ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1982
Seria: AUTOMATYKA z. 64 Nr kol. 736

Jerzy CYKLIS
Instytut Technologii Maszyn
Politechniki Krakowskiej

SYMULACJA ZŁOŻONYCH SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH PRZEDSTAWIONYCH JAKO SIEĆ ZALEŻNOŚCI CZASOWYCH

Streszczenie. Złożony system produkcyjny można przedstawić jako sieć zależności czasowych o jednakowych warunkach logicznych w węzłach przez odpowiednie ukształtowania struktury sieci. Model ten pozwala na dokonanie symulacji systemu z wykorzystaniem reguł sekwencyjnych.

1. WPROWADZENIE

Właściwe związki czasowe pomiędzy kolejnymi etapami złożonego procesu produkcyjnego decydują o terminowości wykonania wyrobu i pełnym wykorzystaniu środków produkcyjnych. Tradycyjny sposób opracowania projektu procesu produkcyjnego dla większej grupy przedmiotów uwzględnia przeciętne (średnie) zapotrzebowanie czasu na poszczególne operacje dla różnych przedmiotów i stanowisk produkcyjnych. Te średnie dane stanowią podstawę opracowania harmonogramu przebiegu prac wraz ze spływem środków dodatkowych. Złożony proces produkcyjny podlega jednak wielu czynnikom przypadkowym, powodującym rozrzuty rzeczywistych czasów wykonania operacji na poszczególnych stanowiskach.

Niekiedy należy się liczyć również z zawodnością poszczególnych urządzeń produkcyjnych. Powoduje to konieczność interwencji kierownictwa, polegającej na wprowadzeniu poprawek w opracowanym wcześniej harmonogramie prac. Wówczas też optymalny harmonogram uzyskany na drodze uwzględnienia parametrów średnich staje się nieaktualny. W przypadku wystąpienia większej liczby zakłóceń przypadkowych mogą powstawać tak zwane "wąskie gardła" produkcyjne, których istnienia nie można było wcześniej wykryć przy tradycyjnym, statycznym rozpatrywaniu zagadnienia. Często interwencje kierownictwa są niekorzystne i nie zawsze dają dobre rezultaty ze względu na konieczność szybkich decyzji nie popartych wnikliwymi obliczeniami. Występuje więc celowość opracowania pewnych reguł decyzyjnych (sterujących), które należy stosować w przypadku koniecznej interwencji.

Podstawową drogą lepszego poznania złożonego systemu produkcyjnego jest dokonanie jego symulacji cyfrowej, przy uwzględnieniu przypadkowego charakteru występujących w nim wielkości.

Symulacja cyfrowa, np. [1, 2, 3], jest dokonywana metodą kolejnych zdarzeń lub stałego kroku czasowego. Może być również dokonana specjalną metodą sekwencyjną. Złożone zależności czasowe występujące w procesie produkcyjnym mogą być przedstawione w postaci sieci z uwzględnieniem jej historii.

Ideą niniejszego artykułu jest wykorzystanie metody sekwencyjnej symulacji i teorii sieci w analizie złożonych systemów produkcyjnych.

2. OPIS ZŁOŻONEGO SYSTEMU PRODUKCYJNEGO JAKO SIECI

Metoda opisu systemu produkcyjnego jako sieci będzie tu omówiona na prostym przykładzie.

