ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1980
Seria: AUTOMATYKA z. 50 Nr kol. 626

Aleksander STASZULONEK

ALGORYTM WYZNACZANIA PROCESU PRZEJŚCIOWEGO W LINII MONTAŻOWEJ

Streszczenie. W artykule przedstawiono nowy model matematyczny przebiegu procesu przejściowego w linii montażowej. Na podstawie modelu matematycznego opracowano algorytm i schemat blokowy programu określającego operacje, które należy wykonać w kolejnych cyklach procesu przejściowego, oraz rozważono możliwość uruchomienia taśmy w okresie przejściowym.

Wstęp

Rozpatrywany jest dyskretny proces montażu obiektu składającego się z N detali. Operacje montażu wszystkich detali są wykonywane na k stanowiskach, umieszczonych szeregowo wzdłuż taśmy produkcyjnej. Ponieważ liczba operacji jest większa od liczby stanowisk, na jednym stanowisku wykonuje się zazwyczaj kilka operacji. Rozdziału operacji między stanowiska dokonuje się tak, aby obciążenia monterów na stanowiskach były w przybliżeniu równe oraz czas wolny w każdym cyklu był minimalny, co zapewnia maksymalną efektywność pracy monterów i wydajność linii [1].

Okazuje się, że dla różnych liczb stanowisk na taśmie inna kolejność montowania detali umożliwia bardziej dogodny przydział operacji. Zagadnienie optymalnego podziału operacji między stanowiska jest problemem balansowania linii montażowych rozwiązanym np. w [1] i [4].

Powyższe odnosi się do sytuacji, gdy nie występują zjawiska zakłócające normalny tok pracy linii zwany stanem ustalonym.

W praktyce produkcyjnej występują następujące sytuacje:

- zmiana liczby stanowisk przy nie zmienionej strukturze montażu
- zmiana struktury przy nie zmienionej liczbie stanowisk
- równoczesna zmiana struktury i liczby stanowisk.

Wymienione sytuacje powodują zmianę przydziału operacji na stanowiska. Można je traktować jako swego rodzaju zakłócenie w dyskretnym procesie przemysłowym. Uzasadnione jest to tym, że przed wystąpieniem zakłócenia na taśmie znajdują się obiekty o określonym stanie zaawansowania montażu i zmiana przydziału operacji po jego wystąpieniu powoduje, że niektóre detale mogą zostać pominięte, co pociąga za sobą wystąpienie braków. Szczegółowy przykład podano w [3].

Zjawiska obserwowane na taśmie od momentu wystąpienia zakłócenia do osiągnięcia stanu ustalonego określa się mianem procesu przejściowego. Przy-

jęto założenie, że na linii montuje się obiekty jednego typu w odróżnieniu od sytuacji, kiedy na linii montowane są obiekty różnych typów i która znana jest jako stan nieustalony. Zagadnienie stanu nieustalonego rozważane jest w [5].

Skutki wystąpienia procesu przejściowego badano w Fabryce Samochodów Małolitrażowych w Bielsku. Aby uniknąć wystąpienia znacznej liczby braków w początkowym okresie pracy nowej zmiany nie uruchamia się przesuwu linii. W tym czasie odbywa się uzupełnianie silników, których montaż rozpoczęto na poprzedniej zmianie tak, aby osiągnąć na każdym stanowisku stan właściwy dla ustalonej pracy nowej zmiany.

W czasie uzupełniania silników monterzy nie dysponują wykazem operacji, które mają wykonać w procesie przejściowym. Postępowanie takie ma zasadnicze wady:

- w czasie postoju, który na ogół trwa kilka cykli, na taśmie nie rozpoczyna się montażu nowych silników, co powoduje obniżenie wydajności o kilka silników na zmianę,
- wśród silników, które są na taśmie występują braki spowodowane nieznajomością wykazu elementów, które muszą być uzupełnione.

Celem niniejszego opracowania jest zbudowanie modelu matematycznego opisującego przebieg procesu przejściowego na linii montażowej i umożliwiającego wyznaczenie operacji, które powinny być wykonane w poszczególnych cyklach. Analizuje się również możliwość uruchomienia taśmy i sterowania jej prędkością w czasie trwania procesu przejściowego.

