

DUALNOŚĆ PROBLEMU BALANSOWANIA LINII MONTAŻOWEJ

Waldemar GRZECHCA

Streszczenie: Praca dotyczy problemu balansowania linii montażowej, który znany jest od ponad 50 lat w literaturze. Większość powstałych opracowań rozważa przypadek projektowania linii dla stałej wartości cyklu produkcyjnego (problem TYP 1). W praktyce jednak w czasach coraz to krótszych cykli życia produktów znaczenie ma przypadek stałej liczby stacji montażowych (problem TYP 2). Artykuł zajmuje się problemem dualności podczas projektowania linii montażowej prezentując zastosowania metod heurystycznych znanych z problemu TYP 1 w przypadku problemu TYP 2.

Słowa kluczowe: linia montażowa, cykl produkcyjny linii, balansowanie linii montażowej.

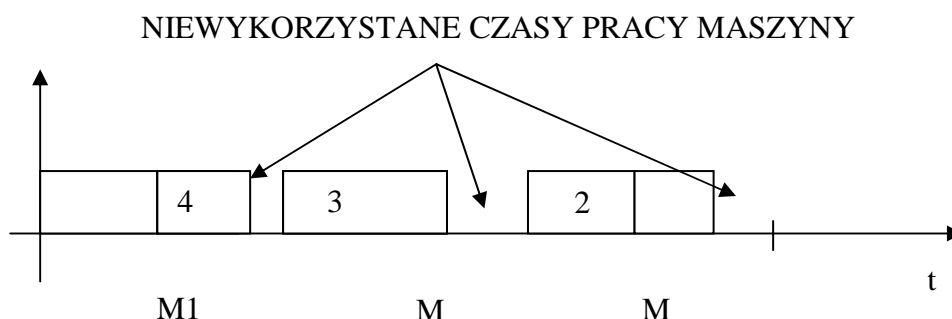
1. Wprowadzenie

Problem balansowania linii montażowej istnieje już prawie 100 lat. To wtedy po raz pierwszy stworzono linię montażową z cyklem produkcyjnym w zakładach produkcyjnych Forda. W roku 1955 został sformułowany matematyczny opis tego typu linii i od tego czasu problem przydziału zadań do stanowisk montażowych jest badany przez wielu naukowców oraz praktyków na całym świecie [1]. Pierwsza opisana linia była linią szeregową i w stosunku do dzisiejszych systemów produkcyjnych była linią bez jakichkolwiek ograniczeń. Z czasem okazało się, sformułowany problem wymaga dodatkowo wielu ograniczeń a struktura linii szeregowej wzbogaciła się o stanowiska równoległe, możliwość prowadzenia montażu z określonych pozycji (strona prawa, strona lewa, dół, góra), ograniczenia powierzchni stacji, itd. Od kilku lat dochodzą jeszcze kolejne zagadnienia: demontażu (recyclingu) oraz rebalansu istniejących już linii produkcyjnych. Pierwsze zagadnienie to demontaż zużytych produktów, w którym pojawiają się części do ponownego wykorzystania, ale także elementy zawierające groźne dla zdrowia substancje. Drugie zagadnienie jest zagadnieniem znanym już od ponad pół wieku jako problem balansowania linii montażowej TYPU 2 (stała liczba stanowisk montażowych, szukana minimalna wartość cyklu linii). Jednak analizując setki artykułów poświęconych temu tematowi można stwierdzić, iż ponad 90 % zajmuje się liniami tworzonymi od podstaw dla montażu nowego produktu finalnego. Dziś jednak produkcja masowa jednego wariantu produktu to przeszłość. Cykl życia produktu staje się coraz krótszy a zakłady produkcyjne, aby przetrwać zmieniają asortyment wytwarzanych wyrobów bardzo często. Linie produkcyjne są projektowane jako wielowersyjne oraz przygotowane do montażu już nie tylko różnych wersji tego samego wyrobu, ale wręcz do wytwarzania różnych wyrobów. Pociąga to za sobą konieczność szybkiego projektowania oraz tworzenia nowych balansów linii montażowych. Problem balansowania linii montażowej TYPU 1 (stały cykl, poszukiwana minimalna liczba stanowisk montażowych) oraz TYPU 2 jest problemem dualnym, tzn. znając rozwiązanie jednego można wyznaczyć rozwiązanie dla drugiego zagadnienia. W dalszej części artykułu zostanie przedstawiony sposób postępowania w przypadku znajomości algorytmów heurystycznych dla problemu TYPU 1 i poszukiwaniu balansu linii dla problemu TYPU 2.

