

Przegląd zaawansowanych modeli planowania produkcji

Waldemar Kaczmarczyk

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Zarządzania,

Katedra Badań Operacyjnych i Technologii Informacyjnych

Streszczenie. W niniejszym artykule przedstawione są podstawowe modele planowania produkcji wykorzystywane w zaawansowanych systemach planowania (APS): modele zadań planowania wielkości i szeregowania partii produkcyjnych, zadań planowania projektów przy ograniczonych zasobach i klasycznych zadań harmonogramowania. APS stanowią rozszerzenie systemów zarządzania zasobami przedsiębiorstwa (ERP). Umożliwiają rzeczywistą optymalizację najważniejszych planów operacyjnych z uwzględnieniem wszystkich celów i ograniczeń. Celem tego artykułu nie jest przedstawienie wyczerpującego przeglądu literatury, lecz przystępny opis podstawowych modeli, wyjaśnienie różnic nimi, wskazanie obszarów ich zastosowań, a także wskazanie podstawowej literatury i aktualnych kierunków badań naukowych.

Słowa kluczowe: systemy informatyczne, planowanie, optymalizacja, produkcja,

1. Wprowadzenie

W dość powszechnym przekonaniu systemy planowania (wykorzystania) zasobów przedsiębiorstw (ang. *enterprise resource planning*, ERP) umożliwiają skuteczne planowanie i koordynację wszystkich działań przedsiębiorstwa. W rzeczywistości są to raczej złożone systemy baz danych, korzystające z bardzo prostych, sztywnych reguł planowania [3], [26] (rozd. 2.2.3). Tworzone za ich pomocą plany są wprawdzie na ogół wykonalne, ale rzadko dobre. Przedsiębiorstwa, które chcą działać na podstawie „optymalnych” planów, powinny stosować metody implementowane w zaawansowanych systemach planowania (ang. *advanced planning systems*, APS) ([36], [37]).

ERP są przykładem informacyjnych *systemów transakcyjnych*, których głównym celem jest gromadzenie, przetwarzanie i udostępnianie informacji. Natomiast APS to *systemy analityczne* usprawniające działanie ERP, których celem jest analiza danych, prognozowanie, symulacja i optymalizacja, czyli zaawansowane metody planowania [33] (rozd. 2.2).

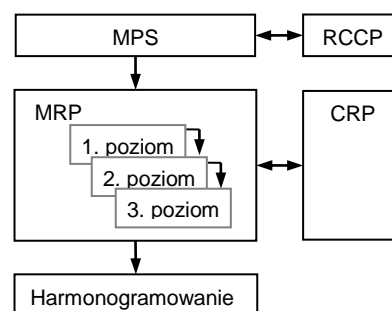
W rozdziale 2. tego artykułu przedstawione są wady klasycznych metod planowania produkcji wykorzystywanych w ERP, a w rozdziale 3. ogólna charakterystyka APS. Następnie

w rozdziale 4. opisano modele planowania wielkości i szeregowania partii produkcyjnych, w rozdziale 5. modele planowania projektów przy ograniczonych zasobach, a w rozdziale 6. modele teorii szeregowania. Na koniec w rozdziale 7. porównano wady i zalety różnych zaawansowanych modeli planowania produkcji, a także wskazano dziedziny ich zastosowań. W rozdziale 8. podsumowano niniejsze rozważania.

2. Wady tradycyjnych systemów planowania

Za planowanie produkcji w ERP odpowiada moduł planowania (wykorzystania) zasobów produkcyjnych (ang. *manufacturing resource planning*, MRP II) [34], [41]. Na rysunku 1. przedstawione są jego główne moduły składowe i kierunki przepływu informacji. Najpierw powstał moduł planowania zapotrzebowania materiałowego (ang. *materials requirements planning*, MRP I) [23], który z uwagi na jego istotne słabości rozbudowano stopniowo do MRP II. Oba te moduły nadal mają jednak istotne słabości [3], [26], m.in.:

- dekompozycja każdego dużego i złożonego zadania planowania na wiele zadań małych i łatwiejszych, każdy prostokąt na rysunku 1., które rozwiązywane są niezależnie, choć ich rozwiązania nie muszą składać się w spójne rozwiązanie pierwotnego zadania,
- brak jawnie i jasno sformułowanych celów planowania, kryteriów optymalizacji,
- założenie, że normatywny (planowany) cykl produkcyjny jest stały, a więc niezależny od aktualnego obciążenia,
- stosowanie prostych reguł (heurystyk) planowania, np. przy planowaniu partii: stały cykl, stała wielkość partii, jakie potrzeby taka partia (ang. *lot for lot*, LFL),
- ignorowanie ograniczonej wielkości zasobów, np. czasu pracy maszyn.



Rys. 1. Moduły planowania operacyjnego produkcji w MRP II

Co prawda MRP II zawiera moduł zgrubnego bilansowania zdolności produkcyjnych (ang. *rough cut capacity planning*, RCCP), który weryfikuje wykonalność głównego planu produkcyjnego (ang. *master production schedule*, MPS), oraz moduł planowania zdolności

produkcyjnych (ang. *capacity requirements planning*, CRP), który weryfikuje wykonalność MRP I. Jednak na ogół są to działania reaktywne, tzn. najpierw układa się plany MPS i MRP I, a dopiero później sprawdza się czy są one wykonalne, by w razie potrzeby je skorygować, co określa się jako równoważenie obciążenia zasobów.

W jaki sposób w takim razie systemy ERP znajdują plany wykonalne? Po pierwsze dzięki różnorodnym zapasom i rezerwom:

- materiałów,
- półwyrobów (produkcja w toku),
- wyrobów finalnych,
- czasu realizacji zleceń
- i zdolności produkcyjnej.

