

DWUKIERUNKOWA HEURYSTYKA BALANSOWANIA LINII MONTAŻOWEJ

Waldemar GRZECHCA

Streszczenie: Problem balansowania linii montażowej należy do problemów o złożoności obliczeniowej klasy NP – trudne. Dlatego też od kilkudziesięciu lat wykorzystuje się w znalezieniu rozwiązania metody dokładne i metody heurystyczne. Mimo, że te ostatnie dają jedynie rozwiązanie dopuszczalne, są one jedynymi, które pozwalają na uzyskanie jakiegokolwiek końcowego uszeregowania zadań na stacjach montażowych linii produkcyjnej. Znane z literatury wskaźniki jakości (efektywność linii, czas linii, współczynniki gładkości) pozwalają na ocenę i akceptację otrzymanego rozwiązania. W artykule rozważono dwukierunkową heurystykę podając kolejne kroki postępowania i porównując rezultaty końcowe z wynikami uzyskiwanymi znanymi do tej pory heurystykami.

Słowa kluczowe: problem balansowania linii montażowej, metody heurystyczne, współczynniki jakości.

1. Wprowadzenie

Problem BLM (balansowania linii montażowej) był powszechnie studiowany od czasu pionierskich prac Brytona w roku 1954 [1], Salvesona w roku 1955 [2] oraz Jacksona w roku 1956 [3]. Potwierdzono użyteczność wielu podejść opracowanych do rozwiązywania problemu BLM w niezliczonych gałęziach przemysłu montażowego, takich jak: przemysł samochodowy, wytwórstwo, RTV, AGD itd. W tradycyjnym problemie BLM zbiór operacji jest dany razem z czasami wykonywania oraz ograniczeniami kolejnościowymi definiującymi dozwolone uszeregowanie operacji. Celem rozwiązywania problemu BLM jest przydzielenie zbioru operacji do kolejnych stacji roboczych w taki sposób, aby zminimalizować ilość potrzebnych stacji oraz spełnić wymagania produkcyjne (np. pożądaną przepustowość linii). W ciągu ostatnich dekad badacze opracowali wiele metod do poszukiwania rozwiązania optymalnego, takich jak: model programowania całkowitoliczbowego 0-1 [4], metoda podziału i oszacowań oraz model programowania dynamicznego [5 - 9]. Jednakże wszystkie podejścia poszukiwania rozwiązania optymalnego są obliczeniowo nieefektywne przy rozwiązywaniu problemów BLM z dużą liczbą operacji. Jest to spowodowane tym, że problemy BLM są problemami NP-trudnymi. Stąd też ważne jest stworzenie efektywnych podejść heurystycznych do poszukiwania jak najlepszych przybliżonych rozwiązań problemu BLM. Wśród wszystkich podejść heurystycznych operacje są przydzielane w kierunku od pierwszej do ostatniej stacji (tj. jednokierunkowo). Jednak Scholl i Voß [10] oraz Scholl i Klein [11], zaproponowali dwukierunkowe podejście, w którym operacje mogły być zarówno przydzielane od pierwszej do ostatniej stacji jak i od ostatniej do pierwszej, czyli rozpoczynając od pierwszej stacji i ostatniej równocześnie. W podejściu dwukierunkowym metoda podziału i oszacowań była wykorzystywana do znajdowania rozwiązań optymalnych. Jednakże z powodu zawłości obliczeniowej algorytmu podziału i oszacowań w problemach z dużą

liczbą operacji jedynie rozwiązania przybliżone były znajduwane. Później Kao i Yeh [12], stworzyli nowe efektywne podejście, w którym zastosowali szeroko znaną metodę ścieżki krytycznej (CPM), do rozwiązywania problemu przyporządkowania operacji dla problemu BLM. Wykazali oni, że podejście oparte na metodzie ścieżki krytycznej zabrało jedynie $0(mn^2)$ czasu obliczeniowego, do uzyskania rozwiązania problemu BLM. W heurystyce omawianej w niniejszym artykule, a zaproponowanej przez Kao i Yeha w 2009 roku [13], połączone są dwa podejścia: dwukierunkowe zaproponowane przez Scholla i Kleina w 1997 roku [11], oraz podejście oparte na metodzie ścieżki krytycznej zaproponowane przez Kao i Yeha w 2006 roku [12]. Połączenie to miało na celu stworzenie efektywnej i wydajnej heurystyki do rozwiązywania problemu BLM.

