

Marek MAGIERA  
Akademia Górniczo – Hutnicza, Kraków

## OCENA PRZYDATNOŚCI SEKWENCJI MONTAŻOWEJ DLA ESM<sup>1</sup>

**Streszczenie.** Przedstawiona w pracy procedura jest związana z funkcjonowaniem elastycznego systemu montażowego (ESM). Opisany problem dotyczy wyboru jednej spośród wielu danych sekwencji montażowych (wygenerowanych dla jednego produktu), która ma być realizowana w zadanej konfiguracji parku maszynowego. Kryterium wyboru sekwencji montażowej stanowi minimalny czas montażu, zależny od liczby wykorzystywanych maszyn i ich rozmieszczenia. W celu rozwiązania problemu sekwencja montażowa została podzielona na grupy operacji, zgrupowane zostały również maszyny tego samego typu. Do znalezienia najkrótszej drogi w grafie wykorzystana została idea programowania dynamicznego.

## VALUATION OF ASSEMBLY SEQUENCE UTILITY FOR FAS

**Summary.** The paper presents procedure connected with flexible assembly system functioning. Presented problem concerns the selection of out of many generated assembly sequences. The criterion of assembly sequence selection determines the minimal processing time, dependent on machine quantity and machines location. Assembly sequence is divided into groups of assembly operations, machines of the same type also create groups. Idea of dynamic programming is used to fixing the shortest way in the graph.

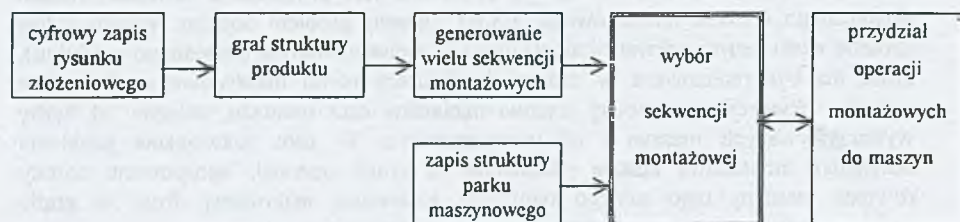
### 1. Wprowadzenie

Sekwencja montażowa stanowi ciąg kolejno wykonywanych operacji montażowych. Istnieje wiele algorytmów heurystycznych generowania sekwencji montażowych produktu na podstawie cyfrowego zapisu rysunku złożeniowego produktu. Są to metody dokładne lub heurystyczne. Wśród metod heurystycznych wyróżnić można m.in. metody oparte na analizie grafu struktury produktu i wygenerowanego na jego podstawie grafu struktury rozstrzelonej (odwzorowującego rysunek eksplodujący) [5]. Sekwencje montażowe generuje się również traktując montaż jako procedurę odwrotną do demontażu. Niektóre procedury generowania sekwencji montażowych oparte są na algorytmach genetycznych [4].

<sup>1</sup> Praca częściowo sfinansowana w ramach Badań Własnych AGH nr 10.200.10

W wielu procedurach dla jednego produktu generowanych jest wiele różnych sekwencji montażowych, z których należy wybrać najlepszą sekwencję dla zadanej konfiguracji parku maszynowego. Montaż produktu zgodnie z zadaną sekwencją montażową stanowi istotę funkcjonowania elastycznego systemu montażowego (rys.1.).

W przedstawionej procedurze przydatność każdej sekwencji montażowej oceniana jest na podstawie czasu jej realizacji w systemie montażowym. Wybierana jest sekwencja o najkrótszym czasie montażu.



Rys. 1. Graficzne zobrazowanie problemu oceny sekwencji montażowej dla ESM  
Fig.1. Graphical presentation of problem of assembly sequence valuation for FAS

## 2. Dane

Efektywność działania elastycznego systemu montażowego jest osiągnięta m.in. dzięki relacyjnemu powiązaniu wszystkich baz danych opisujących jednostki składowe systemu [6]. Wśród tych baz danych można wyróżnić bazę danych opisującą montowany produkt. Dane zawarte w niej wykorzystywane są w procedurze generowania sekwencji montażowych, uzyskiwany jest opis sekwencji montażowych. Druga baza danych opisuje strukturę parku maszynowego. Dane zawarte w tych bazach danych zostały wykorzystane w przedstawionej procedurze.

