

Marek Magiera*

Analiza porównawcza trzech metod planowania produkcji dla systemów przepływowych bez magazynów

1. Wprowadzenie

W planowaniu i sterowaniu produkcją wyróżnia się trzy, wzajemnie powiązane pomiędzy sobą poziomy decyzyjne. Dotyczą one różnych horyzontów czasowych i w związku z tym wyszczególnia się [1]:

- 1) planowanie strategiczne (długookresowe),
- 2) planowanie taktyczne (średnio- i krótkookresowe),
- 3) sterowanie operacyjne (krótkookresowe i bieżące).

Niniejsza praca dotyczy tych dwóch ostatnich z wymienionych poziomów decyzyjnych, czyli [1]:

- planowania taktycznego, dla którego podstawowym zadaniem jest optymalizacja rozdziału zadań i zasobów w systemie produkcyjnym w celu wykonania najbliższych zleceń;
- sterowania operacyjnego, dla którego najważniejsze są problemy harmonogramowania – ustalane są szczegółowe harmonogramy pracy wszystkich urządzeń systemu produkcyjnego.

Wyszczególnione powyżej zadania wymagają rozdziału operacji w przestrzeni oraz w czasie. W rozwiązywaniu ich stosuje się dwa podejścia:

- 1) Hierarchiczne (wielopoziomowe), w którym problem globalny jest dzielony na kolejno rozwiązywane zadania cząstkowe. Jest to powszechnie stosowane podejście. Wynika to z możliwości rozwiązywania w krótkim czasie zadań o stosunkowo dużych rozmiarach. Istotnymi wadami tej koncepcji są: wielokrotne powtarzanie obliczeń w celu uzyskania rozwiązania dopuszczalnego oraz brak możliwości wyznaczenia optimum globalnego.
- 2) Monolityczne (jednopoziomowe), w którym wszystkie zagadnienia rozwiązywane są równocześnie. Stosowanie tej koncepcji zapewnia otrzymywanie krótszych harmono-

* Katedra Badań Operacyjnych i Technologii Informacyjnych, Wydział Zarządzania, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

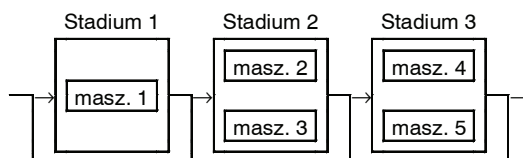
gramów w porównaniu do podejścia wielopoziomowego. Za jakość rozwiązań płaci się jednak czasochłonnością obliczeń, wynikającą z rozwiązywania zadań o znacznych rozmiarach (duża liczba indeksów, parametrów i zmiennych). Dzięki postępowi w technologii komputerowej i rozwojowi oprogramowania podejście to jest coraz częściej stosowane.

W kolejnych rozdziałach pracy (rozd. 2 i 3) opisane są trzy metody planowania produkcji dla systemów przepływowych bez magazynów. Wszystkie te metody opracowane zostały przez autora artykułu. Dwie z nich należą do grupy metod hierarchicznych, a trzecia metoda jest monolityczna. Rozdział 4 poświęcony jest porównaniu tych metod – zmierzeniu ich zalet i wad.

W opracowanych metodach pominięte zostały bufory międzyoperacyjne. Ma to na celu uproszczenie sterowania systemem, zmniejszenia kosztów sterowania i zwiększenia niezawodności. Dla takich systemów obecnie buduje się nowe, coraz szybsze metody planowania produkcji, co znajduje odzwierciedlenie m.in. w pracach: [2–6].

2. Charakterystyka metod

Wszystkie scharakteryzowane w tym rozdziale metody planowania produkcji opracowane zostały dla jednokierunkowego, wielostadialnego systemu przepływowego. W systemie tym wykonywane są operacje dla wielu różnych typów produktów. Każde stadium systemu to zbiór maszyn produkcyjnych, pracujących równolegle. Produkt przechodzący przez dane stadium obciąża w nim tylko jedną maszynę. Niektóre stadia mogą być pominięte. Przykładowa konfiguracja opisanego systemu zamieszczona jest na rysunku 1.

