

Marek Magiera*

Modułowy system wspomagania zarządzaniem łańcuchem dostaw

1. Wprowadzenie

Zarządzanie łańcuchem dostaw jest koncepcją zarządzania stosunkami z dostawcami i odbiorcami oraz klientami w celu dostarczenia do klienta najwyższej wartości usługi po najniższych kosztach całego łańcucha [1]. Obejmuje ono zintegrowane procesy planowania, zaopatrzenia, transportu oraz zwrotów od danego dostawcy do odbiorcy, który stanowi dostawcę dla kolejnego odbiorcy.

Każde przedsiębiorstwo funkcjonujące w ramach łańcucha dostaw ma swoją kulturę organizacji, strategię oraz zasady działania. Zróżnicowanie cech zarządzania poszczególnymi przedsiębiorstwami utrudnia optymalizację w skali łańcucha, a więc zarządzanie łańcuchem dostaw – często trudno jest podporządkować cele indywidualne wspólnemu celowi działania łańcucha dostaw.

Obecnie obserwowany jest bardzo szybki rozwój technologii teleinformatycznych, wspomagających zarządzanie łańcuchem dostaw. W tym celu stosuje się m.in. [2]:

- systemy zaawansowanego planowania i harmonogramowania klasy APS (*Advanced Planning System*) – do synchronizacji planów zaopatrzenia, produkcji i dystrybucji z uwzględnieniem ograniczeń oraz z wykorzystaniem informacji pochodzących od dostawców i dystrybutorów;
- systemy wspomagające zarządzanie kontaktami z klientami klasy CRM (*Customer Relationship Management*) – w celu usprawnienia relacji z ostatecznymi klientami.

Matematyczny opis funkcjonowania takich systemów wymaga wprowadzenia ogromnej liczby indeksów, parametrów, zmiennych, stosowanych w zależnościach matematycznych, określających relacje pomiędzy ogniwami systemu, jak i również w obrębie tych ogniw. Eliminację równoczesnego uwzględniania znacznej liczby parametrów i zmiennych umożliwia modułowe podejście do problemu. Na przykład dla systemów klasy APS buduje się zwykle następujące moduły planistyczne: strategiczne planowanie sieci, wspólne pla-

* Katedra Badań Operacyjnych i Technologii Informatycznych, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

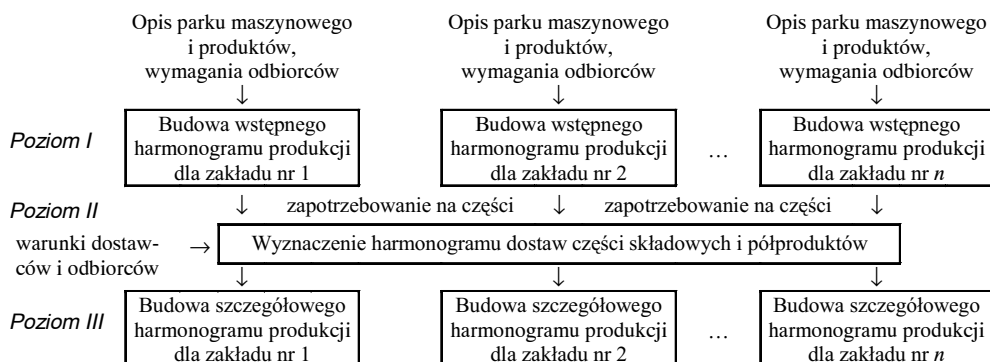
nowanie popytu, koordynacja planów, zaopatrzenia, produkcji i dystrybucji, planowanie i harmonogramowanie produkcji, planowanie transportu i dystrybucji. W modułach tych bardzo często wykorzystuje się programowanie całkowitoliczbowe, dzięki czemu bardzo wysoka jest jakość rozwiązań. Wykazują to m.in. publikacje [3–7].

Niniejsza praca dotyczy przedstawionej tematyki. Opracowany system wspomagania zarządzania łańcuchem dostaw służy godzeniu interesów poszczególnych firm ze wspólnym celem działania łańcucha dostaw. Zostało to osiągnięte dzięki modułowej strukturze zbudowanego systemu oraz hierarchicznemu podejściu do problemu zarządzania łańcuchem. W proponowanej metodzie ma miejsce optymalizacja w skali całego systemu (redukcja kosztów), a także w skali jego ogniw – linii produkcyjnych, dla których budowane są harmonogramy wytwarzania.

