

Rys. 82. Algorytm przewidywania zapotrzebowania według metody Box-Jenkinsa

Obliczenie narastającego błędu zweryfikowane będzie współczynnikiem γ zapewniającym minimalizację wartości odchylenia średniego $(\hat{\sigma}_e^2)$ które charakteryzuje popełnione błędy szacowania na przestrzeni całego okresu i procesu obliczeń. Dla danego γ_0 wybiera się także γ_1 , które zapewnia $\hat{\sigma}_e^2$ min.

Tak więc algorytm przyjmuje postać:

$$\hat{y}_{t+1} = \hat{y}_t + \gamma_0 e_t + \gamma_1 \sum_{j=0}^{j=t} e_j, \text{ gdzie}$$

γ_0 i γ_1 są dwoma podstawowymi parametrami algorytmu Box-Jenkinsa.

Z przedstawionych algorytmów widać, że charakteryzują się one praco-
chłonnym cyklem obliczeniowym polegającym na:

— ciągłym (krocząco-okresowym) aktualizowaniu trendu zapotrzebowania każdego asortymentu, opierającym się na pewnym dynamicznie rozwiązywanym wzorze matematycznym,

— postulowaniu wielkości produkcji w granicach trendu zapotrzebowania i ograniczeń, wynikających z perspektywicznego sterowania produkcją oraz wykonaniu zadań.

Stosowanie wymienionych algorytmów determinuje technika obliczeniowa, która wymaga w tym wypadku szybkich maszyn matematycznych.

b. Dekompozycyjne planowanie potrzeb

Moduł ten działa w warunkach pewności, gdzie parametry mają charakter zdeterminowany. Poszukiwania warunków optymalizacji działania modułu zostają skierowane na odpowiednie dobranie algorytmów do danego typu produkcji. Z dotychczasowej praktyki wynika całkowita przypadkowość stosowanych algorytmów, które w zasadzie sprowadzają się do procedury opartej na intuicji, podczas gdy moduł ten, będący elementem tzw. technicznego przygotowania produkcji (tpp),⁵ ma zasadni-

⁵ Zakres pojęcia tpp jest znacznie szerszy od dekompozycyjnego planowania potrzeb, które jest jego elementem w zakresie cyklicznego systemu przetwarzania danych.

czy wpływ na dalszy prawidłowy rozwój systemu. Pewnym ograniczeniem w rozwoju algorytmów tego modułu jest ich duża pracochłonność obliczeń, która w praktyce nie mogła być realizowana. Dopiero rozwój komputeryzacji stworzył możliwość stosowania prawidłowych metod obliczeniowych. Wystarczy przytoczyć przykład opracowywania listy części i podzespołów dla wyrobów złożonych typu urządzeń radiolokacyjnych (średnio 10 tys. elementów jednorodnych i około 100 tys. wszystkich elementów), które w warunkach tradycyjnych wymaga pracy kilkunastu osób w ciągu kilku miesięcy. Oczywiście praca ta ma charakter jednorazowy i przy wprowadzeniu ewentualnych zmian powoduje, że dotychczasowe obliczenia nie są dalej przydatne.

Właściwie problem wprowadzania zmian konstrukcyjno-technologicznych determinuje rozwój postępu technicznego i powodzenie rozwiązań konstrukcyjnych. Niech przykładem będzie fakt posiadania przez Japonię w momencie rozpoczęcia wojny z USA samolotu odrzutowego, o wiele nowocześniejszego od tych, którymi dysponowali Amerykanie. Jednak samolot ten będąc złożonym wyrobem na skutek wymaganych licznych zmian konstrukcyjno-technologicznych został wprowadzony do działań dopiero pod koniec wojny, kiedy nie miał już wpływu na dalszy jej przebieg. Podaje się obecnie, że najwięcej trudności w owym czasie powodował brak odpowiednio niezawodnego systemu ewidencji tych zmian.

Prawidłowość przebiegu produkcji oraz późniejszej eksploatacji wyrobów zależy od tego, na ile dekompozycyjne planowanie potrzeb odbywa się na podstawie aktualnej bazy normatywnej.

Dekompozycyjne planowanie potrzeb (DPP) dezagreguje syntetyczne informacje, otrzymane na wyjściu modułu „sterowanie zbytem”, na analityczną informację modelującą dalszy przebieg systemu sterowania produkcją.

DPP sprowadza się do opracowania:

- listy części i podzespołów (LCP) na podstawie montażowego rozwinięcia wyrobów oraz wytycznych asortymentowego planu produkcji,
- zestawień materiałochłonności na podstawie LCP,
- zestawień pracochłonności i czasochłonności na podstawie LCP,
- zestawień pomocniczych, jak np. dotyczących oprzyrządowania, na podstawie LCP.

Jak z tego wynika LCP jest podstawowym elementem dekompozycyjnego planowania, który rozpoczyna i determinuje dalsze obliczenia.

Dobór algorytmów określających LCP, zależy od typów produkcji, które dla naszych celów uprościmy i przyjmiemy wytwarzanie:

- wyrobów prostych i o krótkim cyklu produkcyjnym,
- wyrobów złożonych i o długim cyklu produkcyjnym.

Dla pierwszego typu produkcji można dobrać metody statyczne, bowiem przebieg produkcji wymaga pojawienia się wszystkich elementów wyrobu mniej więcej w jednym czasie. Pomijamy tu dyskretność przebiegu, który

praktycznie może dywersyfikować potrzeby; jednak błędu nie popełnia się, jeśli na etapie planowania nastąpi pewna agregacja na korzyść sprawniejszego dysponowania produkcją.

Wyrób A		Wyrób X		Wyrób Y	
Element	ilość/ jednostka	Element	ilość/ jednostka	Element	ilość/ jednostka
B	1	B	1	C	2
C	2	D	1	D	2
D	2	E	1	F	1
1	4	1	1	1	4
2	3	2	1	2	2
4	2	3	1	4	2
11	2	4	1	5	1
12	2	11	1	11	3
		12	2	12	2

Rys. 83. Kartoteka LCP ułożona według wyrobów

Rozróżnimy tu dwa algorytmy: analityczny i syntetyczny. Pierwszy wymaga posiadania kartoteki elementów ułożonej według wyrobów (por. rys. 83), drugi według elementów (por. rys. 84). W obu wypadkach pomija się stopień montażu. Każdy element występuje w kartotece tylko raz.

