ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1992
Seria: AUTOMATYKA z. 110 Nr kol. 1176

Jerzy Cyklis, Wiesław Pierzchała
Politechnika Krakowska

WARUNKI UNIKANIA ZASTOJÓW W MACIERZOWYM MODELU ESP

HOW TO FIND CONDITIONS OF AVOIDING THE DEADLOCKS ON THE BASIS OF THE MATRIX MODEL OF FMS

DIE THEORETISCHE BEDINGUNGEN DER STOCKUNGVERMEIDUNG IN DEM MATRIXMODELL DER FLEXIBLEN FERTIGUNGSSYSTEMEN

Streszczenie: Sterowanie ESP powinno zapewnić działanie systemu bez tzw. zastoju, wynikającego z nadmiaru elementów (palet, przedmiotów), dla których nie istnieje wolne miejsce składowania. W pracy przedstawiono algorytmiczną metodę zapobiegania zastojom w ESP, opartą na porównywaniu liczebności elementów współdziałających zasobą w poszczególnych fazach procesu produkcyjnego.

Summary: In order to avoid the deadlock of FMS caused by the shortage of the storage places for pallets and workpieces specific control measures are considered. The theoretical conditions of avoiding the deadlock has been described. According to the method the number of workpieces or pallets at different stages of the production process are calculated and compared with the number of the free storage places.

Zusammenfassung: Der Mangel der Lagerplätzen für die Paletten und Werkstücken ist eine Ursache der Stockung der flexiblen Fertigungssystemen. Um die Stockung des Systems zu vermeiden, müssen die spezifischen Bedingungen in die Steuerung eingeführt werden. Im Referat wurde dargestellt in welcher Weise diese Bedingungen erfunden werden können. Die Anzahl der Paletten oder der Werkstücken wird gerechnet und mit der Anzahl der freien Lagerplätzen verglichen.

1. Wstęp

Problem sterowania operatywnego systemem produkcyjnym zawiera w sobie zagadnienia, z których tylko część może być rozwiązana za pomocą algorytmów teoretycznych. Pozostała ich większość wymaga zastosowania metod heurystycznych. Modele stosowane w rozważaniach teoretycznych powinny zawierać jak najmniej dodatkowych założeń upraszczających, gdyż ich przyjęcie może ograniczać w istotny sposób podjęcie optymalnych decyzji ~~odnośnie~~ do sterowania systemem. Postulat ten został uwzględniony w opracowanym w latach poprzednich macierzowym modelu do symulacji działania elastycznych systemów produkcyjnych (ESP) [1],[2],[3].

Można wskazać trzy główne funkcje, które powinno spełniać sterowanie operatywne ESP:

1. Zapewnienie bezkolizyjnej pracy obiektów całego systemu, zgodnej z określoną funkcja tych obiektów.
2. Zapewnienie niewystępowania tzw. zastoju (ang. deadlock), w którym po bezkolizyjnym zakończeniu pewnej liczby czynności dalsze czynności nie mogą być rozpoczęte, a w konsekwencji system zatrzymuje się.
3. Optymalizacja harmonogramu działania systemu.

Zapewnienie bezkolizyjnej pracy obiektów systemu wiąże się z realizacją sekwencji czynności wynikających z przekształcania macierzowego modelu systemu. Projektant w dowolny, wygodny dla siebie sposób, dzieli cały system na obiekty, a jego działanie na czynności elementarne. Następnie, zgodnie z przyjętą technologią, określa możliwe sekwencje czynności, nie wprowadzając żadnych dodatkowych ograniczeń. Bezkolizyjne współdziałanie obiektów jest zapewniane algorytmicznie. Nie wystarczy to jednakże do prawidłowej pracy ESP, a w szczególności do niewystępowania zastojów, powstających z reguły na skutek "zatkania" się systemu nadmiarem elementów, dla których nie istnieje wolne miejsce składowania. W pracy przedstawiono metodę algorytmicznego unikania sekwencji czynności prowadzących do takich sytuacji.
Mając zapewnione działanie systemu bez kolizji i bez zastojów, można przystąpić do optymalizacji harmonogramu pracy urządzeń. Zagadnienie to nie będzie tutaj rozpatrywane.

