ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1978
Seria: Automatyka z. 44 Nr kol. 580

Konrad Wala
Akademia Górniczo-Hutnicza

HEURYSTYCZNY ALGORYTM OPTYMALIZACJI DYSKRETNYCH PROCESÓW PRODUKCYJNYCH

Streszczenie. Omówiono heurystyczny algorytm optymalizacji planów kalendarzowych EVOL. W jego strukturze wykorzystano elementy ewolucyjnego szukania. Informacje uzyskane w poprzedzających symulacjach jest wykorzystana do wprowadzania w kolejnych iteracjach częściowych zmian funkcji priorytetu.

1. Wprowadzenie

Wzrost skali i tempa dyskretnych procesów produkcyjnych zwrócił uwagę na rolę sterowania tych procesów za pomocą planów kalendarzowych (harmonogramów). Ustalając terminy wykonania oddzielnych operacji produkcyjnych i wykorzystania do tego celu określonych zasobów (maszyn), plan kalendarzowy jest środkiem koordynacji pracy odcinków produkcyjnych. Od tego, według jakiego planu pracuje zakład produkcyjny, zależy rytmiczność produkcji, czas trwania postojów maszyn, objętość niezakończonej produkcji oraz czas trwania cyklu produkcyjnego. Źle wypracowany plan kalendarzowy jest przyczyną pozornego deficytu maszyn, środków transportowych itp. i prowadzi do oczekiwania na zwolnienie maszyn na jednych odcinkach produkcyjnych, podczas gdy w tym samym czasie inne maszyny są niedociążone. Z przesłanek tych wynika ważność zadań optymalizacji planów kalendarzowych.

Zadanie planowania procesu produkcyjnego zakłada znajomość jego modelu matematycznego, który zawiera dwie podstawowe składowe: zbiór dopuszczalnych planów D oraz kryterium jakości Q(d), $d \in D$. Zakłada się, że zbiór dopuszczalnych planów D jest określony w sposób algorytmiczny, tj. istnieje algorytm symulacyjny a(e) (e-numer symulacji) określający pewną procedurę, która pozwala za skończoną liczbę kroków otrzymać element $d \in D$ [1] :

$$D = \{ d : \langle d, Q(d) \rangle = a(e) : e = 1,2,\ldots \} .$$

Zaletą tak określonego zbioru dopuszczalnych planów D jest możliwość wyznaczania jego elementów dla dużych zadań za pomocą algorytmu symulacyjnego. Natomiast podstawowym mankamentem jest nieznajomość własności zbioru D, co nie pozwala stosować regularne metody poszukiwania optymalnego planu. W tej sytuacji do szukania planu optymalnego wykorzystuje się metody heurystycznej symulacji. Wadą metod heurystycznych, zresztą wcale nie przeszkadzającą w ich szerokim stosowaniu, jest brak możliwości oceny różnicy wartości kryterium jakości rozwiązania otrzymanego za pomocą metody heurystycznej i rozwiązania optymalnego.

Planowanie kalendarzowe w zakładzie produkcyjnym wymaga uzgodnienia dwóch kryteriów oceny planu: kryterium oceniającego jakość wypracowanego planu (kryterium $Q(d)$) oraz kryterium oceniającego jakość procesu wypracowywania planu (czas obliczeń na maszynie cyfrowej : $T_{obl}(d)$). Przez efektywny plan kalendarzowy będziemy rozumieć plan, który z jednej strony zapewnia realizację programu produkcyjnego przy zadowalającej wartości kryterium jakości, a z drugiej strony czas obliczeń związany z otrzymaniem tego planu nie przekracza wartości dopuszczalnej. Ocenę efektywności planu kalendarzowego można albo powierzyć ekspertowi lub wykonać ją w sposób sformalizowany sprawdzając spełnienie warunku:

$$g\left(Q(d)\ ,\ T_{obl}(d)\right) \leqslant 0\ .$$

2. Algorytm symulacyjny dyskretnego procesu produkcyjnego

Przyjęto, że zasoby zakładu produkcyjnego można podzielić na K grup (zbiorów) C_k, $k = \overline{1,K}$, ekwiwalentnych maszyn $c_{kn} \in C_k$, $n = \overline{1,N_k}$, które zgodnie z ustaloną technologią zdolne są wykonywać określone czynności produkcyjne, zwane operacjami. Zakłada się, że wyprodukowanie wyrobu $x_r = \langle \{O_{rj};\ j=\overline{1,J_r}\},\ G_r \rangle$ asortymentu $r = \overline{1,R}$ polega na wykonaniu operacji ze zbioru $\{O_{rj}\ ;\ j=\overline{1,J_r}\}$, z uwzględnieniem warunku poprzedzania G_r [4], gdzie:

$$O_{rj} = \langle L_{rj},\ T_{rj} \rangle ; \quad j = \overline{1,J_r}\ ;$$

J_r - ilość operacji koniecznych do wyprodukowania wyrobu x_r ;
L_{rj} - numer grupy maszyn, przy pomocy których może być wykonana operacja O_{rj}
T_{rj} - czas trwania operacji O_{rj} ;
G_r - relacja określająca dopuszczalną ze względu na warunki technologiczne kolejność wykonania operacji. $\langle O_{rj},\ O_{rj'} \rangle \in G_r$, jeżeli operacja $O_{rj'}$ nie może się rozpocząć, dopóki nie jest wykonana operacja O_{rj}.

Funkcjonowanie algorytmu a(e) polega na modelowaniu przebiegu procesu produkcyjnego w czasie związanego z wytwarzaniem wyrobów asortymentów określonych przez program produkcyjny $V = \{v_{ri}\ ;\ r = \overline{1,R}\ ;\ i = \overline{1,I_r}\}$;

I_r - ilość zaplanowanych wyrobów asortymentu r ;
v_{ri} - czas, po którym można rozpocząć produkcję wyrobu x_{ri}, $i=\overline{1,I_r}$.

W dalszym ciągu indeksem i będą oznaczane elementy i zbiory mające związek z wyrobem x_{ri}, na przykład O_{rji} oznaczać będzie operację O_{rj} wyrobu x_{ri}.

Modelując przebieg procesu, algorytm symulacyjny określa dla istotnych chwil czasu t (chwil, w których następuje istotna zmiana stanu procesu) zbiory $A_k(t)$ operacji gotowych do wykonania w chwili t na maszynach C_k, zbiory $B_k(t) \subset C_k$ maszyn nieobciążonych w chwili t oraz zbiory $U_k(t)$, k=1,K. Elementami zbioru $U_k(t)$ są pary $\langle O_{rji},\ c_{kn} \rangle$. Pierwszą komponentą pary jest operacja O_{rji} wybrana ze zbioru $A_k(t)$ zgodnie z relacją:

$$O_{rji} = \arg \max_{O'_{rji} \in A_k(t)} w(O'_{rji});\ k=L_{rji}$$

i przeznaczona do wykonania w chwili t przy pomocy maszyny $c_{kn} \in B_k(t)$ -

- druga komponenta. Funkcja priorytetu $w=w(O_{rji})$ przypisuje każdej operacji O_{rji} wartość priorytetu, co pozwala na drodze porównywania priorytetu operacji oczekujących na wykonanie przy pomocy maszyn określonej grupy, wyznaczyć tę operację, którą wykonuje się w pierwszej kolejności.

Otrzymany w wyniku symulacji dopuszczalny plan kalendarzowy jest następującym zbiorem:

$$d = \bigcup_{t \in [0,T_o)} d_t \;;$$

$$d_t = \{ \langle t_{rji}, c_{kn} \rangle : \langle O_{rji}, c_{kn} \rangle \in U_k(t) \;;\; t_{rji} = t \;;\; k = L_{rji},\; k=\overline{1,K} \};$$

T_o - horyzont planowania ;

t_{rji} - moment rozpoczęcia operacji O_{rji}.

Dla zadanych V, $\{C_k\}$ komponenty planu kalendarzowego są wyznaczone przez wykorzystaną w algorytmie symulacyjnym funkcję priorytetu, co zanotujemy : $a(e) = a(w_e)$.

Opisana poniżej metoda optymalizacji planów kalendarzowych bazuje na informacji o przebiegu procesu produkcji w postaci funkcji [3] :

$$y(t) = \langle y_1(t), y_2(t), \ldots, y_K(t) \rangle \;,\; t = \overline{0,T_o} \;;$$

$$y_k(t) = \#A_k(t) - \#B_k(t), \quad k = \overline{1,K} \;;$$

$\#X$ - moc zbioru X .

Funkcje $y_k(t)$ informują o chwilowej efektywności organizacji obciążenia grup maszyn C_k, a mianowicie dla t, dla których :

- $y_k(t) > 0$: grupa maszyn C_k jest wąskim gardłem-zwiększa to długość cyklu produkcyjnego wyrobów i objętość niezakończonej produkcji;
- $y_k(t) < 0$: istnieją maszyny grupy C_k nie wykorzystane do procesu produkcyjnego - rośnie czas realizacji programu produkcyjnego i koszt produkcji wyrobów.

