

Waldemar GRZECHCA*

DWUKRYTERIALNA HEURYSTYKA DLA ROZWIĄZYWANIA PROBLEMU BALANSOWANIA LINII MONTAŻOWEJ

Streszczenie

W artykule zaprezentowano wyniki badań dotyczące manualnej linii montażowej. Omawiana dwukryterialna heurystyka ma na celu uwzględnienie zarówno minimalizację czasów przestojów ale także bierze pod uwagę obciążenie pracowników biorących udział w procesie montażu. Jak wiadomo nie każda operacja wymaga jednakowego wysiłku oraz jednakowych ruchów fizycznych. W prezentowanej metodzie uwzględnia się w sposób sformalizowany (metoda RULA i REBA) udział ze względu na obciążenie każdego z pracowników linii a otrzymane wyniki służą korekcie balansu linii otrzymanego wcześniej w oparciu o znane metody heurystyczne dla których kryterium optymalizacji jest jedynie czas przestojów maszyny lub bezczynność pracowników na stanowisku montażowym.

Słowa kluczowe: heurystyki, ergonomia pracy, problem balansowania linii montażowej

1. WPROWADZENIE

Pierwszą linię montażową dla Forda T zaprojektowano w 1913 roku, rewolucjonizując tym samym proces produkcji masowej. Wprowadzenie takiego rodzaju produkcji pozwala na znaczne przyspieszenie produkcji przy jednoczesnym obniżeniu jej kosztów. Dziś systemy produkcyjne oparte na przepływowej linii produkcyjnej są wszechobecne i dotyczą większości wyrobów. Zjawisko balansowania linii montażowej po raz pierwszy opisano [10] w latach pięćdziesiątych. Podstawą problemu balansowania jest przyporządkowanie zbioru zadań do uporządkowanego zbioru stacji roboczych tak aby relacje kolejnościowe były spełnione a wskaźniki jakości zoptymalizowane. Linię montażową uważa się za zbalansowaną gdy wykonano wszystkie operacje nie naruszając żadnego z założeń dotyczącego produkcji na linii montażowej (niepodzielność operacji, przestrzeganie relacji kolejnościowych). Choć problem balansowania znany jest od lat wciąż proponowane są nowe algorytmy oraz modyfikacje już znanych algorytmów. Pracownicy na manualnych liniach montażowych narażeni są na występowanie urazów ze względu na [1]:

- manualne wykonywanie zadań utrzymując stałą postawę podczas pracy,
- wymuszoną pozycję ciała przy pracy (nienaturalne pozycje całego ciała i/lub segmentów ciała, np. pozycja skrzyżowana, zgięta) gdy stacja operatorska nie jest prawidłowo zaprojektowana lub nie posiada możliwości regulacji,
- używanie znacznej siły (nieakceptowane wartości w trakcie wykonywania czynności roboczej),
- powtarzalność ruchów (niekorzystna dla zdrowia ze względu na wysoką częstotliwość powtórzeń, czas trwania każdego ruchu oraz wykonywanie w pobliżu skrajnych położeń kątowych w stawach),
- używanie tylko wybranych partii mięśniowych.

Ergonomia pracy jest jednym z ważniejszych zagadnień, który nie są brane pod uwagę podczas przydzielania zadań do montażu na stacjach roboczych. Badania naukowe wykazują,

* Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki

że brak uwzględnienia czynników ergonomicznych może być powiązany z problemami zdrowotnymi u pracowników, z ich podatnością na występowanie urazów, odbija się także na produktywności pracowników oraz ma wpływ na dokładność wykonywanej pracy. W celu poprawy jakości w miejscu pracy należy uwzględnić czynniki ergonomiczne już na etapie przydzielania operacji do stacji roboczych. Głównym celem artykułu jest przedstawienie oraz analiza dwukryterialnego podejścia do problemu balansowania linii montażowej uwzględniającego zarówno aspekt ekonomiczny związany z przydzielaniem operacji do stacji roboczych tak aby czasy przestojów były możliwie najmniejsze oraz uwzględniając obciążenia jakim poddawany jest układ mięśniowo-szkieletowy pracownika obsługującego wybraną stację roboczą [2].