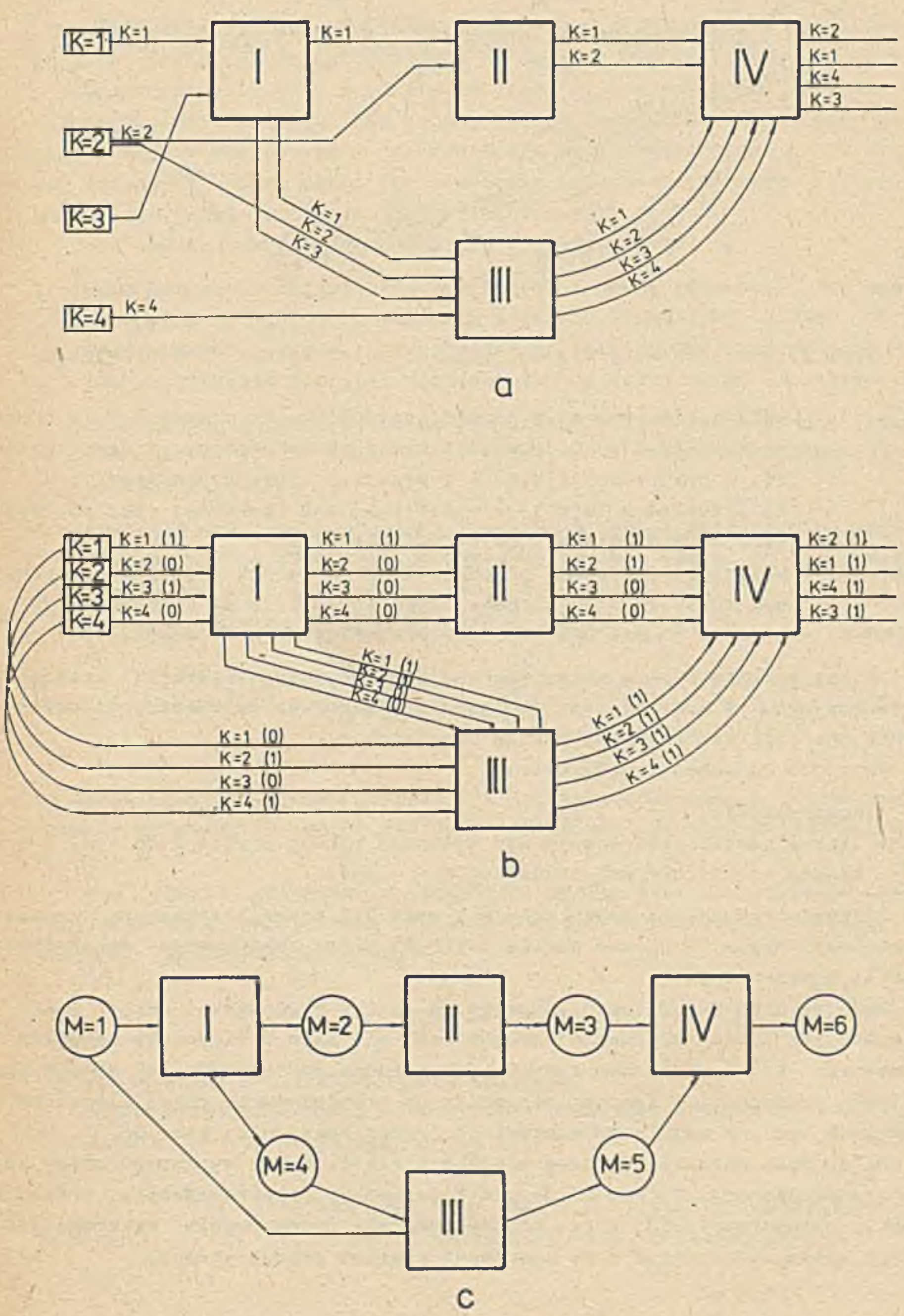
Na rys. 1a pokazane są 4 wyroby o numerach K = 1-4, które podlegają operacjom na czterech stanowiskach I-IV. Niektóre wyroby (np. K = 2) składają się z dwóch elementów, które muszą być obrobione na innych stanowiskach (np. II i III), a następnie połączone (np. na stanowisku IV). Ten sam proces produkcyjny został przedstawiony na rys. 1b, przy czym przyjęto, że jeżeli dany element nie przechodzi przez dane stanowisko, to odpowiada mu wskaźnik IB podany w nawiasie (0), a jeżeli przechodzi (1).