Ponieważ zbiory $A_k(t)$ i $B_k(t)$ są generowane w trakcie funkcjonowania algorytmu symulacyjnego, stosowany będzie także następujący zapis:

$$\langle d, Q(d), y(t) \rangle = a(w_e) \;.$$

3. Heurystyczna metoda symulacji

Reguły priorytetu, używane zwykle w postaci funkcji priorytetu, są w swej istocie prawami sterowania ze sprzężeniem zwrotnym według bieżącego stanu układu. W trakcie badań eksperymentalnych stwierdzono, że znalezienie uniwersalnej funkcji priorytetu dającej efektywne plany kalendarzowe nie jest możliwe oraz że dla każdej funkcji priorytetu istnieją zadania, dla których dana funkcja daje rozwiązania bliskie optymalnym oraz zadania, dla których otrzymujemy złe wyniki [2] . W związku z tym istnieje zagadnienie wyznaczania efektywnej funkcji priorytetu. Jedna z metod poszukiwania efektywnej funkcji priorytetu polega na częściowej zmianie funkcji priorytetu w kolejno wykonywanych symulacjach procesu produkcyjnego: $w_{e+1}(O_{rji}) = w_e(O_{rji}) + \Delta w_e(O_{rji})$.

Przykłady wprowadzania zmian:

- sprawdza się terminy wykonywania wyrobów i w przypadku przekroczenia terminu wykonania przez określony wyrób, zwiększa się priorytet wszystkich

operacji danego wyrobu lub tylko operacji odpowiedzialnych za opóźnienie;
- wykrywa się operacje o maksymalnej średniej wartości oczekiwania na wykonanie w każdym asortymencie i zwiększa się poziom ich priorytetu ;
- wylicza się czas przetrzymania każdego wyrobu i zwiększa poziom priorytetu wszystkich operacji wyrobu o największym czasie przetrzymania.

W strukturze prezentowanego algorytmu poszukiwania efektywnego planu kalendarzowego EVOL zastosowano elementy ewolucyjnego szukania ; częściowe zmiany funkcji priorytetu $\Delta w_e(O_{rji})$ są określane na podstawie informacji otrzymanej z symulacji poprzedzającej w postaci funkcji $y(t)$.

Schemat ewolucyjnego szukania polega na wykonaniu następujących czynności [1, s. 94]. Do zbioru planów dopuszczalnych D rzucamy punkt d_o, wokół tego punktu wyznaczamy otoczenie $\Delta_1 \subset D$. Następnie rzucamy punkty d_1^s, $s=\overline{1,S_1}$ do otoczenia Δ_1 tak długo, dopóki nie znajdziemy punkt $d_1^{S_1}$ bliżej niż d_o położony od optimum /tutaj odległość między punktami mierzy się różnicą wartości kryterium jakości/. Z kolei wokół punktu $d_1^{S_1}$ wyznaczamy otoczenie $\Delta_2 \subset D$ i rzucamy w nie punkty d_2^s, $s=\overline{1,S_2}$ do tej pory póki nie znajdziemy punkt $d_1^{S_1}$ położony bliżej od optimum niż punkt $d_1^{S_1}$ itd. Jest to więc procedura wieloetapowa; podczas każdego etapu m=1,2,.... rzucamy punkty do obszaru $\Delta_{m+1} \subset D$ /wyznaczonego wokół najlepszego rozwiązania etapu m: $d_m^{S_m}$, tak długo, dopóki nie zostanie znaleziony punkt $d_{m+1}^{S_{m+1}}$ położony bliżej od optimum niż punkt $d_m^{S_m}$. Dla przypadku minimalizacji kryteria jakości możemy napisać:

$$Q(d_m^{S_m}) = \min_s \left\{ Q(d_m^s) \right\}; \quad Q(d_o^{S_o}) > Q(d_1^{S_1}) > Q(d_2^{S_2}) > \ldots\ldots$$

Opis algorytmu optymalizacji EVOL /Rys.1/.

1/ Na etapie wstępnym wybiera się wyjściową funkcję priorytetu $w_o = w_o(O_{rji})$.

