

Zbigniew Banaszak, Marek Mazur

Politechnika Wrocławska

SYMULACYJNE PLANOWANIE PRZEBIEGÓW DYSKRETYCH PROCESÓW PRODUKCYJNYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono opis działania mikrokomputerowego systemu planowania procesów potokowych przebiegających współbieżnie. Działanie omawianego systemu oparte jest na metodzie automatycznej syntezy modeli sieciowych procesu [1,3]. System pracuje w trybie konwersacyjnym i umożliwia m.in. analizę stopnia wykorzystania zasobów oraz ocenę działania systemu w stanach awaryjnych.

1. Wstęp

Obserwowany w ostatnich latach rozwój systemów komputerowo zintegrowanego wytwarzania [4,6,8] silnie wiąże się z budową i eksploatacją elastycznych systemów produkcyjnych [7,9]. Obserwowany postęp wyznaczany jest potrzebami w zakresie kompleksowej automatyzacji dyskretnych procesów produkcyjnych, charakterystycznych m.in. dla przemysłu budowy maszyn. Przesłanki tych potrzeb wynikają z konieczności podniesienia wydajności i efektywności produkcji.

Elastyczne systemy produkcyjne (ESP) są obiektami złożonymi, w których współpraca poszczególnych obiektów (obrabiarek, magazynów, manipulatorów itp.) i podsystemów (transportu i składowania, technologicznego przygotowania produkcji, kontroli itp.) jest zintegrowana w ramach komputerowego systemu sterowania o strukturze rozproszonej. Złożoność ESP implikuje konieczność korzystania z odpowiednich narzędzi wspomagających działania człowieka zarówno w fazie projektowania, jak i eksploatacji. Dostępными narzędziami w tym zakresie są systemy typu CAD, CAP, CAM [5,9].

Wymienione środki, korzystając z metod symulacji komputerowej, umożliwiają ocenę różnych konfiguracji systemu produkcyjnego oraz analizę alternatywnych wariantów organizacji przebiegających w nim procesów technologicznych. Przedstawione możliwości wyznaczają zakres zastosowań technik wspomagania komputerowego obejmujący: projektowanie ESP oraz planowanie i sterowanie procesami w nich zachodzącymi.

Zakres niniejszej pracy ogranicza się do zagadnień budowy systemów komputerowo wspomagane planowania przebiegów technologicznych. Zasadniczym jej celem jest przedstawienie systemu umożliwiającego analizę dynamiki przebiegu różnych wariantów realizacji przebiegających współbieżnie procesów potokowych.

Prezentowany system, będąc istotnym rozszerzeniem układu przedstawionego w pracy [2], zapewnia m.in. możliwość dynamicznego priorytetowania zadań i zasobów, analizę przebiegu procesów w stanach awarii systemu oraz ocenę stopnia wykorzystania zasobów systemu.

W rozdziale 2 sformułowano przedmiot i zakres rozważań prowadzonych w niniejszej pracy oraz przedstawiono stosowane dalej metody modelowania i symulacji procesów. Opis działania systemu planowania przebiegów dyskretnych procesów produkcyjnych przedstawiono w rozdziale 4. Przykłady ilustrujące możliwości wykorzystania systemu, jak również pewne uwagi wskazujące na kierunki dalszych prac zebrane zostały odpowiednio w rozdziale 4 i 5.

2. Sformułowanie problemu

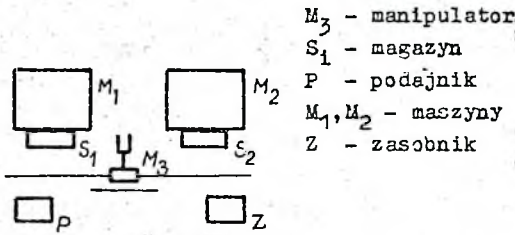
Przedmiotem rozważań jest klasa przebiegających współbieżnie procesów potokowych. Przyjmuje się, że procesy zachodzą w systemie produkcyjnym składającym się ze zbioru obiektów typu: centrum obróbcze, urządzenia do załadunku i wyładunku detali, roboty przemysłowe itp. Z każdym obiektem systemu związany jest zbiór wykonywanych na nim operacji. Kolejność zdarzeń zachodzących w procesach jest zdeterminowana przez porządki określone kolejnością operacji występujących w ciągach technologicznych. Oznacza to w szczególności, że każdy obiekt systemu może realizować pewien zbiór operacji występujących w różnych procesach, przy czym wykonywanie w danym momencie jednej z nich wyklucza wykonywanie wszystkich pozostałych.