Po drugie, dzięki nadzwyczajnym, heurystycznym działaniom korygującym, np.:

- podziałowi partii na część pilną i wykonywaną normalnie,
- nadgodzinom,
- realizacji zleceń z opóźnieniem.

Co prawda na ogół udaje się znaleźć plany wykonalne, ale te wszystkie zapasy, rezerwy i nadzwyczajne działania kosztują, a ponadto otrzymane w ten sposób plany nie są zbyt dobre, tzn. prowadzą do wysokich zapasów, niskiego wykorzystania zdolności produkcyjnej, długich rzeczywistych cykli produkcyjnych i opóźnień w realizacji zamówień.

3. Ogólna charakterystyka APS

Fundament, na którym budowane są APS, stanowią matematyczne modele zadań optymalizacji (planowania) i algorytmy umożliwiające poszukiwania dobrych lub bardzo dobrych rozwiązań dla takich zadań. Wymagania stawiane takim modelom i metodom są bardzo wysokie [33], [36], [37].

W modelach matematycznych cele i ograniczenia definiowanie są jawnie i jasno, co m.in. oznacza, że muszą one uwzględniać wiele konkurencyjnych celów i niejasnych preferencji planowania. Trzeba więc stosować metody optymalizacji wielokryterialnej, np.:

- zastępowanie kryteriów ograniczeniami opisującymi poziomy satysfakcji,
- wyrażanie wszystkich celów w jednostkach pieniężnych,
- agregowanie wielu funkcji celu do jednej ważonej funkcji celu.

Wielka liczba alternatywnych rozwiązań wymusza stosowanie zaawansowanych metod badań operacyjnych, głównie programowania (liniowego) całkowitoliczbowego-mieszanego (ang. *mixed integer programming*, MIP) oraz metaheurystyk, m.in. algorytmów lokalnego przeszukiwania (ang. *local search*) i algorytmów genetycznych.

W modelach wielu zadań planowania trzeba uwzględnić niepewność danych i skutków decyzji. Należy więc stosować zaawansowane prognozowanie i symulację, złożone modele niepewności, np. relacji cena-popyt, optymalizację stochastyczną, a przynajmniej optymalizować normatywne wielkości planowania, np. zapasy bezpieczeństwa i cykle produkcyjne. Niezbędne jest też stosowanie planowania rolowanego, czyli systematycznej rewizji planów, a także rewidowanie planów po ważnych zdarzeniach (ang. *event-driven planning*).

Aby uniknąć negatywnych skutków dekompozycji zadań APS integrują wiele zadań planowania, które w tradycyjnym ERP rozwiązywane są niezależnie. Stopień integracji może być bardzo różny w zależności od złożoności procesu produkcyjnego, m.in. liczby wyrobów finalnych i półwyrobów, ich marszrut, a także liczby i konfiguracji krytycznych zasobów. Integracja może dotyczyć różnych grup zadań, np.:

- APS mogą rozwiązywać zadanie MRP I nie poziom po poziomie, lecz wszystkie poziomy wyrobów na raz.
- Zamiast traktować MPS i RCCP lub MRP i CRP jako osobne zadania, APS może każdą z tych par połączyć w jedno duże zadanie.
- W przypadku prostych systemów całe MRP II można opisać jednym modelem i wyznaczać wszystkie plany równocześnie.
- W ramach jednego przedsiębiorstwa APS integrują zadania planowania zaopatrzenia, produkcji i dystrybucji,
- a za pomocą wspólnego planowania (ang. *collaborative planning*) koordynują plany niezależnych przedsiębiorstw [5], [16], [25], [35].

APS jawnie i jasno modelują hierarchię procesu planowania [31]. Jeśli przy obecnym stanie wiedzy i techniki rozwiązanie modelu monolitycznego nie jest wykonalne, to konieczna jest przemyślana dekompozycja pionowa i/lub pozioma zadania, ewentualnie agregacja danych, np. wyrobów, maszyn czy okresów czasu. Proste sekwencyjne rozwiązywanie kolejnych zdań składowych nie gwarantuje ani wykonalności, ani wysokiej jakości planów. Dlatego konieczne jest iteracyjne planowanie hierarchiczne, w którym w jawny i racjonalny sposób określone są wszystkie jego składowe: antycypacja, instrukcja, reakcja, obserwacja i sterowanie.

4. Planowanie wielkości i szeregowanie partii produkcyjnych

W ramach planowania wielkości i szeregowania partii produkcyjnych ([2], [26]) (ang. *lot-sizing and scheduling*, LSS) należy w kolejnych okresach czasu zaplanować produkcję wielu wyrobów w celu zaspokojenia zmiennego, deterministycznego popytu. Maszyny mają ograniczony czas pracy, a przy przezbieraniu, przestawianiu maszyny z wykonywania jednego wyrobu na inny, ponoszone są jednorazowe koszty, m.in. maszyna ma przestój. Celem planowania jest minimalizacja łącznych kosztów przezbierania maszyn i utrzymywania zapasów. Jeżeli zaplanowane zostaną nieliczne, duże partie produkcyjne, to przebrojeń będzie mało, ale zapasy będą duże. W przeciwnym wypadku zapasy będą małe, ale przebrojeń będzie dużo. Potrzebny jest sensowny kompromis.

W zadaniach LSS stosuje się dyskretną skalę czasu, tzn. horyzont planowania podzielony jest na okresy czasu (ang. *time buckets*), miesiące, tygodnie lub dni. Czasem, ze względów technicznych, stosuje się fikcyjne 1, 2 lub 4 godzinne mikrookresy. W takich modelach bilans popytu, produkcji i zapasów kontrolowany jest jedynie na koniec okresów, a koszty utrzymywania zapasów za cały okres naliczane są wyłącznie na podstawie poziomu zapasów na koniec okresu.