2. OCENA OBCIĄŻENIA FIZYCZNEGO I POSTURALNEGO

Oceny obciążenia fizycznego oraz posturalnego lub obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego, którym poddawany jest pracownika podczas pracy na linii montażowej można dokonać wykorzystując jedną z metod szybkiej oceny ergonomicznej stanowiska pracy:

- metoda RULA (Rapid Upper Limb Assessment) – ukierunkowana szczególnie na ocenę na obciążenie szyi, tułowia i kończyn górnych; sprawdza się dobrze w przypadku oceny pracy w pozycji siedzącej,
- metoda REBA (Rapid Entire Body Assessment) – uwzględnia obciążenie całego układu mięśniowo-szkieletowego związanego zarówno z użyciem siły dla potrzeb wykonania określonego zadania, jak i konieczność utrzymania niezbędnej pozycji ciała.

Ważną zaletą wykorzystania tych metod jest łatwość w stosowaniu oraz szybkość uzyskiwania wyników. Wynik końcowy uzyskiwany przy pomocy w/w metod określa wielkość ryzyka wystąpienia dolegliwości ze strony układu mięśniowo-szkieletowego a także zakres interwencji ergonomicznych niezbędnych do zmniejszenia tego ryzyka [5][6][8].

Ocena za pomocą RULA dokonywana jest w 16 krokach:

- w krokach 1-8 oceniane jest obciążenie dla kończyny górnej – oddzielnie dla prawej i lewej (od +1 do +4),
- w krokach 9-15 oceniane jest obciążenie dla szyi, tułowia i oparcia na podłożu (skala od +1 do +4),
- w powyższych ocenach uwzględniane jest: położenie poszczególnych segmentów ciała oraz wielkość i rodzaj obciążenia zewnętrznego,
- krok 16 – polega na odczytaniu wyniku końcowego oceny oraz jego interpretacji.

W pierwszym etapie przy pomocy rysunków wzorcowych oceniana zostaje pozycja kończyn górnych. Dodatkowo podczas oceny obciążenia nadgarstków uwzględnia się ich skrzywienie:

- jeśli występuje – dodaje się +1 punkt,
- jeśli skrzywienie jest bliskie maksymalnemu – dodaje się +2 punkty.

Następnie wartości dla ocenionych elementów układu ruchu podstawiane są w sposób tabelaryczny w celu uzyskania dla nich wartości sumarycznej – wyniku A.

Do wartości odczytanej z Tabeli 1 dodawane są odpowiednie liczby punktów charakteryzujących użycie mięśni oraz obciążenie lub siły zewnętrzne działające na pracownika otrzymując w efekcie sumę A.

Tabela 1. Metoda RULA – składowe numeryczne służące do obliczenia obciążenia pracownika

Ramie	Przedramię	Nadgarstek							
		1		2		3		4	
		Skrećenie nadgarstka		Skrećenie nadgarstka		Skrećenie nadgarstka		Skrećenie nadgarstka	
		1	2	1	2	1	2	1	2
1	1	1	2	1	2	1	2	1	2
	2	1	2	2	2	2	3	3	3
	3	2	2	2	2	3	3	3	3
2	1	2	2	2	3	3	3	4	4
	2	2	2	2	3	3	3	4	4
	3	2	3	3	3	3	4	4	5
3	1	2	3	3	3	4	4	5	5
	2	2	3	3	3	4	4	5	5
	3	2	3	3	4	4	4	5	5
4	1	3	4	4	4	4	4	5	5
	2	3	4	4	4	4	4	5	5
	3	3	4	4	5	5	5	6	6
5	1	5	5	5	5	5	6	6	7
	2	5	6	6	6	6	7	7	7
	3	6	6	6	7	7	7	7	8
6	1	7	7	7	7	7	8	8	9
	2	7	8	8	8	8	9	9	9
	3	9	9	9	9	9	9	9	9

Punktacja metody dla:
użycia mięśni

- +1 punkt gdy wysiłek głównie statyczny (dłużej niż 1 min),
- +1 punkt gdy czynność wykonywana jest 4 razy na min lub częściej, obciążenia lub siły zewnętrznej
- +0 punktów jeśli brak obciążenia lub mniej niż 2 kg (przerywane obciążenie),
- +1 punkt jeśli obciążenie wynosi 2-10 kg (przerywane obciążenie),
- +2 punkty jeśli obciążenie wynosi 2-10 kg (obciążenie statyczne lub powtarzalne),
- +3 punkty jeśli obciążenie wynosi powyżej 10 kg (obciążenie statyczne lub powtarzalne).

