

Jolanta Krystek  
Politechnika Śląska

## BALANSOWANIE LINII MONTAŻOWEJ Z SZEREGOWĄ STRUKTURĄ MONTAŻU<sup>1</sup>

**Streszczenie.** W artykule opisano program komputerowego wspomaganie projektowania linii montażowej o szeregowej strukturze i ograniczeniami kolejnościowymi realizacji operacji montażowych. Program ten może być podstawowym narzędziem pracy dyspozytora linii. W programie zastosowano cztery warianty algorytmu balansowania linii: konwersacyjny (realizowany samodzielnie przez dyspozytora), najbliższego sąsiedztwa (przeglądowy), optymalny (dokładny) i heurystyczny. Istota problemu balansowania linii polega na wyznaczeniu minimalnej liczby stanowisk pracy i podzbiorów operacji realizowanych na tych stanowiskach.

### 1. Wprowadzenie

Przedmiotem rozważań będzie proces balansowania szeregowej linii montażowej. Linia składa się z transportera poruszającego się z zadanyim cyklem pracy, wzdłuż którego usytuowane są stacje montażowe. W przypadku linii szeregowej na każdej stacji znajduje się jedno stanowisko pracy, czyli operacje realizowane są sekwencyjnie.

Idea procesu balansowania linii [1] polega na wyznaczeniu minimalnej liczby stanowisk pracy poprzez optymalne rozdzielanie operacji na stanowiska. Zakłada się, że dane są: cykl linii, zbiór operacji, czasy ich wykonania i ograniczenia kolejności ich realizacji (ograniczenia te wynikają z technologii produkcji). Jako kryterium optymalizacji przyjmuje się minimalizację stanowisk pracy, co jest równoznaczne z minimalizacją niewykorzystanego czasu pracy na całej linii. Należy wyznaczyć minimalną liczbę podzbiorów operacji i jednocześnie operacje należące do tych podzbiorów. Do rozwiązania tego problemu wykorzystano metodę programowania wieloetapowego.

Z punktu widzenia złożoności obliczeniowej problem balansowania linii jest problemem NP-zupełnym.

W literaturze wyróżnia się algorytmy: dokładne (optymalne) i heurystyczne. Wśród algorytmów dokładnych najkrótsze czasy obliczeń można uzyskać stosując metodę podziału i ograniczeń. W ogólnym przypadku czas obliczeń zależy od algorytmu, stopnia optymalności programu i klasy wykorzystywanego komputera.

W programie "BALANSOWANIE LINII MONTAŻOWEJ" wprowadzono dodatkowe algorytmy: konwersacyjny i przeglądowy. Dzięki temu program może stać się podstawowym narzędziem pracy dyspozytora (projektanta) linii.

<sup>1</sup>) praca częściowo finansowana przez CPBR 7.4 i RP.1.02

Projektant może samodzielnie dokonać balansowania linii, posługując się algorytmem przeglądowym oraz konwersacyjnym. Algorytmy heurystyczny i dokładny zapewniają uzyskanie optymalnego rozwiązania po automatycznych obliczeniach. Między poszczególnymi algorytmami istnieje możliwość przekazywania pośrednich rozwiązań i kontynuowania obliczeń przez inny algorytm.

Program "BALANSOWANIE LINII MONTAŻOWEJ" rozwiązuje podstawowy problem balansowania z relacją kolejności i czasami operacji. Do rozwiązania problemów z wieloma ograniczeniami stosowane były dotąd tylko algorytmy heurystyczne.

## 2. Sformułowanie problemu

Założmy, że dany jest zbiór operacji montażowych:

$$\Omega = \{\omega_n\}, n=1, N \quad (1)$$

gdzie:  $\omega_n$  —  $n$ -ta operacja;  $N$  — liczba operacji.

Niech będzie dany wektor czasów wykonania operacji:

$$\theta = [\theta_n] \quad (2)$$

gdzie:  $\theta_n$  — czas wykonania operacji  $\omega_n$ .

Ograniczenia kolejności wykonywania operacji są macierzą:

$$\Gamma = [\gamma_{\nu, n}], \nu=1, N \quad (3)$$

Elementy tej macierzy definiujemy następująco:

$$\gamma_{\nu, n} = \begin{cases} 1, & \text{jeśli operacja } \omega_\nu \text{ poprzedza operację } \omega_n \\ 0, & \text{w przypadku przeciwnym} \end{cases} \quad (4)$$

Dany jest cykl linii —  $c$ , spełniający warunek:

$$\max_{n=1}^N \theta_n \leq \text{cykl} \leq \sum_{n=1}^N \theta_n \quad (5)$$

Należy wyznaczyć:

- minimalną liczbę  $M$  stanowisk pracy na linii montażowej,
- podzbiory operacji  $W_m$  ( $m=1, M$ ), realizowane na poszczególnych stanowiskach pracy.

