

**ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ**

Bożena SKOŁUD

**PLANOWANIE WIELOASORTYMENTOWEJ
PRODUKCJI RYTMICZNEJ**

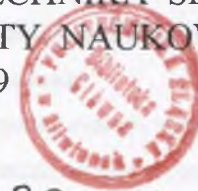
P.3361/00

MECHANIKA

z. 136

**GLIWICE
2000**

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
ZESZYTY NAUKOWE
Nr 1449



P. 3361/00

Bożena SKOŁUD

**PLANOWANIE WIELOASORTYMENTOWEJ
PRODUKCJI RYTMICZNEJ**

4.2.1. Model systemu	59
4.2.1.1. Struktura systemu	60
4.2.1.2. Wskaźniki oceny systemu.	66
4.2.2. Model zlecenia	70
4.2.2.1. Struktura zlecenia	70
4.2.2.2. Wskaźniki oceny zlecenia.	71
4.2.3. Podsumowanie.	72
4.3. Planowanie przepływu produkcji.	72
4.3.1. Przepływy dopuszczalne.	73
4.3.1.1. Struktura systemu a warunki dopuszczalności.	76
4.3.1.2. Odporność na zakłócenia	83
4.3.2. Dobór ograniczeń.	84
4.3.3. Weryfikacja zleceń.	86
4.3.4. Podsumowanie	86
4.4. Podsumowanie rozdziału	87
5. Planowanie i sterowanie przepływem produkcji.	88
5.1. Parametry systemu.	90
5.1.1. Krytyczny zasób i krytyczny proces	91
5.1.2. Okres przepływu ustalonego	95
5.1.3. Podsumowanie	96
5.2. Wybór zleceń do wspólnej realizacji.	96
5.2.1. Warunki wystarczające terminowej realizacji zlecenia.	96
5.2.2. Stopień wykorzystania zasobów.	101
5.2.3. Wielkość zapasów produkcji w toku	102
5.2.4. Metodyka weryfikacji zbioru zleceń	104
5.2.5. Podsumowanie	110
5.3. Wybór dodatkowych zleceń.	110
5.3.1. Warunki wystarczające wielkości partii produkcyjnej.	111
5.3.2. Warunki wystarczające przebiegu ustalonego	114
5.3.3. Warunki wystarczające przydziału pojemności magazynów.	117
5.3.4. Warunki wystarczające terminowej realizacji zlecenia.	121
5.3.5. Metodyka weryfikacji pojedynczych zleceń	127
5.3.6. Podsumowanie	131

5.4. Porównanie metodyk weryfikacji zbioru zleceń i weryfikacji pojedynczych zleceń	132
5.5. Podsumowanie rozdziału.	135
6. Prototypowanie wariantów organizacji produkcji rytmicznej.	136
6.1. System weryfikacji zleceń.	137
6.1.1. Specyfikacja danych.	139
6.1.2. Struktura i działanie systemu.	140
6.1.3. Podsumowanie	142
6.2. Zastosowanie.	142
6.2.1. Obiekt eksperymentu.	142
6.2.2. Przedmiot weryfikacji	144
6.2.3. Eksperyment komputerowy.	144
6.2.4. Wnioski	154
6.3. Podsumowanie rozdziału.	156
7. Zakończenie.	158
Posłowie (synteza własnych dokonań)	161
Dodatek A. Algebraiczna reprezentacja systemu współbieżnych procesów produkcyjnych.	163
A.1. Formalizm algebry (max,+)	163
A.2. Zastosowanie formalizmu algebry (max,+)	167
Dodatek B. System Weryfikacji Zleceń.	175
B.1. Wprowadzanie danych.	175
B.2. Obsługa	180
B.3. Wyniki	181
Dodatek C. Dane wejściowe do przeprowadzenia eksperymentu.	183
Literatura	188
Streszczenie	202

CONTENTS

Index of important symbols	9
1. Introduction	11
1.1. Development trends of production systems.	11
1.2. Subject and the scope	19
2. Literature and production practice analyse	22
2.1. Production planning	22
2.1.1 Process resource allocation planning.	22
2.1.2 Manufacturing process planning.	23
2.1.3 Systems of MRP class.	27
2.1.4 Conclusions	29
2.2. Production flow.	30
2.2.1. Planning techniques	30
2.2.2. Production flow control.	35
2.2.3. Conclusions.	38
2.3. Optimisation of multi-product repetitive manufacturing	38
2.4. Summary	43
3. A goal and thesis	44
3.1. A goal	44
3.2. Thesis	45
3.3. Problem formulation	46
3.4. Scope	48
3.5. Summary	50
4. Pproducer oriented manufacturing	51
4.1. Logistics management	51
4.1.1. Repetitive manufacturing.	52
4.1.2. Concurrent production processes.	54
4.1.3. Modelling of the system of concurrent production processes	56
4.1.4. Production flow scheduling and control	57
4.1.5. Conclusions	59
4.2. Model of multi-product manufacturing flow.	59