Modele LSS opisują równocześnie MPS i RCCP lub MRP i CRP. Jeżeli w bilansie zapasów poszczególnych produktów uwzględniony zostanie popyt zależny, to modele te mogą opisać całe MRP II.

Przy rozwiązywaniu zadań LSS stosuje się na ogół modele i metody MIP, gdyż zadanie te są bardzo trudne i składają się z dwóch zadań optymalizacyjnych:

- kombinatorycznego zadania harmonogramowania przebrojeń oraz
- ciągłego zadania optymalizacji wielkości partii i zapasów.

Modele LSS dzieli się na modele z długimi okresami (ang. *large bucket models*), które dopuszczają wiele przebrojeń maszyn w jednym okresie, oraz modele z krótkimi okresami (ang. *small bucket models*), które dopuszczają co najwyżej jedno przebrojenie na okres.

Początkowo tylko modele z krótkimi okresami wyznaczały kolejność wykonywania partii w trakcie jednego okresu, więc nazwa *lot-sizing and scheduling* odnosiła się tylko do nich, ale dzisiaj takie rozróżnienie nie jest już uzasadnione, gdyż nowe, bardziej rozbudowane modele z długimi okresami też mogą ustalać ścisłą kolejność wyrobów.

4.1. Podstawowy model z długimi okresami

Podstawowy model LSS określany jest jako planowanie partii przy ograniczonych zasobach (ang. *capacitated lot-sizing problem*, CLSP) [27]. Dopuszcza on w jednym okresie wiele przebrojeń. W zadaniu opisanym takim modelem okresy to zazwyczaj tygodnie. Czasem firmy, które swoje działania planują z większą dokładnością, np. na podziałce dziennej, produkcję planują z podziałką tygodniową, gdyż tygodniowa prognoza popytu jest bardziej wiarygodna niż dzienna. W tabeli 1. przedstawiony jest przykładowy harmonogram ułożony za pomocą CLSP dla trzech wyrobów wykonywanych na jednej maszynie.

Tabela 1

Przykładowy harmonogram CLSP

(Okres 0 to okres stan początkowy, półpauza oznacza zero, pusta kratka brak wartości)

Produkt	Zmienna	Okres					Suma
		0	1	2	3	4	
A	Gotowość	–	1	1	–	1	3
	Produkcja		5	11	–	7	23
	Popyt		3	9	4	7	23
	Zapas	–	2	4	–	–	6
B	Gotowość	–	–	1	1	–	2
	Produkcja		–	9	12	–	21
	Popyt		–	9	6	6	21
	Zapas	–	–	–	6	–	6
C	Gotowość	1	1	–	1	–	3
	Produkcja		12	–	8	–	20
	Popyt		2	7	9	2	20
	Zapas	–	10	3	2	–	15

W modelu CLSP jest tylko jedna zmienna binarna przyjmująca wartość 1, gdy maszyna jest w gotowości do wykonywania danego wyrobu. Za każdym razem gdy zmienna gotowości przyjmuje wartość 1 naliczane są koszty przebrajania maszyny, a wielkość produkcji może przyjmować wartości większe od 0. W każdym okresie maszyna może być przebrojona do wykonywania kilku wyrobów, czyli dla kilku wyrobów zmienna gotowości może przyjąć wartości 1, np. w okresie 2. dla wyrobów A i B. Klasyczny model CLSP nie wyznacza kolejności partii w trakcie jednego okresu, np. nie wiemy który z wyrobów ma być wykonywany w okresie 2. wcześniej, A czy B.

4.2. Podstawowy model z krótkimi okresami

Wśród modeli z krótkimi okresami najdokładniejszy jest tzw. model proporcjonalny (ang. *proportional lot-sizing and scheduling*, PLSP) [4]. Dopuszcza on co najwyżej jedno przebrojenie w każdym okresie, przy czym przebrojenie może być w środku okresu, a zatem w trakcie jednego okresu wykonywane mogą być dwa produkty, jeden przed, a drugi po przebrojeniu. Okresy w takich modelach to np. dni, zmiany, jedna lub kilka godzin. Czasem, aby taki model miał sens, rzeczywiste okresy planowania trzeba podzielić na kilka małych fikcyjnych okresów, mikrookresów. Na przykład jedna ośmiogodzinna zmiana na może zostać podzielona na 4 dwugodzinne mikrookresy. Niezerowy popyt i naliczanie kosztów utrzymywania zapasów ma wtedy miejsce tylko na koniec rzeczywistych okresów, tzn. tylko w ostatnim mikrookresie każdego rzeczywistego okresu. Dokładność modelu z mikrookresami zależy od ich liczby [15].

W tabeli 2. przedstawiony jest harmonogram ułożony za pomocą modelu PLSP dla tych samych danych co w tabeli 1., przy czym każdy okres (tydzień) został podzielony na 5 mikrookresów (dni), a tygodniowy popyt z tabeli 1. został w tabeli 2. przypisany do ostatniego mikrookresu każdego tygodnia.