2. Matematyczny opis problemu BLM

Klasyczny problem balansowania linii montażowej sformułowano w następującej postaci:

Dany jest zbiór operacji montażowych:

$$S = \{x_i\}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

gdzie x_i jest i -tą operacją, natomiast n jest liczbą operacji. Ważne jest także, aby żadna operacja nie należała do dwóch różnych podzbiorów, gdyż nie można wykonywać tej samej operacji na dwóch stanowiskach tzn.:

$$S_\mu \cap S_m = \emptyset, \quad \mu \neq m \quad (2)$$

Operacje te mogą być wykonywane przez monterów lub roboty przemysłowe. Istotą tego problemu jest minimalizacja liczby stanowisk na linii montażowej, przy czym zagwarantować należy także kompletność wykonywania montażu. Poniższa zależność ukazuje warunek kompletności montażu:

$$\bigcup_{m=1}^{m=M} S_m = S, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

W tym celu wszystkie operacje należy pogrupować w takie M podzbiorów, aby tworzyły one stanowiska pracy na linii montażowej.

Problem BLM uwzględniać powinien ograniczenia kolejnościowe i pozycyjne. Wszystkie operacje na linii montażowej wykonywane są według kolejności opartej o macierz relacji kolejności wykonywania operacji Γ :

$$\Gamma = [\gamma_{v,i}], \quad v, i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

gdzie $\gamma_{v,i}$ są elementami tej macierzy, które należą do zbioru liczb binarnych:

$$\gamma_{v,i} = \begin{cases} 1 & \text{operacja } x_v \text{ jest bezpośrednim} \\ & \text{poprzednikiem operacji } x_i \\ 0 & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (5)$$

Ograniczenie kolejnościowe opisane jest w następujący sposób:

$$\forall v \forall i \exists \mu \leq m [(\gamma_{v,i} = 1) \cap (x_v \in S_\mu)] \Rightarrow (x_i \in S_m). \quad (6)$$

Ważną daną wejściową modelu balansowania linii montażowej, wynikającą z technologii montażu, są czasy wykonywania operacji. Każda operacja jest przez nie charakteryzowana, a podane są one za pomocą wektora:

$$T = [t_i] \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

gdzie t_i jest czasem wykonywania operacji x_i .

Dany jest także cykl linii montażowej, który spełnia warunek:

$$\max_{1 \leq i \leq n} t_i \leq C < \sum_{i=1}^n t_i, \quad (8)$$

oraz ograniczenie czasowe

$$\forall_{1 \leq m \leq M} \sum_{x_i \in S_m} t_i \leq C \quad (9)$$

W przypadkach tych można określić najkrótszy i najdłuższy czas pomiędzy rozpoczęciem pewnej operacji, a zakończeniem innej.

Problem BLM w takim modelu polega na wyznaczeniu stacji dla wykonywania danego podzbioru operacji, tak aby optymalny balans linii montażowej spełniał kryterium minimalizacji nie wykorzystanego czasu pracy:

$$Q = \sum_{m=1}^{m=M} \left(C - \sum_{\omega_i \in S_m} t_i \right) \rightarrow \min, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (10)$$

lub

$$Q = MC - \sum_{\omega_i \in S_m} t_i \rightarrow \min, \quad (11)$$

gdzie M - zbiór stanowisk pracy, S_m - podzbiór operacji tworzących stanowiska pracy [14].

3. Miary jakości otrzymywanych rozwiązań

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 [15, 16].

