

Waldemar KACZMARCZYK
Akademia Górniczo-Hutnicza

WARUNKI SKUTECZNEJ KOORDYNACJI PRODUKCJI I DYSTRYBUCJI W ŁAŃCUCHACH DOSTAW

Streszczenie. Poniższa praca pokazuje, że w łańcuchach dostaw sama wymiana informacji pomiędzy jego uczestnikami nie prowadzi automatycznie do poprawy łącznej efektywności. Konieczne jest optymalne wykorzystanie tych informacji, co umożliwi pełną koordynację produkcji i dystrybucji. W przeciwnym wypadku odejście od tradycyjnych metod planowania może w pewnych okolicznościach nawet pogorszyć efektywność łańcucha.

CONDITIONS FOR EFFECTIVE COORDINATION OF MANUFACTURING AND DISTRIBUTION IN SUPPLY CHAINS

Summary.

This paper proves that in supply chains information sharing between its members does not guarantee improvement of total efficiency. Necessary is optimal usage of shared information what makes possible full coordination of manufacturing and distribution. In other case departure form traditional procurement planning in some circumstances may even worsen chain efficiency.

1. Wprowadzenie

W niniejszej pracy analizowana jest efektywność planowania produkcji i dostaw, gdy kontrakt zobowiązuje dostawcę do utrzymywania określonego poziomu zapasów u odbiorcy (ang. *Vendor Managed Inventory*, VMI). Tak więc odbiorca nie planuje swojego zaopatrzenia, lecz jedynie zgłasza dostawcy (producentowi) z pewnym wyprzedzeniem swoje dzienne zapotrzebowanie i prognozy na przyszłość. Na tej podstawie dostawca sam decyduje, kiedy i ile części dostarczyć, aby zaspokoić potrzeby odbiorcy i utrzymać uzgodniony zapas bezpieczeństwa. Przegląd podobnych strategii przenoszenia odpowiedzialności za tworzenie zapasów na dostawców i ocenę skutków ich stosowania można znaleźć np. w pracy [1]. Badania nad koordynacją w tak zorganizowanych łańcuchach dostaw dotyczyły dotychczas głównie przypadków z losowym, ale stacjonarnym popytem i ograniczały się do adaptacji klasycznych polityk uzupełniania zapasów. W tej pracy analizowany jest przypadek deterministyczny, gdy popyt jest zmienny, ale znany producentowi z pewnym wyprzedzeniem. Dostawcą jest producent części, a odbiorcami kilku producentów samochodów. Wykorzystywany tu model został już szczegółowo omówiony w pracy [2].

Zadanie planowania dostaw obejmuje podejmowanie decyzji, kiedy, do kogo i jak dużą skierować dostawę. Ten sam towar można skierować bowiem do kilku odbiorców. Celem planowania jest minimalizacja kosztów transportu. Ponieważ planowanie dostaw jest w rękach producenta, to może on ten plan skoordynować ze swoim planem produkcyjnym, minimalizując koszty zapasów i przezbrajania maszyn. Takie zadania *koordynacji produkcji i dystrybucji* były już opisywane [3], ale dla przypadków, gdy zakłady produkujące części i ich odbiorcy były częścią jednej firmy. W pracy [4] przedstawiono analizę wpływu takiej koordynacji na łączne koszty. Wynika z niej, że dzięki koordynacji można uzyskać oszczędności od 3 do 20%.

W kolejnych rozdziałach omówiony zostanie najpierw monolityczny model programowania liniowego całkowitoliczbowego (MIP), a następnie model zdekomponowany na dwa etapy: w pierwszym planowana jest produkcja, a w drugim transport. Na koniec wyniki planowania obiema opisanymi metodami porównane zostaną z metodą tradycyjną, w której najpierw odbiorcy sami planują swoje zaopatrzenie, a następnie dostawca dostosowuje swoją produkcję do ich zamówień.