2. Algorytmy heurystyczne dla problemu balansowania linii montażowej (BLM)

2.1 Sformułowanie problemu BLM

Balansowanie linii montażowej [1, 2] polega na równomiernym rozłożeniu operacji pomiędzy stacje robocze linii tak, aby czas przestoju poszczególnych maszyn był minimalny. Zakłada się przy tym, iż znane są czasy wykonywania operacji na maszynach, relacje kolejnościowe istniejące pomiędzy operacjami wynikające z technologii wytwarzania produktu finalnego oraz wielkość cyklu produkcyjnego lub liczba maszyn. Aby proces balansowania był zakończony należy przydzielić każdą operację raz i tylko do jednej stacji roboczej (rys. 1).



Rys. 1. Problem balansowania linii montażowej

2.2 Wybrane heurystyczne metody dla problemu BLM TYP 1

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. Jedną z opisanych w literaturze heurystyk jest heurystyka IUFF.

Heurystyka Immediate Update First-Fit zaproponowana została przez Hackman'a w 1989 roku. Realizacja jej zależy od numerycznej wartości funkcji, które zostały przedstawione w tabeli 1. Kroki tej heurystyki są następujące:

- określ numeryczny wynik dla każdej operacji,
- uaktualnij zbiór dostępnych operacji (operacje dla których operacje poprzedzające zostały przydzielone),
- spośród operacji, przydziel tą z najwyższą wartością wyniku numerycznego do pierwszej dostępnej stacji roboczej, w której pojemność oraz relacje kolejnościowe nie zostaną naruszone. Wróć do punktu 2 [2].

Tab. 1. Funkcje numeryczne używane w metodzie UIFF

Nazwa	Opis
Positional Weight – PW	Suma czasu zadania x i wszystkich zadań, które po nim następują
Number of Followers – NOF	Liczba zadań następujących po zadaniu x
Number of Immediate Followers - NOIF	Liczba zadań następujących bezpośrednio po zadaniu x
Number of Predecessors – NOP	Liczba zadań poprzedzających zadanie x
Work Element Time – WET	Czas zadania x
Backward Recursive Positional Weight – BRPW	Suma czasu zadania x i wszystkich zadań w ścieżce, gdzie x jest zadaniem głównym

3. Problem BLM TYP 2

Jak już wspomniano problem BLM jest problemem dualnym. Poniżej zostanie omówiony sposób rebalansu linii przy znajomości jedynie algorytmów dedykowanych dla problemu BLM TYP 1. W wyniku tych algorytmów otrzymujemy dopuszczalne rozwiązanie z najmniejszą liczbą stanowisk roboczych jaka jest możliwa do wyznaczenia danym algorytmem przy zadanym cyklu produkcyjnym. Jednym ze sposobów wykorzystania tego typu algorytmów jest zwiększanie cyklu od minimalnej wartości ($c_{\min} = t_{\max}$, gdzie t_{\max} maksymalny czas wykonania najdłuższego ze wszystkich zadań) do wartości w której otrzymamy znaną liczbę stanowisk montażowych z których zbudowana jest linia przeznaczona do rebalansu. Sposób ten na pewno jest poprawny ale nie jedyny. Drugą metodą jest oszacowanie cyklu dla danej liczby stacji co zapewni znalezienie rebalansu w mniejszej liczbie kroków. Znając liczbę stanowisk montażowych K oraz sumę wszystkich czasów wszystkich zadań składających się na montaż produktu finalnego możemy oszacować wartość cyklu produkcyjnego [3], [4]:

$$c_s = \left\lceil \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{K} \right\rceil \quad (1)$$

gdzie: c_s – szacowana wartość cyklu,
 t_i – czas realizacji zadania i ,
 N – liczba zadań,
 K – liczba stanowisk montażowych.

4. Ocena rozwiązania balansu linii montażowej

Do oceny [2] otrzymanych rozwiązań wyznaczono współczynnik gładkości linii, efektywność linii oraz czas linii (czas po którym finalny wyrób opuści linię produkcyjną).

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 wykorzystania stacji i .

