

SZEREGOWANIE ZADAŃ W PROBLEMIE BALANSOWANIA LINII MONTAŻOWEJ

Waldemar GRZECHCA

Streszczenie: Praca przedstawia problem balansowania linii montażowej dla produkcji wielowersyjnej. Oprócz rozwiązania problemu związanego z balansowaniem linii, a więc minimalizacją czasu strat, dodatkowo należy dokonać szeregowania tych zadań aby niwelować różnice wynikające z wykonywania różnych wersji produktu na tej samej linii. W artykule omówiono cechy produkcji wielowersyjnej a następnie podano sposób na jej zbalansowanie na linii montażowej oraz na szeregowanie wykonywanych operacji. Szczególną uwagę skupiono na problemie szeregowania podając nową heurystykę oraz ocenę uzyskiwanych rozwiązań.

Słowa kluczowe: problem BLM, sterowanie produkcją, szeregowanie zadań, kryteria jakościowe.

1. Wprowadzenie

Chociaż geneza powstania pierwszych linii montażowych tak naprawdę sięga znacznie dalej, to jednak maj, roku 1913 uznaje się za absolutny przełom w historii systemów produkcyjnych, a w szczególności ich zastosowania do produkcji masowej. Wtedy też Henry Ford, założyciel i ówczesny prezes Ford Motor Company dostosował swoją fabrykę w Highland Park w stanie Michigan do standardów, które na zawsze zmieniły podejście człowieka do zagadnień produkcji i wytwarzania na skalę masową.

Gdy inni przemysłowcy, nie tylko amerykańscy, zdali sobie sprawę z faktu, w jak wielkim stopniu sukces Forda opiera się na ruchomej linii montażowej, wielu z nich szybko zastosowało ten właśnie wzorzec w swoich fabrykach. Już wkrótce niezliczone produkty, od butów, poprzez żywność w puszkach i słojach, na maszynach prądniczych kończąc zaczęto produkować w skali masowej, na wolno sunących, stabilnych, ruchomych liniach montażowych. Dobra uważane dotąd za luksusowe i adresowane do zamożniejszej części społeczeństwa stały się na tyle tanie, że mogły bez większych problemów trafić do masowego odbiorcy.

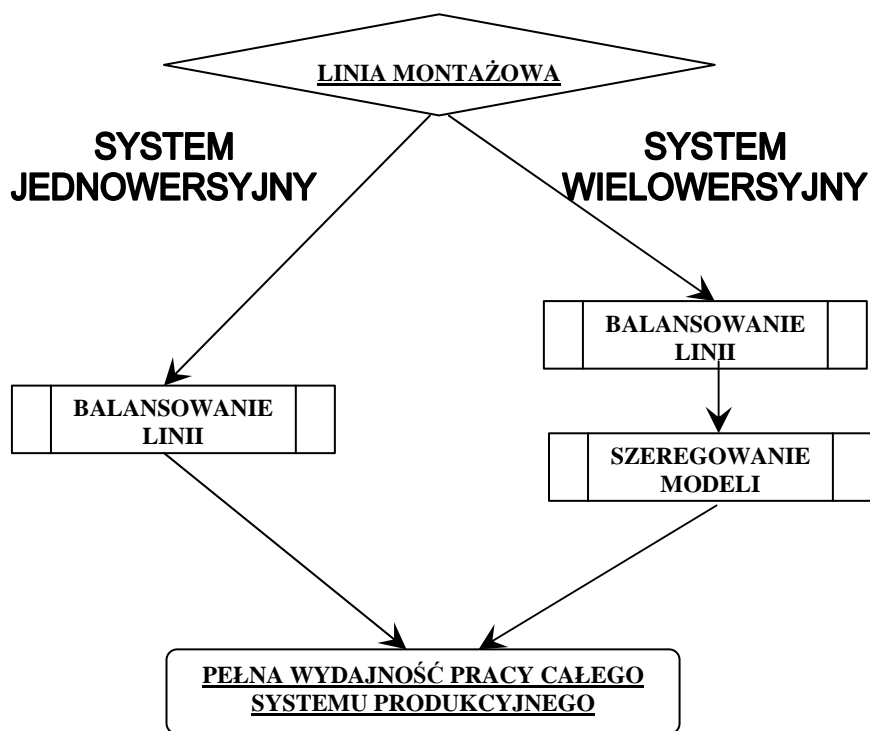
Po dziś dzień systemy produkcyjne są w głównej mierze oparte na przepływowej linii produkcyjnej – są one wszechobecne i dotyczą większości produkowanych obecnie towarów. Można wymienić przynajmniej kilka powodów takiego stanu rzeczy, jak chociażby aspekt społeczny, technologiczny czy modernizacyjny. Jednak na pierwszy plan wysuwa się zdecydowanie wymiar stricte ekonomiczny. Aby utrzymać się na wymagającym, często zmieniającym się i silnie konkurencyjnym rynku producenci niejako zmuszani są do ciągłego podnoszenia jakości swych produktów, cyklicznego obniżania ich cen (czyli przede wszystkim kosztów ich produkcji) oraz stałego skracania czasu wytwarzania. Ponadto, w związku ze stale rozwijającym się społeczeństwem, którego wymagania stają się coraz wyższe – wymagania coraz bardziej ewoluują, przez co są znacznie mniej przewidywalne, a jednocześnie w większym stopniu skonkretyzowane i wysublimowane – bezustannie rośnie zapotrzebowanie na różne warianty i gatunki tych