Dla uzyskania optymalnego rozwiązania wprowadza się kryterium minimalizacji niewykorzystanego czasu pracy:

$$Q = \sum_{m=1}^{m=M} \left( c - \sum_{\omega_n \in W_m} \theta_n \right) \longrightarrow \min \quad (6)$$

Jednocześnie kryterium to minimalizuje liczbę stanowisk pracy

$$Q = Mc - \sum_{n=1}^{n=N} \theta_n \longrightarrow \min \quad (7)$$

Zakłada się, że operacje nie są podzielne, tzn. każda operacja musi być wykonana na jednym stanowisku pracy.

### 3. Koncepcja algorytmu

Do rozwiązywania problemu balansowania linii stosowanych jest wiele algorytmów, które można podzielić na dokładne i heurystyczne. Algorytmy dokładne są oparte na metodach: liniowego programowania dynamicznego, programowania sieciowego, programowania dynamicznego oraz na metodzie podziału i ograniczeń. Algorytmy heurystyczne cechuje duża dowolność i różnorodność. Ogólnie można je podzielić na algorytmy: szeregowania oraz przydziału.

Sformułowany problem balansowania linii rozwiązany został metoda programowania wieloetapowego. Idea tej metody jest oparta na wieloetapowych procesach decyzyjnych oraz metodzie podziału i ograniczeń. Zawiera ona pewne elementy programowania dynamicznego oraz metody podziału i ograniczeń.

W algorytmach programowania wieloetapowego podstawowe znaczenie mają: stan procesu decyzyjnego, wartość stanu, procedury generowania stanów oraz reguły eliminacji stanów nieperspektywicznych, które nie prowadzą do rozwiązania optymalnego.

Proces przydzielania  $N$  operacji do stanowisk pracy może być rozważany jako  $N$ -etapowy proces decyzyjny. Na każdym  $\eta$ -tym etapie ( $\eta=1, N$ ) wychodzimy z pewnego stanu i podejmując decyzję o przydzieleniu operacji przechodzimy do kolejnego etapu. Stan wyraża sytuację, jaka powstaje po przydzieleniu pewnej operacji. Ciąg stanów nazwiemy trajektorią, a ciąg decyzji-strategią. Wszystkie trajektorie wychodzące z punktu startowego (żadna operacja nie została jeszcze przydzielona) tworzą drzewo decyzyjne.

Stany należące do  $\eta$ -go etapu ( $\eta < N$ ) nazwiemy aktywnymi, ponieważ pozwalają wygenerować dalsze stany. Podzbiór  $N$ -go etapu zawiera stany końcowe lub aktualnie najlepszy stan końcowy. Najlepszy stan końcowy (ze względu na pewne kryterium) jest stanem globalnie optymalnym.

Generowanie stanów polega na wyborze pewnego stanu aktywnego i uzupełnieniu go informacją związaną z przydzieloną operacją. Jeżeli takich operacji jest wiele, to z jednego stanu ( $\eta-1$ )-go etapu można wygenerować wiele stanów  $\eta$ -go etapu. Stany aktywne umieszczane są na

liście stanów aktywnych.

Wyboru stanu aktywnego dokonujemy na podstawie pewnych reguł, np.:

- (1) FIFO (ang. first-in, first-out) - najpierw wybiera się stan umieszczony na liście jako pierwszy;
- (2) LIFO (ang. last-in, first-out) - najpierw wybiera się stan umieszczony na liście jako ostatni;
- (3) LLB (ang. least-lower-bound) - wybiera się stan o najmniejszym dolnym ograniczeniu.

Reguła wyboru może być bardzo dużo. Istotne znaczenie ma liczba stanów aktywnych na liście oraz czas potrzebny do uzyskania rozwiązania. Stosując regułę FIFO (rozszerzania), otrzymuje się na liście znacznie więcej stanów niż korzystając z reguły LIFO (zglobiania). Użycie reguły LLB przyspiesza uzyskanie rozwiązania optymalnego.

W trakcie obliczeń eliminowane są stany nieperspektywiczne, czyli pewne wiązki trajektorii, które nie dają rozwiązania optymalnego. Do eliminacji tych stanów stosuje się reguły: sondowania, dominacji i wyczerpywania. Regułami eliminowania zmniejsza się liczbę wygenerowanych stanów. Dzięki temu lista stanów aktywnych zmniejsza się.

### 3.1. Podstawowe definicje

Założmy, że stany ponumerujemy oddzielnie w ramach każdego etapu. Stan procesu decyzyjnego zdefiniujemy tak, by można było z niego odczytać przydział operacji do stanowisk pracy. Stan interpretuje sytuację, jaka powstaje w systemie po podjęciu decyzji. Wartość stanu jest oceną stanu z punktu widzenia przyjętego kryterium optymalizacji.