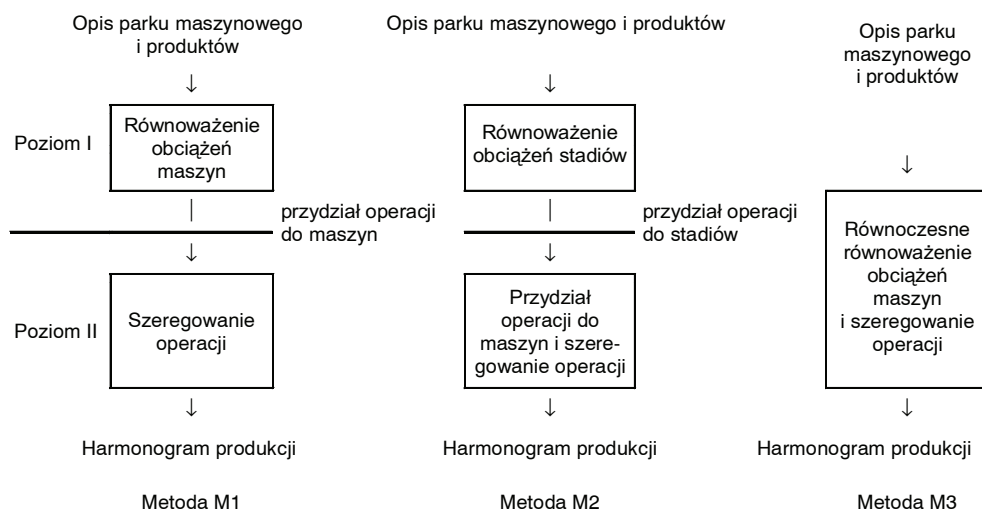


Rys. 1. Przykładowa konfiguracja systemu jednokierunkowego z omijaniem

Dla opisanej konfiguracji systemu opracowane zostały następujące metody:

- Metoda M1 – dwupoziomowa metoda, w której na pierwszym poziomie przydzielane są operacje do maszyn (tak, aby obciążenia maszyn były zrównoważone), a na drugim poziomie operacje te są szeregowane.
- Metoda M2 – dwupoziomowa metoda, w której na pierwszym poziomie przydzielane są operacje do stadiów (tak, aby obciążenia stadiów zostały zrównoważone), a przydział operacji do maszyn (należących do stadiów wyznaczonych na pierwszym poziomie) i uszeregowanie operacji mają miejsce na drugim poziomie.
- Metoda M3 – jednopoziomowa metoda, w której operacje równocześnie rozdzielane są w przestrzeni i w czasie.

Schematy blokowe, ilustrujące wymienione metody, przedstawione są na rysunku 2.



Rys. 2. Schematy blokowe metod

Oto pozostałe charakterystyczne cechy opracowanych metod:

- umożliwiają aproksymację minimalizacji długości uszeregowania – wyznaczane są harmonogramy o jak najmniejszych długościach;
- w związku z pominięciem buforów międzyoperacyjnych w każdej z metod uwzględniono następujące przypadki:
 - blokowanie maszyn – w sytuacji, gdy dana maszyna nie może wykonać operacji, produkt obciąża tę maszynę, na której zakończono uprzednią operację;
 - szeregowanie „bez czekania” – obowiązuje zakaz przerw pomiędzy wykonywaniem kolejnych operacji.
- alternatywność marszrut produkcyjnych – każdy typ operacji przydzielany jest do co najmniej jednej maszyny;
- podział długości uszeregowania na jednostkowe przedziały czasowe;
- uwzględnienia planowanych przestojów maszyn (remonty, konserwacje, przebrojenia).

