

DWUKRYTERIALNA METODA PLANOWANIA TAKTYCZNEGO, DOTYCZĄCEGO MONTAŻU W HYBRYDOWYCH SYSTEMACH PRZEPEŁYWOWYCH

A bi-criteria method of tactical planning for assembly in hybrid flow shop systems

Marek MAGIERA

S t r e s z c z e n i e: We wprowadzeniu opisano wykorzystywane w montażu systemy przepływowe. Następnie przedstawiono metodę przeznaczoną do rozwiązywania zadań dotyczących planowania taktycznego (średnio- i krótkookresowego) dla elastycznych systemów montażowych. Do zadań tych należy planowanie zapotrzebowania na zasoby oraz optymalizacja obciążeń maszyn w celu wykonania zleceń produkcyjnych. Pierwsze z wymienionych zadań dotyczy rozdziału podajników części pomiędzy stadią jednokierunkowej linii montażowej z maszynami równoległymi, czyli hybrydowego systemu przepływowego. Drugie zadanie związane jest z równoważeniem obciążeń stadiów.

Opisano parametry i zdefiniowano zmienne, służące rozwiązywaniu zadań planowania taktycznego. Opracowano procedurę przeznaczoną do oszacowania obciążenia stadium, stanowiącego wąskie gardło w systemie. W procedurze tej wzięto pod uwagę planowane przestoje maszyn montażowych, przeznaczone m.in. na remonty i konserwacje. Metoda charakteryzuje się również uwzględnieniem losowych przestojów maszyn montażowych, np. awarii. W celu rozwiązywania problemów dotyczących planowania taktycznego, zbudowane zostały liniowe modele zadań programowania całkowitoliczbowego. Jeden z modeli matematycznych dotyczy sztywnych marszrut montażu, a drugi model zbudowano do wykorzystania w przypadku alternatywnych marszrut montażu. W funkcji celu, której wartość jest minimalizowana, uwzględniono dwa kryteria. Pierwsze z nich dotyczy równoważenia obciążeń stadiów. Drugie kryterium służy minimalizacji przepływów międzystadialnych. Rozwiązaniem opisanych w artykule zadań są przydziały operacji do stadiów. Wyznaczane jest również rozmieszczenie podajników części składowych montowanych produktów, wykorzystywanych do wykonywania tych operacji, w przypadku których części pobierane są z podajników.

Zaprezentowano wyniki eksperymentów obliczeniowych, służących do weryfikacji metody i porównania rozwiązań, dotyczących różnych wag przy uwzględnieniu sztywnych lub alternatywnych marszrut montażu.

S ł o w a k l u c z o w e: systemy montażowe, harmonogramowanie montażu, planowanie taktyczne, programowanie całkowitoliczbowe, optymalizacja wielokryterialna

A b s t r a c t: A flow shop systems connected with assembly are described in the introduction. The method of tactical planning (medium-term and short-term) for a flexible assembly systems is presented in the next chapters. Demand for planning resources and optimization of stage workloads are regarded tasks of tactical planning. The first of tasks is connected with allocation of part feeders among the stages (the stage is set of parallel machines) – for an unidirectional assembly line with parallel machines (a hybrid flow shop). The second of tasks is related to balancing stage workloads.

A parameters and variables are defined for solving of tactical planning problems. A procedure was constructed to estimate the workload of stadium which is a bottleneck in the system. This procedure was taken into consideration planned downtime of assembly machines, among others for repairs and maintenance of the machines. The method is also characterized by taking into account the random downtime of machines, for example connected with failures.

The mathematical models of integer programming are constructed for the solving of described tasks of tactical planning. The first model is formulated for a fixed assembly routes and the second model is used for an alternative assembly routes. Two criteria are regarded in an objective function. The first of these concerns the balancing stages workloads. The second criterion is the minimization of flows between stages. The solution of tasks described in article are assignments of assembly operations to stages. The part feeders are also assigned to the stages.

