych. Jeżeli nie przewiduje się urządzeń rezerwowych, $\gamma_i = 1$.

Dobór mocy nominalnych urządzeń energetycznych i nominalnych dostaw zewnętrznych rozwiązuje się za pomocą dekompozycji globalnego zadania optymalizacyjnego przy użyciu metody nieoznaczonych czynników Lagrange'a. W tym celu tworzy się nowe wyrażenie funkcji celu dołączając globalne ograniczenie (2) do wyjściowej funkcji celu (26):

$$L = K_R + \lambda\,[S(A_P P + A_G G + \bar{A}\,\bar{G} + X\,E_1 + \bar{X}\,E_2 + Y + K) -$$

$$- P - G - F_P P - F_G G - \bar{F}\,\bar{G} - Q\,E_1 - \bar{Q}\,E_2 - D] \longrightarrow \min. \qquad (32)$$

gdzie λ oznacza wektor wierszowy nieoznaczonych czynników Lagrange'a.

Do wyznaczenia wektora λ konieczna jest znajomość procedury koordynacyjnej zapewniającej zgodność optimów lokalnych z optimum globalnym. Można wykazać [6], że w rozpatrywanym przypadku czynniki Lagrange'a są kosztami jednostkowymi nośników energii, a procedurę koordynacyjną stanowi metoda macierzowa wyznaczania kosztów jednostkowych nośników energii [5].

Funkcja celu dla j-tej gałęzi podsystemu energetycznego ma postać:

$$L_j = K_{Rj} + \sum_{i=1}^{n} k_i\, a_{ij}^{P}\, P_j + \sum_{i=1}^{n} k_i\, a_{ij}^{G}\, G_j + \sum_{i=1}^{n} k_i\, X_{ij} -$$

$$- \sum_{i=1}^{n} (1 - \varepsilon_i) k_{Fi}\, f_{ij}^{P}\, P_j - \sum_{i=1}^{n} (1 - \varepsilon_i) k_{Fi}\, f_{ij}^{G}\, G_j -$$

$$- \sum_{i=1}^{n} (1 - \varepsilon_i) k_{Fi}\, Q_{ij} \longrightarrow \min. \qquad (33)$$

przy czym:

$$K_{Rj} = (\varrho_{Pj} + \beta_{Pj})I_{Pj} + (\varrho_{Gj} + \beta_{Gj})I_{Gj} + (\varrho_{Dj} + \beta_{Dj})I_{Dj} +$$

$$+\alpha_{Pj}\,\dot{P}_{nj} + \alpha_{Gj}\,\dot{G}_{nj} + \alpha_{Dj}\,\dot{D}_{nj} + \varkappa_{Pj}\,P_j + \varkappa_{Gj}\,G_j +$$

$$+\varkappa_{Dj}\,D_j + S_{Rj} \tag{34}$$

gdzie k_i oraz k_{Pi} oznaczają odpowiednio średnioważony koszt jednostkowy i-tego nośnika energii i koszt jednostkowy ubocznego wytwarzania i-tego nośnika energii [5].

Zastosowana metoda dekompozycji sprowadza zadanie optymalizacji do procedury iteracyjnej. W kolejnym kroku iteracyjnym wyznacza się na górnym poziomie hierarchii za pomocą odpowiedniej procedury koordynacyjnej nieoznaczone czynniki Lagrange'a. Następnie przy zadanych wartościach czynników Lagrange'a optymalizuje się w sposób autonomiczny każdy z podsystemów na niższym poziomie hierarchii [1]. Nieoznaczone czynniki Lagrange'a są w tym przypadku kosztami jednostkowymi niśników energii. Metoda macierzowa wyznaczania kosztów jednostkowych nośników energii [5] stanowi procedurę koordynacyjną w iteracyjnym algorytmie zdekomponowanego zadania optymalizacyjnego. Na poziomie podsystemów (gałęzi energetycznych) wyznacza się moce nominalne urządzeń podstawowych i szczytowych oraz wielkość nominalnych dostaw zewnętrznych.