3. Szczegółowy opis metod

Dane wejściowe, opisujące system i przepływające przez niego produkty, są takie same dla wszystkich metod. Na M maszynach, przynależnych ϑ stadium wykonywanych jest N typów operacji, przypisanych W typom produktów. Zestawienie wszystkich indeksów i parametrów wejściowych zamieszczone jest w tabeli 1.

Tabela 1
Zestawienie indeksów i parametrów wejściowych

Indeksy:	k – produkt; $k \in K = \{1, \dots, W\}$
i – maszyna; $i \in I = \{1, \dots, M\}$	l – przedział czasowy; $l \in L = \{1, \dots, H\}$
j – operacja; $j \in J = \{1, \dots, N\}$	v – stadium; $v \in V = \{1, \dots, \vartheta\}$
Parametry wejściowe:	
a_{vj} – przestrzeń robocza maszyny w stadium v , wymagana dla operacji j	
b_v – przestrzeń robocza maszyny w stadium v	
$g_{v\epsilon}$ – czas transportu pomiędzy maszynami w stadium v i w stadium ϵ	
m_v – liczba maszyn w stadium v	
p_{jk} – czas wykonywania operacji j dla produktu k	
$\varphi_{il} = 1$, jeżeli maszyna i jest dostępna w przedziale czasowym l , inaczej $\varphi_{il} = 0$	
D – zbiór uporządkowanych par (i, v) , takich, że maszyna i należy do stadium v	
J_k – zbiór operacji wykonywanych dla produktu k	
J_c – zbiór operacji wymagających użycia podajnika części, $J_c \subset J$	
R_k – zbiór par operacji (j, r) , kolejno wykonywanych dla produktu k	
V_j – zbiór stadiów, w których można wykonać operację j	

Liczba przedziałów czasowych H (tab. 1) wyznaczana była według opracowanej procedury:

1. Dla każdego produktu k wyznacz według (1) całkowity czas wykonywania operacji δ_k :

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

2. Oblicz według (2) ψ – średni czas obciążenia maszyn, zaokrąglony do liczby całkowitej.

$$\psi = \text{round} \left(\sum_{k \in K} \delta_k / M \right) \quad (2)$$

3. Dla każdej maszyny i wyznacz $\tilde{l}_i$ – minimalną wartość liczby przedziałów czasowych, w których maszyna jest dostępna i może być obciążona w czasie ψ ; wartość $\tilde{l}_i$ spełnia zależność (3):

$$\tilde{l}_i = \sum_{\tau=1}^{\tilde{l}_i} \mu_{\tau l}; \quad i = 1, \dots, M \quad (3)$$

4. Oszacowanie długości uszeregowania β wyznacz według (4) – jako maksymalną liczbę spośród wartości obliczonych w poprzednim kroku.

$$\beta = \max \{ \tilde{l}_1, \tilde{l}_2, \dots, \tilde{l}_m \} \quad (4)$$

5. Zakończ procedurę wyznaczając liczbę jednostkowych przedziałów czasowych H według (5).

$$H = 1,2 \cdot \beta \quad (5)$$

Wartość parametru H zweryfikowano w eksperymentach obliczeniowych (rozdz. 4).

Zamieszczone w tabeli 1 indeksy i parametry wejściowe wykorzystane zostały w zbudowanych dla opracowanych metod liniowych modelach matematycznych zadań programowania całkowitoliczbowego. Modele te zostały szczegółowo przedstawione i opisane w pracach: [5] – dla metody M1 oraz [6] – dla metody M3. Modele matematyczne dla metody M2 nie były publikowane i zamieszczone są w tym rozdziale. Zestawienie oznaczeń tych modeli znajduje się w tabeli 2.

Tabela 2
Oznaczenia modeli matematycznych zbudowanych dla metody M2

Model	Opis modelu
<i>A</i>	Równoważenie obciążeń stadiów (poziom I metody)
<i>B</i>	Przydział operacji do maszyn i szeregowanie operacji – z blokowaniem maszyn (poziom II)
<i>C</i>	Przydział operacji do maszyn i szeregowanie „bez czekania” (poziom II)

Wykaz zmiennych, wykorzystanych w modelach *A*, *B*, *C*, zawarty jest w tabeli 3.