The results of computational experiments with the proposed method are presented. The results obtained for the different criterion weights and for a fixed and for an alternative assembly routes are compared.

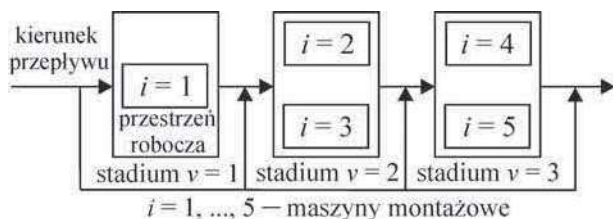
K e y w o r d s: assembly systems, assembly scheduling, tactical planning, integer programming, multi-criteria optimization

Wprowadzenie – systemy przepływowe dotyczące montażu

Na początku zostaną wyjaśnione terminy użyte w tytule artykułu. Zaprezentowana w pracy metoda dotyczy zastosowania jednego z rodzajów systemów przepływowych do równoczesnego montażu różnych typów produktów. Do montażu w systemach przepływowych wykorzystywane są linie montażowe. Przepływ jest tu rozumiany jako przemieszczanie się produktów, których dotyczą operacje wykonywane na poszczególnych maszynach.

W przypadku montażu wykorzystuje się następujące systemy przepływowe (zgodnie z ich nazewnictwem i opisem zamieszczonym w pracy [1]):

- system przepływowy (flow shop). Dotyczy on linii montażowych bez równoległych maszyn. W przypadku każdego produktu wykonywane są operacje na specjalistycznych maszynach. Kolejność wykonywania operacji dotyczących produktów jest zgodna z rozmieszczeniem maszyn w linii. Dzięki temu możliwy jest jednokierunkowy przepływ,
- permutacyjny system przepływowy (permutation flow shop). Jest to szczególny przypadek powyższej



Rys. 1. Przykład struktury hybridowego systemu przepływowego
Fig. 1. Example of structure of hybrid flow shop

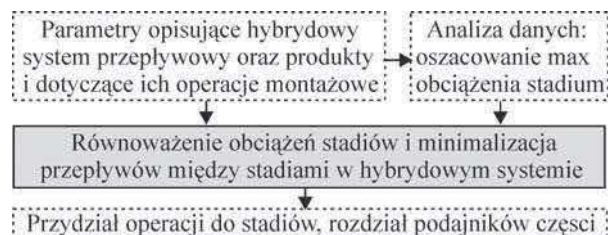
ogólnie scharakteryzowanego systemu przepływowego. System ten wyróżnia jednakowa kolejność wykonywania operacji przypisanych poszczególnym produktom. Produkty przepływają więc zgodnie z kolejnością wprowadzenia produktów do systemu montażowego. W przypadku n produktów istnieje $n!$ możliwości wprowadzenia produktów do systemu – tyle jest permutacji dotyczących kolejności przepływów produktów,

- hybridowy system przepływowo (hybrid flow shop) nazywany jest także systemem przepływowym z maszynami równoległymi lub elastycznym systemem przepływowym (flexible flow shop). Jest to połączenie systemu przepływowego (flow shop) i maszyn równoległych. Kolejność przepływu produktów przez poszczególne stadia systemu (zbiory maszyn pracujących równolegle) nie musi być zgodna z kolejnością wprowadzania produktów do systemu montażowego. Przykładowa struktura tego najbardziej złożonego systemu przepływowego przedstawiono na rys. 1.

Planowanie produkcji w opisanych systemach odbywa się na następujących poziomach: strategicznym (długookresowym), taktycznym (średnio- i krótkookresowym), a także operacyjnym (związanym z bieżącym funkcjonowaniem systemu montażowego) [2]. Do zadań planowania strategicznego zalicza się m.in. projektowanie systemu montażowego oraz produktów, które będą montowane w tym systemie. Zaprezentowana w kolejnych rozdziałach metoda służy jednak do rozwiązywania zadań planowania taktycznego – w zakresie optymalizacji obciążeń maszyn, planowania zapotrzebowania na podajniki części montowanych produktów. Opis zadań rozwiązywanych za pomocą opracowanej metody zawarto w rozdz. 2, zaś rozdz. 3 poświęcony jest matematycznemu opisowi metody. Rozwiązania zadań planowania taktycznego wykorzystywane są na poziomie operacyjnym – w szeregowaniu operacji montażowych.

