

ROMAN JANICZEK, ANDRZEJ MATCZEWSKI

Katedra Elektroenergetyki

METODA WYZNACZANIA OPTIMALNEGO PLANU PRODUKCJI I ZAKUPU ENERGII ELEKTRYCZNEJ PRZEZ ZAKŁAD PRZEMYSŁOWY

Streszczenie: Artykuł przedstawia sposób optymalizacji planów produkcji i zakupu energii elektrycznej dla zakładu przemysłowego, posiadającego własną elektrownię, metodą programowania dynamicznego, z zastosowaniem elektronicznych maszyn cyfrowych.

Plan optymalny wyznacza się poszukując minimalnej wartości funkcji celu, którą tworzy suma godzinowych kosztów zmian produkcji energii elektrycznej w siłowni zakładowej i kosztów zakupu energii elektrycznej z systemu elektroenergetycznego, z uwzględnieniem poziomów napięć i taryf opłat za energię. Podano przykład optymalnego planu produkcji i zakupu energii elektrycznej w obrębie siłowni huty surowcowej dla pełnego zakresu zmian zapotrzebowania energii elektrycznej i żądanej wartości poboru przez hutę pary technologicznej.

Minimum rocznych kosztów energii elektrycznej, ponoszonych przez zakład przemysłowy posiadający własną elektrownię, można osiągnąć przez obniżenie do osiągalnego minimum kosztów wytwarzania energii elektrycznej w elektrowni własnej i przez programowanie zakupu energii elektrycznej z systemu elektroenergetycznego.

Pierwszy ze sposobów jest najczęściej wykorzystywany, np. w szeregu dużych elektrowniach przemysłowych stosuje się zasady ekonomicznego rozdziału obciążeń na poszczególne urządzenia wytwórcze.

Znacznie mniej uwagi poświęca się drugiej z wymienionych dróg obniżenia kosztów za energię elektryczną, nie doceniając możliwości tkwiących w optymalizacji programów zakupu energii z systemu elektroenergetycznego, czy też szerzej mówiąc - gospodarowania nośnikami energii w zakładach przemysłowych.

Rozwojowi prac w tym zakresie nie sprzyja odczuwalny brak odpowiednio przygotowanych, tzn. operatywnych w eksploatacji, programów obliczeń numerycznych.

Artykuł przedstawia sposób optymalizacji planów produkcji i zakupu energii elektrycznej dla zakładu przemysłowego, posiadającego własną elektrownię, metodą programowania dynamicznego, z zastosowaniem elektronicznych maszyn cyfrowych. Omawiana metoda wynika z prac prowadzonych w Instytucie Energetyki Politechniki Śląskiej w zakresie optymalizacji gospodarki energetycznej zakładów przemysłowych [1], [2], [3]. Przykład obliczeń

optymalizacyjnych przeprowadza się dla stosunkowo prostego układu energetycznego huty surowcowej, zawierającego między innymi tylko jedną turbinę kondensacyjną. Przyjęcie tak prostego przykładu uzasadnia się początkowym stadium prac w tym zakresie, w którym przede wszystkim chodziło o opracowanie i wdrożenie metody optymalizacji przy wykorzystaniu dostępnych maszyn cyfrowych.

Całkowity roczny koszt energii elektrycznej, pobieranej przez zakład, jest sumą rocznych kosztów wytwarzania energii elektrycznej w elektrowni zakładowej i rocznych kosztów energii zakupionej z zewnątrz, co można zapisać za pomocą następującej funkcji kosztów:

$$K_{re} = K_{rw} + K_{rz} + K_{rzam} + K_{rd} \quad (1)$$

gdzie:

- K_{re} - całkowite roczne koszty energii elektrycznej ponoszone przez zakład,
- K_{rw} - roczne koszty wytwarzania energii elektrycznej w elektrowni własnej,
- K_{rz} - roczne koszty energii elektrycznej zakupionej przez zakład, pomniejszone o kwotę uzyskaną ze sprzedaży energii własnej,
- K_{rzam} - koszty tzw. zamówienia mocy,
- K_{rd} - koszty dodatkowe, ujmujące kary za przekroczenie zamówienia mocy i za niedotrzymanie wartości współczynnika mocy oraz nagrody za jego podwyższenie.