Rozwiązanie tych problemów umożliwiłoby wydatne zwiększenie wydajności linii oraz poprawę jakości produkcji.

2. Definicje niektórych pojęć

Terminem operacja określono uporządkowane pary liczb

$$O_n = (v_n, t_n) \tag{1}$$

gdzie:

v_n - liczba całkowita oznaczająca kod technologiczny operacji,

t_n - czas wykonywania n-tej operacji o kodzie v_n.

Pod pojęciem struktury montażu rozumie się uporządkowany ciąg elementów

$$S = (v_1, v_2, \ldots v_i, \ldots v_N) \tag{2}$$

gdzie:

v_i - oznaczają kody technologiczne operacji tworzących strukturę procesu,

i - jest wskaźnikiem kolejności operacji,

S - jest wektorem struktury bazowej.

Stan procesu technologicznego (stan linii) jest to tablica określająca stopień zaawansowania montażu na poszczególnych stanowiskach, utworzona w następujący sposób:

$$X = \{x_{ij}\} \tag{3}$$

gdzie:

i - numer kolejny operacji technologicznej $i=1,2,\ldots,N$

j - numer stanowiska montażu $j=1,2,\ldots,k$.

Elementy tablicy stanu określone są następującą zależnością:

$$x_{ij} = \operatorname{sgn} b_{ij}\, v_i \tag{3.1}$$

przy czym funkcja

$$\operatorname{sgn} b_{ij} = \begin{cases} +1 & \text{gdy operacja została wykonana na stanowisku poprzedzającym st. "j"} \\ -1 & \text{gdy operacja i-ta będzie wykonana na stanowisku "j" lub następnych} \end{cases} \tag{3.2}$$

3. Formalizacja matematyczna algorytmu

O wadze i stopniu złożoności rozpatrywanego problemu, a także celowości algorytmizowania zagadnienia świadczy liczba możliwych procesów przejściowych, które mogą zachodzić między dowolnym stanem początkowym X_p oraz końcowym X_k.

Niech liczba praktycznie dopuszczalnych struktur montażu będzie równa h, natomiast liczba stanowisk zmienna w granicach od w_{max} do w_{min} włącznie. Otrzymujemy liczbę możliwych stanów statycznych równą

$$S_{st} = w \cdot h \tag{4}$$

przy czym

$$w = w_{max} - w_{min} + 1 \tag{4.1}$$

gdzie:

w_{max} - maksymalna liczba stanowisk na linii

w_{min} - minimalna liczba stanowisk na linii

w - przyrost liczby stanowisk.

Liczba możliwych procesów przejściowych między dwoma dowolnymi stanami ustalonymi jest równa

$$S_{pp} = 2\binom{S_{st}}{2} = \frac{S_{st}}{(S_{st}-2)!} = S_{st}(S_{st}-1) \tag{5}$$

Przyjmując dla przykładu $w_{min} = 18$, $w_{max} = 22$ oraz $h = 6$ otrzymujemy $S_{pp} = 870$ możliwych procesów przejściowych. W rzeczywistych procesach jak np. montaż silnika samochodu, liczba stanowisk na taśmie może zmieniać się od 20 do 45 oraz liczba struktur może osiągnąć rząd kilkudziesięciu. Liczba operacji w przeciętnym procesie montażu jest rzędu 10^2.

Tablica stanu w rzeczywistych procesach osiąga wymiary rzędu $10^2 \cdot 25$, co powoduje, że czas obliczania przebiegu procesu przejściowego bez zastosowania maszyny cyfrowej czyni starania takie nieskutecznymi.

Rozpatrzmy skutki, jakie może pociągnąć za sobą nieuwzględnienie procesu przejściowego. Stanowiska na linii montażowej ponumerowane są kolejnymi liczbami naturalnymi od 1 do k.

Przypuśćmy, że operacja i-ta była wykonywana przed wystąpieniem zakłócenia na stanowisku "u", natomiast po jego wystąpieniu na skutek zmiany struktury operacja i-ta ma być wykonywana na stanowisku "u-m". Między stanowiskami "u" oraz "u-m" wystąpi m obiektów, w których operacja i-ta nie zostanie wykonana. Przesunięcie tej operacji ze stanowiska "u" na stanowisko "u+m" nie powoduje braków.