2. Opis metody

Łańcuch dostaw, dla którego opracowano metodę, ma sieciowy charakter. W rozpatrywanej sieci wyróżniono trzy rodzaje ogniw: producenci części składowych i podzespołów (dostawcy), producenci złożonych wyrobów, odbiorcy złożonych wyrobów. Zakłady, zwane producentami złożonych wyrobów, charakteryzują się możliwością równoczesnej produkcji wielu różnych typów wyrobów. Są to wielostadialne, jednokierunkowe linie produkcyjne z buforami międzyoperacyjnymi. Szeregowanie operacji wykonywanych w tych zakładach uwzględnia planowane przestoje maszyn.

Na pierwszym poziomie metody budowane są wstępne harmonogramy produkcji dla każdego zakładu produkującego złożone wyroby. Uwzględniają one czasowe i ilościowe wymagania odbiorców. Wiedza o zapotrzebowaniu na części składowe tych wyrobów wykorzystywana jest na drugim poziomie metody. Wyznaczany jest tam harmonogram dostaw części składowych i półproduktów. Na trzecim poziomie wyznaczane są szczegółowe harmonogramy dla wszystkich producentów złożonych wyrobów, uwzględniające warunki dostawców części składowych oraz odbiorców gotowych wyrobów. Schemat blokowy opracowanej metody zamieszczony jest na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy metody

Poziom I

Budowy wstępnych harmonogramów produkcji dla każdego zakładu, realizowane na poziomie I metody, jak również szczegółowych harmonogramów (poziom III), wymagają oczywiście uwzględnienia m.in. konfiguracji parku maszynowego (system przepływowy, gniazdowy, maszyny równoległe, bufory międzyoperacyjne), kierunków przepływu (przepływ jednokierunkowy, możliwości powrotów), ograniczeń technologicznych oraz czasowych dla procesu produkcyjnego (np. szeregowanie bez czekania). W zależności od rozmiarów problemu (liczba równocześnie wykonywanych produktów, liczba części składowych, liczba maszyn) stosuje się jedno z dwóch podejść do budowy harmonogramu produkcji: podejście jednopoziomowe (monolityczne) – dla zadań o stosunkowo niewielkich rozmiarach oraz podejście wielopoziomowe (hierarchiczne) – dla zadań o znacznych rozmiarach, gdzie problem globalny dzielony jest na kolejno rozwiązywane problemy cząstkowe.

Opracowane dla poszczególnych poziomów metody liniowe modele matematyczne zadań programowania całkowitoliczbowego oparte są na podejściu monolitycznym. Umożliwiają one budowę harmonogramów produkcji dla wielostadialnych, jednokierunkowych systemów przepływowych z buforami międzyoperacyjnymi o ograniczonych pojemnościach. Każdy produkt przepływający przez system obciąża co najwyżej jedną maszynę danego stadium. Niektóre stadia mogą być pominięte.

Przykład zastosowania alternatywnego podejścia do planowania produkcji – hierarchicznego – dla różnych konfiguracji parku maszynowego oraz kierunków przepływu można znaleźć m.in. w pracy [5] (dopasowanego do opisywanej metody, np. również uwzględniającego planowane przestoje maszyn).

Zestawienie indeksów, parametrów oraz zmiennych wykorzystanych w modelach matematycznych, umożliwiających budowę wstępnych harmonogramów produkcji dla poszczególnych zakładów, zamieszczono w tabeli 1. Wśród wyróżnionych tam indeksów znajduje się indeks jednostkowego przedziału czasowego I . Wyodrębnienie przedziałów czasowych ułatwia uwzględnienie w budowanym harmonogramie planowanych przestojów maszyn, takich jak np. remonty, przebrojenia, konserwacje. Liczba przedziałów czasowych H , związana z szacowaną długością uszeregowania, została wyznaczona według procedury opracowanej przez autora artykułu, opisaną szczegółowo w pracy [5], a także [6].

Każdy produkt przepływający przez system ma przypisany indeks k . Jeżeli wśród przepływających przez system wyrobów są produkty identyczne, to charakteryzują się taką samą wartością parametru ρ_k – nazywane są one produktami tego samego typu. Identyfikacja typów produktów wykorzystana została w planowaniu przebrojeń maszyn.

Zestawione w tabeli 1 oznaczenia wykorzystane zostały w modelu matematycznym, sformułowanym w zależnościach (1)–(18). Minimalizowana suma (1) przedstawia koszty ponoszone w związku z nieterminowym wykonaniem produktów, gdzie pierwszy składnik tej sumy reprezentuje koszty związane ze zbyt wczesnym wykonaniem operacji dla produktu (koszty magazynowania), a drugi i trzeci – koszty ponoszone w związku ze zbyt późnym wykonaniem produktu, w tym kary umowne (trzeci składnik) za przekroczenie najpóźniejszego dopuszczalnego wykonania produktów [7].

