ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2000
Seria: AUTOMATYKA z. 130 Nr kol 1475

Antoni KORCYL, Piotr ŁEBKOWSKI, Tadeusz SAWIK
Akademia Górniczo-Hutnicza

WIELOOKRESOWY MODEL PLANOWANIA I STEROWANIA PRODUKCJĄ ORAZ ROZWOJU ELEKTROCIEPŁOWNI

Streszczenie. W pracy przedstawiono model matematyczny wielookresowego sterowania rozwojem i produkcją zakładu przemysłowego. Model przeznaczony jest do optymalizacji doboru technologii i zdolności produkcyjnych zakładu zapewniającej pokrycie zapotrzebowania na produkowane wyroby przy minimalnych nakładach inwestycyjnych i kosztach eksploatacji urządzeń oraz opłat związanych z użytkowaniem środowiska w całym okresie planowania. Dla przyjętego scenariusza prognozy zapotrzebowania na produkowane wyroby oraz dostępnych technologii wyznaczana jest optymalna konfiguracja zakładu uwzględniająca wymogi dotyczące ochrony środowiska.

A MULTI-PERIOD MODEL FOR PRODUCTION PLANNING, CONTROL AND CAPACITY EXPANSION PROBLEM OF A THERMAL-ELECTRIC PLANT

Summary. The paper presents mathematical programming model for a thermal-electric power station development planning problem subject to environmental quality constraints. The formulation proposed is a multi-period, mixed-integer linear program. Given a forecast of demand of various types over time and the upper limits for environmental emissions, the problem objective is to modify the system structure so as to meet the demands and the environmental constraints at a minimum total discounted costs of investment and the system operation over a planning horizon.

1. Wstęp

Dynamiczny rozwój aglomeracji miejskich jest ściśle związany z ciągle zwiększającym się zapotrzebowaniem na wszelkiego rodzaju nośniki energii, w tym przede wszystkim na energię elektryczną i cieplną, których odbiorcami są zarówno indywidualne gospodarstwa domowe, jak i zakłady produkcyjne. To zwiększające się zapotrzebowanie wymusza modernizację i rozbudowę przedsiębiorstw produkujących energię elektryczną i cieplną. Równocześnie wprowadzenie drastycznych ograniczeń związanych z użytkowaniem środowiska, dopasowanie krajowych norm do poziomu norm europejskich dopuszcza stosowanie jedynie nowoczesnych, energooszczędnych i przyjaznych środowisku technologii. Istniejące zakłady produkujące stają więc przed koniecznością kompleksowej modernizacji ciągów technologicznych lub

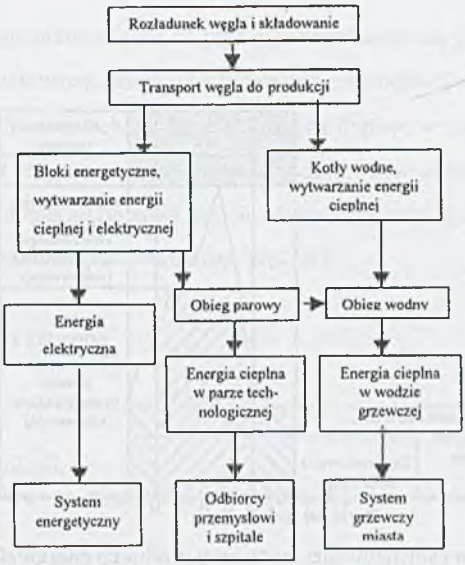
często całkowitych zmian sposobów wytwarzania energii elektrycznej i cieplnej. Wszystko to, przy ograniczonych nakładach inwestycyjnych, jest dodatkowym czynnikiem zwiększającym złożoność problemu optymalnego sterowania bieżącą produkcją i rozwojem firmy.