Ogólny opis metody

Zgodnie ze schematem blokowym metody, przedstawionym na rys. 2, w metodzie należy uwzględnić wiele parametrów, dotyczących montowanych produktów, maszyn montażowych. Szczegółowy wykaz parametrów zamieszczono w rozdz. 3, gdzie przedstawiono również relacje



Rys. 2. Schemat blokowy metody
Fig. 2. Block diagram of the method

matematyczne pomiędzy tymi parametrami i zmiennymi, sformułowanymi w celu rozwiązania problemu. Dane, określające planowane okresy niedostępności maszyn, uwzględnione zostały w procedurze oszacowania średniego obciążenia stadium. W metodzie wzięto pod uwagę także losowe przestoje maszyn.

Metoda służy do równoczesnej minimalizacji obciążeń stadiów i minimalizacji liczby przemieszczeń produktów pomiędzy poszczególnymi stadiami. Obciążenie stadium to czas, w którym operacje wykonywane są na maszynach umieszczonych w tym stadium. Uwzględniono więc dwa kryteria, które są przeważnie w konflikcie. Zmniejszenie liczby przemieszczeń produktów pomiędzy stadiami skutkuje często zwiększeniem obciążeń stadiów.

W celu wyznaczenia rozwiązania opisanego problemu zbudowane zostały liniowe modele zadań programowania całkowitoliczbowego (PC). Modele te zaprezentowano w następnym rozdziale. W modelach tych uwzględniono dwa rodzaje marszrut montażu:

- w modelu M1: sztywne marszrut montażu – marszrut, w przypadku których każdy typ operacji przydzielany jest tylko do jednego stadium,
- w modelu M2: alternatywne marszrut montażu – marszrut, w przypadku których każdy typ operacji przydzielony jest co najmniej do jednego stadium.

Zgodnie ze schematem zamieszczonym na rys. 2, rozwiązaniem zadania są przydziały operacji do poszczególnych stadiów. W przypadku, gdy wykonanie operacji polega na domontowaniu części składowej do uprzednio zmontowanych części, a część ta pobierana jest z podajnika części, to do rozwiązania zadania należy również rozdział podajników części.

Należy podkreślić, że metoda służy równoważeniu obciążeń stadiów, a nie obciążeń maszyn. Operacje przydzielane są do stadiów, a nie maszyn. W związku z tym przydział operacji do maszyn dokonywany jest na poziomie planowania operacyjnego, w przypadku którego szereguje się operacje. Rezultatem uszeregowania operacji jest harmonogram wykonywania operacji, w którym uwzględnione są przydziały operacji do maszyn wyznaczone za pomocą opracowanej metody. Rozwiązanie opisanego zadania optymalizacji obciążeń stadiów i minimalizacji przepływów międzystadialnych należy więc do danych uwzględnianych w harmonogramowaniu montażu – np. za pomocą metod zaprezentowanych w [3] i [4].

Matematyczny opis metody

W celu sformułowania liniowych modeli matematycznych zadań równoczesnego równoważenia obciążeń stadiów i minimalizacji przepływów międzystadialnych przyjęto oznaczenia parametrów i zmiennych, które zestawiono w tab. 1.