W pierwszym przybliżeniu procedury iteracyjnej zakłada się wektor **k** jednostkowych kosztów nośników energii. Zakłada się również w macierzach powiązań międzygałęziowych współczynniki o charakterze sprzężeń zwrotnych. Kolejność obliczeń gałęzi jest wynikiem analizy strukturalnej. Realizuje się wewnętrzne pętle iteracyjne w podsystemach silnie spójnych aż do osiągnięcia wymaganej dokładności określenia współczynników charakteryzujących sprzężenia zwrotne. Po rozwiązaniu w kolejnym kroku dużej pętli iteracyjnej zadania optymalizacyjnego (33) dla wszystkich gałęzi, z uwzględnieniem ograniczeń lokalnych, następuje powrót na poziom koordynacji, gdzie wyznacza się poprawiony wektor kosztów jednostkowych nośników energii. W następnym kroku iteracyjnym wykorzystuje się poprawiony wektor kosztów jednostkowych na poziomie optymalizacji poszczególnych gałęzi. Koniec iteracji w dużej pętli wynika z przyjętej dokładności wyznaczania kosztów jednostkowych.

7. PRZYKŁAD TWORZENIA WARIANTÓW I DOBORU OPTYMALNEJ STRUKTURY MACIERZY POWIĄZAŃ MIĘDZYGAŁĘZIOWYCH

Podsystem technologiczny, do którego jest dobierany w ramach projektu wstępnego optymalny układ gospodarki energetycznej, tworzy wydział wielkich pieców oraz wydział konwertorów i pieców elektrycznych. W tablicy 1 przedstawiono wektor binarny T^b struktury zapotrzebowania nośników energii na potrzeby podsystemu technologicznego.

Tablica 1

Uniwersalna lista nośników energii i wektor T^b struktury zapotrzebowania nośników energii na potrzeby podsystemu technologicznego

u	Nośnik energii	T^b
1	Para wodna SP[x)]	0
2	Para wodna NP1[x)]	1
3	Para wodna NP2[x)]	0
4	Energia elektryczna	1
5	Dmuch wielkopiecowy	1
6	Ciepło grzejne	1
7	Woda zmiękczona	0
8	Woda zasilająca	0
9	Woda przemysłowa	1
10	Sprężone powietrze	1
11	Węgiel energetyczny	0
12	Olej opałowy	0
13	Gaz ziemny	1
14	Gaz wielkopiecowy	1

[x)] SP - para wodna średnioprężna o ciśnieniu 3,7 MPa,
NP1 - para wodna niskoprężna o ciśnieniu 0,8 MPa,
NP2 - para wodna niskoprężna o ciśnieniu 0,12 MPa.

Elementy niezerowe w wektorze T^b informują o nośnikach energii zużywanych bezpośrednio przez podsystem technologiczny. Elementy zerowe wektora T^b dotyczą nośników energii zużywanych wyłącznie wewnątrz podsystemu energetycznego.

Tablica 1 zawiera także listę nośników energii. Wyróżniono 10 nośników energii wytwarzanych jako produkty główne, jeden nośnik energii (gaz wielkopiecowy) wytwarzany jako produkt uboczny nie uzupełniający produkcji głównej oraz trzy nośniki energii sprowadzane z zewnątrz (węgiel energetyczny, gaz ziemny, energia elektryczna). Uzupełnieniem uniwersalnej listy