Strategie funkcjonowania i rozwoju zakładu z uwzględnieniem wielu czynników zarówno ekonomicznych, jak środowiskowych mogą być analizowane za pomocą modeli programowania matematycznego. Jednym z najbardziej zaawansowanych jest MARKAL [2] wielookresowy, liniowy model pierwotnie przeznaczony do modelowania systemów energetycznych regionu lub państwa. W modelu tym elementem wymuszającym zachowanie systemu i jego sterowanie jest określone zapotrzebowanie na wszelkie wyroby finalne i różne rodzaje energii w każdym okresie planowania. Zapotrzebowania określane są w pojęciach społeczno-ekonomicznych, takich jak np.: spożycie poszczególnych wyrobów przemysłowych w danym regionie kraju, wielkość transportu zbiorowego i indywidualnego, zainstalowane odbiorniki ciepła i energii elektrycznej itp. Procesy technologiczne są dokładnie opisane w modelu ich technicznymi i ekonomicznymi charakterystykami ujmującymi m.in. wydajność, jednostkowe zużycie energii i surowców itd. Zapotrzebowania na wyroby i energię wymuszają uruchomienie odpowiednich mocy produkcyjnych regionu lub kraju, na które narzucono wiele ograniczeń ekonomicznych i środowiskowych

W artykule przedstawiono model matematyczny typu MARKAL pojedynczego zakładu produkcyjnego przeznaczony do optymalizacji doboru technologii i zdolności produkcyjnych zapewniających pokrycie zapotrzebowania na produkowane wyroby przy minimalnych nakładach inwestycyjnych i kosztach eksploatacji urządzeń oraz opłat za użytkowanie środowiska w całym okresie planowania. W rozdziale 2 opisano zakład produkcyjny oraz problemy związane z jego funkcjonowaniem. Model matematyczny problemu planowania i sterowania przedstawiono w rozdziale 3. Rozdział 4 zawiera podsumowanie oraz wnioski końcowe.

2. Charakterystyka zakładu produkującego energię elektryczną i cieplną

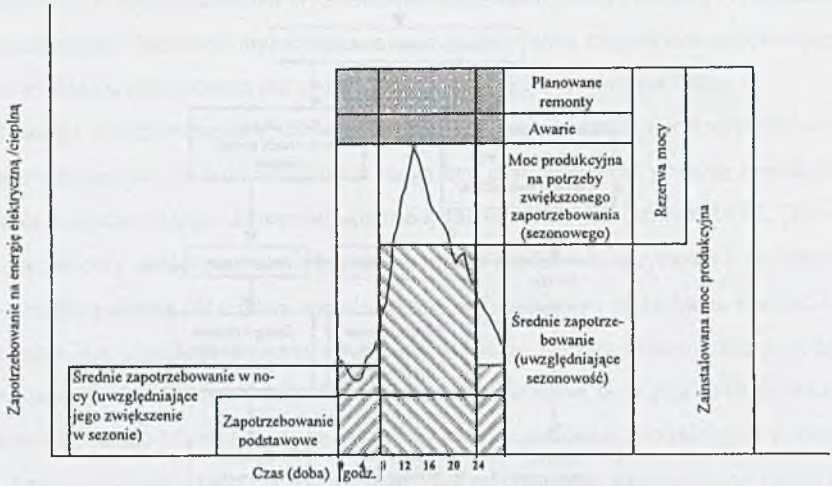
W analizowanej elektrociepłowni znajdują się cztery bloki energetyczne tworzące wydział elektryczny, w którym produkowane są prąd elektryczny, para technologiczna przeznaczona dla odbiorców przemysłowych i szpitali oraz woda grzewcza przekazywana do systemu ogrzewania miasta. Drugi wydział tworzy zespół sześciu kotłów wodnych dostarczający energię cieplną tylko w postaci wody grzewczej. Schemat zakładu przedstawia rys. 1.