### 2.1. Opis sekwencji montażowej

Wygenerowane sekwencje montażowe zapisane są w postaci ciągu zmiennych zawierających numery części uporządkowanych zgodnie z kolejnością montażu produktu. Pierwszy element ciągu (lub grupa elementów w przypadku podzespołu) jest elementem bazowym, do którego domontowywane są kolejne części. Elementy zawarte w nawiasach stanowią podzespoły. Na przykład sekwencja montażowa 6-częściowego produktu może mieć postać: 6,((4,5),1),3,2, czyli należy najpierw umieścić w uchwycie montażowym część nr 6,

potem domontować do niej podzespół zawierający części nr 4,5,1, wśród których części 4 i 5 stanowią podzespół, następnie domontować kolejno części: 3,2.

Wartości zmiennej  $d_r$  przedstawiają czasy montażu poszczególnych części  $r$  do części poprzedzającej ją w ciągu odwzorowującym sekwencję montażową (lub do podzespołu poprzedzającego). W przypadku gdy część  $r$  jest elementem bazowym, to wartość zmiennej  $d_r$  stanowi czas zamontowania tej części w uchwycie montażowym.

## 2.2. Opis parku maszynowego

Przyjęte zostało następujące oznaczenie:  $I = \{1, \dots, m\}$  - zbiór maszyn montażowych. Do opisu parku maszynowego został utworzony prostokątny układ współrzędnych, w którego środku znajduje się stacja załadownicza (oznaczona przez  $L$ ). Opis układu maszyn zawarty jest w macierzy  $P$ , której element  $p[i, j]$  ( $i = 1, \dots, m, j = 1, 2$ ) wyraża położenie  $i$ -tej maszyny względem stacji załadowniczej. Zmienna  $p[i, 1]$  przedstawia odcięta, natomiast zmienna  $p[i, 2]$  - rzędną.

Każda maszyna, której przypisany jest określony typ (np. robot, automat spawalniczy), charakteryzuje się wykazem operacji, które mogą być na niej realizowane (np. spawanie, zgrzewanie, skręcanie). Czas transportu pomiędzy  $k$ -tą i  $l$ -tą maszyną jest oznaczony  $t_{kl}$ . Uwzględnia on czas pobrania części z  $l$ -tej maszyny i jej załadunku na  $k$ -tą maszynę.

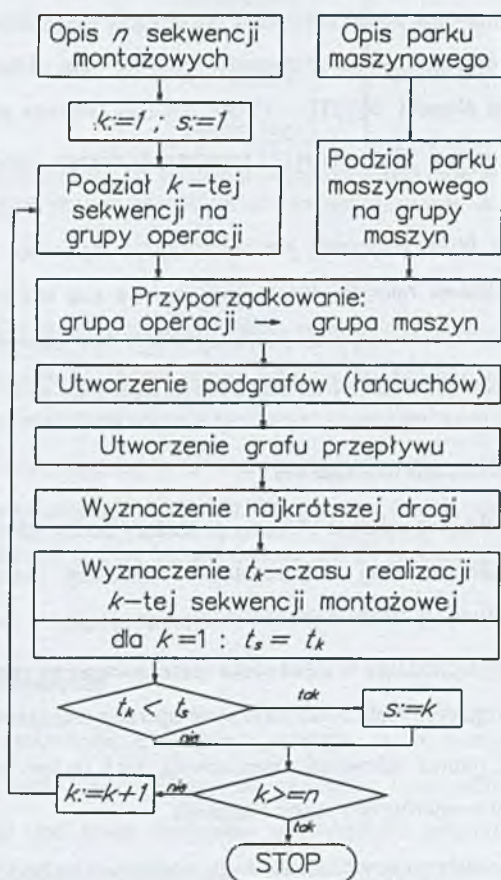
## 3. Procedura oceny sekwencji montażowej

Rysunek 2 przedstawia schemat blokowy procedury oceny sekwencji montażowej. Na schemacie tym wartość zmiennej  $t_r$  przedstawia minimalny czas realizacji sekwencji montażowej. W procedurze tej można wyróżnić następujące etapy:

- krok 1. Podziel maszyny wchodzące w skład parku maszynowego na grupy maszyn tego samego typu (mogących realizować takie same operacje montażowe).
- krok 2. Przyjmij  $k:=1$  (numer sekwencji montażowej),  $s:=1$  ( $s$  jest zmienną zapamiętującą numer sekwencji o najkrótszym czasie realizacji).
- krok 3. Podziel ciąg przedstawiający  $k$ -tą sekwencję montażową na podciągi stanowiące grupy operacji, czyli takich operacji, które mogą być realizowane na jednej maszynie bez użycia środka transportu. Każda grupa operacji związana jest z określonym typem

maszyny (np. robot, automat spawalniczy), czyli ma miejsce przyporządkowanie: grupa operacji  $\leftrightarrow$  typ maszyny.

krok 4. Utwórz podgrafy  $p(l)$  - łańcuchy zawierające wierzchołki przedstawiające maszyny tego samego typu,  $l = 1, \dots, g$ ;  $g$  - liczba grup maszyn. W tym celu utwórz uporządkowaną w dowolny sposób listę maszyn tego samego typu (ciąg odzwierciedlający wierzchołki). Krawędzie grafu powstają w wyniku połączenia każdych dwóch sąsiednich wierzchołków (odpowiadających dwóm sąsiednim elementom na liście maszyn tego samego typu).



Rys.2. Schemat procedury oceny sekwencji montażowej

Fig.2. Schematic diagram of procedure of assembly sequence valuation

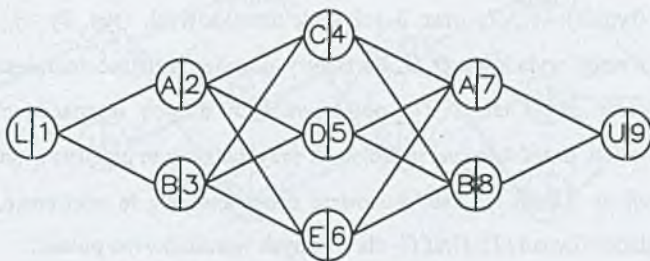
krok 5. Utwórz graf przepływu zawierający wierzchołki: początkowy ( $L$  - stacja załadowcza), końcowy ( $U$  - stacja wyładowcza) oraz utworzone w kroku 4 podgrafy. Każdy podgraf odpowiada jednej grupie operacji. Ich liczba jest więc równa liczbie grup operacji. Podgrafy są zawarte w grafie w sposób uporządkowany (uporządkowanie jest zgodne z uporządkowaniem grup operacji), tak aby były zachowane ograniczenia kolejnościowe wynikające z danej sekwencji montażowej.

Graf przepływu  $G$  powstaje w wyniku połączenia każdego wierzchołka podgrafu z każdym wierzchołkiem „sąsiedniego” podgrafu. Krawędzie w obrębie podgrafu utworzonego w kroku 4 zostają usunięte.

$$G = (L, p_1(I), \dots, p_w(I), U); w - \text{liczba podgrafów} \quad (1)$$

Ponumeruj wierzchołki grafu  $G$ , począwszy od wierzchołka  $L$ , tak aby numery wierzchołków w każdym podgrafie  $p_i(I)$  były większe od numerów wierzchołków w podgrafie  $p_{i-1}(I); i = 1, \dots, w$ .

Np.: Niech sekwencja montażowa składa się z 3 grup operacji:  $a, b, c$ , które mają być wykonywane w przedstawionej kolejności. W skład parku maszynowego, zawierającego 5 maszyn:  $I = \{A, B, C, D, E\}$ , wchodzi dwie grupy maszyn: pierwsza ( $A, B$ ), reprezentowana przez  $p(1)$ , umożliwiającą wykonanie operacji montażowych zawartych w grupach:  $a, c$  oraz grupa maszyn ( $C, D, E$ ) reprezentowana przez  $p(2)$ , umożliwiającą wykonanie operacji montażowych zawartych w grupie operacji  $c$ . Graf przepływu  $G = \{L, p_1(1), p_2(2), p_3(1), U\}$  jest przedstawiony na rys.3.