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:

$$LE = \frac{\sum_{i=1}^M ST_i}{C \cdot M} \cdot 100\% \quad (12)$$

gdzie: M – 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.

$$SI = \sqrt{\sum_{i=1}^M (ST_{max} - ST_i)^2} \quad (13)$$

gdzie: ST_{max} – maksymalny czas stacji roboczej, ST_i – czas stacji i .
 Czas linii (T) – jest współczynnikiem zależnym od ilości stacji. Im ten czas będzie mniejszy, tym lepsze zbalansowanie linii.

$$T = (M - 1) \cdot C + ST_K \quad (14)$$

gdzie: M – 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. Dla potrzeb 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 dotyczącego tego samego zadania dla różnych metod i wartości cyklu. Efektywność linii ma sens dla rozwiązań o różnej liczbie stanowisk montażowych ponieważ licznik wzoru (12) dla rozważanego przykładu ma zawsze ta samą wartość.

4. Opis wykorzystywanych heurystyk i metod

4.1 Heurystyka dwukierunkowa

Omawiana w pracy heurystyka łączy dwa podejścia, dwukierunkowe oraz metodę ścieżki krytycznej (CPM). W omawianej heurystyce użyto następujących oznaczeń:

C – dany czas cyklu

i – numer stacji „forward”

j – numer stacji „backward”

S – zbiór operacji montażowych do przydzielenia do stacji roboczych

S_a – zbiór operacji przydzielonych do stacji roboczych

S_u – zbiór operacji nieprzydzielonych

S_{cp} – zbiór operacji należących do ścieżki krytycznej

\bar{S}_{cp} – zbiór operacji nienależących do ścieżki krytycznej

$T(FS_i)$ – sumaryczny czas operacji przydzielonych do i -tej stacji „forward”

$T(BS_j)$ – sumaryczny czas operacji przydzielonych do j -tej stacji „backward”

W_f – czas bezczynności i-tej stacji „forward”, $W_f = C - T(FS_i)$

W_b – czas bezczynności i-tej stacji „backward”, $W_b = C - T(BS_i)$

Przydzielanie operacji do stacji roboczych w omawianej heurystyce można podzielić na dwa kroki. W pierwszym kroku tworzone są nowe stacje robocze. W podejściu dwukierunkowym, operacje mogą być przydzielone do stacji roboczych rozpoczynając zarówno od pierwszej stacji jak i od ostatniej. Stąd, za każdym razem, kiedy operacje mają być przydzielone do stacji roboczych, tworzy się dwie tymczasowe stacje jednocześnie: jedną stację „forward” (FS) oraz jedną stację „backward” (BS). Nieprzydzielone, spełniające odpowiednie warunki operacje są przydzielane do stacji roboczych FS oraz BS równocześnie. Przez spełnienie odpowiednich warunków rozumie się:

dla stacji „forward”:

- wszystkie operacje poprzedzające daną operację zostały przydzielone do stacji roboczych,
- przydzielenie danej operacji do stacji nie powoduje przekroczenia czasu cyklu,

dla stacji „backward”:

- wszystkie operacje następujące po danej operacji zostały przydzielone do stacji roboczych,
- przydzielenie danej operacji do stacji nie powoduje przekroczenia czasu cyklu.