DEF. 1.: Stan jest wektorem

$$p_{n,l}^{\eta} = \begin{bmatrix} p_n^{\eta,l} \\ \eta \\ l \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} n=1, N \\ \eta=0, N \\ l=1, L_{\eta} \end{array} \quad (9)$$

gdzie:  $\eta$  - numer etapu decyzyjnego,

$l$  - numer stanu w ramach  $\eta$ -go etapu

$L_{\eta}$  - liczba stanów  $\eta$ -go etapu.

Elementy tego wektora określany następująco:

$$p_n^{\eta,l} = \begin{cases} t_n, & \text{jeśli operacja } \omega_n \text{ została przydzielona} \\ & \text{do realizacji} \\ 0, & \text{w przypadku przeciwnym} \end{cases} \quad (10)$$

Sposób wyznaczania chwili  $t_n$  - czasu zakończenia operacji  $\omega_n$ , zostanie przedstawiony przy omawianiu procedury generowania stanów.

DEF.2.: Wartość stanu

$$V^{\eta, l} = \left[ \frac{1}{c} T^{\eta, l} \right]^+ \quad (11)$$

gdzie:  $[.]^+$  - najmniejsza liczba całkowita nie mniejsza od wartości w nawiasie,

$T^{\eta, l}$  - chwila zakończenia wszystkich operacji w stanie  $P^{\eta, l}$  obliczana jest ze wzoru:

$$T^{\eta, l} = \max_{1 \leq n \leq N} p_n^{\eta, l} \quad (12)$$

Wartość stanu określa liczbę stanowisk pracy wykorzystywanych w stanie  $P^{\eta, l}$ . Stanowisko pracy, do którego przydzielono operację  $\omega_n$ , otrzymujemy z formuły:

$$k_n = \left[ \frac{1}{c} p_n^{\eta, l} \right]^+ \quad (13)$$

### 3.2. Generowanie stanów

Dopuszczalne i optymalne rozwiązanie problemu, reprezentują stany końcowego etapu. Żeby otrzymać takie rozwiązanie, należy wygenerować kompletną trajektorię.

Procedura generowania stanów jest zdaniem logicznym określającym warunki, jakie muszą być spełnione, aby wygenerować stan.

Oznaczmy przez  $P^{\eta-1, \lambda}$  wybrany za pomocą dowolnej reguły stan aktywny. Procedura generowania stanów polega na uzupełnieniu tego stanu o operację  $\omega_n$  tak, by otrzymać kolejny stan  $P^{\eta, l}$ .

Dla rozważanego problemu balansowania linii procedura generowania stanów ma postać

$$\bigvee_n \bigvee_{\nu \neq n} \left[ p_n^{\eta-1, \lambda} = 0 \right] \wedge \left[ \left[ \gamma_{\nu, n} = 1 \right] \vee \left[ p_{\nu}^{\eta-1, \lambda} > 0 \right] \right] \Rightarrow P^{\eta, l} = P^{\eta-1, \lambda} + \Delta P \quad (14)$$

Elementy wektora  $\Delta P$ :

$$\Delta p_i = \begin{cases} t_n & \text{gdy } i=n \\ 0, & \text{w przypadku przeciwnym} \end{cases} \quad (15)$$

Chwila  $t_n$  wyznaczana jest następująco:

$$t_n = \begin{cases} \theta_n, & \text{jeśli } \left[ \frac{1}{c} T^{\eta-1, \lambda} \right]^+ = \left[ \frac{1}{c} \left[ T^{\eta-1, \lambda} + \theta_n \right] \right]^+ \\ c \left[ \frac{1}{c} T^{\eta-1, \lambda} \right]^+ + \theta_n, & \text{w przypadku przeciwnym} \end{cases} \quad (16)$$

Wartość nowego stanu wyznaczana jest rekurencyjnie

$$v^{\eta, l} = v^{\eta-1, \lambda} + \Delta v \quad (17)$$

przy czym

$$\Delta v = \begin{cases} 0, & \text{jeśli } \left[ \frac{1}{c} \tau^{\eta-1, \lambda} \right]^+ = \left[ \frac{1}{c} \left( \tau^{\eta-1, \lambda} + \theta_n \right) \right]^+ \\ 1, & \text{w przypadku przeciwnym} \end{cases} \quad (18)$$

W przypadku gdy czas realizacji operacji jest większy niż luz czasu na stanowisku, to zgodnie z założeniem o niepodzielności operacji, jest ona przydzielana na kolejne stanowisko pracy, a liczba dotychczas wykorzystanych stanowisk zostaje zwiększona o 1.

### 3.3. Eliminowanie stanów

Zasadniczą trudnością wyznaczania rozwiązań optymalnych za pomocą programowania wieloetapowego jest duża liczba stanów, które mogą być wygenerowane na pewnym etapie. Dlatego istotne znaczenie mają procedury pozwalające wyeliminować stany nieperspektywiczne, tzn. nie prowadzące do rozwiązania optymalnego.