Rys.3. Przykład grafu przepływu  
Fig.3. Example of flow graph

krok 6. W celu znalezienia najkrótszej drogi w grafie utwórz dla każdego wierzchołka  $i$  układ równań funkcyjnych:

$$f_i = \min_v (t_{ij} + f_j) \quad (2)$$

gdzie:  $t_{ij}$  - czas transportu od maszyny  $i$  do  $j$ ,

$f_i$  - najkrótszy czas transportu pomiędzy  $i$ -tą maszyną a stacją wyladowczą.

Aby wyznaczyć najkrótszą drogę, należy prześledzić połączenia dające minimum funkcji (2) w każdym wierzchołku, rozpoczynając od wierzchołka początkowego ( $L$ ).

krok 7. Mając dany czas wykonywania czynności transportowych oraz czasy wykonywania operacji montażowych, wyznacz  $t_k$  - czas realizacji  $k$ -tej sekwencji montażowej. Jeżeli  $t_k < t_s$ , to  $s := k$ .

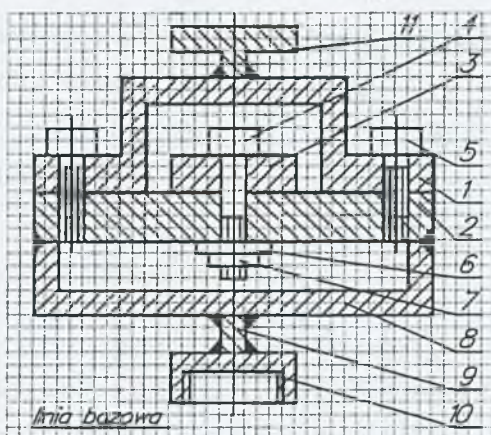
krok 8. Jeżeli  $k \geq n$  ( $n$  - liczba wygenerowanych sekwencji montażowych), to stop, jeśli nie, to przyjmij  $k := k + 1$  i idź do kroku 3.

Przedstawiona procedura wyznacza czas realizacji każdej wygenerowanej sekwencji montażowej. Wartość funkcji (2) uzyskana w  $j$ -tym etapie zależy od stanu w etapie poprzednim oraz od decyzji podjętej w  $j$ -tym etapie. Nie zależy natomiast od tego, jaką drogą system doszedł do stanu  $j+1$ . Jest to własność programowania dynamicznego.

#### 4. Przykład

Rysunek 4 przedstawia rysunek złożeniowy 11-częściowego produktu. Wygenerowane sekwencje montażowe zawarte są w tabl.1. Park maszynowy składa się z 2 automatów spawalniczych (typ  $A$ ):  $A_1$ ,  $A_2$  oraz 3 robotów montażowych (typ  $B$ ):  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ , stacji załadowniczej  $L$  i stacji wyladowczej  $U$ . Parametry odzwierciedlające rozmieszczenie maszyn (rozd.2.2) zawarte są w tabl.2. Na podstawie tych danych wyznaczone są odległości pomiędzy maszynami, przedstawione w tabl.3. W przykładzie tym przedstawiona jest dokładna analiza sekwencji nr 1 (tabl.1). Tab. 4 zawiera dane opisujące tę sekwencję, niezbędne do wyznaczenia układu równań (2). Graf  $G$  dla zadanych warunków ma postać:

$$G = \{L, p_1(1), p_2(2), p_3(1), p_4(2), U\}$$



Rys.4. Rysunek złożeniowy produktu  
Fig.4. Assembled drawing of product.

Tablica 1  
Wygenerowane sekwencje montażowe

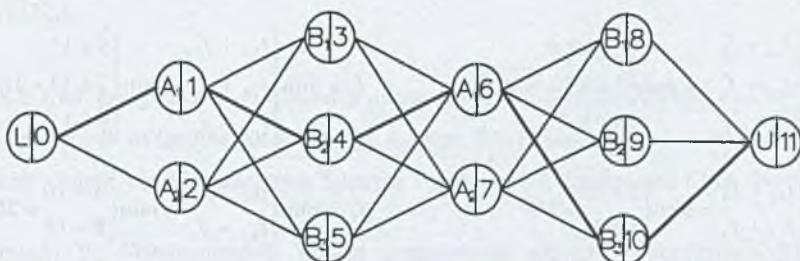
L p.	Sekwencja montażowa
1	10,9,8,(7,6,2,3,4),(1,11),5
2	10,9,8,((7,6,2,3,4),1,5),11
3	(7,6,2,3,4,(1,11),5),8,9,10
4	((4,3,2,6,7),8,9,10),1,11,5