W dalszych rozważaniach posłużymy się tablicą przydziału operacji na stanowiska w końcowym stanie ustalonym, utworzoną według następującego algorytmu:

$$R_{ok} = \{r_{ij}\}$$

$$r_{ij} = 0,5\,(X_{i,j+1} - X_{ij}) \tag{6}$$

$$i = 1,2,\ldots,N$$
$$j = 1,2,\ldots,k-1$$

natomiast dla $j = k$

$$r_{ik} = 0,5\,(s_i - x_{ik}) \tag{6.1}$$

gdzie:

s_i - elementy wektora struktury bazowej

x_{ij} - elementy tablicy stanu procesu

r_{ij} - elementy tablicy przydziału operacji na stanowiska.

Jak łatwo zauważyć r_{ij} przyjmują wartości całkowite dodatnie lub zera.

Na podstawie rozważań przedstawionych w [3] można podać ogólne zależności czasowe pozwalające określić stan procesu oraz operacje, które powinny być wykonane w kolejnych cyklach procesu przejściowego. Zależności te są dla dynamicznego, dyskretnego systemu, jakim jest linia montażowa, odpowiednikami opisu ciągłych układów dynamicznych metodą równań stanu. Odpowiednikiem ciągłego czasu jest tutaj numer cyklu procesu przejściowego.

$$O_{pp}(n) = 0,5(X_k - X_p(n) + 2R_{ok}) \tag{7}$$

$$O_{pp}(n) = O_{mp}(n) + O_{zp}(n) \tag{8}$$

$$X_z(n) = X_p(n) + 2O_{mp}(n) \tag{9}$$

$$X_p(n+1) : X_p^{ij}(n+1) = \begin{cases} X_z^{i,j-1}(n) & \text{dla } j = 2,\ldots,k \\ X_p^{ij} & \text{dla } j = 1 \\ i=1,2,\ldots,N \end{cases} \tag{10}$$

gdzie:

n - wskaźnik cyklu procesu przejściowego

$O_{pp}(n)$ - tablica modyfikacji stanu początkowego

X_k - tablica stanu końcowego

R_{ok} - tablica przydziału operacji na stanowiska w końcowym stanie statycznym

$X_p(n)$ - tablica stanu procesu w cyklu n
$O_{mp}(n)$ - tablica operacji wykonywanych na stanowiskach w n-tym cyklu procesu przejściowego
$O_{zp}(n)$ - tablica zaniku procesu przejściowego
$X_z(n)$ - zmodyfikowana tablica stanu procesu.

Aby wyrównać wymiary tablic X_p oraz X_k dopisuje się do tablicy o mniejszej liczbie kolumn $l=s_p-s_w$ wektorów kolumnowych struktury bazowej S. Symbole s_p i s_w oznaczają początkową i końcową liczbę stanowisk. W przypadku zwiększania liczby stanowisk wektory kolumnowe S dopisujemy ze znakiem "+" za ostatnią kolumną tablicy X_p.

Przydzielanie monterów na stanowiska należy w tym przypadku rozpocząć od stanowisk o najniższych numerach. Eliminuje się w ten sposób wystąpienie pustych zawieszek. Jeśli liczba stanowisk ulega zmniejszeniu modyfikuje się tablicę X_k uzupełniając ją odpowiednią liczbą wektorów struktury bazowej ze znakiem "-" dopisując je przed początkowymi kolumnami. W tym przypadku przydzielanie monterów należy rozpocząć od stanowisk o najwyższych numerach. Eliminuje to możliwość zejścia z linii zawieszek z niedokończonymi silnikami. Zależności (7) - (10) stanowiące formalizację matematyczną opisu procesu przejściowego są podstawą utworzonego algorytmu określania przebiegu tego procesu.

Proces przejściowy można uważać za zakończony wówczas, gdy tablica modyfikacji częściowej $O_{mp}(n)$ stanie się równa tablicy przydziału operacji na stanowiska w końcowym stanie statycznym.

Równocześnie tablica zaniku procesu przejściowego $O_{zp}(n)$ staje się równa zeru.

