

Jerzy Cyklis  
Wiesław Pierzchała  
Politechnika Krakowska

## TAKTYKA STEROWANIA ESP W OPARCIU O MODEL MACIERZOWY

Streszczenie. W proponowanym ujęciu taktyki sterowania ESP wykorzystuje się pewne zależności, nie dopuszczające do wykonania niektórych czynności w poszczególnych fazach eksploatacji systemu. Zależności te zapisywane są w postaci nierówności algebraicznych wiążących liczniki przyporządkowane czynnościom. Metodę pokazano na wybranym przykładzie ESP.

### 1. Wprowadzenie.

Macierzowy model elastycznego systemu produkcyjnego (ESP) stanowi alternatywne podejście do modelowania tych systemów. w stosunku do innych znanych i bogato reprezentowanych w literaturze metod. Może on być z powodzeniem zastosowany w badaniach symulacyjnych, a ponadto - co jest szczególnie istotne dla niniejszej pracy - w komputerowych układach sterowania i nadzorowania systemów elastycznych. W tym wypadku pełni rolę bazy, swego rodzaju wzorca procesu produkcyjnego, umożliwiającego wypracowywanie odpowiednich decyzji i ich skuteczną realizację, poprzez wysyłanie do poszczególnych urządzeń właściwych sygnałów sterujących. Jednolitość koncepcji modelu w dwu wymienionych obszarach zastosowań stanowi jego ważną zaletę.

Istota modelu macierzowego polega na uporządkowaniu działania ESP według wyodrębnionych arbitralnie - jednakże w ścisłym powiązaniu z celem modelowania - czynności elementarnych i elementów systemu biorących udział w tych czynnościach. Stan systemu w poszczególnych etapach jego funkcjonowania opisuje przekształcana rekurencyjnie macierz stanu, pozwalająca określić zbiór czynności aktualnie możliwych do wykonania, ze względu na dostępność niezbędnej liczby odpowiednich elementów. Efektywne sterowanie systemu wymaga w każdym kroku wyboru i wydania polecenia wykonania jednej z czynności należących do tego zbioru.

Model macierzowy ESP opisano szczegółowo w publikacji [3]. Rozszerzoną i udoskonaloną - głównie w aspekcie zastosowań do sterowania - jego wersję przedstawiono w pracy [2].

## 2. Strategia i taktyka w eksploatacji ESP.

W przedsięwzięciach związanych z budową i eksploatacją ESP wyróżnia się cztery fazy (etapy) [9]:

- projektowanie.
- planowanie pracy.
- harmonogramowanie.
- sterowanie i nadzorowanie.

Problemy i decyzje podejmowane w fazie projektowania nie będą tutaj rozpatrywane. Pozostałe etapy dotyczą eksploatacji zainstalowanego i gotowego do pracy ESP.

Planowanie pracy obejmuje między innymi następujące problemy [5,9]:

1. Wybór - na podstawie zleceń produkcyjnych - podzbioru wyrobów bezwzględnie i jednocześnie kierowanych do produkcji. Należy tu uwzględnić żądane terminy wykonania wyrobów, zapewniając jednocześnie odpowiednie obciążenie poszczególnych stacji obróbkowych.
2. Podział grup poszczególnych typów maszyn na podgrupy, wyposażone w identyczne zestawy narzędzi i zdolne do wykonania tych samych operacji. Istnieje ścisły związek tego zagadnienia z poprzednio wymienionym.
3. Dobór liczebności partii produkcyjnych poszczególnych typów wyrobów.
4. Rozdział palet i przyrządów (system dysponuje ograniczoną ich liczbą), pomiędzy wybrane do produkcji typy wyrobów.
5. Przydział poszczególnych operacji i skojarzonych z nimi zestawów narzędzi do odpowiednich podgrup stacji obróbkowych.

Złożoność i powiązania wymienionych problemów sprawiają, że często muszą być one rozwiązywane iteracyjnie albo jednocześnie. Planowanie pracy wymaga powtórzenia, w przypadkach dłuższych awarii maszyn, zakończenia produkcji niektórych partii przedmiotów i wprowadzania na ich miejsce nowych zleceń itp. Decyzje podejmowane na tym etapie wiążą się ze strategią sterowania ESP i będą nazywane decyzjami strategicznymi.

