

Zbigniew Banaszak

Politechnika Wroclawska

## SYSTEM KOMPUTEROWO WSPOMAGANEGO PLANOWANIA PROCESÓW MONTAŻOWYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono opis systemu komputerowo wspomaganego planowania współbieżnie przebiegających procesów technologicznych, realizowanych w elastycznych systemach montażowych. Działanie systemu, pracującego w trybie interakcyjnym, oparte jest na pewnej metodzie automatycznej syntezy procedur bezblokadowego sterowania współbieżnie przebiegającymi procesami, współzawodniczącymi o dostęp do wspólnych zasobów systemu. Automatyczna synteza procedur umożliwi analizę różnych, dopuszczalnych wariantów grupowego sterowania robotami montażowymi, zwalniając tym samym operatora z obowiązku każdorazowego programowania odrębnych programów symulacyjnych.

### 1. Wstęp

Istota komputerowo zintegrowanego wytwarzania [9] zawiera się w kompleksowym podejściu do rozwiązywania zadań występujących na różnych poziomach i w różnych fazach procesu wytwarzania. Ważniejszymi jego fazami są etapy: projektowania wyrobu, planowania procesów technologicznych, planowania produkcji oraz sterowania i dozoru procesów technologicznych. Specyfika każdej z faz określa hierarchię zadań, rozwiązanie których umożliwia przyjęcie optymalnych decyzji.

Łatwo zauważyć, że decyzje podejmowane w jednej z faz wpływają na zakres decyzji podejmowanych w pozostałych fazach. Oznacza to potrzebę budowy środków umożliwiających kompleksowe rozwiązywanie zagadnień optymalizacyjnych, mających na celu ekstremalizację globalnego wskaźnika jakości pracy systemu wytwórczego.

Dostępne w chwili obecnej środki wspomaganie komputerowego umożliwiają niezależne rozwiązywanie zadań: projektowania wyrobów i/lub doboru i rozmieszczenia elementów stanowisk produkcyjnych [8], projektowania procesów technologicznych [7] oraz planowania produkcji [6]. Zauważalnym niedostatkim jest brak metod i środków integrujących funkcje wcześniej wymienionych systemów.

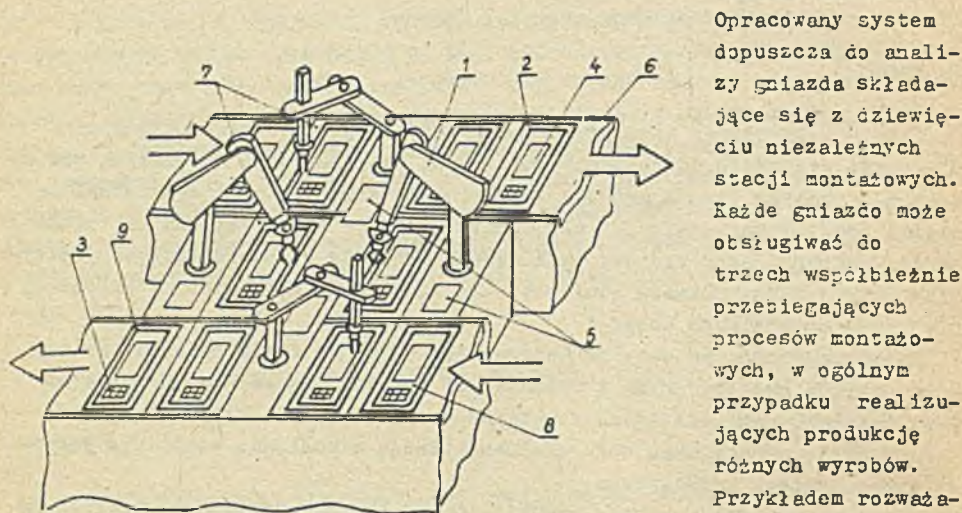
Prezentowany w niniejszej pracy system planowania, stanowi próbę kompleksowego podejścia do rozwiązywania zadań projektowania, planowania i sterowania zrobotyzowanych elastycznych systemów montażowych (ESM). Opracowany w Instytucie Cybernetyki Technicznej PWr. (w ramach GPBP J2.C4) system dialogowego planowania procesów montażowych umożliwia w oparciu

o zadane specyfikacje modelowanych procesów (marszrut technologicznych, czasów trwania poszczególnych operacji montażowych, operacji transportowych itd.) i reguły pierwszeństwa obsługi zadań wyznaczanie i ocenę wybranych wskaźników jakości pracy systemu montażowego. System ten pozwala na symulacyjną analizę różnych wariantów organizacji elementów stanowiska montażowego, jak również różnych wariantów jego pracy.