Minimalny czas niezbędny na wykonanie wszystkich operacji w n-tym cyklu procesu przejściowego znajdujemy z zależności

$$T_n^c = \max_j \sum_{i=1}^{N} t(O_{mp}^{ij}(n)) \tag{11}$$

gdzie:

T_n^c - minimalny czas n-tego cyklu w procesie przejściowym

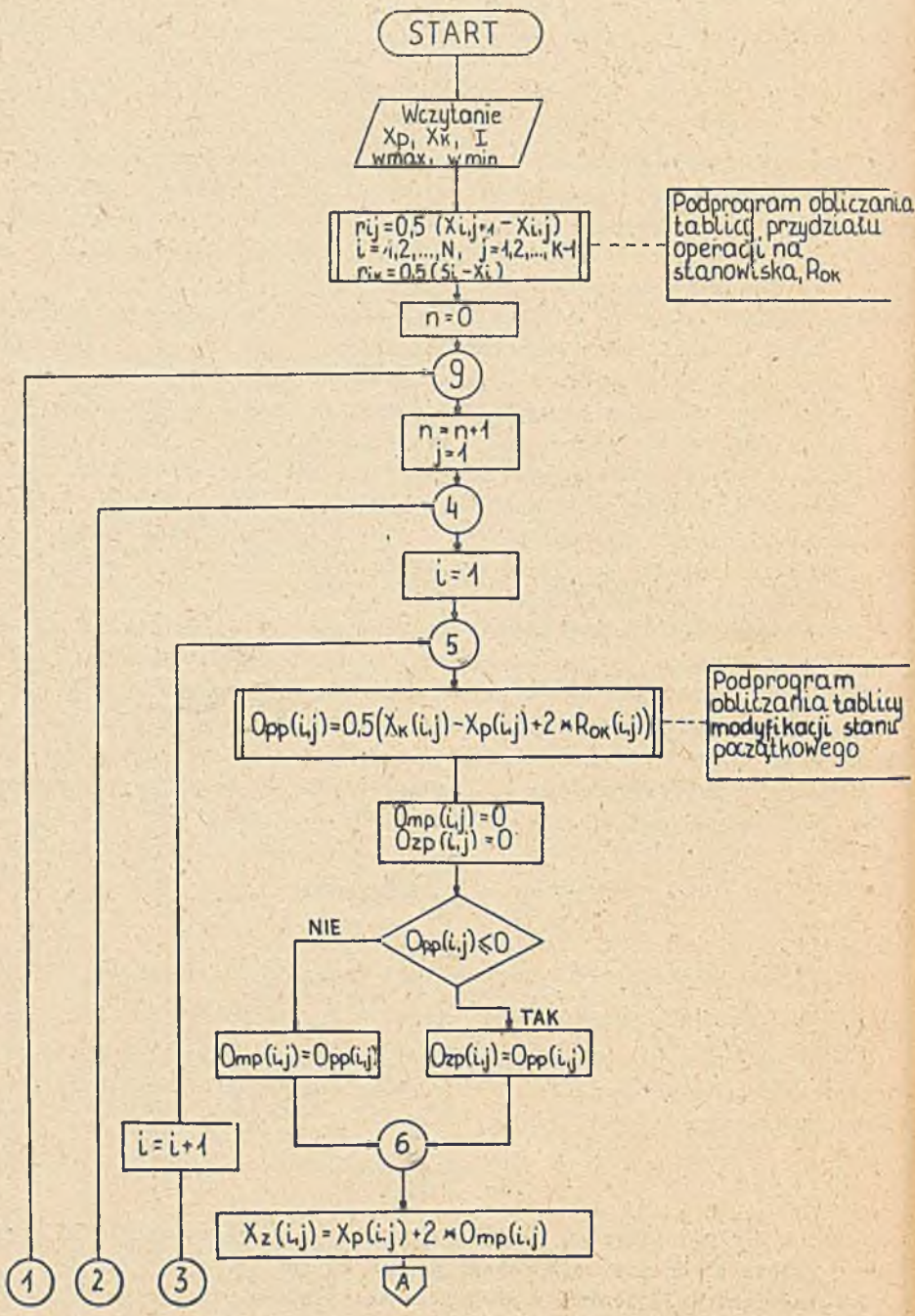
$t(O_{mp}^{ij}(n))$ - czas wykonywania i-tej operacji na stanowisku j.