2. Sformułowanie ogólnych warunków nieblokowania procesu produkcyjnego

Warto zaznaczyć, że definicja zastoju, jako braku możliwości wykonania którejkolwiek czynności, nie jest w pełni odpowiednia dla celów analizy właściwej pracy systemu. Odpowiadałaby ona definicji dla sieci Petriego, w której żadne przejście nie byłoby przygotowane. W rzeczywistym systemie można sobie wyobrazić sytuacje, w których niektóre czynności mogą być wprawdzie podejmowane, ale nie prowadzi to do realizacji przewidzianego procesu produkcyjnego. Np. w pewnym momencie może nastąpić sytuacja, że ze względu na zajętość wszystkich magazynów jedynymi czynnościami, które robot może wykonać, jest pobranie elementów z tych magazynów i następnie powtórne ich odłożenie. Taki cykl nie prowadzi oczywiście do zaawansowania procesu produkcyjnego.
Jako inny przypadek można podać takie czynności, które eliminują zastój, jednakże są czynnościami nieekonomicznymi, z reguły prowadzącymi w odwrotnym kierunku, niż to przewiduje prawidłowy proces produkcyjny. Np. na skutek pobrania z magazynu zbyt wielu palet następuje sytuacja, w której wszystkie wózki są zajęte, a nie ma gdzie tych palet złożyć. Zablokowana możliwość transportu prowadzi do zastoju. Wówczas wprowadza się dodatkową czynność, nie przewidzianą w normalnym procesie produkcyjnym. Jest nią oddanie do magazynu palety uprzednio pobranej przez jeden z wózków. Racjonalne sterowanie systemem nie powinno dopuszczać do takich czynności, z wyjątkiem sytuacji nie przewidzianych w normalnym procesie produkcyjnym, spowodowanych różnego rodzaju niesprawnościami jego elementów (np. awariami). Czynności tego typu powinny być specyfikowane osobno i traktowane jako czynności zabezpieczające system w przypadku awarii.
Zastój w systemie wynika z nadmiaru elementów podlegających procesowi produkcyjnemu, jak palety, przedmioty obrabiane. Aby nie blokowały się one wzajemnie, należy podać takie warunki, które nie tylko wyeliminują

zastój w wąskim sensie (wg definicji sieci Petriego), ale zapewnią możliwość realizacji procesu produkcyjnego zgodnie z zamierzonym, racjonalnym harmonogramem.
Pozostając w przekonaniu o wartości teorii wykorzystującej pojęcie zastoju, wydaje się bardziej celowe oparcie dalszych rozważań na analizie możliwości realizacji procesu produkcyjnego dla elementu, który można aktualnie do systemu wprowadzić. Byłoby to więc pytanie, które przez analogię do sieci Petriego możnaby sformułować jako problem istnienia takich żywych przejść, które przeprowadzą ten element przez wszystkie fazy procesu produkcyjnego. Aby odpowiedzieć na to pytanie, wykorzystując model macierzowy, należy określić liczebność elementów znajdujących się w różnych fazach procesu produkcyjnego.

3. Identyfikacja stanów obiektów i obliczanie ich liczebności

Zasada i wygoda stosowania w modelu macierzowym ESP tzw. macierzy stanu polega na tym, że każdorazowo można obliczyć $NA_{jk}(i)$, tj. liczbę obiektów (elementów) k gotowych do rozpoczęcia czynności j na etapie i.
Element macierzy stanu jest wyznaczany wg wzoru:

$$S_{jk}(i) = NA_{jk}(i) - U_{jk}, \quad k\in 1\div K, \; j\in 1\div J, \tag{1}$$

gdzie U_{jk} jest liczbą obiektów k używanych w czynności j.
Element $S_{jk}(i)$ jest nadwyżką (lub w przypadku znaku ujemnego, niedoborem) obiektów k przygotowanych do wykonania czynności j. Ponieważ w trakcie symulacji (sterowania) ESP zawsze jest znana wartość $S_{jk}(i)$, można na tej podstawie wyznaczyć:

$$NA_{jk}(i) = S_{jk}(i) + U_{jk}. \tag{2}$$

Należy pamiętać, że macierz $[NA_{jk}(i)]$ o elementach $NA_{jk}(i)$ nie określa wszystkich obiektów k, które znajdują się w systemie produkcyjnym, a jedynie tych, które mogą wziąć udział (oczekują) w czynności j. Ponadto, w systemie znajdują się elementy, które biorą udział w rozpoczętych (trwających) czynnościach $l_s \in 1\div J$. Niech $t_1,\dots,t_s,\dots,t_S$ oznaczają kolejne momenty zakończenia czynności $l_1,\dots,l_s,\dots,l_S$, przy czym, jeżeli $t_s \le t_{s+1}$, to $l_s \le l_{s+1}$.
Liczba obiektów k, które będą dodatkowo przygotowane do rozpoczęcia czynności j po zakończeniu czynności l_S, jest równa:

$$NP_{jk}(i,S) = \sum_{s=1}^{S} U_{l_s k} * Out_{jk}(l_s), \tag{3}$$

gdzie element macierzy wyjść $Out_{jk}(l) = 1$ oznacza, że po zakończeniu czynności l, element k jest gotowy do udziału w czynności j. W przeciwnym wypadku $Out_{jk}(l) = 0$.
Należy przestrzec przed interpretacją tej liczby w taki sposób, że o tyle zwiększy się liczba obiektów k w momencie t_S, gdyż wcześniej może ona ulec zmianie na skutek rozpoczęcia lub zakończenia innych czynności niż