Rozważany problem sprowadza się do opracowania systemu konwersacyjnego planowania (harmonogramowania zadań, alokacji zasobów itp.) przebiegu procesów spełniających wyżej wymienione założenia.

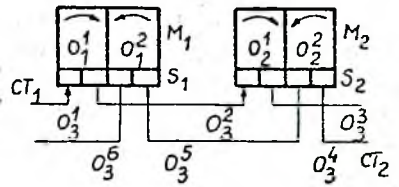
Z uwagi na charakter przyjętych założeń, sprowadzających rozważania do klasy zagadnień typu "job shop", jako metodę analizy dynamiki procesów przyjęto technikę symulacji komputerowej.

Działanie opracowanego systemu oparte zostało na algorytmie automatycznej syntezy modeli sieciowych przebiegu procesu [1,3]. Model sieciowy wyznaczany jest w oparciu o zadany zbiór ciągów technologicznych. Celem ilustracji rozważmy system przedstawiony na rys. 1, którego struktura technologiczna (rys. 2) zadana jest następującymi ciągami technologicznymi: $CT_1 = O_3^1, O_1^1, O_5^2, O_2^1, O_3^3$, $CT_2 = O_3^4, O_2^2, O_5^5, O_1^2, O_3^6$, gdzie O_j^i - oznacza i-tą operację wykonywaną na j-tej maszynie.

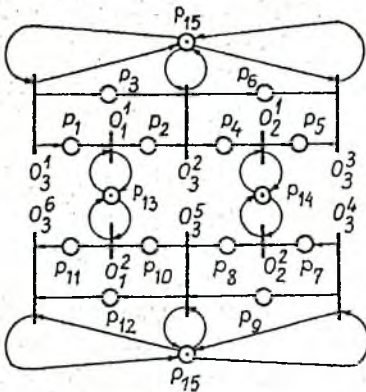
Modelem wszystkich dopuszczalnych realizacji przebiegu procesu (dla dowolnych, nie ustalonych, czasów trwania operacji) jest sieć przedstawiona na rys. 3. Przejścia sieci są interpretowane jako zdarzenia związane z zachodzeniem operacji. Zbiór znakowań osiągalnych sieci ilustruje możliwe



Rys. 1. Gniazdo produkcyjne
Fig. 1. The machining cell



Rys. 2. Struktura technologiczna
Fig. 2. The technological structure



Rys. 3. Model sieciowy procesu
Fig. 3. Net model of the process

stany przebiegu procesów, tzn. możliwe rozmieszczenia detali na buforach maszyn. Przykładowo, stan $M(p_1) = M(p_2) = M(p_3) = M(p_5) = M(p_7) = M(p_8) = M(p_9) = M(p_{10}) = M(p_{11}) = M(p_{12}) = 0$, $M(p_4) = M(p_6) = M(p_{13}) = M(p_{14}) = M(p_{15}) = 1$ oznacza, że detal, obrabiany wzdłuż ciągu CT_1 , umieszczony jest na buforze maszyny M_2 , gdzie oczekuje na wykonanie operacji O_2^1 . Model sieciowy procesu wraz z algorytmem symulacyjnym określającym funkcję przejścia (reguły priorytetowania itp.) tworzy model symulacyjny procesu. Wprowadzenie do modelu symulacyjnego parametrów charakteryzujących zasoby systemu i opcje na nich wykonywane pozwala rozważać

zbiór dopuszczalnych realizacji modelowanego procesu. W szczególności, przyporządkowanie każdej z operacji odpowiedniego czasu jej realizacji pozwala wyznaczyć zbiór dopuszczalnych harmonogramów przebiegu procesu, np. dla zadanych długości serii produkcyjnych.