Tabela 2

Przykładowy harmonogram PLSP

(Okres 0 to okres stan początkowy, półpauza oznacza zero, pusta kratka brak wartości)

Okres	0	1					2					3					4					
Mikrookres	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Suma
A Uruchomienie					1													1				2
Gotowość					1	1	1	1										1	1	1	1	8
Produkcja					1	4	4	4	3									3		4		23
Popyt					3					9					4						7	23
Zapas					1	2	6	10	13	13	4	4	4	4	4			3	3	7		6
B Uruchomienie									1													1
Gotowość									1	1	1	1	1	1								6
Produkcja									1	4	4	4	4	4								21
Popyt											9				6						6	21
Zapas									1	5		4	8	12	12	6	6	6	6	6		6
C Uruchomienie															1							1
Gotowość	1	1	1	1											1	1	1					7
Produkcja		3	4	3										4	4	2						20
Popyt					2					7					9						2	20
Zapas		3	7	10	8	8	8	8	8	1	1	1	1	5		2	2	2	2			9

W modelach z krótkimi okresami są dwie zmienne binarne. Oprócz zmiennej gotowości jest jeszcze zmienna uruchomienia, która przyjmuje wartość 1, gdy gotowość dla danego produktu w dwóch kolejnych okresach zmienia wartość z 0 na 1. Na przykład w mikrookresie 3. maszyna nie jest w gotowości do produkcji wyrobu A, a w 4. mikrookresie już tak. Dlatego w 4. mikrookresie zmienna uruchomienia przyjmuje wartość 1. Koszty przebrojenia w takim modelu naliczane są tylko wtedy gdy zmienna uruchomienia przyjmuje wartość 1.

Aby harmonogramy przedstawione w tabeli 1. oraz 2. reprezentowały rozwiązania dla tego samego zadania, koszty otrzymywania zapasów w każdym okresie należy naliczać na podstawie stanu zapasów w ostatnim mikrookresie tego okresu (szare pola w tabeli 2.).

4.3. Kierunki badań

Badania nad zadaniami LSS zmiernają w kilku kierunkach. Po pierwsze, poszukiwane są modele bardziej dokładne od dotychczasowych. Na przykład klasyczny model CLSP nalicza koszty przebrojenia w każdym okresie, w którym wykonywany jest dany wyrób. Tymczasem w przykładzie z tabeli 1., gdyby wyrób A wykonywany był na koniec 1. okresu i na początku 2. okresu, to w okresie 2. przebrojenie nie byłoby potrzebne. Powstały więc wersje CLSP z partiami wykonywanymi w dwóch kolejnych okresach poprzedzonymi jednym przebrojeniem [10], [29] (hasło: Cross-Period Lot Size Planning).

Jeśli planujemy wykonanie partii 100 rowerów, to wcześniej musimy wykonać partię 200 kół. Tradycyjnie każda partia półwyrobów ma cykl produkcyjny równy co najmniej jednemu okresowi, czyli zostanie zaplanowana co najmniej jeden okres wcześniej niż partia wyrobu finalnego. Jeśli na wykonanie partii kół potrzebny jest 1 dzień, a okres to tydzień, to cykl partii kół też będzie równy tygodniowi i niepotrzebnie wydłuży cykl produkcyjny rowerów. Dlatego opracowano modele, w których okresy mogą być krótsze od czasów przebrojeń [39], [14]. Niektórzy chcą iść jeszcze dalej i całkowicie wyeliminować zbędne odstępy czasowe pomiędzy partiami wyrobów i ich części [38].

Inne badania skierowane są na modelowanie różnorodnych specyficznych warunków, jakie mogą wystąpić w procesach produkcyjnych. Jednym z ważniejszych jest uwzględnianie czasów i kosztów przebrojeń maszyn zależnych od kolejności wykonywania wyrobów [8], [9], [29] (hasło: Sequence-Dependent Lot-Size Planning). Innym przykładem są modele dla linii produkcyjnych [32], identycznych maszyn równoległych [15], czy grup maszyn z ograniczoną liczbą równoczesnych przebrojeń [40].

Nie mniej ważne są prace nad modelami, które będą łatwiejsze do rozwiązywania, modelami ściślej opisującymi zbiór rozwiązań. Dla takich modeli relaksacja liniowa ma

rozwiązania optymalne położone „bliżej” rozwiązań całkowitych [26], [43]. Przykładem może być całkowitoliczbowy model dla identycznych maszyn równoległych [15], który tym łatwiej rozwiązywać im więcej (sic!) jest maszyn. Powstają też nowe modele z długimi okresami dla zadań z pojedynczą maszyną [6] lub z maszynami równoległymi [18].

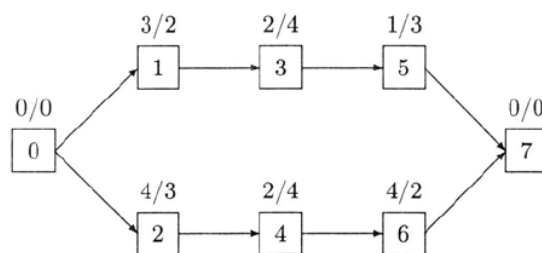
Na koniec trzeba wskazać przykłady prac nad nowymi metodami poszukiwania rozwiązań dla tych wszystkich modeli. Powstają liczne nowe metaheurystyki i heurystyki MIP [12], a także algorytmy hybrydowe, łączące metody programowania ograniczeń, sztucznej inteligencji i metaheurystyk z metodami MIP (ang. matheuristics) [19], [28].

5. Planowanie projektów przy ograniczonych zasobach

Zadania planowania projektów przy ograniczonych zasobach (ang. *resource-constrained project scheduling problem*, RCPSp) znalazły szerokie zastosowanie przy planowaniu produkcji [17], [22]. Przez projekt należy tu rozumieć realizację wielu zleceń produkcyjnych, z których każde mogłoby zostać opisane jest jako niezależny projekt. Jednak projekty-zlecenia za pomocą fikcyjnych operacji i ograniczeń kolejnościowych łączone są w pojedynczy projekt, opisujący wykonywanie całego planu produkcyjnego.

