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

Eugeniusz TOCZYŁOWSKI, Artur WALCZAK, Mariusz KALETA
Politechnika Warszawska

ALGORYTM HARMONOGRAMOWANIA PRACY JEDNOSTEK WYTWÓRCZYCH W SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM [1]

Streszczenie. W pracy są prezentowane algorytmy opracowane dla problemu dobowego harmonogramowania pracy jednostek wytwórczych energii elektrycznej przez operatora systemu elektroenergetycznego, którego zadanie polega na bilansowaniu prognozy zapotrzebowania na energię za pomocą wyboru ofert sprzedaży energii składanych przez wytwórców konkurujących na rynku energii.

UNIT COMMITMENT ALGORITHM FOR THE POWER SYSTEM

Summary. We consider a unit commitment problem for the power system operator, who is responsible, under the centralized energy market rules, for scheduling power generation units in order to match the demand side with the supply offered by producers, who compete by offering bids on the spot market.

1. Harmonogramowanie pracy jednostek wytwórczych na rynku energii

W ramach prac projektowych nad rozwojem rynku bilansującego energii elektrycznej w Polsce powstał model tzw. Systemowego Ofertowego Rynku Energii Elektrycznej (SOREE) [5]. Na tym rynku operator centralnie zarządza, nadzoruje i rozstrzyga konflikty występujące pomiędzy uczestnikami rynku bilansującego poprzez planowanie pracy konkurujących jednostek wytwórczych.

Stronę podażową na rynku SOREE reprezentują konkurujący między sobą wytwórcy energii elektrycznej. Każda z jednostek wytwórczych składa raz dziennie ofertę cenową złożoną z ceny uruchomienia oraz jednostkowych cen wytwarzania energii. Ponadto każda jednostka wytwórcza określa charakteryzujący ją zestaw parametrów technicznych,

[1] Praca częściowo finansowana w ramach projektu KBN 8T11A00913

uwzględniany podczas doboru jednostek do dobowego planu pracy: minimalne i maksymalne zdolności produkcyjne oraz charakterystyki uruchomieniowe opisujące długotrwały proces włączania i synchronizacji jednostki z siecią przesyłową. Strona popytu jest reprezentowana przez zagregowaną krzywą zapotrzebowania na energię. Znane są dobowe prognozy popytu na energię elektryczną oraz wymagane rezerwy mocy w kolejnych godzinach doby.

Na podstawie ofert wszystkich wytwórców oraz przy uwzględnieniu ograniczeń globalnych związanych z wymaganiem pokrycia zapotrzebowania na energię, uwzględnieniem rezerw oraz wszystkich ograniczeń technicznych jednostek wytwórczych, operator rynku wybiera najlepsze oferty do realizacji i tworzy harmonogram pracy jednostek minimalizując sumaryczne koszty wytwarzania energii, przy założeniu jednolitej, rynkowej ceny sprzedaży energii w danej godzinie.

W pracy przedstawiamy nasze doświadczenia związane z opracowywaniem i rozwojem algorytmu harmonogramowania RO-KCO, który został zaimplementowany i wdrożony w fazie treningowej rozwoju rynku energii elektrycznej SOREE w Polsce. Cechą charakterystyczną zrealizowanej przez nas pracy była konieczność uzyskania w bardzo krótkim czasie (rzędu kilku tygodni) zadowalającego algorytmu dla trudnego problemu harmonogramowania już w pierwszej fazie wdrożenia. W dalszych fazach wdrożenia był możliwy rozwój algorytmu przez poszerzenie realizowanych funkcji związanych ze wspomaganiem decyzji operatora, z uwzględnieniem analizy wielokryterialnej, oraz doskonalenie algorytmu pod względem efektywności i szybkości uzyskiwanych rozwiązań.