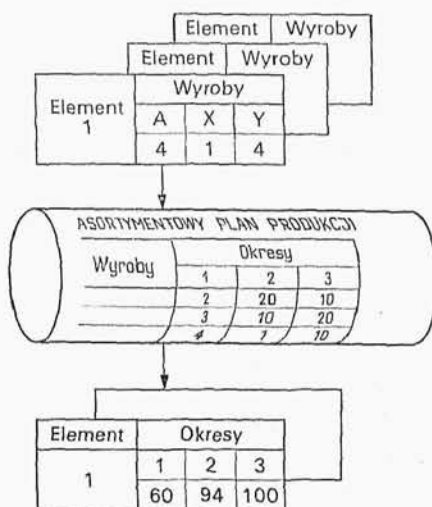
Element	Wyroby		
	A	X	Y
B	1	1	
C	2		2
D	2	1	2
E		1	
F			1
1	4	1	4
2	3	1	2
3		1	
4	2	1	2
5			1
11	2	1	3
12	2	2	2

Rys. 84. Kartoteka LCP ułożona według elementów

Analityczny algorytm polega na przemnożeniu jednostkowego zużycia elementów przez wielkość produkcji wyrobu. Powtarza się to dla wszystkich wyrobów, po czym sortuje według elementów i sumuje. Jeśli zbiorcze zapotrzebowanie np. elementu D wynosi 50 szt., a stan magazynowy wynosi 20, wówczas potrzeby netto sięgają 30 szt. Algorytm umożliwia określenie potrzeb netto podzespołów przez porównanie potrzeb z zapasem. Jego wadą natomiast jest niemożliwość powstrzymania produkcji detali, z których montuje się element D, powodujących zbędny montaż w tym wypadku 20 elementów. Zaletą tego algorytmu jest możliwość po-

równania ze stanem zapasów (np. produkcją według zapasu półfabrykatów).

Syntetyczny algorytm polega na podobnym przemnożeniu jednostkowego zużycia elementów przez wielkość produkcji wyrobu bez potrzeby późniejszego sortowania. Plan produkcji może być ustalony dla wybranych okresów, a wówczas zapotrzebowanie elementów można określić według okresów. Metodę obliczeń ilustruje rysunek 85.



Rys. 85. Rozwijanie montażowe wyrobów według algorytmu syntetycznego

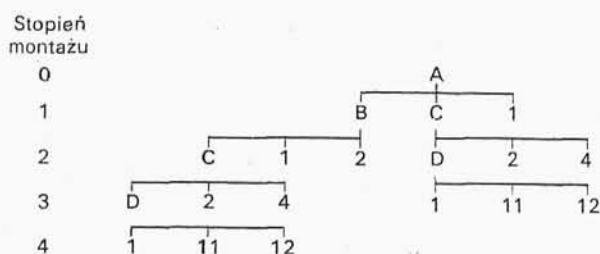
Zaletą tego algorytmu jest możliwość określenia potrzeb w czasie. Wadą natomiast jest brak możliwości porównania zapotrzebowania ze stanem zapasów, chyba że dla pierwszego okresu: wówczas występują te same problemy zbędnej produkcji, jak w metodzie analitycznej.

Jeśli analityczny algorytm zostanie rozszerzony o rozróżnienie okresów, wówczas wydłuża się cykl obliczeń (dodatkowe sortowanie) i zatracą się możliwości porównania ze stanem zapasów. Nanoszenie zmian konstrukcyjnych jest łatwiejsze w kartotece zorganizowanej według elementów, w wypadku gdy zmiana dotyczy kilku wyrobów. Przy jednym wyrobie łatwość aktualizacji obu kartotek jest jednakowa.

Poważnym mankamentem obu algorytmów jest uzyskanie danych, które mogą przy automatycznym ich traktowaniu spowodować produkcję zbędnych elementów; przy czym analityczna metoda przez porównanie na poziomie tych elementów ze stanem zapasów może w pewnym stopniu złagodzić zbędną produkcję (stan zapasu jest odbiciem zbędnej produkcji wytworzonej w poprzednim okresie, np. inicjującym obliczenia). Dzięki temu wystąpi także pewna kompensacja minimalizująca błąd dekompozycji.

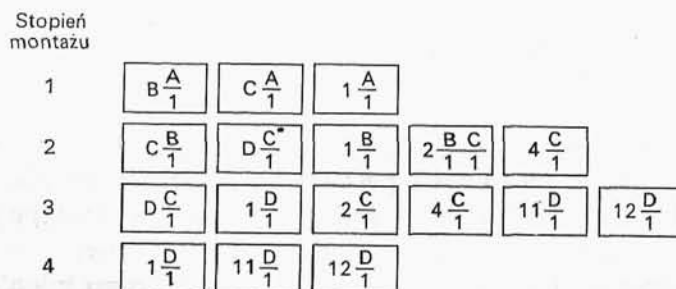
Algorytm analityczny ma charakter koordynacyjny. Prowadzi do pełnej zgodności bilansowej. Ma jednak także wady, które powodują, że dla produkcji złożonych wyrobów poszukiwać należy bardziej optymalnych algorytmów, opartych na dynamiczności procesu produkcyjnego wyrobów.

Wyróżnić tu można grupę algorytmów opierających się na rozwinięciu montażowym wyrobu, tzn. rozpatrujących kolejność produkcji detali, podzespołów, zespołów w poszczególnych stopniach montażu, jak ilustruje to rysunek 86.



Rys. 86. Rozwinięcie montażowe wyrobu

Na podstawie rozwinięcia wyrobu można utworzyć zapis dla każdego stopnia montażu (por. rys. 87).

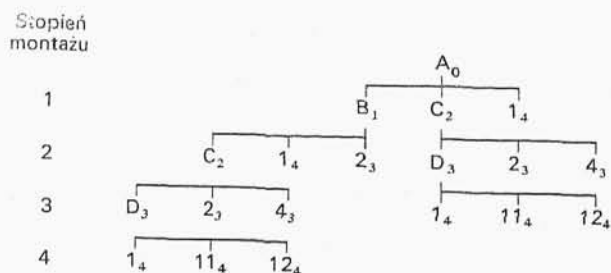


Rys. 87. Diagram zapisów odpowiadających rozwinięciu wyrobu

Adaptując syntetyczny algorytm mnoży się jednostkowe zużycie przez wielkość produkcji finalnych asortymentów, a następnie porównuje ze stanem zapasów. Tylko według potrzeb netto prowadzone jest dalsze mnożenie dla różnych stopni montażu, gdzie potrzeby stopnia wyższego (netto) są danymi wyjściowymi. Unika się w tej metodzie sugerowania zbędnej produkcji detali i podzespołów. Ulepszeniem tego algorytmu jest algorytm rozwinięcia wyrobu z zaznaczeniem macierzystych stopni montażu (por. rys. 88).

Przy każdym elemencie zaznacza się macierzysty stopień montażu, tzn. ten, podczas którego element zostaje wytworzony. Dzięki temu można

porównać zapotrzebowanie ze stanem zapasów, w momencie wchodzenia elementu do montażu (o czym wskazuje stopień montażu) oraz określić zapotrzebowanie brutto (sortując elementy według ich indeksu i macierzystego stopnia montażu), co ułatwia uruchamianie serii produkcyjnych. Wynika z tego dla każdego elementu, kiedy najwcześniej może być uruchomiona jego produkcja (o czym informuje macierzysty stopień montażu), kiedy i w jakiej liczbie elementy winny być wyprodukowane.