Tabela 3
Wykaz zmiennych dla modeli opracowanych dla metody M2

$x_{vj} = 1$, jeżeli operację j przydzielono do stadium $v \in V_j$, inaczej $x_{vj} = 0$ (dla modelu <i>A</i>)
$z_{vjk} = 1$, jeżeli do stadium v przydzielano operację j wykonywaną dla produktu k , inaczej $z_{vjk} = 0$ (dla modelu <i>A</i>)
$q_{ikl} = 1$, jeżeli w przedziale czasowym l operacja dla produktu k wykonywana jest na maszynie i , inaczej $q_{ikl} = 0$ (dla modeli <i>B</i> i <i>C</i>)
$y_{ikl} = 1$, jeżeli w przedziale l produkt k blokuje maszynę i , inaczej $y_{ikl} = 0$ (dla modelu <i>C</i>)

Oto modele matematyczne zbudowane dla metody M2 i ich szczegółowy opis.

- Model *A* – rozwiązywany na poziomie I w celu zrównoważenia obciążeń stadiów.
Zminimalizować: $P_{\max}$ (6)

przy ograniczeniach:

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} p_{jk} z_{vjk} + \sum_{l \in L: l \leq \beta} \sum_{i \in I: (i,v) \in D} (1 - \phi_{il}) \leq P_{\max}; \quad v \in V \quad (7)$$

$$\sum_{v \in V} z_{vjk} = 1; \quad j \in J_k; k \in K \quad (8)$$

$$z_{vjk} \leq x_{vj}; \quad v \in V; j \in J_k; k \in K \quad (9)$$

$$\sum_{v \in V} v \cdot z_{vjk} \leq \sum_{v \in V} v \cdot z_{vrk}; \quad k \in K; (j, r) \in R_k \quad (10)$$

$$\sum_{v \in V_j} x_{vj} \geq 1; \quad j \in J \quad (11)$$

$$\sum_{j \in J_c} a_{vj} x_{vj} \leq b_v m_v; \quad v \in V \quad (12)$$

$$x_{vj} = 0; \quad j \in J; v \notin V_j \quad (13)$$

$$x_{vj}, z_{vjk} \in \{0, 1\}; \quad j \in J; k \in K; v \in V \quad (14)$$

Na I poziomie metody M2 minimalizowane jest obciążenie najbardziej obciążonego stadium (6), wyznaczane w zależności (7). Drugi składnik nierówności (8) uwzględnia ograniczoną dostępność maszyn w oszacowanej wg (4) długości uszeregowania β . Pozostałe ograniczenia zapewniają:

- (8) – rozdział wszystkich operacji pomiędzy stadia;
- (9) – przydział produktów do takich stadiów, do których przydzielono odpowiednie operacje;
- (10) – zachowanie ograniczeń kolejnościowych i jednokierunkowość przepływu;
- (11) – przydział każdego typu operacji do co najmniej jednego stadium;
- (12) – zachowanie ograniczonej przestrzeni roboczej maszyn;
- (13) – eliminację przydziału operacji do niewłaściwych stadiów;
- (14) – binarność zmiennych decyzyjnych.

Wyznaczone przydziały operacji do stadiów stanowią dane wejściowe do zadania rozwiązywanego na poziomie II. Wśród nich jest całkowity czas wykonywania w stadium v operacji dla produktu k :

$$t_{vk} = \sum_{j \in J_k} p_{jk} z_{vjk}; \quad v \in V; k \in K \quad (15)$$

Oto modele matematyczne zadań rozwiązywanych na poziomie II metody M2.

- Modele: B , C – rozwiązywane w celu przydziału operacji do maszyn i ich uszeregowania.