Tabela 1
Zestawienie indeksów i parametrów wejściowych – dla poziomu I i III

Indeksy:		k – produkt (wyrób); $k \in K = \{1, \dots, W\}$;
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_v	–	pojemność bufora międzyoperacyjnego, umieszczonego przed stadium v ;
b_i	–	maksymalna liczba podajników, jakie można ustawić przy maszynie i ;
c_{1k}	–	koszt ponoszony w ciągu jednej jednostki czasu (jeden przedział czasowy), wynikający z przyspieszenia wykonania operacji dla produktu k ;
c_{2k}	–	koszt ponoszony w ciągu jednej jednostki czasu (jeden przedział czasowy), wynikający z opóźnienia wykonania operacji dla produktu k ;
c_{3k}	–	jednostkowa kara (koszt) za przekroczenie najpóźniejszego terminu wykonywania operacji dla produktu k .
$g_{\varepsilon v}$	–	czas transportu produktu pomiędzy maszynami należącymi do stadiów: ε, v ;
p_{jk}	–	czas wykonywania operacji j dla produktu k ;
s_k	–	termin zakończenia wykonywania wszystkich operacji dla produktu k ;
u_k	–	najpóźniejszy termin zakończenia wykonywania wszystkich operacji dla produktu k , po przekroczeniu którego naliczana jest jednostkowa kara;
α	–	dowolna liczba całkowita, większa od szacowanej długości uszeregowania;
$\gamma_{k\psi}$	–	czas przebrojenia w związku ze zmianą asortymentu produkcji – z produktu k na ψ .
ρ_k	–	typ k – tego produktu;
μ_{il}	=	1, jeżeli maszyna i jest dostępna w przedziale czasowym l , inaczej $\mu_{il} = 0$;
η_{ij}	=	1, jeżeli maszyna i jest zdolna do wykonywania operacji typu j , inaczej $\eta_{ij} = 0$;
J_c	–	zbiór operacji wymagających użycia podajnika części $J_c \subset J$;
J_k	–	zbiór operacji wykonywanych dla produktu k , $J_k \subset J$;
D	–	zbiór uporządkowanych par (i, v) , takich, że maszyna i należy do stadium v ;
P_1	–	zbiór par (k, j) , gdzie $k \in K, j \in J_k$ i k jest pierwszą operacją dla produktu k ;
P_2	–	zbiór par (k, j) , gdzie $k \in K, j \in J_k$ i j jest ostatnią operacją dla produktu k ;
R_k	–	zbiór par (j, r) , gdzie $j, r \in J_k$ – kolejno wykonywanych operacji dla produktu k .
Zmienne:		
d_k	–	czas przyspieszenia w wykonaniu produktu k ;
e_k	–	czas opóźnienia w wykonaniu produktu k ;
f_k	–	moment wykonania produktu k ;
v_k	=	1, jeżeli został przekroczony najpóźniejszy termin wykonania produktu k , inaczej $v_k = 0$;
y_{klv}	=	1, jeżeli bufor międzyoperacyjny znajdujący się przed stadium v jest obciążony przez produkt k w przedziale czasowym l , inaczej $y_{klv} = 0$;
z_{ijkl}	=	1, jeżeli na maszynie i wykonywana jest operacja typu j dla produktu k przedziale czasowym l , inaczej $z_{ijkl} = 0$.

Zminimalizować:

$$\sum_{k \in K} (d_k c_{1k} + e_k c_{2k} + v_k c_{3k}) \quad (1)$$

przy ograniczeniach:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_k : \eta_{ij}=1} z_{ijkl} = p_{jk}; \quad j \in J_k; \quad k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_k : \eta_{ij}=1} z_{ijkl} \leq 1; \quad k \in K; \quad l \in L \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in J_k} \sum_{l \in L} \frac{z_{ijkl}}{p_{jk}} \leq b_i; \quad i \in I \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in J_k : \eta_{ij}=1} z_{ijkl} \leq \mu_{il}; \quad i \in I; \quad l \in L \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \frac{l \cdot z_{ijkl}}{p_{jk}} - \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \frac{l \cdot z_{irkl}}{p_{rk}} - \frac{p_{jk} + p_{rk}}{2} \geq 0; \quad (6)$$

$$(r, j) \in R_k; \quad k \in K$$

$$z_{ijkl} + z_{\tau rkf} \leq 1; \quad (i, v), (\tau, v) \in D : \tau \neq i; \quad (7)$$