Jeżeli któryś z elementów tablicy $O_{mp}^{ij}(n)=0$, to odpowiednio $t(0) = 0$. Oznaczając liczbę cykli przez L obliczamy całkowity minimalny czas trwania przejściowego

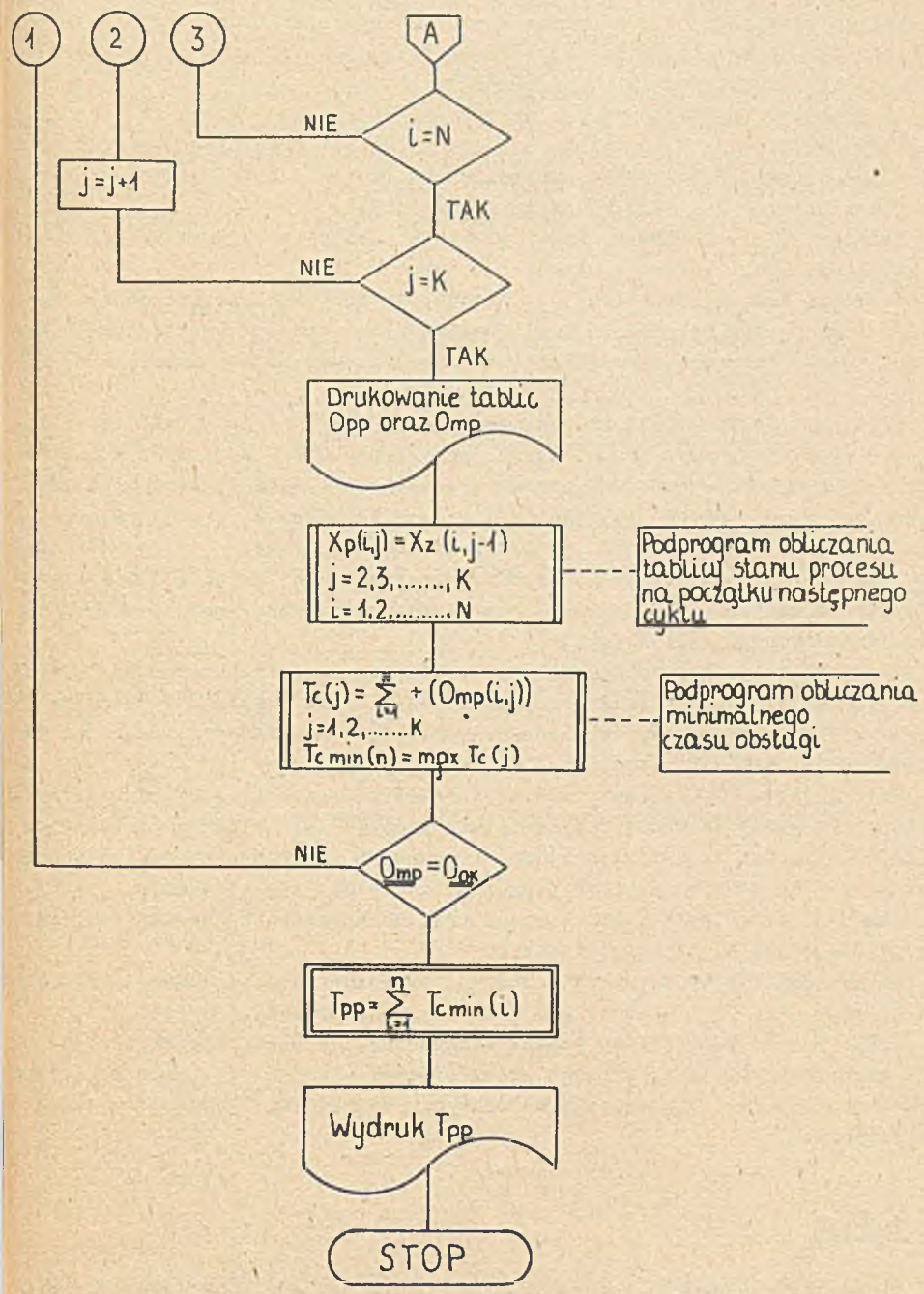
$$t_{min}^{pp} = \sum_{n=1}^{L} T_n^c \tag{12}$$

Schemat blokowy programu realizującego wyznaczanie operacji wykonywanych w czasie procesu przejściowego podano na rys. 1.