Roczna moc zamówiona wynika z prognoz zapotrzebowania mocy przez zakład i mocy dyspozycyjnej elektrowni własnej, czyli koszt roczny mocy zamówionej zakładu eksploatowanego K_{rzam} nie zależy od planu pracy elektrowni własnej.

Zakłada się, że koszty dodatkowe K_{rd} wynikają z danych statycznych o pracy elektrowni i zużycia mocy przez zakład, czyli nie stanowią składnika podlegającego optymalizacji.

Pomija się również koszty stałe energii elektrycznej wytwarzanej w elektrowni własnej, gdyż koszty te, jako niezależne od wielkości produkcji energii, nie wpływają na rozwiązanie zadania dla przypadku zakładu eksploatowanego. Zakłada się, że podział kosztów na stałe i zmienne jest w zakładzie prowadzony prawidłowo.

Pozostałe dwa składniki kosztów rocznych energii, których minimum poszukuje się i które nazywane będą rocznymi kosztami zmiennymi K_{rez} , zależą odpowiednio od przebiegu w skali roku obciążenia elektrowni własnej $X_w(t)$ i mocy zakupywanej przez zakład na poszczególnych napięciach $X_i(t)$:

$$K_{rez} = \int_0^T \left\{ K_w [X_w(t)] + \sum_{i=1}^n K_{zi} [X_i(t)] \right\} dt \quad (2)$$

gdzie: T oznacza liczbę jednostek czasu t (np. godzin) w skali roku, $i = 1, 2, \dots, n$ oznacza liczbę napięć, na których odbywa się wymiana energii z systemem elektroenergetycznym, K_{zi} oznacza koszty energii zakupywanej przez zakład na napięciu i -tym.

Z matematycznego punktu widzenia koszt K_{rez} jest funkcjonalem, a proces podejmowania decyzji o sposobie pokrycia zadanego przebiegu zapotrzebowania mocy zakładu jest typowym procesem dynamicznym. Ze względu na występowanie w zadaniu zmiennych dyskretnych (np. ceny taryfowe energii zakupywanej w różnych strefach doby) zastosowanie do poszukiwania minimum funkcjonalu K_{rez} rachunku wariacyjnego jest niemożliwe. Można natomiast w oparciu o podstawowe zasady programowania dynamicznego uzasadnić, że przy określonych założeniach upraszczających¹⁾ minimum kosztów K_{rez} można osiągnąć tylko wówczas, gdy w każdej z chwil t wewnątrz okresu T zapewniać się będzie minimum sumy obu głównych składników kosztów zmiennych energii K_{ez} , czyli:

$$\min K_{ez} [Z(t)] = \min \left\{ K_w [X_w(t)] + \sum_1^n K_{zi} [X_i(t)] \right\} \quad (3)$$

Dwulność rozwiązania powyższego zadania jest poważnie ograniczona, gdyż:

a) spełniony musi być bilans mocy zakładu:

$$Z(t) = X_w(t) + \sum_{i=1}^n X_i(t) \quad (4)$$

gdzie $Z(t)$ oznacza zapotrzebowanie zakładu na energię elektryczną w chwili t ,

b) nie mogą być przekroczone ograniczenia techniczne, np.

- przepustowość połączeń zewnętrznych:

$$X_i \leq X_i \text{ max} \quad (5)$$

- minimalne i maksymalne obciążenia urządzeń wytwórczych:

$$X_w \text{ min} \leq X_w < X_w \text{ max} \quad (6)$$

c) spełnione muszą być określone logiczne ograniczenia, np.

$$X_w, X_i \geq 0 \quad (7)$$

¹⁾ Uproszczenie polega na pominięciu kosztów strat energii w cyklach odstawienia - postój - uruchomienia urządzeń.