Rys.1. Schemat elektrociepłowni
Fig.1. Block diagram of a thermal-electric power station

Istotny wpływ na przebieg sterowania procesem technologicznym ma nierównomierność zapotrzebowania na energię elektryczną i cieplną uzależniona zarówno od pory roku, jak i wahań w ciągu doby. W sezonie grzewczym, tj. od września do maja, energia cieplna jest produkowana w obu wydziałach. Zwykle uruchamiane są dwa lub trzy kotły, natomiast pozostałe stanowią rezerwę wykorzystywaną w czasie zwiększonego zapotrzebowania. Poza sezonem jedynie część pary wytworzonej przy produkcji energii elektrycznej jest dostarczana odbiorcom przemysłowym i szpitalom, przeważająca część ciepła nie jest wykorzystywana. W związku z wyżej opisanymi nierównomiernościami zapotrzebowania na energię elektryczną i cieplną konieczne jest zapewnienie rezerwy mocy, która uruchomiona w odpowiednim momencie pokryje okresowo zwiększony popyt na dany nośnik energii, zrekompensuje braki wynikające z przerw w produkcji spowodowane awariami oraz planowanymi remontami. Rysunek 2 przedstawia schemat typowej struktury wykorzystania zainstalowanej mocy przy produkcji energii elektrycznej lub cieplnej.

Zróżnicowanie zapotrzebowania występujące w ciągu roku zostało uwzględnione w modelu poprzez wprowadzenie trzech poziomów popytu różnych dla zimy, lata i pozostałych miesięcy. Także wahania dobowe dla potrzeb modelu opisano odmiennymi zapotrzebowaniami dla godzin nocnych i dziennych.



Rys.2. Struktura zainstalowanej mocy przy produkcji energii elektrycznej i cieplnej
Fig.2. Representation of electricity/heat - generation capacity

3. Model matematyczny planowania i sterowania produkcją oraz rozwoju elektrociepłowni

W rozdziale tym zostanie przedstawiony model matematyczny problemu planowania i sterowania produkcją oraz rozwoju elektrociepłowni.

W modelu każda technologia opisana jest za pomocą trzech zmiennych reprezentujących odpowiednio: nakłady inwestycyjne, zainstalowaną moc oraz moc wykorzystywaną. Dla każdej technologii uruchomiona moc jest ograniczona poprzez wielkość zainstalowanej mocy oraz możliwość wykorzystania tej mocy w danym okresie planowania. Wielkość produkcji jest proporcjonalna do uruchomionej mocy produkcyjnej. Także poziom emisji szkodliwych substancji do środowiska jest bezpośrednio związany z uruchomioną mocą produkcyjną. Zainstalowana moc w okresie planowania ulega zmniejszeniu i konieczne są nakłady inwestycyjne na jej odtworzenie lub powiększenie. W wielu przypadkach, w związku ze zbyt dużą uciążliwością dla środowiska oraz płaconymi karami za jego użytkowanie, bardziej opłacalne jest zastąpienie istniejącej technologii nową. Nowe technologie uruchamiane mogą być w dowolnym okresie, a ich moc przez pewien podokres nie wymaga ponoszenia nakładów inwestycyjnych.

Przy budowaniu modelu matematycznego typu MARKAL dla problemu sterowania i rozwoju elektrociepłowni przyjęto następujące warunki:

- Zapotrzebowania na wszystkie typy energii oraz surowce musi być zaspokojone poprzez produkcję za pomocą istniejących technologii, nowych technologii lub import.

- Nakłady inwestycyjne przeznaczone na pracujące technologie są przeznaczone zarówno na podtrzymanie zainstalowanej mocy, jak i zmniejszenie szkodliwej emisji do środowiska.
- Moc nowo zainstalowanej technologii jest dostępna dopiero w momencie jej całkowitego zainstalowania i jest przyjmowana jako stała w początkowym okresie jej wykorzystania.
- Czas uruchamiania nowej technologii jest niezależny od wielkości jej docelowej mocy i nie jest dłuższy niż jeden okres planowania (np. pięć lat).