samych produktów.

Wychodząc temu naprzeciw wytwórcy dostarczają na rynek wyroby w kilku, czasem kilkunastu odmianach różniących się między sobą z reguły kilkoma detalami. Detalami, które w gruncie rzeczy stanowią o jakości produkcji w danym zakładzie wytwórczym. Mogą to być choćby samochody jednego modelu różniące się zamontowaną skrzynią biegów (manualną bądź automatyczną) lub wyposażeniem, komputery tej samej serii z procesorami o różnym taktowaniu zegara lub różną pamięcią operacyjną, czy też różnego rodzaju akcesoria użytku codziennego przeznaczone dla osób prawo, lub leworęcznych (pióra wieczne, myszki komputerowe, piły spalinowe itp.).

2. Charakterystyka produkcji wielowersyjnej

Produkcja wielowersyjna na linii montażowej posiada wiele cech wspólnych obowiązujących dla linii jednowersyjnej. Rysunek 1 przedstawia różnicę w podejściu do problemu jedno- i wielowersyjnego produkcji [1].



Rys. 1. Problemy optymalizacyjne dla produkcji jedno- i wielowersyjnej

Systemy produkcji wielowersyjnej (ang. mixed-model production systems), zdobywają coraz większą rzeszę użytkowników w środowiskach przemysłowych, są także stale rozwijane i doskonalone. Jest to spowodowane ich niewątpliwą ergonomią, wszechstronnością i elastycznością, z których to producenci wynoszą wiele korzyści, jak na przykład:

- zapewnienie regularności i ciągłości produkcji,

- eliminacja zatorów, przestojów i ‘wąskich gardeł’ (ang. ‘bottlenecks’),
- ‘jakość wpisana w produkcję’ czyli pełna kontrola jakości na każdym etapie montażu,
- skrócenie cykli produkcyjnych i zwiększenie wydajności,
- optymalizacja komunikacji współprodukcyjnej, w tym dostaw komponentów na linię,
- łatwość obsługi,
- relatywnie niskie koszty produkcji,
- bezpieczeństwo pracy,
- ergonomia środowiska.

Systemy te ponadto zapewniają stały przepływ materiału, redukują do minimum poziom inwentarza potrzebnego do całościowej produkcji oraz, o czym już wspomniano, są bardzo elastyczne względem zmian w modelach. Jednakże, wszystkie te niewątpliwe zalety muszą mieć też swoją cenę – systemy te wymagają skomplikowanego i specjalistycznego, a co za tym idzie również bardzo drogiego wyposażenia nastawionego na minimalizację potencjalnych opóźnień oraz eliminację ewentualnych zatorów i przezbrojeń.

Sama idea produkcji wielowersyjnej sprowadza się do założenia, iż na jednej, elastycznej linii montażowej wspólnie montowanych jest przynajmniej kilka modeli (wersji) tego samego produktu podstawowego. Modelowość (wersyjność) wspomnianego produktu podstawowego rozumiana jest tu w sposób następujący: poszczególne modele różnią się od siebie pod względem kolorów, rozmiarów, użytych komponentów i (lub) wyposażeniem. W przytłaczającej większości przypadków znaczny procent podzespołów montowanych na linii jest wspólny dla wszystkich modeli a występujące różnice wynikają przede wszystkim z różnych czasów operacji dla tych samych komponentów. Pozostałe różnice zasadniczo generowane są w wyniku montowania, lub nie, poszczególnych detali, którymi różnią się wersje modelu bazowego.