W następnym etapie procedurę stosuje się do pozostałych elementów układu ruchu tj. tułowia, szyi i kończyn dolnych.

Dodatkowo podczas oceny uwzględnia się:

- +1 punkt gdy tułów jest prawidłowo podparty podczas siedzenia,
- +2 punkty gdy nie ma podparcia,
- +1 punkt jeżeli tułów jest skrecony,
- +1 punkt jeżeli tułów jest pochylony na bok,
- +1 punkt jeżeli szyja jest skrecona,
- +1 punkt jeżeli szyja jest pochylona na bok.

Ocena obciążeń kończyn dolnych:

- 1 punkt jeśli kończyny dolne wspierają się na podłożu albo pozycja jest zrównoważona,
- 2 punkty jeśli kończyny dolne nie wspierają się na podłożu albo pozycja nie jest zrównoważona.

Uwzględniając zatem pozycję szyi, tułowia oraz postawę nóg otrzymujemy tabelaryczny Sumę B – Tabela 2.

Tabela 2. Suma B

Suma dla pozycji szyi	Suma dla pozycji tułowia											
	1		2		3		4		5		6	
	Nogi		Nogi		Nogi		Nogi		Nogi		Nogi	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	1	3	2	3	3	4	5	5	6	6	7	7
2	2	3	2	3	4	5	5	5	6	7	7	7
3	3	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	7
4	5	5	5	6	6	7	7	7	7	7	8	8
5	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8
6	8	8	8	8	8	8	8	9	9	9	9	9

W rezultacie podstawiamy sumę A i sumę B do tabeli otrzymując wynik końcowy RULA – Tabela 3

Tabela 3. Wynik sumy A i sumy B

		Suma B						
		1	2	3	4	5	6	>6
Suma A	1	1	2	3	3	4	5	5
	2	2	2	3	4	4	5	5
	3	3	3	3	4	4	5	6
	4	3	3	3	4	5	6	6
	5	4	4	4	5	6	7	7
	6	4	4	5	6	6	7	7
	7	5	5	6	6	7	7	7
	>7	5	5	6	7	7	7	7

Otrzymany wynik końcowy oceny RULA porównujemy z wartościami w Tabeli 4, co pozwala na ocenę ryzyka powstania dolegliwości ze strony układu ruchu jak również ocenę konieczności zastosowania interwencji ergonomicznej w celu zmniejszenia poziomu ryzyka [5][8].

Tabela 4. Metoda RULA - interpretacja

Suma końcowa	Ryzyko
1-2	Małe
3-4	Średnie
5-6	Wysokie
7	Bardzo wysokie

Ocena za pomocą metody REBA dokonywana jest w 13 krokach:

- w krokach 1- 5 oceniane jest obciążenie dla szyi, tułowia i oparcia na podłożu (w skali od +1 do +4),
- w krokach 6-10 oceniane jest obciążenie kończyny górnej – oddzielnie dla prawej i lewej (w skali od +1 do +4),
- w powyższych ocenach uwzględniane jest: położenie poszczególnych segmentów ciała oraz: wielkość obciążenia zewnętrznego; jakość chwytu,

- krok 11-12 – polega na ustaleniu wyniku końcowego oceny REBA z uwzględnieniem rodzaju wysiłku (wysiłek statyczny, powtarzalność, szybkie i duże zmiany postawy ciała),
- krok 13 jest interpretacją wyniku końcowego REBA.

W pierwszym etapie przy użyciu rysunków wzorcowych oceniana zostaje pozycja tułowia, szyi i kończyn dolnych. Następnie wartości dla ocenionych elementów układu ruchu podstawiane są do Tabeli 5 w celu odczytania dla nich wartości sumarycznej.