3.1. Indeksy, parametry i zmienne

Indeksy

i typ technologii,
j typ nowej technologii,
k rodzaj energii, surowca, półwyrobu lub wyrobu (ELC – energia elektryczna, LTH – energia cieplna),
s dostawcy, odbiorcy,
t okres planowania,
v rodzaj emisji do atmosfery,
z pora roku (zima, lato, przejściowa – wiosna, jesień),
y pora dnia (dzień - d, noc - n).

Zmienne

F_{kstzy} przepływ typu k od dostawcy s w okresie t, porze roku z i porze dnia y,
U_{jt} 1, jeżeli nowa technologia typu i o wielkości j jest uruchamiana w okresie t, inaczej 0,
W_{it} nowa moc uruchomiona w okresie t związana z nakładami inwestycyjnymi w istniejącą technologię,
X_{itzy} uruchomiona moc produkcyjna istniejącej technologii i w okresie t w sezonie z i porze dnia y,
Y_{itzy} uruchomiona moc produkcyjna nowej technologii i w okresie t w sezonie z i porze y,
Z_{it} zainstalowana moc produkcyjna istniejącej technologii i w okresie t.

Parametry

a_{ij} wielkość zainstalowanej mocy j nowej technologii typu i,
b_{vt} jednostkowa opłata za użytkowanie środowiska podczas emisji substancji v w okresie t,
$c_i^{(0)}$ jednostkowy koszt stały związany z zainstalowaną technologią typu i,
$c_i^{(1)}$ jednostkowy koszt stały związany z zainstalowaną nową technologią typu i,
c_i^{X} jednostkowy koszt zmienny związany z użytkowaną istniejącą technologią i,
c_i^{Y} jednostkowy koszt zmienny związany z użytkowaną nową technologią i,
c_{kstzy}^{F} jednostkowy koszt zakupu energii/surowca typu k ze źródła s w okresie t, sezonie z oraz porze dnia y,
c_{kstzy}^{P} jednostkowa cena sprzedaży energii typu k ze źródła s w okresie t, sezonie z oraz porze dnia y,
C_t^{U} górny limit nakładów inwestycyjnych na nowe technologie w okresie t,
C_t^{W} górny limit nakładów inwestycyjnych na modernizację istniejących technologii w okresie t,
d_{ktzy} zapotrzebowanie na energię typu k w okresie t, sezonie z oraz porze dnia y,

$e_{iv}^{(o)}$ jednostkowa wielkość emisji typu v związana z uruchomioną, istniejącą technologią i,

$e_{iv}^{(1)}$ jednostkowa wielkość emisji typu v związana z uruchomioną nową technologią typu i,

epk_{itzy} współczynnik wykorzystania energii elektrycznej przez technologię typu i w okresie zwiększonego zapotrzebowania na energię w okresie t, sezonie z oraz porze dnia y,

er_{zy} współczynnik rezerwy mocy na przesył energii elektrycznej w sezonie z oraz porze y,

fr_{kzy} współczynnik wielkości zapotrzebowania na energię typu k w sezonie z oraz porze y,

$g_{ik}^{(o)}$ jednostkowa wielkość produkcji energii typu k związana z uruchomioną istniejącą technologią typu i,

$g_{ik}^{(1)}$ jednostkowa wielkość produkcji energii typu k związana z uruchomioną nową technologią typu i,

$h_{ik}^{(o)}$ jednostkowa wielkość zapotrzebowania na energię/surowce typu k związana z uruchomioną istniejącą technologią typu i,