Tak rozumiany model symulacyjny procesu jest środkiem umożliwiającym zrutynizowanie obliczeń prowadzących do określonych wariantów rozwiązań. Uzyskiwane za jego pomocą rozwiązania są zależne od przyjętej strategii poszukiwania, tj. organizacji eksperymentów symulacyjnych. Przykładowo, przy wariantowaniu długości serii produkcyjnych realizowanych we współbieżnie przebiegających procesach, mających na celu maksymalne wykorzystanie zasobów systemu kolejności realizacji poszczególnych zadań, mogą być wyznaczane dla stałych lub zmiennych, w zadanym horyzoncie czasowym, funkcji priorytetów.

Należy podkreślić, że rozważane modele symulacyjne procesu reprezentują dopuszczalne, lecz tylko bezblokadowe realizacje jego przebiegu.

3. Symulator przebiegu procesów

Obiektem symulacji są procesy obsługi serii zadań przepływających wzdłuż współbieżnie realizowanych ciągów technologicznych. Przebiegi procesów badane są dla zadanych czasów trwania poszczególnych operacji oraz długości serii zadań. Wyniki symulacji, w formie wykresów Gantta, są formowane na bieżąco na monitorze TV.

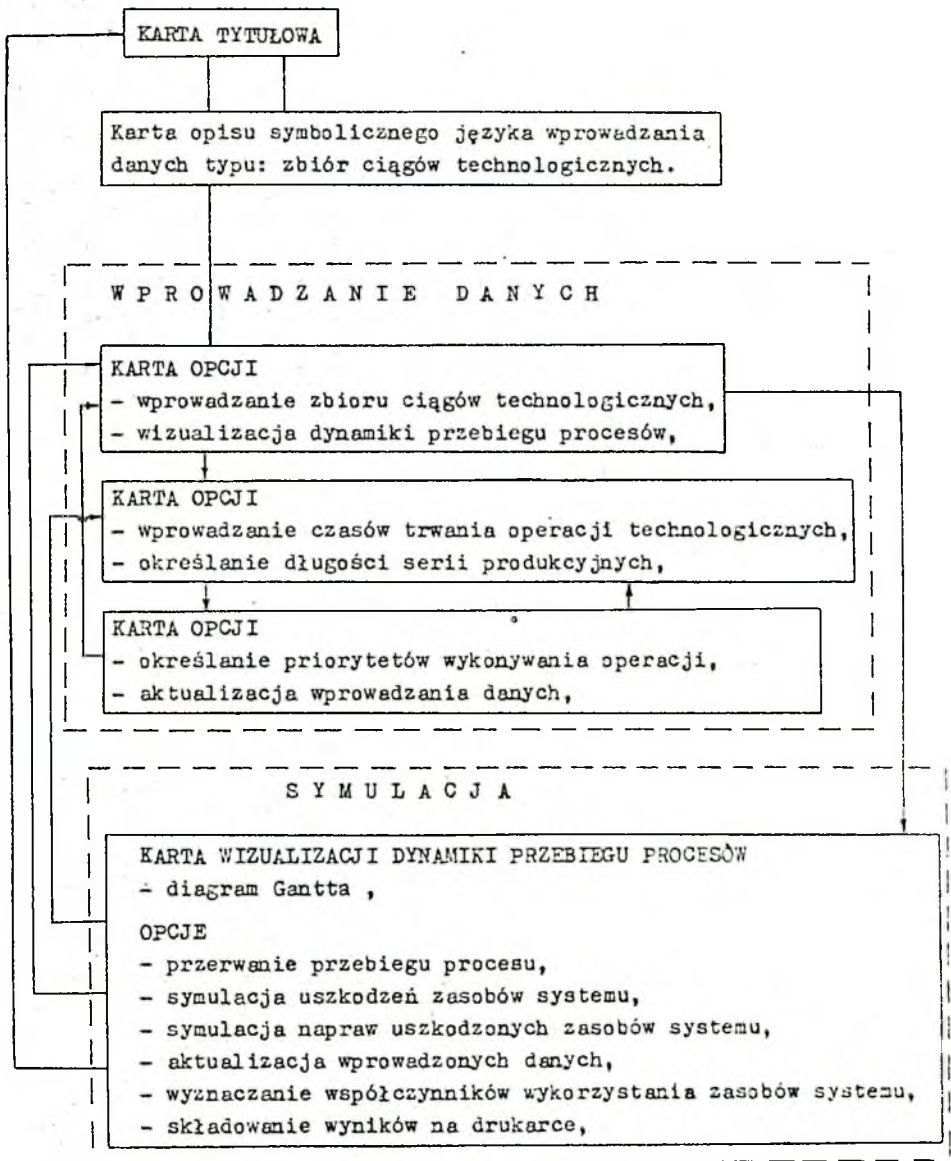
Prezentowana wersja symulatora zrealizowana została na mikrokomputerze ZX-Spectrum (48k). Z uwagi na ograniczone możliwości wykorzystania mikrokomputera wersja ta pozwala na jednoczesną analizę przebiegu co najwyżej czterech procesów współbieżnych. Długość ciągu technologicznego specyfikującego każdy z procesów nie może przekraczać 100 operacji. Liczba uwzględnianych zasobów systemu nie przekracza 7, przy czym każdy z nich może wykonywać do 100 różnych operacji technologicznych. Długości realizowanych serii nie przekraczają 64 zadań.