Jeśli chodzi o zagadnienia kolejnościowe rozwiązywane w fazie harmonogramowania, należy podkreślić pewien istotny fakt. W odróżnieniu od klasycznego podejścia do problemów harmonogramowania decyzje co do przydziału i kolejności operacji na poszczególnych stanowiskach (stacjach obróbkowych) - jeśli to tylko możliwe - powinny być podejmowane na bieżąco, bezpośrednio przed ich wykonywaniem [1,4,6,8]. Pozwoli to na uwzględnienie przynajmniej niektórych uwarunkowań wynikających z aktualnego stanu systemu, a ponadto ułatwi prognozowanie skutków podejmowanych decyzji.

Stosowane tutaj algorytmy muszą być wystarczająco szybkie, toteż chętnie i z dobrym skutkiem wykorzystuje się proste procedury heurystyczne [np.4,7]. W optymalizacji harmonogramów dla ESP brane są pod uwagę typowe, znane kryteria: maksymalizacja wskaźników wykorzystania maszyn, wydajności, minimalizacja robót w toku lub czasów cykli produkcyjnych, z uwzględnieniem ewentualnych wymagań wynikających z żądanych terminów wykonania wyrobów.

Etap sterowania i nadzorowania ESP polega na wysyłaniu do poszczególnych urządzeń poleceń wykonania określonych czynności, śledzeniu procesu produkcyjnego, sprawdzaniu jego zgodności z planem, korygowaniu ewentualnych rozbieżności i podtrzymywaniu pracy systemu w przypadkach awarii niektórych elementów wyposażenia.

Decyzje podejmowane w fazie harmonogramowania oraz sterowania i nadzorowania będą nazywane decyzjami taktycznymi.

### 3. Związek taktyki z modelem macierzowym ESP.

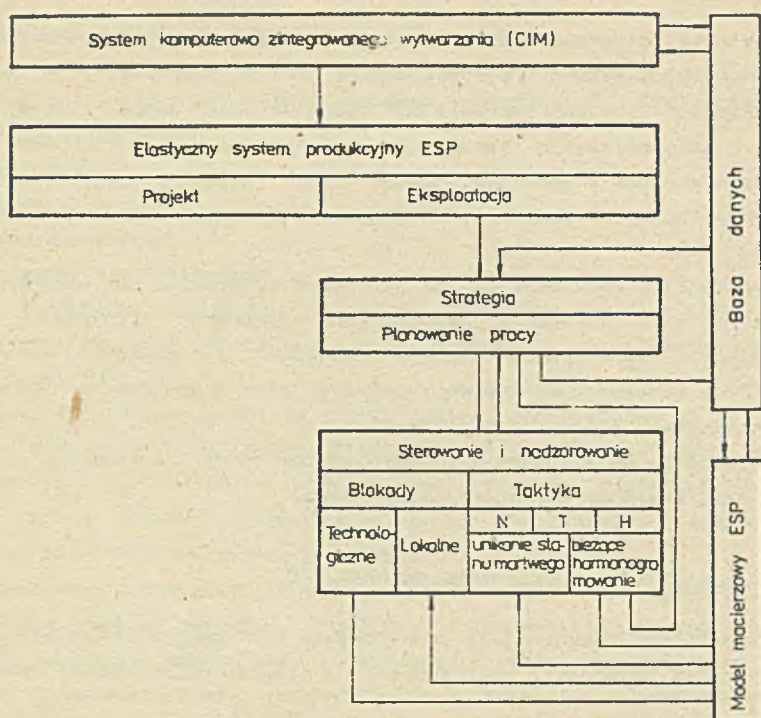
O skuteczności sterowania i nadzorowania ESP (obejmującego bieżące harmonogramowanie czynności) realizowanego w oparciu o jego model macierzowy stanowią:

- blokady ESP,
- taktyka ESP.

Strukturę strategii i taktyki sterowania ESP przedstawiono na rys 1.

Najogólniej mówiąc, celem blokad jest eliminowanie z rozważań na poszczególnych etapach sterowania i nadzorowania systemu, czynności niemożliwych do wykonania lub niedopuszczalnych sposobów ich realizacji. Blokad powinny być tak skonstruowane, aby umożliwiały jak najwięcej wariantów wykorzystania elementów ESP. Pozwoli to na elastyczne i efektywne gospodarowanie zasobami, z uwzględnieniem aktualnego stanu systemu. Ponadto, umożliwi podtrzymywanie procesu produkcyjnego w przypadku awarii niektórych maszyn i urządzeń, z uwzględnieniem alternatywnych marszrut technologicznych.