$h_{ik}^{(1)}$ jednostkowa wielkość zapotrzebowania na energię/surowce typu k związana z uruchomioną nową technologią typu i,

hr_{zy} współczynnik rezerwy mocy na przesył energii cieplnej w sezonie z oraz porze dnia y,

l_i czas życia zainstalowanej technologii,

p_i jednostkowe nakłady na zainstalowanie nowej mocy technologii typu i,

pk_{itzy} współczynnik zainstalowanej mocy technologii typu i przeznaczony na pokrycie zwiększonego zapotrzebowania na energię elektryczną/cieplną w sezonie z oraz porze dnia y w każdym okresie planowania t,

q_i jednostkowe nakłady na powiększenie mocy istniejącej technologii typu i,

qs_{zy} współczynnik występowania sezonu z oraz pory dnia y w odniesieniu do roku kalendarzowego,

r_{it} moc znamionowa istniejącej technologii typu i w okresie t,

T horyzont planowania,

u_i współczynnik konwersji zainstalowanej mocy technologii typu i na jednostki produkcji rocznej,

α roczna stopa dyskontowa,

β_{it} współczynnik wykorzystania istniejącej technologii i w okresie t,

γ_{it} współczynnik wykorzystania nowej technologii i w okresie t,

η_k sprawność sieci dystrybucyjnej typ energii k.

ϕ_i współczynnik zmniejszenia opłaty za emisję substancji v związanej z technologią i

3.2. Model matematyczny problemu sterowania i rozwoju elektrociepłowni

Model matematyczny zadania planowania i sterowania produkcją oraz rozwojem elektrociepłowni składa się z funkcji celu oraz ograniczeń związanych z przepływem surowców i energii, wykorzystaniem zainstalowanych mocy produkcyjnych, zapewnieniem zwiększonego sezonowego zapotrzebowania na energię oraz nakładami na modernizację i wprowadzanie nowych technologii do produkcji.

- Funkcja celu

Funkcja celu minimalizuje łączne zdyskontowane nakłady inwestycyjne na nowe i istniejące technologie powiększone o koszty stałe i zmienne związane z zainstalowanymi i uruchomionymi mocami istniejących i nowych technologii oraz opłatami za użytkowanie środowiska. Zdyskontowane nakłady inwestycyjne wraz z kosztami są pomniejszone o zdyskontowane przychody ze sprzedaży energii elektrycznej i cieplnej.

$$
\begin{aligned}
MIN\ & \sum_t \frac{1}{(1+\alpha)^{n(t-1)}}\left(\sum_i\sum_j p_i a_{ij} U_{ijt} + \sum_i q_i W_i\right) + \\
& \sum_t \frac{1}{(1+\alpha)^{n(t-1)}}\left(\sum_{m=1}^{n}(1+\alpha)^{1-m}\right)*\left(\sum_i c_i^{(0)} Z_{it} + \sum_i\sum_j c_i^{(1)} a_{ij} U_{ij(t-1)} + \sum_i c_i^X X_{itzy} + \sum_i c_i^Y Y_{itzy}\right) + \\
& \sum_t \frac{1}{(1+\alpha)^{n(t-1)}}\left(\sum_{m=1}^{n}(1+\alpha)^{1-m}\right)*\left(\sum_k\sum_s\sum_z\sum_y c_{kstzy}^F F_{kstzy}\right) + \\
& \sum_t \frac{1}{(1+\alpha)^{n(t-1)}}\left(\sum_{m=1}^{n}(1+\alpha)^{1-m}\right)*\left(\sum_i\sum_v e_{iv}^{(0)} b_{vt} X_{it}(1-\phi_i) + \sum_i\sum_v e_{iv}^{(1)} b_{vt} Y_{it}(1-\phi_i)\right) - \\
& \sum_t \frac{1}{(1+\alpha)^{n(t-1)}}\left(\sum_{m=1}^{n}(1+\alpha)^{1-m}\right)*\left(\sum_k\sum_z\sum_y c_{ktzy}^P d_{ktzy}\right)
\end{aligned}
$$

- Przepływ energii i surowców

$$\sum_s F_{kstzy} + \sum_i g_{ik}^{(0)} X_{itzy} + \sum_i g_{ik}^{(1)} Y_{itzy} - \sum_i h_{ik}^{(0)} X_{itzy} - \sum_i h_{ik}^{(1)} Y_{itzy} \geq d_{ktzy},\ \forall k,t,z,y$$

Ograniczenia te zapewniają, że w każdym okresie planowania dla każdego typu surowca czy energii suma energii/surowców uzyskanych podczas produkcji oraz zakupionych ze źródeł zewnętrznych nie może być mniejsza od sumy zapotrzebowania na energię/surowce do produkcji oraz zapotrzebowania zewnętrznego.

