

Waldemar GRZECHCA  
Politechnika Śląska

## ANALIZA WYDAJNOŚCI STACJI I LINII MONTAŻOWEJ

**Streszczenie.** Praca porusza problem analizy wyniku balansu linii montażowej. W literaturze można znaleźć kilka miar opisujących jakość uzyskiwanych rezultatów. Należą do nich: wydajność linii, czas linii oraz współczynnik gładkości linii. Wszystkie jednak dotyczą oceny balansu całej linii i niestety, nie pozwalają na szczegółową analizę poszczególnych stacji montażowych. Autor wprowadza zatem kolejny współczynnik wydajności dotyczący pojedynczych stacji i umożliwiający dokonanie oceny balansu linii na poziomie kolejnych stanowisk.

## ANALYSIS OF STATION AND ASSEMBLY LINE EFFICIENCY

**Summary.** The paper considers the analysis of final result of assembly line balancing problem. Some measures are described in the literature: line efficiency, time of the line and smoothness index. All of them show the quality of whole line balance and they don't allow to analyze only the station balance. Author introduces the next measure: station efficiency index which allows to observe the station balance and helps to improve the balance of the whole assembly process.

### 1. Opis problemu balansowania linii montażowej

Balansowanie linii montażowej składa się ze skończonego zbioru elementów roboczych oraz zadań, przy czym każde z nich posiada czas operacji oraz ustalone relacje kolejnościowe, które precyzują dopuszczalne uporządkowanie zadań. Jednym z problemów, nieodłącznym w organizowaniu produkcji masowej, jest, jak pogrupować zadania do wykonania na stacji roboczej, tak żeby osiągnąć pożądaną poziom wydajności. Balansowanie linii jest próbą ulokowania równej ilości pracy do każdej stacji roboczej na linii. Podstawą problemu balansowania linii jest przyporządkowanie zbioru zadań do uporządkowanego zbioru stacji roboczych, tak żeby relacje kolejnościowe były spełnione i wskaźniki wydajności były zoptymalizowane.

Podczas projektowania linii balansującej następujące ograniczenia muszą być narzucone na grupowanie elementów roboczych:

- relacja kolejnościowa,
- liczba elementów roboczych nie może być większa niż liczba stacji roboczych. Ponadto minimalna liczba stacji roboczych jest jeden,

- czas cyklu (wielkość czasu dostępnego na każdej stacji lub czas pomiędzy kolejnymi zestawami schodzącymi z linii) jest większy lub równy maksymalnemu czasowi stacji [1].

Korzystając z prac [1,2], problem BLM sformułujemy w następujący sposób: zadanie polega na pogrupowaniu operacji montażowych w dopuszczalne podzbiory, które tworzą stanowiska pracy na linii montażowej. Przyjmuje się, że dany jest zbiór operacji z relacjami (ograniczeniami) kolejnościowymi oraz dane są czasy wykonywania operacji.

Wyróżnia się dwa warianty BLM:

- dla zadanego cyklu należy wyznaczyć minimalną liczbę podzbiorów operacji, które tworzą stanowiska pracy,
- dla zadanej liczby stanowisk pracy należy wyznaczyć minimalny cykl.

W celu uzyskania wyniku finalnego balansu linii montażowej wykorzystuje się do obliczeń zarówno metody dokładne, dające optymalne rozwiązanie, jak i metody przybliżone, których wynikiem jest rozwiązanie dopuszczalne. W dalszej części pracy skupiono się na metodach heurystycznych ze względu na szybkie uzyskiwanie wyniku końcowego, co w praktycznych zastosowaniach ma ogromne znaczenie, a istniejące oceny jakościowe pozwalają eliminować rozwiązania dalekie od oczekiwanych zarządzających produkcją.

## 2. Wybrane heurystyki

Algorytmy heurystyczne cechuje duża różnorodność. Ogólnie można je podzielić na algorytmy: szeregowania oraz przydziału. Do pierwszej grupy należą algorytmy, które pozwalają wyznaczyć bezpośrednio dopuszczalną sekwencję wykonywania operacji. Sekwencję tę wyznacza się na podstawie heurystycznych reguł. Do drugiej grupy należą algorytmy, które pozwalają wyznaczyć bezpośrednio dopuszczalne podzbiory operacji na stanowiskach pracy. Podzbiory te wyznacza się na podstawie reguł heurystycznych. Algorytmy szeregowania zaleca się, gdy cykl jest krótki względem czasów operacji, tzn. liczba operacji na stanowiskach pracy nie jest duża. W przeciwnym przypadku lepsze rezultaty dają algorytmy przydziału, ponieważ kolejność operacji niezależnych może być dowolna. Do najczęściej stosowanych metod heurystycznych należą: metoda RPW (*Ranked Positional Weight*) oraz grupa metod IUFF (*Immediate Update First Fit*). We wszystkich tych metodach ustala się listę rankingową zadań do przydziału do stanowisk roboczych na linii montażowej, a następnie, po uwzględnieniu ograniczeń kolejnościowych i wartości cyklu produkcyjnego, następuje przydział do tworzonych stacji. Analizując rozwiązania heurystyczne, możemy z jednej strony być pewni, iż uzyskany wynik jest dla rozpatrywanego problemu wynikiem dopuszczalnym, z drugiej strony, potrzebujemy dodatkowych miar otrzymanych rezultatów, aby poddać ocenie jakościowej końcowe rozwiązanie.