$$j, r \in J : j \neq r; \quad k \in K; \quad l, f \in L$$

$$l \cdot \sum_{i \in I} z_{ijkl} - f \cdot \sum_{i \in I} z_{ijkf} \leq p_{jk} - 1 + \left(1 - \sum_{i \in I} z_{ijkf} \right) \cdot \alpha; \quad (8)$$

$$j \in J; \quad k \in K; \quad l, f \in L : l < f, \quad p_{jk} > 1$$

$$l \cdot z_{ijkl} - f \cdot z_{\tau rkf} - 1 \geq g_{\varepsilon v} + \alpha(1 - z_{ijkl}); \quad (i, v), (\tau, \varepsilon) \in D; \quad (9)$$

$$(r, j) \in R_k; \quad k \in K; \quad l, f \in L : f < l$$

$$l \cdot z_{ijkl} - f \cdot z_{irkf} \leq p_{jk} + p_{rk} - 1 + \alpha(1 - z_{ijkl}) + \alpha(1 - z_{trkf});$$

$$i \in I; k \in K; l, f \in L : f < l \quad (10)$$

$$f_k = \frac{\sum_{i \in J} \sum_{l \in L} l \cdot z_{ijkl}}{p_{jk}} + \frac{p_{jk} - 1}{2}; \quad (k, j) \in P_2 \quad (11)$$

$$i \cdot z_{ijkl} \geq \tau \cdot z_{trkf} - \alpha \cdot (1 - z_{ijkl});$$

$$i, \tau \in I; (r, j) \in R_k; k \in K; l, f \in L \quad (12)$$

$$e_k \geq f_k - w_k; \quad d_k \geq w_k - f_k; \quad f_k - u_k \leq \alpha \cdot v_k; \quad k \in K \quad (13)$$

$$\sum_{l \in L} \frac{l z_{ijkl}}{p_{jk}} - \frac{p_{jk} + p_{rk}}{2} - \sum_{l \in L} \frac{l z_{trkl}}{p_{rk}} - g_{v\varepsilon} = \sum_{l \in L} y_{klv};$$

$$(i, v), (\tau, \varepsilon) \in D : v > \varepsilon; (r, j) \in R_k : p_{jk}, p_{rk} > 0; k \in K \quad (14)$$

$$l \cdot y_{klv} \geq \sum_{f \in L} \frac{f \cdot z_{trfk}}{p_{rk}} + \frac{p_{rk} + 1}{2} + g_{\varepsilon v} - \alpha(1 - y_{klv});$$

$$(\tau, \varepsilon) \in D; v \in V : \varepsilon < v; (r, j) \in R_k; k \in K; l \in L \quad (15)$$

$$l \cdot y_{klv} \leq \sum_{f \in L} \frac{f \cdot z_{ijkf}}{p_{jk}} + \frac{1 - p_{jk}}{2} + \alpha \cdot (1 - y_{klv});$$

$$(i, v) \in D; \varepsilon \in V : \varepsilon < v; (r, j) \in R_k; k \in K; l \in L \quad (16)$$

$$\sum_{k \in K} y_{klv} \leq a_v; \quad l \in L; \quad v \in V \setminus \{1\} \quad (17)$$

$$v_k, y_{klv}, z_{ijkl} \in \{0,1\}, d_k, e_k \geq 0; \quad (18)$$

$$i \in I; j \in J; k \in K; l \in L$$

Kolejne ograniczenia zawarte w modelu matematycznym zapewniają: (2) – rozdział wszystkich operacji pomiędzy te maszyny, które są zdadne do ich wykonania; (3) – wykonywanie w danym momencie co najwyżej jednej operacji dla danego produktu; (4) – zachowanie ograniczonej przestrzeni roboczej każdej maszyny (umieszczenie przy maszynie dopuszczalnej liczby podajników); (5) – obciążenie maszyny co najwyżej jedną operacją w danym przedziale czasowym; (6) – kolejność wykonywania operacji zgodną z daną sekwencją; (7) – obciążenie co najwyżej jednej maszyny danego stadium przez produkt; (8) – niepodzielność wykonywania operacji w czasie oraz w przestrzeni; (9) – czas na transport produktu pomiędzy stadiami; (10) – ciągłość kolejnych operacji wykonywanych na tej samej maszynie dla danego produktu (operacje nie są rozdzielone operacjami przynależnymi innym produktom); (11) – wyznaczenie czasów opuszczenia systemu przez przepływające przez niego produkty; (12) – jednokierunkowość przepływu; (13) – wyznaczenie nieterminowości (opóźnienia, przyspieszenia) w wykonaniu produktów oraz przyznanie jednostkowych kar za przekroczenie najpóźniejszych terminów wykonania produktów; (14) – wyznaczenie czasu obciążeń buforów przez poszczególne produkty; (15), (16) – określenie przedziałów czasowych, w których produkty obciążają odpowiednie bufony (przed wykonaniem kolejnych operacji); (17) – wyeliminowanie przekroczenia ograniczonej pojemności buforów; (18) – odpowiednie typy zmiennych.