Blokady, w istocie stanowiące ograniczenia dla wyboru kolejnej czynności do wykonania w ESP, można podzielić na dwie grupy. Pierwsza grupa blokad prowadzi do eliminowania czynności niewykonywalnych w poszczególnych etapach funkcjonowania systemu, ze względu na niedostępność wszystkich wymaganych elementów. Pozwala to każdorazowo wyselekcjonować czynności możliwe do wykonania, z jednoczesnym zapewnieniem porządku narzuconego przez technologię. Blokad tego typu ujęte są w modelu macierzowym ESP. Druga grupa



Rys 1. Ogólna struktura strategii i taktyki sterowania ESP.  
Fig 1. The general structure of the strategy and the tactics of the FMS control.

obejmuje inne specyficzne ograniczenia o charakterze lokalnym, które zapewniają bezkolizyjność wykonywania poszczególnych czynności przez różne elementy (np. kilka wózków transportowych). Wskazane jest, aby ograniczenia te nie eliminowały możliwości wykonywania czynności dopuszczonych do realizacji przez model macierzowy, co wiązałoby się z obniżeniem elastyczności systemu, ale dotyczyły sposobu ich wykonania. Jako charakterystyczny przykład można tutaj podać system transportu z kilkoma wózkami, które mogą sobie wzajemnie przeszkadzać w realizacji zadań transportowych. Efektywne i bezkolizyjne sterowanie takiego systemu jest złożonym zagadnieniem i stanowi przedmiot odrębnych prac.

Proponowana taktyka ESP polega na wykonywaniu czynności z listy dopuszczalnej przez model macierzowy, a ściślej biorąc przez blokady w nim zawarte (w myśl zasady: co nie jest zabronione, jest dozwolone), z wyjątkiem tych czynności, na które nałożono dodatkowe ograniczenia taktyczne. Czasem lista zawiera czynności niezależne od siebie w tym sensie, że polecenie wyko-

nania którejkolwiek z nich nie eliminuje możliwości realizacji żadnej z pozostałych. W tym wypadku zleca się wykonanie wszystkich czynności z listy. Jeżeli natomiast zależność taka występuje, po wyborze i poleceniu wykonania jednej czynności, z listy usuwa się czynności wyeliminowane przez ten wybór (ich numery wskaże model macierzowy). Wspomniane ograniczenia taktyczne wynikają z następujących przesłanek:

- Nie można dopuścić do zablokowania środków transportowych przez pobranie na nie elementów, dla których nie istnieje przygotowane miejsce złożenia. Zapobiega to doprowadzeniu do stanu martwego systemu, gdy żadna z czynności nie może być wykonana. Stosowne warunki umożliwiają sprawdzenie, czy istnieje wolne miejsce dla złożenia elementu (np. palety, przedmiotu obrabianego) pobranego przez środek transportowy.
- Należy spełnić wymagania strategiczne, w szczególności odnoszące się do kolejności pobierania elementów z magazynu według określonego planu, z wykorzystaniem informacji o aktualnym zaawansowaniu produkcji.

Jak już wspomniano, macierzowy model ESP na każdym etapie jego funkcjonowania dopuszcza do realizacji pewien podzbiór czynności elementarnych. Do taktyki natomiast należy zapewnienie właściwej sekwencji poleceń wykonywania tych czynności. W zależności od złożoności postępowania prowadzącego do podjęcia odpowiedniej decyzji w tym zakresie, można wyróżnić trzy poziomy taktyki.

**Poziom 1. Taktyka typu N (wykorzystanie liczników zakończonych czynności)**

W każdym etapie eksploatacji ESP określa się liczbę zwolnionych miejsc, na które można złożyć pobrany z magazynu, lub innego modułu systemu element (np. przedmiot obrabiany, paletę). Jak pokazano w pracy [2], w i-tym etapie działania systemu, dla każdej czynności elementarnej  $j$  znane są cztery wielkości:

- $T_{startj}(i)$  - możliwy termin rozpoczęcia ( $M$  dla czynności niewykonywalnej),
- $T_{endj}(i)$  - przewidywany termin zakończenia dla czynności rozpoczętej ( $M$  dla nie rozpoczętych),
- $N_{startj}(i)$  - liczba przypadków rozpoczęcia czynności,
- $N_{endj}(i)$  - liczba przypadków zakończenia czynności, przy czym  $M$  jest wystarczająco dużą liczbą.

Ponadto przyjęto następujące oznaczenia:

- $K_2$  - podzbiór elementów systemu stanowiących możliwe miejsca złożenia elementu transportowanego (np. stołów stacji obróbkowych),
- $J_p$  - podzbiór czynności związanych z pobieraniem elementów, które mają być przekazane na jedno z miejsc  $K_2$ ,

$J_{\Sigma}$  - podzbiór czynności związanych ze zwalnianiem miejsc  $K_{\Sigma}$ .