4.2.1. Model of the system	59
4.2.1.1. Structure of the system.	60
4.2.1.2. Performance index	66
4.2.2. Model of production order.	70
4.2.2.1. Structure of production order.	70
4.2.2.2. Performance index	71
4.2.3. Conclusions.	72
4.3. Planning of production flow.	72
4.3.1. Permissible flows.	73
4.3.1.1. Structure of a system, vs. permissibility conditions.	76
4.3.1.2. Robustness.	83
4.3.2. Selection of constraints.	84
4.3.3. Validation of workorder.	86
4.3.4. Conclusions	86
4.4. Summary	87
5. Planning and control of production flow	88
5.1. System parameters	90
5.1.1. Critical process and critical resource.	91
5.1.2. Cycle of a steady state flow	95
5.1.3. Conclusions	96
5.2. Selection of production order for concurrent realisation.	96
5.2.1. Sufficient conditions for due time completion.	96
5.2.2. Rate of resource utilisation.	101
5.2.3. Rate of work in progress	102
5.2.4. Methodology for production order prototyping.	104
5.2.5. Conclusions	110
5.3. Selection of additional production orders.	110
5.3.1. Sufficient conditions for batch sizing.	111
5.3.2. Sufficient conditions for steady state execution.	114
5.3.3. Sufficient conditions for buffers allocation.	117
5.3.4. Sufficient conditions for completion of production.	121
5.3.5. Methodology for a single production order prototyping	127
5.3.6. Conclusions.	131

5.4. Comparison of methods of a multi order and a single production order verification methodology	132
5.5. Summary	135
6. Prototyping of production flow	136
6.1. System of the production order validation.	137
6.1.1. Data specification.	139
6.1.2. Structure and operation of a system	140
6.1.3. Conclusions	142
6.2. Implementation.	142
6.2.1. Object	142
6.2.2. Verification objective.	144
6.4.3. Computer's experiment.	144
6.4.4. Conclusions.	154
6.3. Recapitulation.	156
7. Concluding remarks	158
Epilogue (synthesis of achievements)	161
Appendix A. Algebraic representation of regular structure of processes	163
A.1. Formalism of (max,+) algebra	163
A.2. Illustrative example of algebra (max,+) utilisation	167
Appendix B. System of a production order validation	175
B.1. Data specification	175
B.2. Manual	180
B.3. Results.	181
Appendix C. Input data for experiment.	183
References	188
Abstract	202

Wykaz ważniejszych oznaczeń

$M_1, M_2, \dots, M_i, \dots, M_m,$	Zasoby
$Z_1, Z_2, \dots, Z_j, \dots, Z_n,$	Zlecenia
$P_1, P_2, \dots, P_j, \dots, P_n,$	Procesy
I_j	Liczba wytworów do skompletowania zlecenia Z_j
M_s	Macierz struktury systemu o wymiarach $m \times n$
n_{ij}	Element macierzy M_s
i	Kolejny numer zasobu
j	Kolejny numer procesu
$V = \{V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_m\}$	Macierz przebiegu ustalonego procesów
$V_i = v_1^i, v_2^i, \dots, v_k^i, \dots, v_T^i$	Macierz stanu i -tego zasobu
v_1^i	Element macierzy V_i
M_{A_j}	Macierz marszrut alternatywnych $m \times R_j$
R_j	Liczba operacji procesu P_j
a_{ij}	Element macierzy marszrut alternatywnych
M_{P_j}	Macierz procesu o wymiarach $3 \times R_j$
$(M_i, M_k)_j$	Para zasobów sąsiadujących
τ_i	Czas realizacji reguły σ_i
φ	Największy element macierzy M_{A_j}
σ_i	Lokalna reguła rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych
$\chi = [\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_i, \dots, \chi_m]$	Wektor względnych powtórzeń reguł w systemie
χ_i	Element wektora χ , krotność i -tej reguły w czasie cyklu systemu
n_{ij}	Powtarzalność j -tego procesu w regule alokowanej na i -tym zasobie
$Q_{ij} = n_{ij} * \chi_i$	Liczba wystąpień j -tego procesu w jednym cyklu na zasobie i -tym
t_{ij}	Czas jednostkowy operacji j -tego procesu na i -tym zasobie
to_j	Termin przyjęcia zlecenia
S_{ij}	Czas realizacji partii B_j j -tego procesu na i -tym zasobie
B_{w_j}	Dopuszczalna wielkość partii j -tego procesu na w -tym zasobie wspólnym
B_j	$\text{Min}(B_{w_j})$
$H^{w,n+1}$	Długość maksymalnego przestoju zasobu wspólnego
q	Częstotliwość wprowadzania partii B_j

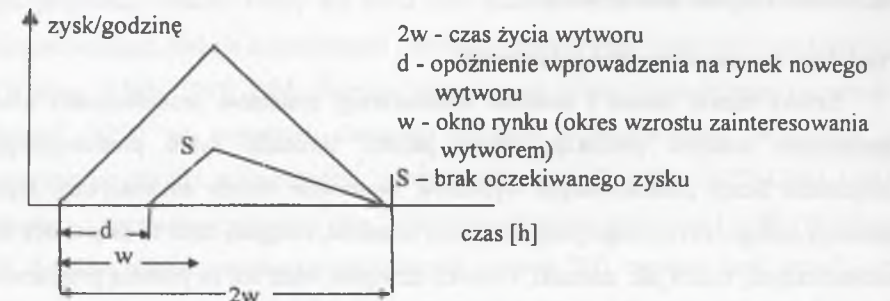
T_j	Okres wprowadzania partii B_j
tp_j	Ostateczny dopuszczalny termin uruchomienia j-tego zlecenia gwarantujący terminowość
C_p	Cykl produkcyjny
$(P_j)^1$	Pierwszy wiersz macierzy M_{P_j}
to_j^1	Możliwy termin rozpoczęcia realizacji operacji j-tego procesu na i-tym zasobie
M_{Cs}	Macierz pojemności systemu o wymiarach $m \times m$
CS_{ikj}	Pojemność magazynu międzyoperacyjnego dla $(M_i, M_k)_j$
η_z	Współczynnik zajętości zasobów
η	Współczynnik efektywności wykorzystania zasobów
T	Okres systemu
T_i	Fundusz czasu pracy dla i-tego zasobu w okresie T
D	Zapasy produkcji w toku
δ_j	Wskaźnik terminowej realizacji zlecenia
μ	Współczynnik terminowej realizacji zlecenia
tr_j	Rzeczywisty termin realizacji zlecenia
tz_j	Planowany (dyrektywny) termin realizacji zlecenia