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

$$LE = \frac{\sum_{i=1}^K ST_i}{c \cdot K} \cdot 100\% \quad (3)$$

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

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

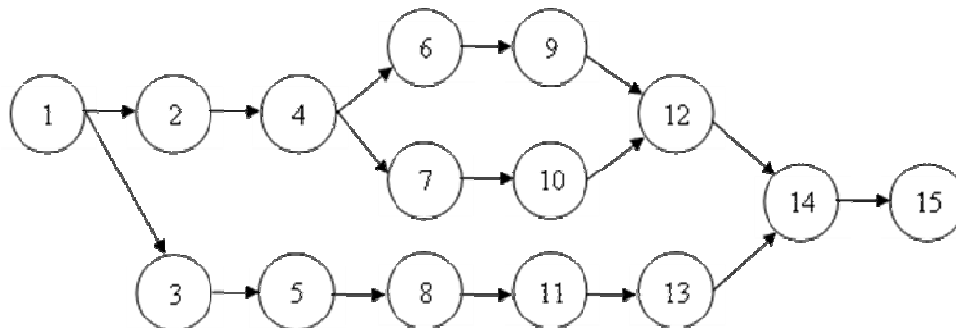
$$T = (K - 1) \cdot c + ST_K \quad (4)$$

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

Powyższe wskaźniki pozwalają ocenić wyniki dopuszczalne problemu BLM i wybrać najlepszy z nich.

5. Przykład numeryczny

Dla analizy problemu przeprowadzono obliczenia dla przykładu 15 operacji (rys. 2). Czasy operacji umieszczono w tabeli 2. W pierwszym etapie przyjęto znajomość cyklu produkcyjnego $c = 14$ i wyznaczono liczbę stacji roboczych K wykorzystując metodę heurystyczną IUUF – RPW. W drugim etapie założono znajomość liczby stacji $K = 5$ i przeprowadzono symulację począwszy od najmniejszej możliwej wartości cyklu równej maksymalnemu czasowi operacji. Rys. 3 obrazuje obciążenie stacji dla $c = 14$ dla balansu linii $S1 - \{1, 3, 2\}$, $S2 - \{5, 8, 4, 7\}$, $S3 - \{11, 6, 9\}$, $S4 - \{10, 13\}$, $S5 - \{12, 14, 15\}$. Tabela 3 zawiera w formie graficznej obciążenia stacji roboczych dla różnych cykli produkcyjnych. Rys. 4 prezentuje przypadek gdy dla cyklu równego 16 jednostek czasowych otrzymano linię złożoną z 4 stacji montażowych, a więc mniejszą niż zakładano.

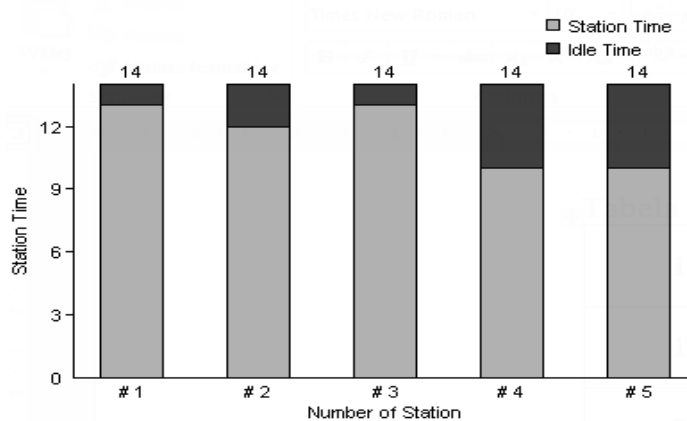


Rys. 2. Graf relacji kolejnościowych dla przykładu numerycznego

Tab. 2. Czasy t_i wykonania i – tych operacji

i	t_i	i	t_i	i	t_i	i	t_i
1	5	5	7	9	1	13	6
2	2	6	4	10	4	14	2
3	6	7	1	11	8	15	3
4	2	8	2	12	5		