Tablica 2

Zestawienie urządzeń energetycznych

Symbol	Rodzaj urządzenia
U_1	Kotły parowe opalane gazem wielkopiecowym i węglem energetycznym wytwarzające parę wodną SP o ciśnieniu 3,7 MPa
U_2	Kotły parowe opalane gazem wielkopiecowym i olejem opałowym wytwarzające parę wodną SP o ciśnieniu 3,7 MPa
U_3	Turbozespoły upustowo-kondensacyjne zasilane parą wodną SP1 z upustem regulowanym 0,8 MPa
U_4	Turbozespoły przeciwprężne zasilane parą wodną SP o przeciwciśnieniu 0,8 MPa
U_5	Stacje redukcyjno-schładzające 3,7/0,8 MPa wytwarzające parę wodną NP1
U_6	Stacje redukcyjne 0,8/0,12 MPa wytwarzające parę wodną NP2
U_7	Dmuchawy wielkopiecowe napędzane za pomocą turbin kondensacyjnych zasilanych parą wodną SP o ciśnieniu 3,7 MPa
U_8	Dmuchawy wielkopiecowe z napędem elektrycznym
U_9	Podgrzewacze wody grzejnej zasilane parą wodną NP1
U_{10}	Zmiękczalnia wody
U_{11}	Pompownia wody zasilającej ze stacją odgazowania
U_{12}	Pompownia wody przemysłowej
U_{13}	Stacja sprężarek powietrza

nośników energii jest zestawienie urządzeń energetycznych analizowanych w projekcie wstępnym (tabl. 2). Na podstawie listy nośników energii oraz zestawienia urządzeń energetycznych utworzono zbiór tematów i rozwiązań projektowych (tabl. 3). Wyróżniono 9 tematów i 12 rozwiązań projektowych. Do oznaczenia poszczególnych rozwiązań projektowych zastosowano symbole zamieszczone w tablicy 2. Dodatkowy symbol D_4 dotyczy energii elektrycznej

Tablica 3

Tablica tematów i rozwiązań projektowych

t	Tematy projektowe	p	Rozwiązania projektowe
1	Para wodna SP	1	U_1
		2	U_2
2	Para wodna NP1	3	$U_3 \wedge U_5 \wedge D_4$
	Energia elektryczna	4	$U_4 \wedge U_5 \wedge D_4$
3	Para wodna NP2	5	U_6
4	Dmuch wielkopiecowy	6	U_7
		7	U_8
5	Ciepło grzejne	8	U_9
6	Woda zmiękczona	9	U_{10}
7	Woda zasilająca	10	U_{11}
8	Woda przemysłowa	11	U_{12}
9	Sprężone powietrze	12	U_{13}

Przykładowo $U_4 \wedge U_5 \wedge D_4$ oznacza turbozespół przeciwprężny wraz ze stacją redukcyjno-schładzającą i możliwością dostawy energii elektrycznej.

Tablice 1, 2 i 3 tworzą sformalizowany zapis scenariusza projektowanej gospodarki energetycznej.

Na podstawie scenariusza tworzy się zbiór wszystkich możliwych wariantów struktury gospodarki energetycznej wybierając po jednym rozwiązaniu z każdego tematu projektowego. W analizowanym przykładzie wyróżniono 8 wariantów struktury podsystemu energetycznego (tabl. 4). Każdemu wariantowi podsystemu energetycznego odpowiada wektor binarny $\mathbf{W}_l$ struktury gospodarki energetycznej (l oznacza numer wariantu). Przykładowo dla III wariantu układu gospodarki energetycznej wektor $\mathbf{W}_3$ ma postać:

$$\mathbf{W}_3^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Tablica 4

Zestawienie wariantów podsystemu energetycznego

Tematy proj. t / Warianty	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	U_1	$U_3 \wedge U_5 \wedge D_4$	U_6	U_7	U_9	U_{10}	U_{11}	U_{12}	U_{13}
II	U_1	$U_3 \wedge U_5 \wedge D_4$	U_6	U_8	U_9	U_{10}	U_{11}	U_{12}	U_{13}
III	U_1	$U_4 \wedge U_5 \wedge D_4$	U_6	U_7	U_9	U_{10}	U_{11}	U_{12}	U_{13}
IV	U_1	$U_4 \wedge U_5 \wedge D_4$	U_6	U_8	U_9	U_{10}	U_{11}	U_{12}	U_{13}
V	U_2	$U_3 \wedge U_5 \wedge D_4$	U_6	U_7	U_9	U_{10}	U_{11}	U_{12}	U_{13}
VI	U_2	$U_3 \wedge U_5 \wedge D_4$	U_6	U_8	U_9	U_{10}	U_{11}	U_{12}	U_{13}
VII	U_2	$U_4 \wedge U_5 \wedge D_4$	U_6	U_7	U_9	U_{10}	U_{11}	U_{12}	U_{13}
VIII	U_2	$U_4 \wedge U_5 \wedge D_4$	U_6	U_8	U_9	U_{10}	U_{11}	U_{12}	U_{13}