W przeciwieństwie do metod dokładnych, gdzie mamy pewność rozwiązania optymalnego, w przypadku metod przybliżonych mamy stosunkowo krótki czas uzyskania końcowego balansu linii montażowej, a opisane w kolejnym punkcie miary pozwalają na praktyczną ocenę tego balansu. Doświadczenie pokazuje dużą

skuteczność stosowanych heurystyk, co pozwala na stosowanie ich w praktycznych obliczeniach [3][4].

### 3. Miary jakości rozwiązań problemu BLM

Balansowanie linii montażowej jest najlepsze, gdy dla każdej stacji roboczej suma czasów operacji elementarnych jest równa czasowi cyklu. Niestety, nie zawsze jest to możliwe. Stworzone zostały zatem miary, które pozwalają na porównywanie metod używanych do rozwiązywania tego typu zadań [1][5][6].

Stosowane miary to:

- efektywność linii - *Line Efficiency* (LE),
- współczynnik gładkości - *Smoothness Index* (SI),
- czas linii - *Time* (T).

**Efektywność linii (LE)** – jest to stosunek całkowitego czasu cyklu mnożony przez numer stacji. Pokazuje procentowo wykorzystanie linii. Można to wyrazić następującym wzorem:

$$LE = \frac{\sum_{i=1}^K ST_i}{c \cdot K} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie: K – liczba stacji roboczych, c – czas cyklu, ST – czas wykorzystania stacji.

**Współczynnik gładkości (SI)** – jest to wskaźnik pokazujący względną gładkość danej zbalansowanej linii montażowej. Współczynnik gładkości równy zero wskazuje na najlepiej zbalansowaną linię. Im wartość SI jest mniejsza, tym bardziej linia jest zbalansowana.

$$SI = \sqrt{\sum_{i=1}^K (ST_{\max} - ST_i)^2} \quad (2)$$

gdzie:  $ST_{\max}$  – maksymalny czas stacji roboczej,  $ST_i$  – czas stacji  $i$ .

**Czas linii (T)** – jest współczynnikiem zależnym od liczby stacji. Im ten czas będzie mniejszy, tym lepsze zbalansowanie linii.

$$T = (K - 1) \cdot c + ST_K \quad (3)$$

gdzie: K – ilość stacji roboczych, c – czas cyklu,  $ST_K$  – czas ostatniej stacji.

Omawiając przedstawione miary, należy zwrócić uwagę na ogromną ich przydatność w ocenie rozwiązań dopuszczalnych dla problemu balansowania linii montażowej. Czas linii wprost informuje nas o opuszczeniu przez produkt finalny linii fabrycznej. Oczywiście jest, iż rozwiązanie o mniejszym czasie linii jest rozwiązaniem lepszym. Na potrzeby omawianego problemu utworzono wskaźnik gładkości, który informuje nas o istnieniu czasu przestoju na linii. Wartość większa od zera oznacza powstanie takiego czasu. Ze względu na uzależnienie tego wskaźnika od czasów

wykonania operacji możemy tym wskaźnikiem porównywać rozwiązania dotyczące tego samego zadania dla różnych metod i wartości cyklu. Efektywność linii ma sens dla rozwiązań o różnej liczbie stanowisk montażowych.

#### 4. Efektywność stacji montażowej

Efektywność linii montażowej, znana również jako wydajność linii, informuje wprost o wykorzystaniu całej struktury. Dla wielu rozwiązań o takiej samej liczbie stacji, ale innym przydziale kolejnościowym operacji, współczynnik ma taką samą wartość. Dlatego też autor pracy proponuje bardziej szczegółową miarę – mianowicie współczynnik efektywności stacji montażowej.