Rys. 88. Rozwinięcie wyrobu z zaznaczeniem macierzystych stopni montażu

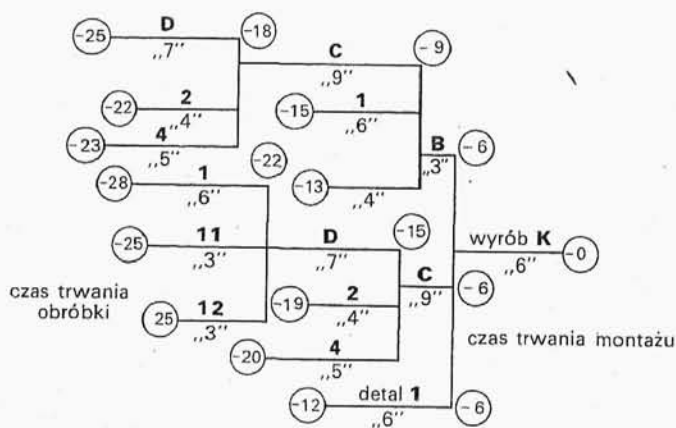
Rozwinięcie wyrobu należy utrzymać w kolejności malejącej, tzn. od wyższych do niższych stopni montażu. Ewidencja stanu zapasów jest prowadzona według macierzystych stopni montażu. Wprowadzamy do systemu dane o asortymentowym planie produkcji. Poczynając od najwyższych stopni montażu porównujemy plan ze stanem zapasów. Jeśli zapas pokrywa potrzeby, żadnej dalszej akcji nie podejmuje się. Dla elementów o niższych macierzystych stopniach montażu przechowuje się chwilowe potrzeby brutto (otrzymane na danym stopniu montażu) aż do osiągnięcia macierzystego stopnia montażu i porównania ze stanem zapasu.

W dekompozycji potrzeb opierającej się na stopniach montażu wyróżnia się w cyklu produkcyjnym tylko podstawowe okresy, podczas gdy w każdym stopniu montażu można jeszcze wyróżnić podstopnie, aż do odzwierciedlenia faktycznego zazębiania się obróbki i montażu w czasie. Algorytm, który będzie to lepiej realizował oparty jest na tzw. kalendarzu jednostek terminów. W poprzednich algorytmach ograniczono się do bardzo podstawowych danych: indeksu elementu oraz liczby sztuk na wyrób bądź elementu wyższego stopnia. Natomiast w tym algorytmie wymagana jest informacja o normach czasowych wykonania (tpz — czas przygotowawczo-zakończeniowy, tj. czas jednostkowy). Rozwijając wyrób według stopni montażu przewiduje się początek i zakończenie obróbki lub montażu, wykonując następujące działanie (por. rys. 89):

$$L = \sum_{j=1}^{i=n} tpz_i + nt_{ji} \cdot N, \text{ gdzie}$$

L — oznacza liczbę jednostek terminów przetwarzania,
 i — liczbę operacji technologicznych,
 N — normatyw przejść międzyoperacyjnych,
 M — moduł jednostki terminu (np. 3 dni).

Opierając się na wspomnianych algorytmach montażowych określa się N . Przy tym wystąpią jednak trudności porównywania określonych potrzeb ze stanem zapasów. Bowiern określenie potrzeb netto możliwe jest na poziomie macierzystych stopni montażu, podczas gdy wyznaczanie terminu odbywa się na każdym stopniu montażu. Porównanie ze stanem zapasów wymaga kilkakrotnego rozwijania montażowego wyrobu (za pierwszym razem w celu określenia potrzeb brutto i netto), aby optymalnie dobrać wielkość produkcji elementów powtarzających się na kilku stopniach montażu. Między innymi może być brana pod uwagę wielkość optymalnej serii. W zależności od typu produkcji — t.p.z. może być pominięte (masowa, ustabilizowana) lub określone na podstawie normatywów dla danego rodzaju operacji technologicznej.



Rys. 89. Cyklogram montażowy wyrobu według negatywnych jednostek terminów

Normatywy przejść międzyoperacyjnych (międzywydziałowych) są statystycznie wyznaczone dla każdej grupy operacji i komórek produkcyjnych. Wymaga to dodatkowej informacji w karcie o miejscu wykonania operacji i przesłania.

Moduł jednostki terminów wybiera się taki, aby najlepiej odzwierciedlał charakter cyklu produkcyjnego. Najczęstszym modulem są 3 dni. Wielkość modułu wyrażonego w godzinach różna będzie dla pracy 1-, 2- czy 3-zmianowej. W ten sposób można wyznaczyć termin na wykonanie poszczególnych operacji i całych elementów. Wyznaczanie terminu odbywa się według tzw. negatywnych jednostek. Po wstawieniu plano-

wanego terminu zakończenia montażu wyboru otrzymuje się łańcuch terminów pozytywnych, odpowiadających datom kalendarza.

Rozwijanie wyrobów i terminowanie może być dokonywane dla każdego n lub dla najbardziej typowego łańcucha n . Wówczas otrzymuje się katalog rozwiniętych wyrobów z wyznaczonymi terminami rozpoczęcia i zakończenia produkcji; na tej podstawie można podejmować decyzję o wielkości serii, znając równolegle stan innych zasobów określonych w ten sam sposób (np. dysponowany stan zapasów, zdolności produkcyjne maszyn i ludzi).

Wadą tego systemu jest złożoność metody numerycznej zapewniającej bilansowanie potrzeb ze stanem zapasów (kilka powtórzeń rozwijania) oraz może zbyt duża szczegółowość, która w normalnej praktyce nie będzie wykorzystana.

Uproszczeniem tego systemu obliczeń będzie korzystanie z tzw. dopuszczalnego okresu rozpoczęcia obróbki lub montażu elementu (tzw. *lead time*), który liczy się od rozpoczęcia produkcji danego elementu do zakończenia montażu jednostki wyrobu. (por. rys. 90).



Rys. 90. Dopuszczalny okres rozpoczęcia produkcji (*lead time*)

Można rozwijać montażowo wyrób opierając się na metodach macierzowych (np. metodzie Gorino), które charakteryzują się większą prędkością obliczeń, lecz nastroczają sporo trudności w etapowym porównywaniu ze stanem zapasów.

Z tego przeglądu wynika, że pewne algorytmy mają przewagę nad innymi. Jednak ich dobór jest uzależniony od wymagań, charakteru procesu produkcyjnego i celowości. Wykazaliśmy przewagę algorytmów dynamicznych nad statystycznymi, jednak preferowanie ich dla planowania potrzeb produkcji np. piór kulkowych, mogłoby być niewłaściwe.