Ponadto dla systemów, w których jest bardzo duże zróżnicowanie asortymentu przepływających produktów, wskazane jest uwzględnienie dodatkowego ograniczenia – (19) – zapewniającego czas na przebrojenie maszyn, w związku z wprowadzeniem do systemu produktów typu ψ , bezpośrednio po zakończeniu operacji dla produktów typu k .

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} l \cdot \left(\frac{z_{ir\psi l}}{p_{rk}} - \frac{z_{ijkl}}{p_{jk}} \right) - \frac{p_{jk} + p_{rk}}{2} + 1 \geq \gamma_{\psi k}; \quad (19)$$

$$(k, j) \in P_1; \quad (\psi, r) \in P_2 : \rho_k \neq \rho_{\psi}$$

Poziom II – wyznaczenie harmonogramu dostaw części składowych i półproduktów

Znajomość zapotrzebowania na części składowe, wynikająca ze wstępnego planu produkcji zbudowanego na poziomie I metody, jest uwzględniana w tworzeniu harmonogramu dostaw części składowych. W sformułowanym dla tego zadania modelu matematycznym stosowane są oznaczenia zestawione w tabeli 2.

Tabela 2

Zestawienie indeksów, parametrów wejściowych oraz zmiennych – dla poziomu II

Indeksy:	
i – producent części składowych; $i \in I = \{1, \dots, M\}$;	k – część składowa; $k \in K = \{1, \dots, W\}$;
j – producent złożonych wyrobów; $j \in J = \{1, \dots, N\}$;	l – okres (jednostkowy); $l \in L = \{1, \dots, H\}$;
Parametry wejściowe:	
a_{ijk}	– min. liczba części k , sprzedawanych przez dostawcę i odbiorcy j , upoważniająca do upustu;
b_{ijk}	– kwota upustu danego odbiorcy j przez dostawcę i w związku z jednorazową sprzedażą części k w liczbie wynoszącej co najmniej a_{ijk}
c_{1ijl}	– cena usługi transportowej pomiędzy zakładami producentów: i, j wykonywanej w okresie l ;
c_{2ik}	– cena części składowej k sprzedawanej przez producenta i ;
c_{3jk}	– kara za każdy dzień opóźnienia w dostawie części składowej k do producenta j ;
c_{4jk}	– koszt magazynowania w okresie jednostkowym 1 sztuki części k w zakładzie producenta j ;
d_{ikl}	– podaż producenta i , dotycząca części k w okresie l ;
p_{jkl}	– wielkość zapotrzebowania producenta j na część k w okresie l ;
v_k	– przestrzeń zajmowana przez produkt k w czasie jego transportu (z opakowaniem);
v_l	– pojemność samochodu dostawczego, dysponowanego w okresie l ;
A	– zbiór par (j, k) , gdzie część składowa k jest wykorzystywana w produkcji w zakładzie j ;
K	– zbiór par (i, k) , gdzie część składowa k jest produkowana w zakładzie producenta i ;
P	– zbiór trójek (i, k, l) , gdzie producent i ma dostępne do transportu części k w okresie l ;
R	– zbiór trójek (j, k, l) , gdzie producent (odbiorca) j ma zapotrzebowanie na części k w okresie l ;
T	– zbiór trójek (i, j, l) , określający okresy l , w których możliwy jest transport od producenta (dostawcy) i do producenta (odbiorcy) j ;
U	– zbiór trójek (i, j, k) , gdzie producent i dostarczający części składowe k do odbiorcy j stosuje upusty, związane z zamówieniem odpowiedniej liczby części k .
Zmienne:	
x_{ijkl}	– liczba sztuk części k transportowanych pomiędzy zakładami producentów: i, j w okresie l ;
y_{ijk}	= 1, jeżeli zamawiana dla jednego transportu liczba części k , mającego miejsce pomiędzy zakładami producentów i, j wynosi co najmniej a_{ijk} , inaczej $y_{ijk} = 0$;
z_{ijl}	= 1, jeżeli w okresie l ma miejsce transport pomiędzy zakładami producentów: i, j .
g_{jkl}	– liczba części składowych k będących w nadmiarze w zakładzie producenta j w okresie l ;
q_{jkl}	– liczba brakujących sztuk części składowych k w zakładzie producenta j w okresie l ;