Tabela 5. Wartość sumaryczna oceny ruchów tułowia, szyi i nóg

Tułów	Szyja											
	1				2				3			
Nogi	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	1	2	3	4	1	2	3	4	3	3	5	6
2	2	3	4	5	3	4	5	6	4	5	6	7
3	2	4	5	6	4	5	6	7	5	6	7	8
4	3	5	6	7	5	6	7	8	6	7	8	9
5	4	6	7	8	6	7	8	9	7	8	9	9

Do wartości odczytanej z Tabeli 5 dodawana jest liczba punktów charakteryzująca obciążenie lub siłę zewnętrzną działającą na pracownika otrzymując w efekcie wynik A.

Tabela 6. Metoda REBA – punkty oceny dla obciążenia i siły

Punkty	0	1	2	+1
Obciążenie/siła	<5 kg	5-10 kg	>10 kg	Obciążenie gwałtowne, szybko narastające

Podobnie dla pozostałych elementów układu ruchu oceniamy obciążenia.

Dodatkowo uwzględniamy:

- +1 punkt jeśli ramię jest odwiedzione lub skrzyżowane,
- +1 punkt jeśli bark jest podniesiony,
- -1 punkt jeśli ramię jest opuszczone lub podparte.

Dodatkowo +1 punkt jeśli nadgarstki są odchylone na boki lub skrzyżowane.

Następnie otrzymujemy Tabelę 7 – wynik B, który jest pomocny w otrzymaniu sumy B.

Tabela 7. Wynik B

	Ramię	Przedramię					
		1			2		
	Nadgarstki	1	2	3	1	2	3
1		1	3	3	1	2	3
2		1	2	3	2	3	4
3		3	4	5	4	5	5
4		4	5	5	5	6	7
5		6	7	8	7	8	8
6		7	8	8	8	9	9

Do wartości otrzymanej z tabeli B dodajemy odpowiednio punkty w zależności od rodzaju uchwytu:

- +0 punktów – dobrze dopasowane uchwyty z elementem umożliwiającym wygodny chwyt,

- +1 punkt – chwyt rękoma akceptowalny ale nie idealny lub wygodne trzymanie przy wykorzystaniu innych elementów ciała,
- +2 punkty – chwyt rękoma niewygodny lub niemożliwy,
- +3 punkty – brak uchwytów, chwyt nie zapewnia bezpieczeństwa, trzymanie nie jest możliwe nawet przy użyciu innych części ciała.

W rezultacie podstawiamy wynik A i wynik B do Tabeli 8 otrzymując wynik C.

Tabela 8. Wynik C

Wynik A	Wynik B										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	1	1	2	3	3	4	5	6	7	7
2	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7	7
3	2	3	3	3	4	5	6	7	7	8	8
4	3	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9
5	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9
6	6	6	6	7	8	8	9	9	10	10	10
7	7	7	7	8	9	9	9	10	10	11	11
8	8	8	8	9	10	10	10	10	10	11	11
9	9	9	9	10	10	10	11	11	12	12	12
10	10	10	11	11	11	11	11	12	12	12	12
11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12
12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Wynik z tabeli zwiększamy o liczbę punktów charakteryzującą aktywność pracownika podczas wykonywania ocenianego zadania:

- +1 punkt jeżeli co najmniej jedna z części ciała pozostaje w warunkach statycznych dłużej niż 1 min,
- +1 punkt jeżeli powtarzanie niewielkiego zakresu czynności zachodzi częściej niż 4 razy na min (oprócz chodzenia),
- +1 punkt jeżeli wykonywanie czynności powoduje nagłe duże zmiany pozycji ciała lub czynność wykonywana jest na niestabilnej podstawie.

Otrzymany wynik końcowy oceny REBA porównujemy z wartościami w Tabeli 9, co pozwala na ocenę ryzyka powstania dolegliwości ze strony układu ruchu jak również ocenę konieczności zastosowania interwencji ergonomicznej w celu zmniejszenia poziomu ryzyka [5][6].

Tabela 9. REDA - interpretacja

Wynik REBA	Ryzyko
1	Niewielkie
2-3	Małe
4-7	Średnie
8-10	Wysokie
11-15	Bardzo wysokie

3. DWUKRYTERIALNY PROBLEM BALANSOWANIA LINII MONTAŻOWEJ

Problem balansowania linii montażowej w klasycznej postaci poszukuje odpowiedzi na jedno z pytań:

1. w jaki sposób uszeregować operacje na danej liczbie stacji roboczych tak aby jej zbalansowanie było jak najlepsze?
2. dla zadanego czasu cyklu jaka jest minimalna ilość stacji roboczych oraz w jaki sposób uszeregować operacje na stacjach aby otrzymać najlepsze zbalansowanie linii?