Określanie potrzeb w zakresie pracochłonności, materiałochłonności, oprzyrządowania wymaga skojarzenia ustalonej LCP z kartoteką norm czasowych, materiałowych bądź wykazami oprzyrządowania — zorganizowanych według elementów. Postać zestawień może być statyczna lub dynamiczna w zależności od postaci LCP.

Nie podajemy tu algorytmów numerycznych rozwinięć montażowych realizowanych przy wykorzystaniu masowych pamięci taśmowych i dyskowych.

c. Sterowanie zapasami

Zapasy występujące w procesie produkcyjnym mogą dotyczyć materiałów i półfabrykatów z zakupów, produkcji w toku, półfabrykatów i wyrobów gotowych w wypadku realizacji zamówień z zapasów.

Poszukując optymalnego sterowania zapasami dążyć się winno do:

- ustabilizowanej ewidencji każdego elementu (asortymentu),
- stosowania ograniczeń wynikających z innych modułów systemu sterowania (np. perspektywicznego czy finansowego),
- automatycznego oddziaływania na zmiany,
- redukcji nadmiernych zapasów,
- właściwej obsługi dostawców (zamówienia realizowane z zapasów),
- koncentracji środków finansowych na te wydatki, które są niezbędne w chwili obecnej,
- posiadania danych o sytuacjach wyjątkowych etc.

Rozpatrzmy, jakie sytuacje mogą wystąpić w gospodarce zapasami. Pierwsza: zapas tworzony jest dla pojedynczego celu, aby zapewnić równowagę w krótkich okresach w warunkach zróżnicowania przychodów i rozchodów. Zróżnicowanie terminów może wystąpić, gdy przychody są dyskretne, a rozchody ciągłe, bądź gdy zamówienia na uzupełnienie zapasów są opóźnione, a coraz to narastające zużycie wyprzedza przewidywania.

Druga: zapas jest zbyt mały, także częstotliwość braków jest tak duża, że poziom obsługi odbiorców lub produkcji jest bardzo niski.

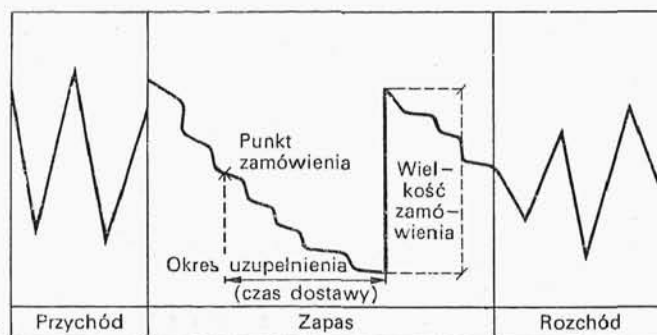
Trzecia: zapas jest zbyt duży, poziom obsługi jest bardzo dobry, ale zapasy są nadmierne i kosztowne.

Widać z tego, że sterowanie zapasami sprowadza się do analizy i podjęcia decyzji w zakresie (por. rys. 91):

— kiedy zamówić?

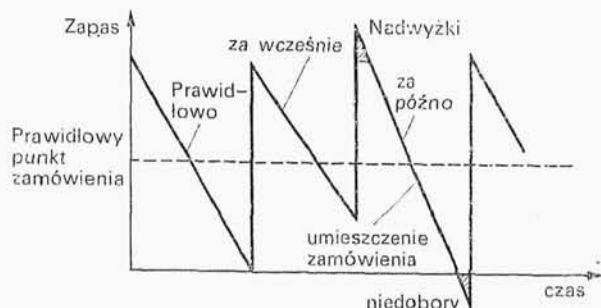
— ile zamówić?

Dzięki takiej analizie można przyjąć, aby zapas malał aż do momentu,



Rys. 91. Interpretacja sterowania zapasami

kiedy krytyczny moment zostanie wykryty przez punkt zamówienia; występuje wówczas konieczność złożenia nowego zamówienia na dostawę. Zapas nadal maleje aż do momentu, gdy następuje nowa dostawa. Jeśli punkt zamówienia został prawidłowo określony, wówczas zapas opadnie do dopuszczalnych granic. Jeśli punkt zamówienia jest zbyt wcześnie ustalony, wówczas wystąpią zapasy ponadnormatywne i odwrotnie (por. rys. 92).

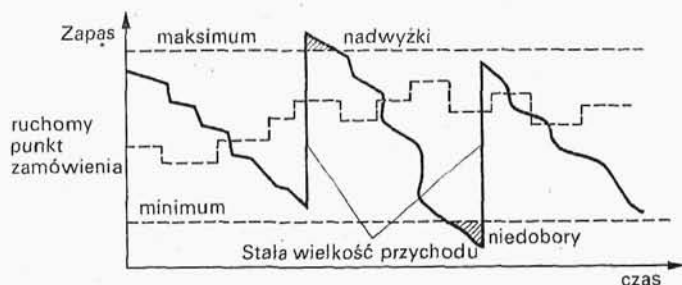


Rys. 92. Warianty określenia punktu zamówienia

Zbyt późne wyznaczenie punktu prowadzi do braków. Wystawienie zamówień dostaw w złym czasie może wynikać z:

- błędnego przewidywania popytu (dostawy z magazynu) lub zużycia (dostawy do produkcji),
- błędnego określenia czasu na dostawę,
- obu na raz popełnionych błędów.

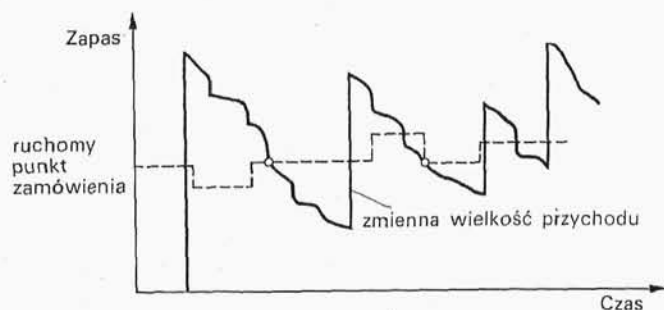
Skoro ustalono, że poziom zapasu jest określany na podstawie popytu lub zużycia, które mają charakter zmienny, zatem punkt zamówienia musi być określany w sposób zmienny, a nie tak, jak to ilustruje rysunek 92.



