ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1988
Seria: AUTOMATYKA z.96 Nr kol.972

Artur Gan
Politechnika Śląska

OPTYMALNA ORGANIZACJA KOLEJNOŚCI PROCESÓW NA WEJŚCIU ZROBOTYZOWANYCH KOMPLEKSÓW TECHNOLOGICZNYCH*/

Streszczenie. Elastyczność automatyzowanej produkcji w największym stopniu zależy od tego, na ile operatywnie system sterowania EAP reaguje na zmiany w potoku wejściowym procesów. W pracy przedstawiono algorytm, który umożliwia suboptymalne uszeregowanie procesów na wejściu zrobotyzowanego kompleksu technologicznego.

1. Wprowadzenie

Jednym z podstawowych systemów zabezpieczających elastyczność automatyzowanej produkcji jest system operatywnego sterowania. W czasie realizacji procesów produkcyjnych często zmieniają się warunki zewnętrzne, aby więc zapewnić elastyczność automatyzowanej produkcji, system ten powinien szybko i elastycznie odpowiadać na te zmiany.

Czynniki zewnętrzne wnoszące zmiany w realizacji procesów można wydzielić w trzy główne grupy:

- ustalenie warunków początkowych (rozruch produkcji);
- postój awaryjny;
- zmiana w potoku wejściowym procesów.

Elastyczność automatyzowanej produkcji w największym stopniu zależy od tego, na ile operatywnie system sterowania EAP reaguje na zmiany w potoku wejściowym procesów. Podczas przechodzenia na produkcję nowej wersji jakiegoś wyrobu jest możliwe wykorzystanie już aktualnie istniejącego i funkcjonującego podstawowego wyposażenia technicznego (WT), jednak należy zmienić przy tym szereg parametrów. Procesy technologiczne są wtedy charakteryzowane nowymi marszrutami, tj. innymi kolejnościami przechodzenia procesów przez zrobotyzowany kompleks technologiczny oraz odmiennymi czasami realizacji tych procesów. Inaczej mówiąc, na linii zrobotyzowanego kompleksu technologicznego pojawia się zupełnie nowa sytuacja, wymagająca wypracowania nowej strategii sterowania. Jednym z pierwszych etapów wypracowywania nowej strategii jest utworzenie optymalnego organizacyjnego uszeregowania procesów na wejściu zrobotyzowanego kompleksu technologicznego.

Celem tego referatu jest przedstawienie algorytmu, który umożliwia suboptymalne uszeregowanie procesów na wejściu zrobotyzowanego kompleksu technologicznego.

*/ Praca była częściowo finansowana przez problem RP.I.02 i CPBR 7.4

2. Przedstawienie problemu optymalnej organizacji kolejności procesów na wejściu ZKT i podstawowe określenia

Duża liczba zadań podejmowania decyzji w procesie sterowania procesami technologicznymi, a także w innych dziedzinach działalności człowieka sprowadza się do określenia optymalnej kolejności realizacji n procesów za pomocą m różnych typów podstawowego wyposażenia technicznego według kryterium minimalnego sumarycznego czasu realizacji wszystkich procesów. Dane zadanie jest znane w literaturze [1] jako zadanie m x n - wymiarowe Bellmana - Johnsona. Rozpracowane w obecnym czasie metody rozwiązywania tego zadania, oparte na użyciu metod grafów i granic, programowania dynamicznego, wieloetapowego i innych, przynoszą trudności w realizacji, związane w głównej mierze z małą szybkością obliczeń takich algorytmów, a więc nie daje się ich zastosować do obliczeń w czasie rzeczywistym. Proponuje się więc różne metody przybliżone. Sporządzono także proste algorytmy rozwiązywania takich zadań dla szeregu wyszczególnionych przypadków [2], [3]. Używanie takich algorytmów pozwala na istotne zmniejszenie trudności uporządkowywania procesów oraz na skrócenie czasów obliczeń. Rozwiązanie podanego zadania w tym referacie zostanie wykonane za pomocą bardzo prostego algorytmu szeregowania opartego na algorytmie zaproponowanym przez Łysienkę [4]. Algorytm ten w początkowym uszeregowaniu procesów, opartym na analizie ilości zajętych WT lub ich czasów zajętości, dokonuje korekt na podstawie wartości względnych uogólnionych współczynników korelacji procesów.