Reguła wyczerpywania eliminuje stan  $P^{\eta, l}$ , z którego nie można otrzymać dopuszczalnego stanu końcowego (wyczerpane zostały możliwości generowania rozwiązań dopuszczalnych).

Reguła sondowania eliminuje stan  $P^{\eta, l}$ , którego stan lokalnie optymalny (najlepszy stan końcowy, który można otrzymać ze stanu  $P^{\eta, l}$ ) jest gorszy od stanu aktualnie najlepszego (najlepszy stan końcowy wyznaczony w ograniczonym czasie obliczeń). W tym celu dla stanu  $P^{\eta, l}$  wyznacza się oszacowanie dolnego ograniczenia  $b^{\eta, l}$  wartości stanu  $V^{\eta, l}$ :

$$b^{\eta, l} = \left[ \frac{1}{c} \tau^{\eta, l} + \delta \right]^+ \quad (19)$$

gdzie:  $\delta = \sum_{\omega_n \in \Omega^{\eta, l}} \theta_n$  - suma czasów operacji niezrealizowanych w stanie  $P^{\eta, l}$

Regułę sondowania stosuje się, gdy znany jest aktualnie najlepszy stan o wartości  $V^a$  (stan ten znajduje się na etapie N).

**DEF. 3.:** Stan  $P^{\eta, l}$  można uznać za nieperspektywiczny, gdy:

$$b^{\eta, l} > V^a \quad (20)$$

Reguła dominacji pozwala wyeliminować jeden z dwóch stanów aktywnych  $P^{\eta, l_1}$  i  $P^{\eta, l_2}$  - ten, którego stan lokalnie optymalny jest gorszy.

Ponieważ w trakcie obliczeń wartości stanów lokalnie optymalnych nie są znane, należy zatem określić warunki eliminacji. W rozważanym problemie stan  $P^{n, l}$  dominuje nad stanem  $P^{n, l}$ , z, gdy dla tego samego zbioru operacji zrealizowanych czas zakończenia ostatniej operacji jest mniejszy.

#### 4. Opis programu "BALANSOWANIE LINII MONTAŻOWEJ" i konfiguracja sprzętowa

Program o nazwie roboczej BLM został napisany w języku PASCAL. Wykorzystano dostępną implementację tego języka dla systemu operacyjnego PC-DOS, MS-DOS: TURBO PASCAL wersja 3.0 firmy BORLAND INTERNATIONAL. Wykorzystano również graficzny pakiet oprogramowania w języku PASCAL: TURBO GRAPHIX TOOLBOX, tej samej firmy.

Program jest przeznaczony do użytkowania na komputerze typu IBM PC/XT/AT, w którego konfiguracji wymagana jest karta grafiki Hercules. Karta ta umożliwia uzyskanie wysokiej rozdzielczości ekranu (720x350 punktów), co pozwala na zwiększenie ilości informacji wyświetlanych jednocześnie, jednak jej użycie wymaga wyświetlania w trybie monochromatycznym. Minimalna pojemność pamięci operacyjnej komputera wynosi 640 kB. Ułatwieniem dla użytkownika jest korzystanie z komputera z zainstalowaną pamięcią typu Winchester - przyspieszającą pracę programu ze zbiorami danych.

#### 5. Komunikacja użytkownika z programem

Wszystkie informacje niezbędne do komunikacji użytkownika z programem znajdują się na ekranie monitora jako MENU w tzw. okienkach. Podstawowe przyciski wykorzystywane przez program to przyciski kierunków i funkcyjne F1-F9. Umożliwiają one poruszanie się po wszystkich MENU. Wybranie danej opcji z podświetlonego MENU realizowane jest przyciskiem RETURN.

Główne MENU składa się z czterech podstawowych opcji:

- ZBIORY - operacje na zbiorach danych tworzonych dla programu, bez konieczności powrotu do systemu operacyjnego,
- EDYCJA - edytory do wprowadzania i weryfikacji danych,
- OBLICZENIA - zbiór algorytmów realizujących balans linii,
- SYSTEM - powrót do systemu operacyjnego.

Wybór jednej z opcji jest realizowany przez przyciski F1-F4 i zaznaczony poprzez inwersję wybranej opcji.

Na ekranie wyświetlana jest nazwa zbioru danych, dla którego przeprowadzane są obliczenia.