Rys. 93. Interpretacja ruchomego punktu zamówienia

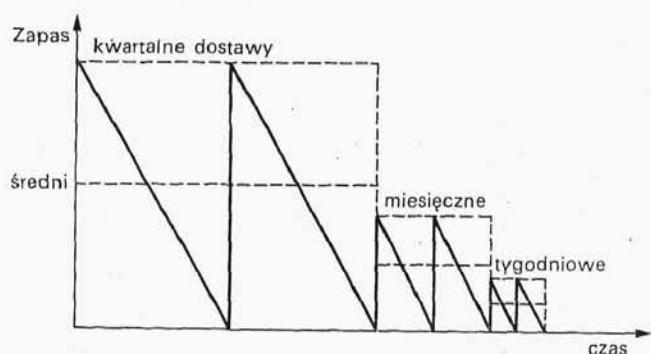
Z rysunku 93 wynika, że pomimo zastosowania ruchomego punktu zamówienia, nie unikniono nadwyżek ani braków. Widać z tego, że wielkość dostaw musi być również zmienna, jak to ilustruje rysunek 94 i dostosowana do zmian popytu i zużycia.

Rozpatrując wielkość dostaw jest oczywiste, że wzrost wielkości dostaw



Rys. 94. Interpretacja ruchomego punktu zamówienia i zmiennej wielkości dostaw

powoduje zwiększenie średniego zapasu i wydłuża przerwę pomiędzy dostawami (por. rys. 95). Rozpatrzmy, jak kształtuje się koszt zapasów przy różnej częstotliwości dostaw (por. tabl. 17).



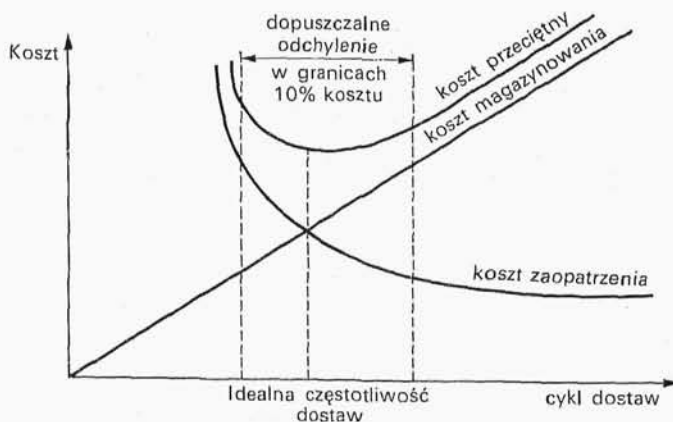
Rys. 95. Wielkość średniego zapasu w funkcji częstotliwości dostaw

Jeśli średni zapas jest wysoki, wówczas koszt jego utrzymania jest również wysoki. Przerwa między kolejnymi dostawami jest długa i oczywiście tylko kilka zamówień jest umieszczonych w ciągu roku. Koszt operacyjny składania zamówień jest wówczas niski.

TABLICA 17
Koszt zapasów przy różnej częstotliwości dostaw
(w tys. zł)

Częstotliwość dostaw	26 tygodni	17 tygodni	13 tygodni	4 tygodnie	1 tydzień
Roczna wartość zużycia	520	520	520	520	520
Wartość zamówień	280	170	130	40	10
Wartość średniego zapasu	130	85	65	20	5

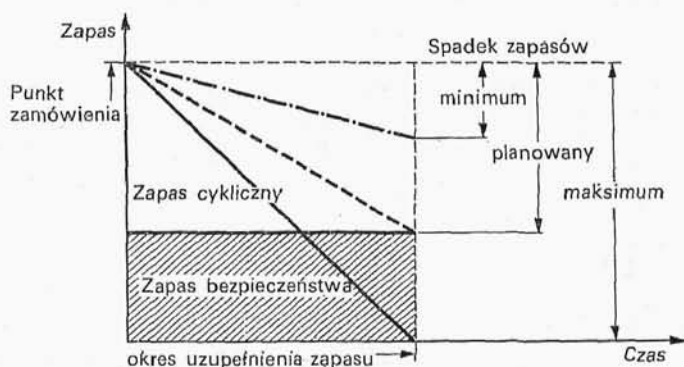
Zależność tę ilustruje rysunek 96, na którym wyznacza ona optymalną częstotliwość dostaw.



Rys. 96. Określenie optymalnej częstotliwości dostaw

Należy przede wszystkim podkreślić, że wszelkie planowanie pomimo doboru — wydawałoby się — najefektywniejszych metod, kryje w sobie pewien błąd. W wypadku zapasów występuje ryzyko co będzie, jeśli plan został źle zbudowany lub dostawy opóźnione.

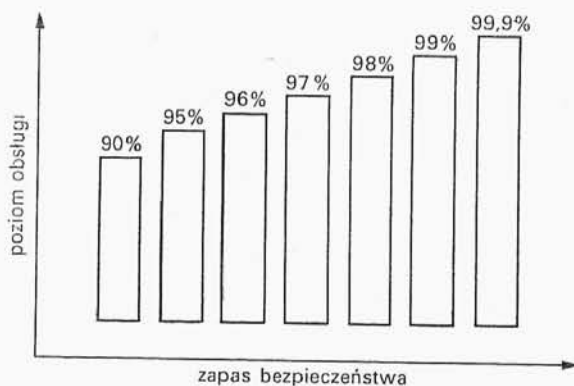
Stąd też wprowadza się dodatkowe zabezpieczenie w okresie uzupełnienia dostaw od momentu wykrycia punktu zamówienia. Spadek zapasów w tym czasie dzieli się na: minimalny, planowany, maksymalny. Zapas między zużyciem planowanym a maksymalnym jest zapasem gwarancyjnym. Natomiast zas między punktem zamówienia a zużyciem planowanym jest zapasem cyklicznym (rys. 97). Zapas bezpieczeństwa naruszany jest w wyjątkowych wypadkach.



Rys. 97. Zapas cykliczny i zapas bezpieczeństwa

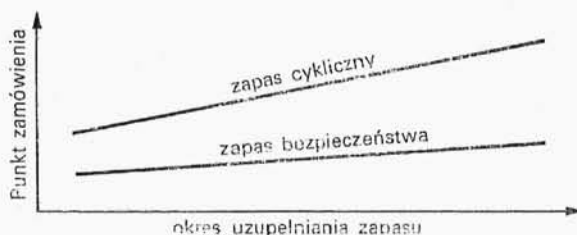
Stopień zabezpieczenia obsługi odbiorców lub produkcji przed brakiem zapasu, czemu przeciwdziała zapas bezpieczeństwa, jest miarą obsługi klienta lub produkcji. Trzymanie dużego zapasu bezpieczeństwa jako rezerwy połączone jest z dużym kosztem magazynowania. Z tych względów określenie wielkości tego zapasu opiera się na pewnym z góry ustalonym

prawdopodobieństwie, że popyt lub zużycie nie przekroczy posiadanej rezerwy. Prawdopodobieństwo to określa się współczynnikiem ufności⁶ lub częściej zwanym w anglosaskiej nomenklaturze współczynnikiem obsługi. Wysokość jego może wynosić np. 95% lub 99%. Zamiast tego prawdopodobieństwa można się posługiwać prawdopodobieństwem zdarzenia przeciwnego, czyli tzw. współczynnikiem ryzyka, wynoszącym odpowiednio 5% lub 1%, który wyraża prawdopodobieństwo, że zapas bezpieczeństwa nie wystarczy na pokrycie zwiększonego zapotrzebowania. W wypadku 5% ryzyka oznacza, że braki w magazynie nie mogą się powtórzyć więcej niż 1 raz na 20 cykli zapotrzebowania. Cykliczny zapas odpowiada wtedy planowanym rozchodom, a zapas bezpieczeństwa poziomowi obsługi, przy czym zależność pomiędzy wielkością zapasu bezpieczeństwa a poziomem obsługi przedstawia diagram na rysunku 98.