1. Wprowadzenie

1.1. Kierunki rozwoju systemów produkcyjnych

W dobie konkurencji wzrasta zainteresowanie producentami, którzy są w stanie, w momencie napływu zlecenia (zamówienia), podjąć wiążące decyzje co do jego przyjęcia, gwarantując dotrzymanie terminów realizacji. Potrzeba taka wynika z obserwowanych tendencji do skracania czasu życia wytworu oraz wzrostu zapotrzebowania na zróżnicowane wytwory. Rosnące wymagania klientów i ukierunkowanie producentów na potrzeby rynku „time to market” powodują problemy z dotrzymaniem terminowości realizacji zleceń.

Każde opóźnienie wprowadzenia na rynek nowego wytworu powoduje brak oczekiwanego zysku, zależny od czasu życia wytworu oraz od pojawiającego się zapotrzebowania na ten wytwór, co ilustruje rys. 1.1.



Rys. 1.1. Straty wynikłe z opóźnienia „d” wprowadzenia nowego produktu [Syan, Menon, 1994]

Fig. 1.1. Revenue loss due to delay “d” of a new product introduction [Syan, Menon, 1994]

Dominacja na rynku może nastąpić jedynie przez szybsze, tańsze i doskonalsze utożsamianie się z oczekiwaniami klienta oraz lepsze dopasowanie się do jego potrzeb. Możliwość wprowadzenia na rynek nowego wytworu w oczekiwanym terminie zależna jest od szybkości podejmowania wiążących decyzji o możliwości realizacji zleceń. Krótki czas życia wytworu w razie błędnej decyzji często nie daje możliwości powrotu do etapu projektowania.

Konkurencyjność przedsiębiorstwa decyduje o jego przetrwaniu na rynku. W dobie współzawodnictwa producentów o dostęp do rynku konieczne jest nowe spojrzenie na obliczanie kosztów. Tradycyjny proces obliczania kosztów, polegający na wyznaczaniu ceny jako sumy

kosztów wytwarzania i zysku, jest nie do przyjęcia. Oferowany produkt musi być konkurencyjny ze względu na cenę, przy jednoczesnym zachowaniu wymaganego poziomu jakości. Nowoczesny producent może zatem manipulować jedynie kosztami, na które ma bezpośredni wpływ [Skołod, 1998 f].

Nasuwa się spostrzeżenie, że dla różnych producentów dostępne są te same środki produkcji (obrabiarki, systemy transportu, oprzyrządowanie) i te same materiały produkcyjne. Niedoskonałości w postaci strat i opóźnień w produkcji, a z tym związane szerokie możliwości działania, są zauważalne na etapie projektowania produktu oraz organizacji produkcji i zarządzania. Konkurencyjne jest to przedsiębiorstwo, które potrafi zorganizować produkcję, gwarantującą większą efektywność i jednocześnie pozwalającą na zaspokojenie potrzeb klienta lepiej niż konkurent. Atutem takiego wytwórcy jest szybkość udzielania wiążących odpowiedzi co do możliwości przyjęcia zlecenia i gwarancji terminowej jego realizacji.

Dążenia te są powodem nieustannego rozwoju metod i technik wytwarzania. Do znaczących etapów rozwoju systemów wytwarzania należą [Skołod, 1999a]: automatyzacja wytwarzania, komputerowa integracja wytwarzania, inżynieria współbieżna, wytwarzanie w przedsiębiorstwie wirtualnym, biologiczny i holoniczny modele wytwarzania, wytwarzanie odchudzone i wytwarzanie żywotne.

Produkcja zautomatyzowana i elastyczna

Szybki rozwój metod i środków automatyzacji systemów produkcyjnych umożliwił: zmniejszanie kosztów produkcji, wzrost jakości, skrócenie cyklu produkcyjnego oraz zwiększenie liczby produkowanych wytworów. Stosowane metody automatyzacji zapewniają realizację stałego, cyklicznego programu pracy urządzeń, osiąganą bądź to za pomocą środków mechanicznych, takich jak: zderzaki, krzywki, dźwignie, bądź też za pomocą programowanych sterowników logicznych. Ten sposób automatyzacji pozwala zwykle na niewielki zakres zmian programu produkcyjnego. W praktyce pociąga to konieczność każdorazowego, pracochłonnego przeobrażania całego systemu produkcyjnego. Niedostatek ten kompensowany jest przez zastosowanie zautomatyzowanych systemów do produkcji masowej i wielkoseryjnej. Nie odsuwa to jednak ryzyka nadprodukcji, związanego z podejmowaniem produkcji, której wielkość może przekraczać zapotrzebowanie rynku [Tymowski, 1966].