Obsługa systemu odbywa się w trybie konwersacyjnym, gdzie operator odpowiada na komunikaty systemu poprzez wybór opcji zestawionych na kartach MENU. Przyjęty sposób stronicowania ilustruje schemat przedstawiony na rys. 4.

Programowanie symulatora w opcji "wprowadzanie zbioru ciągów technologicznych" odbywa się w prostym języku symbolicznym wykorzystującym, obok standardowych znaków klawiatury dziesiętnej, następujące symbole: E - maszyna wieloczynnościowa, L - start wprowadzania danych, C - początek sekwencji symboli operacji ciągu technologicznego, T - koniec sekwencji symboli ciągu technologicznego, K - koniec wprowadzania zbioru ciągów technologicznych, B - kasowanie ostatniego, błędnie wpisanego zapisu operacji, W - kasowanie wszystkich, wcześniej wprowadzonych, zapisów operacji, R - start symulacji. Ciągi technologiczne wprowadzane są w postaci sekwencji rozpoczynających się symbolami CX, gdzie X - numer kolejnego ciągu, zawierającego zapisy operacji technologicznych postaci EXX-ØY, gdzie: XX - numer operacji wykonywanej na Y-tej maszynie.

Programując symulator w opcji "wyznaczanie współczynników wykorzystania zasobów systemu", użytkownik ma do dyspozycji następujący zbiór parametrów: CZAS - aktualny czas trwania symulacji, $m(i, j)$ - czas pracy i-tej maszyny w j-tym ciągu, m_{is} - sumaryczny czas pracy i-tej maszyny, $h(j)$ - moment ukończenia serii zadań wykonywanych w j-tym procesie, $h = \max \{h(j) \mid j \in N_7^4\}$. Korzystając z tych parametrów łatwo zdefiniować inne wskaźniki charakteryzujące stopień wykorzystania zasobów systemu, np. $m(i, j)/h(j)$ oznaczający stopień wykorzystania i-tego zasobu w j-tym procesie.

Użytkownik może również na bieżąco ingerować w przebieg symulowanego procesu (opcja: "wizualizacja dynamiki przebiegu procesów"), przerywając i wznowiając jego przebieg, symulując częściowe lub całkowite uszkodzenia i/ lub naprawy poszczególnych zasobów, dokonując zmian w zakresie wartości



Rys. 4. Struktura MENU

Fig. 4. The menu structure

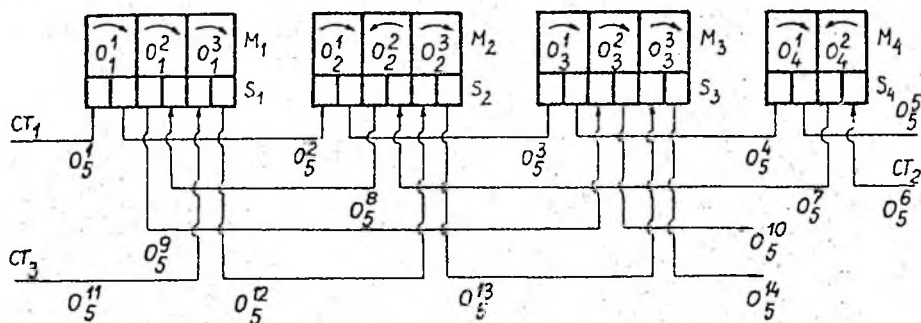
uprzednio zadanych czasów realizacji oraz priorytetów wykonania poszczególnych operacji.