### 5.1. Opcja ZBIORY

Wszystkie operacje ze zbiorami danych dotyczą tylko zbiorów o rozszerzeniu BLM. Opcja ta umożliwia:

- SAVE: zapamiętanie danych, wprowadzonych opcją EDYCJA oraz częściowych rozwiązań z obliczeń konwersacyjnych i najbliższego sąsiedztwa,
- LOAD: korzystanie ze stworzonych wcześniej zbiorów danych dla ponownych obliczeń lub ich kontynuacji. Lista zbiorów danych wyświetlana jest na monitorze,
- RENAME: zmiana nazwy zbioru danych,
- COPY: kopiowanie zbioru danych na inną dyskietkę lub Winchester,
- DELETE: usunięcie wybranego zbioru danych.

Dzięki tej opcji praca ze zbiorami danych możliwa jest bez konieczności wychodzenia do systemu operacyjnego.

### 5.2. Opcja EDYCJA

Wybranie tej opcji pozwala na zdeklarowanie podstawowych parametrów linii oraz dodatkowych współczynników niezbędnych do przeprowadzenia obliczeń. W trakcie obliczeń może zaistnieć potrzeba zmiany niektórych danych, co również jest możliwe.

Dane, które można wprowadzać lub zmieniać:

- liczba operacji montażowych,
- czasy ich realizacji,
- ograniczenia kolejności realizacji operacji,
- ograniczenia ilościowe (ze względu na ograniczoną pojemność pamięci komputera należy ograniczyć liczbę stanów na poszczególnych etapach, co oznaczono w p.3.1 jako  $L_{\eta}$ ),
- cykl linii montażowej,
- współczynniki etapowe (jako jedną z heurystyk wyboru stanu aktywnego stosuje się zmodyfikowaną regułę LLB:

$$b_1^{\eta, l} = b^{\eta, l} * \alpha_{\eta} \quad (20)$$

gdzie:  $b_1^{\eta, l}$  - zmodyfikowane dolne ograniczenie,

$\alpha_{\eta}$  - współczynnik etapu  $\eta$ .

Współczynniki te są niezbędne do równomiernego zagęszczenia generowanej sieci rozwiązań ),

-heurystyki:

a) dla wyboru stanu aktywnego:

- reguła LLB,
- reguła LIFO,
- reguła FIFO,



b) dla wyboru operacji:

- kolejna operacja,
- maksymalna liczba następników (operacje, które nie mogą być zrealizowane z powodu braku operacji przydzielanej),
- maksymalny czas realizacji.

W zależności od charakteru procesu technologicznego heurystyki mogą być zupełnie inne,

-metody eliminacji stanów:

- a) reguła wyczerpywania,
- b) reguła dominacji,
- c) reguła sondowania,
- d) reguła dominacji, sondowania i wyczerpywania.

### 5.3. Opcja OBLICZENIA

Dzięki tej opcji operator może dokonać balansowania linii wykorzystując jeden z czterech algorytmów:

- KONWERSACYJNY,
- NAJBLIŻSZEGO SASIEDZTWA,
- HEURYSTYCZNY,
- OPTYMALNY.

Między poszczególnymi algorytmami istnieje możliwość przekazywania częściowych rozwiązań i kontynuowania obliczeń przy wykorzystaniu innego algorytmu.

a) Algorytm konwersacyjny jest typowym przykładem tego, że program może być narzędziem pracy dla projektanta (operatora) linii. Jeżeli operator ma dużą praktykę i doskonale zna technologię produkcji, to pewne decyzje przydziału kolejnych operacji może podjąć samodzielnie, a następnie przekazać otrzymany stan do algorytmu optymalnego lub heurystycznego, który automatycznie znajdzie rozwiązanie optymalne, uwzględniające podjęte decyzje. Gdy operator nie jest pewny swojej decyzji, to może przekazać stan do algorytmu najbliższego sąsiedztwa, który umożliwi mu przeglądnięcie sąsiedztwa tego stanu i sąsiedztwa stanu, który zostałby wygenerowany po podjęciu tej decyzji. Powrót do algorytmu konwersacyjnego jest możliwy w każdej chwili.

Komunikacja prowadzona jest w sposób konwersacyjny i umożliwia:

- przydzielenie operacji do realizacji - (F1),
- kasowanie ostatnio przydzielonej operacji - (F2),
- podgląd macierzy kolejności operacji - (F3),
- uzyskanie podpowiedzi dla optymalnego przydziału - (F4),
- wprowadzenie warunków początkowych obliczeń - (F5),

- wydrukowanie aktualnego rozwiązania - (F9),
- koniec pracy algorytmu konwersacyjnego - (F10).

Operator podejmuje kolejne decyzje w oparciu o dane, które są wyświetlane na ekranie (rys.1):

- czasy realizacji poszczególnych operacji,
- współczynniki etapowe,
- macierz kolejności operacji (ze względu na swoją konstrukcję nie zmieściła się na ekranie, ale może być w każdej chwili podglądana),
- aktualne rozwiązanie oraz dodatkowe informacje dotyczące tego rozwiązania:
  - aktualny etap,
  - czas zakończenia ostatnio realizowanej operacji,
  - czas do zakończenia cyklu (luz czasu na stanowisku),
  - aktualna liczba wykorzystanych stanowisk pracy,
  - cykl linii.