Identycznie w drugim kroku przydziela się spełniające odpowiednie warunki operacje do stacji roboczych. Najpierw za pomocą metody ścieżki krytycznej określa się zbiór operacji ścieżki krytycznej S_{cp} , które w proponowanej heurystyce mają większy priorytet przy przydzielaniu do stacji roboczych. W tym kroku określa się również zbiór operacji nie należących do ścieżki krytycznej \bar{S}_{cp} . Dla stacji roboczej FS najpierw przydziela się operacje z S_{cp} nie posiadające operacji poprzedzających, a operacje z \bar{S}_{cp} przydziela się tylko wtedy, jeżeli przydzielenie operacji z S_{cp} narusza relację kolejnościową. Podobnie dla stacji BS najpierw przydziela się operacje z S_{cp} nie posiadające operacji następujących, a operacje z \bar{S}_{cp} przydziela się tylko wtedy, jeżeli przydzielenie operacji z S_{cp} narusza relację kolejnościową. W razie wystąpienia konfliktów, stosuje się jakąkolwiek sensowną regułę priorytetową (RPW, WET, Numeracja operacji). Przydzielanie operacji do stacji roboczych kontynuuje się tak długo, aż nie da się przydzielić więcej operacji spełniających odpowiednie warunki. Po przydzieleniu operacji do tymczasowych stacji roboczych FS i BS, wybiera się jedną z nich, by ją utrwalić. By zdecydować, którą utrwalić, oblicza się: $W_f = C - T(FS_i)$ oraz $W_b = C - T(BS_i)$, tj. czasy bezczynności odpowiednio stacji „forward” i „backward”. Czas bezczynności jest odchyleniem czasu pracy stacji od czasu cyklu, stąd intuicyjnie można powiedzieć, że mniejsze odchylenie wpływa na zmniejszenie liczby potrzebnych stacji. Stąd, stacja robocza posiadająca mniejszy czas bezczynności (stacja robocza z $\min(W_f, W_b)$) jest utrwalana wraz z przydzielonymi do niej operacjami; operacje przydzielone do stacji posiadającej większy czas bezczynności są zwalniane jako nieprzydzielone. Nowe stacje robocze tymczasowe są tworzone i cała procedura jest powtarzana dla pozostałych nieprzydzielonych operacji. Algorytm kończy się, kiedy wszystkie operacje zostaną przydzielone do utrwalonych stacji roboczych.

4.2 Metoda ścieżki krytycznej

Rozważony zostanie zbiór ścieżek pełnych, tj. prowadzących od wydarzenia początkowego do wydarzenia końcowego. Zbiór ten jest niepusty i skończony. W sieci

czynności każdej ścieżce pełnej przyporządkowany jest jednoznacznie czas wykonania ścieżki (suma czasów wszystkich operacji należących do tej ścieżki). Ten umożliwia zdefiniowanie czasu realizacji projektu oraz ścieżki krytycznej. *Ścieżka krytyczna* jest ścieżką pełną, dla której czas trwania jest najdłuższy. Możliwie najkrótszy termin realizacji przedsięwzięcia określony jest przez czas ścieżki krytycznej. Oznacza to, że nie można zrealizować przedsięwzięcia, zanim nie wykona się najdłuższego w sensie czasu ciągu następujących po sobie czynności. Tak więc czas wykonania wszystkich czynności należących do ścieżki krytycznej określa możliwy najkrótszy termin zakończenia przedsięwzięcia [17].

4.2.1 Procedura przejścia do „przodu”

Procedura przejścia do przodu prowadzi do określenia najwcześniejszych chwil czasowych, w których można rozpocząć *EST* (*Earliest Start Time*) i zakończyć *EFT* (*Earliest Finish Time*) realizację poszczególnych operacji. *EST* oznacza najwcześniejszy możliwy moment czasu, w którym operacja może nastąpić. Dla operacji rozpoczynających sieć operacji przyjmujemy *EST* równe 0. Dla każdej kolejnej operacji najwcześniejszy termin rozpoczęcia określa się następująco:

$$EST_j = \max_{i \in I(j)} \{EST_i + t_i\} \quad (15)$$

gdzie: i, j - kolejne operacje, $I(j)$ – zbiór zdarzeń bezpośrednio poprzedzających zdarzenie i .

Aby wyznaczyć *EST* dla operacji „ j ” należy dla wszystkich bezpośrednich poprzedników operacji „ j ” - $I(j)$ wyznaczyć sumy ich *EST* z ich czasem wykonania i wybrać największą z tych sum.