Dla dalszego opisu algorytmu szeregowania procesów zostanie teraz wprowadzonych kilka pojęć.

Rozważmy w tym celu zrobotyzowany kompleks technologiczny (ZKT), który jest systemem o przestrzennym rozmieszczeniu przyrządów obróbczych (i wspomagających) i jednego systemu transportowego potoku wyrobów wiążącego wszystkie pozycje robocze. Pod pozycją roboczą rozumie się tutaj miejsce, na którym detal jest przygotowywany, obrabiany, oczyszczany, mierzony, składowany, umocowywany lub konserwowany. Zadaniem systemu transportowego jest takie przemieszczenie detali przez pozycje robocze, dla którego jest zapewniony minimalny średni czas obróbki wszystkich detali. Pozycja robocza jest ściśle związana z określonym WT służącym odpowiednio do przygotowywania detalu, obrabiania, oczyszczania, mierzenia, konserwowania itp. Za pomocą każdego WT są więc wykonywane określone operacje, które składają się na całość procesu wprowadzanego do realizacji.

Załóżmy, że nasz system składa się z m typów podstawowego WT, służących do realizacji n procesów. Niech wektor:

$$\mathbf{S} = [s_j], \qquad j = 1..m \qquad /1/$$

oznacza kody wykorzystywanego WT. W najprostszym przypadku $s_j = j$, przy

czym w ogólności, jeżeli $j \neq k$, to $s_j \neq s_k$. W rzeczywistości nie wszystkie procesy muszą być realizowane za pomocą każdego wyposażenia technicznego, tak więc dana jest macierz przyporządkowania WT do procesów - macierz $\mathbb{C}$ o wymiarach $n \times m$:

$$\mathbb{C} = [c_{ij}], \quad i = 1...n, \quad j = 1...m \qquad /2/$$

gdzie:

$$c_{ij} = \begin{cases} 1 - \text{gdy j-te WT jest wykorzystywane w realizacji i-tego procesu,} \\ 0 - \text{w przypadku przeciwnym.} \end{cases}$$

Każde WT może być w danej chwili zajęte realizacją operacji tylko jednego procesu i przystępuje do realizowania operacji następnego procesu dopiero po zakończeniu poprzedniej.

Macierz $\mathbb{T}$ określa czasy zajętości WT w poszczególnych procesach:

$$\mathbb{T} = [t_{ij}], \quad i = 1...n, \quad j = 1...m \qquad /3/$$

gdzie:

$$t_{ij} = \begin{cases} \text{czas zajętości j-tego WT w i-tym procesie } (t_{ij} > 0) & \text{gdy } c_{ij} = 1 \\ 0 & \text{gdy } c_{ij} = 0 \end{cases}$$

Dla każdego procesu można określić sumaryczny czas zajętości WT, jest to zarazem minimalny możliwy czas realizacji danego procesu :

$$T_i^o = \sum_{j=1}^{m} t_{ij}, \quad i = 1...n \qquad /4/$$

Jeżeli w każdym procesie są zajęte wszystkie WT, to na podstawie znajomości czasów T_i^o procesów dokonuje się wstępnego uszeregowania procesów według wzrastających czasów T_i^o.

Najczęściej zdarza się jednak, że nie wszystkie procesy zajmują wszystkie WT. W takiej sytuacji korzystniejszym kryterium uszeregowania wstępnego procesów będzie ilość zajętych WT w danym procesie:

$$W_i^1 = \sum_{j=1}^{m} c_{ij}, \quad i = 1...n \qquad /5/$$

Uszeregowania wstępnego dokonuje się wtedy według wzrastających wartości W_i^1. Taki sposób początkowego uszeregowania jest uzasadniony z następującej przyczyny. Przy tworzeniu harmonogramów procesów, harmonogram pierwszego procesu nie ulega przesunięciu nawet w przypadku pokrywania się tych lub innych faz z drugim lub dalszymi procesami. Dlatego, czym mniej

WT wykorzystuje się w pierwszym procesie, tym mniejsze prawdopodobieństwo takiego skupienia, chociaż nie można tego wykluczyć całkowicie. Taka sama sytuacja zachodzi przy tworzeniu harmonogramów czasowych następnych procesów. Pozwala więc to na przyjęcie opisanego sposobu uszeregowania początkowego procesów.