Modele RCPSp zakładają, że liczba i wielkości partii wszystkich wyrobów i półwyrobów są już znane, tym samym znana jest liczba i czasy wykonywania wszystkich operacji. Złożona struktura wyrobów jest tu równoznaczna ze złożonymi ograniczeniami kolejnościowymi pomiędzy operacjami. W zadaniu RCPSp należy tak ustalić terminy wykonywania operacji, aby zminimalizować wybrane kryteria, zazwyczaj czas zakończenia całego projektu. W odróżnieniu od klasycznych zadań planowania projektów w zadaniach RCPSp do wykonywania każdej operacji potrzebne mogą być różne zasoby, pracownicy, maszyny lub narzędzia. Terminy rozpoczęcia operacji należy tak zaplanować, by łączne obciążenie żadnego zasobu nigdy nie przekraczało jego wielkości.

Przykład projektu obejmującego dwa zlecenia przedstawiony jest na rysunku. 2. Pierwsze zlecenie wymaga wykonania operacji 1, 3 i 5, a drugie operacji 2, 4 i 6. Fikcyjna operacja początku 0 połączona jest fikcyjnymi ograniczeniami z początkowymi operacjami obu zleceń, a końcowe operacje obu zleceń połączone są z fikcyjną operacją końca całego planu 7. Nad węzłami reprezentującymi czynności podany jest czas wykonywania operacji i ich zapotrzebowanie na zasób, np. liczba potrzebnych pracowników.



Rys. 2. Diagram sieciowy [11] (str. 7)

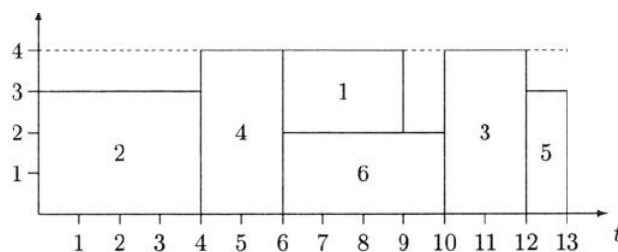
Wyniki klasycznej analizy czasowej, tzn. ignorującej ograniczone zasoby, dla tego projektu przedstawione są w tabeli 3. *ES* oznacza najwcześniejszy możliwy początek (ang. *earliest start*), a *LS* najpóźniejszy (ang. *latest start*). Najpóźniejszy termin zakończenia całego projektu oszacowano jako sumę czasów wykonywania wszystkich operacji.

Tabela 3.

Analiza czasowa ignorująca wielkość zasobu [11] (str. 7)

<i>j</i>	0	1	2	3	4	5	6	7
<i>ES_j</i>	0	0	0	3	4	5	6	10
<i>LS_j</i>	6	10	6	13	10	15	12	16

W tym przykładzie ograniczenia kolejnościowe dopuszczają równoczesne wykonywanie operacji 1 i 2. Dla wielkości zasobu równej 4 nie jest to jednak rozwiązanie dopuszczalne, gdyż te dwie operacje wymagają w sumie 5 jednostek zasobu. Na rysunku 3. przedstawione jest rozwiązanie optymalne. Jak widać wykonywanie operacji nieparzystych zostało znacznie opóźnione. Ponieważ RCPSP sprawdza tylko łączne obciążenie zasobu, więc poszczególne jednostki zasobu nie zostały przypisane do konkretnych operacji.



Rys. 3. Rozwiązanie dla wielkości zasobu równej 4 [11] (str. 7)

Za pomocą modelu RCPSP dopuszczającego definiowanie pomiędzy operacjami odstępów maksymalnych (RCPSP/max), a nie tylko odstępów minimalnych, można opisać szereg szczególnych uwarunkowań występujących w procesie produkcyjnym [21], np. podział partii produkcyjnej na partie transportowe, wymóg równoczesnego rozpoczęcia lub zakończenia grupy operacji, konieczność wykonywania kolejnych operacji danego wyrobu lub maszyny bez przerw. Tak więc ten stosunkowo prosty model pozwala opisać wiele złożonych zagadnień produkcyjnych, ale nie wszystkie. Wciąż rozważane są nowe specjalne przypadki, m.in.:

- losowe czasy wykonywania [13],
- przebrojenia różnego typu [13],
- zmienna długość operacji [13],
- wspólne planowanie [25],
- pracownicy o wielu kwalifikacjach [20],
- i czynności wymagające równocześnie dyskretnych i ciągłych zasobów [42].

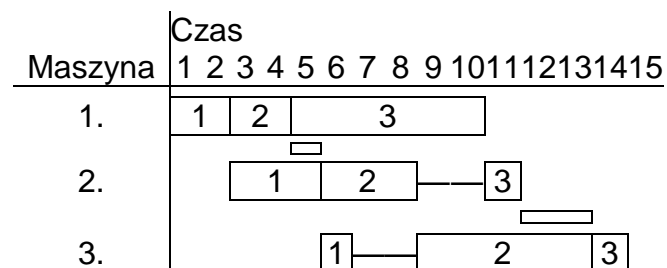
Niestety rozwiązywanie zadań RCPSP nie jest sprawą prostą, więc oprócz uznanych już metod ([17], [22]) w literaturze wciąż pojawiają się nowe metody, metaheurystyki [1], [13], oraz heurystyki MIP [20].

6. Zadania klasycznej teorii szeregowania

Zadania i algorytmy klasycznej teorii szeregowania [24] (ang. *scheduling theory*, ST) są w polskiej literaturze dość wyczerpująco opisane ([7], [30] rozdz. 8).