W obydwu przypadkach oceną zbalansowania linii montażowej jest osiągnięcie jak najmniejszego czasu przestojów stacji roboczych wynikający z niepełnego przydziału operacji dla danej stacji. Tradycyjne podejście do problemu BLM skupia się jedynie na czasie przetwarzania na stacjach roboczych, nie brane pod uwagę jest to jakim obciążeniem poddawany jest układ mięśniowo-szkieletowy pracownika podczas wykonywania czynności zawodowych. W celu złagodzenia obciążeń jakim poddawaniu są pracownicy linii montażowej najbardziej zalecanym jest podejście inżynierskie, które wymaga modyfikacji stacji roboczych, używanych narzędzi oraz sposobu wykonywania zadań na rzecz zmniejszenia obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego pracownika. Bardzo często takie podejście okazuje się niepraktyczne i kosztowne. Alternatywnie stosuje się podejście administracyjne, które przewiduje zmniejszenie narażenia na prace w nie ergonomicznych warunkach (np. nadmierne obciążenia fizyczne, niewygodna pozycja pracy) uzyskuje się je poprzez wprowadzenie techniki rotacji pracy. Pracownicy wymieniają się na poszczególnych stacjach roboczych, tak aby zredukować ich czas pracy na mniej ergonomicznie przystosowanych stacjach. Jednakże podczas pracy na linii montażowej często stosowane jest przypisywanie wybranego pracownika do jednej stacji roboczej, aby w takim przypadku zminimalizować narażenie pracownika na urazy wynikające z wykonywania zadań potrzebne jest odpowiednie przydzielenie operacji do stacji, które zbalansuje również obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego. Pracownik przydzielony do danej stacji roboczej wykonuje kilka operacji, które zostały przydzielone do tej stacji. Wykorzystując jedną z metod oceny obciążenia fizycznego i posturalnego możemy określić jej całościowy wynik obciążenia na układ mięśniowo-szkieletowy pracownika. Suma wyników obciążenia operacji przypisanych do danej stacji stanowi całkowite obciążenie jakim poddany jest pracownik tej stacji. W celu otrzymania najlepszego zbalansowania obciążenia fizycznego i posturalnego pomiędzy pracownikami różnych stacji należy tak dobrać operacje do stacji aby całościowe obciążenia poszczególnych stacji były równe. Zmiany takie powinny nie tylko zmniejszyć ryzyko występowania urazów u pracowników związanych z pracą w nie ergonomicznych warunkach, ale także pozytywnie wpłynąć na jakość i wydajność pracy [6].

Na potrzeby dwukryterialnej heurystyki potrzebna jest miara opisująca zarówno czasy przestojów stacji operatorskich, jak i zbalansowanie obciążeń fizycznych i posturalnych jakim poddawany jest pracownik podczas wykonywania zadań. Dwukryterialna heurystyka dla problemu BLM rozwiązuje zadanie typu II w związku z czym należy wyliczyć najlepszy możliwy do osiągnięcia czas cyklu, liczymy go jako średni czas przypadający na stację roboczą.

$$\bar{T} = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^N t_j \quad (1)$$

gdzie:

K – liczba stacji roboczych,

N – liczba operacji,

t_j – czas realizacji j -tej operacji.

Po uszeregowaniu operacji na stacjach roboczych znany jest czas pracy każdej ze stacji T_j . Znormalizowaną wariancję czasu przetwarzania stacji obliczamy ze wzoru:

$$VT = \frac{1}{T} \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \left(ST_i - \bar{T} \right)^2 \quad (2)$$

Podobnie jak w przypadku czasu operacji postępujemy z obciążeniami na układ mięśniowo – szkieletowy pracownika, które otrzymano wykorzystując jedną z metod oceny obciążenia fizyczno posturalnego. Wyliczamy najlepsze do osiągnięcia sumaryczne obciążenie każdej ze stacji ze wzoru:

$$\bar{R} = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^N r_j \quad (3)$$

gdzie:

r_j – obciążenie j – tej operacji.