Kolejność wykonywania danego wyrobu na danym stanowisku odpowiada kolejności jego numeru, licząc od góry na liniach łączących stanowiska (zmianę kolejności można zaobserwować na stanowisku IV). Następnym krokiem jest wspólne ujęcie wszystkich przedmiotów K = 1-5, co jest pokazane na grafie wg rys. 1c.

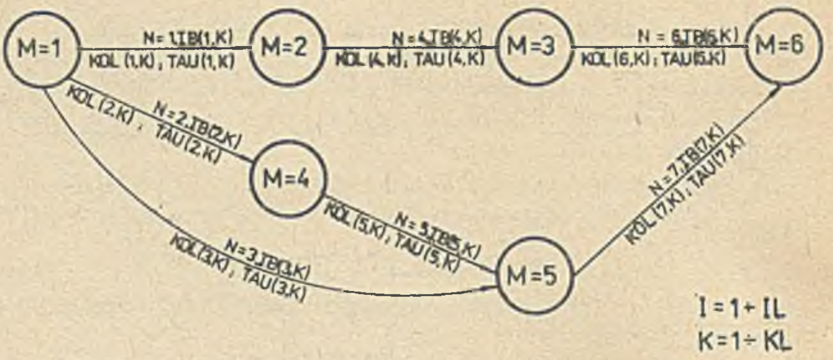
Graf dualny do grafu na rys. 1c jest pokazany na rys. 2 i stanowi on sieć systemu produkcyjnego. W sieci tej należy jednoznacznie określić kolejność wykonywania przedmiotów w poszczególnych gałęziach na podstawie wcześniej ułożonego harmonogramu. Jeżeli dany przedmiot nie jest wykonywany w danej gałęzi (na danym stanowisku), to posiada on wskaźnik wykonania IB (N,K) = 0 i jego kolejność jest obojętna, tym niemniej należy ją ustalić w dowolny sposób ze względów formalnych (dla uniknięcia niejednoznaczności w programie obliczeniowym).

Można teraz powiedzieć, że cały system produkcyjny scharakteryzowany jest siecią wg rys. 2, dla której należy podać następujące parametry:

- N - numer gałęzi, w przykładzie N = 1-7,
- NL - liczba gałęzi, w przykładzie NL = 7,
- M - numer oczka sieci w przykładzie M = 1-6,
- ML - liczba oczek sieci, w przykładzie ML = 6,
- NB(N) - numer początku gałęzi, np. NB(5) = 4,
- NE(N) - numer końca gałęzi, np. NE(5) = 5,
- K - numer przedmiotu w partii, w przykładzie 1-4,
- KL - liczba przedmiotów w partii, w przykładzie 4,



Rys. 1. Etapy formalizacji zapisu systemu produkcyjnego jako grafu



Rys. 2. Graf dualny grafu wg rys. 1c - sieć systemu produkcyjnego

IB(N,K) - wskaźnik wykonywania danego przedmiotu K w gałęzi N, w przypadku IB(N,K) = 0 przedmiot nie jest wykonywany w danej gałęzi, w przypadku IB(N,K) = 1 przedmiot jest wykonywany. Na przykład w IB(1,1) = 1, IB(1,2) = 0 (porównaj rys. 1b wyjście ze stanowiska I do stanowiska II),

KOL(N,K) - kolejność wykonania przedmiotu K w gałęzi N, w przykładzie np. KOL(7,1) = 2 (porównaj rys. 1b wyjście ze stanowiska IV),

TAU(N,K) - czas wykonania operacji nad przedmiotem K w gałęzi N.

Pełnej analizy czasów można dokonać uwzględniając "historię" stanowisk produkcyjnych, a ściślej czas zwolnienia stanowiska do dyspozycji dokonywania operacji nad aktualną partią przedmiotów.

Przyjęto oznaczenia dodatkowe:

I - numer partii,

LL - liczba partii, które mają być wykonane (jedna partia I na rys. 1 i 2 składa się z czterech przedmiotów K = 1-4).