Każda nieprawidłowo podjęta decyzja jest sygnalizowana odpowiednim komentarzem wyświetlanym w dolnym okienku ekranu.

Kasowanie ostatnio przydzielonych operacji (krok po kroku) umożliwia zmianę generowanej ścieżki bez konieczności ustawiania warunków początkowych.

Podczas podejmowania decyzji o przydzieleniu operacji do realizacji, można korzystać z podpowiedzi. Program analizuje wszystkie rozwiązania na deklarowaną głębokość analizy i podaje optymalną (dla tej głębokości) operację do przydzielenia. Głębokość analizy ustawiana jest przez operatora. Mała wartość głębokości nie gwarantuje, że operacja zalecana do realizacji będzie właściwa. Jedynie analiza bardzo głęboka (na ostatni etap) gwarantuje optymalność podpowiedzi, ale wiąże się to ze zwiększeniem czasu jej uzyskania. Jeżeli oczekiwanie przedłuża się, to można je przerwać i otrzymamy aktualnie najlepszą operację zalecaną do przydzielenia.

Warunki początkowe obliczeń reprezentują postać rozwiązania w chwili rozpoczęcia pracy z algorytmem konwersacyjnym.

b) Algorytm najbliższego sąsiedztwa (przeglądowy) umożliwia przeglądanie, na danym etapie, wszystkich stanów wygenerowanych z dowolnego stanu (wybranego przez operatora) z poprzedniego etapu. Pokazuje również jedną z możliwych ścieżek dojścia do tego rozwiązania i jedną z możliwych ścieżek wygenerowaną z tego rozwiązania.

Dla każdego stanu wyświetlane są dodatkowe informacje (rys.2):

- numer etapu,
- numer stanu na tym etapie (dla orientacji o miejscu na liście stanów aktywnych),
- luz czasu na stanowisku,

rys.1. Obliczenia konwersacyjne  
Fig.1. Conversational calculations

ZBIORY		EDYCJA		OBLICZENIA		SYSTEM		
OBLICZENIA KONWERSACYJNE								
Czasy realizacji		Wspolczynniki				Aktualne rozhlazanie		
Oper.	Czas	Etap	Wartosc			Oper.	Czas Zak.	
		0	1	Aktualny etap	-	16		
1	14	1	1	Czas zakonczenia ostatniej operacji	-	878	1	0
2	17	2	1	Numer ostatniej operacji	-	22	2	493
3	27	3	1	Czas do zakonczenia cyklu	-	172	3	0
4	69	4	1	Aktualna ilosc stanowisk	-	5	4	371
5	50	5	1	Cykl linii	-	210	5	751
6	68	6	1				6	0
7	11	7	1	F1 - Wybor operacji			7	0
8	29	8	1	F2 - Kasowanie ostatniego etapu			8	0
9	28	9	1	F3 - Podglad macierzy kolejnosci operacji			9	0
10	17	10	1	F4 - Podpowiedz			10	302
11	65	11	1	F5 - Warunki poczatkowe obliczen			11	179
12	51	12	1	F6 - Drukowanie aktualnego rozhlazania			12	544
13	79	13	1	F10- End			13	623
14	3	14	1				14	0
15	91	15	1				15	0
16	95	16	1				16	0
17	74	17	1				17	835
18	5	18	1				18	59
19	56	19	1				19	476
20	59	20	1				20	0
21	18	21	1				21	0
22	38	22	1				22	878
23	39	23	1				23	0
24	75	24	1				24	285
25	89	25	1				25	54
26	55	26	1				26	119
27	50	27	1				27	0
28	17	28	1				28	711
29	64	29	1				29	694
30	49	30	1				30	0

F1-ZBIORY

F2-EDYCJA

F3-OBLICZENIA

F4-SYSTEM

AKTUALNY ZBIOR DANYCH --> DATA30

- liczba wykorzystanych stanowisk,
- numer ostatnio przydzielonego zadania.

Przeglądanie stanów jest możliwe poprzez:

- wybór stanu następnego (zmiana ścieżki)-(F1),
- wybór stanu poprzedniego (powrót ścieżki)-(F2),
- wybór etapu (ustawienie początku ścieżki)-(F3),
- przydzielenie zadania-(F4),
- ustawienie warunków początkowych-(F5),
- wydrukowanie rozwiązania-(F9),
- koniec przeglądania-(F10).

Z algorytmu przeglądowego można przekazać dowolny stan jako warunek początkowy innego algorytmu.

c) Algorytm heurystyczny dokonuje automatycznie obliczenia stanu optymalnego korzystając z heurystyk wyboru stanu aktywnego i operacji do przydzielenia (ustawionych w EDYCJI).