Po uszeregowaniu operacji na stacjach roboczych znane jest sumaryczne obciążenie każdej ze stacji R_j . Znormalizowaną wariancję obciążenia stacji obliczamy ze wzoru:

$$VR = \frac{1}{R} \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \left(R_i - \bar{R} \right)^2 \quad (4)$$

Złożony wskaźnik wariancji definiuje się jako średnią ważoną obliczaną ze znormalizowanych wariancji czasu przetwarzania VT oraz obciążenia VR . Wielkości wag (z zakresu od 0 do 1) przypisane do czasu przetwarzania oraz obciążenia dobierane są według uznania w zależności od tego co ma większy priorytet w procedurze balansowania. Suma wag WT oraz WR musi być równa 1. Złożony wskaźnik zmienności CV opisany jest wzorem:

$$CV = WT \cdot VT + WR \cdot VR \quad (5)$$

gdzie:

WT – waga czasu przetwarzania stacji,

WR – waga obciążenia stacji.

Linia montażowa jest kompletnie zbalansowana gdy wartość $CV=0$, oznacza to, że na stacjach nie występują przestoje oraz obciążenia zostały rozłożone w sposób równomierny. Sytuacja taka jest jednak mało prawdopodobna dlatego też poszukujemy się rozwiązania z minimalną wartością CV [6].

4. OCENA BALANSU LINII MONTAŻOWEJ

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 [3],[11],[12].

Stosowane miary to:

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

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

$$LE = \frac{\sum_{i=1}^K ST_i}{c \cdot K} \cdot 100\% \quad (6)$$

gdzie:

K – liczba stacji,

c – cykl linii,

ST_i – czas wykorzystania i – tej 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.

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

(7)

gdzie :

ST_{max} – maksymalnie wykorzystana stacja montażowa,

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

$$LT = (K - 1) \cdot c + ST_K \quad (8)$$

gdzie:

K – ilość stacji roboczych,

c – czas cyklu,

ST_K – czas ostatniej stacji.

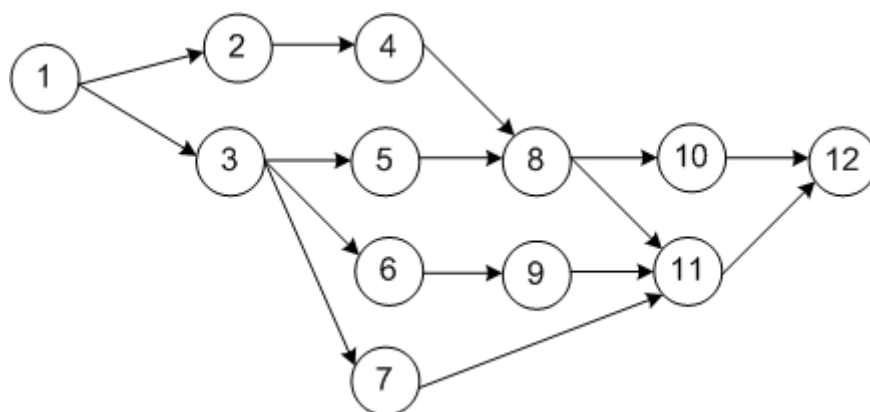
Omawiając przedstawione miary należy zwrócić uwagę na ogromną ich przydatność w ocenie rozwiązań dopuszczalnych dla problemu balansowania linii montażowej. Czas linii wprost informuje nas o opuszczeniu przez produkt finalny linii fabrycznej. Oczywiście jest, iż rozwiązanie o mniejszym czasie linii jest rozwiązaniem lepszym. Dla potrzeb omawianego problemu utworzono wskaźnik gładkości, który informuje nas o istnieniu czasu strat 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 da różnych metod i wartości cyklu. Efektywność linii ma sens dla rozwiązań o różnej liczbie stanowisk montażowych.