$N_j$  - licznik przyporządkowany czynności  $j$ ,

$l_{\Sigma}$  - stała całkowita, zależna od liczebności zbioru  $K_{\Sigma}$  i stanu początkowego.

Słowne warunki umożliwiają sprawdzenie istnienia wolnego miejsca złożenia i w przypadku jego braku, wstrzymanie czynności pobrania. Warunki te mają postać nierówności algebraicznych, wiążących liczniki przyporządkowane czynnościom i wyrażone są wzorem:

$$\sum_{j \in J_p} \leq \sum_{j \in J_{\Sigma}} N_j + l_{\Sigma} \quad (1)$$

W taktyce typu N liczniki  $N_j$  odnoszą się do zakończonych czynności. Na etapie  $i$  należy zatem przyjąć  $N_j = N_{\text{ond}j}(i)$ .

Druga grupa warunków nierównościowych dla taktyki typu N zapewnia właściwą kolejność uruchamiania produkcji poszczególnych typów przedmiotów i odnosi się do przyjętego planu pracy ESP.

Czynność tylko wtedy może być wykonana, gdy spełnione są wszystkie warunki, które zostały jej przypisane.

**Poziom 2. Taktyka typu T (przewidywanie zwolnienia miejsca złożenia)**

Dysponując co najmniej dwoma wózkami, można osłabić ograniczenia rozpatrywane w taktyce typu N, w niektórych wypadkach doprowadzając do uruchomienia czynności niedopuszczalnych z punktu widzenia tej taktyki. Idea proponowanego postępowania polega na sprawdzeniu możliwości zwolnienia się miejsca przekazania przed najwcześniejszym przewidywanym (ze względu na czas trwania transportu) terminem złożenia nowo pobranego elementu.

Na etapie  $i$ , dla czynności  $l$  o czasie trwania  $t_l$ , sprawdzenie to wykonuje się według następującego, prostego algorytmu:

W warunku postaci (1) przypisanym czynności  $l$  podstawia się  $N_j = N_{\text{start}l}(i)$ .

Jeżeli jest on spełniony, to dodatkowo należy sprawdzić warunek:

$$T_{\text{start}l}(i) + t_l \geq \min_{j \in J_{\Sigma}} T_{\text{ond}j}(i), \quad (2)$$

którego spełnienie rozstrzyga o możliwości wykonania czynności  $l$ .

Z oczywistych powodów taktyki typu T nie można zastosować w wypadku jednego środka transportowego. Należy jej także unikać przy zawodności układu transportu, gdyż awaria w czasie wykonywania czynności zwalnającej miejsce złożenia mogłaby doprowadzić do zablokowania transportu. Tym niemniej, analizując różne scenariusze awarii elementów w czasie projektowania układów sterowania i nadzorowania ESP, można przewidzieć odpowiednie czynności wycofujące, odblokowujące unieruchomiony system.

Pomimo to, że stosowanie taktyki typu T prowadzi do pewnego skomplikowania algorytmów sterowania i przepływu informacji w systemie, należy ją zalecić w wypadku dysponowania kilkoma środkami transportowymi i przy dużym udziale czasu trwania czynności transportowych. Można się wtedy spodziewać pewnej oszczędności czasu, a co za tym idzie zwiększenia wykorzystania modułów obróbkowych i efektywności całego systemu.

### Poziom 3. Taktyka typu N (zastosowanie złożonych algorytmów bieżącego doboru kolejności wykonywania czynności)

Często zachodzi konieczność uwzględnienia dodatkowych, nie rozpatrywanych dotychczas okoliczności.