W dowolnym momencie można przerwać obliczenia i przekazać aktualne rozwiązanie jako warunek początkowy innego algorytmu. Na ekranie wyświetlane są takie same informacje, jak w algorytmie optymalnym (rys.3).

Możliwe jest korzystanie z kilku różnych heurystyk, podczas balansowania linii.

d) Algorytm optymalny znajduje rozwiązanie optymalne dla stanu wprowadzonego jako warunek początkowy obliczeń (może to być warunek zerowy).

Na ekranie, oprócz podstawowych informacji o danych, wyświetlane jest:

- aktualnie najlepsze rozwiązanie,
- czas zakończenia ostatniej operacji,
- liczba wykorzystanych stanowisk pracy,
- czas otrzymania aktualnie najlepszego rozwiązania,
- liczba generacji.

Gdy czas obliczeń przedłuży się, można przerwać obliczenia:

- STOP ZIMNY - (F1)
- STOP GORĄCY (ustawienie warunków początkowych obliczeń) - (F2).

Po zakończeniu obliczeń wyświetlony zostaje stan optymalny, czas obliczeń, całkowita liczba generacji oraz uaktualnione zostają informacje o całkowitej liczbie wykorzystanych stanowisk pracy i czasie zakończenia realizacji ostatniej operacji.

W tym algorytmie wykorzystuje się programowo ustalone heurystyki:

- wybór stanu aktywnego: zmodyfikowana reguła LLB,
- wybór operacji: kolejna operacja.

Rys. 2. Przeglądanie stanów aktywnych  
Fig. 2. Survey of active states

BALANSOWANIE LINII SPOŁIENIOWEJ								
ZBIORY	EDYCJA	OBLICZENIA	OBLICZENIA NAJLEPIEJSZEGO SYSTEMU		SYSTEM			
F1 - Następny stan	0 493 0	0 493 0	0 493 0	377 493 1004	377 493 1004	377 493 1004	377 493 1004	
F2 - Poprzedni stan	371 761 0	371 761 0	371 761 0	371 761 0	371 761 0	371 761 1118	371 761 1118	
F3 - Wybór etapu	322 0 0	322 0 0	322 0 0	322 0 0	322 0 0	322 0 1197	322 0 1197	
F4 - Przydzielenie zadania	302 178 544 623	302 178 544 623	302 178 544 623	302 178 544 623	302 178 544 623	302 178 544 623	302 178 544 623	
F5 - Warunki początkowe	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	
F6 - Drukowanie	835 59 476 0 0 0 0 0 285 54 114 0 711 694 0	835 59 476 0 0 0 0 0 285 54 114 0 711 694 0	835 59 476 0 0 0 0 0 285 54 114 0 711 694 0	835 59 476 0 0 0 0 0 285 54 114 0 711 694 0	835 59 476 0 0 0 0 0 285 54 114 0 711 694 0	835 59 476 0 0 0 0 0 285 54 114 0 711 694 0	835 59 476 0 0 0 0 0 285 54 114 0 711 694 0	835 59 476 0 0 0 0 0 285 54 114 0 711 694 0
Etap	17	17	19	20	21	22	23	
Stan	4	7	1	1	1	1	1	
Łącz. czasu	120	87	73	46	192	113	88	
Ilość stanowisk	6	6	6	6	6	6	6	
Nr zadania	7	15	1	3	6	8	9	

F1-ZBIORY      F2-EDYCJA      F3-OBLICZENIA      F4-SYSTEM      AKTUALNY ZBIOR DANYCH --> DATA20

Rys. 3. Obliczenia heurystyczne  
Fig. 3. Heuristic calculations.

BALANSOWANIE LINII MONTAZOWEJ									
ZBIORY		EDYCJA		OBLICZENIA		SYSTEM			
OBLICZENIA HEURYSTYCZNE									
Czasy realizacji Oper. Czas		Wspolczynniki Etap Wartość		Ograniczniki Etap Wartość		F9 - DRUKUJ WYNIKI		Aktualne rozdzielenie Oper. Czas Zak.	
1	14	1	1	1	0			1	14
2	17	2	1	2	0			2	31
3	27	3	1	3	0	F10- END		3	58
4	69	4	1	4	0			4	127
5	50	5	1	5	0			5	177
6	68	6	1	6	0	CZAS DTRZYMANIA ROZH.		6	278
7	44	7	1	7	0	0: 0:49.43		7	322
8	29	8	1	8	0			8	351
9	28	9	1	9	0			9	205
10	17	10	1	10	0	CZAS OBLICZEN		10	437
11	65	11	1	11	0	0: 0:49.81		11	416
12	51	12	1	12	0			12	488
13	79	13	1	13	0			13	567
14	3	14	1	14	0	IL.GENERACJI ROZH.OPT.		14	970
15	41	15	1	15	0	339		15	611
16	95	16	1	16	0			16	725
17	74	17	1	17	0	CALKOWITA IL.GENERACJI		17	799
18	5	18	1	18	0	345		18	616
19	56	19	1	19	0			19	896
20	59	20	1	20	0	Cyki linii		20	955
21	18	21	1	21	0	210		21	973
22	38	22	1	22	0			22	1011
23	39	23	1	23	0			23	838
24	75	24	1	24	0			24	1125
25	84	25	1	25	0			25	1179
26	55	26	1	26	0			26	1234
27	50	27	1	27	0			27	1310
28	17	28	1	28	0			28	1251
29	64	29	1	29	0			29	1374
30	49	30	1	30	0			30	1423
Regula eliminacji stanów		Aktualne heurystyki				Czas zakończenia montażu - 1423			
DOMINACJA SONDOWANIE		Wybor stanu REGULA FIFO		Wybor zadania KOLEJNA OPERACJA		Ilość stanowisk pracy - 7			
F1-ZBIORY	F2-EDYCJA	F3-OBLICZENIA	F4-SYSTEM	AKTUALNY ZBIOR DANYCH -->		DATA30			