Każde p-te rozwiązanie projektowe jest opisane za pomocą macierzy binarnych $\mathbf{A}^b_{pP}$, $\mathbf{A}^b_{pG}$, $\mathbf{F}^b_{pP}$, $\mathbf{F}^b_{pG}$ charakteryzujących strukturę zużycia i ubocznego wytwarzania nośników energii. Stanowią one podstawę do utworzenia macierzy binarnych $\mathbf{A}^b_P$, $\mathbf{A}^b_G$, $\mathbf{F}^b_P$, $\mathbf{F}^b_G$ powiązań międzygałęziowych. W tablicy 5 zamieszczono niezerowe wektory kolumnowe macierzy struktury rozwiązań projektowych. Przykładowo macierz $\mathbf{A}^b_G$ dla wariantu III wyznacza się według relacji:

$$\mathbf{A}^b_G = \left[\mathbf{A}^b_{1G}, \ldots, \mathbf{A}^b_{pG}, \ldots, \mathbf{A}^b_{12\,G}\right] \mathbf{W}_3 , \tag{35}$$

skąd:

$$\mathbf{A}^b_G = \mathbf{A}^b_{1G} + \mathbf{A}^b_{4G} + \mathbf{A}^b_{5G} + \mathbf{A}^b_{6G} + \mathbf{A}^b_{8G} + \mathbf{A}^b_{9G} + \mathbf{A}^b_{10\,G} + \mathbf{A}^b_{11\,G} + \mathbf{A}^b_{12\,G} \tag{36}$$

Macierz $\mathbf{A}^b_{1G}$ (rozwiązanie projektowe U_1 - kotły pyłowo-gazowe) posiada niezerową pierwszą kolumnę odpowiadającą pierwszej kolumnie macierzy $\mathbf{A}^b_G$. Macierz $\mathbf{A}^b_{4G}$ (rozwiązanie projektowe $U_4 \wedge U_5 \wedge D_4$ - turbozespół przeciwprężny i stacja redukcyjno-schładzająca) ma niezerową drugą kolumnę odpowiadającą drugiej kolumnie macierzy $\mathbf{A}^b_G$. Niezerowe elementy tej kolumny odpowiadają zużyciu pary wodnej średnioprężnej SP oraz wody zasilającej w stacji redukcyjno-schładzającej 3,7/0,8 MPa. Współczynniki zużycia dotyczące turbiny przeciwprężnej są ujęte w macierzy $\mathbf{A}^b_{4P}$. Macierz $\mathbf{A}^b_{5G}$ odpowiada stacji redukcyjnej 0,8/0,12 MPa wytwarzającej parę niskoprężną NP2. Macierz $\mathbf{A}^b_{5G}$ posiada niezerową trzecią kolumnę (trzecia kolumna macierzy $\mathbf{A}^b_G$). Macierz $\mathbf{A}^b_{6G}$ (rozwiązanie projektowe U_7 - turbodmuchawy z napędem parowym) posiada niezerową piątą kolumnę odpowiadającą 5 kolumnie macierzy $\mathbf{A}^b_G$. Macierz $\mathbf{A}^b_{8G}$ (rozwiązanie projektowe U_9- ciepło grzejne) ma niezerową szóstą kolumnę odpowiadającą 6 kolumnie macierzy $\mathbf{A}^b_G$. Macierz $\mathbf{A}^b_{9G}$ odpowiada stacji uzdatniania wody (zmiękczalnia - rozwiązanie projektowe U_{10}). Macierz $\mathbf{A}^b_{9G}$ posiada niezerową siódmą kolumnę odpowiadającą siódmej kolumnie macierzy $\mathbf{A}^b_G$. Macierze $\mathbf{A}^b_{10\,G}$, $\mathbf{A}^b_{11\,G}$, $\mathbf{A}^b_{12\,G}$ (rozwiązania projektowe odpowiednio U_{11} - woda zasilająca, U_{12} - woda przemysłowa, U_{13} - sprężone powietrze) posiadają odpowiednio niezerowe kolumny o numerach 8, 9 i 10 odpowiadające tym samym kolumnom w macierzy $\mathbf{A}^b_G$. Macierz binarną $\mathbf{A}^b_G$ powiązań międzygałęziowych dla wariantu III ujmuje tablica 6.