Zminimalizować:

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} l \cdot q_{ikl} \quad (16)$$

przy ograniczeniach:

$$\sum_{i \in I: (i,v) \in D} \sum_{l \in L} q_{ikl} = t_{vk}; \quad v \in V; k \in K \quad (17)$$

$$\sum_{k \in K} q_{ikl} \leq \phi_{il}; \quad i \in I; l \in L \quad (18)$$

$$q_{ikl} + q_{\tau kf} \leq 1; \quad k \in K; (\tau, v), (i, v) \in D: i \neq \tau \quad (19)$$

$$l \cdot q_{ikl} - f \cdot q_{ikf} \leq t_{vk} - 1 + (1 - q_{ikf}) \cdot \alpha \quad (20)$$

$(i, v) \in D; l, f \in L: l > f; k \in K$

$$\frac{\sum_{i \in I: (i,v) \in D} \sum_{l \in L} l \cdot q_{ikl}}{t_{vk}} - \frac{\sum_{\tau \in I: (\tau,\varepsilon) \in D} \sum_{l \in L} l \cdot q_{\tau kl}}{t_{\varepsilon k}} - \frac{t_{vk} + t_{\varepsilon k}}{2} \geq g_{vk} \quad (21)$$

$$k \in K; v, \varepsilon \in V: t_{vk}, t_{\varepsilon k} > 0$$

$$q_{ikl} \in \{0, 1\}; \quad i \in I; k \in K; l \in L \quad (22)$$

- Tylko dla modelu B (systemu z możliwością blokowania maszyn):

$$y_{ikl} \leq \sum_{f \in L} q_{ikf}; \quad i \in I; k \in K; l \in L \quad (23)$$

$$\sum_{i \in I: (i,v) \in D} \sum_{l \in L} \frac{l \cdot q_{ikl}}{t_{vk}} - \sum_{\tau \in I: (\tau,\varepsilon) \in D} \sum_{l \in L} \frac{l \cdot q_{\tau kl}}{t_{\varepsilon k}} - \frac{t_{vk} + t_{\varepsilon k}}{2} - g_{vk} = \sum_{\tau \in I: (\tau,\varepsilon) \in D} \sum_{l \in L} y_{\tau kl} \quad (24)$$

$$k \in K; l, f \in L; v \in V \setminus \{1\}: t_{vk} > 0; \varepsilon \in V: \varepsilon < v, t_{\varepsilon k} > 0 \wedge \sum_{\psi=\varepsilon}^v t_{\psi k} = t_{\varepsilon k} + t_{vk}$$

$$l \cdot y_{\tau kl} + \alpha(1 - y_{\tau kl}) \geq \frac{\sum_{\tau \in I: (\tau, \varepsilon) \in D} \sum_{f \in L} f q_{\tau kf}}{t_{\varepsilon k}} + \frac{t_{\varepsilon k} + 1}{2} \quad (25)$$

$$(\tau, \varepsilon) \in D; k \in K : t_{\varepsilon k} > 0 \wedge \sum_{\rho \in V: \varepsilon \leq \rho} t_{\rho k} > t_{\varepsilon k}; l \in L$$

$$l \cdot y_{\tau kl} \leq \sum_{i \in I: (i, v) \in D} \sum_{f \in L} \frac{f \cdot q_{ikf}}{t_{vk}} - \frac{t_{vk} + g_{vk}}{2} + \alpha \cdot (1 - y_{\tau kl}) \quad (26)$$

$$(\tau, \varepsilon) \in D; v \in V : v > \varepsilon; k \in K : t_{vk}, t_{\varepsilon k} > 0 \wedge \sum_{\rho \in V: \varepsilon \leq \rho \leq v} t_{\rho k} = t_{\varepsilon k} + t_{vk}; l \in L$$

$$q_{ikl} + y_{ikl} \leq 1; \quad i \in I; k \in K; l \in L \quad (27)$$

$$y_{ikl} \in \{0, 1\}; \quad i \in I; k \in K; l \in L \quad (28)$$

– Tylko dla modelu C (dla systemu „bez czekania”):

$$l \cdot \sum_{i \in I: (i, v) \in D} q_{ikl} - f \cdot \sum_{\tau \in I: (\tau, \varepsilon) \in D} q_{\tau kf} \leq g_{vk} + t_{vk} - 1 + \alpha(1 - \sum_{\tau \in I: (\tau, \varepsilon) \in D} q_{\tau kf}) \quad (29)$$

$$\varepsilon, v \in V : v > \varepsilon; k \in K : t_{\varepsilon k}, t_{vk} > 0 \wedge \sum_{\rho \in V: \varepsilon \leq \rho \leq v} t_{\rho k} = t_{\varepsilon k} + t_{vk}; l, f \in L$$