2. Model matematyczny problemu

Na potrzeby referatu przedstawimy uproszczoną wersję matematycznego modelu rozważanego problemu harmonogramowania. Niech $h \in H$ oznacza zbiór kolejnych godzin horyzontu planowania (doby) oraz $j \in J$ określa zbiór jednostek wytwórczych na rynku ofertowym biorących udział w procesie ofertowym. Pokrycie prognozy zapotrzebowania D_h na energię w każdej godzinie doby wraz z zagwarantowaniem warunków bezpieczeństwa dostaw oznacza konieczność zapewnienia w całym 24-godzinnym dyskretnym horyzoncie planowania spełnienia ograniczeń globalnych dotyczących tzw. górnego i dolnego

poziomu rezerw dostępnych w aktualnie czynnych blokach cieplnych. W każdej godzinie h suma minimalnych zdolności produkcyjnych jednostek pracujących musi być mniejsza niż wartość zapotrzebowania D_h w tej godzinie pomniejszona o poziom rezerwy dolnej R_h^-. Analogicznie w każdej godzinie suma maksymalnych zdolności produkcyjnych jednostek pracujących musi być większa niż wartość zapotrzebowania w tej godzinie powiększona o poziom rezerwy górnej R_h^+. Każda jednostka wytwórcza $j \in J$ jest opisana zestawem parametrów określających minimalne i maksymalne zdolności produkcyjne $[P_{jh}^{\min}, P_{jh}^{\max}]$, parametry kosztowe oferty produkcji energii przez tę jednostkę - koszt rozruchu S_j oraz cenę ofertową k_j, a także parametry techniczne związane głównie z uruchamianiem jednostki. Po stronie wytwarzania (generacji) w problemie doboru występują jednostki wytwórcze elektrowni cieplnych pracujących na rynku systemowym oraz źródła zewnętrzne reprezentujące generację na rynkach lokalnych, planowaną pracę hydroelektrowni oraz wielkość wymiany zagranicznej (importu oraz eksportu). Źródła zewnętrzne nie uczestniczą w procesie ofertowym i są reprezentowane w sposób zagregowany, tzn. jest znana ich sumaryczna, planowana wielkość wytwarzania Z_h w kolejnych godzinach h horyzontu planowania,ponadto podawany jest ich zakres dopuszczalnej generacji $[Z_h^{\min}, Z_h^{\max}]$.

W kolejnych punktach rozdziału zostaną opisane poszczególne elementy zadania harmonogramowania: ograniczenia modelu dynamiki jednostek wytwórczych, ograniczenia rezerw mocy oraz model funkcji kosztów.

Model dynamiki jednostek wytwórczych

Oznaczmy przez $t \in T_j$ zbiór kolejnych godzin pełnego cyklu rozruchu jednostki j. Niech τ_{tj} oznacza ułamek mocy docelowej dostarczany przez jednostkę j na t godzin przed zakończeniem rozruchu. W celu określenia stanu, w jakim znajduje się jednostka wytwórcza, jest definiowana następująca zmienna decyzyjna:

$$v_{jh} = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli jednostka } j \text{ pracuje z mocą dyspozycyjną o godzinie } h, \\ 0 & \text{w przeciwnym przypadku.} \end{cases}$$

Dodatkowo dla wykrywania punktów, w których następują rozruchy jednostek, do modelu zostają wprowadzone pomocnicze zmienne binarne r_{jh} zdefiniowane następująco:

$$r_{jh} = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli jednostka } j \text{ może osiągnąć nominalną moc o godzinie } h, \\ 0 & \text{w przeciwnym przypadku.} \end{cases}$$

Zmienna binarna r_{jh} jest równa 1, gdy jednostka j osiąga nominalną moc o godzinie h.

Model dynamiki jednostek wytwórczych można przedstawić w następującej postaci:

$$v_{jh} - v_{j,h-1} \leqslant r_{jh} \quad \forall j \in J \; \forall h \in H \tag{1}$$

$$v_{jh} \geqslant r_{jh} \quad \forall j \in J \; \forall h \in H \tag{2}$$

$$v_{jh} + \sum_{t \in T_j} r_{j,h+t} \leqslant 1 \quad \forall j \in J, \; \forall h \in H \tag{3}$$

$$v_{jh} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \; \forall h \in H \tag{4}$$

Jeżeli jednostka nie pracowała w godzinie $h = 0$, to niezbędne są dodatkowe ograniczenia zabezpieczające przed zbyt wczesnym rozruchem:

$$\sum_{t \in T_j^0} r_{j,t-1} = 0 \quad \forall j \in J \tag{5}$$

przy czym T_j^0 jest zbiorem godzin początkowych, w których jest zabronione zakończenie rozruchu. Jeżeli $v_{j0} = 1$, to ograniczenie (5) wynika z (3) i nie jest konieczne.