- Zwiększone sezonowe zapotrzebowanie na energię

$$
\begin{aligned}
\frac{\eta_k}{1+er_{zy}}\left(\sum_i u_i pk_{itzy} Z_{it} + \sum_i\sum_j pk_{itzy} p_i a_{ij} U_{ijt} + \frac{1}{qs_{zy}}\sum_s F_{ktszy}\right) \geq & \sum_i h_{it}^{(0)} epk_{itzy} X_{itzy} + \sum_i h_{it}^{(1)} epk_{itzy} Y_{itzy} \\
& + \frac{1}{qs_{zy}}\sum_s d_{ktszy},\ \forall t,y,z;\ \ k = ELC
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\frac{\eta_k}{1+hr_{zy}}\left(\sum_i u_i pk_{itzy} Z_{it} + \sum_i\sum_j pk_{itzy} p_i a_{ij} U_{ijt}\right) \geq & \sum_k h_{it}^{(0)} epk_{ktzy} * \frac{fr_{kzd} + fr_{kzn}}{qs_{zd} + qs_{zn}} X_{it} \\
& + \sum_k h_{it}^{(1)} epk_{ktzy} * \frac{fr_{kzd} + fr_{kzn}}{qs_{zd} + qs_{zn}} Y_{it} + \frac{1}{qs_{zy}}\sum_s d_{ktszy},\ \forall t, z = w\ \ k; = LTH
\end{aligned}
$$

Pierwsze ograniczenie zapewnia zaspokojenie zwiększonego popytu na energię elektryczną w czasie sezonu i w określonej porze dnia. Drugie ograniczenie dotyczy zapotrzebowania na energię elektryczną. W obu ograniczeniach uwzględnione są zarówno istniejące, jak i nowe technologie, a także wewnętrzne zużycie energii w elektrociepłowni.

- Odtwarzanie zdolności produkcyjnych

$$Z_{it} - \sum_{s=t_0}^{t} W_{is} = r_{it}, \forall i,t; \quad t_0 = Max[1, t - l_i + 1]$$

Ograniczenia te zapewniają, że każdej istniejącej technologii zainstalowana moc produkcyjna jest równa sumie mocy znamionowej i mocy uzyskanej poprzez nakłady inwestycyjne w poprzednich okresach z wyłączeniem tych nakładów, które były dokonane wcześniej niż czas życia technologii.

- Wykorzystanie istniejącej technologii

$$X_{it} \le \beta_{it} Z_{it}, \quad \forall i,t$$

W ograniczeniach tych zapewniamy możliwość uruchomienia mocy produkcyjnej dla każdej technologii nie większej niż moc zainstalowana.

- Wykorzystanie nowej technologii

$$Y_{it} \le \gamma_{it} \sum_j \sum_{s=1}^{t-1} a_{ij} U_{jst}, \forall i,t$$

Uruchomienie mocy produkcyjnej dla każdej nowej technologii nie może być większe niż moc zainstalowana dla tej technologii.

- Dopuszczalne nakłady inwestycyjne

$$\sum_i \sum_j p_i a_{ij} U_{jit} \le C_t^U, \ \forall t$$

$$\sum q_i W_{it} \le C_t^W, \ \forall t$$

Nakłady ponoszone na uruchomienie nowych technologii nie mogą przekroczyć dysponowanych funduszy w każdym okresie planowania. Podobnie nakłady inwestycyjne na modernizację istniejących technologii nie mogą przekroczyć dysponowanych funduszy dla każdego okresu planowania.