2. Model monolityczny

Tabela 1

Parametry	
\mathcal{T}	= $\{1, \dots, T\}$ – zbiór okresów, gdzie T to liczba okresów,
\mathcal{N}	= $\{1, \dots, n\}$ – zbiór produktów, gdzie n to liczba produktów,
\mathcal{K}	– zbiór klientów,
S	– zbiór rodzajów pojazdów,
d_{jkt}	– popyt klienta k na produkt j w okresie t ,
h_{jk}	– jednostkowy koszt magazynowania produktu j u klienta k , przy czym $k = 0$ oznacza dostawcę,
p_j	– czas wykonywania produktu j ,
C_t	– zdolność produkcyjna w okresie t ,
s_j	– koszt przezbrojenia przed produktem j ,
L_s	– ładowność pojazdu s ,
$q(k, s)$	– czas transportu pojazdem s do klienta k ,
c_{ks}	– jednostkowy koszt transportu do klienta k pojazdem s ,
e_{jk}	– jednostkowy koszt straconego popytu na produkt j u klienta k .

W tabeli 1 podane są parametry omawianego zadania. Horyzont planowania wynosi 28 dni, gdyż na takich prognozach jest oparty. Liczba wyrobów wynosi $n = 2$, a klientów 3. Stosowane są cztery różne samochody dostawcze. Czasy transportu dla małych samochodów wynoszą 2, a dla dużych 3 dni. Popyt w trakcie tygodnia ulega dużym wahaniom, nawet o 100%. Roczny jednostkowy koszt zapasów został przyjęty na poziomie 5% wartości wyrobów, a koszt straconego popytu 10%.

Tabela 2

Zmienne

x_{jt}	– wielkość produkcji wyrobu j w okresie t ,
y_{jt}	= 1, gdy w okresie t produkowany jest wyrób j , 0 inaczej,
z_{jt}	= 1, gdy w okresie t uruchamiany jest produkcja wyrobu j , 0 inaczej,
u_{jkst}	– wielkość dostawy produktu j do klienta k w okresie t , $u_{jkst} = 0$ dla $t \leq q(k,s)$,
v_{kst}	= 1, gdy do klienta k w okresie t wysyłany jest pojazd s , 0 inaczej,
I_{jkt}	– zapas produktu j na koniec okresu t u klienta k , gdzie $t = 0$ oznacza zapas początkowy, natomiast $k = 0$ zapasy dostawcy,
f_{jkt}	– stracony (niezaspokojony) popyt na produkt j u klienta k w okresie t .

W tabeli 2 opisane są zmienne modelu monolitycznego (1-9), tzn. modelu obejmującego wszystkie zadania składowe całego omawianego procesu planowania.

$$\min \sum_{j \in \mathcal{N}} \sum_{t \in \mathcal{T}} (s_j z_{jt} + h_{j0} I_{j0t} + \sum_{k \in \mathcal{K}} (h_{jk} I_{jkt} + e_{jk} f_{jkt})) + \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{t \in \mathcal{T}} (c_{ks} v_{kst} + \sum_{j \in \mathcal{N}} h_{jk} q(k,s) u_{jkst}) \quad (1)$$

$$\text{p.o.} \quad I_{j0,t-1} + \sum_{s \in \mathcal{S}} u_{jks,t-q(k,s)} - d_{jkt} + f_{jkt} = I_{jkt}, \quad t \in \mathcal{T}, j \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{K}, \quad (2)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{N}} u_{jkst} \leq L_s v_{kst}, \quad t \in \mathcal{T}, k \in \mathcal{K}, s \in \mathcal{S}, \quad (3)$$

$$I_{j0,t-1} + x_{jt} - \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{s \in \mathcal{S}} u_{jkst} = I_{j0t}, \quad t \in \mathcal{T}, j \in \mathcal{N}, \quad (4)$$

$$x_{jt} \leq B_{jt} y_{jt}, \quad t \in \mathcal{T}, j \in \mathcal{N}, \quad (5)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{N}} y_{jt} \leq 1, \quad t \in \mathcal{T}, \quad (6)$$

$$y_{jt} - y_{j,t-1} \leq z_{jt}, \quad t \in \mathcal{T}, j \in \mathcal{N}, \quad (7)$$

$$x_{jt}, u_{jkst}, I_{jkt} \geq 0, \quad t \in \mathcal{T}, j \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{K}, s \in \mathcal{S}, \quad (8)$$

$$y_{jt}, z_{jt}, v_{kst} \in \{0,1\}, \quad t \in \mathcal{T}, j \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{K}, s \in \mathcal{S}, \quad (9)$$