Planowane przestoje maszyn (np. konserwacje, przeglądy) uwzględniono w opracowanej metodzie i dotychczas czasu, który nie przekracza minimalnego obciążenia stadium w systemie montażowym oznaczonego LBP_{\max} , a wyznaczanego zgodnie z następującą procedurą:

- 1) Na podstawie równania (1) oblicz c_k – całkowity czas wykonywania operacji dotyczących wszystkich sztuk

produktu $k \in K$, na które jest zapotrzebowanie wynoszące d_k .

$$c_k = \sum_{j \in J_k} d_k p_{jk}; \quad k \in K \quad (1)$$

- 2) Zgodnie z równaniem (2) oblicz e – średni czas obciążenia stadium. Zastosowano funkcję round służącą zaokrągleniu do liczby całkowitej (M – liczba maszyn, zgodnie z tab. 1).

$$e = \text{round} \left(\frac{1}{M} \sum_{k \in K} c_k \right) \quad (2)$$

- 3) W przypadku każdej maszyny $i \in I$ oszacuj jej minimalne obciążenie ω_i , uwzględniające ograniczoną

Tabela 1. Zestawienie parametrów i zmiennych
Table 1. Summary of parameters and variables

Podstawowe zbiory:	
I	– zbiór maszyn: $I = \{1, \dots, M\}$,
J	– zbiór typów operacji: $J = \{1, \dots, N\}$,
K	– zbiór typów produktów: $K = \{1, \dots, T\}$,
L	– zbiór przedziałów czasowych: $L = \{1, \dots, H\}$,
S	– zbiór indeksów produktów (dotyczy modelu M2, każda sztuka ma inny indeks); $S = \{1, \dots, \max_{k \in K} d_k\}$,
V	– zbiór stadiów: $V = \{1, \dots, \vartheta\}$,
Pozostałe zbiory:	
I_j	– zbiór maszyn zdolnych do wykonania operacji typu $j \in J$, $I_j \subset I$,
V_j	– zbiór stadiów, w których maszyny są zdolne do wykonania operacji typu $j \in J$, $V_j \subset V$,
J^c	– zbiór operacji wymagających wykorzystania podajnika części, $J^c \subset J$,
J_k	– zbiór operacji wykonywanych dla produktu $k \in K$, $J_k \subset J$,
R_k	– zbiór uporządkowanych par operacji (r, j) kolejno wykonywanych dla produktu k , gdzie $r, j \in J_k$,
Z	– zbiór uporządkowanych par (i, v) , takich, że maszyna i należy do stadium v ,
Parametry:	
a_{vj}	– przestrzeń robocza maszyny umieszczonej w stadium v wymagana dla wykonania operacji j ,
b_v	– przestrzeń robocza maszyny umieszczonej w stadium v , w której mogą być umieszczone podajniki,
d_k	– zapotrzebowanie (popyt) na produkt k ; inaczej: liczba sztuk produktu k , która ma być zmontowana,
m_v	– liczba maszyn umieszczonych w stadium v ,
p_{jk}	– czas wykonywania operacji typu j dotyczącej produktu k ,
μ_{il}	= 1, jeżeli maszyna i jest dostępna w przedziale czasowym l , inaczej $\mu_{il} = 0$,
λ	– waga kryterium dotyczącego obciążenia stadium, gdzie $\lambda \in [0, 1]$,
Zmienne:	
P_{\max}	– obciążenie stadium stanowiącego wąskie gardło w linii montażowej,
x_{vj}	= 1, jeżeli operację j przydzielono do stadium v , inaczej $x_{vj} = 0$,
▪ dotyczące tylko modelu M1 (sztywne marszruty montażu):	
y_{vk}	= 1, jeżeli produkt typu k przepływa przez stadium v , inaczej $y_{vk} = 0$,
z_{vjk}	= 1, jeżeli do stadium v przydzielono operację j wykonywaną dla produktu typu k , inaczej $z_{vjk} = 0$,
▪ dotyczące tylko modelu M2 (alternatywne marszruty montażu):	
w_{vks}	= 1, jeżeli produkt s (sztuka nr s) typu k przepływa przez stadium v , inaczej $w_{vks} = 0$,
q_{vjks}	= 1, jeżeli do stadium v przydzielono operację j wykonywaną dla produktu s typu k , inaczej $q_{vjks} = 0$.