5. PRZYKŁAD NUMERYCZNY

Dwukryterialna heurystyka wykorzystuje klasyczny algorytm heurystyczny Kilbridge'a & Wester'a [3],[4],[7],[9] do otrzymania wstępnego uszeregowania operacji na stacjach roboczych. Następnie wykorzystuje się algorytm zamiany operacji na stacjach tak aby otrzymać minimalną wartość wskaźnika zmienności CV. W założeniu rozwiązywany jest problem BLM typu II dlatego też liczba stacji roboczych jest dana, a najlepszy czas cyklu możliwy do osiągnięcia można wyliczyć, jak i najbardziej zbilansowane obciążenia dla poszczególnych stacji [11].

Na rysunku 1 przedstawiono graf relacji kolejnościowej a w Tabeli 10 podane zostały czasy operacji oraz ich obciążenia. Zakłada się również dla problemu znajomość liczby stacji $K=4$.



Rys. 1. Graf relacji kolejnościowej

Źródło: opracowanie własne

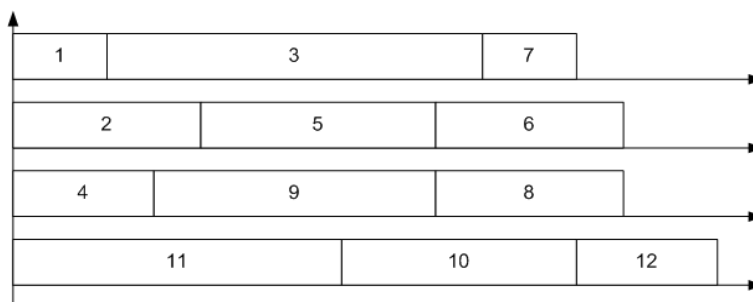
Tabela 10. Czasy i obciążenia operacji dla przykładu numerycznego

	Numer operacji											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t_j	2	4	8	3	5	4	2	4	6	5	7	3
r_j	3	4	4	1	2	4	3	2	2	2	4	4

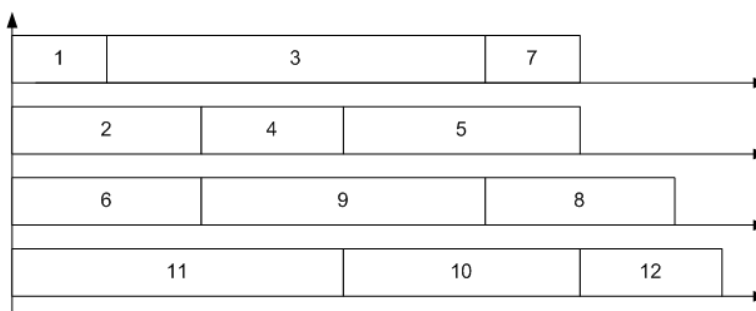
Po dokonaniu obliczeń zmieniając wartości wag WR oraz WT otrzymano balans linii którego ocenę zamieszczono w Tabeli 11 a rozkład operacji na poszczególnych stacjach roboczych przedstawiają odpowiednio rysunki 2 – 4.

Tabela 11. Wyniki badań dla różnych wartości wag

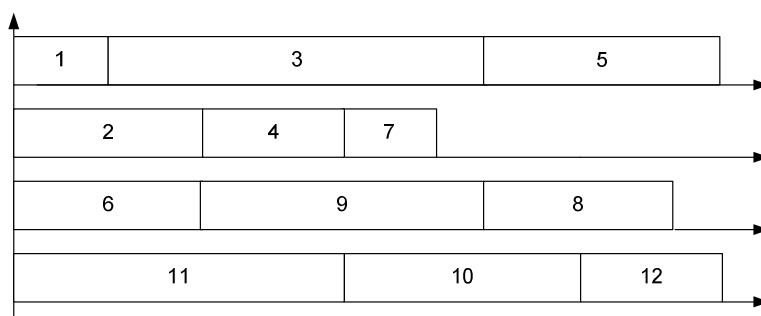
	WT = 1 WR = 0		WT = 0,5 WR = 0,5		WT = 0 WR = 1	
	K&W	Rebalans	K&W	Rebalans	K&W	Rebalans
CV	0,09	0,09	0,31	0,16	0,54	0,08
Cykl	15	15	15	15	15	15
LE[%]	88,33	88,33	88,33	88,33	88,33	88,33
SI	42,63	42,63	42,63	41,95	42,63	33,11
LT	60	60	60	60	60	60