Historia procesu na danym etapie I może być scharakteryzowana czasem zwolnienia oczka M przed partią I-T(M,I) (czas zakończenia wykonywania partii poprzedniej).

Budując sieć należy zwrócić uwagę na rodzaj stanowiska, które ona reprezentuje. I tak np. inaczej przedstawia się sieć dla montażu zespołów z elementów, które muszą być wszystkie uprzednio dostarczone, aby montaż można było rozpocząć, a inaczej dla prostego przekazywania dalej elementów w partiach bez ich wspólnego montowania (patrz dokładniej pkt. 3).

Mając dane warunki logiczne w oczkach sieci, można wyznaczyć czasy zakończenia operacji T,(M,I-1) dające podstawę do przeprowadzenia obliczeń partii o numerze (I-1). W ten sposób powstaje pewna reguła rekurencyjna, którą można wykorzystać przy symulacji systemu produkcyjnego.

3. OPIS WARUNKÓW LOGICZNYCH W OCZKACH SIECI

W oczkach sieci mogą występować różne warunki logiczne, w zależności od tego, jakie operacje dochodzące do niego w nim występują. W niniejszej pracy postanowiono, dla prostoty programu i przejrzystości zadania budowy sieci, sprowadzić wszelkie rodzaje oczek do jednego. Różne warunki logiczne mogące występować w oczkach sieci będą uwzględniane przez odpowiednią zmianę struktury sieci (wprowadzenie czynności pozornych o czasie trwania równym zero) opisaną w dalszej części tego punktu.

Jako podstawowe założenie w oczku sieci przyjęto:

1 - daną operację o czasie trwania TAU(N,K) można rozpocząć po doprowadzeniu do danego oczka elementu w czasie T(NB(N),K) gdzie NB(N) oznacza numer oczka na początku gałęzi N. (Inaczej ten warunek oznacza zakończenie operacji dochodzących do oczka NB(N) dla elementu K),

2 - daną operację TAU(N,K) można rozpocząć po zwolnieniu danego oczka M w czasie T(M) (po zakończeniu wykonywania poprzednich operacji dochodzących do oczka M),

3 - następne operacje wychodzące z oczka M można rozpocząć po zakończeniu wszystkich operacji dochodzących do tego oczka, to jest, dla których numer oczka na końcu gałęzi N spełnia: NE(N) = M.

Powyższe założenia można zapisać za pomocą wzoru:

$$T(M,K) = \max_{N\in\{NE(N) = M\}} \left\{ \begin{matrix} T(NB(N),K) + TAU(N,K),\ldots, \\ T(M) + TAU(N,K),\ldots \end{matrix} \right\} \tag{1}$$

Zapis $N \in \{NE(N) = M\}$ oznacza, że należy uwzględnić zbiór gałęzi dochodzących do oczka M (zbiór ten jest określony równaniem końca gałęzi NE(N) = M.

Czas T(M,K) obliczony z powyższego wzoru, jest równocześnie nowym czasem zwolnienia danego oczka (możliwość podjęcia następnej operacji), co prowadzi do reguły rekurencyjnej

$$T(M) = T(M,K), \tag{2}$$

wykorzystywanej w następnym kroku obliczeń.

Podane wyżej zależności w konkretnym przypadku podanym na rys. 2 np. dla punktu M = 5 przyjmują postać:

$$T(5,K) = \max \left\{ \begin{matrix} T(4,K) + TAU(5,K),\ T(1,K) + TAU(3,K), \\ T(5) + TAU(5,K),\ T(5) + TAU(3,K) \end{matrix} \right\} \tag{3}$$

a następnie wg reguły rekurencyjnej:

$$T(5) = T(5,K) \tag{4}$$

Jeżeli dany przedmiot K w gałęzi N nie jest wykonywany, tj. TB(N,K) = 0, to obliczenia mogą uwzględniać ten fakt w charakterze warunku logicznego opuszczenia tej operacji bez zmian dotąd obliczonych wartości czasów zakończenia operacji T(M,K) i czasów zwolnienia oczek T(M).