3. Problem balansowania linii montażowej

Projektując zbalansowaną linię montażową grupujemy elementy robocze pamiętając o narzuceniu następujących ograniczeń:

- relacje kolejnościowe,
- minimalna liczba stacji roboczych K wynosi jeden,
- czas cyklu c , rozumiany jako wielkość czasu dostępnego na każdej stacji, jest większy lub równy maksymalnemu czasowi stacji.

Aby znaleźć rozwiązanie problemu balansowania linii montażowej wykorzystuje się metody dokładne gwarantujące rozwiązanie optymalne lub metody przybliżone, które gwarantują wprawdzie tylko rozwiązanie dopuszczalne ale mogą być stosowane dla problemów o dużej liczbie zadań [2], [3].

Pomijając założenie, że analogiczne zadania spośród wszystkich modeli muszą być przypisane do tej samej stacji roboczej, problem balansowania linii wielowersyjnej można podzielić na m (liczba wersji) niezależnych problemów balansowania linii jednowersyjnej. Jednakże takie podejście do problemu może skutkować przyporządkowaniem identycznych operacji do różnych stacji roboczych, a to zazwyczaj nie jest pożądanym rozwiązaniem ze względu na konieczność zastosowania dodatkowych urządzeń, pogorszenie efektu specjalizacji, trudniejszą kontrolą nad produkcją oraz spadkiem efektywności spowodowanym wydłużeniem czasu potrzebnego na ustawianie urządzeń. Dlatego problem

balansowania wielowersyjnej linii montażowej zazwyczaj definiowany jest w oparciu o model średni, to znaczy, balansowanie linii wielowersyjnej opiera się na tych samych problemach realizacyjnych co balansowanie linii jednowersyjnej. Tak więc zasadniczo którakolwiek z metod dokładnych lub heurystycznych stosowanych do balansowania linii jednowersyjnej może być zastosowana do uzyskania rozwiązania problemu balansowania linii wielowersyjnej. Otrzymane rozwiązania zapewnią minimalną ilość stacji roboczych lub minimalny czas cyklu w odniesieniu do modelu średniego. Powyższe podejście nie próbuje jednak wyrównać, zależnego od aktualnie produkowanego zestawu modeli, wykorzystania poszczególnych stacji roboczych. To znaczy, że nie bierzemy pod uwagę żadnych dodatkowych funkcji, które wprowadzałyby rozróżnienie pomiędzy kilkoma jednakowymi (czasem nawet optymalnymi ze względu na c lub K) rozwiązaniami otrzymanymi dla rozpatrywanej dla linii jednowersyjnej (model średni). W celu porównania uzyskanych rozwiązań pod względem stopnia wykorzystania stacji roboczych w zależności od czasów operacji dla poszczególnych modeli można wykorzystać przedstawione w kolejnym punkcie kryteria. Mają one na celu wskazanie rozwiązania, które najbardziej zbliża nas do linii przez czasów obciążeń oraz czasów przestojów.

Zadaniem prezentowanych poniżej kryteriów jest zapewnienie równomiernego wykorzystania wszystkich dostępnych stacji roboczych. Kryteria te powinny umożliwić, spośród dostępnych przyporządkowań operacji do stacji roboczych, wybór tych rozwiązań które zapobiegają wystąpieniu na linii montażowej zjawiska przeciążenia pracą lub beczynności [4].

Kryterium 1

Poniższą funkcja minimalizuje sumę wartości bezwzględnych różnic pomiędzy średnim całkowitym czasem operacji \bar{t}_m a całkowitym czasem obciążenia stacji τ'_{mk} wszystkich modeli i stacji:

$$\text{Minimalizuj } \Psi_1 = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \left| \tau'_{mk} - \bar{t}_m \right| \quad (1)$$

Kryterium 2

Jest to uniezależniona od zestawu modeli (wersji) funkcja minimalizująca maksymalne odchylenie czasu operacji któregośkolwiek z modeli od średniego obciążenia stacji na sztukę:

$$\text{Minimalizuj } \Psi_2 = \max \left\{ \left| \tau_{mk} - \bar{t}_m \right| \right\} \quad (2)$$

gdzie: $k = 1, \dots, K$ i $m = 1, \dots, M$.