W dalszym ciągu omówione będzie tylko zmodyfikowane zadanie poszukiwania minimum względnej funkcji kosztów K_{ez} w określonej chwili t . Wówczas składową zmienną kosztu wytwarzania energii w elektrowni własnej można, po wprowadzeniu pojęcia kosztów jednostkowych k_w , zapisać w postaci:

$$K_w(X_w) = k_w(X_w) \cdot X_w \quad (8)$$

Natomiast koszty zakupu energii z zewnątrz zależą od czasu, gdyż obowiązujące taryfy podają koszt jednostki mocy w poszczególnych strefach doby, czyli:

$$K_{zi}(t, X_i) = k_{zi}(t) \cdot X_i \quad (9)$$

Wykorzystując powyższe zależności można zapisać:

$$K_{ez}(Z) = k_w(X_w) \cdot X_w + \sum_i k_{zi}(t) \cdot X_i \quad (10)$$

Zmiennymi decyzyjnymi w omawianym zadaniu są X_w i X_i , a podstawowymi parametrami, obok zapotrzebowania energii Z przez zakład, są charakterystyki jednostkowych zmiennych kosztów energii wytwarzanej $k_w(X_w)$ i zakupowanej $k_{zi}(t)$. Charakterystyki $k_{zi}(t)$ wynikają z obowiązujących taryf opłat za energię elektryczną pobieraną z systemu elektroenergetycznego.

Natomiast charakterystyka $k_w(X_w)$ przedstawia charakterystykę jednostkowych kosztów zmiennych elektrowni własnej, którą w najogólniejszym przypadku złożonego układu cieplnego elektrowni trzeba ustalać w oparciu o ekonomiczny rozdział obciążeń na współpracujące urządzenia wytwórcze, który zapewnia osiągnięcie minimum k_w przy danym obciążeniu elektrowni X_w . Wartość składnika drugiego we wzorze (10) jest w pewnym sensie narzucona (stanowi wynik gospodarowania taryfami opłat za energię w systemie krajowym), natomiast wartość składnika pierwszego można kształtować na drodze zmiany rozdziału zadań na poszczególne urządzenia elektrowni własnej, czyli poprawne rozwiązanie zadania poszukiwania minimum kosztów K_{ez} jest uwarunkowane poprawnym rozwiązaniem zadania cząstkowego, tzn. minimalizacją $k_w(X_w)$.

W dalszym ciągu zadanie zostanie poddane kolejnej modyfikacji, przez nadanie mu pozornie dynamicznego charakteru na drodze rozbicia zadania na szereg zadań cząstkowych, tzw. etapów.

Oznaczając kolejno:

$$\begin{aligned} X_w + X_1 &= Z_1; & Z_1 + X_2 &= Z_2; & \dots; & Z_{i-1} + X_i &= Z_i; \\ & & \dots; & & & & & Z_{n-1} + X_n &= Z \end{aligned} \quad (11)$$

funkcję celu (10) można przedstawić w postaci:

$$K_{ez}(Z) = k_w(X_w) \cdot X_w + k_{z1}(t)(Z_1 - X_w) + k_{z2}(t)(Z_2 - Z_1) + \\ + k_{zi}(t)(Z_i - Z_{i-1}) + \dots + k_{zn}(t)(Z - Z_{n-1}) \quad (12)$$

Zgodnie z zasadami ogólnymi minimalizacji funkcji powyższego typu, opisującymi wieloetapowy proces decyzyjny [5], wyznaczanie minimum funkcji $K_e(Z)$ polega na poszukiwaniu minimum określonych kosztów składowych dla poszczególnych etapów, czyli dla pierwszego etapu:

$$F_1(Z_1) = \min [k_w(X_w)X_w + k_{z1}(t)(Z_1 - X_w)] \quad (13)$$

$$X_w \min \leq X_w \leq X_w \max$$

dla drugiego:

$$F_2(Z_2) = \min [F_1(Z_1) + k_{z2}(t)(Z_2 - Z_1)] \quad (14)$$

$$0 \leq Z_1 \leq Z$$

dla i-tego:

$$F_i(Z_i) = \min [F_{i-1}(Z_{i-1}) + k_{zi}(t)(Z_i - Z_{i-1})] \quad (15)$$

$$0 \leq Z_{i-1} \leq Z$$

dla n-tego:

$$F_n(Z) = \min [F_{n-1}(Z_{n-1}) + k_{zn}(t)(Z - Z_{n-1})] \quad (16)$$

$$0 \leq Z_{n-1} \leq Z$$

Z zasad programowania dynamicznego wynika, że przy pomocy powyższych funkcji rekurencyjnych można dojść w n-tym etapie do poprawnego rozwiązania zadania. Wartości zmiennych decyzyjnych X_w , X_i wynikające z funkcji rekurencyjnej (16) dają dla danego zapotrzebowania mocy przez zakład Z rozwiązanie minimalizujące funkcję celu K_{ez} względem zadanych ograniczeń i wartości cen taryfowych $k_{zi}(t)$.

Dla konkretnego przypadku gospodarki energią elektryczną w obrębie siłowni wybranej huty funkcja kosztów (12) przyjmie postać:

$$K_e = k_w(x_w) X_w + k_{110}(t) X_{110} + k_{60}(t) X_{60} - k_{sp}(t) X_{sp} \quad (17)$$

gdzie:

- X_w - moc elektryczna elektrowni zakładowej [MW],
 X_{110} - moc elektryczna zakupiona z sieci 110 kV [MW],
 X_{60} - moc elektryczna zakupiona z sieci 60 kV [MW],
 X_{sp} - moc elektryczna sprzedana przez hutę [MW],
 $k_w(X_w)$ - jednostkowy koszt zmienny wytwarzania energii elektrycznej w elektrowni własnej [zł/MWh], przy danym jej obciążeniu X_w ,
 k_{110} - cena energii elektrycznej zakupionej z sieci 110 kV [zł/MWh],
 k_{60} - cena energii elektrycznej zakupionej z sieci 60 kV [zł/MWh],
 k_{sp} - cena, po której sprzedaje się energię elektryczną własną [zł/MWh]

W omawianym przykładzie liczbowym występują następujące ograniczenia

$$5 \text{ MW} < X_w \leq 26 \text{ MW}$$

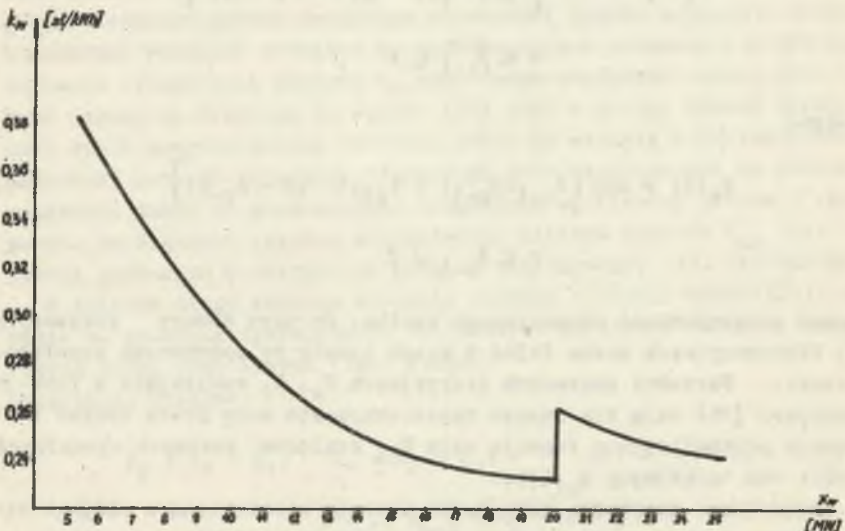
$$2 \text{ MW} < X_{110} \leq 35 \text{ MW}$$

$$0 \text{ MW} < X_{60} \leq 30 \text{ MW}$$

$$Z = X_w + X_{110} + X_{60} - X_{sp}$$

W praktyce zapotrzebowanie mocy przez hutę zawiera się w granicach:

$$12 \text{ MW} < Z \leq 21 \text{ MW}$$



Rys. 1. Jednostkowy koszt zmienny energii elektrycznej k_w w funkcji obciążenia turbozespołu

Ponadto spełniony musi być bilans pary w hucie, a w przypadku niedoboru pary produkowanej w kotłowni własnej można ją kupować z zewnątrz.