## 2. Model systemu montażowego

Klasa ESM rozważana w niniejszej pracy obejmuje elastyczne gniazda montażu mechanicznego, w których wszystkie operacje technologiczne wykonywane są przez grupę robotów montażowych wyposażonych w magazyn głowic technologicznych.

Montowane obiekty umieszczone są na paletach wyposażonych w zasobniki montowanych detali i przesuwają się na transporterze wzdłuż kolejnych stacji montażowych.



Rys. 1. Elastyczne gniazdo montażowe. 1 - robot montażowy, 2 - paleta, 3 - zasobnik detali, 4 - montowany obiekt, 5 - magazyn głowic technologicznych, 6 - transporter, 7 - stanowisko montażowe, 8 - paleta z obiektem przygotowanym do montażu, 9 - paleta ze zmontowanym obiektem.

Fig. 1. Flexible assembly system. 1 - the assembly robot, 2 - the pallet, 3 - the container, 4 - the detail, 5 - the gripper/tool changing station, 6 - the conveyor, 7 - the assembly station, 8 - the assembly pallet with a row material, 9 - the assembly pallet with a finished detail.

Opracowany system dopuszcza do analizy gniazda składające się z dziewięciu niezależnych stacji montażowych. Każde gniazdo może obsługiwać do trzech współbieżnie przebiegających procesów montażowych, w ogólnym przypadku realizujących produkcję różnych wyrobów. Przykładem rozważanego typu gniazd jest system montażowy przedstawiony na rys. 1, w którym na sześciu stacjach obsługiwanych przez cztery roboty realizowany jest montaż dwóch typów detali.

Operacje montażowe z różnych stacji mogą być, w ogólności, wykonywane przez różne roboty. Oznacza to możliwość dodatkowego wykorzystania robotów, które ukończyły prace w danej stacji, do zakończenia operacji na stacjach, na których montaż nie został jeszcze ukończony. Transportery zapewniają asynchroniczny przepływ palet - przesunięcie palety z jednego stanowiska na drugie zachodzi automatycznie wówczas, gdy wszystkie czynności montażowe związane z pierwszą stacją zostały ukończone, a miejsce na drugiej stacji zostało zwolnione. Procesy montażowe specyfikowane są marszrutami technologicznymi określającymi porządku operacji montażowych wykonywanych na poszczególnych stacjach i operacji transportu palet oraz czasy wykonania poszczególnych operacji montażowych. Z każdą operacją montażową związane są numery robotów, za pomocą których, alternatywnie, dana operacja może być wykonana oraz specyfikacje trajektorii robotów wykonujących daną operację. Specyfikację trajektorii robota stanowi ciąg podprzestrzeni strefy roboczej gniazda montażowego, przez które przechodzi ramię robota w procesie realizacji danej operacji montażowej. Przyjmuje się, że podział strefy roboczej gniazda na podprzestrzenie jest podziałem arbitralnym, nie ulegającym zmianom w trakcie eksploatacji systemu.

Zachowanie omawianego typu systemów modelowane jest za pomocą aparatu teorii sieci Petri [10,11]. Modelem sieciowym zachowania systemu, odwzorowującym wszystkie możliwe realizacje procesu montażowego, jest czasowa sieć Petri skonstruowana na bazie digrafu ograniczeń kolejnościowych (determinującego kolejność wykonania zbioru operacji montażowych), czasów wykonania operacji oraz specyfikacji trajektorii robotów (sekwencji podprzestrzeni zajmowanych przez ramię robota w procesie realizacji danej operacji) [1,5]. Należy zauważyć, że realizacje trajektorii robotów montażowych mogą być interpretowane jako procesy przemieszczania się manipulatorów robotów przez zbiory podprzestrzeni strefy roboczej gniazda. Oznacza to, w ogólnym przypadku, że współbieżne wykonywanie operacji montażowych wymaga synchronizacji procesów przemieszczania manipulatorów robotów, tzn. synchronizacji procesów konkurujących o dostęp do wspólnych zasobów systemu (podprzestrzeni strefy roboczej gniazda montażowego). Synchronizacja pracy robotów jest niezbędna dla zapewnienia bezkolizyjnej i bezblokadowej pracy systemu.