Macierze $\mathbf{A}^b_P$, $\mathbf{F}^b_P$, $\mathbf{F}^b_G$ dla III wariantu mają identyczne wymiary jak macierz $\mathbf{A}^b_G$, lecz znacznie mniej elementów niezerowych. Macierz $\mathbf{A}^b_P$ posiada dwa elementy niezerowe: a^P_{12} i a^P_{92} dotyczące zużycia pary SP i wody przemysłowej przez turbozespół przeciwprężny. Macierz $\mathbf{F}^b_P$ ma jeden element niezerowy f_{42} ujmujący uboczne wytwarzanie energii elektrycznej na strumieniu pary przeciwprężnej NP1. Macierz $\mathbf{F}^b_G$ posiada trzy elementy niezerowe f^G_{31}, f^G_{75}, f^G_{76} dotyczące kolejno ubocznego wytwarzania pary NP2 przy produkcji pary SP (rozprężacz odmulin), odzysku kondensatu ze stacji dmuchaw oraz odzysku kondensatu przy wytwarzaniu ciepła grzejnego.

Tablica 5

Niezerowe wektory kolumnowe A_p^j binarnych macierzy struktury rozwiązań projektowych[x)]

u	Nośnik energii	Rozwiązania projektowe - p																	
		1	2	1,2	3				4			5	6	7	8	9	10	11	12
		A_{1G}^{b1}	A_{2G}^{b1}	$F_{1,2G}^{b1}$	A_{3P}^{b2}	A_{3G}^{b2}	F_{3P}^{b2}	A_{3P}^{b4}	A_{4G}^{b2}	A_{4P}^{b4}	F_{4P}^{b2}	A_{5G}^{b3}	A_{6G}^{b5}	A_{7G}^{b5}	A_{8G}^{b6}	A_{9G}^{b7}	A_{10G}^{b8}	A_{11G}^{b9}	A_{12G}^{b10}
1	Para wodna SP	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2	Para wodna NP1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
3	Para wodna NP2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
4	Energia elektr.	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
5	Dmuch wielkopiec.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Ciepło grzejne	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	Woda zmiękczona	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
8	Woda zasilająca	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	Woda przemysłowa	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1
10	Sprężone powietrze	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	Węgiel energet.	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	Olej opałowy	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	Gaz ziemny	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	Gaz wielkopiecowy	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

x) Indeks "j" oznacza numer niezerowej kolumny macierzy, indeks "p" - numer rozwiązania projektowego. Indeksy "G" oraz "P" dotyczą odpowiednio urządzeń szczytowych i podstawowych. Np. wektor kolumnowy A_{6G}^{b5} dotyczy 6 rozwiązania projektowego (dmuchawy z napędem parowym), a indeks górny 5 odpowiada numerowi dmuchu wielkopiecowego na uniwersalnej liście nośników energii.