Wdrożenie elastycznych systemów wytwórczych (ESW) umożliwia skracanie czasu uruchomień nowych wytworów oraz przyspieszenie realizacji zamówień. ESW nazywamy komputerowo zintegrowany zespół numerycznie sterowanych maszyn, urządzeń manipulacyjnych i transportowych, zautomatyzowanych urządzeń pomiarowych itd. [Santarek,

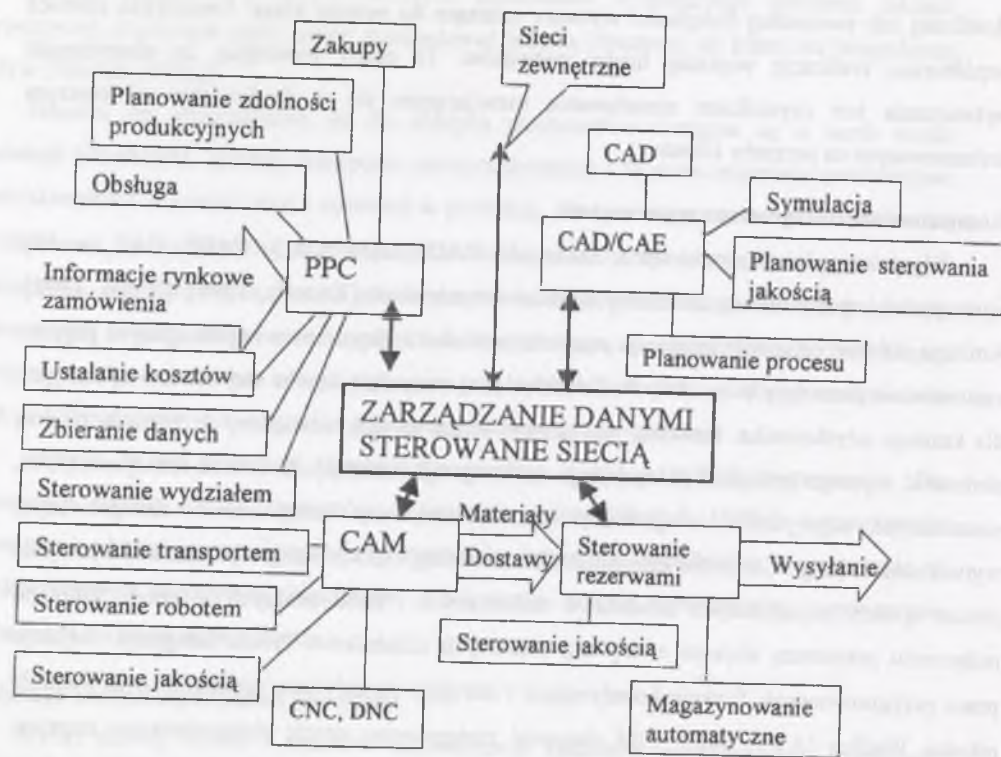
Strzelczak, 1989]. Charakteryzuje się on krótkim czasem przezbrajania i może przetwarzać w określonej lub swobodnej kolejności wytwory należące do pewnej klasy. Umożliwia również współbieżną realizację większej liczby wytworów. Te cechy powodują, że elastyczność wytwarzania jest czynnikiem nieuchronnie rozwijającym się w środowisku wytwórczym zorientowanym na potrzeby klienta.

Komputerowo zintegrowane wytwarzanie

Klasy narzędzi programowych, takie jak: CAD, CAM, CAQ, CAPP, CAE, zostały opracowane i stosowane do oddzielnych zadań inżynierskich [Knosala, 1998], [Weiss, 1998]. Ambicją stała się całkowita integracja wszystkich działań komputerowo wspomaganym poprzez zastosowanie centralnej bazy- danych. Zakłada się, że wszystkie dane w niej zawarte są dostępne dla każdego użytkownika. Problem, jaki ma być w ten sposób rozwiązany ze względu na swą złożoność wymaga podejścia polegającego na integracji istniejących, dobrze funkcjonujących, niezależnych algorytmów w globalny system, nazywany komputerowo zintegrowanym wytwarzaniem (ang.: Computer Integrated Manufacturing - CIM). Integracja rozumiana jest jako proces syntezy pojedynczych składników technicznych i funkcjonalnych w całość, które po połączeniu przynoszą większe efekty niż suma tych składników. Proces integracji obejmuje prace przygotowawcze, funkcje koordynujące i sterujące przepływem produkcji* oraz kontrolę jakości. Według [AWF, 1985] CIM obejmuje zintegrowane użycie elektronicznego przetwarzania danych (EPD) we wszystkich obszarach działania przedsiębiorstwa, związanych z przygotowaniem produkcji i wytwarzaniem, tj. współdziałanie CAD, CAE, CAPP, CAM, CAQ oraz planowania i sterowania produkcją (ang.: Production Planning and Control - PPC) [Koch *et al.*, 1999]. Wspólne wykorzystanie wszystkich danych systemu EPD, zwanych bazą danych, jest warunkiem udanego zastosowania CIM. Ukoronowaniem dążeń integracyjnych wg Scheera [Scheer, 1991] miała być fizyczna realizacja CIM, prowadząca w rezultacie do utworzenia „fabryki przyszłości” (ang.: Factory of the Future). Zadania realizowane w ramach CIM można podzielić na dwa podstawowe obszary:

- funkcje organizacyjne (PPC) - zdeterminowane przez zamówienie,
- funkcje techniczne (CAx [Chlebus, 1998], [Chlebus, 1999]) - zdeterminowane przez opisy produktu i zasobów produkcyjnych.

* Przepływ produkcji jest to przepływ materiałów i wyrobów w przedsiębiorstwie, który odbywa się w ramach realizacji procesu produkcyjnego. Sterowanie przepływem produkcji jest to funkcja kierowania i regulacji przepływem materiałów (American Production and Inventory Control Society, za [Wróblewski, 1993]).