Modele ST, podobnie jak modele RCPSP zakładają, że liczba i wielkości partii jest znana. W zadaniu ST należy tak przydzielić operacje do maszyn i/lub ustalić ich kolejność, a także terminy wykonywania, aby zminimalizować wybrane kryteria, np. długość harmonogramu. Maszyny mogą być dedykowane tzn. przeznaczone do wykonywania różnych operacji, lub równoległe, tzn. przeznaczone do wykonywania tych samych operacji, choć niekoniecznie z tą samą prędkością. Wyróżnia się kilka konfiguracji maszyn dedykowanych: system przepływowy, w którym kolejność maszyn dla wszystkich wyrobów jest taka sama, system gniazdowy, w którym kolejność maszyn dla różnych może być różna, oraz system otwarty, w którym kolejność maszyn jest dowolna. Wyznaczając kolejność i terminy wykonywania operacji trzeba przestrzegać ograniczenia kolejnościowe, określające dla każdej operacji jakie inne operacje muszą się zakończyć, by dana operacja mogła się rozpocząć.

Na rysunku 4. przedstawiony jest przykład harmonogramu dla trzech wyrobów w systemie przepływowym z trzema maszynami.



Rys. 4. Przykład harmonogramu dla systemu przepływowego

(niski prostokąt oznacza oczekiwanie wyrobu, — oznacza przestój maszyny)

7. Porównanie modeli planowania produkcji

Zadania planowania produkcji można modelować korzystając z trzech rodzajów pokrewnych modeli i opracowanych dla nich algorytmów:

- 1) planowania wielkości i szeregowanie partii produkcyjnych (LSS),
- 2) planowania projektów przy ograniczonych zasobach (RCPS) lub
- 3) klasycznej teorii szeregowania (ST).

Każdy z tych modeli ma swoje zalety i wady, przypadki do których pasuje lepiej lub gorzej. Czasem trudno jest ocenić, który z nich jest dla danego przedsiębiorstwa najbardziej odpowiedni. Wybór utrudnia dodatkowo fakt, że w jednym systemie planowania, w jego różnych modułach, wykorzystywać można różne rodzaje modeli. Proces planowania często w sposób naturalny dzieli się bowiem na kilka odrębnych etapów (poziomów), a czasem z uwagi na jego złożoność trzeba go zdekomponować na kilka modułów, wykorzystując w tym celu jego matematyczne własności [31].

Poniższy opis zalet i wad poszczególnych rodzajów modeli i algorytmów jest nieco subiektywny i mało precyzyjny, a więc niezbyt naukowy, ale modelowanie jest sztuką wymykająca się po części opisowi naukowemu. To nie znaczy, że powinniśmy zrezygnować z prób jego opisu i analizy.

7.1. Modele i algorytmy LSS

Wielką zaletą modeli planowania wielkości i szeregowania partii produkcyjnych (LSS) jest równoczesne podejmowanie decyzji o liczbie, wielkości i terminach wykonywania partii. Jednak obecnie modele i/lub algorytmy LSS kiepsko sobie radzą m.in. ze złożoną konfiguracją zasobów, dużą liczbą maszyn i wyrobów, dokładnym wyznaczeniem cykli produkcyjnych, a także z wyrobami o złożonej strukturze, czyli z popytem zależnym.

Dlatego modele LSS wykorzystywane są głównie do planowania produkcji średnio- i małoseryjnej, m.in. w przemyśle maszynowym i wyrobów konsumpcyjnych. Złożoność struktury wyrobów jest tam dość ograniczona, więc algorytmy LSS są w stanie się z nią uporać. Liczne zamówienia od wielu klientów na te same produkty, uzupełnione prognozą popytu w późniejszych okresach, dają w sumie zmienny, lecz dość wysoki łączny popyt w kolejnych okresach. Jeżeli przebrojenia maszyn są długie i/lub kosztowne, to równoczesne podejmowanie decyzji o liczbie, wielkości i terminach wykonywania partii ma kluczowe znaczenie.

Modele i metody LSS wykorzystywane są często na górnym poziomie planowania, MPS i/lub MRP I, do określenia liczby i wielkości partii, a także przydzielenia ich do określonego okresu produkcyjnego (ang. *time bucket*): zmiany, dnia lub tygodnia. Później, na dolnym poziomie, inne modele i metody wyznaczają szczegółowy harmonogram produkcji dla każdego okresu z osobna. Dość często firmy rezygnują z optymalizacji takiego szczegółowego harmonogramu, pozostawiając harmonogramowanie pracownikom lub przypadkowi.

7.2. Modele i algorytmy RCPSP

Modele planowania projektów przy ograniczonych zasobach (RCPSP) zakładają, że liczba i wielkość partii jest znana, ale z trudem opisują różnorodne ograniczenia zasobów czy konfiguracje maszyn. Za to algorytmy RCPSP z łatwością radzą sobie nawet z licznymi operacjami i bardzo złożonymi ograniczeniami kolejnościowymi.

Modele RCPSP wykorzystywane są przede wszystkim do planowania produkcji małoseryjnej i jednostkowej wyrobów złożonych, głównie w przemyśle maszynowym, stoczniowym i w budownictwie. W takich procesach produkcyjnych liczba zamówień od klientów (projektów składowych) jest niewielka, więc połączenie ich w partie jest albo łatwe, albo niemożliwe, wyroby składają się z wielu części i podzespołów, a ograniczenia kolejnościowe czynności są bardzo złożone, liczba operacji może być liczona w setkach, a nawet w tysiącach. W takich firmach wielu pracowników ma kwalifikacje do pracy na różnych stanowiskach, a maszyny nie są zbyt wysoko obciążone, więc można się wtedy zadowolić przybliżonym i zagregowanym uwzględnianiem ograniczonych zasobów.