Wprowadzenie do funkcji celu wielkości nieliniowej $k_w(X_w)$ nie musi być dokonane za pomocą związku algebraicznego. Wystarczy, jeżeli wartości zdjęte z wykresu tej funkcji (rys. 1), są zestawione tabelarycznie (tablica 1) w przedziałach wartości odpowiadających skokowym zmianom zapotrzebowania mocy Z (na przykład co 1 MW).

Tablica 1

Wartości funkcji kosztów zmiennych wytwarzania energii elektrycznej

X_w	MW	5	6	7	8	9	10	11	12
k_w	zł/MWh	400	362	334	314	298	288	270	270
X_w	MW	13	14	15	16	17	18	19	20
k_w	zł/MWh	264	258	252	248	243	240	238	256
X_w	MW	21	22	23	24	25	-	-	-
k_w	zł/MWh	254	252	250	248	246	-	-	-

Funkcja $k_w(X_w)$ posiada skok w punkcie $X_w = 20$ MW, co wynika z dwu przyczyn:

- przy tej wartości obciążenia otwiera się zawór przeciążeniowy na turbinie, co powoduje pogorszenie sprawności wewnętrznej turbiny,
- przy zadanym poborze pary technologicznej, wynoszącym w okresie zimowym 70 t/h konieczny jest - dla uzyskania znamionowej mocy turbozespołu 25 MW - zakup pary z zakładu sąsiadującego z hutą, po cenie wyższej od kosztu produkcji pary we własnej kotłowni.

Wyniki obliczeń minimalizujących funkcję kosztów K_e dla warunków okresu zimowego przedstawiono w tablicy 2.

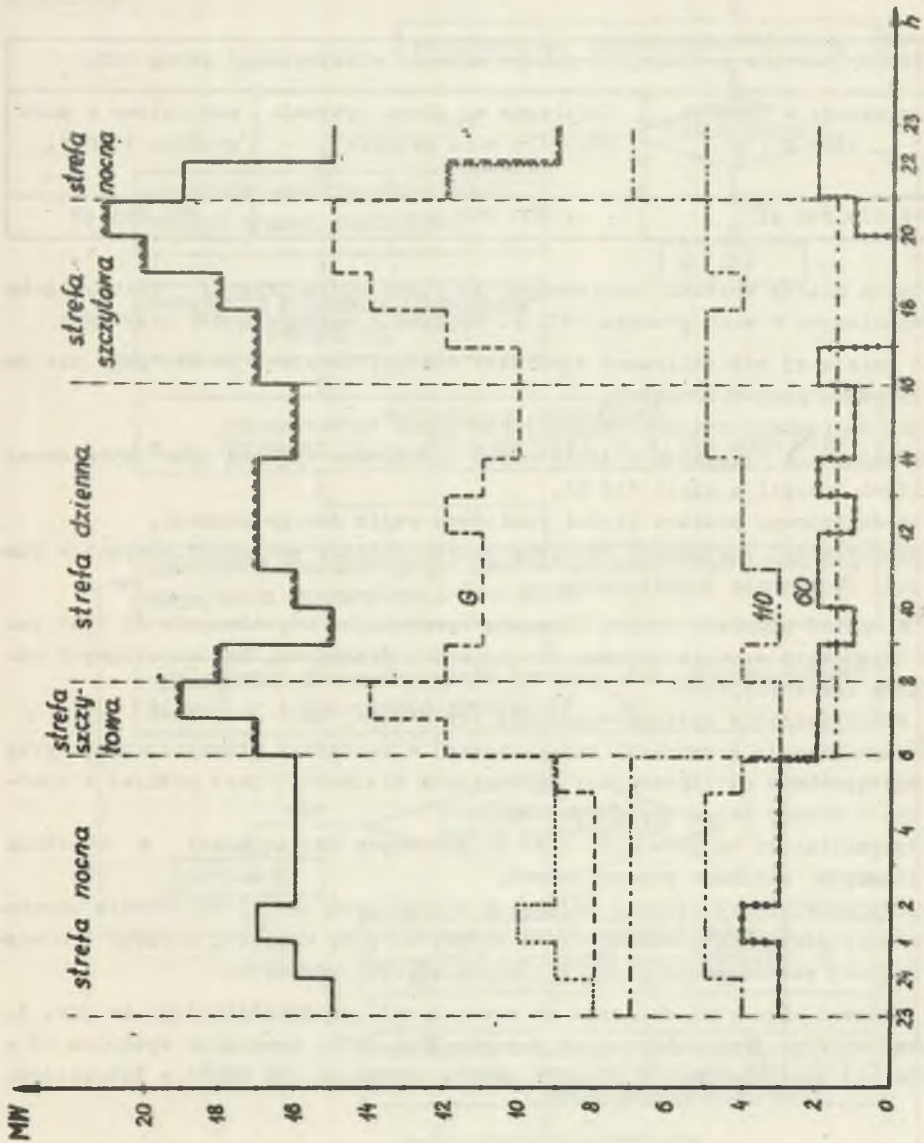
Otrzymane wyniki porównano następnie z rezultatami eksploatacji huty w typowym dniu roboczym miesiąca grudnia. Na rys. 2 przedstawiono, celem porównania praktykowanego sposobu prowadzenia gospodarki energetycznej huty z ustalonymi programem optymalnym, wykresy pokrycia zapotrzebowania mocy przez hutę, wg danych eksploatacyjnych i wg wyników obliczeń.