- W wielu wypadkach taktyka typu N i T umożliwia wykonanie więcej niż jednej czynności. Zachodzi konieczność doboru kolejności ich uruchamiania, zwłaszcza wtedy, gdy wykonanie jednej eliminuje możliwość wykonania innych. Znajdują tutaj zastosowanie rozmaite algorytmy harmonogramowania, ustalające porządek czynności według różnych kryteriów. Wystarczającą skuteczność wykazują stosunkowo proste heurystyki [5,6,7]. W programie wykorzystanym do przetwarzania zamieszczonego w pracy modelu ESP zastosowano heurystykę polegającą na wykonywaniu dopuszczalnych czynności według narastających ich numerów. Posiada ona intuicyjne uzasadnienie, wynikające z naturalnej tendencji do układania czynności w tablicy wyjściowej dla modelu macierzowego, zgodnie z porządkiem technologicznym.
  - W związku z wykonywanym planem produkcyjnym, aktualną sytuacją w systemie lub też z innych powodów niejednokrotnie zachodzi konieczność wstrzymania wykonywania niektórych czynności. Podaje się wtedy odpowiednie terminy najwcześniejsze dopuszczalne, po przekroczeniu których zakaz automatycznie przestaje obowiązywać. Tę tutaj jedną z możliwości aktywnego udziału dyspozytora w sterowaniu systemem.
  - Macierzowy model ESP, który, jak pokazano w pracy [2], może być efektywnie zastosowany do sterowania systemem, jest modelem symulacyjnym. Pozwala zatem antycypować stany systemu dla różnych wariantów decyzji taktycznych. Analiza możliwych skutków takiej czy innej decyzji wiąże się niekiedy z dużymi trudnościami. Tymczasem rozpoczynając od aktualnego stanu systemu (model podąża za procesem rzeczywistym), można symulować kolejne stany, sprawdzając skuteczność wybranej taktyki.
- Prognozowanie stanów ESP w oparciu o jego model macierzowy umożliwia także zaplanowanie i wcześniejsze wykonanie odpowiednich czynności przygotowawczych. Jeżeli np. z modelu wynika, że niebawem pojawi się zadanie transportowe, nieuzasadnione jest przetrzymywanie wózka w neutralnym

miejscu. Należy go z wyprzedzeniem wysłać tam, skąd pobierany będzie element. Uzyska się w ten sposób przyspieszenie operacji transportowych, co jest szczególnie istotne w systemach rozległych z długimi drogami transportowymi. Do tego celu wymagana jest odpowiednia postać modelu, w którym występują czynności przygotowawcze, np. dojazd wózka do miejsca pobrania elementu, dojazd do miejsca złożenia. Warto tutaj dodać, że dobór czynności elementarnych w modelu ściśle wiąże się z celem modelowania. Na przykład wskazane jest rozdrobnienie czynności, w których biorą udział elementy częściej ulegające uszkodzeniom. Układ nadzorowania, w którym model stanowi komputerowy wzorzec procesu produkcyjnego, dokładnie zlokalizuje wtedy miejsce awarii.

Decyzje w ramach taktyki typu H powinny być sprawdzone, czy nie naruszają wymagań przyjętego planu produkcyjnego. Konieczność odwołania się do modułu planowania ma miejsce także w przypadkach większych i długotrwałych awarii, zazwyczaj wymagających skorygowania planu.

#### 4. Przykład

Zaproponowane podejście do taktyki sterowania ESP zostanie pokazane na przykładzie systemu elastycznego do obróbki części obrotowych. Konfigurację elementów systemu przedstawiono na rys. 2.

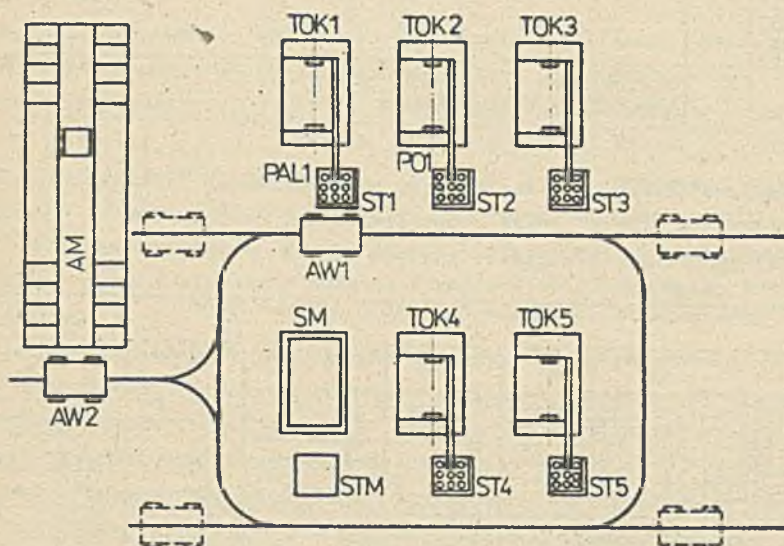
Dwa typy przedmiotów obrabianych (P01 i P02) są transportowane w paletach (PAL1, PAL2). W paletce PAL1 znajdują się 4 przedmioty P01, a w paletce PAL2, 6 przedmiotów P02. Transport palet pomiędzy automatycznym magazynem (AM), stołami stacji tokarskich (ST1-ST5) oraz stołem stacji mycia (SM), wykonywany jest z pomocą dwóch automatycznych wózków (AW1, AW2). Każdy z przedmiotów jest całkowicie obrabiany na dowolnej z pięciu stacji tokarskich (TOK1-TOK5), a następnie myty na stacji mycia (SM). Macierzowy model tego systemu przedstawiono w pracy [2]. W tabelicy 1 zestawiono czynności transportowe, przy czym skróty ich nazw zapisano według schematu:

element przekazywany ,skąd --> dokąd.