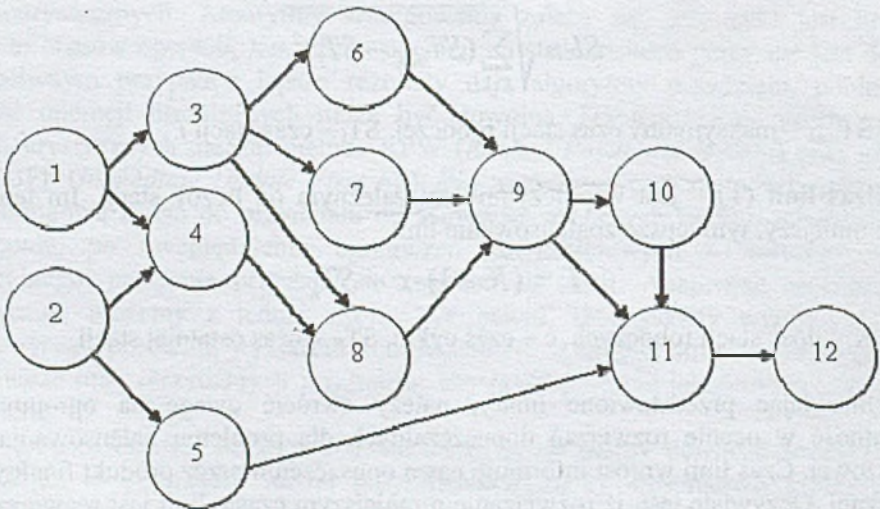
$$LE_{STi} = \frac{ST_i}{c} \cdot 100\% \quad (4)$$

gdzie:  $LE_{STi}$  - współczynnik efektywności i-tej stacji.

Stosując w praktyce zaprezentowany współczynnik efektywności stacji, możemy przeprowadzić szczegółową analizę linii i w łatwy sposób znaleźć najgorzej wykorzystaną stację montażową i podjąć próbę likwidacji wąskiego gardła linii.

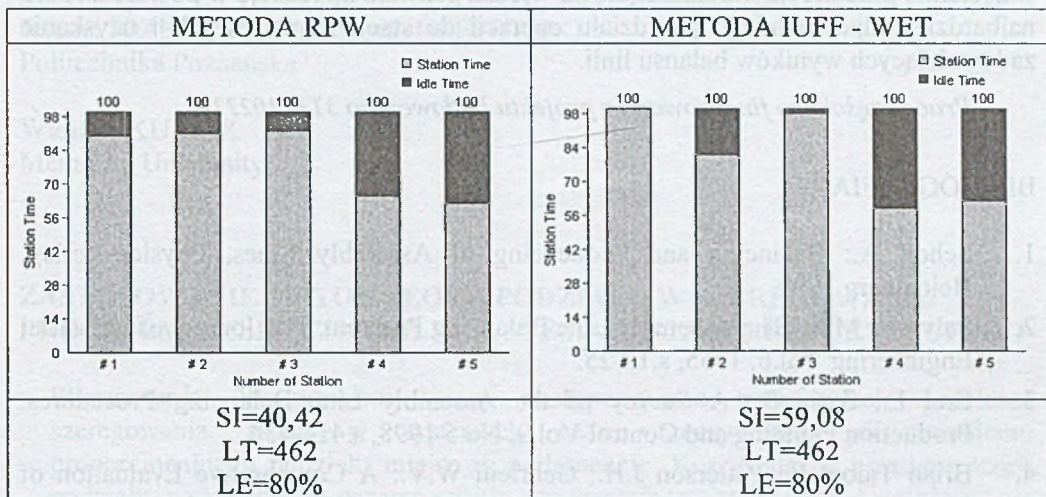
#### 5. Przykład obliczeniowy

Aby przybliżyć problem oceny końcowego rozwiązania balansu linii, przedstawiono przykład numeryczny. Ograniczenia technologiczne opisuje graf relacji kolejnościowej (rys.1), którego liczba węzłów odpowiada liczbie operacji. Dla uzyskania rozwiązania końcowego wykorzystano metody RPW oraz IUFF, a wyniki zobrazowano na rysunkach 2 i 3.