Kryterium 3

Kryterium to minimalizuje sumę przekroczeń czasu cyklu Δ_{mk}^+ dla wszystkich modeli (wersji) i wszystkich stacji:

$$\text{Minimalizuj } \Psi_3 = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \max \{ 0, \tau_{mk} - c \} = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \Delta_{mk}^+ \quad (3)$$

4. Szeregowanie wersji produktu

Po dokonaniu balansu linii montażowej otrzymuje sekwencję operacji przydzielanych

do poszczególnych stanowisk montażowych. Dla produkcji jednowersyjnej problem optymalizacyjny zostaje w ten chwili zakończony. W przypadku produkcji wielowersyjnej dokonujemy dodatkowo szeregowania wersji wytwarzanego produktu. Krok ten pozwala na zmniejszenie sumy czasu przestoju oraz czasów przeciążeń stacji roboczych na linii. Istnieje w literaturze wiele heurystyk pozwalających na uzyskanie rozwiązania tego etapu optymalizacji.

Autor tej pracy proponuje nową heurystykę średniego czasu operacji. Uzyskiwanie rozwiązania za pomocą tej metody jest następujące:

- przyjmuje się znajomość wyniku wynikające z pierwszego etapu optymalizacyjnego czyli z procesu balansowania dla modelu średniego,
- sprawdzenie jakości i poprawności zbalansowania linii poprzez wyliczenie całkowitego czasu dostępnego na stację, czyli $I * c$ (gdzie I – popyt całkowity, c – czas cyklu), a następnie sprawdzenie czy suma czasów operacji na każdej ze stacji mieści się w przedziale czasu, jaki jest dostępny na daną stację,
- wstępna sekwencja modeli tworzona jest na podstawie średniego czasu operacji przypadającego na model – t_m . W tym wypadku pierwszeństwo przypada na model, którego średni czas operacji jest najbliższy czasowi cyklu, czyli na model, dla którego różnica pomiędzy czasem cyklu a średnim czasem operacji ma najniższą wartość – bez względu na to czy czas cyklu jest większy czy też mniejszy od rozpatrywanego średniego czasu operacji dla modelu (znaki '+' i '-' przed otrzymanym wynikiem nie odgrywają żadnej roli). Jeżeli jednak pomiędzy modelami występuje konflikt (identyczny średni czas operacji charakteryzuje więcej niż jeden model) należy posłużyć się zasadą pierwszeństwa wynikającą z indeksowania modeli – model o niższym indeksie 'wchodzi' jako pierwszy,
- uaktualnienie otrzymanej sekwencji podstawowej w oparciu o popyt na każdy z modeli, przy założeniu, że do sekwencji podstawowej dopisywane są kolejno uaktualniane sekwencje w sposób iteracyjny. Przyjąć należy, iż liczba 'dopisywanych' sekwencji ma być równa co do wartości najwyższemu popytowi na model w rozpatrywanym systemie. Utworzoną w punkcie poprzednim sekwencję podstawową traktuje się jako pierwsze dopisanie – kolejne sekwencje natomiast tworzy się w oparciu o zapotrzebowanie na modele w myśl zasady, że wielokrotność modeli w sekwencji odpowiada rzeczywistemu popytowi na te modele.
- jako sekwencję finalną traktuje się tą otrzymaną w iteracji, której indeks jest równy najwyższemu popytowi na model w rozwiązywanym problemie – mówiąc prościej uszeregowanie kompletne uzyskuje się w ostatniej iteracji.

5. Przykład obliczeniowy

Aby zobrazować działanie proponowanej heurystyki posłużono się przykładem numerycznym. Ze względu na objętość pracy skupiono się na etapie szeregowania przyjmując iż balans linii został wcześniej wyznaczony i jest znany. Dokładny opis otrzymywania balansu można między innymi znaleźć w pracy [5]. Rozważono problem produkcyjny składający się z czterech modeli ($M=4$), które montowane są na linii produkcyjnej składającej się z 5 stacji roboczych ($K=5$). Popyt na kolejne modele wynosi odpowiednio $d_1 = 2$, $d_2 = 3$, $d_3 = 2$ oraz $d_4 = 1$, czas cyklu został ustalony na poziomie $c = 5$ jednostek czasowych, natomiast długość stacji będąca iloczynem całkowitego popytu i czasu cyklu wynosi $I = 40$. Jak już wspomniano linie została uprzednio zbalansowana,

a więc znane są wartości zajętości stanowisk roboczych dla poszczególnych modeli produktu finalnego. Dane te zostały przedstawione w Tabeli 1.