W tabelicy 2 podano warunki ograniczające postaci (1) dla taktyki typu N. Każdy z wymienionych warunków posiada prostą interpretację. Np. pierwszy z warunków przyporządkowanych czynności numer 1 spełniony jest tylko wtedy, gdy dla palety pobranej z magazynu istnieje co najmniej jedno wolne miejsce na stołach stacji tokarskich. Warunek dla czynności  $j=33$  zapewnia istnienie wolnego stołu stacji mycia w chwili pobierania palety ze stołu sta-



cji tokarskiej. Plan produkcji zakładał równoczesne i równomiernie rozłożone w czasie wykonywanie obu wyrobów. Stąd drugi warunek dla czynności  $j=1,2,47,48$ , zapewniający zbliżoną liczbę wyprodukowanych sztuk przedmiotów PO1 i PO2, w każdej fazie procesu. Można oczywiście w podobny sposób zapisać warunki pozwalające zachować dowolne inne proporcje pomiędzy wykonanymi wyrobami. W razie potrzeby możliwa jest zmiana tych warunków w czasie trwania procesu.



Rys 2. ESP do obróbki części obrotowych.  
FMS for turning.

Tablica 1 Czynności transportowe

Nr	Nazwa czynn.	Nr	Nazwa czynn.	Nr	Nazwa czynn.	Nr	Nazwa czynn.
1	PAL1.AM-->AW1	33	PAL1.ST1-->AW1	47	PAL2.AM-->AW1	79	PAL2.ST1-->AW1
2	PAL1.AM-->AW2	34	PAL1.ST2-->AW1	48	PAL2.AM-->AW2	80	PAL2.ST2-->AW1
3	PAL1.AW1-->ST1	35	PAL1.ST3-->AW1	49	PAL2.AW1-->ST1	81	PAL2.ST3-->AW1
4	PAL1.AW1-->ST2	36	PAL1.ST4-->AW1	50	PAL2.AW1-->ST2	82	PAL2.ST4-->AW1
5	PAL1.AW1-->ST3	37	PAL1.ST5-->AW1	51	PAL2.AW1-->ST3	83	PAL2.ST5-->AW1
6	PAL1.AW1-->ST4	38	PAL1.STM-->AW1	52	PAL2.AW1-->ST4	84	PAL2.STM-->AW1
7	PAL1.AW1-->ST5	39	PAL1.ST1-->AW2	53	PAL2.AW1-->ST5	85	PAL2.ST1-->AW2
8	PAL1.AW1-->STM	40	PAL1.ST2-->AW2	54	PAL2.AW1-->STM	86	PAL2.ST2-->AW2
9	PAL1.AW2-->ST1	41	PAL1.ST3-->AW2	55	PAL2.AW2-->ST1	87	PAL2.ST3-->AW2
10	PAL1.AW2-->ST2	42	PAL1.ST4-->AW2	56	PAL2.AW2-->ST2	88	PAL2.ST4-->AW2
11	PAL1.AW2-->ST3	43	PAL1.ST5-->AW2	57	PAL2.AW2-->ST3	89	PAL2.ST5-->AW2
12	PAL1.AW2-->ST4	44	PAL1.STM-->AW2	58	PAL2.AW2-->ST4	90	PAL2.STM-->AW2
13	PAL1.AW2-->ST5			59	PAL2.AW2-->ST5		
14	PAL1.AW2-->STM			60	PAL2.AW2-->STM		

Numery czynności	Nr war.	Warunki ograniczające
1, 2	1	$N_1 + N_2 + N_{47} + N_{48} \leq N_{33} + N_{34} + N_{35} + N_{36} + N_{37} + N_{39} + N_{40} + N_{41} + N_{42} + N_{43} + N_{79} + N_{80} + N_{81} + N_{82} + N_{83} + N_{85} + N_{86} + N_{87} + N_{88} + N_{89} + 4$
	2	$4 * N_1 + 4 * N_2 \leq 6 * N_{47} + 6 * N_{48}$
33, 34, 35, 36, 37, 39, 40, 41, 42, 43, 79, 80, 81, 82, 83, 85, 86, 87, 88, 89	1	$N_8 + N_{14} + N_{54} + N_{60} \leq N_{38} + N_{44} + N_{84} + N_{89}$
47, 48	1	jak warunek 1 dla czynności 1
	2	$4 * N_1 + 4 * N_2 \geq 6 * N_{47} + 6 * N_{48}$

Tablica 3 zawiera czynności trwające oraz dopuszczone do wykonania przez model macierzowy na etapie  $i=938$  odpowiadającym chwili  $T=668$ , wraz ze wszystkimi wielkościami używanymi w taktyce typu N i T.