Oznacza to możliwość prowadzenia analizy przebiegu procesów w warunkach

dynamicznie zachodzących zmian w zakresie funkcji priorytetów oraz czasów trwania operacji.

4. Zastosowania

Celem ilustracji możliwości zastosowań opracowanego systemu rozważmy gniazdo produkcyjne o strukturze technologicznej jak na rys. 5.



Rys. 5. Struktura technologiczna gniazda produkcyjnego

Fig. 5. Technological structure of the machining cell

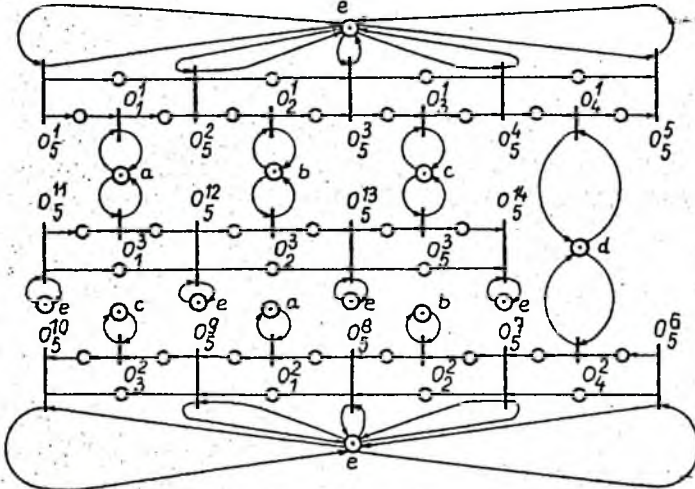
Realizowane współbieżnie procesy zadane są ciągami technologicznymi: $CT_1 = O_5^1, O_1^1, O_5^2, O_1^2, O_5^3, O_1^3, O_5^4, O_1^4, O_5^5$, $CT_2 = O_5^6, O_4^2, O_5^7, O_2^2, O_5^8, O_2^2, O_5^9, O_2^2, O_5^{10}$, $CT_3 = O_5^{11}, O_3^3, O_5^{12}, O_2^3, O_5^{13}, O_3^3, O_5^{14}$, gdzie operacje $O_5^1 - O_5^{14}$ są operacjami transportu międzyoperacyjnego wykonywanymi przez manipulator M_5 . Pojemności magazynów S_i zadane są liczbami operacji wykonywanych na odpowiednich maszynach M_i we wszystkich ciągach technologicznych. Oznacza to m. in., że każdej operacji technologicznej wykonywanej na maszynie M_i odpowiada odpowiedni sektor magazynu S_i .

Modelem zbioru dopuszczalnych, tzn. bezblokadowych realizacji przebiegu procesów jest sieć przedstawiona na rys. 6. Reprezentowany w modelu sieciowym mechanizm synchronizacji zapewnia, że detal może być wprowadzony w dany obszar magazynu tylko wówczas, gdy obszar ten jest zwolniony i maszyna nie pracuje lub obrabia detal pobrany z innego obszaru tego magazynu. Przyjęty algorytm symulacji zakłada asynchroniczną pracę obiektów systemu, w której każdy z obiektów dąży do zminimalizowania czasów przesto-
jów.

Dla czasów realizacji poszczególnych operacji, zadanych w tabeli 1, opracowany system wyznacza, w oparciu o model sieciowy z rys. 6, dopuszczalne wykresy czasowe przebiegu procesów. Uzyskane tą drogą diagramy, umożliwiają poszukiwanie optymalnych harmonogramów realizacji wprowadzonych serii zadań. Poszukiwanie rozwiązań optymalnych realizowane jest

poprzez zmiany priorytetów wykonywania operacji konfliktowych, tzn. operacji wykonywanych na wspólnym zasobie.

Przykładowo, przyjmując, że w każdym z procesów realizowane jest tylko jedno zadanie, łatwo wyznaczyć uszeregowanie optymalne, rys. (7a).