dostępność maszyny. W tym celu przyjmij $i := 1$ i kolejno wykonaj:

- przyjmij $\omega_i := 1$ i idź do kroku 3b.
- jeżeli warunek (3) jest spełniony w przypadku maszyny i , to idź do kroku 3d, w przeciwnym razie idź do kroku 3c.

$$\sum_{\tau=1}^{\omega_i} \mu_{i\tau} = e \quad (3)$$

- jeżeli $\omega_i < H$ (H – liczba przedziałów czasowych) to przyjmij $\omega_i := \omega_i + 1$ i wróć do kroku 3b. W przypadku, gdy $\omega_i = H$ i nie został spełniony warunek (3) należy zmodyfikować parametry: zwiększyć wartość H w celu umożliwienia wykonania wszystkich operacji lub zwiększyć dostępność maszyny w kolejnych okresach l .
- jeżeli $i < M$ to wróć do kroku 3a, w przeciwnym razie idź do kroku 4, w którym uwzględnione zostaną wyznaczone wartości ω_i dla $i = 1, \dots, M$ stanowią oszacowanie minimalnych obciążeń poszczególnych maszyn.
- oszacuj wg (4) minimalną wartość obciążenia stadium najbardziej obciążonego.

$$LBP_{\max} = \max_{i \in I} \omega_i \quad (4)$$

W celu uwzględnienia losowych przestoju maszyn wykorzystano znajomość funkcji niezawodności każdej maszyny w stadium v oznaczonej $F_v(t)$ [5]. Funkcja ta (5) dla każdego czasu ustalonego $t \geq 0$ ma wartość równą prawdopodobieństwu znajdowania się maszyny umieszczonej w stadium v do chwili $t = LBP_{\max}$ w stanie zdatności.

$$F_v(t) = P(E_v \geq t); \quad t = LBP_{\max} \quad (5)$$

gdzie:

E_v – zmienna losowa oznaczająca czas zdatności dla maszyn w stadium v .

Zestawione w tab.1 parametry i zmienne, jak i również zdefiniowane w zależnościach (4) i (5) dodatkowe dane, uwzględniono w zaprezentowanych poniżej modelach zadań PC.

Model matematyczny M1 przeznaczony do równoczesnego równoważenia obciążeń stadiów i minimalizacji przepływów międzystadialnych – w przypadku sztywnych marszrut:

$$\text{Zminimalizować: } \lambda P_{\max} + \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} d_k y_{vk} \quad (6)$$

przy ograniczeniach:

$$\sum_{j \in J_k} \sum_{k \in K} \frac{d_k P_{jk} z_{vj} z_{vk}}{m_v F_v(LBP_{\max})} + \sum_{l \in I: l \leq LBP_{\max}} \sum_{i \in I: (i,v) \in Z} \frac{1 - \mu_{il}}{m_v} \leq P_{\max}; \quad v \in V \quad (7)$$

$$\sum_{v \in V_j} x_{vj} = 1; \quad j \in J \quad (8)$$

$$x_{vj} = 0; \quad j \in J; \quad v \notin V_j \quad (9)$$

$$\sum_{j \in J^c} a_{vj} x_{vj} \leq b_v m_v; \quad v \in V \quad (10)$$

$$z_{vj} \leq x_{vj}; \quad j \in J_k; \quad k \in K; \quad v \in V \quad (11)$$

$$\sum_{v \in V_j} z_{vj} = 1; \quad j \in J_k; \quad k \in K \quad (12)$$

$$\sum_{v \in V} v z_{vj} \leq \sum_{v \in V} v z_{vrk}; \quad k \in K; \quad (j,r) \in R_k \quad (13)$$

$$y_{vk} \geq z_{vj}; \quad j \in J_k; \quad k \in K; \quad v \in V \quad (14)$$

$$x_{vj}, y_{vk}, z_{vj} \in \{0,1\}; \quad j \in J; \quad k \in K; \quad v \in V \quad (15)$$