Tablica 2  
Opis rozmieszczenia maszyn

$i$	$p(i,1)$ [m]	$p(i,2)$ [m]
$A_1$	0	4
$A_2$	0	8
$B_1$	3	0
$B_2$	3	4
$B_3$	3	8
$U$	0	12

Tablica 3  
Odległości pomiędzy maszynami [m]

	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$L$	$U$
$A_1$	5	3	5	4	8
$A_2$	8,5	5	3	8	4
$L$	3	5	8,5	-	12
$U$	12,4	8,5	5	12	-



Rys. 5. Graf przepływu  
Fig. 5. Flow graph

Tablica 4

## Opis sekwencji montażowej nr 1

Nr		Czas	Typ maszyny	Oznaczenie
1	[10;9]	12	A	$p_1(1)$
2	[10,9;8]	10	A	$p_1(1)$
3	[7;6]	5	B	$p_2(2)$
4	[7,6;2]	6	B	$p_2(2)$
5	[7,6,2;3]	6	B	$p_2(2)$
6	[7,6,2,3;4]	9	B	$p_2(2)$
7	[10,9,8;(7,6,2,3,4)]	10	A	$p_3(1)$
8	[1;11]	12	A	$p_3(1)$
9	[10,9,8,(7,6,2,3,4),(1,11)]	11	B	$p_4(2)$
10	10,9,8,(7,6,2,3,4),(1,11);5]	12	B	$p_4(2)$

Graf przepływu przedstawiony jest na rys 5. Równania funkcyjne mają postać:

$$f_{11} = 0$$

$$f_{10} = \min(t_{1011} + f_{11}) = \min(5 + 0) = 5$$

$$f_9 = \min(t_{911} + f_{11}) = \min(8,5 + 0) = 8,5$$

$$f_4 = \min \begin{cases} t_{46} + f_6 \\ t_{47} + f_7 \end{cases} = \min \begin{cases} 3 + 10 \\ 5 + 8 \end{cases} = 13$$

$$f_8 = \min(t_{811} + f_{11}) = \min(12,4 + 0) = 12,4$$

$$f_3 = \min \begin{cases} t_{36} + f_6 \\ t_{37} + f_7 \end{cases} = \min \begin{cases} 5 + 10 \\ 8,5 + 8 \end{cases} = 15$$

$$f_7 = \min \begin{cases} t_{78} + f_8 \\ t_{79} + f_9 \\ t_{710} + f_{10} \end{cases} = \min \begin{cases} 8,5 + 12,4 \\ 5 + 8,5 \\ 3 + 5 \end{cases} = 8$$

$$f_2 = \min \begin{cases} t_{23} + f_3 \\ t_{24} + f_4 \\ t_{25} + f_5 \end{cases} = \min \begin{cases} 8,5 + 15 \\ 5 + 13 \\ 3 + 11 \end{cases} = 14$$

$$f_6 = \min \begin{cases} t_{68} + f_8 \\ t_{69} + f_9 \\ t_{610} + f_{10} \end{cases} = \min \begin{cases} 5 + 12,4 \\ 3 + 8,5 \\ 5 + 5 \end{cases} = 10$$

$$f_1 = \min \begin{cases} t_{13} + f_3 \\ t_{14} + f_4 \\ t_{15} + f_5 \end{cases} = \min \begin{cases} 5 + 15 \\ 3 + 13 \\ 5 + 11 \end{cases} = 16$$

$$f_5 = \min \begin{cases} t_{56} + f_6 \\ t_{57} + f_7 \end{cases} = \min \begin{cases} 5 + 10 \\ 3 + 8 \end{cases} = 11$$

$$f_0 = \min \begin{cases} t_{01} + f_1 \\ t_{02} + f_2 \end{cases} = \min \begin{cases} 4 + 16 \\ 8 + 14 \end{cases} = 20$$