Rys. 98. Wielkość zapasu bezpieczeństwa w zależności od współczynnika poziomu obsługi

Znając możliwości zamrożenia środków finansowych oraz sezonowe zużycie można określić dla danego poziomu obsługi odpowiednią wielkość zapasu bezpieczeństwa. Z praktyki wynika, że dla dłuższych okresów dostaw zapas bezpieczeństwa rośnie wolniej niż zapas cykliczny (por. rys. 99).



Rys. 99. Zależność wielkości zapasów od okresu uzupełnienia zapasu

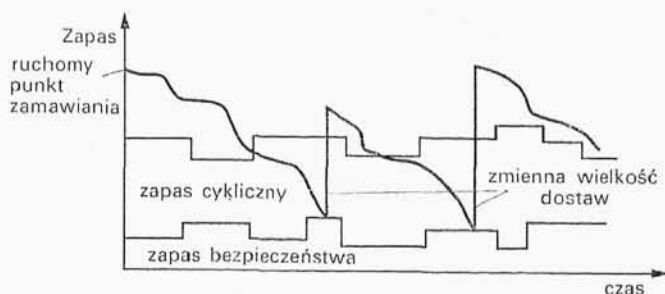
⁶ Por. O. Lange: *Optymalne decyzje, zasady programowania*, wyd. cyt.

Jest rzeczą znaną z praktyki, że gdy okres uzupełniania zapasu wydłuża się, wówczas wzrasta ryzyko braków i zapas bezpieczeństwa musi dawać jeszcze większą gwarancję.

Poszukując optymalnego systemu sterowania zapasami można stwierdzić, że prowadzi do niego algorytm uwidoczniiony na rysunku 100.

Polega on na:

- ruchomym punkcie zamawiania,
- zmiennej wielkości dostaw,
- zmiennej wielkości zapasu bezpieczeństwa.



Rys. 100. Optymalny system sterowania zapasami

Stosując pewne zasady działania serwomechanizmów do sterowania zapasami można podać, że optymalna wielkość uzupełniających dostaw minimalizująca koszt zapasów wynosi:

$$Q_k = C_k(T+1) - \sum_{j=1}^{j=T} Q_{k-j} - (I_k - I_b), \text{ gdzie}$$

$C_k(T+1)$ oznacza przewidywany popyt lub zużycie w okresie $K+1$ do $K+T+1$,

I_k — zapas cykliczny w okresie K ,

I_b — zapas bezpieczeństwa,

T — czas uzupełniania zapasu.

Jest oczywiste, że objęcie takim sterowaniem wszystkich asortymentów (średnio 20 tys. w przemyśle maszynowym) może w efekcie być nieoptymalne, przynajmniej z dwóch następujących powodów:

— dla pewnych asortymentów, szczególnie tych podstawowych, można dokładnie określić popyt lub zużycie, choćby na podstawie dekompozycyjnego planowania potrzeb (ta droga jest pewniejsza od zaproponowanej procedury),

— sterowanie metodą przedstawioną wymaga stosowania długiej procedury obliczeniowej, która może się okazać nieopłacalna dla wszystkich asortymentów.

Z tego względu występujące w produkcji asortymenty można podzielić na trzy kategorie A, B, C, gdzie:

	A	B	C
wartość zużycia	65%	20%	15%
liczba pozycji	15%	35%	50%

Z tego zestawienia wynika, że tylko 15% asortymentu odpowiada wartości 65% całego zapasu. Na tej kategorii asortymentów powinna być ześrodkowana główna uwaga systemu sterowania zapasami.

Stąd okaże się celowe, by sterowanie zapasami asortymentów oprzeć: dla kategorii A — na wynikach dekompozycyjnego planowania, dla kategorii B, C — na systemie optymalnego sterowania.

W uzasadnionych wypadkach asortyment typu C można oprzeć na prostym sterowaniu według zasady minimum-maksimum i stałym punkcie zamawiania przyjmując, że oszczędności na koszcie operacyjnym dla połowy asortymentu o wartości 15% całości będą znacznie większe, niż efekty uzyskane w wyniku optymalnego sterowania. Oczywiście należy przeprowadzić rachunek ekonomiczny dla konkretnych warunków (biorąc pod uwagę np. koszt 1 godz. pracy komputera).

5. Dobór algorytmów do bieżącego sterowania produkcją (bilansowanie i układanie harmonogramów)

Algorytmy bieżącego sterowania produkcją zostaną omówione w szczególności ze względu na moduł bilansowania i układania harmonogramów produkcji. W module dysponowania produkcją przeważają bardziej procedury, mniej algorytmy.

Bieżące bilansowanie i harmonogramowanie produkcji polega na zorganizowaniu wykonania wielkiej liczby operacji technologicznych w taki sposób, aby najlepiej wykorzystać zdolność produkcyjną zasobów, a wartość produkcji w toku sprowadzić do minimum.

Dane otrzymane na etapie dekompozycyjnego planowania potrzeb oraz sterowania zapasami wskazują na wielkości produkcji poszczególnych asortymentów w różnym stopniu dekompozycji (detale, podzespoły, wyroby). Dane te skojarzone ze zdolnością produkcyjną tworzą proces bilansowania i układania harmonogramów produkcji.

Typowym, najczęściej stosowanym algorytmem bilansowania jest tzw. „nieokreślona przepustowość”. W codziennej praktyce przedsiębiorstw daty zakończenia produkcji elementów ustalane są na podstawie żądań odbiorców bez głębszej analizy dostępności zasobów.