Rys. 6. Model sieciowy procesu

Fig. 6. Net model of the process

Ma ono miejsce wówczas, gdy wszystkie operacje ciągu CT₃ mają wyższe priorytety od operacji występujących w ciągu CT₂ i CT₁, przy czym wszystkie operacje (z wyjątkiem operacji O₃¹) ciągu CT₁ mają niższy priorytet od wszystkich operacji (z wyjątkiem operacji O₃²) występujących

w ciągu CT₂, gdzie priorytet O₃¹ jest większy od priorytetu O₃².

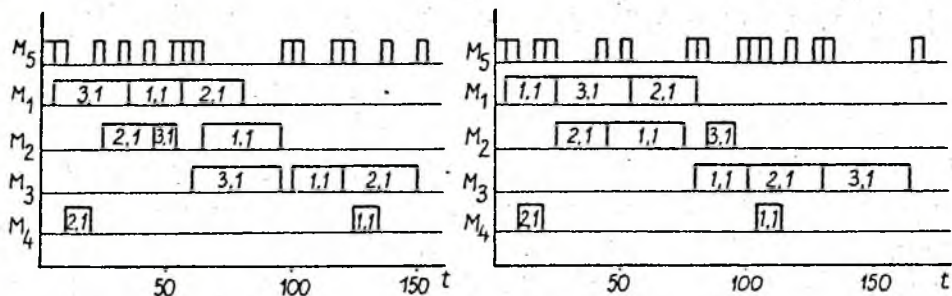
Tabela 1. Czasy wykonania operacji technologicznych

Table 1. Operation processing times

Zadanie	Ciągi technologiczne									Czasy wykonania operacji								
	operacje									operacje								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CT ₁	O ₅ ¹	O ₁ ¹	O ₅ ²	O ₂ ¹	O ₅ ³	O ₃ ¹	O ₅ ⁴	O ₄ ¹	O ₅ ⁵	5	20	5	30	5	20	5	10	5
CT ₂	O ₅ ⁶	O ₄ ²	O ₅ ⁷	O ₂ ²	O ₅ ⁸	O ₁ ²	O ₅ ⁹	O ₃ ²	O ₅ ¹⁰	5	10	5	20	5	25	5	30	5
CT ₃	O ₅ ¹¹	O ₁ ³	O ₅ ¹²	O ₂ ³	O ₅ ¹³	O ₃ ³	O ₅ ¹⁴	-	-	5	30	5	10	5	35	5	-	-

Diagram przedstawiony na rys. 7 b) uzyskany został przy założeniu, że priorytety wszystkich operacji występujących w CT₁ są wyższe od priorytetów wszystkich operacji występujących w CT₂ i CT₃, przy czym priorytety wszystkich operacji ciągu CT₂ są większe od priorytetów wszystkich operacji występujących w CT₃. Dla porównania, przyjmując powyższy sposób priorytetowania, przedstawiony został (rys. 8) wykres ilustrujący przebiegi

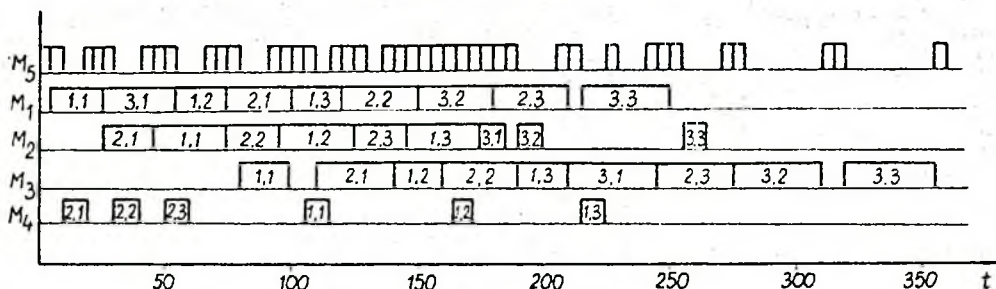
procesów w przypadku, gdy każdy proces realizuje serię 3 zadań.



[Y, X] - oznacza, że w procesie Y jest wykonywany X-ty detal

Rys. 7. Wykres Gantta realizacji przebiegu procesów

Fig. 7. The Gantt chart of the processes performance

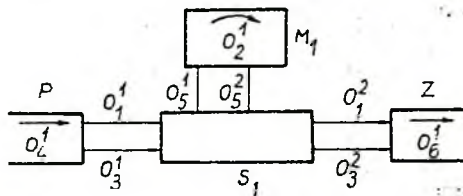


Rys. 8. Wykres Gantta realizacji przebiegu procesów

Fig. 8. The Gantt chart of the processes performance

Inny obszar zastosowań omawianego systemu wiąże się z analizą dynamiki procesów w sytuacjach związanych z występowaniem awarii obiektów systemu.