2/ Rzuty punktu d_m^s do zbioru $\Delta_m \subset D$ realizuje się poprzez wykonanie symulacji:

$$\langle d_m^s , Q_m^s \rangle = a(w_m^s), \quad s = \overline{1,S_m} ;$$

gdzie:

$$w_m^s(O_{rji}) = w_{m-1}^{S_{m-1}}(O_{rji}) + \Delta w_m^s(O_{rji});$$

Δw_m^s - s-ta próba korekcji funkcji priorytetu na etapie m ;

$w_{m-1}^{S_{m-1}}(O_{rji})$ - funkcja priorytetu wyznaczająca najlepszy plan na etapie m-1.

3/ W celu zwiększenia efektywności poszczególnych rzutów i uzyskania poprawy kryterium jakości po możliwie małej ilości symulacji, kolejne rzuty d_m^s nie są wykonywane w sposób losowy. Przyjęto, że próby korekcji funkcji priorytetu $\Delta w_m^s(O_{rji})$ będą konstruowane na podstawie informacji jaką wnosi funkcja $y(t) = y^{m-1}(t)$ wyznaczona podczas obliczania najlepszego planu na etapie m-1 /planu $d_{m-1}^{S_{m-1}}$/.

Przedstawimy jeden z możliwych sposobów użycia funkcji $y(t)$ do tego celu. Polega on na wykrywaniu celowości przyspieszenia wykonania niektórych operacji.

Oznaczmy przez t_k te momenty czasu, w których po okresie niedociążenia maszyn grupy k ($y_k^{m-1}(t) < 0$) po raz pierwszy jest spełniony warunek

$y_k^{m-1}(t) \geq a_1$ oraz przez $\beta(t_k^*, a_1)$ następujące zbiory:

$$\beta(t_k^*, a_1) = \{ O_{rji} : O_{rji} \in A_k(t_k^*) \wedge E(O_{rji}) \neq \emptyset \};$$

gdzie:

$$E(O_{rji}) = \{ O_{rj'i} : \langle O_{rj'i}, O_{rji} \rangle \in G_r \}.$$

Przyjmujemy, że celowym jest przyśpieszyć moment wejścia do zbioru $A_k(t)$ przynajmniej po jednej operacji z każdego zbioru $\beta(t_k^*, a_1)$, ponieważ :

- chwilę t_k poprzedza przedział czasu, w którym maszyny C_k są niedociążone ;
- przyspieszenie to jest możliwe poprzez zwiększenie priorytetu operacji $E(O_{rji})$; $O_{rji} \in \beta(t_k^*, a_1)$.

Wybierając w sposób arbitralny po jednej operacji z każdego zbioru $\beta(t_k^*, a_1)$ tworzymy zbiór $\gamma(a_1)$ oraz funkcję $\Delta w_m^s(O_{rji}) = \Delta w_m(O_{rji}, a_1, a_2)$:

$$\Delta w_m(O_{rji}, a_1, a_2) = \begin{cases} a_2 & \text{dla } O_{rji} \in \{ O_{rji} : O_{rji} \in E(O_{rj'i}) \wedge O_{rj'i} \in \gamma(a_1) \} \\ 0 & \text{dla pozostałych argumentów funkcji } w(O_{rji}); \end{cases}$$

a_2 - przyrost wartości priorytetu dla operacji zbioru $\gamma(a_1)$;
s - numer sprawdzanego wariantu wartości parametrów a_1 i a_2 .

4. Zakończenie

Otoczenie Δ_m jest określone przez zakres zmian funkcji priorytetu w_m^s , $s = \overline{1, S_m}$. Z kolei zakres zmian funkcji priorytetu jest wyznaczony przez:

$\#\gamma(a_1) \leq \gamma_{max}$ - maksymalną ilość przyspieszanych operacji;