Rys. 1.2. Integracja funkcjonalna w „fabryce przyszłości” [Scheer, 1991]

Fig. 1.2. Functional integration in the „Factory of the Future” [Scheer, 1991]

CIM obejmuje integrację procesu i integrację danych, które są możliwe poprzez niezależność aplikacyjną organizacji danych. Oznacza to, że struktury danych są projektowane niezależnie od indywidualnych aplikacji. Powiązanie łańcucha procesów poprzez system informacyjny umożliwi szybką interwencję w przypadku odchylenia sterowanego procesu. Ograniczenia związane z realizacją zadań integracyjnych wynikają głównie z nieopłacalności lub niemożności całościowego rozwiązywania tego zagadnienia, którego głównym składnikiem jest wspólna, zunifikowana baza danych, dostępna dla wszystkich użytkowników (pracowników działów projektowych, konstrukcyjnych, planowania produkcji i sterowania, wydziałów bezpośrednio produkcyjnych i innych), spełniająca jednocześnie oczekiwania każdego z nich.

Wobec braku technicznych możliwości realizacji przedstawionej koncepcji CIM do chwili obecnej nie utworzono systemu zintegrowanego poprzez scentralizowaną bazę danych.

Pojawiła się więc inna koncepcja CIM, zgodnie z którą celem CIM jest dążenie do integracji logistycznych funkcji przedsiębiorstwa, takich jak: transport, magazynowanie oraz harmonogramowanie. Integracja obejmuje również problematykę zarządzania operacjami występującymi w dyskretnych procesach. Charakter operacji jest bardzo zróżnicowany, obejmuje procesy:

- obróbki i montażu,
- transportu i składowania,
- planowania i kontroli,
- usuwania odpadów i zasilania energetycznego,
- przetwarzania i przesyłania danych.

Wspólną cechą procesów jest ich dyskretny charakter oraz związki określające następstwo operacji i związki określające współdziałanie różnych procesów (np. wzajemne wykluczanie się operacji produkcyjnych i operacji remontu realizowanych na danym zasobie [Skołod, 1997b]).

Inżynieria współbieżna

Potrzeba przyspieszenia wejścia na rynek nowego produktu oraz poszukiwanie metod działania umożliwiających szybką odpowiedź klientowi odnośnie do możliwości wytwórczych przyczyniły się do utworzenia metodologii zwanej inżynierią współbieżną (ang.: Concurrent Engineering - CE) [Syam, Menon, 1994], [Tian *et al.*, 1998], [Boucher, Cauvin, Kieffer, 1998], [Skołod, Gattner, 1998].

CE polega na integracji działań i danych realizowanych głównie w ramach technicznego i organizacyjnego przygotowania produkcji, to jest na konstruowaniu nowego wytworu, zaprojektowaniu procesu technologicznego, przygotowaniu planu i harmonogramu. CE jest wynikiem nowej orientacji w rozwoju produktu, wyrażającej się szczególnym nastawieniem na spełnienie potrzeb konsumenta [Skołod, 1998d]. Podstawowe różnice pomiędzy CE a metodami tradycyjnymi przedstawiono w tabeli 1.1.

CE jest oparta na trzech podstawowych strategiach: równoległym działaniu, standaryzacji i integracji, przy czym:

1. Równoległe wykonywanie zadań powoduje zmniejszenie czasu wykorzystanego na projektowanie produktu. Jest to przyczyną skomplikowania zagadnienia z powodu niepełnej informacji, wynikającej ze współbieżnej realizacji zadań.
2. Standaryzacja polega na ujednoczeniu różnych aspektów w procesie rozwoju produktu.

3. Integracja bazuje przede wszystkim na prowadzeniu prac w interdyscyplinarnych zespołach, co usprawnia proces projektowania przy jednoczesnym uwzględnianiu zmian wewnątrz komórki, której dotyczy oraz zmian otoczenia.

Tabela 1.1

Porównanie podejścia tradycyjnego i projektowania współbieżnego

Metody tradycyjne	CE
• funkcjonalny podział zadań	• wielofunkcyjne wypełnianie zadań
• ciągły proces rozwoju produktu i procesu	• równoległe rozwijanie procesu i produktu
• dostawca konkurentem w grze na rynku	• dostawca partnerem we współpracy
• modyfikowanie produktu	• współtworzenie produktu przez klienta
• koszt najważniejszym wskaźnikiem kontroli	• czas najważniejszym wskaźnikiem kontroli
• niezdeterminowane reakcje producenta na ruchy na rynku	• uzależnienie reakcji producenta od trendów rynkowych

Wytwarzanie w przedsiębiorstwie wirtualnym

Dalsze poszukiwania sposobów wytwarzania, uwzględniających szybki rozwój produktu, skracający się cykl życia oraz podwyższające się standardy jakości doprowadziły do wytwarzania w przedsiębiorstwie wirtualnym (ang.: Virtual Manufacturing - VM) [Kazuaki *et al.*, 1996], [Lee, Noh, 1997], które jest kolejnym etapem rozwoju CIM.