Jak zaznaczono wyżej, inne warunki logiczne w oczku sieci niż opisano wyżej można wprowadzić przez zmianę struktury sieci.

Warunki ostrzejsze od podstawowych są następujące:

- daną operację w czasie trwania TAU(N,K) można rozpocząć po doprowadzeniu do danego oczka M wszystkich elementów w czasie T(NB(N),K), dla których NE(N) = M,
- warunki (2) i (3) pozostają nie zmienione w stosunku do podstawowych.

Założenia powyższe można zapisać przy pomocy wzoru

$$T(M,K) = \max_{N \in \{NE(N) = M\}} \{T(NB(N),K),\ldots,T(M)\} + \max_{N \in \{NE(N) = M\}} \{TAU(N,K),\ldots\} \tag{5}$$

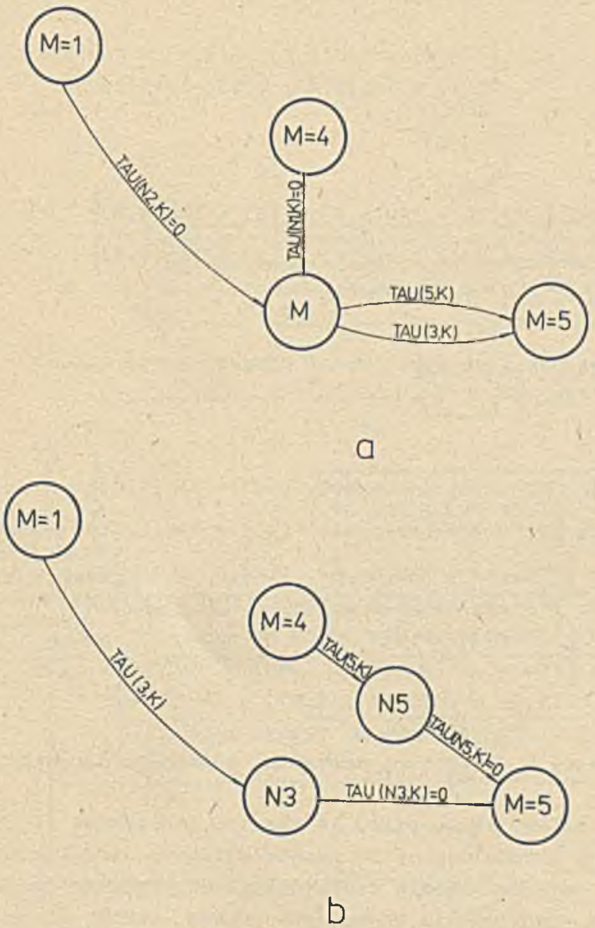
Gdyby warunek ten dotyczył np. punktu M = 5 dla grafu wg rys. 2, to przyjąłby on postać:

$$T(5,K) = \max\{T(4,K),\ T(1,K),\ T(5)\} + \max\{TAU(5,K),\ TAU(3,K)\} \tag{6}$$

Można go jednak uzyskać przez zmianę struktury sieci pokazaną na rys. 3a przy warunkach podstawowych wg wzoru (1). Wówczas bowiem:

$$\begin{aligned} T(M,K) &= \max\{T(4,K) + TAU(N1,K),\ T(1,K) + TAU(N2,K), \\ &\qquad T(M,K) + TAU(N1,K),\ T(M,K) + TAU(N2,K)\} \\ &= \max\{T(4,K),\ T(1,K)\} \\ T(5,K) &= \max\{T(M,K) + TAU(5,K),\ T(M,K) + TAU(3,K), \\ &\qquad T(5) + TAU(5,K),\ T(5) + TAU(3,K)\} = \\ &= \max\{T(M,K),\ T(5)\} + \max\{TAU(5,K),\ TAU(3,K)\} = \\ &= \max\{T(4,K), T(1,K), T(5)\} + \max\{TAU(5,K), TAU(3,K)\} \end{aligned} \tag{7}$$