Bilansowanie odbywa się przez przydzielanie poszczególnym komórkom produkcyjnym fabrykacji określonych elementów lub operacji technologicznych w zależności od zorganizowania produkcji — poczynając od daty zakończenia produkcji. Czas transportu międzyoperacyjnego, międzywy-

działowego jest na ogół nie brany pod uwagę. Przy takim bilansowaniu mogą wystąpić przepełnienia. Przesunięcie daty fabrykacji nie jest w takiej sytuacji możliwe, bowiem zagraża to terminowej dostawie całego zamówienia. Sytuacja wymaga:

— pogodzenia się z występującymi przepełnieniami, które wymagają dodatkowych przedsięwzięć ze strony kierownictwa, np. podzlecenie wykonania innemu zakładowi, zorganizowanie dodatkowej zmiany lub wyrażenie zgody na godziny nadliczbowe,

— poszukiwania dostępnych zasobów we wcześniejszych okresach, przy czym może nawet wystąpić konieczność kompletnej zmiany poprzednich harmonogramów.

Pewne rozwinięcie tego algorytmu może być dokonane przez wprowadzenie priorytetów wykonania.

Bez specjalnych dowodów można się zgodzić, że algorytm ten nie zabezpiecza optymalnego bilansowania i układania harmonogramów. Z drugiej strony, zanim przejdziemy do poszukiwania przydatniejszych do naszych celów algorytmów, należy zwrócić uwagę na wyjątkową złożoność procesu produkcyjnego. Oto jego przykład.

Proces technologiczny każdego z pięciu różnych detali składa się z pięciu różnych operacji technologicznych, wymagających różnych obrabiarek. Należy znaleźć taką sekwencję operacji, która zapewnia najszybszy przebieg obróbki. Okazuje się, że wyboru należy dokonać spośród 25 milionów możliwych sekwencji. Zakładając, że ułożenie jednej sekwencji wymagałoby jednej sekundy pracy szybkiej elektronicznej maszyny cyfrowej, wówczas wybieranie najszybszej sekwencji trwałoby osiemset lat pracy tryzmicznej.

Oczywiście przytoczony przykład jest nieporównywalnie uproszczony w stosunku do sytuacji faktycznie występujących. Bilansowanie i układanie harmonogramów produkcji jest odpowiednio proste, kiedy program produkcji jest stały, produkowane asortymenty są jednakowe, czasy wykonania stałe i sekwencje marszrut niezależne. Lecz poważnemu skomplikowaniu ulega proces obliczeniowy w warunkach, kiedy program produkcji ulega zmianie, ilość rodzajów produkowanych asortymentów jest bardzo duża, czasy wykonania możliwe są do oszacowania probabilistycznego, a sekwencje marszrut technologicznych są między sobą odpowiednio zązębiająco sprzężone.

Ze względu na wyjątkową złożoność problemu można projektować algorytmy o pewnych własnościach optymalizacyjnych. Podobnie jak w zagadnieniu komiwojażera — optymalizujące algorytmy teoretycznie jeszcze nie są rozwiązane.

Przytoczony na wstępie algorytm „nieokreślonej przepustowości” jest jednym z wypadków intuicyjnego bilansowania i układania harmonogramów, które w ogólnym zarysie sprowadzają się do wykorzystania infor-

macji dostępnych również dla stanowiska roboczego lub w rozdzielni. Na przykład wybór, która spośród oczekujących operacji winna być wcześniej rozpoczęta lub powinna oczekiwać jako następna, zależy od tego, który detal do danej operacji nadszedł pierwszy, lub którą operację można najszybciej skończyć, lub które detale mają największą ilość niezakończonych operacji. Można wybrać kolejność obróbki w sposób jeszcze bardziej przypadkowy.

Pewne z tych algorytmów mogą być całkowicie odrzucone, inne mogą być w pewnych wypadkach akceptowane. Symulacja na komputerze może pomóc w wyborze najkorzystniejszych algorytmów. Pełne zastosowanie technik symulacyjnych ograniczone jest trudnościami potęgowanymi w miarę wzrostu rozmiarów problemu.

Pewne doświadczenia przeprowadzone w tym zakresie⁷, wykazały, że określanie harmonogramu opierające się na kombinacji dwóch reguł, branie do obróbki tych robót, które skończą się szybciej i takich, które mają największą ilość niezakończonych operacji — nie daje lepszych wyników od przypadkowej generacji możliwych sytuacji pośrednio akceptowanych na zasadzie doświadczenia lub porównania w stosunku do poprzedniego wariantu, przyjmując pewne reprezentatywne kryterium, które z reguły jest łącznym czasem obciążenia maszyn (suma najkrótszych sekwencji technologicznych).

Dalszym ulepszeniem algorytmów optymalizujących jest przygotowanie harmonogramów oparte na zasadzie heurystycznej, która odpowiada stylowi pracy wykwalifikowanego planisty. Przez odpowiednie stawianie pytań otrzymuje się odpowiedzi dające rozwiązanie.

Niedawno przeprowadzone doświadczenia w amerykańskim koncernie General Electric zostały oparte na wskaźniku wykorzystania zatrudnienia w zależności od zmian zapotrzebowania, przy czym przyjęto, że wskaźnik ten różny jest dla warunków produkowania na zapas (lepsze dopasowanie zatrudnienia) i dla warunków produkcji według zamówień. Projektuje się taki harmonogram, który umożliwia uniknięcie strat z powodu niewykorzystania zatrudnionych pracowników.

Rozważa się w związku z tym:

- a) czy można w ramach danego poziomu zatrudnienia zbudować taki harmonogram przebiegu produkcji, w którym zredukuje się czas przestojów pracowników (gdy zamówienia mają tendencję zniżkową) lub unikanie godzin nadliczbowych, gdy wystąpi zwiększenie zamówień?
- b) jak zbudować harmonogram, aby przystosować go do możliwych zmian w zamówieniach, tak by równocześnie zapewnił on odpowiednią efektywność wykorzystania zatrudnienia?

⁷ Por. B. Giffer, G. L. Thompson: *Algorithms for Solving Production Scheduling Problems*, „Operations Research” 1960, nr 8.

Symulację przeprowadzono opierając się na czterech następujących zasadach harmonogramowania:

- pierwsza zasada: najkrótszy czas obróbki (z marszrutami zastępczymi),
 druga zasada: najdłuższy czas obróbki (z marszrutami zastępczymi),
 trzecia zasada: przypadkowy wybór sekwencji (z marszrutami zastępczymi),
 czwarta zasada: przypadkowy wybór sekwencji (bez marszrut zastępczych).

Uzyskane wyniki przedstawiamy w tablicy 18.