$B_{jt} = \min \{ \lfloor C_i / p_{jt} \rfloor, \sum_{l=t, \dots, T} d_{jl} \}$ oznacza górne oszacowanie wielkości produkcji x_{jt} .

Ograniczenie (2) opisuje bilans zapasów, dostaw i popytu odbiorców, a (4) bilans producenta. Ograniczenie (3) wymusza, by wielkość dostaw była mniejsza od ładowności wybranych pojazdów, a (5), by wielkość produkcji była mniejsza od czasu pracy maszyny. Ograniczenie (6) zezwala na produkcję co najwyżej jednego wyrobu dziennie. (7) sprzęga zmienne opisujące stan maszyny y_{jt} ze zmienną przeczbrojenia z_{jt} . Czas dostawy zależny od wyboru samochodu wymusił utworzenie oddzielnych ograniczeń (3) oraz osobnych zmiennych u_{jkst} dla każdego rodzaju samochodu.

Czas dostawy $q(k,s)$ jest bezpośrednio uwzględniony w ograniczeniu (2) przy wyznaczaniu właściwej zmiennej wielkości dostawy u_{jkst} dla danego dnia. Ostatni człon funkcji celu (1) dolicza koszt „magazynowania” wyrobów na samochodach podczas transportu, aby nie premiować wolniejszych środków transportu.

Proces produkcyjny modelowany był dotychczas [2] jako *planowanie partii przy ograniczonych zasobach* (ang. Capacited Lot Sizing Problem, CLSP). Tutaj zastosowany został natomiast jeden z modeli *planowania i szeregowani partii* tzw. CSLP (ang. Continuous Setup Lot-sizing Problem). Zmiana ta wynika z faktu, iż partie produkcyjne obejmują po kilka okresów. Model CLSP tego nie dopuszcza, a CSLP już tak. Przegląd takich modeli można znaleźć np. w pracy [5].

3. Planowanie sekwencyjne i tradycyjne

Takie złożone zadania są zazwyczaj rozwiązywane przez dekompozycję na kilka niezależnych zadań rozwiązywanych *sekwencyjnie*. W tym przypadku na ogół najpierw rozwiązywane jest zadanie planowania produkcji, a następnie dystrybucji. Taka kolejność wydaje się być naturalna dla producenta i jest stosowane w praktyce, gdyż produkcja jest jego głównym zadaniem, a ponadto faktycznie poprzedza dystrybucję.

Model *planowania produkcji* składa się z ograniczeń (4-7). Popyt klientów musi tu zostać zagregowany i uwzględniony bezpośrednio w bilansie zapasów producenta, a zmienna zapasów I_{jt} reprezentuje zapasy zarówno dostawcy jak i odbiorców. Ponieważ przy planowaniu produkcji nie wiadomo jakim środkami transportu będą realizowane poszczególne dostawy, więc nie można z góry przewidzieć czasu ich realizacji. Przyjęto zatem, że produkcja musi wyprzedzać zapotrzebowanie klientów o najdłuższy czas dojazdu: $Q = \max_{k \in K, s \in S} q(k, s)$. Po obliczeniu planu produkcyjnego trzeba *zaplanować dystrybucję*, czyli kiedy i jak duże partie wyrobów trzeba dostarczyć do poszczególnych odbiorców. To zadanie opisują ograniczenia (2-4).