Tablica 6

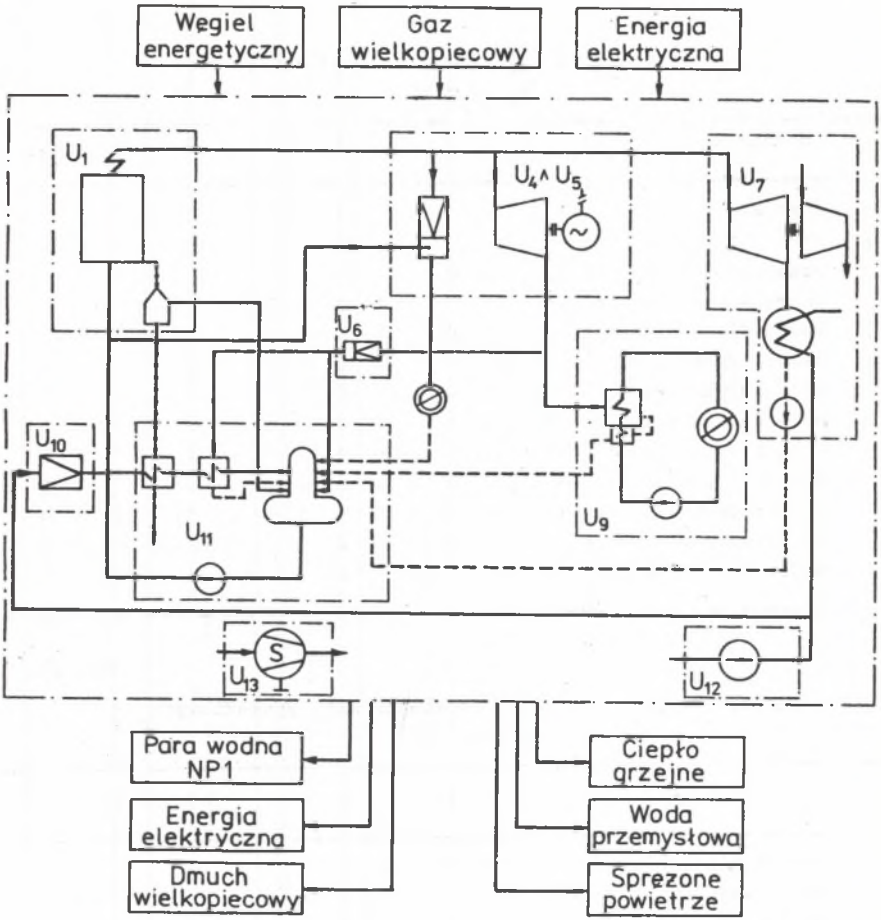
Macierz binarna A_G^b powiązań międzygałęziowych
(wariant III)

u	Nośnik energii	i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Para wodna SP	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Para wodna NP	2	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
3	Para wodna NP2	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
4	Energia elektryczna	4	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0
5	Dmuch wielkopiecowy	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Ciepło grzejne	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	Woda zmiękczona	7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
8	Woda zasilająca	8	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	Woda przemysłowa	9	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0
10	Sprężone powietrze	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	Węgiel energetyczny	11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	Gaz ziemny	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	Gaz wielkopiecowy	13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablica 7

Macierz binarna $(A^b + F^b)$ powiązań międzygałęziowych
(wariant III)

u	Nośnik energii	i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Para wodna SP	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Para wodna NP1	2	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
3	Para wodna NP2	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Energia elektryczna	4	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0
5	Dmuch wielkopiecowy	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Ciepło grzejne	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	Woda zmiękczona	7	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0
8	Woda zasilająca	8	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	Woda przemysłowa	9	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0
10	Sprężone powietrze	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	Węgiel energetyczny	11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	Gaz ziemny	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	Gaz wielkopiecowy	13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Rys. 1. Schemat ideowy podsystemu energetycznego dla wariantu III
Fig. 1. Schematic diagram of the energy subsystem for the 3rd alternative design

Na rys. 1 przedstawiono schemat ideowy podsystemu energetycznego dla wariantu III.