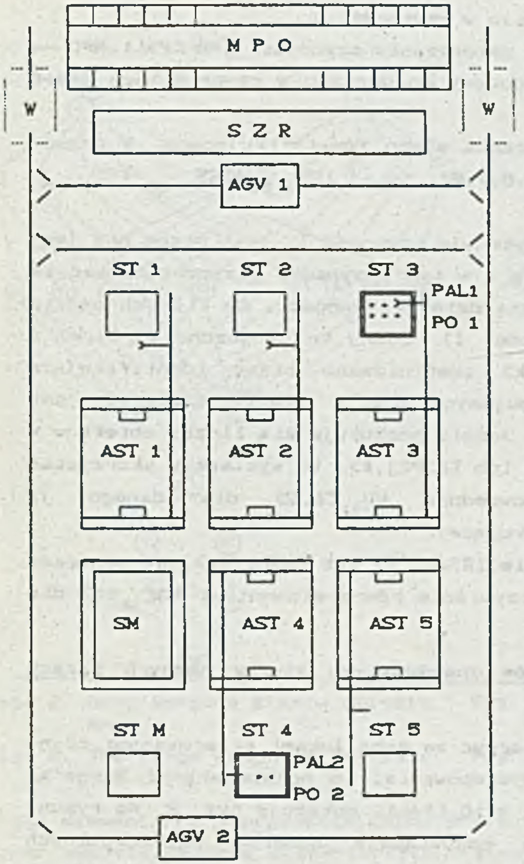
wymienione $l_1,\dots,l_s,\dots,l_S$. Wielkość $NP_{jk}(i,S)$ oznacza jedynie liczbę dodatkowych obiektów k, które w trakcie procesu produkcyjnego od aktualnej chwili t do chwili t_S będą dostarczane w stanie umożliwiającym rozpoczęcie czynności j. Liczba wszystkich obiektów k, które będzie można potencjalnie użyć do rozpoczęcia czynności j, wynosi:

$$NAP_{jk}(i) = NA_{jk}(i)+NP_{jk}(i,S)=S_{jk}(i)+U_{jk} +\sum_{s=1}^{S} U_{l_s k} * Out_{jk}(l_s) \qquad (4)$$

Stan danego obiektu k jest określony przez czynność, którą może on rozpocząć. Niech stan ten będzie oznaczony ESA(j,k). Równocześnie, z punktu widzenia sensu działania systemu, stan ten jest również określony przez czynność l, którą zakończył dany obiekt k. Jeżeli po zakończeniu danej czynności obiekt k jest przygotowany do rozpoczęcia więcej niż jednej czynności (potencjalnie, nie równocześnie), np. j_1 i j_2, to wówczas oznacza to, że stany ESA(j_1,k) oraz ESA(j_2,k) pozostają w relacji identyczności Id. Dla celów bilansowania liczby obiektów w systemie może wówczas budzić nieporozumienie, jeżeli poda się liczbę $NA_{j_1k}(i)$ obiektów k zdolnych do wykonania czynności j_1 oraz liczbę $NA_{j_2k}(i)$ obiektów k zdolnych do wykonania czynności j_2. Jeżeli bowiem rozpocznie się czynność j_1, to liczba $NA_{j_1k}(i)$ zostanie pomniejszona o U_{jk}, ale również stanie się to z liczbą $NA_{j_2k}(i)$. Chociaż algorytm macierzowy zapewnia takie działanie, to jednak warto wprowadzić pojęcie stanu identyfikującego obiektu k, oznaczonego IESA(j,k), który będzie jednakowy dla obu czynności j_1 i j_2. Można tego dokonać na wiele sposobów, wprowadzając np. oznaczenia kolejnych faz technologicznych. Tu proponuje się, aby stan identyfikujący IESA(j,k) był najmniejszym numerem czynności j z tych, które znajdują się w relacji identyczności $j_1,\dots,j_d,\dots,j_D \in Id$. Macierz stanów identyfikujących jest oznaczona [IES] a jej element IES_{jk}. Jest on równy 0, gdy dany obiekt k nie bierze udziału w czynności j. Jeżeli dany obiekt k jest przygotowany do rozpoczęcia tylko jednej czynności j, to wówczas $IES_{jk}=j$. Jeżeli obiekt k jest przygotowany do kilku czynności $j_1<\dots<j_d<\dots<j_D$, to wówczas $IES_{j_1k}=\dots=IES_{j_dk}=\dots=IES_{j_Dk}=\dots=j_1$. Ten ostatni fakt wyznacza się algorytmicznie na podstawie zadeklarowanych zbiorów wyjść OS(j,k), zawierających podstawowe dane dla macierzowego modelu symulacyjnego ESP (patrz przykład). Jeżeli OS(j,k)=$(j_1,\dots,j_d,\dots,j_D)$ oraz $j_1<\dots<j_d<\dots<j_D$, to wówczas $IES_{j_1k}=\dots=IES_{j_dk}=\dots=IES_{j_Dk}=\dots=j_1$.