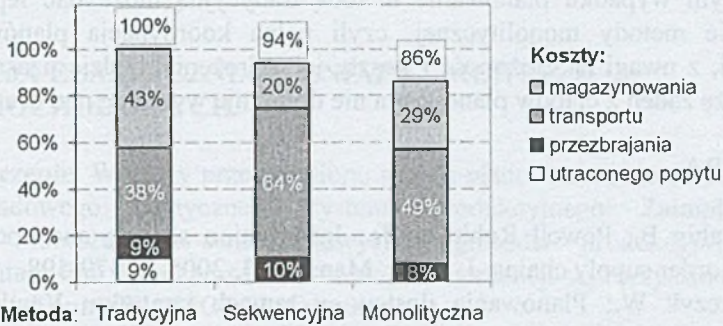
Tradycyjne planowanie w łańcuchach dostaw przebiega w odwrotnym kierunku niż w opisanej powyżej metodzie sekwencyjnej. Najpierw każdy z odbiorców planuje wyłącznie swoje *zaopatrzenie*, czyli narzuca dostawcy terminy i wielkości dostaw. A dopiero potem dostawca planuje swoją produkcję. Modele obu tych zadań są zbliżone do modeli w metodzie sekwencyjnej.

4. Wyniki obliczeń

Wykonane zostały obliczenia dla stosunku jednostkowych kosztów przebrojenia i magazynowania s_j/h_j równego 100, 200 i 300, a także dla względnego obciążenia producenta wynoszącego około 60%, 70%, 80% i 90%. Względne obciążenie rozumiane jest tu jako $\sum_{t \in T} \sum_{j \in N} d_{jt} / \sum_{t \in T} C_t * 100\%$. Inne parametry były albo dobrze znane, albo tylko w niewielkim stopniu zależne od producenta. Na podstawie rzeczywistych danych o popycie, zostały opracowane cztery scenariusze jego zmian. Obliczenia wykonano przy pomocy program ILOG CPLEX 11 na komputerze z procesorem Intel T1300 1.66 MHz. Obliczeń trwały 30 minut. W metodach dwuetapowych planowanie produkcji rozwiązywane było w przeciągu kilkudziesięciu sekund, a pozostały czas przeznaczony był na zadanie dystrybucji. Łączny błąd względny rozwiązań, czyli względna różnica $(f^* - f^R)/f^R * 100\%$ wartości funkcji celu rozwiązań całkowitoliczbowych f^* i ich relaksacji liniowych f^R , dla metody

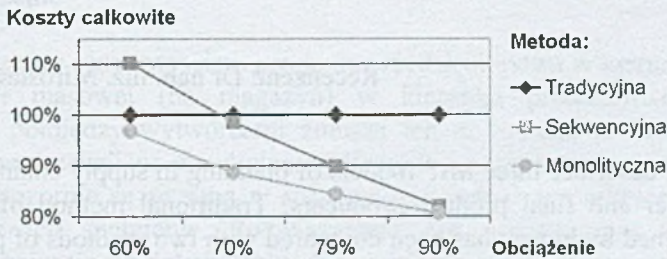
monolitycznej mieścił się w przedziale od 17,8% do 26,9%, dla metody sekwencyjnej od 2,8% do 6,3%, a dla metody tradycyjnej od 4,0% do 5,8%.

Na rysunku 1 przedstawiony jest rozkład czterech podstawowych rodzajów kosztów w zależności od zastosowanej metodach planowania. Wartość 100% odpowiada łącznym kosztom przy metodzie tradycyjnej. Wykorzystanie metody sekwencyjnej pozwala zredukować łączne koszty o 6%, a metody monolitycznej aż o 14% dzięki pełnej koordynacji produkcji i dystrybucji.



Rys. 1. Wielkość kosztów przy różnych metodach planowania w stosunku do kosztów metody tradycyjnej

W porównaniu z rozwiązaniami modelu monolitycznego metoda sekwencyjna prowadzi do znacznego wzrostu kosztów dystrybucji. Dzieje się tak, gdyż wyznaczając plan produkcyjny, ignoruje ona te koszty. W metodzie tradycyjnej, przy planowaniu zaopatrzenia klientów ignorowane są z kolei koszty zapasów u producenta i jego zdolności produkcyjne, prowadzi więc ona do ich wzrostu oraz utraty części popytu.