VM bazuje na utworzeniu jednostki produkcyjnej poprzez wybór wymaganych zasobów z różnych przedsiębiorstw i na syntezie tych zasobów poprzez połączenia sieciowe. Przedsiębiorstwa pracują, realizując wspólne zlecenia, w celu spełnienia oczekiwań rynku [Papaioannou, Edwards, 1998], [Gornev *et al.*, 1997]. Według Masahiko i Iwata [Masahiko, Iwata, 1993] przedsiębiorstwo takie jest wysoko zintegrowane, współdziałające i współewoluujące i jest zorientowane na klienta. Wytwarzanie w przedsiębiorstwie wirtualnym nazywane jest również wytwarzaniem wyobrażonym lub sztucznym. Jest uważane za zaawansowaną i efektywną formę organizacji i zarządzania nowoczesnego przedsiębiorstwa, najlepszego w danych warunkach ekonomicznych i technicznych. Rozwój VM zmierza do wielomiejscowego, wieloaspektowego przedsiębiorstwa, zawierającego transakcje pomiędzy producentem, klientem, dostawcą i podwykonawcą. Wymaga tym samym integracji bardzo zróżnicowanych informacji, aplikacji i procesów [Teixeira, Makatsoris, Besant, 1997] oraz wielodyscyplinarnego, autonomicznego zespołu. Elementy takiego systemu wytwórczego są geograficznie rozproszone i dlatego mankamentem jest sterowanie nimi. VM sprowadza się więc

do rozpatrywania problemów logistyki przedsiębiorstwa. Zagadnienia te są szczególnie istotne w sytuacji rozproszenia zasobów systemu wytwórczego.

Wirtualny model przedsiębiorstwa może być wykorzystywany do badań symulacyjnych (ang.: Virtual Enterprise - VE) [Goto, Kimura, Asamori, 1997]. Umożliwia badanie funkcjonowania zaprojektowanego procesu wytwórczego. Do prowadzenia badań symulacyjnych stosowane są algorytmy ewolucyjne, pozwalające na systematyczne poszukiwanie rozwiązania najlepszego z możliwych [Westkamper, Freese, 1998]. Istotą tego podejścia jest realistyczne odzwierciedlenie procesu wytwórczego, co daje możliwość bezpośredniej interwencji w jego przebieg, natomiast niedogodnością i wadą tego podejścia są konieczność budowy skomplikowanego modelu systemu oraz prowadzenie czasochłonnych badań symulacyjnych, nie gwarantujących otrzymania rozwiązania optymalnego [Iwata *et al.*, 1995]. Każda zmiana zlecenia, awaria maszyny, awaria systemu transportu czy ograniczenie pojemności magazynowych wymaga pracochłonnej budowy nowego modelu systemu.

Biologiczny i holoniczny modele wytwarzania

Rezygnację ze scentralizowanego podejścia do integracji wytwarzania, jaką proponował Scheer w [Scheer, 1991], prezentuje biologiczny model wytwarzania (ang.: Biological Manufacturing - BM). Charakteryzuje się on ukierunkowaniem na dynamiczne adaptowanie się do niedeterministycznych zmian zachodzących w systemie i jego otoczeniu. Inspiracją biologicznego modelu wytwarzania jest biologia, a ściślej: samorozwój, samoorganizacja i ewolucja. BM jest zorientowane na produkt postrzegany jako organizm żyjący w środowisku. Produkt współzawodniczy z innymi w sensie kształtu, funkcjonalności lub innych cech [Vaario, Ueda, 1996], [Gattner, Kłos, Banaszak, 1997], [Ueda, 1997]. Uzyskanie globalnej struktury jako rezultatu lokalnego procesu nazywamy samoorganizacją, co jest podstawową ideą biologicznego wytwarzania. BM w środowisku produkcyjnym dotyczy różnych płaszczyzn, takich jak:

- samoorganizujący się wydział produkcyjny,
- harmonogramowanie dynamiczne,
- dostosowanie się do wymagań produktu,
- dostosowanie się do zmian produktu.

Zbliżony do BM jest holoniczny model wytwarzania (ang.: Holonic Manufacturing - HM), bazujący na organizacji socjalnej i żyjących w niej organizmach. HM reprezentuje dążenia inżynierskie do rozwoju i działania autonomicznych zdecentralizowanych i współdziałających systemów wytwórczych [Tönshoff, Winkler, Ehrmann, 1998]. Elementy systemu wytwórczego oraz produkty są holonami, to jest elementami, które mają zarówno autonomię, jak i możliwość

kooperacji. Holon może podejmować decyzje poprzez wzajemne uzgodnienia i działania koordynujące z innymi. Posiada dane niezbędne do podejmowania decyzji, działania oraz komunikowania się z innymi holonami. Komunikację umożliwiają algorytmy i procedury pozwalające na prowadzenie negocjacji i wykonywanie wspólnych działań [Kawamura, 1997], [Valckenaers *et al.*, 1998], [Fischer, 1998], [Bajic, Chaxel, 1997]. System holonów, współpracujących w określonym celu, tworzy holarchy^{*}. Holarchy definiują podstawowe reguły współpracy holonów i ograniczają ich autonomię. Analogiczne do nich są agenty. Agent jest podsystemem, który wykonuje, bazując na wiedzy i preferencjach, swój lokalnie zdefiniowany cel [Müller, 1998]. Agenty (minimum dwa) tworzą systemy wieloagentowe.

Przedstawione koncepcje wytwarzania, a w szczególności wytwarzanie wirtualne, biologiczny i holoniczny modele wytwarzania zauważalne są w produkcji złożonych wyrobów, takich jak: samochody, komputery, sprzęt AGD. Gotowe produkty są zbudowane z zespołów produkowanych w niezależnych od siebie przedsiębiorstwach, będących dostawcami elementów składowych, produkujących je dla wielu odbiorców i dostarczających je w zależności od aktualnych potrzeb każdego z nich.