Proponowane podejście zostanie zilustrowane przykładem modelu ESP (rys.1) przedstawionego w pracach [2], [3]. Tutaj, przytaczając ten przykład, ograniczono się do podania tylko informacji wykorzystywanych.

System składa się z pięciu autonomicznych stacji tokarskich (AST 1÷5) wyposażonych w stoły (ST 1÷5), stacji mycia (SM) ze stołem (ST M), dwóch automatycznie sterowanych wózków indukcyjnych (AGV 1,2) i magazynu palet



Rys.1. ESP do obróbki przedmiotów obrotowych

Fig.1. FMS for turning

Element (k) ⟶		k	18
j	Czynność (j) ↓		PAL 1
1	START		2
2	PAL1,MPO → AGV 1		4÷8
3	PAL1,MPO → AGV 2		10÷14
4	PAL1,AGV1 → ST 1		34,41
:	:		:
8	PAL1,AGV1 → ST 5		38,45
9	PAL1,AGV1 → ST M		21
10	PAL1,AGV2 → ST 1		34,41
:	:		:
14	PAL1,AGV2 → ST 5		38,45
17	PAL1,AGV2 → ST M		21
21	PAL1,SM *		39,40
34	PAL1,ST 1 → AGV1		9
:	:		:
38	PAL1,ST 5 → AGV1		9
39	PAL1,ST M → AGV1		46
40	PAL1,ST M → AGV2		47
41	PAL1,ST 1 → AGV2		17
:	:		:
45	PAL1,ST 5 → AGV2		17
46	PAL1,AGV1 → MPO		95
47	PAL1,AGV2 → MPO		95
95	END		

Tablica 1. Zbiory wyjść OS(j,k).

obróbkowych (MPO). W systemie obrabia się dwa rodzaje przedmiotów (PO 1, PO 2), transportowanych w paletach (odpowiednio PAL 1, PAL 2). Każdy z przedmiotów jest całkowicie obrabiany na dowolnej stacji, a następnie myty na stacji mycia. W tablicy 1 podano czynności elementarne dla obiektu k=18 (PAL 1) wraz ze zbiorami wyjść OS(j,18). Nazwy czynności zapisano w uproszczony sposób. Pierwsza nazwa (przed przecinkiem) odnosi się do obiektu przemieszczanego lub podlegającego obróbce (myciu, kontroli). Następne nazwy wskazują skąd i dokąd jest on przemieszczany (przypadek strzałki ⟶) lub gdzie jest obrabiany (przypadek gwiazdki *). Np.: PAL 1,AGV 1 ⟶ ST 1 oznacza, że paleta PAL 1 jest przekazywana z wózka AGV 1 na stół ST 1. PAL 1,SM * oznacza mycie na stacji mycia SM, przedmiotów ułożonych na palecie PAL 1.

Zbiór OS(j,k) zawiera numery czynności, do których przygotowany jest obiekt *k* po zakończeniu swego udziału w czynności *j*.

Np. OS(2,16)=(4÷8) oznacza, że po zakończeniu czynności j=2 (PAL1,MPO ⟶ AGV 1) obiekt k=16 (PAL 1) jest gotowy do udziału w czynnościach j=4÷8 (PAL 1,AGV 1 ⟶ ST 1÷5).

Można teraz podać przykład wyznaczania stanu identyfikującego. W przedstawionym modelu OS(2,16) = (4,5,6,7,8), stąd $IES_{4\ 16}=IES_{5\ 16}=IES_{6\ 16}=IES_{7\ 16}=IES_{8\ 16}=4$.

Stan obiektów *k*, które aktualnie wykonują czynność *l*, jest przez nią jednoznacznie określony. Jest wygodnie i w tym przypadku przyporządkować im stany, w których dany obiekt się znajdzie (czynności, do których będzie przygotowany po zakończeniu czynności *l*). Stany te oznaczono ESP(j,k) i podobnie jak dla stanów ESA(j,k) zdefiniowano stany identyfikujące IESP(j,k). Liczba obiektów znajdujących się w stanie ESP(j,k) jest określona przez element $NP_{jk}(i,S)$. Jeżeli poszukuje się liczby obiektów w stanach identyfikujących IESA(j,k) lub IESP(j,k), to wystarczy skorzystać z macierzy $NA_{jk}(i)$ lub odpowiednio $NP_{jk}(i,S)$ dla danego *j*, odpowiadającego czynności identyfikującej.