Rys. 2. Szeregowanie operacji na linii montażowej dla WT=0 ora WR=1
Źródło: opracowanie własne



Rys. 3. Szeregowanie operacji na linii montażowej dla WT=0,5 ora WR=0,5
Źródło: opracowanie własne



Rys. 4. Szeregowanie operacji na linii montażowej dla WT=0 oraz WR=1
Źródło: opracowanie własne

6. PODSUMOWANIE

Analizując powyższe wyniki widzimy wpływ wprowadzenia dwukryterialnego podejścia na otrzymane rozwiązania problemu balansowania linii montażowej. Największą rolę odgrywa odpowiednie dobranie wartości wag w zależności od tego jak bardzo zależy nam na jednym z kryterium, ekonomicznym związanym ze zmniejszeniem czasów przestojów na stacjach roboczych, czy ergonomicznym związanym ze zbalansowaniem obciążeń posturalnych i fizycznych na pracownika. Dla wartości wag WT=0,5 oraz WR=0,5 dostrzegamy bardzo dobre wyniki zarówno zbalansowania czasów jak i obciążeń stacji. Dwukryterialna heurystyka dla problemu balansowania linii montażowej znacznie zwiększa możliwości zbalansowania linii zarówno ekonomicznie jak i ergonomicznie w zależności od doboru wartości odpowiednich wag.

Praca współfinansowana ze środków BK218/2009/Rau1.

LITERATURA

- [1] Aaras, A. and Westgaard, R. H.: *Further studies of postural load and musculo-skeletal injuries of workers at an electro-mechanical assembly plant*. Applied Ergonomics, 18(3), 1987, pp.211-219.
- [2] Amen, M.: *Heuristic methods for cost-oriented assembly line balancing: a comparison on solution quality and computing time*. International Journal of Production Economics, 69, 2001, pp.255-264.
- [3] Boysen N., Fliedner Malte., Scholl A.: *A classification of assembly line balancing problem*. Jenaer Schriften zur Wirtschaftswissenschaft, 12/2006, ISSN-1611-1311.
- [4] Erel E., Sarin S. A.: *Survey of the Assembly Line Balancing Procedures*. Production Planning and Control Vol.9, No.5, 1998, pp.414-134.
- [5] Hignett S., McAtamney L.: *Rapid entire body assessment (REBA)*. Applied Ergonomics, 3, 2000, pp.201-205.
- [6] Joturanda Ch., Nanthavanij S.: *Heuristic Procedure for Two-Criterion Assembly Line Balancing Problem*, IEMS Vol.5, No. 2, 2006.
- [7] Kilbridge M.D., Wester L.: *A Heuristic Method of Assembly Line Balancing*. The Journal of Industrial Engineering, Vol.12, pp.292-298.
- [8] Lueder R.: *A Proposed RULA for Computer Users*. Proceedings of Ergonomics Summer Workshop, UC Berkley Center for Occupational & Environmental Health Continuing Educational Program, San Francisco, August 8-9, 1996.
- [9] 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, pp.577-586.
- [10] Salvesson M.E.: *The Assembly Line Balancing Problem*. The Journal of Industrial Engineering Vol.6, 1955, pp.18-25.
- [11] Scholl A.: *Balancing and Sequencing of Assembly Lines*. Physica-Verlag Heidelberg 1998.
- [12] Shkurba V.V. Beletskii.: *Numerical methods for assembly line balancing problem (survey)*. Cybernetics and system analysis, Vol. 13, Number 1, 1977, pp.96-108.

TWO – CRITERION ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM

Abstract

In the paper results of investigation of manual assembly line balancing problem are presented. The discussed two-criterion heuristic considers minimization of the idle times and the overload of workers working on assembly workstation. Each manual operation need different physical effort and characterizes different risk of dangerous movements. Two-criterion method uses known methodology (RULA and REBA) to describe and analyze the entire posture of body, used force and types of performed movements or action. Results and conclusions of the research allow to modify known assembly line balance calculated by heuristics. Simple numerical example is presented and the final results for different value of WT and WR wages are shown.

Keywords: heuristics methods, assembly line balancing problem, ergonomics