Koncepcje te powstały w wyniku dążenia do zapewnienia jakości obsługi oczekiwanej przez klienta, tj. dotrzymania terminów i jakości wytworów. W tym samym czasie producent dąży do eliminowania wszystkiego, co nie dodaje wartości produktowi. Takie dążenie nazywane jest **odchudzonym wytwarzaniem** (ang.: Lean Production - LP). LP oznacza tyle, co szczupłe lub odchudzone podejście do produkcji lub wytwarzanie odchudzone. „Jest to produkcja, która daje coraz więcej, używając coraz mniej - mniej ludzkiego wysiłku, mniej urządzeń, mniej czasu i mniej miejsca, dążąc równocześnie do zaopatrzenia klientów dokładnie w to, co chcą” [Womack, Jones, 1996]. Polega ona na systematycznej redukcji strat we wszystkich sferach działalności przedsiębiorstwa, a więc na skróceniu czasu pracy, redukcji czasu od zamówienia do uruchomienia produkcji, obniżeniu poziomu zapasów, wzroście efektywności, a tym samym na obniżeniu kapitału obrotowego [Lee, 1998], [Prasad, 1994]. LP jest identyfikowany z sukcesem japońskiego przemysłu samochodowego, w którym pracownicy tworzą silny, zintegrowany zespół [Nowosielski, 1997]. Stosowana tam koncepcja KAIZEN oznacza zmianę (KAI) na lepsze (ZEN), czyli „stały rozwój”. Koncepcja ta jest stosowana w środowisku wytwórczym. Między innymi polega na odchodzeniu od produkcji w partiach na korzyść przepływu pojedynczych elementów [Melnik *et al.*, 1998], [Kaizen, 1999]. Podejście to

* Termin holarchy jest bezpośrednim przeniesieniem z języka angielskiego; do tej pory nie ma odpowiednika polskiego.

sprowadza się do wzrostu wykorzystania czasu na procesy twórcze i eliminowania działań nie dodających wartości produktowi. LP jest próbą spojrzenia producenta na produkt z punktu widzenia klienta, a nie tylko z poziomu swojej wewnętrznej organizacji. W wytwarzaniu odchudzonym obowiązuje reguła, polegająca na przekształcaniu klasycznego systemu produkującego partiami, z towarzyszącymi mu kolejkami, w przepływ ciągły, zależny od potrzeb klienta. Rozumiane jako eliminacja wszystkiego, co nie dodaje wartości produktowi oraz jako dążenie do eliminacji zbędnych nakładów inwestycyjnych, jest zauważalną tendencją rozwoju systemów produkcyjnych, ich organizacji i eksploatacji [Hancock, Zayko, 1998], [Liker, 1998].

Dążenie do wytwarzania w przedsiębiorstwie całkowicie zintegrowanym, spełniającym założenia Lean Manufacturing, w zakresie działań, którymi nie można sterować, to tzw. **żywotne wytwarzanie** (ang.: Agile Manufacturing- AM) [Prasad, 1994], [Maskell, 1998]. Żywotność jest wyrażana podstawowymi zasadami [Goldham, Nagel, Preiss, 1995]:

- produkcją wysokiej jakości, w małych ilościach, spełniającą oczekiwania klienta,
- gotowością na zmiany wynikające z wymagań dynamicznego rynku,
- tworzeniem partnerstwa (współpracy) pomiędzy wytwórcą i klientem.

Jest to taka koncepcja projektowania produktu i procesu wytwórczego, która nastawiona jest na uwzględnienie zmian sytuacji na rynku oraz zmiany zapotrzebowania. Dzięki elastycznej strukturze zarządzania daje możliwość rekonfiguracji wytwarzania, określając poziom dopuszczalnych zmian ze względów ekonomicznych.

Można zatem stwierdzić, że współczesne wytwarzanie zmierza do zintegrowanego ujęcia różnych w swej naturze i charakterze problemów wytwarzania. Charakteryzuje się ciągłym poszukiwaniem rozwiązań gwarantujących powodzenie przedsięwzięcia produkcyjnego.

1.2. Przedmiot i zakres pracy

Przedmiotem rozważań są systemy dyskretnych procesów przemysłowych (DPP), tworzące kompleksy operacji^{*}, uwarunkowane logicznie w czasie i przestrzeni [Kowalowski, 1984]. Współcześnie około 80% wartości produkcji całego przemysłu jest wynikiem wytwarzania właśnie w tego typu systemach. Wymagania rynku, a w szczególności: wzrastające

* Przez kompleks operacji rozumie się złożony obiekt sterowania, w którym częściami składowymi są operacje charakteryzowane czasem ich trwania, a struktura systemu jest zdeterminowana uwarunkowaniami czasowymi.

zapotrzebowanie na zróżnicowane produkty, krótkie serie produkcyjne oraz krótki czas życia produktów sprawiają, że o konkurencyjności na współczesnym rynku decyduje zdolność do szybkiego i trafnego reagowania na jego potrzeby.

Istnieje zazwyczaj pewna rezerwa, tak sprzętowa jak i funkcjonalna, której wykorzystanie stanowi o dodatkowych możliwościach wzrostu efektywności wytwarzania. Wykorzystanie tych rezerw staje się możliwe, z kolei, przy założeniu pełnej integracji dotyczącej zarówno sprzętu i oprogramowania, jak i realizowanych z ich pomocą funkcji. Osiągnięcie celu, jakim jest pełna integracja strumieni różnej natury (materiałów, informacji, energii), stanowi przedmiot intensywnie prowadzonych badań logistyki produkcji [Bacelli, 1992], [Banaszak *et al.*, 1998], [Korzeń, 1995], [Korzeń, 1999].