TABLICA 18

Symulacja przeprowadzona według czterech zasad tworzenia harmonogramów

Tydzień	I zasada			II zasada			III zasada			IV zasada		
	% wykorzystania zatrudnienia	narastający % wykorzystania zatrudnienia	średnia liczba robót	% wykorzystania zatrudnienia	narastający % wykorzystania zatrudnienia	średnia liczba robót	% wykorzystania zatrudnienia	narastający % wykorzystania zatrudnienia	średnia liczba robót	% wykorzystania zatrudnienia	narastający % wykorzystania zatrudnienia	średnia liczba robót
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	100	100	771	100	100	953	100	100	912	100	100	912
2	100	200	583	100	200	917	100	200	828	100	200	827
3	100	300	470	100	300	859	100	300	745	100	300	734
4	100	400	382	100	400	796	100	400	655	99	399	634
5	100	500	313	100	500	710	100	500	543	99	498	547
6	100	600	255	100	600	618	100	600	431	99	597	438
7	94	694	198	86	656	480	91	691	336	85	682	340
8	71	765	154	65	751	379	66	757	268	51	733	281
9	50	815	122	44	795	299	48	805	223	36	769	239
10	36	851	96	23	818	255	29	834	187	26	795	206
11	31	882	72	43	861	215	31	865	147	30	825	185
12	29	911	53	38	869	177	29	894	110	22	847	163
13	26	937	38	14	913	119	30	924	82	18	865	144
14	15	952	24	19	932	84	21	945	52	23	888	127
.
.

Liczba tygodni nie obciążonych maszyn.

Z wyników symulacji optymalnego harmonogramu wynika przewaga pierwszej zasady oraz zaleta stosowania technologii zastępczych (por. zasadę trzecią i czwartą).

Dalsze symulacje przeprowadza się dla różnych poziomów zamówień i bada przydatność poszczególnych kryteriów, aż do osiągnięcia najlepszego wykorzystania zatrudnionych pracowników.

Przygotowanie harmonogramów rozpoczęcia produkcji podzespołów nie może być zaczęte przed zakończeniem produkcji detali bezpośrednio wchodzących do danego podzespołu. Wykorzystując mechanizm „0”, „1” sygnalizujący zakończenie lub niezakończenie obróbki detali (podzespo-

łów niższego rzędu) można harmonogramowanie sprowadzić do algorytmów programowania liniowego⁸.

Poprzednie metody charakteryzowały się symulowaniem pewnej liczby harmonogramów, które były wybierane w zależności od przyjętych mierników oceny. Zwrócono przy tym uwagę na poważne trudności w przeliczaniu poszczególnych wariantów.

Przeprowadzono pewne badania nad algorytmami zapewniającymi skończoną liczbę przeliczeń, tzw. aktywnego fizycznego harmonogramu. Harmonogram ten ma następujące własności:

- a) przestój stanowiska roboczego nie może przekraczać okresu obróbki elementu, który w tym samym czasie mógłby być wykonany (czas przestoju stanowiska roboczego, krótszy od tzw. „czasu przestoju elementu”),
- b) jeśli element zostanie przydzielony do obróbki na danym stanowisku roboczym, wówczas rozpoczyna się ona natychmiast, kiedy dane stanowisko robocze i element są równocześnie do tego gotowe.

Przeprowadzono doświadczenia⁹ dla warunków charakteryzowanych występowaniem „6·6” problemów. Oznacza to, że w każdym wariancie 6 części wyrobu jest wytwarzanych zawsze na 1 lub 6 obrabiarkach:

Element wyrobu		Obrabiarki					
1	sekwencje operacji technologicznych	3	1	2	4	6	5
2		2	3	5	6	1	4
3		3	4	6	1	2	5
4		2	1	3	4	5	6
5		3	2	5	6	1	4
6		2	4	6	1	5	3

Możemy z tej macierzy generować serię problemów, które będziemy oznaczać $6 \cdot 6 * 1$, $6 \cdot 6 * 2$, ..., $6 \cdot 6 * 6$. Pierwszy problem oznacza, że każdy element wyrobu jest wytwarzany w 1 operacji na obrabiarkach wymienionych w I kolumnie. Drugi problem oznacza, że każdy element jest wytwarzany w 2 operacjach na obrabiarkach wymienionych w kolumnach I i II itd.

Obliczenia harmonogramów aktywnych przeprowadzono na komputerze IBM 704 dla poszczególnych problemów (por. tabl. 19 na s. 169).

Z tablicy 19 wynika olbrzymi wzrost liczby wariantów aktywnych harmonogramów. Ze zrozumiałych względów zatrzymano się na pięciu kombinacjach. Przy bliższej ocenie poszczególnych wariantów przekonano się, że na każdy aktywny wariant przypada 100 nieaktywnych wariantów, czyli dla 5-operacyjnego procesu technologicznego 5 elementów liczba wszystkich warunków wynosi 8 milionów.

⁸ Por. R. E. Gomory: *Outline of an Algorithm for Integer Solutions to Linear Programs*, „Bulletin of the American Mathematical Society” 1958, nr 5, 64.

⁹ Por. B. Griffer, G. L. Thompson: op. cit.

TABLICA 19

Warianty aktywnych harmonogramów

Zadanie	Liczba wariantów aktywnych harmonogramów	Czas obliczeń na komputerze w min.
6 · 6*1	36	0.01
6 · 6*2	290	0.09
6 · 6*3	914	0.48
6 · 6*4	7 546	4.82
6 · 6*5	84 802	70.18

Uproszczenie harmonogramu przez sprowadzenie go do tzw. aktywnego harmonogramu poważnie skraca czas przeliczeń, jednak znajduje zastosowanie do niewielkich rozmiarów problemów, np. w ramach gniazd produkcyjnych oraz przy wykorzystaniu bardzo szybkich komputerów.

Aby uniknąć przeliczenia wszystkich wariantów harmonogramów (nawet ograniczonych) do wariantów efektywnych — można zastosować symulację według metody Monte Carlo. Wprawdzie metoda ta nie gwarantuje znalezienia harmonogramu optymalnego, jednak zapewnia sprawne obliczanie losowo wybranych harmonogramów, z których wybiera się najlepsze. Poprzez wydłużanie procesu liczenia na coraz to mniejszych próbkach harmonogramów można określić prawdopodobieństwo pojawienia się jeszcze lepszego harmonogramu. Dla poprzednio podanego przykładu obliczenia metodą Monte Carlo przedstawiamy w tablicy 20.

TABLICA 20

Harmonogram obliczony metodą Monte Carlo

Zadanie	Liczba wariantów aktywnego harmonogramu	Zaobserwowane prawdopodobieństwo krótszego harmonogramu	Liczba znalezionych krótszych harmonogramów	Liczba powtarzających się harmonogramów
6 · 6	5000	0.008	40	3 potrójne 7 podwójnych
7 · 7	5000	0.007	34	5 podwójnych
10 · 10*8	3000	0.009	28	bez powtarzania

Z przytoczonej analizy algorytmów optymalizujących wynika złożoność tego zagadnienia pod względem kombinatoryjnym. Ze względu na wielkość problemu nie wszystkie algorytmy w swej teoretycznej konstrukcji słuszne mogą znaleźć zastosowanie ze względów praktycznych. Wydaje się, że algorytmy heurystyczne, Monte Carlo oraz uczące się należą do czołowej grupy o najlepszych obecnie własnościach optymalizujących.