Najwcześnieszą chwilę zakończenia operacji (*EFT*) oblicza się jako sumę najwcześniejszego momentu rozpoczęcia operacji (*EST*) oraz czasu realizacji tej operacji (t):

$$EFT_i = EST_i + t_i \quad (16)$$

4.2.2 Procedura cofania

Procedura cofania prowadzi do określenia najpóźniejszych chwil czasowych, w których należy rozpocząć *LST* (*Latest Start Time*) i zakończyć *LFT* (*Latest Finish Time*) realizację poszczególnych operacji. *LFT* oznacza najpóźniejszy możliwy moment czasu, w którym operacja może się zakończyć. Dla operacji kończących sieć czynności przyjmujemy *LFT* równe czasowi trwania projektu, który wynosi T i jest równy największemu *EFT* wyliczonemu w procedurze przejścia do przodu. Dla każdej poprzedzającej operacji najpóźniejszy termin zakończenia określa się następująco:

$$LFT_i = \min_{j \in J(i)} \{LFT_j - t_j\} \quad (17)$$

gdzie: i, j – kolejne operacje, $J(i)$ – zbiór zdarzeń bezpośrednio następujących po zdarzeniu j .

Czyli aby wyznaczyć *EFT* dla operacji „ i ” należy dla wszystkich bezpośrednich następników operacji „ i ” - $J(i)$ wyznaczyć różnice ich *EFT* z czasem ich wykonania i wybrać najmniejszą z tych różnic.

Najpóźniejsza chwila rozpoczęcia operacji (*LST*) obliczana jest jako różnica

najpóźniejszej chwili zakończenia operacji (LFT) i czasu realizacji tej operacji (t).

$$LST_i = LFT_i - t_i \quad (18)$$

4.2.3 Wyznaczenie ścieżki krytycznej

Rezerwa czasu jest maksymalnym możliwym opóźnieniem operacji, które nie powoduje wydłużenia czasu projektu. Rezerwę czasową operacji określa się następująco:

$$\Delta t_i = LST_i - EST_i \quad (19)$$

lub

$$\Delta t_i = LFT_i - EFT_i \quad (20)$$

Rezerwa czasowa dla każdej czynności jest różnicą pomiędzy najpóźniejszym dopuszczalnym a najwcześniejszym możliwym terminem jej wystąpienia. Operacje z zerowymi rezerwami czasowymi należą do ścieżek krytycznych sieci i jakiegokolwiek opóźnienie w ich pojawieniu się lub realizacji prowadzi do opóźnienia momentu zakończenia całego projektu. Czynności należące do ścieżek krytycznych nazywa się krytycznymi [18].

4.3 Heurystyka jednokierunkowa

Przydzielanie operacji do stacji roboczych w heurystyce jednokierunkowej można opisać następująco:

- Tworzona jest nowa stacja robocza.
- Nieprzydzielone, spełniające odpowiednie warunki operacje są przydzielane do stacji roboczej. Przez spełnienie odpowiednich warunków rozumie się:
 - wszystkie operacje poprzedzające daną operację zostały przydzielone do stacji roboczych,
 - przydzielenie danej operacji do stacji nie powoduje przekroczenia czasu cyklu.
- W razie wystąpienia konfliktów, stosuje się regułę priorytetową (RPW, WET, Numeracja operacji).
- Przydzielanie operacji do stacji roboczej kontynuuje się tak długo, aż nie da się przydzielić do niej więcej operacji spełniających odpowiednie warunki.
- Jeżeli istnieją jeszcze jakieś nieprzydzielone operacje – następuje przejście do początku algorytmu, jeżeli takowych nie ma algorytm kończy obliczenia [19].

W heurystyce wykorzystano znane z literatury procedury kolejnościowe [9]:

- WET (Working Element Time),
- RPW (Ranking Positional Weight),
- Numeracja operacji.

Musimy mieć świadomość iż to tylko wybrane reguły priorytetowe, w literaturze można ich znaleźć znacznie więcej a ich wybór należy do przeprowadzających badania.