W powyższym modelu zostały uwzględnione następujące uwarunkowania w zapotrzebowaniu na energię elektryczną (ELC) i cieplną (LTH) :

- odmienność dla każdego sezonu (zima, lato, wiosna, jesień),
- zmienność w ciągu dnia (dzień, noc),

Przedstawiony model można w łatwy sposób rozszerzyć poprzez wprowadzenie dodatkowych ograniczeń dotyczących wysokości nakładów ponoszonych na nowe inwestycje w odniesieniu do mocy uruchomionych w okresach poprzedzających.

4. Podsumowanie

Przedstawiony model matematyczny typu MARKAL problemu sterowania produkcją i rozwojem elektrociepłowni jest modelem programowania całkowitoliczbowego, w którym łączy się wielkość uruchamianych mocy produkcyjnych z nakładami inwestycyjnymi na istniejące i nowe technologie oraz uwzględnia wpływ na środowisko. Przeznaczony jest do optymalizacji doboru technologii i zdolności produkcyjnych elektrociepłowni zapewniających pokrycie zapotrzebowania na energię elektryczną i cieplną przy minimalnych nakładach inwestycyjnych i kosztach eksploatacji zastosowanych technologii oraz opłat związanych z użytkowaniem środowiska w całym okresie planowania.

Zmiany zachodzące w polskiej gospodarce zbliżające ją do gospodarki wolnorynkowej, także w sektorze nośników energii, wymagają od producentów i dystrybutorów dostosowania swoich strategii działania do potrzeb rynku typu giełdowego. W krajach Unii Europejskiej dystrybutorzy energii cieplnej i elektrycznej dokonują dwukrotnie w ciągu dnia zakupu energii analizując nowe warunki proponowane przez producentów. W przedstawionym modelu uwzględniono taką możliwość.

Dalsze prace prowadzone są w kierunku wyznaczenia strategii rozwoju elektrociepłowni ściśle powiązanej z wielookresowym modelem rozwoju regionu uwzględniającym ekonomiczne i środowiskowe aspekty.

LITERATURA

1. Berger C., Dubois R., Haurie A., Lessard E., Loulou R., Waaub J.P.: Canadian MARKAL: An advanced linear programming system for energy and environmental modelling. INFOR, vol.30, 1992, pp.222-239.
2. Fishbone L.G., Giesen G., Goldstein G., Hymmen H.A., Stocks K.J., Vos H., Wilde D., Zoelcher R., Balzer C., Abilock H.: User's Guide for MARKAL (BNL/KFA Version 2.0): A Multi-Period Linear Programming Model for Energy Systems Analysis. IEA, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 1983.
3. Korcyl A, Łebkowski P., Sawik T.: An LP Model for a Steel Mill Capacity Expansion Planning. Zeszyty Naukowe AGH, Automatyka, tom3, z.1, Kraków 1999, s.185-190.

4. Korcyl A., Łebkowski P., Sawik T.: Planowanie rozwoju miejskiej sieci ciepłowniczej w Krakowie. Zarządzanie w przemyśle. Teoria i praktyka. Wyzwania XXI wieku., AGH, Kraków 1999, s.509-514.
5. Sawik T.: Regional Development Planning Models for Environmental Management, Part I: A monolithic Approach. Zeszyty Naukowe AGH, Automatyka, Kraków 1997, s.481-487.

Recenzent: Prof.dr inż. T.Puchałka

Abstract

The paper presents mathematical programming model for production planning, control and capacity expansion problem for a thermal-electric power station. The formulation proposed is a multi-period, mixed-integer linear program. Given a forecast of demand of various types of energy over time horizon and the upper limits for environmental emissions, the problem objective is to modify the system structure so as to meet the demands and the environmental constraints at a minimum total discounted costs of investment and the system operation over a planning horizon. The restructuring plan obtained the capacity expansion and operational program including introduction new and deleting of some of the existing technologies to satisfy environmental constraints.