Pewna modyfikacja tego modelu, tzw. sieć czasowa ze wzbronieniami, stanowi model procedury grupowego sterowania robotami montażowymi [2,3]. Model procedury sterowania odwzorowuje dopuszczalne, tzn. bezkolizyjne i nieprowadzące do powstawania blokad, realizacje modelowanego procesu montażowego. Algorytm syntezy modeli sterowań dopuszczalnych przedstawiony jest w pracach [5]. Komputerowa implementacja tego algorytmu stanowi podstawę działania odpowiedniego algorytmu symulacyjnego umożliwiającego m. in. badanie wpływu różnych reguł priorytutowania zadań i zasobów (marszrut

technologicznych, robotów, operacji montażowych) na wybrane, dynamiczne charakterystyki działania systemu.

### 3. Komputerowo wspomagane planowanie procesów montażowych

Opracowany system [4] stanowi pakiet programów napisanych w BASIC-u i przeznaczony jest do użytkowania na minikomputerach serii IBM PC AT. Umożliwia projektowanie elastycznych systemów montażowych (dobór robotów do poszczególnych operacji montażowych, wariantowanie stacji montażowych gniazda itd.) oraz planowanie produkcji (wyznaczanie harmonogramów produkcji, scenę wskaźników jakości pracy systemu, analizę podatności na uszkodzenia itd.). System pozwala na analizę stopnia wykorzystania robotów oraz analizę różnych wariantów organizacji przebiegających współbieżnie procesów montażowych (przy zmiennych czasach wykonania operacji montażowych, długościach serii produkcyjnych, liczbach stacji montażowych, priorytetach itd.).

Dla ilustracji możliwości wykorzystania opracowanego systemu rozważmy następujące zadanie.

Dwa typy obiektów montowane są w gnieździe o strukturze jak na rys. 1. Porządki operacji montażowych związanych z poszczególnymi obiektami zadane są marszrutami montażowymi, odpowiednio  $MT_1$  i  $MT_2$

$$MT_1 = [(O_{1_1}, R_1), (O_{1_2}, R_2)], [(O_{2_2}, R_2)], [(O_{3_3}, R_3), (O_{3_4}, R_4)],$$

$$MT_2 = [(O_{4_2}, R_2)], [(O_{5_3}, R_3), (O_{5_4}, R_4)], [(O_{6_3}, R_3)],$$

gdzie:

$[(O_{1_j}, R_j), \dots, (O_{i_k}, R_k)]$  - oznacza i-tą operację montażową, do wykonania której wykorzystany może być jeden z alternatywnych robotów  $R_j, \dots, R_k$ ,

$O_{i_k}$  - czas wykonania i-tej operacji przez k-ty robot,

$R_k$  - symbol k-tego robota montażowego.

W danym przypadku, rozważane marszruty przedstawiają liniowe porządki następstwa operacji montażowych. W ogólnym przypadku, dla reprezentacji zbiorów operacji częściowo uporządkowanych wykorzystywana jest notacja listowa. Specyfikacje trajektorii robotów określone są następującymi sekwencjami:

$$\begin{aligned} TR_{1,1} &= (y_1, y_2, y_3, y_4), & TR_{2,1} &= (y_5, y_3, y_7, y_6), & TR_{1,2} &= (y_7, y_8, y_9, y_{10}), \\ TR_{3,3} &= (y_5, y_{12}, y_{10}, y_{13}), & TR_{4,3} &= (y_{14}, y_{12}, y_2, y_{17}), & TR_{2,4} &= (y_{10}, y_{20}, y_{16}, y_{17}), \\ TR_{3,5} &= (y_{18}, y_8, y_{20}, y_{15}), & TR_{4,5} &= (y_{11}, y_3, y_{10}, y_{19}), & TR_{3,6} &= (y_{22}, y_{21}, y_{11}, y_{23}), \end{aligned}$$

gdzie:

$TR_{1,j} = (y_k, \dots, y_1, \dots, y_r)$  - sekwencja podprzestrzeni, przez które prze-  
mieszczą się manipulator i-tego robota w trak-  
cie wykonywania j-tej operacji montażowej,  
 $y_1$  - symbol l-tej podprzestrzeni przestrzeni roboczej gniazda montażowego.

Przyjmując, że czasy wykonania poszczególnych operacji montażowych i ope-  
racji transportu międzystanowiskowego zadane są w tabeli 1, należy okre-  
lić strukturę gniazda (wyznaczyć stacje montażowe, tzn. ich liczbę i wys-  
tępujące w nich typy robotów) oraz wybrać regułę priorytetowania, ekstre-  
malizującą średni czas ukończenia procesów produkcyjnych związanych z wy-  
konaniem serii wyrobów - po 10 detali w każdym z procesów montażowych.

Tabela 1.