Ograniczenia rezerw mocy

Pełny model bilansu mocy musi uwzględniać o każdej godzinie zarówno moc generowaną wtedy, gdy jednostki pracują już po uruchomieniu, jak i wtedy, gdy są w fazie rozruchu. Niech P_{jh} oznacza planowaną moc dostarczaną przez jednostkę j aktywną o godzinie h, natomiast P_{jh}^r – moc generowaną przez jednostkę j w godzinie h w przypadku, gdy jednostka znajduje się w fazie rozruchu. Moc generowana w przypadku, gdy jednostka znajduje się w fazie rozruchu, wyraża się następującą zależnością:

$$P_{jh}^r = \sum_{t \in T_j} r_{j,h+t} \tau_{tj} P_{j,h+t}^{\max} \tag{6}$$

O każdej godzinie h musi istnieć możliwość pokrycia zapotrzebowania wraz z rezerwą górną R_h^+ ponad prognozowane zapotrzebowanie D_h, czyli:

$$Z_h^{\max} + \sum_{j \in J} (v_{jh} P_{jh}^{\max} + P_{jh}^r) \geqslant D_h + R_h^+ \quad \forall h \in H \tag{7}$$

Ponadto o każdej godzinie h musi istnieć możliwość dopasowania możliwości wytwórczych do zmniejszonego zapotrzebowania, czyli pomniejszonego o rezerwę dolną R_h^- poniżej prognozowanego zapotrzebowania D_h:

$$Z_h^{\min} + \sum_{j \in J} (v_{jh} P_{jh}^{\min} + P_{jh}^r) \leqslant D_h - R_h^- \quad \forall h \in H \tag{8}$$

Poza godzinami rozruchu jednostki planowana moc dostarczana przez jednostkę musi spełniać nierówności:

$$v_{jh}P_{jh}^{\min} \leqslant P_{jh} \leqslant v_{jh}P_{jh}^{\max} \quad \forall j \in J,\ \forall h \in H \tag{9}$$

Ponadto musi być spełniony warunek na dopasowanie mocy do zapotrzebowania:

$$Z_h + \sum_{j \in J}(P_{jh} + P_{jh}^{r}) = D_h \quad \forall h \in H \tag{10}$$

Model funkcji kosztów

Z danych ofertowych dla każdej jednostki $j \in J$ są znane jej ceny ofertowe: stały składnik S_j kosztu pojedynczego uruchomienia j-tej jednostki oraz cena kontynuacji k_j, czyli krańcowa cena jednostkowa wytwarzania energii przez j-tą jednostkę.

W zadaniu jest minimalizowana suma kosztów podstawowych związanych z zakupem energii elektrycznej w horyzoncie planowania:

$$\min \left[\sum_{h \in H} KCO_h(D_h - Z_h) + \sum_{h \in H} \sum_{j \in J} S_j r_{jh} \right] \tag{11}$$

przy czym KCO_h jest tzw. *krańcową ceną ofertową*. W godzinie h zmienna KCO_h jest wyznaczana jako maksymalna spośród cen *kontynuacji* k_j dla zbioru jednostek aktywnych, czyli są spełnione warunki:

$$k_j v_{jh} \leqslant KCO_h \quad \forall j \in J,\ \forall h \in H \tag{12}$$

Funkcja celu ma charakter minimaksowy, co oznacza, że ceny zakupu energii KCO_h są ustalane na poziomie maksymalnej spośród cen kontynuacji k_j jednostek aktywnych.

3. Algorytm harmonogramowania - wersja podstawowa

Rozmiar rozważanego problemu harmonogramowania można zredukować, gdyż zmienne ciągłe P_{jh} modelu można wyeliminować. Mimo to problem doboru jednostek wytwórczych na SOREE jest szczególnie złożonym i specyficznym, wieloetapowym zadaniem optymalizacji dyskretnej. Problem różni się od klasycznej postaci zadania harmonogramowania pracy jednostek tym, że w funkcji celu występują ceny krańcowe KCO_h wiążące wszystkie jednostki wytwórcze. Jest to zatem minimaksowe zadanie optymalizacji

dyskretnej z dużą liczbą trudnych do spełnienia warunków i ograniczeń wynikających z charakterystyki właściwości technicznych jednostek wytwórczych oraz wymagań globalnych na zapotrzebowanie i rezerwy mocy. Rozmiar rzeczywistego zadania, mierzony liczbą zmiennych i ograniczeń, jest stosunkowo duży.