Wielkościami wejściowymi w programie są: tablica stanu początkowego, tablica stanu końcowego, wektor struktury bazowej, wektor czasu wykonywania operacji technologicznych oraz początkowa i końcowa liczba stanowisk na taśmie.



Rys. 1. Schemat blokowy programu wyznaczania przebiegu procesu przejściowego



Rys. 1.c.d.Schemat blokowy programu wyznaczania przebiegu procesu przejściowego

Po wczytaniu tych danych następuje tworzenie tablicy operacji przydzielonych na poszczególne stanowiska w stanie ustalonym. Sposób tworzenia tej tablicy podaje zależność (6). Po jej utworzeniu rozpoczyna się maszynowa analiza przebiegu procesu przejściowego.

Obliczenia wykonywane są cyklicznie, aż do momentu, kiedy tablica modyfikacji częściowej O_{mp} stanie się równa tablicy przydziału operacji R_{ok}.

W początkowej fazie pętli następuje obliczenie tablicy modyfikacji stanu początkowego O_{pp} zgodnie z zależnością (7).

Tablica O_{pp} ma wymiar Nxk. Elementy tablicy przyjmują wartości całkowite dodatnie, całkowite ujemne lub zero.

Wartości dodatnie tablicy O_{pp} oznaczają kody technologiczne operacji, które powinny być wykonane w analizowanym cyklu procesu przejściowego. Wartości ujemne lub zera sygnalizują, że operacje zostały nadrobione wcześniej.

Następnie dokonuje się rozłożenia tablicy O_{pp} na dwie tablice składowe o tych samych wymiarach. Czynności tej odpowiada zależność(8). Pierwsza z tych tablic nazwana O_{mp} zawiera tylko elementy dodatnie lub zera, natomiast druga, określona jako tablica zaniku procesu przejściowego zawiera tylko elementy ujemne lub zera. Liczba niezerowych elementów tej tablicy maleje w każdym cyklu procesu przejściowego, aż cała tablica stanie się tożsamościowo równa zeru. Jest to drugi warunek konieczny do zakończenia procesu przejściowego.

Po określeniu tablicy modyfikacji częściowej oblicza się czas pracy monterów na każdym stanowisku w analizowanym cyklu procesu. W rezultacie otrzymuje się wektor T_c. Element wektora T_c o największej wartości jest minimalnym czasem cyklu linii.

Jeżeli proces przejściowy nie został zakończony, to następuje kolejno obliczenie zmodyfikowanej tablicy stanu procesu X_z zgodnie z zależnością (9). Tablica ta uwidacznia stan procesu po zakończeniu analizowanego cyklu, a więc również posiada dokładnie określoną interpretację. Jest ona podstawą do określenia tablicy stanu procesu na początku następnego cyklu, co uwidoczniono na schemacie na rys. 1.

Po wykonaniu powyższych obliczeń wyprowadzane są na urządzenia zewnętrzne tablice X_p, O_{mp}. Wydruk ten jest ostatnią operacją w pętli.

Jeśli proces przejściowy został zakończony, to następuje obliczenie minimalnego czasu trwania procesu przejściowego. Wartość ta wraz z liczbą cykli procesu jest wprowadzana na drukarkę wierszową. Wydruk ten kończy obliczenia.

4. Wnioski

Przedstawiony sposób wyznaczania przebiegu procesu przejściowego sprawdzono przeprowadzając obliczenia na maszynie MIŃSK 32. Jako język programowania wykorzystano Fortran.