Model matematyczny:

Zminimalizować:

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} c_{2ik} x_{ijkl} - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} b_{ijk} y_{ijk} + \\ & + \sum_{(i,j,l) \in T} c_{1ijl} z_{ijl} + \sum_{(j,k) \in A} \sum_{l \in L} (c_{3jk} q_{jkl} + c_{4jk} g_{jkl}) \end{aligned} \quad (20)$$

przy ograniczeniach:

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L: (i,j,l) \in T} x_{ijkl} = \sum_{l \in L: (j,k,l) \in R} p_{jkl}; \quad j \in J; k \in K \quad (21)$$

$$\sum_{l \in L: (j,k,l) \in R} x_{ijkl} \geq a_{ijk} y_{ijk}; \quad (i,j,k) \in U \quad (22)$$

$$\sum_{k \in K: (i,k,l) \in P} v_k x_{ijkl} \leq v_l; \quad (i,j,l) \in T \quad (23)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ijkl} = 0; \quad (i,j,l) \notin T \quad (24)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ijkl} \leq \alpha \cdot z_{ijl}; \quad (i,j,l) \in T \quad (25)$$

$$\sum_{j \in J: (i,j,l) \in T} x_{ijkl} \leq \sum_{\tau \in L: \tau \leq l \wedge (i,k,\tau) \in P} d_{ik\tau}; \quad i \in I; k \in K; l \in L \quad (26)$$

$$\sum_{\tau \in L: \tau \leq l \wedge (j,k,\tau) \in R} p_{jk\tau} - \sum_{\tau \in L: \tau \leq l} \sum_{i \in I} x_{ijk\tau} \leq q_{jkl}; \quad j \in J; k \in K; l \in L \quad (27)$$

$$\sum_{\tau \in L: \tau \leq l} \sum_{i \in I} x_{ijk\tau} - \sum_{\tau \in L: \tau \leq l \wedge (j,k,\tau) \in R} p_{jk\tau} \leq g_{jkl}; \quad j \in J; k \in K; l \in L \quad (28)$$

$$x_{ijkl}, z_{ijl} \in \{0,1\}; \quad i \in I; j \in J; k \in K; l \in L \quad (29)$$

Zależność (20) służy do minimalizacji kosztów obsługi łańcucha dostaw, wśród których wyróżniono: koszty zakupu części składowych przez producentów złożonych wyrobów (składnik 1), uwzględniające rabaty za jednorazowe zakupy określonej liczby sztuk

(składnik 2); koszty transportu (składnik 3); koszty związane z nieterminowością dostaw części składowych do producentów złożonych wyrobów, które związane są z: karami za każdy dzień (okres) opóźnienia w dostawie części, kosztami magazynowania części dostarczonych przedterminowo. Kolejne warunki matematyczne zapewniają: (21) – dostarczenie wymaganej liczby części składowych do każdego producenta złożonych wyrobów; (22) – uzależnienie ceny części składowych od zamawianej jednorazowo liczby sztuk tych części; (23) – miejsce na dostarczane części w dysponowanym w danym okresie środku transportu; (24) – eliminację transportu części składowych w okresach (dniach), gdy środki transportu pomiędzy poszczególnymi zakładami są niedostępne; (25) – wyznaczenie transportów pomiędzy zakładami; (26) – zabezpieczenie przed zakupem niedostępnej liczby części składowych w zakładzie producenta tych części; (27) – wyznaczenie niedoborów (braków) części składowych w poszczególnych okresach dla zakładów produkujących złożone wyroby; (28) – wyznaczenie dla producentów złożonych wyrobów nadwyżek części składowych w kolejnych okresach; (29) – odpowiednie typy zmiennych.