Funkcja celu (6) służy do zrównoważenia obciążeń stadiów oraz do minimalizacji liczby produktów przepływających przez poszczególne stadia, co skutkuje poszukiwaniem takich rozwiązań, w których każdy produkt przepływa przez jak najmniejszą liczbę stadiów [4]. W funkcji (6) $\lambda \in [0, 1]$ jest współczynnikiem wagi, dotyczącej wyznaczenia dzięki ograniczeniu (7) średniego obciążenia maszyny umieszczonej w najbardziej obciążonym stadium. Wzięto pod uwagę ograniczoną dostępność maszyn: planowane przestoje (znane dzięki wartościom parametrów μ_{ij}) oraz losowe przestoje maszyn (wykorzystano znajomość funkcji (5)). Drugim kryterium, dotyczącemu liczby przepływów produktów przez stadia, przyporządkowano wagę $1 - \lambda$. Wartość parametru λ ma istotne znaczenie dla rozwiązywanego zadania. Oba uwzględnione kryteria nie dotyczą jednakowych jednostek (czas obciążenia maszyny mierzy się w sekundach, a liczbie przepływów produktów nie przypisuje się jednostek. Ponadto mogą być różne rzędy wielkości składników funkcji celu w przypadku obu kryteriów. Dlatego w celu doboru wag wskazane jest zastosowanie dialogowej procedury optymalizacji dwukryterialnej [4]. Jest to interaktywna procedura przeznaczona do wyznaczania rozwiązań dla 3 wag testowych w każdej iteracji. W przypadku, gdy żadne z rozwiązań nie satysfakcjonuje decydenta, następuje zmiana obszaru poszukiwań. Nowy obszar poszukiwań uzależniony jest od wartości funkcji celu i wag testowych, uwzględnianych w poprzedniej iteracji.

Kolejne ograniczenia zapewniają: (8) – przydział każdego typu operacji dokładnie do jednego stadium, (9) – eliminację przydziału operacji do niewłaściwych stadiów, (10) – uwzględnienie ograniczonej przestrzeni roboczej maszyn, (11) – wykonywanie operacji przypisanych produktom w tych stadiach, którym przydzielono operacje dotyczące tych produktów, (12) – rozdział wszystkich operacji pomiędzy stadia, (13) – jednokierunkowość przepływu produktów i zachowanie kolejności wykonywania operacji, (14) – wyznaczenie stadiów, przez które przepływają poszczególne produkty, (15) – binarność zmiennych decyzyjnych.

W przypadku alternatywnych marszrut montażu należy zastosować model M2:

$$\text{Zminimalizować: } \lambda P_{\max} + \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \sum_{s \in S} w_{vks} \quad (16)$$

przy ograniczeniach (9) i (10), a także:

$$\sum_{j \in J_k} \sum_{k \in K} \frac{p_{jk} q_{vjks}}{m_v F_v(LBP_{\max})} + \sum_{l \in L: l \leq LBP_{\max}} \sum_{i \in I: (i,v) \in Z} \frac{1 - \mu_{il}}{m_v} \leq P_{\max}; \quad v \in V \quad (17)$$

$$\sum_{v \in V_j} x_{vj} \geq 1; \quad j \in J \quad (18)$$

$$q_{vjks} \leq x_{vj}; \quad j \in J_k; \quad k \in K; \quad s \in S; \quad v \in V \quad (19)$$

$$\sum_{v \in V_j} q_{vjks} = 1; \quad j \in J_k; \quad k \in K; \quad s \in S; \quad s \leq d_k \quad (20)$$

$$\sum_{v \in V} v q_{vjks} \leq \sum_{v \in V} v q_{vrks}; \quad k \in K; \quad (j,r) \in R_k; \quad s \in S_k; \quad s \leq d_k \quad (21)$$

$$w_{vks} \geq q_{vjks}; \quad j \in J_k; \quad k \in K; \quad s \in S; \quad v \in V; \quad s \leq d_k \quad (22)$$

$$x_{vj}, q_{vjks}, w_{vks} \in \{0,1\}; \quad j \in J; \quad k \in K; \quad s \in S; \quad v \in V \quad (23)$$