Nazwa czynności	Nr (j)	$T_{startj}(i)$	$T_{endj}(i)$	$N_{startj}(i)$	$N_{endj}(i)$	$t_j$
PAL1.AM → AW1	1	668	M	7	7	3.0
PAL1.AM → AW2	2	668	M	6	6	3.0
PAL2.AM → AW1	47	668	M	4	4	3.0
PAL2.AM → AW2	48	668	M	4	4	3.0
PAL1.ST5 → AW1	37	668	M	1	1	2.0
PAL1.ST5 → AW2	43	668	M	0	0	2.0
PO1.TOK1* (1)	21	M	673	18	17	33.0
PO1.TOK3*	23	M	693	6	5	33.0
PO1.TOK4*	70	M	670	10	9	20.0

(1) PO1.TOK1\* oznacza obróbkę przedmiotu PO1 na stacji tokarskiej TOK1.

Nazwa czynności	Nr (j)	$T_{startj}(i)$	$T_{endj}(i)$	$N_{startj}(i)$	$N_{endj}(i)$	$t_j$
PAL1.AM → AW2	2	668	M	6	6	3.0
PAL2.AM → AW2	48	668	M	4	4	3.0
PAL1.ST5 → AW1	37	M	670	2	1	2.0
PO1.TOK1*	21	M	673	18	17	33.0
PO1.TOK3*	23	M	693	6	5	33.0
PO2.TOK4*	70	M	670	10	9	20.0

#### Taktyka typu N.

Stany liczników zdarzeń zakończenia czynności  $N_{endj}(i)$  na rozpatrywanym etapie sprawiają, że spośród czynności dopuszczonych do wykonania przez model macierzowy, stosowne warunki spełnione są jedynie dla czynności  $j=37$  (PAL1.ST5 → AW1) oraz  $j=43$  (PAL1.ST5 → AW2). Zgodnie z zastosowaną heurystyką rozpoczynana jest czynność  $j=37$ , co w kolejnym etapie  $i=939$  eliminuje możliwość wykonania czynności  $j=1, 43, 47$ . W dalszym ciągu warunki

nie dopuszczają do zrealizowania któregokolwiek zdarzenia (tablica 4). Następuje przesunięcie czasu bieżącego do chwili  $T=670$ , interpretowane jako oczekiwanie na zrealizowanie najwcześniejszego możliwego zdarzenia (zwolnienie stołu ST5). Zmiana licznika  $N_{\text{end}37}(940)$  związana z terminowym zakończeniem czynności  $j=37$  spowoduje spełnienie warunków dla czynności  $j=48$  (PAL2, AM $\rightarrow$ AW2), która wobec tego będzie się mogła rozpocząć w chwili  $T=670$ .

#### Taktyka typu T.

Celowe jest sprawdzenie możliwości rozpoczęcia czynności  $l=48$  w chwili  $T=668$  ( $i=939$ ), ponieważ przypisane jej warunki są spełnione dla liczników zdarzeń rozpoczęcia  $N_{\text{start}j}(939)$ . Łatwo zauważyć, że spełniony jest także warunek (2) ( $T_{\text{start}48}(939)=668$ ,  $t_{48}=3.0$ ,  $\min_{j \in J} T_{\text{end}j}(939)=T_{\text{end}37}(939)=670$ ). Zatem czynność  $l=48$  można rozpocząć w chwili  $T=668$ , ponieważ przewidywane zwolnienie miejsca (ST5) na złożenie pobranego elementu (PAL2) nastąpi przed jego dostarczeniem. Na tym etapie zyskuje się w ten sposób dwie jednostki czasu i likwiduje przerwę w pracy stacji lokarskiej TOKS.