Dla ilustracji rozważmy przykład gniazda o strukturze technologicznej jak na rys. 9, w którym realizowany jest ciąg $CT = \{O_4^1, \{O_1^1, O_3^1\}, \{O_5^1\}, \{O_2^1\}, \{O_5^2\}, \{O_1^2, O_3^2\}, \{O_6^1\}$, przy czym zapis $\{O_j^i, O_k^i\}$ oznacza, że i-ta operacja ciągu technologicznego może być wykonana na jednym z dwóch zasobów

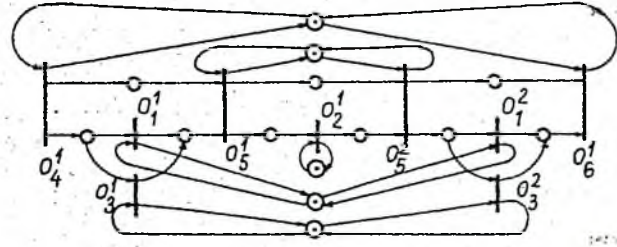


Rys. 9. Gniazdo produkcyjne

Fig. 9. The machining cell

systemu, j-tym lub k-tym. W omawianym przykładzie dopuszcza się możliwość zamiennego korzystania z manipulatorów M_1 i M_2 realizujących operacje transportu międzystanowiskowego typu podajnik - magazyn oraz magazyn - zasobnik. Operacje O_5^1, O_5^2 realizowane są przez urządzenie załadowczo-wyładow-

cze M_5 . Model sieciowy bezblokadowych realizacji procesu przedstawia rys. 10. Dla czasów realizacji poszczególnych operacji, zadanych w tabeli 2,



Rys. 10. Model sieciowy procesu
Fig. 10. Net model of the process

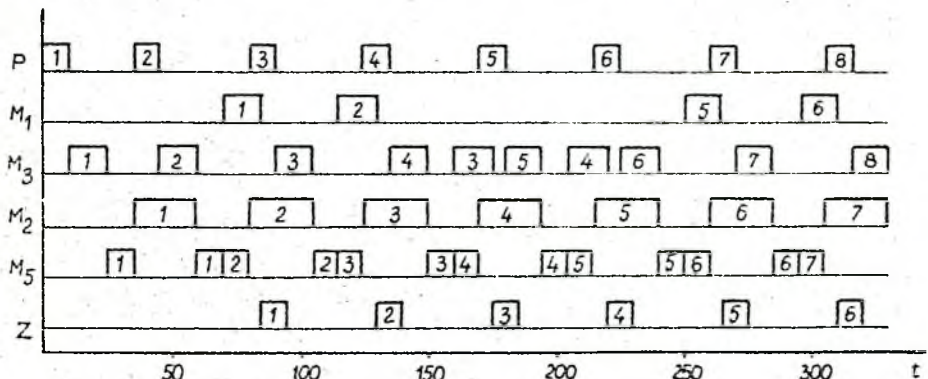
podajnik - magazyn, podczas gdy M_3 wykonuje operacje transportu typu: magazyn - zasobnik. W stanie awarii manipulatora M_1 , tj. w chwili $t = 150$ do chwili $t = 240$, obie operacje wykonuje manipulator M_3 . Naprawa M_1 , w chwili $t = 240$, prowadzi do poprzednio ustalonego podziału funkcji manipulatorów.

wykres czasowy przebiegu procesu uwzględniający stany uszkodzeń i napraw manipulatora M_1 przedstawiony został na rys. 11.