Oszczędności dla huty z praktycznego zastosowania optymalnych planów gospodarowania energią elektryczną potwierdzają pierwsze doświadczenia przeprowadzone w hucie w grudniu 1970 roku. W tablicy 3 przedstawiono osiągnięte w eksploatacji i obliczone miesięczne koszty energii elektrycznej w hucie, przy danych wyjściowych do tych obliczeń odpowiadających warunkom eksploatacji. Koszty osiągnięte w grudniu 1970 r. są o ponad 1,5 mln zł niższe niż przed rokiem, gdy nie znane były optymalne plany pracy.

Tablica 2

Wyniki obliczeń optymalnego programu produkcji energii elektrycznej przez generator własny i jej zakupu z zewnątrz w różnych strefach taryfowych, przy stałym zapotrzebowaniu pary technologicznej 70 t/h

Zapotrzebowanie mocy, MW	STREFA NOCNA				STREFA DZIENNA				STREFA SZCZYTOWA			
	Obciążenie generatora	Zakup z sieci		Koszt pokrycia obciążenia zł/h	Obciążenie generatora	Zakup z sieci		Koszt pokrycia obciążenia zł/h	Obciążenie generatora	Zakup z sieci		Koszt pokrycia obciążenia zł/h
		110kV po 0,14 zł/kWh	60 kV po 0,14 zł/kWh			110kV po 0,26 zł/kWh	60 kV po 0,26 zł/kWh			110 kVpo 1,1 zł/kWh	60 kV po 1,1 zł/kWh	
21	0	10	11	2940	21	0	0	5040	21	0	0	5040
20	0	10	10	2800	20	0	0	4800	20	0	0	4800
19	0	9	10	2660	19	0	0	4560	19	0	0	4560
18	0	8	10	2520	18	0	0	4320	18	0	0	4320
17	0	7	10	2380	17	0	0	4131	17	0	0	4131
16	0	6	10	2240	16	0	0	3952	16	0	0	3952
15	0	7	8	2100	15	0	0	3750	15	0	0	3750
14	0	7	7	1960	14	0	0	3584	14	0	0	3584
13	0	5	8	1820	0	13	0	3380	13	0	0	3432
12	0	5	7	1680	0	12	0	3120	12	0	0	3240



Rys. 2. Grafik zapotrzebowania i pokrycia mocy;
 rzeczywisty: proponowany:

- | | | |
|---|---|------------------------|
| — | — | - zapotrzebowanie mocy |
| — | — | - generator |
| — | — | - 60 kV |
| — | — | - 110 kV |