#### Taktyka typu H.

Podany przykład pozwala zaprezentować jedną z potencjalnych możliwości tego typu taktyki. Przeprowadzona w odpowiednim momencie symulacja kilku kolejnych etapów funkcjonowania systemu pozwala przewidzieć terminy zdarzeń stanowiących przedmiot analizy w taktyce typu T. Widoczna jest możliwość jeszcze wcześniejszego (bliskiego chwili  $T=667$ ) rozpoczęcia czynności  $j=48$ . Dokładne ustalenie tego terminu wymaga dalszego podziału czynności traktowanych tutaj jako elementarne. W przedstawionej sytuacji zysk jest niewielki, toteż chodziło jedynie o pokazanie metody, która -jak wspomniano- byłaby efektywna dla czasochłonnych operacji transportowych.

### 5. Zakończenie

W zaproponowanym podejściu do taktyki sterowania ESP istotne jest to, że pozostaje ona na zewnątrz jego modelu funkcjonalnego. Zastosowany tutaj model macierzowy i tkwiące w nim blokady w każdym okresie pracy systemu pozwalają określić technologicznie dopuszczalne warianty dalszego działania. Istnieje zatem możliwość swobodnego i uwzględniającego aktualny stan procesu produkcyjnego, doboru taktyki sterowania, bez konieczności głębokiego ingerowania w model.

Ważnym i wymagającym komputerowego wspomagania zagadnieniem jest opracowanie odpowiedniej strategii z punktu widzenia opłacalności eksploatacji systemu. Taktyka sterowania w zaproponowanym ujęciu pełniła by służebną rolę w stosunku do realizowanej strategii działania ESP.

#### LITERATURA

- [1] Ammons J.C., Govindaraj T., Mitchell Ch.M.: Decision Models for Aiding FMS Control. Georgia Institute of Technology, 1985.
- [2] Cyklis J.: Algorytm symulacji ESP. Referat zgłoszony na VI Krajową Konferencję Automatyzacji Dyskretnych Procesów Przemysłowych. Kozubnik, 1988.
- [3] Cyklis J.: Towards simple simulation of FMS. Monografie Politechniki Krakowskiej, nr 58, 1987.
- [4] Kiran A.S., Aptekin S.: Scheduling Algorithms for Flexible Manufacturing Systems. Working Paper ISE 85-18, University of Southern California, Dept. of Industrial and Systems Engineering, 1985.
- [5] Kiran A.S., Tansel B.C.: Mathematical Programming Models for Flexible Manufacturing Systems. Working Paper ISE 86-01, University of Southern California, Dept. of Industrial and Systems Engineering, 1986.
- [6] Kusiak A. (ed): Modelling and Design of Flexible Manufacturing Systems. Elsevier, New York, 1986.
- [7] Murotsu Y., Oba F., Iwata K., Yasuda K.: A Production Scheduling System for Flexible Manufacturing Systems. Computer Applications in Production and Engineering (ed. E. A. Warman), IFIP, 1983.
- [8] Ranky P.: The Design and Operation of FMS. IFS (Publications) LTD, UK, North-Holland Publishing Company, 1983.
- [9] Stecke K.E.: Design, Planning, Scheduling and Control Problems of Flexible Manufacturing Systems. Annals of Operations Research, 3, 1985.

Recenzent: Prof. dr inż. H. Kowalowski

Wpłynęło do Redakcji do 1988-04-30.

## ТАКТИКА УПРАВЛЕНИЯ ГИБКИХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ УЧАСТКОВ НА ОСНОВЕ МАТРИЧНОЙ МОДЕЛИ

## Резюме

Матричная модель гибких автоматизированных участков (ГАУ) определяет все возможные события, которые могут быть реализованы на каждом шагу управления участка. Соответствующая тактика управления должна быть подчинена оптимальной стратегии и противодействовать выполнению действий, которые могли бы довести к блокировке участка или к снижению его эффективности.

Представленная в работе тактика базируется на алгебраических условиях, которые делают возможными некоторые действия. Эти условия имеют вид простых линейных неравенств, в которых выступают аргументы, представляющие собой количество реализованных событий.

Приведён вид условий для примерного ГАУ.

## THE TACTICS OF THE FMS CONTROL ON THE BASIS OF THE MATRIX MODEL

## Summary

The matrix model of FMS determines all possible events which could be performed at each stage of the system control. The proper tactics of FMS should meet the demand of its optimal strategy and also prevent the system from unnecessary activities which can lead to lowering its effectiveness and even to the deadlock of the system. The tactics presented in the paper is based on some conditions limiting possibility of starting some activities. This conditions have the form of simple linear inequalities with parameters indicating numbers of already performed events. The example of the conditions of a chosen FMS are also presented.