Parametr α , stosowany w zapisie niektórych ograniczeń przedstawionych modeli, jest dowolną liczbą całkowitą, spełniającą nierówność: $\alpha > H$.

W modelach B i C aproksymowana jest długość uszeregowania. Minimalizowana suma (16) zapewnia nie tylko otrzymywanie jak najkrótszych harmonogramów, ale również uzyskanie stosunkowo krótkich czasów zakończenia operacji dla poszczególnych produktów. Pozostałe zależności matematyczne gwarantują:

- (17) – rozdział wszystkich operacji (przydzielonych danemu stadium) pomiędzy maszyny;
- (18) – wykonanie co najwyżej jednej operacji na danej maszynie w okresie jej dostępności;
- (19) – przepływ produktu przez co najwyżej jedną maszynę danego stadium;
- (20) – niepodzielność wykonywania operacji w czasie (ich ciągłość) i w przestrzeni;
- (21) – zachowanie kolejności wykonywania operacji oraz zapewnienie czasu na transport pomiędzy stadiami;
- (22) – binarność zmiennych.

Następna grupa ograniczeń dotyczy tylko modelu B . Zależności te zapewniają:

- (23) – możliwość blokowania przez produkt tylko tych maszyn, którym przydzielone zostały przynależne mu operacje;
- (24) – wyznaczenie łącznego czasu blokowania maszyny w danym stadium przez każdy produkt;
- (25) i (26) – wyznaczenie przedziałów czasowych, w których maszyna pełni tę funkcję;
- (27) – wyeliminowanie równoczesnego pełnienia przez maszynę roli bufora i wykonywanie operacji;
- (28) – binarność zmiennych.

Ograniczenie (27), zbudowane tylko dla modelu C , umożliwia szeregowanie „bez czekania” – przerwy pomiędzy kolejnymi operacjami przeznaczone są tylko na przemieszczanie się produktu pomiędzy stadiami.

Dla każdej z metod wyznaczana była według zależności (30) długość uszeregowania $C_{\max}$.

$$C_{\max} = \max_{i \in I, k \in K, l \in L} (l \cdot q_{ikl}) \quad (30)$$

4. Porównanie metod

W celu porównania opracowanych metod przeprowadzone zostały eksperymenty obliczeniowe. Objęte zostały nimi cztery grupy zadań, których parametry zestawiono w tabeli 4. Dla każdej z tych grup rozwiązano 40 przykładów testowych. Wykorzystano w tym celu pakiet optymalizacji dyskretniej [8].

Tabela 4
Parametry grup zadań testowych

Grupa	ϑ	M	N	W	H	Liczby:
1	2	6	12	4	20	ϑ – stadiów
2	3	6	14	6	30	M – maszyn
3	3	8	16	7	35	N – typów operacji
4	4	8	18	8	40	W – typów produktów
						H – przedziałów czasowych

Do bezpośredniego porównania metod wyznaczane były wartości wskaźników zdefiniowanych w zależnościach (31). Wartości średnie tych wskaźników zestawiono w tabeli 5.

$$\gamma_j^i = C_{\max}^i / C_{\max}^j; \quad \chi_j^i = CPU^i / CPU^j \quad (31)$$

$$i, j \in \{M1, M2, M3\}; i \neq j$$

gdzie:

- γ_j^i – wskaźnik służący porównaniu długości uszeregowania wyznaczonych wg (30) przy zastosowaniu metod $i, j \in \{M1, M2, M3\}$;
- χ_j^i – wskaźnik przeznaczony do porównania czasów obliczeń dla metod $i, j \in \{M1, M2, M3\}$.