Obiekty, które znajdują się w stanie IESA(j,k) lub IESP(j,k), są oznaczone IESAP(j,k) i ich liczba jest oczywiście równa elementowi $NAP_{jk}(i)$ dla danego identyfikującego *j* (wzór 4).

4. Obliczanie liczebności obiektów znajdujących się w różnych fazach procesu produkcyjnego

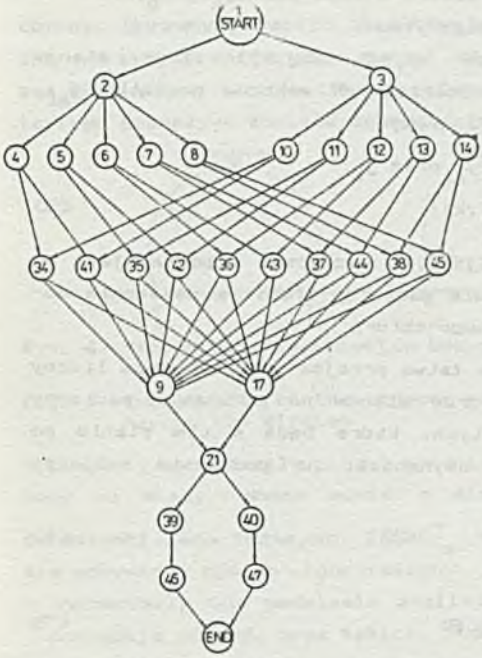
Jeżeli dla danego obiektu *k* połączyć ze sobą łukami skierowanymi czynności w możliwej kolejności ich występowania, to powstaje graf Berge'a. Przykład takiego grafu dla obiektu *k*=16 (PAL1) pokazuje rys. 2. Na rysunku tym numery w wierzchołkach odpowiadają numerom poszczególnych czynności *j*. Graf ten może też być interpretowany jako graf kolejnych stanów ESA(j,k) dla ustalonego *k*. Element macierzy przyległości danego grafu $INC_{lj}(k)$ jest równy 1, gdy istnieje łuk wychodzący z wierzchołka *l*, a wchodzący do wierzchołka *j*. W przeciwnym przypadku $INC_{lj}(k)=0$.

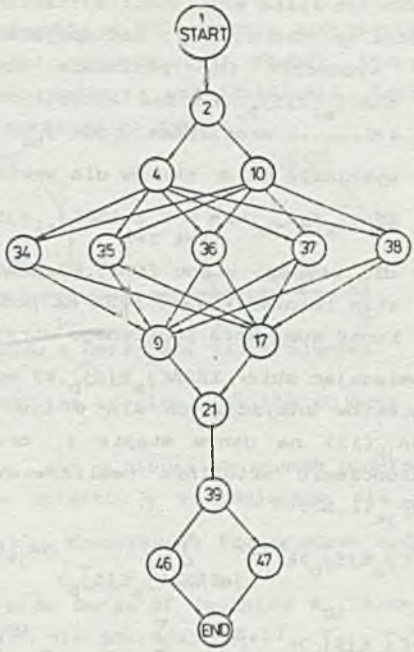
Np. $INC_{4\ 34}(16)=1$, $INC_{4\ 9}(16)=0$.

Istnieje prosty związek tej macierzy incydencji z macierzą wyjść modelu macierzowego: $INC_{lj}(k)=Out_{jk}(l)$.

Graf Berge'a można zbudować także dla stanów identyfikujących IESA(j,k). Korzystając z podanych wcześniej zasad tworzenia tych stanów można zauważyć, że jeśli $INC_{lj_1}(k)=\ldots=INC_{lj_d}(k)=\ldots=INC_{lj_D}(k)$ oraz $j_1<j_2\ldots j_d\ldots j_D$, to stanem identyfikującym jest stan $IESA(j_1,k)$. Graf Berge'a stanów można przekształcić w graf Berge'a stanów identyfikujących w ten sposób, że pominie się wszystkie te stany, które mają wspólne wejście (a ściślej, do których wchodzą łuki z tego samego wierzchołka) (rys. 3).

Powyższej operacji przekształcenia można dokonać, zastępując numery ESA(j,k) przez IESA(j,k), a następnie łącząc w jeden wierzchołki o tych samych numerach.





Rys. 2. Graf Berge'a stanów obiektu k=16

Fig. 2. The Berge graph of states of the object k=16.

Rys. 3. Graf Berge'a stanów identyfikujących obiektu k=16

Fig. 3. The Berge graph of identity states of the object k=16.