Poziom III – budowa szczegółowych harmonogramów produkcji

Dla każdego producenta złożonych wyrobów budowany jest szczegółowy harmonogram produkcji. Dostosowany jest on do harmonogramu dostaw części składowych, zbudowanego na poziomie II. Na podstawie znanych czasów dostaw części składowych znana jest wartość parametru r_k – momentu gotowości wykonywania operacji dla produktu k . Dane te wykorzystywane są do ponownego rozwiązania zadania wyznaczania harmonogramu produkcji – sformułowanego dla poziomu I, uzupełnionego o warunek (30). Zależność ta zapewnia wykonywanie operacji dla produktu k dopiero wtedy, gdy są dostarczone odpowiednie części składowe.

$$l \cdot z_{ijkl} \geq r_k; \quad i \in I; \quad j \in J_k : \eta_{ij} = 1; \quad k \in K; \quad l \in L \quad (30)$$

3. Eksperymenty obliczeniowe

Weryfikacja metody dokonana została w oparciu o pakiety optymalizacji dyskretniej: [10, 11]. Testowe przykłady rozwiązano dla trzech zakładów – producentów części składowych oraz pięciu zakładów – producentów złożonych wyrobów. Eksperymenty obliczeniowe pozwoliły dokonać pewnych porównań dla zakładów – producentów części składowych. Przeprowadzono je dla 3 grup zadań testowych. W tabeli 3 zestawiono parametry tych grup oraz wartości średnie wyników porównań dla poszczególnych producentów złożonych wyrobów. Każda z testowych grup obejmowała 20 przykładów.

Porównano rozwiązania otrzymane dla opracowanej metody z wynikami, w których uwzględniono możliwości powrotów do maszyn wcześniej odwiedzanych, gdzie modele matematyczne dla poszczególnych zakładów – modułów (poziom I i II) metody opisane są w pracy [5]. Wyniki porównania pokazują wpływ ograniczenia przepływu do tylko jednego kierunku na wydłużenie długości harmonogramu – średnio o około 8,5÷9,2%. Koszty pono-

szzone w związku z nieterminowym wykonaniem produktów były wyższe o około $4,9 \div 5,4\%$ w przypadku jednokierunkowego systemu przepływowego, w porównaniu do systemu z możliwością powrotu. Przyjęto, że w porównywanych zakładach produkcyjnych jest jednakowe podejście do gospodarki magazynowej (są bufora międzyoperacyjne lub ich brak).

Tabela 3
Parametry grup testowych zadań i wyniki eksperymentów obliczeniowych

Parametry grup zadań testowych							Średnie wyniki porównań w [%]			
							jednokierunkowego przepływu z przepływem umożliwiającym powroty	systemu bez buforów (z blokowaniem maszyn) z systemem z buforami		
Grupa	ϑ	M	N	W	H	B	ξ_1	θ_1	ξ_2	θ_2
1	2	6	12	4	20	12	9,2	5,4	8,7	5,2
2	3	6	14	6	30	12	9,0	5,3	8,1	4,7
3	4	8	16	7	35	16	8,5	4,9	7,9	4,4

Liczby: ϑ – stadiów, M – maszyn, N – typów operacji, W – typów produktów, H – przedziałów czasowych, B – suma pojemności buforów międzyoperacyjnych.
 ξ_1, ξ_2 – porównanie długości uszeregowania, θ_1, θ_2 – porównanie kosztów ponoszonych w związku z nieterminowym wykonaniem produktów, gdzie np.:
 $\xi_1 = (C_{\max}^I - C_{\max}^{II}) / C_{\max}^{II}$; $C_{\max}^I, C_{\max}^{II}$ – długości uczerogowań dla: systemu jednokierunkowego, systemu z możliwością powrotów (wielkość odniesienia).
 $\theta_1 = (F^I - F^{II}) / F^{II}$; F^I, F^{II} – koszty ponoszone w związku z nieterminowym wykonaniem produktów, wyznaczone dla: systemu jednokierunkowego, systemu z powrotami.

Porównano również dwie konfiguracje systemu: bez buforów (w którym może zachodzić blokowanie maszyn przez produkty oczekujące na wykonanie kolejnych operacji – przedstawiony w pracy [6]) z systemem z buforami międzyoperacyjnymi (opisany w niniejszym artykule). Eliminacja buforów międzyoperacyjnych wpłynęła na wydłużenie długości uszeregowania o około $7,9 \div 8,7\%$ oraz wzrost kosztów o $4,4 \div 5,2\%$. Porównanie to zostało dokonane oczywiście przy założeniu, że we wszystkich zakładach produkcyjnych są jednakowe typy przepływów oraz jednakowe rodzaje gospodarki magazynowej. Modułowy charakter przedstawionego systemu wspomagania zarządzania łańcuchem dostaw ma jednak dużą zaletę: elastyczność. Daje to możliwość różnicowania poszczególnych jego ogniw – zakładów produkcyjnych, czyli np. konfiguracji maszyn, organizacji przepływów produktów.

4. Uwagi końcowe

Zaletą opracowanej metody jest próba godzenia interesów całego łańcucha dostaw z dążeniami poszczególnych zakładów produkcyjnych, będącymi ogniwami tego łańcucha.