Tablica 3

Koszty zmienne produkcji i zakupu energii elektrycznej przez hutę		
poniesione w grudniu 1969 r.	obliczone wg planu optymal- nego dla m-ca grudnia 1970 r.	poniesione w m-cu grudniu 1970 r.
6 579 299 zł	4 650 038 zł	4 891 355 zł

Różnica między kosztami obliczonymi wg planu optymalnego a rzeczywiście poniesionymi w m-cu grudniu 1970 r. wpływa z następujących przyczyn:

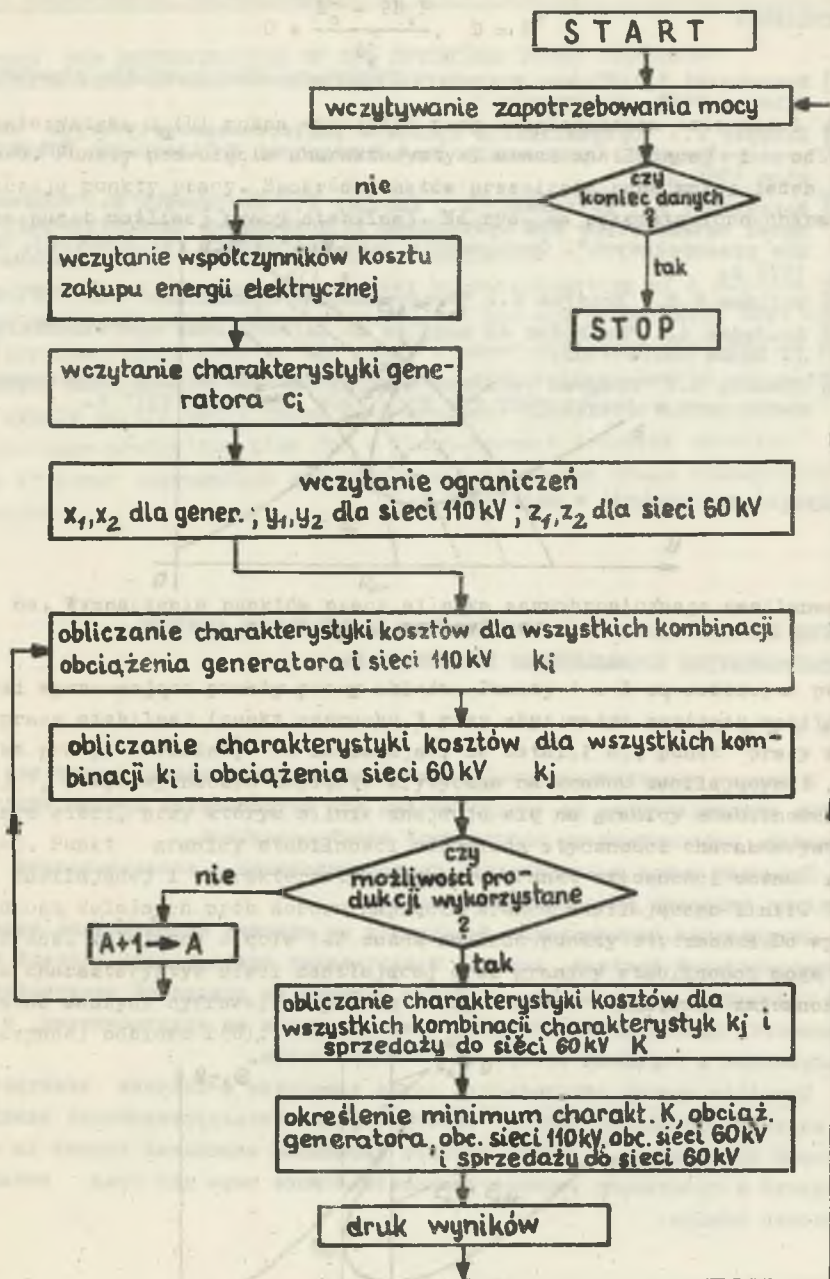
- z mniejszej niż obliczono sprzedaży energii do sieci 60 kV, gdyż nie zakupywano pary z zewnątrz,
- nie dotrzymano minimum technicznego pracy turbozespołu,
- w godzinach dziennych i szczytowych zakupywano większą niż wyznaczono ilość energii z sieci 110 kV,
- niedokładnego pomiaru ilości spalonego węgla energetycznego,
- niedokładnej znajomości charakterystyki kosztów zmiennych energii w funkcji obciążenia turbozespołu.