Droga elementarna w przedstawionych grafach będzie oznaczana $(j_a \longrightarrow j_b)$.
Zbiór wszystkich dróg elementarnych o początku w wierzchołku a i końcu w wierzchołku b będzie oznaczany $\langle j_a \longrightarrow j_b \rangle$.
Np. zbiór dróg elementarnych pomiędzy j_a=4 oraz j_b=21 (rys. 2) zawiera cztery drogi: (4,34,9,21), (4,41,9,21), (4,34,17,21), (4,41,17,21)
Zbiory te można wyznaczyć na podstawie macierzy incydencji [INC] albo wyjść [Out].
Zbiór wszystkich stanów, które odpowiadają zbiorowi dróg $\langle j_a \longrightarrow j_b \rangle$ oznaczono ESA($j_a \le j \le j_b$,k). Analogicznie dla stanów identyfikujących IESA($j_a \le j \le j_b$,k).

Pojęcia powyższe można uogólnić na wektor $\bar{j}_a$ oraz wektor $\bar{j}_b$. Można mówić o dowolnej drodze pomiędzy dowolnymi współrzędnymi wektora $\bar{j}_a$ oraz $\bar{j}_b$ (jeżeli istnieje). Zbiór wszystkich dróg pomiędzy dowolnymi współrzędnymi wektora $\bar{j}_a$ oraz dowolnymi współrzędnymi wektora $\bar{j}_b$ oznaczono $\langle \bar{j}_a \longrightarrow \bar{j}_b \rangle$.
Analogicznie przyjęto pozostałe oznaczenia dla stanów np.: ESA($\bar{j}_a \le j \le \bar{j}_b$,k) czy IESA($\bar{j}_a \le j \le \bar{j}_b$,k).
Np. na rys. 3: IESA((4,10)$\le j \le$(9,17),16)=⟨4,10,34,35,36,37,38,9,17⟩.

Istnieje kilka możliwości wyznaczania zbioru stanów $IESA(\bar{j}_a \le j \le \bar{j}_b, k)$. Można np. skorzystać z następującego algorytmu:

- wyznaczyć (na podstawie zbiorów wyjść $OS(j,k)$) zbiór stanów $ESA(j_{ai} \le j \le j_{bl}, k)$ dla wszystkich współrzędnych wektora początku j_{ai}, $i=1,\ldots,I$ oraz końca drogi j_{bl}, $l=1,\ldots,L$;
- wyznaczyć zbiór stanów dla wektora $\bar{j}_a$ oraz $\bar{j}_b$:

$$ESA(\bar{j}_a \le j \le \bar{j}_b, k) = \bigcup_{i=1}^{I} \bigcup_{l=1}^{L} ESA(j_{ai} \le j \le j_{bl}, k); \tag{5}$$

- dla każdego stanu $ESA(j,k) \in ESA(\bar{j}_a \le j \le \bar{j}_b, k)$ wyznaczyć odpowiadający mu stan identyfikujący IESA na podstawie macierzy [IES], a następnie dokonać sumowania logicznego otrzymanego zbioru.

Posiadając zbiór $IESA(\bar{j}_a \le j \le \bar{j}_b, k)$ można łatwo przejść do obliczenia liczby obiektów znajdujących się w tym zbiorze stanów na podstawie macierzy $[NA_{jk}(i)]$ na danym etapie i oraz tych, które będą w tym stanie po zakończeniu aktualnie realizowanych czynności, na podstawie macierzy $[NP_{jk}(i,S)]$:

$$NA_{(\bar{j}_a \le j \le \bar{j}_b)k}(i) = \sum_{j \in IESA(\bar{j}_a \le j \le \bar{j}_b)} NA_{jk}(i) \tag{6}$$

$$NP_{(\bar{j}_a \le j \le \bar{j}_b)k}(i,S) = \sum_{j \in IESA(\bar{j}_a \le j \le \bar{j}_b)} NP_{jk}(i,S) \tag{7}$$

5. Warunki bezblokadowej pracy ESP

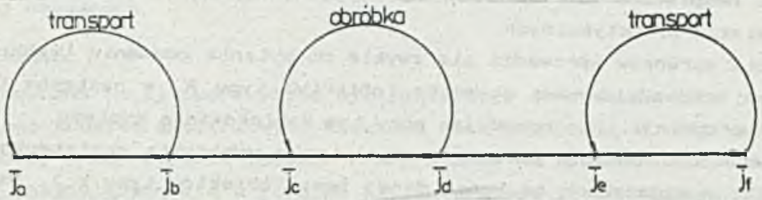
Możliwość wyznaczenia liczebności obiektów znajdujących się w różnych stanach (etapach) procesu produkcyjnego pozwala na racjonalizację jego sterowania, tak aby nie dopuścić do zbyt dużej liczby blokujących się nawzajem obiektów. Przystępując do formułowania odpowiednich warunków należy tu zaznaczyć, że obiekty występujące w ESP różnią się między sobą co do funkcji, które mają spełnić. Pod względem funkcjonalnym można by je podzielić na dwie zasadnicze grupy:

- obiekty, które podlegają kierunkowym przemianom w procesie produkcyjnym (przedmioty obrabiane, palety);
- obiekty, które obsługują te przemiany (maszyny technologiczne, magazyny, środki transportu).