Ze względu na nietypową postać zadania oraz złożoność problemu, rozwiązanie problemu doboru jednostek w sposób gwarantujący całkowitą optymalność w zadowalającym czasie okazało się niemożliwe mimo wykorzystania jak najlepszych metod i technik optymalizacji dyskretnej, w tym efektywnych pakietów komercyjnych CPLEX i ILOG [8].

Zaproponowano zatem przybliżony algorytm konstrukcyjny [6], wykorzystujący podejście strukturalne optymalizacji, polegające na głębokiej analizie właściwości problemu doboru jednostek, a następnie zaprojektowaniu faz etapowego algorytmu harmonogramowania rozwiązującego podproblemy optymalizacji najbardziej użyteczne w poszczególnych fragmentach algorytmu przy uwzględnieniu specyficznych właściwości zagadnienia. W algorytmie wykorzystuje się z jednej strony właściwości problemu doboru jednostek, a z drugiej strony, po stronie metod i technik optymalizacji, te metody elementarne, które okazują się w danym fragmencie algorytmu najbardziej użyteczne. Do rozwiązania podproblemów użyto efektywnych pakietów obliczeniowych (CPLEX, ILOG) specjalizowanych algorytmów optymalizacji dyskretnej. Opracowany algorytm konstrukcyjny RO-KCO+ (Rynek Ofertowy - Krańcowa Cena Ofertowa) pozwala na szybkie znalezienie dopuszczalnych i stosunkowo dobrych rozwiązań problemu. Ze względu na objętość pracy, algorytm ten zostanie omówiony tylko opisowo, jego szczegóły można znaleźć w cytowanej literaturze źródłowej [6, 7].

W algorytmie RO-KCO+ wyznacza się w danej godzinie zestaw jednostek aktualnie pracujących, odstawianych lub uruchamianych, badając, czy np. uruchomienie lub odstawienie danej jednostki w rozważanej godzinie, choć chwilowo korzystne, nie spowoduje trudności w zapewnieniu wymaganego zakresu rezerw lub nie przyczyni się do poniesienia wysokich kosztów odstawiania i uruchamiania innych jednostek w dalszej części doby.

Fazy algorytmu. Algorytm rozpoczyna działanie od regularyzacji i analizy kształtu krzywej prognozy popytu na moc. Na tej podstawie horyzont planowania jest dzielony na etapy, w których krzywa prognozy popytu zachowuje cechy monotoniczności. W rezultacie są wyznaczane tzw. doliny, szczyty oraz etapy narastania i opadania. Wyodrębnienie

etapów odbywa się na podstawie analizy średniej arytmetycznej wartości godzinowych dolnej i górnej krzywej zapotrzebowania. Realizowana tzw. *regularyzacja krzywych zapotrzebowania* ma na celu wygładzenie krzywych zapotrzebowania (krzywej nominalnej zapotrzebowania powiększonej i odpowiednio pomniejszonej o rezerwę górną i dolną) i w ten sposób otrzymanie krzywych monotonicznych w danym etapie. Regularyzacja ma miejsce każdorazowo dla etapów wzrostu i opadania krzywej zapotrzebowania. W jej wyniku może nastąpić restrykcja zadania przez zwiększenie wymaganych poziomów rezerw. Jeśli zadanie zostanie w ten sposób nadmiernie usztywnione, dokonywane jest skrócenie długości etapów.

Następnie w kolejnych krokach uruchamiane są procedury planowania wykorzystujące właściwość monotniczności krzywej zapotrzebowania. W podejściu tym charakterystycznymi godzinami, mającymi wpływ na plan pracy w całej dobie, są godziny najwyższego szczytu i najniższej doliny krzywej zapotrzebowania. Wyznaczenie zestawu jednostek w tych godzinach silnie wpływa na harmonogram uzyskany w pozostałych godzinach horyzontu.

Działanie procedury poszukiwań rozwiązań jest dalej zróżnicowane w zależności od rodzaju etapów. W dalszej części algorytmu jest wykonywany złożony, dynamiczny algorytm poszukiwań zestawu jednostek aktualnie uruchamianych przy narastającej krzywej popytu oraz algorytm odstawiania jednostek przy malejącej krzywej popytu. Wynikowy algorytm jest stosunkowo złożony i realizuje niejawny przegląd możliwych rozwiązań na horyzoncie złożonym z wielu godzin. Jego celem jest otrzymanie harmonogramu jak najtańszego z punktu widzenia sumarycznego kosztu w całym okresie planowania i związanego zarówno z kosztem uruchamiania jednostek, jak i bezpośrednim kosztem zakupu energii dostarczanej przez jednostki już uruchomione.