Niemniej uzyskane wyniki wskazują wyraźnie, iż w porównaniu do 1969 roku osiągnięto w hucie poważne oszczędności finansowe, bez dodatkowych nakładów inwestycyjnych.

Przeprowadzone badania pozwalają stwierdzić, że:

- optymalizacja gospodarki energetycznej w zakładach przemysłowych, przy występowaniu nieliniowych i dyskretnych wielkości, jest możliwa w oparciu o metody badań operacyjnych,
- optymalizacja ta prowadzić może do poważnych oszczędności w kosztach własnych zakładów przemysłowych,
- przy niewielkiej liczbie zmiennych decyzyjnych (do 4) obliczenia odręczne nie stwarzają poważniejszych kłopotów, przy większej liczbie konieczne jest zastosowanie elektronicznych maszyn cyfrowych.

Schemat algorytmu obliczeń na maszynie cyfrową przedstawiono na rys. 3. Opracowany program obliczeń na maszynie Odra 1204, oznaczony symbolem PD - 1204 [6] dostępny jest w ośrodku maszyn cyfrowych ODM ZEOPd w Katowicach.



Rys. 3. Schemat blokowy programu PD-1204

LITERATURA

- [1] Nehrebecki L.: "Ocena gospodarki energetycznej zakładów przemysłowych" Gliwice 1969, maszynopis.
- [2] Kaszper J.: "Optymalizacja bilansów paliwowo-energetycznych zakładów przemysłowych". Opracowanie Inst. Energetyki Politechniki Śląskiej, Gliwice 1969 r.
- [3] Nehrebecki L., Matczewski A., Kaszper J., Czajkowski J.: "Uproszczony model matematyczny dla optymalizacji gospodarki energetycznej zakładów przemysłowych". Opracowanie Inst. Energetyki Pol. Śląskiej, Gliwice 1970 r.
- [4] Bellman R.E., Dreyfus S.: "Programowanie dynamiczne" PWE 1967 r.
- [5] Kaufmann A.: "Methodes et modèles de la recherche operationnelle" t. II Dunod Paris 1962.
- [6] Nowacki A.: "Program obliczeń funkcji kosztów metodą programowania dynamicznego w języku MOST II" PD - 1204 Katowice 1971 r.

Wpłynęło do redakcji w maju 1971 r.

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНА ВЫРАБОТКИ И ПОКУПКИ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ**

Р е з ю м е

В статье представлен метод оптимизации планирования выработки и покупки электроэнергии из энергосистемы для потребностей промышленного предприятия, располагающего собственной электростанцией.

Применен метод динамического программирования с использованием электронных цифровых вычислительных машин.

Оптимизация планирования базируется на поисках минимального значения целевой функции, которая представляет совокупность часовой величины переменных расходов на выработку энергии на заводской электростанции и стоимости одновременной покупки электроэнергии из энергосистемы, с учетом напряжения и тарифных ставок на электроэнергию.

Приведен пример оптимального плана выработки и покупки электроэнергии в пределах хозяйства силовой электростанции металлургического завода (охлаждающая продукция), с учетом полного диапазона изменений спроса на электроэнергию и требуемого расхода технологического пара для нужд металлургического завода.

A METHOD FOR DETERMINATION OF THE OPTIMIZED POWER PURCHASE-
PRODUCTION PLAN IN INDUSTRIAL PLANTS

S u m m a r y

The paper presents a method for optimization of power purchase-production plan in plants equipped with their own power stations, by dynamic programming, using electronic digital computer.

The optimized plan can be computed by determination of a minimum value of the target function which consists, of the sum of variable cost of power (per hour) generated in the plant's power unit, and the cost of power purchased from an external power system, with voltage levels and electricity supply tariff being taken into account. Example of an optimized power purchase-production plan for a blast-furnace ironwork covering full range of power consumption and the required process steam consumption was presented.