Założenia słabsze od podstawowych są następujące: warunek (1) i (3) jak w modelu podstawowym, (2) daną operację TAU(N,K) można rozpocząć po zwolnieniu danej gałęzi N (po zakończeniu wykonywania poprzedniej operacji w danej gałęzi N).



Rys. 3. Graf dla zmienionych warunków logicznych dla oczka M = 5

Założenia powyższe można zapisać za pomocą wzoru:

$$T(M,K) = \max_{N \in \{NE(N) = M\}} \left\{ T(NB(N),K) + TAU(N,K), \ldots, T(N) + TAU(N,K), \ldots \right\} \tag{9}$$

Istotną różnicą w stosunku do warunków podstawowych jest zastąpienie czasu zwolnienia oczka T(M) we wzorze (1) przez czas zwolnienia gałęzi T(N). Stosuje się tu regułę rekurencyjną:

$$T = \max \left\{ T(NB(N),K) + TAU(N,K), \; T(N) + TAU(N,K) \right\} \tag{10}$$

$$T(N) = T$$

Dla punktu M = 5 wg rys. 2 przyjmą one postać:

$$T(5,K) = \max\left\{T(4,K) + TAU(5,K),\ T(1,K) + TAU(3,K),\ T(5) + TAU(5,K),\ T(3) + TAU(3,K)\right\} \quad (11)$$

oraz

$$\begin{aligned} T1 &= \max\left\{T(4,K) + TAU(5,K),\ T(5) + TAU(5,K)\right\} \\ T2 &= \max\left\{T(1,K) + TAU(3,K),\ T(3) + TAU(3,K)\right\} \\ T(5) &= T1,\quad T(3) = T2 \end{aligned} \quad (12)$$

Warunki logiczne pokazane wyżej można uzyskać przez zmianę struktury sieci pokazaną na rys. 3b.

Otrzymuje się:

$$\begin{aligned} T(N5,K) &= \max\left\{T(4,K) + TAU(5,K),\ T(N5) + TAU(5,K)\right\} \\ T(N3,K) &= \max\left\{T(1,K) + TAU(3,K),\ T(N3) + TAU(3,K)\right\} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} T(5,K) &= \max\left\{T(N5,K) + TAU(N5,K),\ T(N3,K) + TAU(N3,K),\ T(5) + TAU(N5,K),\ T(5) + TAU(N3,K)\right\} = \\ &= \max\left\{T(N5,K) + T(N3,K)\right\} = \\ &= \max\left\{T(4,K) + TAU(5,K),\ T(N5) + TAU(5,K),\ T(1,K) + TAU(3,K),\ T(N3) + TAU(3,K)\right\} \end{aligned} \quad (14)$$

Wzór ten jest zgodny z przyjętymi wcześniej słabszymi warunkami logicznymi (11).