4.4 Algorytm poprawy uszeregowania

Jeżeli przy przydzielaniu operacji do tymczasowej stacji roboczej (FS lub BS):

- sumaryczny czas operacji przydzielonych do stacji roboczej jest mniejszy od czasu cyklu,

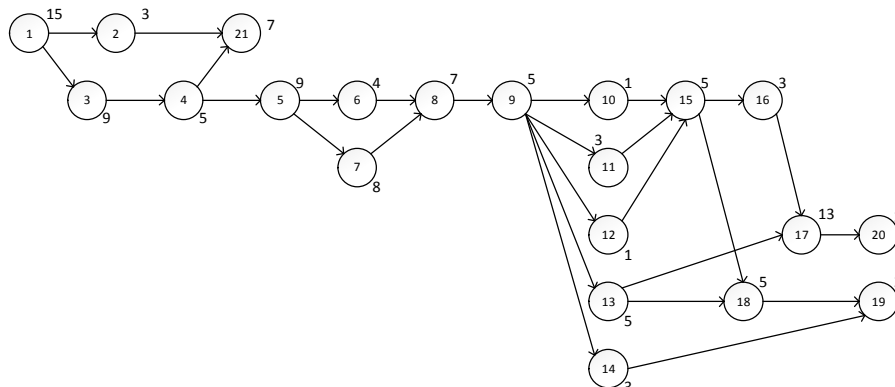
- nie ma operacji, która mogłyby być przydzielona do stacji roboczej bez przekroczenia czasu cyklu i naruszenia relacji kolejnościowej,
 - istnieje operacja x nie naruszająca reguły relacji kolejnościowej, lecz jej przydzielenie do stacji roboczej spowodowałoby przekroczenie czasu cyklu,
- wtedy aktywowany jest algorytm poprawy uszeregowania.

Działanie algorytmu:

1. $i=1$;
2. Tymczasowo usuwa się z tymczasowej stacji roboczej „i” ostatnio przydzielonych operacji.
3. Jeżeli którakolwiek z tymczasowo usuniętych operacji jest poprzednikiem operacji x, algorytm jest przerywany.
4. Jeżeli dodanie operacji x do stacji roboczej powoduje przekroczenia czasu cyklu, $i=i+1$; powrót do punktu 2.
5. Jeżeli dodanie operacji do stacji roboczej nie powoduje przekroczenia czasu cyklu i poprzez podmianę „i” ostatnich operacji na operację x, otrzymujemy lepsze wypełnienie czasu stacji roboczej, to kończymy algorytm podmieniając operacje.

5. Przykład numeryczny

W celu zobrazowania działania omówionych heurystyk przeanalizowano przykład numeryczny o 21 zadaniach, którego relacje kolejnościowe przedstawia graf z Rys. 1. Czasy operacji podano obok węzłów grafów a groty strzałek wskazują na kierunek wykonywania operacji. Do uzyskania końcowego balansu założono 3 wartości cyklu C: 35, 21 oraz 14 jednostek czasowych. W Tab. 1 oraz Tab. 2 podano wartości współczynników jakości dla różnych wartości cyklu i różnych wykorzystanych heurystyk. Analizując wyniki w tabeli można zauważyć powtarzalność wyników dla tego samego cyklu dla różnych metod heurystycznych wykorzystywanych w badaniach.



Rys. 1 Graf relacji kolejnościowej dla przykładu numerycznego

Na Rys. 2 – 3 przedstawiono najlepsze rozwiązania dla różnych heurystyk oraz cykli produkcyjnych.

Tab. 1. Miary jakościowe balansu dla cyklu C: 35 oraz 21

Reguła	Miary	CYKL = 35			CYKL = 21		
		HD+	HD-	HJ	HD+	HD-	HJ
RPW	M	3	3	4	5	5	6
	T	105	105	107	105	105	107
	SI	0	0	33,03	0	0	19,05
	LE	100%	100%	75%	100%	100%	83,33%
Numeracja operacji	M	3	3	4	5	5	6
	T	105	105	112	105	105	112
	SI	0	0	27,18	0	0	14,93
	LE	100%	100%	75%	100%	100%	83,33%
WET	M	4	4	4	6	6	6
	T	139	139	107	125	125	107
	SI	31,16	31,16	33,03	20,02	20,02	19,10
	LE	75%	75%	75%	83,33%	83,33%	83,33%

gdzie: HD+ – heurystyka dwukierunkowa z włączonym algorytmem poprawy,
 HD- – heurystyka dwukierunkowa z wyłączonym algorytmem poprawy,
 HJ – heurystyka jednokierunkowa.