W modelu M2 zastosowano m.in. zmienne w_{vks} służące opisowi przepływów poszczególnych sztuk s produktów typu k przez stadia v . Suma wartości tych zmiennych jest uwzględniona w funkcji (16) w celu wyznaczenia liczby przepływów produktów przez poszczególne stadia (łącznej liczby „odwiedzin” stadiów przez produkty). Interpretacja funkcji celu (16) oraz ograniczenia (17) jest taka sama, jak w przypadku funkcji (6) oraz relacji (7). Alternatywność marszrut montażu zapewnia ograniczenie (18). Ograniczenia (19)–(23) pełnią podobną rolę jak zinterpretowane relacje (11)–(15), dotyczące modelu M1.

Weryfikacja metody

W celu weryfikacji metody rozwiązano przykłady testowe dotyczące 4 grup zadań. Parametry tych grup zadań oraz wyniki przeprowadzonych eksperymentów obliczeniowych zestawiono w tab. 2. W przypadku każdej

z grup zadań rozwiązano 30 przykładów. Modele matematyczne zostały zakodowane w języku AMPL (A Modelling Language for Mathematical Programming) [6]. Do obliczeń wykorzystano pakiet optymalizacji dyskretnej GNU *Linear Programming Kit* (GLPK). W celu porównania obciążenia najbardziej obciążonego stadium P_{\max} z oszacowanym największym obciążeniem stadium LBP_{\max} w (24) zdefiniowano wskaźniki dotyczące różnych wag λ . Eksperymenty obliczeniowe dotyczyły również drugiego kryterium. W celu porównania liczby przemieszczeń zdefiniowano w (25) wskaźniki β_i (dotyczące sztywnych marszrut) oraz γ_i (dotyczące alternatywnych marszrut), gdzie indeks i oznacza wartość parametru λ (waga, która została uwzględniona w rozwiązaniu zadania). Wartości średnie wszystkich wskaźników porównań zestawiono w tab. 2.

$$\alpha_1 = \frac{P_{\max} - LBP_{\max}}{LBP_{\max}} \cdot 100\% \quad (\text{dla } \lambda = 1); \quad (24)$$

$$\alpha_{0,5} = \frac{P_{\max} - LBP_{\max}}{LBP_{\max}} \cdot 100\% \quad (\text{dla } \lambda = 0,5)$$

$$\beta_i = \frac{Y_i - Y_0}{Y_0} \cdot 100\%, \quad \text{gdzie } Y_i = \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} d_k y_{vk}; \quad (25)$$

$$\gamma_i = \frac{W_i - W_0}{W_0} \cdot 100\%, \quad \text{gdzie } W_i = \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \sum_{s \in S} w_{vks}$$

Porównanie średnich wartości wskaźnika α wykazuje, że łatwiej jest zrównoważyć obciążenia stadiów w przypadku marszrut alternatywnych (α_1 nie przekroczył 5,6%) niż w przypadku sztywnych marszrut (α_1 wynosił nawet prawie 10%) – tutaj istotny jest nie tylko przydział każdego typu operacji do tylko jednego stadium, ale również niepodzielność wykonywanych operacji (zarówno pomiędzy maszyny, jak i również niepodzielność w czasie). Dokonane symulacje obciążeń maszyn pokazały wpływ zmniejszenia wagi λ ($\lambda = 0,5$) na wzrost obciążenia wąskiego gardła systemu (na podstawie wartości $\alpha_{0,5}$) i zmniejszenie liczby produktów przepływających przez stadia. W tab. 2 wykazano za pomocą wskaźników β i γ ,

Tabela 2. Parametry grup zadań i wyniki eksperymentów obliczeniowych [%]

Table 2. Parameters of groups of tasks and results of computational experiments [%]