## 6. Uwagi końcowe

Z punktu widzenia złożoności problemu balansowania linii można wyróżnić dodatkowe ograniczenia wynikające z:

- istnienia dodatkowych parametrów operacji,
- wykluczania realizacji pewnych podzbiorów operacji na jednym stanowisku pracy,
- przynależności operacji do pewnego podzbioru, zwanego enklawą,
- lokalizacji operacji,
- kosztów wykonywania operacji.

Program "BALANSOWANIE LINII MONTAŻOWEJ" rozwiązuje klasyczny problem balansowania. Wprowadzenie dodatkowych ograniczeń komplikuje procedurę generowania stanów przez konieczność uwzględniania dodatkowych warunków. W zależności od procesu technologicznego i wymagań związanych z linią program może zostać zmodyfikowany.

Program taki może być wykorzystany jako podstawowe narzędzie pracy dyspozytora, do projektowania linii montażowej. Dyspozytor może korzystać z czterech algorytmów balansowania linii: konwersacyjnego, optymalnego, przeglądowego lub heurystycznego. Każdy z nich ma inne zadanie do wykonania. Algorytm konwersacyjny pozwala na samodzielne przeprowadzenie balansowania przez dyspozytora, którego praktyka i znajomość technologii procesu ma duże znaczenie w uzyskaniu poprawnego balansu. Algorytm przeglądowy ułatwia dyspozytorowi zadanie dzięki możliwości oglądania stanów aktywnych otrzymanych po przydzieleniu proponowanej przez niego operacji. Weryfikację wyniku zapewniają algorytmy optymalny i heurystyczny, które automatycznie znajdują rozwiązanie optymalne.

Program "BALANSOWANIE LINII MONTAŻOWEJ" posiada pewne ograniczenia programowe (maksymalna liczba operacji: 30, maksymalna liczba stanów na etapie: 20) i sprzętowe, które sprawiają, że obecna wersja programu jest wersją eksperymentalną. Możliwe jest zastosowanie tego samego algorytmu dla większej liczby operacji, co wymaga pewnej modyfikacji programu.

## LITERATURA

- [1] Marecki F.: Modele matematyczne i algorytmy alokacji operacji i zasobów na linii montażowej, ZN Pol. Sl., s. Automatyka, nr 82, Gliwice 1986.
- [2] Mansoor E.M.: Assembly Line Balancing - Extension and Discussion. The Journal of Industrial Engineering, 1964, V.15, No 6.
- [3] Praca zbiorowa: Metodyka, modelowanie i optymalizacja sterowania procesami montażu na liniach z uwzględnieniem diagnostyki i kontroli międzyoperacyjnej, Raport z pracy n-b (niepublikowany), Gliwice 1986.

## БАЛАНСИРОВАНИЕ СБОРОЧНОЙ ЛИНИИ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ СБОРКИ

## Резюме

В статье представлена программа проектирования сборочной линии с последовательной структурой сборки и ограничениями на последовательность сборочных операций. Программа может быть основным орудием труда диспетчера линии. В программе применены четыре варианта алгоритма балансирования линии: диалоговый, ближайшего соседа, оптимальный и эвристический. Проблема балансирования линии состоит в определении минимального числа рабочих мест и подмножеств операций, реализуемых на этих местах.

## SERIAL ASSEMBLY LINE BALANCING

## Summary

This paper presents a program for serial assembly line balancing that could be considered as CAD-like program (Computer-Aided Design). This program can be a basic tool for the line dispatcher. Four variants of balancing line algorithm were used in the program: conversational (performed individual by dispatcher), survey, optimal and heuristic. The essence of problem of balancing line is to calculate a minimum number of work stations and qualify subsets of operations performed on these work stations.