Modele RCPSP/max pozwalają matematycznie opisać różnorodne ograniczenia terminów, które w modelach ST opisane są na ogół jedynie werbalnie, np. wykonywanie kilku kolejnych czynności na tym samym wyrobie lub na tej samej maszynie bez przerw, czy równoczesny początek lub koniec kilku czynności, co przydatne jest do opisu procesów produkcyjnych w przemyśle chemicznym i farmaceutycznym. Dlatego stosowane są również do planowania krótkoterminowego, tzn. harmonogramowania np. w przemyśle farmaceutycznym.

Modele i algorytmy RCPSP można rozpatrywać jako część teorii szeregowania, jednak metody planowania projektów od początku były postrzegane jako odrębna dziedzina.

7.3. Modele i algorytmy ST

Modele klasycznej teorii szeregowania (ST), podobnie jak modele RCPSP, nie planują wprowadzić ani liczby, ani wielkości partii, ale dokładnie opisują strukturę procesu produkcyjnego, a zwłaszcza konfigurację maszyn. Algorytmy ST szybko znajdują rozwiązania

nawet dla dużej liczby maszyn i wyrobów, jednak kiepsko sobie radzą z bardzo złożonymi ograniczeniami kolejnościowymi.

Modele ST wykorzystywane są do planowania produkcji mało seryjnej i jednostkowej wyrobów o dość prostej strukturze, a także do szczegółowego, krótkoterminowego planowania produkcji średnioseryjnej, gdy liczba i wielkości partii (operacji) została już ustalona na wcześniejszych etapach planowania, np. w ramach MRP I. W takich przypadkach liczba zleceń produkcyjnych jest duża, a konieczne jest bezpośrednie i szczegółowe uwzględnianie konfiguracji maszyn.

Modele ST wykorzystuje się przeważnie do harmonogramowania produkcji w jednym okresie, np. na jednej zmianie, gdy poszczególne zlecenia obejmują wykonanie kilku operacji na jednym półwyrobie, które powiązane są na ogół prostymi ograniczeniami kolejnościowymi o postaci łańcucha. Wykonywanie różnych części czy podzespołów, ich montaż czy demontaż, rozdzielone są wtedy pomiędzy kolejne okresy. Można powiedzieć, że złożona struktura wyrobów, złożone ograniczenia kolejnościowe, dekomponowane są w ten sposób na liniowe odcinki wykonywane w osobnych okresach czasu.

8. Podsumowanie

Dotychczasowe metody planowania produkcji stosowane w ERP są na ogół kiepskie. W najlepszym razie gwarantują wykonalność planów, a dobrej jakości już nie. Możemy układać plany znacznie lepiej. Konieczne jest w tym celu stosowanie zaawansowanych systemów planowania APS. Tylko jak przekonać do tego kierowników, skoro „wszystko jakoś działa”, a zbudowanie lepszego systemu planowania jest trudne i pracochłonne?

Zaprojektowanie systemu planowania produkcji dla każdego przedsiębiorstwa jest poważnym wyzwaniem. Żaden ze znanych modeli nie jest idealny, nie opisuje wszystkich istotnych cech procesu, a znane algorytmy radzą sobie lepiej lub gorzej w różnych okolicznościach. Bardzo dokładne modelowanie procesu produkcyjnego i bardzo szczegółowe planowanie nie zawsze są konieczne. Tak więc dokonanie wyboru wymaga wiedzy zarówno o cechach modeli i efektywności algorytmów, jak i dogłębnej znajomości procesu produkcyjnego.

Komplementarność przedstawionych modeli i hierarchiczna struktura procesu planowania wymusiły modułarną budowę APS, co ułatwia projektowanie systemów planowania. Jednak sensowne zaprojektowanie całego procesu, poszczególnych etapów planowania i przepływów informacji pomiędzy nimi, wymaga dogłębnej znajomości modeli. A jeśli cały system ma

działać efektywnie, to trzeba również dobrze się orientować, które algorytmy planowania są efektywne i w jakich przypadkach.

9. Literatura

- [1] Diakoulakis I.E., Koulouriotis D.E., Emiris D.M., *Resource constrained project scheduling using evolution strategies*, Operational Research, 4(3), 2004, str. 261-275.
- [2] Drexl A., Kimms A., *Lot sizing and scheduling - survey and extensions*, European Journal of Operational Research, 99(2), 1997, str. 221-235.
- [3] Drexl A., Fleischmann B., Günther H.-O., Stadler H., Tempelmeier H., *Konzeptionelle Grundlagen kapazitätsorientierter PPS Systeme*, Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 46, 1994, str. 1022-1045.
- [4] Drexl A. Haase K., *Proportional lotsizing and scheduling*, International Journal of Production Economics, 40, 1995, str. 73-87.
- [5] Dudek G., *Collaborative Planning in Supply Chains*, Springer Berlin, 2009.
- [6] Fleischmann B., Meyr H., *The general lotsizing and scheduling problem*, OR Spektrum, 19(1), 1997, str. 11-21.
- [7] Grabowski J., Nowicki E., Smutnicki C., *Metoda blokowa w zagadnieniach szeregowania zadań*, Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa, 2003.
- [8] Günther H.-O., Grunow M., Neuhaus U., *Realizing block planning concepts in make-and-pack production using MILP modelling and SAP APO ©*, International Journal of Production Research, vol. 44, 2006, str. 3711-3726.
- [9] Guimarães L., Klabjan D., Almada-Lobo B., *Modeling lotsizing and scheduling problems with sequence dependent setups*, European Journal of Operational Research 239, 2014, str. 644-662.
- [10] Haase K., *Capacitated lot sizing with linked production quantities of adjacent periods*, Technical report, Working Paper 334, Institut für Betriebswirtschaftslehre, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Germany., 1996.
- [11] Hartmann S., *Project Scheduling under Limited Resources*, volume 478 of Series, str. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Springer Berlin, 1999.
- [12] Jans R., Degraeve Z., *Meta-heuristics for dynamic lot sizing: A review and comparison of solution approaches*, European Journal of Operational Research, 177, 2007, str. 1855-1875.