Uszeregowanie procesów można przedstawić w postaci wektora indeksów procesów:

$$Q_o = [q_i] , \qquad i = 1 \ldots n \qquad /6/$$

gdzie q_i jest numerem wiersza w macierzy $\mathbb{T}$ lub $\mathbb{C}$, który odpowiada i-temu procesowi według uszeregowania. Dla uszeregowania wstępnego jest więc spełniony warunek:

$$T_{q_1}^{o} \leqslant T_{q_2}^{o} \leqslant \ldots \leqslant T_{q_i}^{o} \leqslant \ldots \leqslant T_{q_n}^{o} \qquad /7/$$

lub

$$W_{q_1}^{1} \leqslant W_{q_2}^{1} \leqslant \ldots \leqslant W_{q_i}^{1} \leqslant \ldots \leqslant W_{q_n}^{1} \qquad /8/$$

Dla danego uporządkowania procesów określona jest macierz procesów według uszeregowania:

$$\mathbb{M}^1 = [u_{ij}] , \qquad i = 1 \ldots n, \qquad j = 1 \ldots m \qquad /9/$$

gdzie:

$$u_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{dla} \quad c_{q_i,j} = 0 \\ S_j & \text{dla} \quad c_{q_i,j} = 1 \end{cases}$$

oraz utworzona na jej podstawie macierz wtórna procesów:

$$\mathbb{M}^2 = [m_{ij}] , \qquad i = 1 \ldots n, \qquad j = 1 \ldots (3m-6) \qquad /10/$$

gdzie:

$$m_{i,3l-2} = u_{i,l}; \quad m_{i,3l-1} = u_{i,l+1}; \quad m_{i,3l} = u_{i,l+2} ,$$
$$l = 1 \ldots m-2$$

to znaczy, że macierz wtórna tworzy trójki procesów z macierzy pierwotnej, np.:

$$\text{jeżeli} \quad \mathbb{M}^1 = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & u_{14} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} & u_{24} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} & u_{34} \\ u_{41} & u_{42} & u_{43} & u_{44} \end{bmatrix}, \quad \text{to} \quad \mathbb{M}^2 = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & u_{12} & u_{13} & u_{14} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} & u_{22} & u_{23} & u_{24} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} & u_{32} & u_{33} & u_{34} \\ u_{41} & u_{42} & u_{43} & u_{42} & u_{43} & u_{44} \end{bmatrix}$$

Postać macierzy wtórnej procesów M^2 jest wygodna do określenia tzw. uogólnionego względnego współczynnika korelacji procesów. Współczynnik ten służy, jak to wcześniej wspomniano, jako kryterium dokonywania korekty we wstępnym uszeregowaniu procesów. Względny współczynnik korelacji procesów λ i l jest zdefiniowany jako:

$$K_{\lambda l} = V_{\lambda l} \cdot T_{\lambda l}, \quad \lambda = 1...n, \quad l \neq \lambda, \quad l = 1...n \qquad /11/$$

gdzie: $V_{\lambda l}$ - współczynnik korelacji wyposażeń technicznych pomiędzy procesami λ i l, będący miarą liczby wspólnych WT dla obu procesów, zdefiniowany jako:

$$V_{\lambda l} = \sum_{j=4}^{3m-6} v_j^{\lambda l} \quad \lambda = 1...n, \quad l \neq \lambda, \quad l = 1...n \qquad /12/$$

gdzie:

$$v_j^{\lambda l} = \begin{cases} 0, \text{gdy } (m_{\lambda,j} \neq m_{l,j-2}) \vee (j \bmod 3 = 0) \vee (m_{\lambda,j} = 0) \\ 1, \text{gdy } (m_{\lambda,j} = m_{l,j-2}) \wedge (j \bmod 3 \neq 0) \wedge (m_{\lambda,j} \neq 0) \end{cases}$$

Współczynnik korelacji WT może więc przyjmować wartości z zakresu od 0 do $2(m-3)$.