Najkrótszą drogę w grafie (rys.5) dają połączenia o minimum funkcji (2) w każdym wierzchołku. Uzyskane zostały 3 rozwiązania: (0,1), (1,4), (4,6), (6,10), (10,11) (pogrubione na rys.5); (0,1), (1,4), (4,7), (7,10), (10,11) oraz (0,1), (1,5), (5,7), (7,10), (10,11), wyznaczające drogę  $l = 20$ m. Jeżeli oznaczymy przez  $v$  parametr określający średnią prędkość



transportu między maszynami, to dla każdej  $k$ -tej sekwencji montażowej czas jej realizacji można wyrazić:

$$t_k = l/v + t_m,$$

gdzie  $t_m$  wyraża sumę czasów wykonywania operacji montażowych (tabl.4.).

## 5. Uwagi końcowe

Przedstawiona procedura ma na celu ułatwienie podjęcia decyzji wyboru jednej spośród wielu sekwencji montażowych wygenerowanych dla danego produktu. W ocenie przydatności każdej sekwencji montażowej brana jest pod uwagę konfiguracja parku maszynowego. Kryterium oceny przydatności sekwencji jest czas jej realizacji. W wyniku modyfikacji zawartej w pracy procedury (np. w celu aplikacji jej w algorytmie przydziału operacji montażowych do maszyn), w niektórych przypadkach można zmniejszyć czas wykonywania operacji montażowych. Można to osiągnąć przez wykorzystanie maszyn równoległych, tzn. przez odciążenie najbardziej obciążonych maszyn, czy przez równoczesny montaż przynajmniej dwóch grup operacji (modyfikacja sekwencji montażowej), zachowując ograniczenia kolejnościowe. Modyfikacje te mogą jednak znacznie wydłużyć czasy wykonywania czynności transportowych.

Pokazana procedura może więc zostać wykorzystana w projektowaniu elastycznego systemu montażowego, w sterowaniu operacyjnym, np. w algorytmie przydziału operacji montażowych do maszyn.

## LITERATURA

1. Ignasik E. (red. pracy zbiorowej): *Badania operacyjne*. PWE Warszawa 1996.
2. Iha K.: *Handbook of flexible manufacturing systems*. San Diego 1991.
3. Kusiak A.: *Intelligent Manufacturing Systems*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 1990.
4. Łebkowski P.: *Wieloagentowy system generowania sekwencji montażowej dla FAS*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Zeszyty Naukowe, Automatyka 1996, z.118, str.121-130.
5. Łebkowski P., Magiera M.: *Komputerowy system generowania sekwencji montażowych dla FAS*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Zeszyty Naukowe, Automatyka 1994, z.115, str.191-200.

6. Magiera M., Łebkowski P.: Relacyjna baza danych do generowania sekwencji operacji dla ESM. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Zeszyty Naukowe, Automatyka 1996, z.119, str.43-52.
7. Magiera M.: Algorytm przydziału operacji montażowych do maszyn dla ESM. Wydawnictwa AGH, Automatyka 1997, tom I, zeszyt I, str.259-266.
8. Sawik T.: Optymalizacja dyskretna w elastycznych systemach produkcyjnych. WNT, Warszawa 1992.
9. Sawik T.: Planowanie i sterowanie produkcji w elastycznych systemach montażowych. WNT, Warszawa 1996.
10. Vonderembse M., White G.: Operations magement - concepts, methods, and strategies. West Publishing Company 1987.

Recenzent: Dr hab.inż.Mirosław Zaborowski, prof.Pol.Śl.

## Abstract

Specially created databases constitute a starting point for the procedure of valuation assembly sequence utility for flexible assembly systems. The first database describes the assembly sequences of the product being assembled. This database describes the digital recording geometry of all components, the description of junction between components of the product and the description of subsets. The other database describes the machines. This database contains the description of the machine location and their characteristic.

All the assembly operations are allocated to operation groups. Each group of assembly operation is connected with one machine type. The solution of the valuation assembly sequence utility problem is based on the graph model. Each node of the graph presents machine and each edge presents distance between two machines. The idea of dynamic programming is used to fixing of the shortest way in the graph. The total processing time (fixed for each assembly sequence) determines the criterion for assembly sequence selection.

Presented procedure can be applied for designing the flexible assembly system, e.g. in the algorithm of allocation assembly operation to assembly machines.