Tabela 5
Wartości średnie wskaźników γ_j^i, χ_j^i [%]

Grupa	System z możliwością blokowania maszyn						Szeregowanie „bez czekania”					
	$\bar{\gamma}_{M1}^{M2}$	$\bar{\gamma}_{M1}^{M3}$	$\bar{\gamma}_{M2}^{M3}$	$\bar{\chi}_{M1}^{M2}$	$\bar{\chi}_{M1}^{M3}$	$\bar{\chi}_{M2}^{M3}$	$\bar{\gamma}_{M1}^{M2}$	$\bar{\gamma}_{M1}^{M3}$	$\bar{\gamma}_{M2}^{M3}$	$\bar{\chi}_{M1}^{M2}$	$\bar{\chi}_{M1}^{M3}$	$\bar{\chi}_{M2}^{M3}$
1	0,92	0,88	0,94	1,21	2,95	2,43	0,90	0,84	0,91	1,19	2,87	2,41
2	0,94	0,89	0,95	1,25	7,74	6,19	0,92	0,86	0,92	1,22	7,19	5,90
3	0,95	0,90	0,95	1,28	9,28	7,35	0,92	0,87	0,93	1,26	9,15	7,26
4	0,96	0,92	0,96	1,32	13,55	10,22	0,93	0,90	0,95	1,31	13,02	9,94

Dzięki zamieszczonym w tabeli 5 wartościom parametru γ_j^i dla $i, j \in \{M1, M2, M3\}$ można porównać średnie wartości wyznaczonych dla poszczególnych grup długości harmonogramów. Wykazują one, że najkrótsze harmonogramy otrzymywane były przy zastosowaniu metody monolitycznej i stanowiły one 84,92% długości harmonogramów otrzymywanych przy zastosowaniu metody M1 oraz 91,96% harmonogramów wyznaczanych według metody M2. Długości harmonogramów budowanych wg metody M2 stanowiły natomiast 90,96% długości uszeregowanych otrzymywanych przy zastosowaniu metody M1. To porównanie dwóch dwupoziomowych metod wykazało istotną korzyść z przydzielenia dużego pola swobody poziomowi II metody M2. Długości uszeregowanych wyznaczane dla systemów przepływowych, w których obowiązuje zakaz przerw pomiędzy wykonywaniem kolejnych operacji były dłuższe (do 18%) w porównaniu z wynikami dla systemów, w których maszyny mogą pełnić rolę buforów.

Przedstawione w tabeli 5 porównanie czasów obliczeń wykazuje zwiększenie czasochłonności obliczeń w przypadku stosowania podejścia monolitycznego – w porównaniu z opracowanymi metodami hierarchicznymi. Wybór metody M3 wiązał się z kilku- lub kilkunastokrotnym zwiększeniem czasów obliczeń (w zależności od rozmiaru zadania) w odniesieniu do metody M1 lub M2. Porównane zostały również czasy obliczeń metod dwupoziomowych. Za przypisanie poziomowi II metody M2 większego pola swobody, niż ma to miejsce dla metody M1, należy zapłacić wzrostem czasu obliczeń o około 20÷30%. Czasy obliczeń dla szeregowania „bez czekania” były do 28% większe od czasów rozwiązywania problemu dla systemu z możliwością blokowania maszyn.

5. Uwagi końcowe

Przedstawione porównanie trzech metod pozwoliło zmierzyć wady i zalety dwóch alternatywnych podejść w planowaniu i sterowania produkcją: monolitycznego oraz hierarchicznego. Wykazało ono znaczne skrócenie długości uszeregowania w przypadku stoso-

wania podejścia jednopoziomowego, w porównaniu do dwupoziomowej koncepcji planowania produkcji. Porównanie czasów obliczeń dla obu tych koncepcji jest jednak niekorzystne dla podejścia monolitycznego. Rozwój techniki komputerowej i oprogramowania będzie jednak wpływał nie tylko na wzrost prędkości obliczeń, ale również na możliwość rozwiązywania problemów o coraz większych rozmiarach.