$O_i$	$O_1$	$O_2$	$O_3$	$O_4$	$O_5$	$O_6$	$O_7$	$O_8$	$O_{10}$	$O_{12}$	$O_{13}$	$O_{12}$	$O_{13}$	$O_{14}$
$R_1$	10	20												
$R_2$	15			10										
$R_3$			20		25	15								
$R_4$			15		20									
$C_1$							5	5			6		5	
$C_2$									5	5		7		6

W przeprowadzonym eksperymencie rozważono trzy warianty organizacji  
gniazda montażowego, związane z przyjęciem następujących marszrut tech-  
nologicznych:

wariant 1.

$$TM_1^1 = (O_7, C_1), [(O_{1_1}, R_1), (O_{1_2}, R_2)], [(O_{2_2}, R_2)], [(O_{3_3}, R_3), (O_{3_4}, R_4)], (O_8, C_1),$$

$$TM_2^1 = (O_9, C_2), [(O_{4_2}, R_2)], [(O_{5_3}, R_3), (O_{5_4}, R_4)], [(O_{6_3}, R_3)], (O_{10}, C_2),$$

wariant 2.

$$TM_1^2 = (O_7, C_1), [(O_{1_1}, R_1), (O_{1_2}, R_2)], (O_{11}, C_1), [(O_{2_2}, R_2)], [(O_{3_3}, R_3), (O_{3_4}, R_4)],$$

$$(O_8, C_1),$$

$$TM_2^2 = (O_9, C_2), [(O_{4_2}, R_2)], [(O_{5_3}, R_3), (O_{5_4}, R_4)], (O_{12}, C_2), [(O_{6_3}, R_3)], (O_{10}, C_2),$$

wariant 3.

$$TM_1^3 = (O_7, C_1), [(O_{1_1}, R_1), (O_{1_2}, R_2)], (O_{11}, C_1), [(O_{2_2}, R_2)], (O_{13}, C_1), [(O_{3_3}, R_3),$$

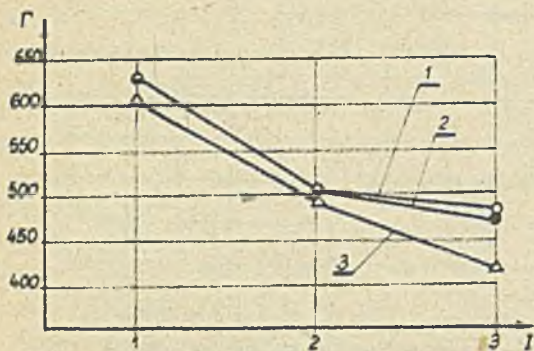
$$(O_{3_4}, R_4)], (O_8, C_1),$$

$$\tau_2^3 = (O_9, C_2), [(O_{14}, R_2)], (O_{14}, C_2), [(O_{53}, R_3), (O_{54}, R_4)], (O_{12}, C_2), [(O_{63}, R_3)], (O_{10}, C_2).$$

gdzie:  $(O_i, C_j)$  - oznacza i-tą operację transportu palety realizowaną przez j-ty transporter.

Pierwszy z wymienionych wariantów zakłada podział gniazda na dwie stacje, po jednej stacji obsługującej każdy z procesów. Drugi i trzeci wariant zakładają występowanie odpowiednio dwóch i trzech stacji w każdej z marszrut.

Wyniki eksperymentu zebrane zostały na rys. 2, przedstawiającym zależności średnich czasów ukończenia procesów produkcyjnych od liczby stacji montażowych I, sparame-



Rys. 2. Zależności średniego czasu ukończenia procesów produkcyjnych od liczby stacji montażowych wykorzystywanych w poszczególnych procesach, 1 - reguła PIFO, 2 - reguła LIFO, 3 - reguła najkrótszej operacji.  
Fig. 2. Dependence between mean time of production process and the number of assembly stations applied. 1 - PIFO dispatching rule, 2 LIFO dispatching rule, 3 - the shortest time operation rule.

Z analizy przedstawionego przykładu wynika, że wyodrębnienie oddzielnych stanowisk montażowych pozwala skrócić czas montażu serii wyrobów przy jednoczesnym wydłużeniu średniego czasu cyklu produkcyjnego. Zależność "reguła priorytetowania - wskaźnik jakości pracy systemu" ma charakter niezmienniczy względem rozpatrywanych wariantów dekompozycji gniazda na stacje.

tryzowane typem wykorzystywanej reguły priorytetowania. Średni czas ukończenia procesów produkcyjnych wyznaczany jest według zależności

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i}{N},$$

gdzie:

$\tau_i$  - okres wyznaczony momentami wprowadzenia pierwszej i wyprowadzenia ostatniej palety z serii i-tego typu wyrobu,

$N$  - liczba równoległe wykonywanych procesów montażowych.