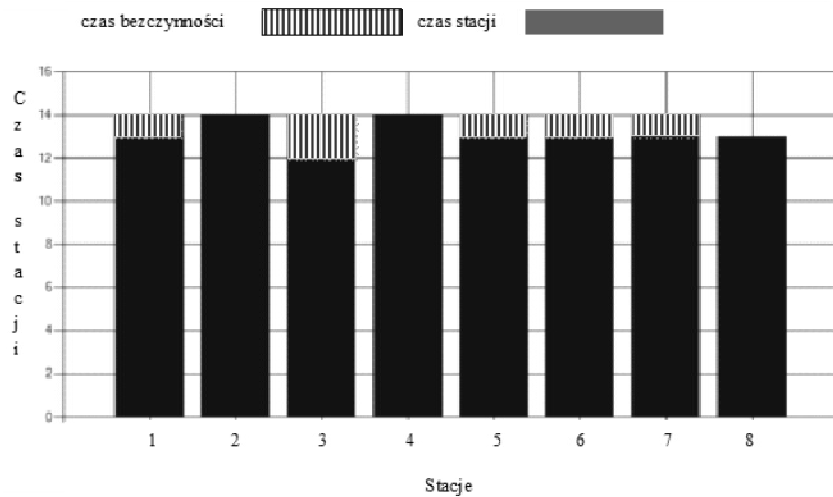
Tab. 2. Miary jakościowe balansu dla cyklu C: 14

Reguła	Miara	HD+	HD-	HJ
RPW	M	9	9	8
	T	125	125	111
	SI	11,70	10,44	3
	LE	83,33%	83,33%	93,75%
Numeracja operacji	M	8	9	9
	T	111	124	124
	SI	3	11,79	10,05
	LE	93,75%	83,33%	83,33%
WET	M	8	8	9
	T	111	111	122
	SI	3	3	10,25
	LE	93,75%	93,75%	83,33%

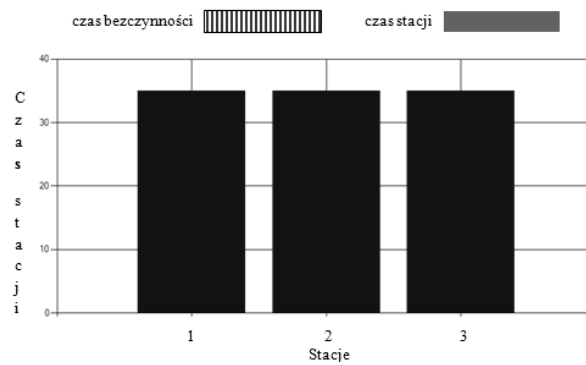
gdzie: HD+ – heurystyka dwukierunkowa z włączonym algorytmem poprawy,
 HD- – heurystyka dwukierunkowa z wyłączonym algorytmem poprawy,
 HJ – heurystyka jednokierunkowa.