Z punktu widzenia teorii grafów jest to podział na:

- obiekty, których grafy czynności Berge'a nie zawierają obwodów;
- obiekty, których grafy czynności Berge'a zawierają obwody.

Pierwszy typ obiektów nie zawiera obwodów z dokładnością do czynności przewidzianych w przypadku awarii. Do nich właśnie należą palety i przedmioty obrabiane. Inne obiekty zawsze muszą pracować w określonych cyklach, co objawia się istnieniem obwodów w grafach czynności Berge'a. Obiekty bez obwodów realizują swój proces produkcyjny biorąc udział w czynnościach, do których po kolei dołączają obiekty mające w swoim grafie obwody. Sprawny przepływ obiektów bez obwodów w ESP oznacza spotykanie się na swojej marszrucie z tymi obiektami posiadającymi obwody, które znajdują się w stanie (fazie) zdatnym do podjęcia współdziałania. Idea takiego przepływu została schematycznie pokazana na rys. 4.



Rys. 4. Współdziałanie obiektów bez obwodów z obiektami zawierającymi obwody

Fig. 4. Cooperation of the objects without the circles with the objects having the circles

W powyższy sposób cały proces produkcyjny jest w naturalny sposób podzielony na etapy. Można mówić o stanie obiektu k znajdującego się w określonej jego fazie, np. IESA($\bar{j}_a \le j \le \bar{j}_b$, k). Wyznaczanie faz procesu może się odbywać w sposób algorytmiczny:

- wyznaczenie (na podstawie analizy grafów Berge'a) obiektów k_Ω, które posiadają obwody, oraz takich, które ich nie posiadają $k_\rightarrow$.
- wyznaczanie kolejno k_Ω, które wchodzą do współpracy na różnych etapach procesu obiektu $k_\rightarrow$. Odpowiadające temu czynności wyznaczają fazy procesu.

Istotną pomoc w wyznaczaniu tych etapów może stanowić wiedza projektanta systemu.

Aby cały proces produkcyjny obiektu $k_\rightarrow$ był realizowalny, muszą być realizowalne wszystkie jego fazy. Jest rzeczą oczywistą, że założenie takie musi leżeć u podstaw każdego projektu ESP. Jako paradoksalny przykład niespełnienia takiego rodzaju założenia może służyć system, w którym po dojściu do pewnego etapu dalszy proces jest nierealizowalny, ze względu na brak odpowiedniej maszyny technologicznej. Chociaż sytuacja taka nie musi być wykluczona w projekcie, to jednak w rzeczywistości może się wydarzyć na skutek awarii jednej z obrabiarek. Wówczas oczywiście należy wstrzymać dopływ nowych obiektów $k_\rightarrow$, których ta awaria dotyczy. Dla poprawnie działającego systemu przyjmuje się założenie, że istnieje zawsze taka droga, która doprowadza obiekt $k_\rightarrow$ ze stanu początkowego (na rys. 4 $\bar{j}_a$) do stanu końcowego ($\bar{j}_f$). Wówczas tylko można rozpocząć jedną z czynności $\bar{j}_a$.

Drugi warunek wynika z wymagania, aby każda rozpoczęta faza procesu produkcyjnego mogła być ukończona. Jeżeli każda faza procesu będzie mogła być ukończona (nie będzie blokady), to rozważając go od końca będzie można ukończyć wszystkie fazy dotyczące obiektów $k_\rightarrow$, następnie je poprzedzające, aż do fazy początkowej. Należy jednak przy tym uwzględnić dwa rodzaje warunków: dostateczne i konieczne. Jeżeli warunki konieczne nie są spełnione, system zatrzymuje się. Spełnienie warunków koniecznych nie zapewnia zawsze pracy bezblokadowej. Spełnienie warunków dostatecznych jest bezpieczne dla systemu, ale w pewnych warunkach może prowadzić do rozwiązań nieoptymalnych.

Istota warunków sprowadza się zwykle do pytania odnośnie transportu, czy można wprowadzić nowe elementy (obiekty) typu k_+ w następną (pierwszą) fazę produkcji, nie powodując przy tym zablokowania systemu.

Warunek dostateczny polega na spełnieniu wymagania dostatecznej liczby miejsc w magazynach na końcu danej fazy (obiektów typu k_Q). Warunek konieczny uwzględnia istnienie dodatkowych miejsc na środkach transportowych (też obiekty typu k_Q), które mogą być dodatkowo wykorzystane jako czasowe magazyny. Nie można (warunek konieczny) jednak zapełnić wszystkich magazynów i środków transportowych, bo wówczas nie można opróżnić magazynów stacjonarnych, w konsekwencji środków transportowych i system staje.