Rys. 2. Zależność kosztów całkowitych od względnego obciążenia producenta przy różnych metodach planowania w stosunku do kosztów metody tradycyjnej

Łączne koszty tylko w niewielkim stopniu były zależne od stosunku kosztów przezbrajania i magazynowania. Natomiast względne obciążenie producenta w istotny sposób wpływa na ich wielkość, co ilustruje rysunek 2. Metoda monolityczna zawsze daje najlepsze wyniki, ale w skrajnych przypadkach pozostałe metody też mogą być przydatne. Przy niskim obciążeniu producenta jego ograniczona zdolność produkcyjna w niewielkim stopniu wpływa na łączne koszty, więc metoda tradycyjna, koncentrująca się na kosztach zapasów i zaopatrzenia klientów, ustępuje

monolitycznej jedynie o 3%. Natomiast metoda sekwencyjna, pomimo wykorzystania pełnej informacji o popycie klientów, jest gorsza od tradycyjnej o przeszło 11%.

Przy wysokim obciążeniu producenta metoda sekwencyjna, planująca w pierwszej kolejności wykorzystanie jego zasobów, daje wyniki gorsze jedynie o 1% od wyników metody monolitycznej. Metoda tradycyjna jest tu gorsza aż o 19%.

Podsumowując, współpraca pomiędzy klientami i dostawcą, wymiana informacji i koordynacja planów są istotne, gdy zasoby produkcyjne są bardzo obciążone. W przeciwnym wypadku planowanie metodą tradycyjną może dać lepsze wyniki. Zastosowanie metody monolitycznej, czyli pełna koordynacja planów produkcji i dystrybucji, z uwagi na złożoność i koszty jej wdrożenia, będzie uzasadnione, pod warunkiem że żaden z etapów planowania nie dominuje wyraźnie nad drugim.

LITERATURA

1. Funda Sahin E., Powell Robinson Jr.: Information sharing and coordination in make-to-order supply chains, *J. Oper. Manag.*, 23, 2005, p. 579-598.
2. Kaczmarczyk W.: Planowanie dostaw w ramach kontraktu Vendor Managed Inventory przy zmiennym popycie. *Zeszyty Naukowe AGH, Automatyka*, tom 11, zeszyt 1-2, 2007, s. 129-138.
3. Zhi-Long Chen: Integrated Production and Distribution Operations: Taxonomy, Models, and Review, chapter 17 of the book *Handbook of Quantitative Supply Chain Analysis: Modeling in the E-Business Era*, edited by D. Simchi-Levi, S.D. Wu and Z.-J. Shen, Kluwer Academic Publishers, 2004.
4. Pankaj Chandra, Marshall L. Fisher: Coordination of Production and Distribution Planning. *Eur. J. Op. Res.*, 72, 1994, p. 503-517.
5. Drexl A., Kimms A.: Lot sizing and scheduling — survey and extensions. *Eur. J. Op. Res.*, 99, 1997, p. 221-235.

Recenzent: Dr hab. inż. Mirosław Zaborowski

Abstract

This paper describes three MIP models of planning in supply chain consisting of one part supplier and final product producers. Traditional method of procurement planning performed by buyers has been compared with two methods of planning done by suppliers based on information about client demand, with and without full coordination of manufacturing and distribution.

Computational experiments has proven that in analyzed supply chain coordination may give up to 19% savings on total cost. However information sharing is not enough to achieve such results. Decomposition of the whole production and distribution planning problem in independent subproblems and their successive solving may lead to unsatisfactory results. On the other hand such successive methods might be quite successful in extreme cases. If suppliers workload is low, less than 60%, traditional uncoordinated planning is almost optimal. If workload is high, over 90%, distribution might be planned after production without significant total cost surplus.