$T_{\lambda l}$ - współczynnik korelacji dla czasów zajętości WT w procesach λ i l, będący miarą nakładania się czasowego procesów na poszczególnych WT. Jest on zdefiniowany jako:

$$T_{\lambda l} = \sum_{j=4}^{3m-6} \Delta T_j^{\lambda l} \quad \lambda = 1...n, \quad l \neq \lambda, \quad l = 1...n \qquad /13/$$

gdzie:

$$\Delta T_j^{\lambda l} = \left| t_{q_\lambda, m_{\lambda,j}} - t_{q_l, m_{l,j-3}} \right|$$

przy czym, jeżeli $m_{r,s} = 0$, to $t_{q_r, m_{r,s}} = 0$.

Współczynnik korelacji dla czasów - $T_{\lambda l}$ może przyjmować wartości z zakresu od 0 do $3 \cdot \max(T_\lambda^0, T_l^0)$.

Korekta uszeregowania procesów dokonywana jest według kryterium minimalizacji względnego współczynnika korelacji procesów. Polega więc ona na tym, że dla trójki procesów np. λ, k i l, przy czym $\lambda < k < l$, określa się wartości względnych współczynników korelacji $K_{\lambda,k}$ i $K_{\lambda,l}$ i jeżeli $K_{\lambda k} > K_{\lambda l}$, to dokonujemy zamiany procesów k i l miejscami, tzn.:

$$(\lambda < k < l) \wedge (K_{\lambda k} > K_{\lambda l}) \Rightarrow (q_k = l) \wedge (q_l = k) \qquad /14/$$

Taki sposób korygowania uszeregowania procesów zmniejsza wielkości faz pokrycia pomiędzy kolejnymi procesami, a co za tym idzie, zmniejsza

wielkość przestojów pomiędzy dwoma kolejnymi procesami wprowadzonymi do realizacji, a więc zmniejsza [illegible] w ten sposób sumaryczny czas realizacji wszystkich procesów.

3. Opis algorytmu

Algorytm szeregowania procesów jest tutaj czterostapowy. Kolejne etapy, to:

1 - wprowadzanie danych $n, m, \mathcal{S}, \mathbb{C}, \mathbb{T}$ na podstawie wzorów /1/ - /3/ ;
2 - wstępne uszeregowanie procesów jednym ze sposobów podanych w poprzednim podrozdziale - wzory i nierówności /4/ - /8/ ;
3 - etap korygowania uszeregowania procesów;
4 - wyprowadzenie ostatecznego uszeregowania procesów w postaci /6/.

Etapy 1, 2 i 4 nie wymagają tutaj szczegółowego opisu, gdyż szeroko zostały już opisane w poprzednim podrozdziale. Poniżej zostanie opisany etap 3 - etap - korygowania wstępnego uszeregowania procesów.

Etap ten może być realizowany różnymi sposobami. Poniżej zostaną opisane w skrócie trzy sposoby.

Sposób I

W pierwszym kroku dokonujemy obliczenia wartości współczynników korelacji /11/ dla procesów $l = 2...n$ względem pierwszego procesu $(\lambda = 1)$ i dokonujemy zmiany uszeregowania procesów według wzrastających wartości $K_{\lambda l}$. W drugim kroku dokonujemy obliczenia wartości współczynników korelacji dla procesów $l = 3...n$ względem procesu drugiego $(\lambda = 2)$ i dokonujemy korekty jak wyżej. Postępujemy tak do momentu porównania w takim kroku tylko dwóch ostatnich procesów względem trzeciego od końca i dochodzimy w ten sposób do końcowego uszeregowania procesów.