Aby zapisać powyższe warunki, wprowadza się dodatkowe oznaczenia:

$\bar{k}$ oznacza wektor obiektów k o składowych $k_1, \ldots, k_p, \ldots, k_P$.

Zbiór stanów, które odpowiadają wszystkim współrzędnym tego wektora, oznaczono:

$$ESA(\bar{j}_a \le j \le \bar{j}_b, \bar{k}) = \bigcup_{p=1}^{P} ESA(\bar{j}_a \le j \le \bar{j}_b, k_p) \tag{8}$$

oraz analogicznie:

$$IESA(\bar{j}_a \le j \le \bar{j}_b, \bar{k}) = \bigcup_{p=1}^{P} IESA(\bar{j}_a \le j \le \bar{j}_b, k_p). \tag{9}$$

Liczbę wszystkich obiektów znajdujących się w tych stanach identyfikacyjnych określa wzór:

$$NA_{(\bar{j}_a \le j \le \bar{j}_b)\bar{k}}(i) = \sum_{p=1}^{P} NA_{(\bar{j}_a \le j \le \bar{j}_b)k_p}(i) \tag{10}$$

oraz dla stanów potencjalnie możliwych:

$$NP_{(\bar{j}_a \le j \le \bar{j}_b)\bar{k}}(i,S) = \sum_{p=1}^{P} NP_{(\bar{j}_a \le j \le \bar{j}_b)k_p}(i,S). \tag{11}$$

Sumę powyższych liczb oznaczono:

$$NAP_{(\bar{j}_a \le j \le \bar{j}_b)\bar{k}}(i) = NA_{(\bar{j}_a \le j \le \bar{j}_b)\bar{k}}(i) + NP_{(\bar{j}_a \le j \le \bar{j}_b)\bar{k}}(i,S). \tag{12}$$

Jeżeli teraz przyjąć, że $\bar{k}_+$ oznacza wektor elementów wchodzących do systemu, a $\bar{k}_{Qb}$ magazyny występujące w czynnościach $\bar{j}_b$, wówczas warunkiem dostatecznym zakończenia pewnej fazy (a więc także możliwości rozpoczęcia czynności będącej składową wektora $\bar{j}_a$) jest:

$$NAP_{(\bar{j}_a \le j \le \bar{j}_b)\bar{k}_{\rightarrow}}(i) \le NAP_{\bar{j}_b \bar{k}_{Qb}}(i) \cdot \tag{13}$$

Warunek powyższy jest ważny po rozpoczęciu czynności należącej do wektora $\bar{j}_a$. Przed jej rozpoczęciem należy odjąć od lewej strony liczbę obiektów U_{jk} w niej używanych.

6. Zakończenie

Przedstawiono tutaj teoretyczne ujęcie taktyki sterowania ESP, powiązanej z jego modelem macierzowym. Kluczową rolę odgrywają w niej warunki bezblokadowej pracy systemu postaci (13), oparte na bilansie liczebności obiektów, znajdujących się w różnych fazach procesu produkcyjnego. Opracowano i uruchomiono nową wersję programu symulacyjnego ESPSYM opartego na modelu macierzowym ESP, w której wykorzystuje się opracowaną metodę.

LITERATURA

[1] Cyklis J.: Algorytm symulacji ESP, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s.Automatyka, z.96, Gliwice 1988.

[2] Cyklis J., Pierzchała W.: Simulation and Control of FMS on its Operational Level. 6th Symposium on Information Control Problems in Manufacturing Technology. INCOM'89. Madrid, 1989.

[3] Cyklis J. i in.: Weryfikacja koncepcji podłączenia sterowania modułu rzeczywistego do programu symulującego działanie ESP. Opracowanie dla CPBP 02.04. ITMiAP Politechniki Krakowskiej, Kraków 1989.

Recenzent: Prof.dr inż. Henryk Kowalowski

Wpłynęło do Redakcji do 30.04.1992 r.

Abstract:

The matrix model assures that the system works without collisions. Another problem to solve is avoiding the deadlock of the system. The definitions similar to those given for Petri nets are not convenient ones. In order to assure the evenness of the product stream it is assumed that for each stage of the production process there is not shortage of the storage places for pallets and workpieces. The method proposed in the paper is based on the Berge graphs defined for each object of the system. The arcs of the graph link the activities performed by the object *k* according to the output set OS(j,k). The state of the object *k* is described by the activity which it already ended or the set of activities which can start. If the object can start more that one activity, one of them can be chosen for the description of the object state. In this way the so called identity states are defined. These states help to count the number of objects in a given production stage and to compare the number of the pallets (workpieces) with the number of storage places. The computer program prevent the start of the activities leading to the shortage of the storage places.