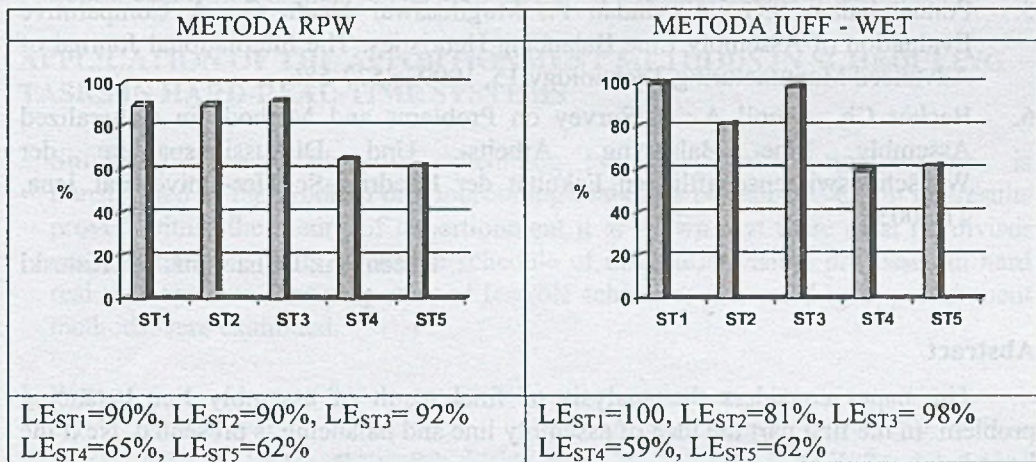


Rys. 1. Graf relacji kolejnościowej dla przykładu numerycznego

Czasy wykonywania operacji są następujące:  $t_1=20$ ,  $t_2=40$ ,  $t_3=70$ ,  $t_4=10$ ,  $t_5=30$ ,  $t_6=11$ ,  $t_7=32$ ,  $t_8=60$ ,  $t_9=27$ ,  $t_{10}=38$ ,  $t_{11}=50$  oraz  $t_{12}=12$ . Cykl produkcyjny  $c$  wynosi 100 jednostek czasowych.



Rys. 2. Graficzna prezentacja balansu linii dla metod RPW i IUUFF - WET



Rys. 3. Wydajność poszczególnych stacji dla metody RPW i IUUFF-WET

## 6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono problem oceny rozwiązania dopuszczalnego w zagadnieniu balansowania linii montażowej. Szczególną uwagę poświęcono wydajności linii i stacji montażowej. Analizując przedstawione rozwiązanie, można zauważyć, iż współczynnik efektywności linii montażowej w wielu przypadkach nie jest wystarczający, aby rozstrzygnąć, który z otrzymanych rezultatów przedstawia lepiej zbalansowaną linię produkcyjną. Aby uzyskać bardziej szczegółową informację, wprowadzono współczynnik efektywności stacji montażowej. Rozpatrując przykład

numeryczny w wyniku zastosowania metody heurystycznej RPW i UIFF – WET, uzyskano efektywność linii identyczną dla obu metod (LE=80%). Dopiero wydajność poszczególnych stacji obrazuje nam zjawisko wąskich gardeł pojawiających się w systemie produkcyjnym. Szczegółowa wiedza pozwala na reakcję w postaci wyboru najbardziej odpowiedniego przydziału operacji do stacji montażowych i uzyskanie zadowolających wyników balansu linii.

*Praca częściowo finansowana z projektu badawczego 3T11A02229.*

## BIBLIOGRAFIA

1. Scholl A.: *Balancing and Sequencing of Assembly Lines*, Physica-Verlag, Heidelberg 1999.
2. Salveson M.E.: *The Assembly Line Balancing Problem*, *The Journal of Industrial Engineering* Vol.6, 1955, s.18-25.
3. Erel E., Sarin S.: *A Survey of the Assembly Line Balancing Procedures*. *Production Planning and Control* Vol.9, No.5 1998, s.414-434.
4. Brian Talbot F., Patterson J.H., Gehrlein W.V.: *A Comparative Evaluation of Heuristic Line Balancing Techniques*. *Management Science* Vol.32 No.4, 1986, s.431-453.
5. Ponnambalam S.G., Aravindan P., Mogileeswar Naidu G.: *A Comparative Evaluation of Assembly Line Balancing Heuristics*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 15, 1999, s.577-586.
6. Becker Ch., Scholl A.: *A Survey on Problems and Methods in Generalized Assembly Line Balancing*. *Arbeits- Und Diskussionspapiere der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität Jena*, 21/2003

Recenzent: Dr hab. inż. Jan Kałuski

## Abstract

The paper considers the analysis of final result of assembly line balancing problem. In the first part the idea of assembly line and balancing is presented. Next the knowledge of exact and heuristic methods is shown. Benefits of using heuristic methods are discussed. Some measures are described: line efficiency, time of the line and smoothness index. All of them show the quality of whole line balance and they don't allow to analyze only the station balance. Author introduces the next measure: station efficiency index which allows to observe the station balance and helps to improve the balance of the whole assembly process. A numerical example of 12 tasks is given. The results shows the necessity of introduction of additionally index. The detailed information allows to choose the better final results of assembly line balancing and it allows to avoid bottlenecks in whole production system.