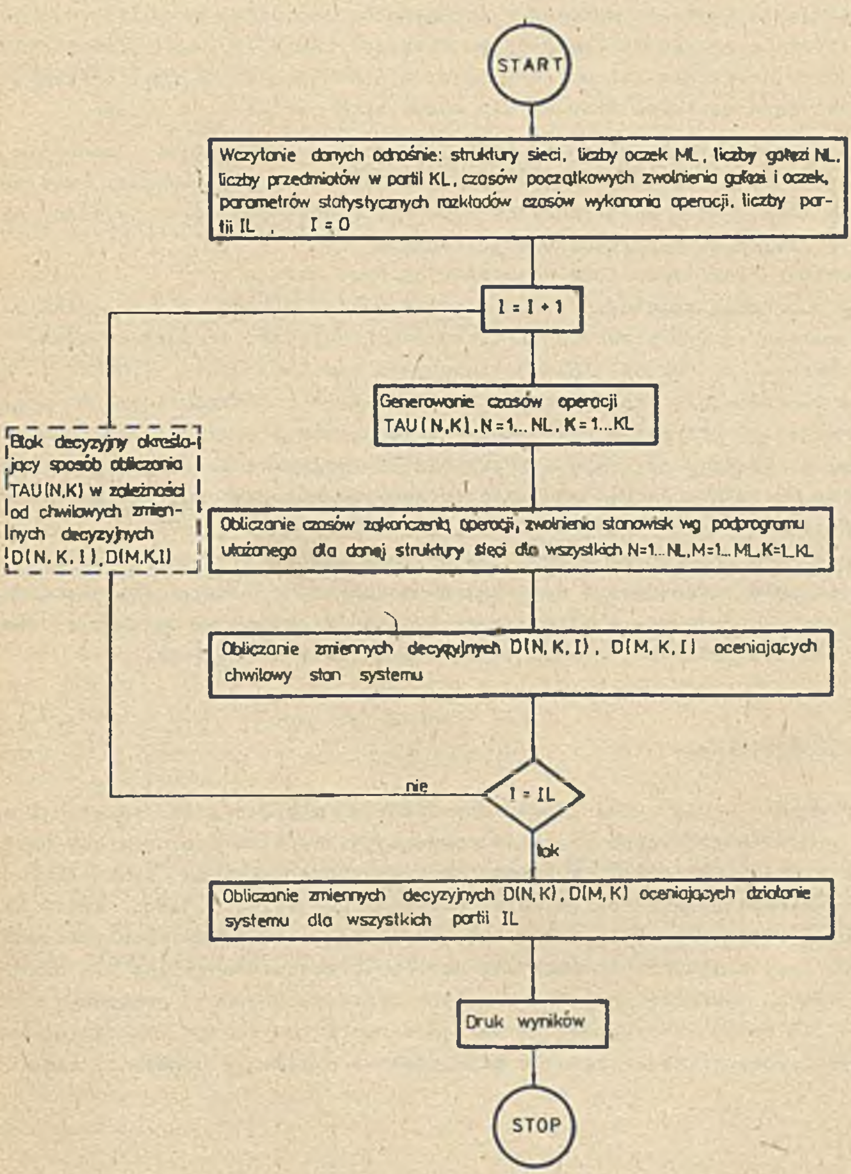
Na zakończenie należy stwierdzić, że warunki podstawowe (1) i mocniejsze (5) odpowiadają przede wszystkim technologicznym warunkom montażu. Warunki słabsze (9) mają przeważnie zastosowanie do procesu obróbki serii na wielu maszynach (zagadnienia harmonogramowania obróbki elementów).

4. SYMULACJA ZŁOŻONEGO SYSTEMU PRODUKCYJNEGO

Symulacja złożonego systemu produkcyjnego opisanego siecią wg rys. 2 zawiera następujące zasadnicze części składowe:

- wczytanie danych odnośnie do struktury i parametrów sieci,
- generowanie czasów wykonania operacji TAU(N,K) na każdym etapie symulacji I, dla każdej gałęzi N = 1...NL oraz dla każdego przedmiotu K,
- obliczanie czasów zakończenia poszczególnych operacji w oczkach sieci, uwzględniając dane z poprzedniego etapu odnośnie do czasów zwolnienia oczek T(M,I).

  Po zakończeniu obliczeń otrzymuje się czasy zwolnienia i oczek T(M,I-1) jako dane wejściowe do etapu (I-1).