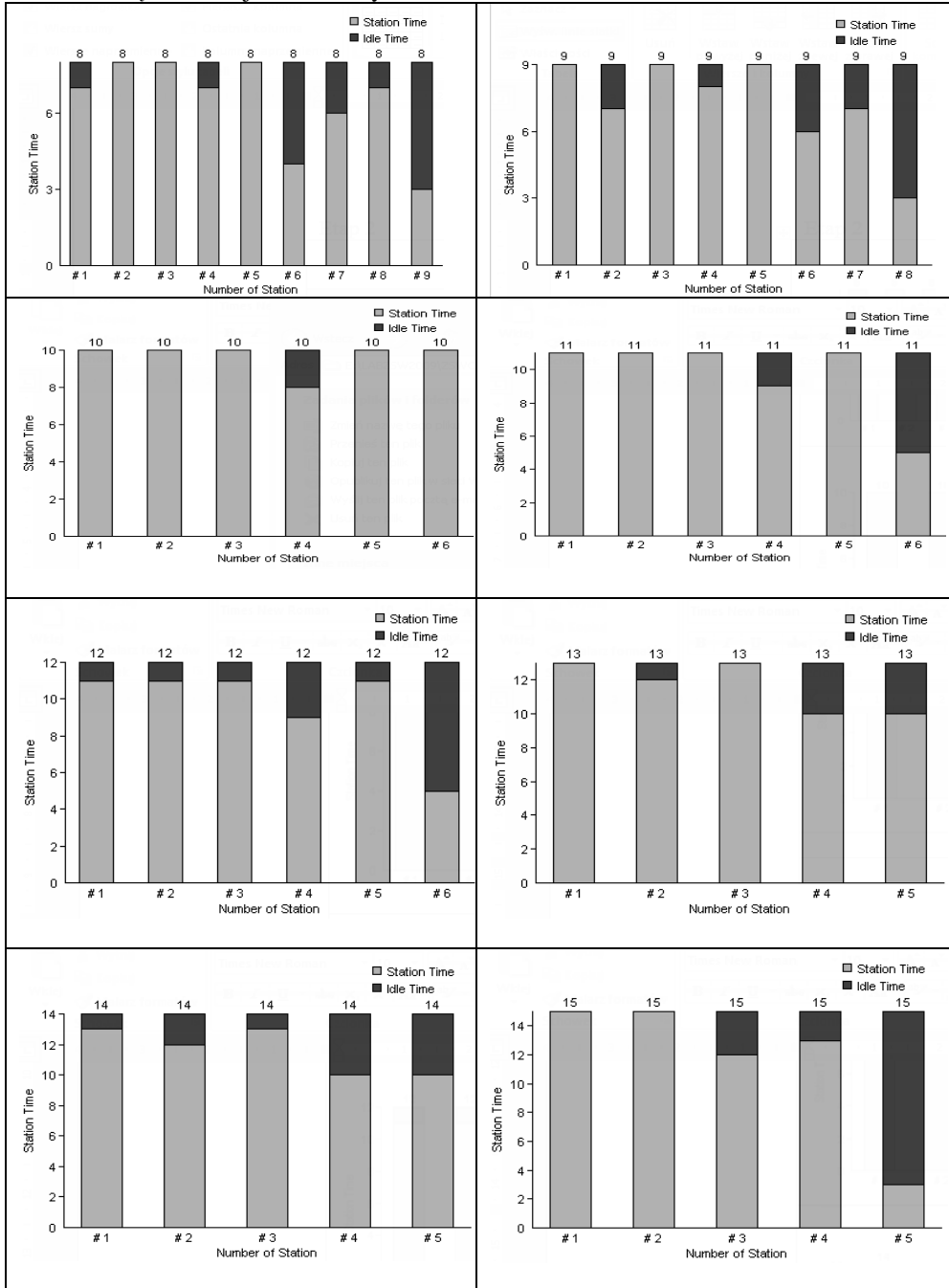
Etap 1

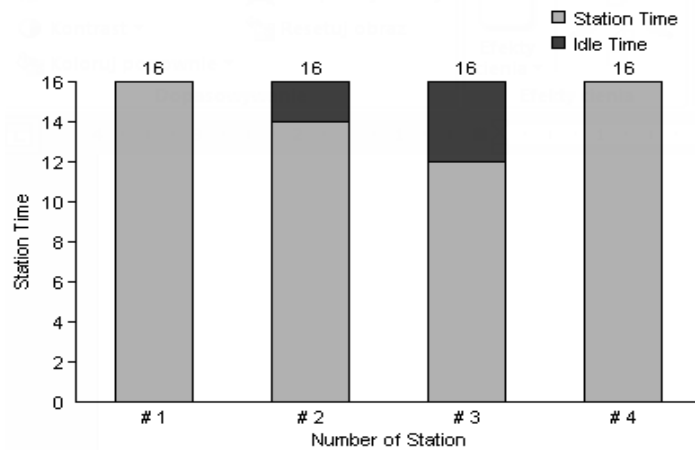


Rys. 3. Obciążenie stacji roboczych dla $c=14$

Etap 2

Tab. 3. Obciążenie stacji montażowych dla $c = 8 \div 15$

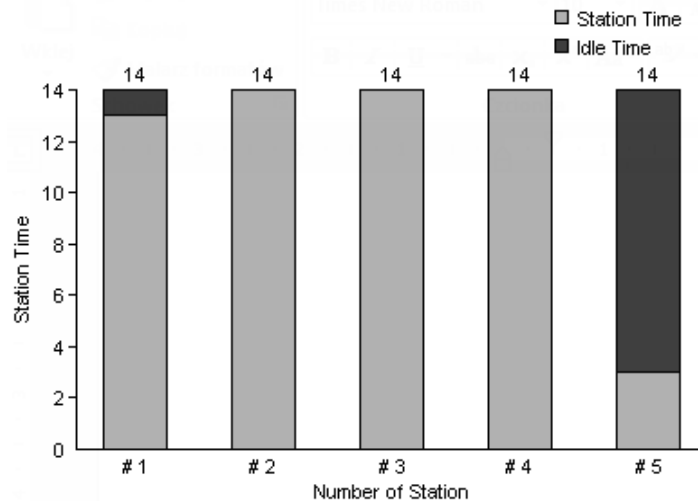




Rys. 4. Obciążenie stacji roboczych dla c = 16

Tab. 4. Wskaźniki jakości rozwiązania problemu balansu dla K = 5 i różnych c

	LE	SI	T
c = 13, K = 5	89,23%	4,36	62
c = 14, K = 5	82,86%	4,36	66
c = 15, K = 5	77,33%	12,53	63



Rys. 5. Obciążenie stacji roboczych dla c = 14 uzyskane metodą IUFF - WET

Rys. 5 przedstawia rozwiązanie otrzymane metodą IUFF – WET. Dla tego rozwiązania oceny jakościowe są następujące: LE = 82,86%, SI = 11,05 oraz T = 59. Porównując ten wynik z wynikami w tabeli 4 można stwierdzić, że stosowanie różnych metod heurystycznych pozwala na wybór najlepszego dopuszczalnego rozwiązania pod względem wybranego wskaźnika jakości.

6. Wnioski

Problem balansowania absorbuje naukowców i praktyków od wielu lat. W artykule przypomniano o dualności problemu co może tłumaczyć fakt, iż zdecydowana większość prac, które powstały dotychczas opisują metody i rozwiązania w oparciu o problem BLM TYP 1. Jednak w dzisiejszych czasach często mamy przed sobą problem wykorzystania istniejącej linii montażowej a zatem problem BLM TYP 2. Aby nie mnożyć kolejnych heurystyk z powodzeniem można wykorzystać wiedzę istniejącą i stosowaną dla projektowania nowych linii. Może wydawać się żmudne symulowanie wyników zwiększając kolejno wartość cyklu produkcyjnego ale pozytywnym efektem takiego podejścia jest analiza wielu rozwiązań otrzymywanych dla tej samej liczby stacji roboczych. Formuła (1) pomaga wyznaczyć balans dla przypadku gdy liczba