W przedziale czasu do chwili $t = 130$ następuje "specjalizacja" manipulatorów, tzn. manipulator M_1 wykonuje operacje transportu typu:

Tabela 2. Czasy wykonania operacji technologicznych
Table 2. Operation processing times

Zadanie	Ciąg technologiczny									Czasy wykonania operacji								
	operacje									operacje								
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7				
CT	O_4^1	O_1^1	O_3^1	O_5^1	O_2^1	O_5^2	O_1^2	O_3^2	O_6^1	10	15	15	10	25	10	15	15	10



Rys. 11. Wykres Ganttta realizacji przebiegu procesu
Fig. 11. The Gantt chart of the process performance

5. Uwagi końcowe

Istniejąca wersja systemu, w ramach przyjętej strategii sterowania asynchronicznego, pozwala na symulacyjną ocenę różnych wariantów realizacji procesów przebiegających współbieżnie. Istotnymi zaletami określającymi zakres jego zastosowań są możliwości: oceny stopnia wykorzystania zasobów systemu, analizy działania systemu w stanach awaryjnych oraz oceny wybranych reguł priorytetyzowania zadań i zasobów.

Implementacja przedstawionej koncepcji systemu na mikrokomputer typu IBM PC pozwoli na jej praktyczne wykorzystanie w systemach sterowania dyspozytorskiego ze wspomaganie komputerowym, jak również w rozwiązywaniu zadań z zakresu technologicznego przygotowania produkcji. Rozszerzenie takie pozwoli m.in. na bieżącą analizę zapasów międzyoperacyjnych oraz uwzględnienie losowości parametrów procesu produkcyjnego. Umożliwi tym samym ocenę wpływu zjawisk powodujących niepowtarzalność czasów operacji, uszkodzeń obiektów systemu itp.

LITERATURA

- [1] Banaszek Z.: Algorytmy automatycznego modelowania asynchronicznych procesów współbieżnych, Pr. nauk. Inst. Cybernetyki Technicznej PWr., Nr 68, seria: Konf., Nr 27, Wrocław, 1985, ss. 105-116.
- [2] Banaszek Z., Mazur M.: System komputerowo wspomaganego planowania procesów współbieżnych, Pr. nauk. Inst. Cybernetyki Technicznej PWr., Nr 68, seria: Konf., Nr 27, Wrocław, 1985, ss. 117-124.
- [3] Banaszek Z.: Coordination of concurrent processes: automatic program synthesis, Nat. Konf. 8th European Meeting on Cybernetics and Systems Research, Wiedeń, 1-4 kwietnia, 1986.
- [4] Bullinger H.J., Warnecke H.J. (red.): Toward the factory of the future, Springer-Verlag, Berlin, 1985.
- [5] Dwivedi S.N. (red.): Robotics and factories of the future, Springer-Verlag, Berlin, 1984.
- [6] Hartley J.: Flexible automation in Japan, Springer-Verlag, Berlin, 1984.
- [7] Mortimer J. (red.): The FMS report, Springer-Verlag, Berlin, 1984.
- [8] Mortimer J. (red.): Integrated manufacture, Springer-Verlag, Berlin 1985.
- [9] Ranky P.G.: The design and operation of FMS (Flexible Manufacturing Systems), North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1983.

Recenzent: Prof.dr inż. Henryk Kowalowski

Wpłynęło do Redakcji do 1986.04.30

ИМИТАЦИОННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Резюме

В статье представлены результаты разработки микропроцессорной системы автоматического планирования процедур дискретного управления асинхронными одновременно протекающими процессами. Предложенная система позволяет исследовать показатели использования ресурсов моделированной системы, анализировать поведение системы в случаях отказов отдельных её элементов. Кроме того, она легко перенастраивается, что позволяет исследовать различные планируемые варианты протекания технологических процессов.

USE OF SIMULATION FOR THE PLANNING OF DISCRETE PRODUCTION PROCESSES FLOW

Summary

This paper deals with the Petri net approach to the automatic modeling and simulation of concurrent, pipeline-like flowing processes in large-variety, small-lot production systems. The approach implemented is based on an algorithm transforming any process specification /reflecting the order of operations occurring in the course of the process flow/ into the relevant net model of a control flow. The model obtained serves as a simulation model of admissible deadlock-free process realizations. The presented concept has been implemented in a software package, oriented to support the system designer in the course of the variety of concurrent processes performance evaluation. The developed software system works in the interactive mode. Its menu is self explanatory, e.g. help functions are available on every menu level. The package helps to determine different dispatching rules usually used in the process performance planning. It enables also the observation of different variants of process execution and the evaluation of machine utilization coefficients as well as the simulation of the system performance when break-downs of some machines occur. Illustrative examples on favour of the above possibilities are discussed briefly.