Rys. 4. Uproszczony schemat blokowy programu symulacyjnego

- obliczanie różnego typu zmiennych decyzyjnych chwilowych D(N,K,I) D(M,K,I), pozwalających ocenić poprawność działania systemu dla etapu I. Przykładem zmiennych decyzyjnych chwilowych mogą być czasy oczekiwania przedmiotu w kolejce do stanowiska, czasy przerw pracy stanowisk, spóźnienia terminów wykonania przedmiotów lub całej partii I,
- obliczenie zmiennych decyzyjnych średnich D(N,K), D(M,K) posiadających podobne znaczenie jak opisane wyżej zmienne decyzyjne chwilowe,ale przedstawiające wartości średnie dla wszystkich partii .I = 1...IL.

Na podstawie toku obliczeń widać, że jedyne zastrzeżenie odnośnie do struktury sieci dotyczy niewystępowania zapętleń, gdyż wówczas nie można byłoby korzystać z odpowiednich reguł rekurencyjnych sekwencyjnego obliczenia czasów w poszczególnych jej oczkach.

Schemat blokowy obliczeń pokazano na rys. 4.

Na podstawie zmiennych decyzyjnych średnich D(N,K), D(M,K) można zmieniać parametry lub strukturę procesu produkcyjnego wykrywając m.in. "wąskie gardła" produkcji. Zmienne decyzyjne chwilowe D(N,K,I),D(M,K,I) służą do wypracowania decyzji odnośnie do działań organizacyjnych w postaci interwencji w przypadku zakłócenia harmonogramu prac ponad wartość dopuszczalną. Decyzje te, typu wstrzymania lub przyspieszenia pracy na danym stanowisku, odbijają się na sposobie generowania wartości czasów TAU(N,K) w następnym etapie (I-1).

Symulacja pozwala na ocenę, jakie reguły interwencyjne (sterujące),mające na celu podtrzymanie planowanego przebiegu produkcji, są najbardziej efektywne. Na schemacie blokowym wg rys. 3 oznaczone są one linią przerywaną dla podkreślenia, że nie muszą w programie występować.

5. ZAKOŃCZENIE

Artykuł pokazał tylko główny zarys metody zastosowania symulacji sieci w analizie złożonych systemów produkcyjnych. Niektóre programy obliczeniowe zostały opracowane w języku FORTRAN IV dla systemu CYBER-72 w Instytucie Technologii Maszyn Politechniki Krakowskiej. Można stwierdzić, że jest to jedna z najefektywniejszych metod oceny pracy rzeczywistych systemów produkcyjnych. Rozważa się możliwość zastosowania jej dla nowo projektowanych systemów przy braku danych statystycznych. W przypadku tym ocenie podlegałyby dopuszczalne wartości rozrzutów czasów wykonania poszczególnych operacji ze względu na prawidłowość działania całego systemu.

LITERATURA

[1] CYKLIS J.: Zastosowanie członów nieliniowych w analizie systemu masowej obsługi. Prace Komisji Mechaniki Stosowanej PAN, 1980.

[2] GORDON G.: "System simulation" Pentice Holl, Inc, New Yersey, USA.

[3] NAYLOR T.N.: Computer simulation Techniques for Business and Economics, Wiley, New York 1965.

Recenzent: Prof. dr inż. Henryk KOWALOWSKI

Wpłynęło do Redakcji 15.05.1982 r.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ ИЗОБРАЖЕННЫХ КАК СЕТЬ ВРЕМЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Р е з ю м е

В работе указано, что в разных логических условиях, которые имеют место в действительной производственой системе, можно всегда рассматривать эту систему как сеть с условиями одного типа, изменяя только её структуру и вводя мнимые операции, время длительности которых равно нулю.

Метод этот не вводит ограничений по количеству элементов в партии и структуре сети, за исключением общего положен отсутствия петель.

SIMULATION OF COMPLEX PRODUCTION SYSTEMS CONSIDERED AS A NETWORK OF RELATIONS IN TIME

S u m m a r y

An approach to a description of a complex production system as a network of relations in time is discussed. The description is valid for a general class of systems with various net structures but in the absence of any loops. The theory is the base for a simulation method.