6. Podsumowanie

W artykule omówiono problem heurystyk w zagadnieniu balansowania linii montażowej. Szczególnie zwrócono uwagę, że znane do tej pory podejście heurystyki jednokierunkowej może być uzupełnione o dwukierunkowe algorytmy szeregowania zadań na stacjach roboczych linii produkcyjnej. Podejście to jest powszechne w liniach typu U, kiedy to za względu na uzyskiwanie balansu linii bierzemy jednocześnie pod uwagę zarówno zadania z początku grafu relacji kolejnościowej jak i z jego części końcowej. Przeprowadzone badania zgodnie z oczekiwaniami dały rozwiązania dopuszczalne ale również w niektórych przypadkach wręcz rozwiązania optymalne. Mimo, że jest to zupełny przypadek, jak się



Rys. 2 Balans linii dla cyklu $C=14$ oraz heurystyki jednokierunkowej



Rys. 3 Balans linii dla cyklu $C=21$ oraz heurystyki dwukierunkowej z włączonym algorytmem poprawy i regułą RPW

okazuje możliwy do osiągnięcia. Badania są jedynie potwierdzeniem, że heurystyki mogą dać różne rozwiązania końcowe a miary jakości pozwalają na oceny otrzymanych wyników. Stosowanie różnych heurystyk potwierdza tezę, że z większej liczby różnych wyników zawsze można wybrać to rozwiązanie, które pod względem wcześniej ustalonych kryteriów (czas linii, brak długich przestojów, efektywności linii czy liczby stacji, zadanej wielkości produkcji) jest dla nas najlepsze.

Prace zrealizowane przy wsparciu środków BK265/Rau1/2014.

Literatura

1. Bryton, B. Balancing of continuous production line. M.S. Thesis. Northwestern University, Evanston, IL, 1954

2. Salveson, M. E. The assembly line balancing problem. *The Journal of Industrial Engineering*, 6, 1955, 18-25
3. Jackson, J. R. A computing procedure for a line balancing problem. *Management Science*, 2, 1956, 261-271
4. Graves, S. C., Lamar, B. W. An integer programming procedure for assembly system design problems. *Operations Research*, 41, 1983, 522-545
5. Carraway, R. L. A dynamic programming approach to stochastic assembly line balancing. *Management Science*, 35, 1989, 459-471.
6. Becker, C., & Scholl, A. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168, 2006, 694-715
7. Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, 183(2), 2007, 674-693
8. Ghosh, S., Gagnon, R. J. A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems. *International Journal of Production Research*, 27, 1989, 637-670
9. Scholl, A. *Balancing and sequencing of assembly lines*. Physica- Verlag Heidelberg, 1999.
10. Scholl, A., Voß, S. Simple assembly line balancing–heuristic approaches. *Journal of Heuristics*, 2, 1996, 217-244
11. Scholl, A., Klein, R. SALOME: A bidirectional branch and bound procedure for assembly line balancing. *INFORMS Journal on Computing*, 9, 1997, 319-334
12. Kao, H. H., Yeh, D. H. A new approach for assembly line balancing problems. *The 36th international conference on computers and industrial engineering, Taipei, Taiwan 2006*, 3886-3897
13. Kao H. H. Yeh D. H. A new bidirectional heuristic for the assembly line balancing problem., *Computers & Industrial Engineering* 57, 2009, 1155-1160
14. Grzechca W. *Analiza teoriogrowego algorytmu balansowania linii montażowej*. Instytut Automatyki Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001. (praca doktorska niepublikowana).
15. Marecki F. *Modele matematyczne i algorytmy alokacji operacji i zasobów na linii montażowej*. ZN. Pol. Śl. Seria Automatyka 82, Gliwice 1986.
16. Erel E., Sarin S. A. Survey of the Assembly Line Balancing Procedures. *Production Planning and Control* Vol.9 No.5, 1998, 414-434
17. *Praca zbiorowa pod redakcją E. Ignasiaka, Badania operacyjne*. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1977.
18. Sysło M. M., Deo N., Kowalik J.S. *Algorytmy optymalizacji dyskretnej*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1995.
19. Ponnambalam S. G., Aravindan P., Mogileeswar G., Naidu A Comparative Evaluation of Assembly Line Balancing Heuristics.. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1999, 577-586

Dr inż. Waldemar GRZECHCA
 Zakład Inżynierii Systemów
 Instytut Automatyki
 Politechnika Śląska
 44-100 Gliwice, ul Akademicka 16
 tel. 322372198
 email: waldemar.grzechca@polsl.pl