#### 4. Uwagi końcowe

Przedstawiony system konwersacyjnego planowania procesów montażowych umożliwia projektowanie struktury i planowanie procesów zachodzących w ESM. Jego podstawową zaletą, oprócz możliwości wykorzystania zarówno w trybie "on-line" (sterowanie operatywne), jak i "off-line" (harmonogramowanie produkcji), jest możliwość rozpatrywania tylko dopuszczalnych, tzn. nie prowadzących do kolizji i blokad, wariantów grupowego sterowania robotami montażowymi. Wymieniona zaleta pozwala znacznie uprościć sam proces planowania, zwalniając operatora systemu z obowiązku każdorazowego programowania odrębnych procedur sterowania ESM.

Dalsze wersje prezentowanego systemu przewidują rozszerzenie modelowanych systemów do 12 robotów oraz uwzględnienie losowości parametrów ESM.

#### LITERATURA

- [1] Banaszak Z.: Planning of robots cooperation: automatic modelling and simulation, Prepr. of IFAC IFIP IMACS Int. Symp. on Theory of Robots, Dec. 3-5, 1986, Vienna, pp. 375-384.
- [2] Banaszak Z., Abdul-Hussin M.H.: Modelling of assembly robots cooperation, Proc. of the 2nd Int. Seminar and Symposium: Automation and Robots, Oct. 27-29, Belgrade, 1987, pp. 69-80.
- [3] Banaszak Z., Kusmuk V.V.: System komputerowo wspomaganego planowania produkcji w elastycznych systemach montażowych, Materiały Krajowej Konferencji Naukowej "Komputerowe systemy i metody wspomagające podejmowanie decyzji", 26-29 października, Warszawa, 1987.
- [4] Banaszak Z., Kowalewski T.: Dokumentacja programu BIG MOUSE, Report ICT PWr. seria: SPR nr 30/87, Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1987.
- [5] Banaszak Z., Abdul-Hussin M.H.: Petri net approach to automatic real-time program synthesis, Petri Net Newsletter, No. 27, 1987, pp. 10-27.
- [6] Chryssolouris G., Chan S., Wright K.: MADEMA: framework for decision making in manufacturing systems, Proc. of the 12th Conference on Production Research and Technology "Advanced systems for manufacturing", May 14-17, Madison, 1985, pp. 75-84.
- [7] Cser I., Toth T.: Computer-aided technological process-planning: methods, systems and application experiences, Modelling and Design of Flexible Manufacturing Systems, A. Kusiak (Ed.), Elsevier Science Publ., Amsterdam, 1986, pp. 249-288.
- [8] Garden Y., Lucas M.: Techniques graphiques interactives et C.A.O., Hermes Pub. Ltd., France, 1983.
- [9] Mortimer J. (Ed.): Integrated manufacture, IFS Pub. Ltd., Springer-Verlag, Heidelberg, 1985.
- [10] Reisig W.: Place Transition systems, Petri nets: central models and their properties, W. Brauer, W. Reisig, G. Rozenberg G (Eds), Lecture Notes in Computer Science, 1987, No. 254, pp. 117-141.
- [11] Rosenberg G., Thiagarajan P.S.: Petri nets: basic notions, structure, behaviour, Lecture Notes in Computer Science, 1986, No. 224, pp. 585-668.

Recenzent: Prof. dr inż. H. Kowalowski

Wpłynęło do Redakcji do 1988-04-30.

## СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ СБОРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

## Резюме

В статье даётся разработка системы автоматизированного планирования конвейерных параллельно протекающих сборочных процессов. Представляемая система разработана на базе некоторого метода автоматического синтеза процедур группового управления компонентами гибкого автоматизированного робототехнического комплекса. Алгоритмы управления, получаемые с помощью этого метода, обеспечивают предупреждение столкновений и блокировок группы взаимодействующих сборочных роботов. Система работает в диалоговом режиме и обеспечивает возможность проведения оценок коэффициентов составных компонентов сборочной системы, производственных циклов а также оценок функционирования системы в аварийных обстановках её компонентов.

## SYSTEM OF THE COMPUTER-AIDED ASSEMBLY PROCESSES PLANNING

## С у м м а р у

In this paper a system of the computer-aided planning of concurrently flowing assembly processes is presented. The menu-driven system operation is based on a method of automatic synthesis of control flow models of the concurrent processes competing in the access to the shared flexible assembly system (FAS) resources. The method of the control flow models synthesis allows to analyse the admissible controls of the assembly robots cooperating in FAS as well as provides a tool for the automatic design of the appropriate simulation programs.