Minimalizowane są koszty obsługi łańcucha dostaw, ale również koszty związane z nieterminowością wykonywania operacji przez poszczególne zakłady produkcyjne, dzięki czemu każdy zakład produkcyjny dąży do spełnienia nie tylko warunków ilościowych, ale również czasowych.

Dzięki podziałowi rozwiązywanego zadania na kolejno rozpatrywane problemy cząstkowe można rozwiązywać problemy o stosunkowo dużych rozmiarach – opisanych znaczną liczbą indeksów, parametrów oraz zmiennych. Odbywa się to oczywiście kosztem jakości rozwiązania. Zastosowanie w metodzie podejścia hierarchicznego nieznacznie (w zależności od parametrów wejściowych) wydłuża długości harmonogramów dla poszczególnych zakładów produkcyjnych.

Zastosowanie programowania całkowitoliczbowego umożliwiło otrzymywanie rozwiązań optymalnych dla zadań rozwiązywanych na poszczególnych poziomach metody. Wpłynęło to jednak na czasochłonność obliczeń. Wykorzystanie opisanych zależności matematycznych w algorytmie hurystycznym, np. relaksacyjnym, skróciłoby wielokrotnie czasy obliczeń dla poszczególnych zadań, pogorszyłyby jednak jakość rozwiązań.

Modułowość we wspomaganiu zarządzaniem łańcucha dostaw, którą charakteryzuje się metoda, korzystnie wpływa na możliwość reharmonogramowania. Uaktualnione harmonogramy produkcji można budować tylko dla tych zakładów, dla których wymagana jest zmiana uszeregowania operacji.

Przedstawione dla poszczególnych poziomów metody modele matematyczne mogą być oczywiście zmodyfikowane, rozbudowane. Zmiany mogą dotyczyć poszczególnych modułów – zakładów. Mogą one być związane ze strukturą parku maszynowego w zakładzie (linia produkcyjna, gniazda produkcyjne, podajniki części, maszyny równoległe), organizacją przepływu produktów (przepływ jednokierunkowy, możliwość omijania stadiów, przepływ powrotny), czy z kryterium optymalizacji.

Odzwierciedlenie w harmonogramach produkcji planowanych przestojów maszyn (remonty, konserwacje) oraz czasów przebrojeń przy zmianie asortymentu produkcji można rozszerzyć o uwzględnienie wiedzy o losowych przestojach maszyn – w przypadku znajomości znajomość prawdopodobieństwa znajdowania się tych urządzeń w stanie zdatności w szacowanym okresie ich eksploatacji.

Literatura

- [1] Fehner I., *Zarządzanie łańcuchem dostaw*. Wyższa Szkoła Logistyki, Poznań 2007.
- [2] Witkowski J., *Zarządzanie łańcuchem dostaw*. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2003.
- [3] Pochet Y., Wolsey L.A., *Production Planning by Mixed Integer Programming*. Springer, New York 2006.
- [4] Sawik T., *Integer Programming approach to reactive scheduling in make-to-order manufacturing*. Mathematical and Computer Modelling, 46 (11–12), 2007, 1373–1387.
- [5] Magiera M., *Modele PLC szeregowania operacji z określonymi terminami zakończenia zadań*. [w:] Komputerowo zintegrowane zarządzanie, t. II pod red. R. Knosali. Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2007, 25–34.

- [6] Magiera M., *Modele PLC szeregowania operacji dla wielostadialnego systemu wytwarzania dokładnie na czas*. [w:] Wybrane zagadnienia logistyki stosowanej, Polska Akademia Nauk – Komitet Transportu, 2007, 152–159.
- [7] Magiera M., *Metoda harmonogramowania montażu dla systemów wytwarzania dokładnie na czas*. Przegląd Mechaniczny, Miesięcznik Naukowo-Techniczny, nr 12/08, Warszawa 2008, 33–37.
- [8] Hall N.G., Sriskandarayah C., *A survey of machine scheduling problems with blocking and no-wait in process*. Operations Research, 44, 1996, 510–525.
- [9] Ronconi D.P., *A note on constructive heuristics for flowshop problem with blocking*. International Journal of Production Economics, 87, 2004, 39–48.
- [10] Fourer R., Kernighan B., Gay D., *AMPL – A Modelling Language for Mathematical Programming*. Boyd & Fraser Publishing Company 1993.
- [11] Scharge L., Cunningham L., *LINGO, Optimization Modelling Language*. LINDO Systems Inc., Chicago 1991.