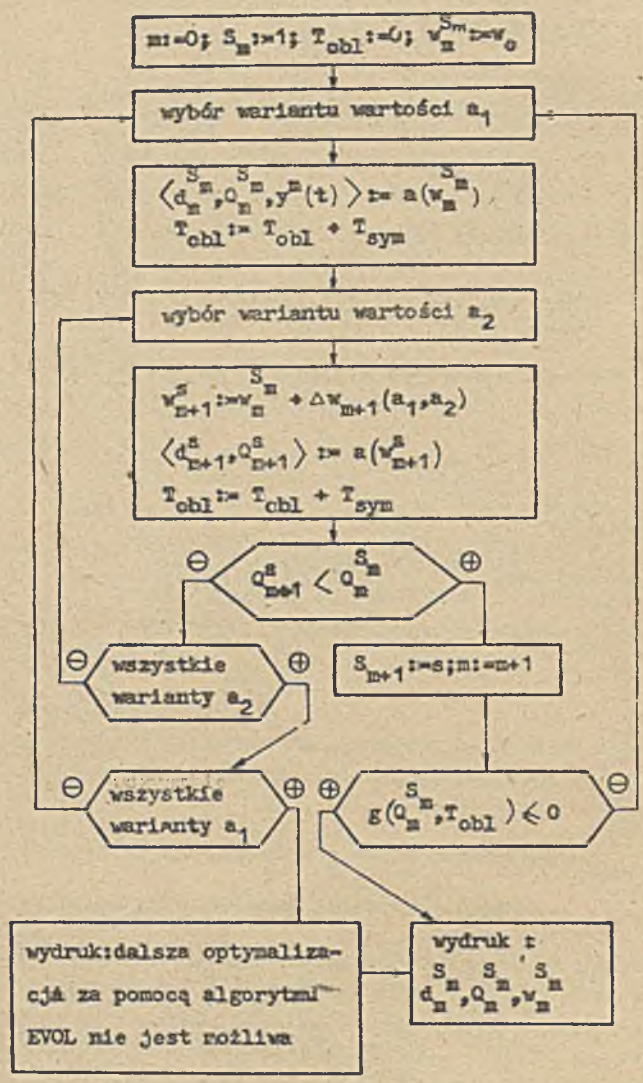
$a_2 \leq a_{2\,max}$ - maksymalną wartość przyrostu priorytetu.

Użytkownik, na podstawie doświadczenia nabytego w czasie obliczeń, może łatwo wykryć te pary $\langle a_1, a_2 \rangle$, dla których jest największe prawdopodobieństwo otrzymania rozwiązania lepszego i ustalić odpowiednią kolejność sprawdzania wariantów par. Dzięki temu ulega zmniejszeniu ilość potrzebnych symulacji S_m na poszczególnych etapach i tym samym wzrasta efektywność algorytmu EVOL. Najprostszą funkcją oceny efektywności planu kalendarzowego jest następująca:

$$g(Q(d), T_{obl}(d)) = (Q(d) - a_3) + a_4 \cdot (a_5 - T_{obl}(d));$$

a_3, a_4, a_5 - zadane stałe.

Opisany algorytm EVOL jest przeznaczony do rozwiązywania realnych zadań planowania /duża ilość zmiennych, złożone ograniczenia/. Jeżeli przyjąć, że ilość wykonanych symulacji jest stała $(\sum_m S_m = const)$, to czas obliczeń jest proporcjonalny /w przybliżeniu/ do wielkości zadania



Rys.1. Schemat blokowy algorytmu EVOL.

określonego przez sumę operacji składających się na program produkcyjny: $\sum_r J_r \cdot I_r$. W rozwiązywanych przez autora zadaniach wykonanie 4-5 etapów pozwoliło zmniejszyć czas trwania postoju maszyn o 15-35% w stosunku do wyjściowego planu kalendarzowego d_0

LITERATURA

[1.] Lichtiensztejn B.E.: Diskrietnost i słuczajnost w ekonomiko-matiematiczeskich zadaczach.Nauka, Moskwa, 1973.

[2.] Pierwozwanskij A.A.: Matiematiczeskije modieli w uprawlenii proizwodstwom. Nauka, Moskwa, 1975.

[3.] Wala K. : Zastosowanie symulacji do optymalizacji planowania operacji przy ograniczonych zasobach.Prace VII Krajowej Konferencji Automatyki. Rzeszów, 1977.

[4.] Wala K.: Algorytm symulacyjny dyskretnego procesu produkcyjnego. Materiały 37 Sesji Naukowej AGH, Kraków, 1978.

ЕВРИСТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ОПТИМАЛИЗАЦИИ ДИСКРЕТНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Р е з ю м е

В работе рассматривается евристический алгоритм оптимализации календарных планов EVOL.

В его структуре используется эволюционного поиска. Информация полученная в предыдущих моделированиях используется на входе очередных частичных изменений приоритетной функции.

A HEURISTIC ALGORITHM FOR THE OPTIMIZATION OF DISCRETE INDUSTRIAL PROCESSES

S u m m a r y

A heuristic algorithm EVOL for the optimization of calendar plans, based on some elements of evolutionary seeking methods, is presented. Information gained during previous simulations is used in the successive iterations of the priority function changes.