stacji zależy od sumy czasów wszystkich operacji, należy jednak pamiętać, że projektant może się spotkać w rzeczywistości z zupełnie inną liczbą stacji istniejącej stacji linii montażowej. Można spotkać w literaturze metody dedykowane dla problemu BLM TYP 2 [5], [6] ale wykorzystują one zawsze 2 etapy w którym pierwszy polega na wstępnym wykorzystaniu przydziału zadań do linii korzystając z metod dla problemu BLM TYP 1.

Praca powstała przy wsparciu środków statutowych Instytutu Automatyki BK209/ Raul/ 2009/t.5.

Literatura

1. Salveson M.E.: The Assembly Line Balancing Problem, The Journal of Industrial Engineering Vol.6, 1955, pp. 18-25.
2. Scholl A.: Balancing and Sequencing of Assembly Lines, Physica-Verlag, Heidelberg, 1999.
3. Gu L., Hennequin S., Sava A., Xie X.: Assembly Line Balancing Problems Solved by Estimation of Distribution, Proceedings of the 3rd Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering, 2007, pp. 123-128.
4. Grzechca W.: Rebalans linii montażowej, Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej Numer specjalny Vol. LVI, XI Szkoła komputerowego wspomaganie projektowania, wytwarzania i eksploatacji, Jurata 2007, str. 305-316.
5. Liu S.B., Ong H.L., Huang H.C.: A bidirectional heuristic for stochastic assembly line balancing Type II problem, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 25, 2005, pp. 71-75.
6. Rubinovitz J, Levitin G.: Genetic algorithm for assembly line balancing. International Journal of Production Economic 41(1-3), 1995, pp. 343-354.

Dr inż. Waldemar GRZECHCA
Zakład Inżynierii Systemów
Instytut Automatyki
Politechnika Śląska
44-100 Gliwice, ul Akademicka 16
tel. : 0(prefix)32 237 21 98
e-mail: waldemar.grzechca@polsl.pl