- [13] Józefowska J., Węglarz J., editors, *Perspectives In modern project scheduling*, Springer, 2006.
- [14] Kaczmarczyk W., *Modelling multi-period set-up times in the proportional lot-sizing problem*, *Decision Making in Manufacturing and Services*, 3(1-2), 2009, str. 15-35.
- [15] Kaczmarczyk W., *Proportional lot-sizing and scheduling problem with identical parallel machines*, *International Journal of Production Research*, 49(9), 2010, str. 2605-2623.
- [16] Kilger Ch., Reuter B., Stadtler H., *Collaborative planning*, In Stadtler H., Kilger Ch., editors, *Supply Chain Management and Advanced Planning*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2008, str. 263-284.
- [17] Kolisch R., *Project Scheduling under Resource Constraints*, Springer Berlin, 1995.
- [18] Meyr H., *Simultaneous lotsizing and scheduling on parallel machines*, *European Journal of Operational Research*, 139(2), 2002, str. 277-292.
- [19] Milano M., van Hentenryck P., editors, *Hybrid Optimization*, Springer, New York, 2011.
- [20] Montoya C., Bellenguez-Morineau O., Pinson E., Rivreau D., *Branch-and-price approach for the multi-skill project scheduling problem*, *Optimization Letters*, 8(5), 2014, str. 1721-1734.
- [21] Neumann K., Schwindt Ch., *Activity-on-node networks with minimal and maximal time lags and their application to make-to-order production*, *OR Spektrum*, 19, 1997, str. 205-217.
- [22] Neumann K., Schwindt Ch., Zimmermann J., *Project Scheduling with Time Windows and Scarce Resources*, Springer, 2003.
- [23] Orlicky J., *Planowanie potrzeb materiałowych*, PWE, 1982
- [24] Pinedo M. L., *Scheduling, Theory, Algorithms, and Systems*, Springer, 2008.
- [25] Pinto G., Ben-Dov Y.T., Rabinowitz G., *Formulating and solving a multi-mode resource-collaboration and constrained scheduling problem (MRCCSP)*, *Annals of Operations Research*, 206(1), 2013, str. 311-339.
- [26] Pochet Y., Wolsey L.A., *Production planning by mixed integer programming*, Series in Operations Research and Financial Engineering, Springer, New York, 2006.
- [27] Quadt D., Kuhn H., *Capacitated lot-sizing with extensions: a review*, *4OR*, 6, 2008, str. 61-83.
- [28] Raidl G., Puchinger J., *Combining (integer) linear programming techniques and metaheuristics for combinatorial optimization*, In Blum Ch., Aguilera M.J.B., Roli A.,

- Sampels M., editors, *Hybrid Metaheuristics*, volume 114 of Studies in Computational Intelligence, Springer Berlin Heidelberg, 2008, str. 31-62.
- [29] *SAP Help portal*: <http://help.sap.com/>, 15 października 2014.
- [30] Sawik T., *Optymalizacja dyskretna w elastycznych systemach produkcyjnych*, WNT, Warszawa, 1992.
- [31] Schneeweiß Ch., *Distributed Decision Making*, Springer Berlin, 2003.
- [32] Seeanner F., Meyr H., *Multi-stage simultaneous lot-sizing and scheduling for flow line production*, OR Spectrum, 35(1), 2013, str. 33-73.
- [33] Shapiro J. F., *Modeling the Supply Chain*, Duxbury, 2001.
- [34] Silver E. A., Pyke D. F., Peterson R., *Inventory Management and Production Planning and Scheduling*, Wiley, 1998
- [35] Stadler H., *A framework for collaborative planning and state-of-the-art*, In *Supply Chain Planning*, pages 1-26, Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [36] Stadler H., Fleischmann B., Grünow M., Meyr H., Suerie Ch., *Advanced Planning in Supply Chains, Management for Professionals*, Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [37] Stadler H., Kilger Ch., editors, *Supply Chain Management and Advanced Planning*, Springer, Berlin, 2008.
- [38] Stadler H., Sahling F., *A lot-sizing and scheduling model for multistage flow lines with zero lead times*, European Journal of Operational Research, 225(3), 2013, str. 404-419.
- [39] Suerie Ch., *Modeling of period overlapping setup times*, European Journal of Operational Research, 174(2), 2006, str. 874-886.
- [40] Tempelmeier H., Buschkühl L., *Dynamic multi-machine lotsizing and sequencing with simultaneous scheduling of a common setup resource*, International Journal of Production Economics, 113(1), 2008, str. 401-412.
- [41] Vollmann T. E., Berry W. L., Whybark D. C., Jacobs F. R., *Manufacturing Planning and Control for Supply Chain Management*, McGraw-Hill/Irwin, 2004.
- [42] Waligóra G., *Discrete-continuous project scheduling with discounted cash inflows and various payment models - a review of recent results*, Annals of Operations Research, 213(1), 2014, str. 319-340.
- [43] Wolsey L.A., *Solving multi-item lot-sizing problems with an MIP solver using classification and reformulation*, Management Science, 48(12), 2002, str. 1587-1602.