4. Rozszerzenia algorytmu

Mimo iż podstawowa wersja algorytmu RO-KCO+ zazwyczaj znajduje dobre rozwiązania w krótkim czasie, w ramach dość długiej historii rozwoju i usprawnień algorytmu konstrukcyjnego wyszukiwane były specyficzne sytuacje, dla których uzyskane wyniki można było poprawić – w ten sposób uzyskiwano modyfikacje i rozszerzenia podstawo-

wej wersji algorytmu [2, 3, 4]. Ponadto system planowania pracy jednostek wytwórczych był rozwijany w celu realizacji nowych wymagań funkcjonalnych formułowanych przez operatora systemu.

System wspomagania decyzji operatora

W praktyce funkcjonowania rynku bilansującego energii elektrycznej operator systemu musi uwzględniać inne, niekosztowe kryteria oceny planów pracy jednostek wytwórczych, np. stopień realizacji kontraktów długoterminowych, miary stopnia elastyczności składu jednostek oraz ograniczenia systemowe i wymagania bezpieczeństwa systemu elektroenergetycznego. Dlatego też został zaprojektowany nadrzędny moduł wspomagania decyzji (DSS), który pozwala na uwzględnianie dodatkowych kryteriów poprzez interaktywne narzucanie przez operatora systemu odpowiednio dobieranych restrykcji problemu [9]. Wykorzystując go operator ma możliwość interaktywnego tworzenia harmonogramu uwzględniając różnorodne kryteria. W trakcie procesu poszukiwania najlepszego rozwiązania wyznaczane są wartości następujących kryteriów jakości:

- *Koszt całkowity.* Jest to całkowity koszt zakupu energii w ciągu doby, uwzględniający dane ofertowe jednostek, w tym koszty rozruchu.
- *Zapas rezerwy górnej.* Jest to zapas górnej rezerwy mocy w "najgorszej" godzinie harmonogramu. Przez zapas górnej rezerwy mocy rozumieć należy różnicę między sumą mocy maksymalnych, którą mogą generować pracujące jednostki, a prognozą zapotrzebowania powiększoną o wymagany górny poziom rezerw.
- *Zapas rezerwy dolnej.* Jest to zapas dolnej rezerwy mocy w "najgorszej" godzinie harmonogramu. Przez zapas dolnej rezerwy mocy rozumieć należy różnicę między prognozą zapotrzebowania zmniejszoną o wymagany dolny poziom rezerw a sumą mocy minimalnych, którą mogą generować pracujące jednostki.
- *Energia kontraktowa.* Jest to procentowa ilość energii wytwarzanej przez jednostki realizujące zobowiązania kontraktowe w stosunku do energii całkowitej.
- *Zmiana elastyczności.* Współczynnik ten ma za zadanie oceniać wpływ wyboru pracujących jednostek kontraktowych na poprawę lub pogorszenie się wymagań dotyczących zakresów regulacyjności pozostałych jednostek.

W pierwszym kroku działania systemu algorytm RO-KCO+ generuje propozycję rozwiązania podając harmonogram możliwe bliski optymalnemu z punktu widzenia sumarycznych kosztów generacji. Następnie operator może zmieniać tak utworzony harmonogram wymuszając odstawienia lub uruchomienia jednostek wytwórczych i ponownie uruchamiając algorytm optymalizacyjny uwzględniający naniesione preferencje. Proces można powtarzać wielokrotnie generując listę planów pracy. Poszczególne rozwiązania można przeglądać, a wraz z kształtem otrzymanego harmonogramu podawane są również wartości poszczególnych kryteriów jego oceny. Operator ma możliwość powrotu do dowolnego wcześniej wybranego rozwiązania, wprowadzenia innych preferencji i kontynuowania poszukiwań. Automatycznie obliczane wartości wskaźników pozwalają mu zorientować się także w kosztach poszczególnych ograniczeń oraz dokonać analizy parametrycznej ograniczeń. Wielokrotnie przeprowadzony proces optymalizacji oraz kształtowane doświadczeniem preferencje poszukiwania rozwiązań umożliwiają znalezienie harmonogramu nie tylko zapewniającego niewielki koszt całkowity, ale również zaspokojenie innych wymagań, w tym m.in. dotyczących bezpieczeństwa systemu lub stopnia realizacji kontraktów długoterminowych.