W tablicy 7 zamieszczono macierz binarną $(\mathbf{A}^b + \mathbf{F}^b)$ powiązań międzygałęziowych uzyskaną na drodze sumowania według zasad algebry Boole'a macierzy $\mathbf{A}_P^b$, $\mathbf{A}_G^b$, $\mathbf{F}_P^b$, $\mathbf{F}_G^b$. Macierz $(\mathbf{A}^b + \mathbf{F}^b)$ podlega następnie analizie strukturalnej według algorytmu przedstawionego w punkcie 4. W tablicy 8 zamieszczono macierz binarną $(\mathbf{A}^b + \mathbf{F}^b)$ przekształconą do postaci blokowej trójkątnej górnej w wyniku podziału gałęzi na grupy "wejście", "centrum", i "wyjście" oraz wydzielenia podsystemów silnie spójnych. Przekształcona ma-

cierz $(A^b + F^b)$ posiada także minimalną liczbę elementów leżących poniżej głównej przekątnej.

Tablica 3

Macierz binarna $(A^b + F^b)$ powiązań międzygałęziowych przekształcona do postaci blokowej trójkątnej górnej z minimalną liczbą elementów poniżej przekątnej głównej

(wariant III)

u	Nośnik energii	i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
4	Energia elektryczna	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0
11	Węgiel energetyczny	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
14	Gaz wielkopiecowy	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
9	Woda przemysłowa	4	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0
7	Woda zmiękczona	5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0
3	Para wodna NP2	6	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
8	Woda zasilająca	7	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
1	Para wodna SP	8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
2	Para wodna NP1	9	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0
5	Dmuch wielkopiecowy	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Ciepło grzejne	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	Sprężone powietrze	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	Gaz ziemny	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

LITERATURA

[1] Popyrin L.S.: Matematiczeskoje modelirowanije i optimizacija tiepłoenergeticzeskich ustanowok. Wyd. Energia, Moskwa 1978.

[2] Szargut J.: Analiza termodynamiczna i ekonomiczna w energetyce przemysłowej. WNT, Warszawa 1983.

[3] Szargut J., Ziębik A.: Model matematyczny liniowy bilansu materiałowo-energetycznego huty żelaza. Archiwum Energetyki nr 2, 1972.

[4] Ziębik A., Presz K.: Metoda systemowa doboru struktury macierzy powiązań międzygałęziowych w projekcie wstępnym gospodarki energetycznej zakładu przemysłowego. Archiwum Energetyki nr 1, 1984.

[5] Ziębik A., Gwóźdź J.: Metoda macierzowa wyznaczania kosztów jednostkowych w gospodarce energetycznej zakładu przemysłowego. Archiwum Energetyki nr 1-2, 1983.

[6] Ziębik A.: Model matematyczny bilansu energetycznego dla potrzeb projektu wstępnego gospodarki energetycznej zakładu przemysłowego. Problemy Projektowe nr 3, 1986.

[7] Ziębik A., Presz K.: Zastosowanie teorii przepływów międzygałęziowych do sporządzania wykresów uporządkowanych sumarycznego zapotrzebowania nośników energii w zakładzie przemysłowym. Archiwum Energetyki nr 2, 1987.

МЕТОД КОМПЬЮТЕРНОГО ВОСПОМАГАНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭНЕРГОХОЗЯЙСТВА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Р е з ю м е

В статье оговорен системный метод подбора оптимальной структуры энергохозяйства промышленного предприятия на этапе начального проекта. Показаны алгоритмы получения вариантов системы энергохозяйства и матрица двоичных междуотраслевых связей. Оговорена математическая модель энергобаланса для нужд начального проекта энергохозяйства.

METHODOLOGY OF COMPUTER-AIDED DESIGN OF INDUSTRIAL PLANT ENERGY MANAGEMENT

S u m m a r y

A system method of selecting the optimum structure of the industrial plant energy management in a fordesign stage has been discussed in the paper.

Creation algorithms of the energy management alternative designs and interbranch connection binary matrices have been presented.

Mathematical model of the energy balance for the needs of the energy management fordesign has been discussed.