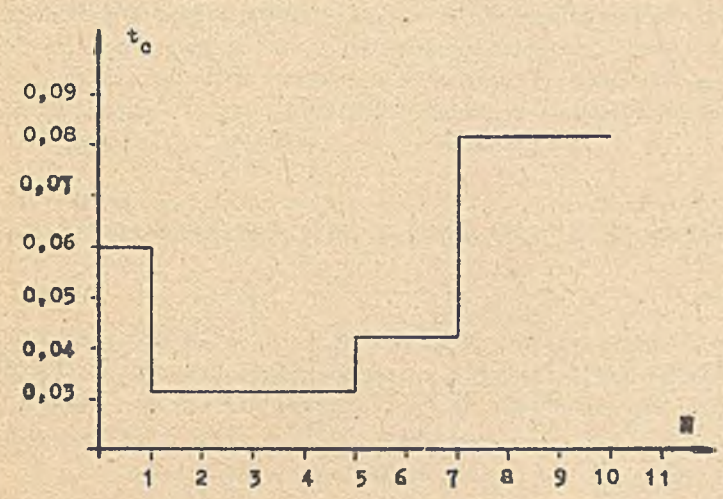
Dane wejściowe dobierano tak, aby wystąpiły wszystkie sytuacje wymienione we wstępie.

Ze względu na duże rozmiary tablic stanu początkowego i końcowego(40x15) danych tych nie prezentuje się w artykule. Tablice stanu dla procesu o niewielkiej liczbie operacji przedstawiono w [3]. Przykładowo przebieg procesu przejściowego na wybranym stanowisku podano w tablicy 1. Tabela zawiera wykaz operacji, które należy wykonywać w procesie przejściowym. Informację taką uzyskuje się dla każdego stanowiska.

Tablica 1

Przebieg procesu przejściowego na stanowisku 3

Lp.	kody operacji	czas obsługi
1	9,10,11,12	0,031
2		0,000
3	1,2	0,010
4	1,2	0,010
5	1,2	0,010
6	1,2	0,010
7	1,2	0,010
8	1,2	0,010
9	1,2	0,010
10	1,2	0,010



Rys. 2. Minimalny czas cyklu w procesie przejściowym

Wykres przedstawiony na rys. 2 przedstawia przebieg minimalnego czasu obsługi linii w kolejnych cyklach procesu przejściowego.

Znajomość przebiegu procesu przejściowego pozwala na wyeliminowanie przestoju linii po rozpoczęciu pracy nowej zmiany. Dokonywane w programie obliczanie minimalnego czasu obsługi dla każdego cyklu pozwala na skokowe sterowanie prędkością przesuwu taśmy. Zastosowanie opracowanej metody w przypadkach wymienionych we wstępie pozwala tym samym na zwiększenie wydajności i poprawę jakości produkcji na linii montażowej.

LITERATURA

[1] KOWALOWSKI H. i inni,: Optymalizacja pracy linii montażowej silnika, Raport z pracy naukowo-badawczej, Instytut Automatyki, Politechnika Śląska Gliwice 1977.

[2] MARECKI F.: Modelowanie symulacyjne linii montażowej samochodu małolitrażowego. Informatyka nr 7-8, 1975.

[3] STASZULONEK A.: Wybrane zagadnienia analizy procesu przejściowego w linii montażowej. Materiały I Krajowej Konferencji Automatyzacji Dyskretnych Procesów Przemysłowych. Gliwice 1978.

[4] MARECKI F.: Analiza sterowania linii montażowej. Seminarium Automatyzacji Dyskretnych Procesów Przemysłowych, Instytut Automatyki, Politechnika Sląska, Gliwice 1978.

[5] KIMMEL M.: Analiza i modelowanie nieustalonego procesu montażu taśmowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka z. 43. Gliwice 1978.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В МОНТАЖНОЙ ЛИНИИ

Р е з ю м е

В работе представлена новая математическая модель переходного процесса в монтажной линии. На основании математической модели разработаны алгоритм и блок-схема программы, вычисляющей операции переходного процесса. Обсуждена возможность приведения в движение монтажной линии во время переходного процесса.

DETERMINATION OF THE TRANSIENT PROCESS IN ASSEMBLY LINE

S u m m a r y

A new mathematical model of transient process in assembly line is presented in the paper. The algorithm and block diagram of the program which determines the operations to be performed during the consecutive phases of the process has been developed. The possibility of starting the assembly line during the process performance is discussed.