System wspomagania decyzji potwierdził swoje zalety łącząc skuteczność algorytmów optymalizacji minimalnokosztowej z elastycznością rozwiązań zadań analizy wielokryterialnej. Jego wykorzystanie stanowiło również źródło kierunków usprawnień i modyfikacji algorytmu bazowego.

Algorytm poprawy rozwiązań

Po wielu, trwających ponad rok pracach i eksperymentach uzyskano ostateczną, najbardziej efektywną wersję algorytmu konstrukcyjnego RO-KCO+ osiągając pewne nasycenie w tym kierunku rozwoju. Ewentualne dalsze modyfikacje algorytmu RO-KCO+ istotnie zwiększające jego efektywność, o ile to jest w ogóle możliwe, musiałyby bazować na opracowaniu zupełnie nowych modułów optymalizacyjnych, odbiegających od ogólnych założeń strukturalnego algorytmu konstrukcyjnego [6]. W aktualnych warunkach przyjęto założenie, że wewnętrzna struktura algorytmu RO-KCO+ nie będzie dalej modyfikowana. Powstało pytanie, czy mimo to istnieje możliwość poprawienia efektywności algorytmu

konstrukcyjnego, np. poprzez randomizację.

W pracy [4] opracowano algorytm poprawy rozwiązań, przy założeniu że może być dokonywana jedynie nadrzędna optymalizacja w stosunku do autonomicznego modułu optymalizacyjnego RO-KCO+. Interakcja z algorytmem RO-KCO+ jest realizowana poprzez mechanizm parametrycznej restrykcji problemu uzyskiwanej w module wspomagania decyzji przez odpowiedni wybór wartości parametrów nadrzędnych za pomocą symulowanego wyżarzania.

Przestrzeń poszukiwanych rozwiązań może być zawężana w wyniku arbitralnie podjętych decyzji operatora systemu wspomagania decyzji DSS. W algorytmie RO-KCO+ można wyróżnić zmienne odpowiadające najwyższemu szczytowi i najniższej dolinie zregularyzowanej krzywej zapotrzebowania. Plan pracy w tych godzinach jest wyznaczany poprzez rozwiązanie zadania minimalnokosztowego doboru jednostek w pojedynczej godzinie (DJS), przy uwzględnieniu szacunkowych kosztów generacji w dłuższym horyzoncie planowania. Harmonogram pracy w pozostałych godzinach powstaje w wyniku wypełnienia macierzy v pomiędzy wyróżnionymi godzinami za pomocą specjalizowanych algorytmów, przy uwzględnieniu już ustalonego harmonogramu dla szczytu i doliny. Zatem harmonogram zależy od doboru zestawu jednostek w wyróżnionych godzinach — najwyższym szczycie i najniższej dolinie. Harmonogram w wyróżnionych godzinach może być jądrem decyzyjnym całego zagadnienia.

Restrykcja przestrzeni dopuszczalnych rozwiązań jest zdefiniowana przez macierz $a = (a^S, a^D)$ złożoną z wektorów parametrów a^S dla godziny najwyższego szczytu oraz a^D dla godziny najniższej doliny. Parametr a_j^h przyjmuje wartość 1, jeżeli jednostka $j - ta$ musi pracować w godzinie h, wartość 0, jeżeli jednostka ta nie może pracować w godzinie h, lub wartość c, jeżeli nie nakładamy żadnych restrykcji na plan pracy jednostki j w godzinie h, gdzie $h \in \{S, D\}$. Element v_{jh} jest równy a_j^h, gdy $a_j^h \in \{0, 1\}$ dla $h \in \{S, D\}$ lub v_j^h może przyjmować wartości ze zbioru $\{0, 1\}$ dla pozostałych j, h.

Proces harmonogramowania pracy jednostek wytwórczych przez algorytm RO-KCO+ jest wrażliwy na wyróżnione zmienne odpowiadające parametrom a^S i a^D. W wyniku zastosowania procedur algorytmu RO-KCO+ jądro zadania złożone z wektorów a^S i a^D przekształcane jest w harmonogram pracy na całym horyzoncie planowania:

$$\{J = (a^S, a^D)\} \rightarrow v. \tag{13}$$

Przestrzeń argumentów a^S i a^D zadania nadrzędnego jest znacząco mniejsza niż przestrzeń rozwiązań dopuszczalnych całego zadania. Jednocześnie zmienne decyzyjne zadania nadrzędnego pozwalają na wyznaczenie całej macierzy v za pomocą algorytmu RO-KCO+. W ujęciu tym możemy spojrzeć na algorytm RO-KCO+ jako na przybliżony, szybki algorytm optymalizacji lokalnej.