Sposób II

W każdym kroku dokonujemy kolejno porównania dwóch procesów l i $(l + 1)$ względem procesu $(l - 1)$ i jeżeli zachodzi warunek /14/, to dokonujemy zamiany procesów l i $(l + 1)$ miejscami. W każdym kroku l zmienia się od 2 do $(n - 1)$. Powtarzamy wykonywanie opisanego kroku aż do momentu, gdy nie wykonamy żadnego przestawienia procesów (w najgorszym wypadku będzie n-krotne wykonanie kroku). W ten sposób dochodzimy do końcowego uszeregowania procesów.

Sposób III

W przypadku bardzo dużych zadań, tzn. dużej liczby procesów, można dokonać rozbicia wtórnej macierzy procesów $\mathbb{M}^2$ na podmacierze i dokonywać korekty uszeregowania sposobem I lub II w ramach każdej z podmacierzy osobno. Podział macierzy znacznie zwiększa szybkość obliczeń. Możliwość

podziału macierzy wtórnej wynika z następującego faktu. Przy formułowaniu harmonogramów czasowych poszczególnych procesów w wyniku przesunięć, w ogólnym przypadku, wprowadzenie każdego następnego procesu do realizacji coraz to bardziej oddala się od chwili rozruchu pierwszego procesu. Może więc zaistnieć sytuacja, kiedy chwila rozruchu i-tego procesu znajdzie się poza przedziałem czasu przewidzianym na realizację pierwszego procesu /lub blisko jego końca/. To znaczy, że prawdopodobieństwo pokrywania się czasów realizacji tych procesów dąży do zera. Badania praktyczne pokazały, że podział macierzy ma sens, gdy $n > 7$. Optymalna liczba wierszy w podmacierzy wynosi ok. 30 % ogólnej liczby procesów n:

$$L = [0{,}3\ n]^{+} \qquad /15/$$

Jeżeli liczba wierszy L jest większa od liczby trójek procesów w wierszu macierzy $\mathbb{M}^2$ (czyli $m - 2$), to za liczbę wierszy w podmacierzy przyjmuje się:

$$L = m - 2 \qquad /16/$$

Liczba pełnych podmacierzy w macierzy $\mathbb{M}^2$ jest określona jako całkowita część z dzielenia n przez L:

$$P = [\ n/L\ ]^{-} \qquad /17/$$

Przy takim podziale macierzy istnieje możliwość występowania jednej macierzy niepełnej o liczbie wierszy:

$$Ln = n - P \cdot L \qquad /18/$$

Na podstawie przedstawionej metodyki opracowano algorytm w postaci praktycznego oprogramowania w języku Turbo Pascal na mikrokomputerze typu IBM PC/XT. Praktyczne badania przedstawionego algorytmu pokazały, że za jego pomocą można z powodzeniem szeregować procesy w czasie rzeczywistym na wejściu ZKT z dostateczną dokładnością, tj. z całkowitym czasem realizacji wszystkich procesów minimalnym lub prawie minimalnym.

LITERATURA

[1] Tanajew W.S., Szkurba W.W.: Wwiedienie w teoriu raspisanij. Moskwa, Nauka, 1975.

[2] Flexible Manufacturing Systems: Methods and Studies - edited by Kusiak A., North - Holland, 1986.

[3] Modeli i algoritmy ASU , Kiszyniew, Sztiinca, 1986.

[4] Łysienko E.W.: Projektirowanie awtomatizirowannych sistem uprawlienia tiechnołogicieskimi prociessami. Moskwa, Radio i Swiaz, 1987.

Recenzent: Prof.dr h.inż.A.Woźniak
Wpłynęło do Redakcji do 1988-04-30.

ОПТИМАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ НА ВХОДЕ ГИБКО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Р е з ю м е

Гибкость автоматизированного производства зависит прежде всего от степени оперативности систем управления ГАП и скорости реагирования на изменения потоков входных процессов. В работе дан алгоритм, позволяющий на субоптимальное расписание для процессов на входе гибкоавтоматизированного производства.

OPTIMAL MANAGEMENT OF THE PROCESSES SEQUENCE IN THE INPUT OF ROBOTIZED TECHNOLOGICAL COMPLEXES

S u m m a r y

Flexibility of automated production greatly depends on the operational reactions of the control system for changes in the input stream of the processes. The algorithm which enables suboptimal scheduling of input processes for the robotized technological complex is presented.