Porównanie dwóch metod dwupoziomowych pokazało, że pozostawienie większego pola swobody poziomowi szeregowania operacji wpływa korzystnie na jakość harmonogramów – przydzielanie operacji do maszyn na poziomie II zwiększa czasochłonność obliczeń, w odniesieniu do obciążania maszyn na poziomie I, ale otrzymuje się krótsze harmonogramy.

Modele opracowane dla wszystkich opisanych metod mogą być oczywiście zmodyfikowane, rozbudowane, wykorzystane do budowy innych algorytmów. W celu skrócenia czasu obliczeń dla zadań o znacznej liczbie parametrów i zmiennych zaleca się zastosowanie opracowanych modeli w heurystykach relaksacyjnych. W algorytmach tych zmienne binarne zastępuje się zmiennymi ciągłymi, a następnie za pomocą określonych reguł wyznacza się całkowitoliczbowe rozwiązania, spełniające wszystkie narzucone warunki. Przykłady zastosowania liniowych modeli matematycznych w heurystykach relaksacyjnych, dotyczących planowania i sterowania produkcją, można znaleźć, m.in. w pracach: [1, 7].

Podział długości uszeregowania na jednostkowe przedziały czasowe ułatwił uwzględnienie planowanych przestojów maszyn, dzięki czemu w opracowanych metodach lepiej odzwierciedlone są warunki, w których ma miejsce proces produkcyjny.

Podsumowując prezentację opisanych metod, można stwierdzić, że pojawiają się coraz lepsze perspektywy dla rozwiązywania problemów związanych z planowaniem i sterowaniem produkcji, sformułowanych w postaci zadań programowania całkowitoliczbowego – w tym dla stosowania podejścia monolitycznego. Dla zadań o znacznych rozmiarach korzystne jest natomiast stosowanie podejścia wielopoziomowego, w którym daje się duże pole swobody poziomowi harmonogramowania i sterowania produkcji. Przyczynił się do tego rozwój techniki komputerowej, dzięki któremu dla wielu zadań czasochłonność obliczeń staje się coraz mniejszym problemem.

Literatura

- [1] Sawik T.: *Planowanie i sterowanie produkcji w elastycznych systemach montażowych*. Warszawa, WNT 1996
- [2] Abadi I.N.K., Hall N.G., Sriskandarayah C.: *Minimizing Cycle Time in a Blocking Flowshop*. Operations Research, 46, 2000, 177–180
- [3] Hall N.G., Sriskandarayah C.: *A survey of machine scheduling problems with blocking and no-wait in process*. Operations Research, 44, 1996, 510–525
- [4] Ronconi D.P.: *A note on constructive heuristics for flowshop problem with blocking*. International Journal of Production Economics, 87, 2004, 39–48

- [5] Magiera M.: *Hierarchiczna metoda planowania produkcji dla systemu przepływowego bez magazynów*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Zeszyty Naukowe, Automatyka 2006, z. 144, 57–62
- [6] Magiera M.: *Monolityczna metoda planowania produkcji dla wielostadialnego systemu przepływowego bez magazynów*. w: *Nowoczesne metody i techniki w zarządzaniu*. Pod red. nauk. J.T. Dudy i W. Waszkielewicz, Wydawnictwa AGH, Kraków 2006, 275–281
- [7] Magiera M.: *Heurystyczne algorytmy planowania montażu dla elastycznej linii montażowej z maszynami równoległymi o ograniczonej dostępności*. w: *Zastosowania teorii systemów. Monografie*. Nr 3. Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH, Kraków 2005, 185–194
- [8] Fourer R., Kernighan B., Gay D.: *AMPL – A Modelling Language for Mathematical Programming*. Boyd & Fraser Publishing Company 1993