Dekompozycja zadania prowadzi zatem do dwuwarstwowej struktury algorytmicznej. W warstwie nadrzędnej wyznaczane są kluczowe parametry RO-KCO+ - wektory a^S i a^D. Przestrzeń tych parametrów jest przeszukiwana przy wykorzystaniu algorytmu symulowanego wyżarzania. Warstwa zadania podrzędnego polega na uruchomieniu algorytmu RO-KCO+ z zadanymi przez wyższą warstwę parametrami. W wyniku uzyskiwany jest koszt harmonogramu pozwalający ocenić parametry a. W pracy [4] przeprowadzono porównanie różnych wersji algorytmu RO-KCO+ z wykorzystaniem modułu randomizowanego poszukiwania rozwiązania za pomocą symulowanego wyżarzania. Dla rzeczywistych danych ofertowych z fazy treningowej SOREE uzyskiwana redukcja kosztu dobowego zakupu energii była rzędu kilkuset tysięcy złotych (ok. 1 %).

LITERATURA

1. Ingberg L., *Simulated Annealing: Practice versus Theory*, J. Mathl. Comput. Modelling, 8, pp. 29-57, 1993.
2. Kaleta M., Walczak A.: *Algorytm adaptacyjny planowania jednostek wytwórczych w trakcie wznoszenia krzywej zapotrzebowania modelu SOREE*, Raport IAiIS nr 99-52, Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej, Politechnika Warszawska, Warszawa 1999.
3. Kaleta M., Walczak A.: *Algorytm poprawy harmonogramu pracy jednostek wytwórczych na styku doby X-1 i X* , raport IAiIS nr 99-48, Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej, Politechnika Warszawska, Warszawa 1999.
4. Kaleta M., Toczyłowski E., Walczak A.: *Randomizacja algorytmu harmonogramowania pracy jednostek wytwórczych na rynku energii elektrycznej* (w przygotowaniu)
5. *Podstawowe zasady systemowego rynku ofertowego (poolu)*, Energoprojekt-Consulting S.A., Warszawa, czerwiec 1997.
6. Toczyłowski E.: *Koncepcja algorytmu harmonogramowania pracy jednostek wytwórczych na ofertowym rynku energii elektrycznej*, Raport IAiIS, Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej, Politechnika Warszawska, Warszawa, styczeń 1998.
7. Toczyłowski E., Walczak A.: *Algorytm harmonogramowania pracy jednostek wy-*

twórczych na ofertowym rynku energii elektrycznej, Materiały XIII Krajowej Konferencji Automatyki, Opole, 21-24 września 1999, str. 139-144, 1999.

8. Toczyłowski E. i inni *Analiza przydatności oprogramowania komercyjnego CPLEX i ILOG do rozwiązywania problemów optymalizacji dyskretnej dla modeli planowania pracy jednostek wytwórczych bez ograniczeń i z ograniczeniami systemowymi (ROPLAN)*, Centrum Badawcze Energetyki i Ochrony Środowiska, Politechnika Warszawska, Warszawa 1998.
9. Walczak A., Toczyłowski E., Granat J., Fleszar K.: *Wspomaganie decyzji dobowego planowania pracy jednostek wytwórczych na rynku energii elektrycznej*, Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej OPE'99, Jachranka, 7-8 października 1999, str.32-42.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. M. Zaborowski

Abstract

A unit commitment scheduling problem for the power system operator under the centralized energy market rules differs from the classical one by assumption, that the price for energy in each hour set by the auction rules is the marginal clearing price determined by the most expensive active generation unit. The System Operator is responsible for scheduling power generation units in order to match the demand side with the supply offered by producers, who compete by offering bids on the spot market. The aim of this unit commitment problem is to minimize the total cost of buying energy over a 24 hour horizon, including start-up costs. The schedule must satisfy all capacity constraints, start-up characteristics of generation units, and systems constraints which assure sufficient margins for lower and upper hot power reserves in the system. We present a constructive scheduling algorithm for this problem, its modifications, and present the decision support system designed for the System Operator of the Polish energy spot market SOREE.