Grupa zadań	Parametry grupy zadań					Sztywne marszrut				Alternatywne marszrut			
	ϑ	M	N	T	B	α_1	α_1	$\beta_{0,7}$	$\beta_{0,5}$	α_1	α_1	$\gamma_{0,7}$	$\gamma_{0,5}$
1	2	4	10	4	100	9,8	14,9	3,2	1,4	5,6	10,1	8,7	4,5
2	2	6	12	5	200	8,3	12,4	3,3	1,6	5,4	8,8	9,2	4,8
3	3	6	14	5	400	7,5	11,1	4,1	1,9	2,9	7,7	10,0	6,4
4	3	8	16	6	500	7,2	10,2	4,8	2,6	2,4	4,5	12,1	8,8

Liczby: ϑ – stadiów, M – maszyn, N – typów operacji montażowych, T – typów produktów, B – łączna liczba produktów przepływających przez linię montażową

że znacznie łatwiej sterować liczbą produktów w przypadku marszrut alternatywnych niż w przypadku sztywnych marszrut, których uwzględnienie skutkuje brakiem elastyczności marszrut przepływów produktów, co wykazały niewielkie wartości wskaźników $\beta_{0,5}$.

Uwagi końcowe

Przedstawiona metoda planowania taktycznego służy przede wszystkim do przeprowadzania symulacji: badania wpływu uwzględnianych wag i rodzaju marszrut montażu na obciążenia stadiów i liczbę przemieszczeń produktów, a zalety przeprowadzania symulacji procesów produkcyjnych wykazano w pracy [7]. Uzyskiwane rozwiązania stanowią punkt wyjścia do szeregowania operacji montażowych – budowy harmonogramów montażu.

Metodę opracowano do wykorzystania w przypadku hybrydowych systemów przepływowych. Jednakże przy zapisie danych, w którym każde stadium zawiera jedną maszynę, metoda dotyczy również systemów przepływowych bez maszyn równoległych (flow shop).

Do zalet metody zalicza się wzięcie pod uwagę planowanych oraz losowych przestojów maszyn. Dzięki temu opracowane modele w lepszym stopniu odzwierciedlają rzeczywistość. Temu samemu celowi służy również wyodrębnienie zbioru operacji wymagających wykorzystania podajników części i uwzględnienie ograniczonej przestrzeni roboczej.

W przypadku wagi $\lambda = 1$ lub $\lambda = 0$, czyli uwzględnienia tylko jednego kryterium, za pomocą

opracowanych modeli wyznaczone są rozwiązania optymalne. Jest to kolejna zaleta opracowanych modeli, osiągnięta dzięki zastosowaniu programowania całkowitoliczbowego.

LITERATURA

- [1] Fourer R., D. Gay, B. Kernighan. 2003. "AMPL, A Modelling Language for Mathematical Programming". Duxbury Press, Pacific Grove, CA.
- [2] Kobiałka J., P. Łukasik. 2015. „Symulacja procesów produkcyjnych – modułowe stanowiska dydaktyczne”. *Technologia i Automatyzacja Montażu* (2): 28–32.
- [3] Macha E. 2001. „Niezawodność maszyn”. Opole: Wydawnictwo Politechniki Opolskiej.
- [4] Magiera M. 2016. „Wybrane metody planowania przepływów produktów przez linie produkcyjne i łańcuchy dostaw”. Kraków: Wydawnictwo AGH (w druku).
- [5] Pinedo M.L. 2008. "Scheduling. Theory, Algorithms and Systems". New York: *Springer*.
- [6] Sawik T. 1999. "Production Planning and Scheduling in Flexible Assembly Systems". Berlin: *Springer-Verlag*.
- [7] Skołod B. 2006. „Zarządzanie operacyjne. Produkcja w małych i średnich przedsiębiorstwach”. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.

Dr inż. Marek Magiera – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Katedra Badań Operacyjnych i Technologii Informatycznych, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: mmagiera@zarz.agh.edu.pl.