Tab. 1. Dane wejściowe dla szeregowania linii po etapie balansowania

c	I	d	m	K					t _m
				S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	
5	8	2	m_1	0	2	6	5	2	3
		3	m_2	3	4	7	0	6	4
		1	m_3	6	7	0	5	5	4,6
		2	m_4	0	3	3	6	1	2,6
		-	r' _k	15	29	39	27	29	27,8

gdzie: r'_k – całkowity czas stacji dla wszystkich wersji produktów,
t_m – średni czas dla poszczególnych stacji dla m-tego modelu.

Każdy z całkowitych czasów stacji r'_k zawiera się w 40 jednostkach, więc jakość zbalansowania linii pozwala na swobodne przeprowadzenie sekwencjonowania modeli. W przeciwnym wypadku, czyli gdy chociaż jeden z całkowitych czasów stacji r'_k przekracza czas, jaki jest dostępny na stację należy powtórzyć balansowanie gdyż poziom jakości bieżącego zbalansowania linii nie pozwala na utworzenie efektywnej sekwencji modeli.

W przypadku prezentowanego przykładu numerycznego kolejny etap heurystyki to wyznaczenie różnic pomiędzy t_m oraz r'_k:

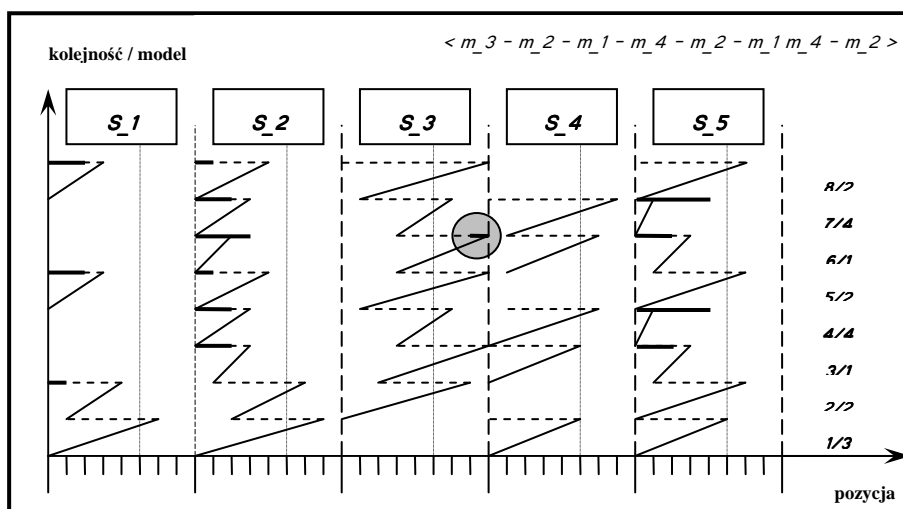
$$\begin{aligned} m_1 & 27,8 - 3,0 = 24,8 \\ m_2 & 27,8 - 4,0 = 23,8 \\ m_3 & 27,8 - 4,6 = 23,2 \\ m_4 & 27,8 - 2,6 = 25,2. \end{aligned}$$

Stąd też otrzymana sekwencja podstawowa przybiera następującą postać:
< m₃ – m₂ – m₁ – m₄ >.

Uaktualnienie otrzymanej sekwencji podstawowej w oparciu o popyt na każdy z modeli pozwala wyznaczyć sekwencję końcową

$$\begin{aligned} & < m_3 - m_2 - m_1 - m_4 > \\ & < m_3 - m_2 - m_1 - m_4 - m_2 - m_1 - m_4 > \\ & < m_3 - m_2 - m_1 - m_4 - m_2 - m_1 - m_4 - m_2 >. \end{aligned}$$

Dla tak otrzymanej sekwencji możemy dokonać oceny jakości uzyskanego rozwiązania. Dla produkcji jednowersyjnej ocena jakości rozwiązania sprowadza się do wyliczenia efektywności linii, czasu linii oraz współczynnika gładkości [1]. Dla linii wielowersyjnej, po wyznaczeniu balansu i szeregowaniu kolejnych wersji produktów, konstruuje się tzw. diagram przemieszczeń operatorów w obrębie stacji roboczej [6]. Dla uzyskanego rozwiązania diagram taki został przedstawiony na rysunku 2.



Rys. 2. Diagram przemieszczeń operatorów

Aby zinterpretować prawidłowy stworzony graf należy pamiętać:

- startowa pozycja wewnątrz każdej ze stacji ustawiana jest jako 0 jednostek czasowych – lewa granica stacji,
- krańcowa pozycja wewnątrz każdej ze stacji ustawiana jest jako 8 jednostek czasowych (wynika to z treści zadania, ponadto długość wszystkich stacji jest stała) – prawa granica stacji,
- ruch operatora odbywa się od początku do końca stacji – od lewej do prawej granicy stacji (wynika to z założeń dla linii technologicznej),
- montaż modelu reprezentowany jest przez ciągle linie ukośne kreślone od lewej do prawej strony wewnątrz stacji,
- powrót operatora obrazują poziome linie przerywane kreślone od prawej do lewej strony wewnątrz stacji,
- pogrubione fragmenty poziomych linii przerywanych przy prawej granicy stacji oznaczają pracę dodatkową,
- pogrubione fragmenty poziomych linii przerywanych przy lewej granicy stacji oznaczają czasy przestoju (czasy jałowe),
- czas cyklu jest zaznaczony pionową linią kropkowaną na poziomie pięciu jednostek czasowych każdej ze stacji (wynika to z założeń poczynionych w treści zadania).

Diagram umożliwia szczegółową analizę czasu przestoju i czasu dodatkowych operatorów.

6. Wnioski i uwagi

Przedstawiona praca dotyczy analizy balansowania oraz szeregowania wielowersyjnej linii montażowej. Znaczną uwagę skupiono na drugim etapie optymalizacyjnym mianowicie tworzeniu sekwencji różnych wersji produkowanego wyrobu finalnego bazując na znajomości wcześniej uzyskanego balansu. Linia montażowa wielowersyjna oprócz znanego z linii montażowej jednowersyjnej czasu przestoju może generować dodatkowy

czas zwany czasem przeciążenia. Oba czasy są zjawiskami negatywnymi i dlatego też rozwiązanie problemu balansowania i szeregowania wersji produktu jest niesłychanie ważne dla zapewnienia dobrych wyników ekonomicznych każdego zakładu montażowego cechującego się typem produkcji wielowersyjnej. Dla analizowanego w pkt. 5 przykładu numerycznego otrzymaliśmy diagram przemieszczeń operatora w obrębie stacji roboczej (rys. 2). Całkowity czas wypracowany przez pracowników dodatkowych wynosi 1 jednostkę czasową, natomiast całkowity czas jałowy stabilizuje się na poziomie 26 jednostek czasowych. Zjawisko przeciążenia stacji (czego efektem są występujące prace dodatkowe) ma miejsce na stacji S_3. Stacją, która wygenerowała najwyższy wskaźnik czasu przestoju jest stacja S_2 z 11 jednostkami czasowymi czasu jałowego. Tylko stacja S_4 pozostaje całkowicie wolna od przestojów czasowych. Konkludując, diagram przemieszczeń operatora jest źródłem wiedzy dotyczących czasów przestojów i czasów przeciążeń stacji co pozwala na ocenę balansu i szeregowania a konsekwencją tej analizy jest przyjęcie otrzymanego rozwiązania jako akceptowalnego lub poszukiwanie nowego.

Praca powstała przy wsparciu finansowym ze środków BK 209/Rau1/2008/t.5

Literatura

1. Scholl A.: *Balancing and Sequencing of Assembly Lines*, Physica-Verlag, Heidelberg, 1999.
2. Salvesson M.E.: *The Assembly Line Balancing Problem*, *The Journal of Industrial Engineering* Vol. 6, 1955, s. 18-25.
3. 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.
4. Erel E., Gocken H.: *Shortest Route Formulation of Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem*, *Eur. J. Oper. Res.*, 116, 1999, s. 194-204.
5. Grzechca W.: *Projektowanie wielowersyjnej linii montażowej*, X Szkoła komputerowego wspomaganie projektowania, wytwarzania i eksploatacji, WAT Warszawa 2006, s. 47-60.
6. Battini D., Facio M., Ferrari E., Persona A., Sgarbossa F.: *Design Configuration for a Mixed Model Assembly System in Case of Low Product Demand*, *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology* 34(1), 2007, s. 188-200.

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