Łatwo zauważyć, że cel ten, jakkolwiek w ograniczonym zakresie, realizują współczesne techniki wytwarzania. Przykładowo, inżynieria współbieżna pozwala integrować różne fazy technicznego i organizacyjnego przygotowania produkcji. Z kolei wytwarzanie w wirtualnym przedsiębiorstwie umożliwia integrację potencjału geograficznie rozproszonych producentów podzespołów określonego produktu finalnego. Również koncepcja odchudzonej produkcji koncentruje działalność przedsiębiorstwa na obsłudze klienta (zlecenia produkcyjnego) poprzez integrację poszczególnych funkcji przedsiębiorstwa, dokładnie tak jak tego wymaga obsługa zlecenia.

Dążenie do integracji wyraża się zwykle jednym z dwóch wzajemnie wykluczających się celów: interes producenta oraz interes zleceniodawcy (klienta) [Koch, 1999]. Sprzeczność tych celów narzuca zorientowanie integracji bądź to na interes producenta, bądź też na korzyść klienta (np. uzyskanie maksymalnej jakości za tę samą cenę). Oznacza to między innymi występowanie dwóch strategii wytwarzania: dedykowanej (zorientowanej na) potrzebom klienta (i/lub jego zlecenia) oraz dedykowanej możliwościom producenta. Integracja potencjału producenta zorientowana na pełne wykorzystanie, związanych z tym możliwości zakładu, maksymalizuje wykorzystanie zasobów przedsiębiorstwa przy spełnieniu wszystkich wymagań klienta. Wybór tej strategii implikuje konieczność odpowiedniej selekcji przyjmowanych zleceń produkcyjnych. Każde przyjęte zlecenie (zlecenia) winno ekstremalizować wybrane wskaźniki efektywności funkcjonowania przedsiębiorstwa oraz posiadać gwarancje odpowiedniej jego obsługi. Plan produkcji powinien uwzględniać szczegóły jego realizacji, jego sterowania w warunkach jednoczesnej produkcji innych wytworów oraz istniejących ograniczeń zasobowych systemu. Metodyka umożliwiająca dokonywanie tego typu wyborów, tzn. **metodyka planowania produkcji** w dedykowanych systemach produkcji rytmicznej stanowi przedmiot niniejszej pracy.

Monografia obejmuje cztery zasadnicze części.

W rozdziale drugim scharakteryzowano fazę przygotowania produkcji oraz stosowane w tym zakresie systemy klasy MRP, wskazano ich niedostatki i wynikającą z nich potrzebę poszukiwania innego podejścia do realizacji zadań z zakresu organizacyjnego przygotowania produkcji. Szczególną uwagę zwrócono na przepływ produkcji. Omówiono techniki planowania oraz sposoby sterowania przepływem produkcji. Na podstawie przesłanek wynikających z przeprowadzonej analizy wyjaśniono pojęcie dedykowalności systemów wytwórczych. W trzecim rozdziale sformułowano cel, tezę i problem, będące przedmiotem dalszych rozważań.

W czwartym rozdziale przedstawiono modele systemu produkcyjnego i zlecenia. Zdefiniowano podstawowe pojęcia, zaproponowano wskaźniki oceny funkcjonowania systemu oraz wskaźniki oceny realizacji zlecenia. Ponadto określono warunki wystarczające, gwarantujące jakościowo dopuszczalne (wolne od blokad i zagłódzeń) funkcjonowanie systemu.

Planowanie i sterowanie przepływów produkcji jest tematem piątego rozdziału. Analizowane są w nim problemy zarówno przyjmowania pakietu zleceń do jednoczesnej realizacji w danym systemie, jak i przyjmowania dodatkowych zleceń do systemów realizujących wcześniej przyjęte zlecenia. Przedstawiona metodyka bazuje na warunkach wystarczających, sformułowanych w postaci twierdzeń i wniosków.

Prototypowanie wariantów obsługi produkcji rytmicznej jest przedmiotem rozważań rozdziału szóstego. W celu weryfikacji przedstawionego podejścia utworzono system weryfikacji zleceń (SWZ), wspomagający podejmowanie decyzji planistycznych. Działanie pakietu SWZ zweryfikowano korzystając z danych udostępnionych przez Fabrykę Reduktorów i Motoreduktorów „BEFARED” S.A. w Bielsku Białej.

Ponadto do pracy dołączono trzy dodatki. dodatek A zawiera formalizm algebry (max,+) i przykład jego zastosowania. W dodatku B zawarto opis działania pakietu SWZ. W dodatku C przedstawiono marszrutę procesów, wykaz urządzeń oraz dane wejściowe zastosowane w przeprowadzonych eksperymentach.

Znaczną część badań wykonano w ramach projektu badawczego nr 7 T07D 025 15 pt: "Metoda harmonogramowania zleceń w dedykowanych systemach wytwarzania o charakterze cyklicznym" finansowanego przez Komitet Badań Naukowych, którego autorka jest kierownikiem.

2. Analiza literatury i praktyki produkcyjnej

2.1. Przygotowanie produkcji

Eksploatację systemu wytwórczego poprzedza faza przygotowania produkcji. Decyzje podjęte w tej fazie mają istotny wpływ na realizację produkcji i jej koszty. Według prowadzonych badań 60-95% kosztów produktu jest zdeterminowanych w fazie jego projektowania [Sohlenius, 1992]. Równocześnie zauważalna jest łatwość przeprowadzania zmian przy niskich kosztach ich wprowadzania. Koszty fazy przygotowania produkcji stanowią około 17% kosztów wytwarzania. Przygotowanie produkcji jest więc etapem, który w sposób znaczący wpływa na powodzenie przedsięwzięcia produkcyjnego.

Wyróżnia się dwa obszary fazy przedprodukcyjnej: techniczne przygotowanie produkcji oraz organizacyjne przygotowanie produkcji.

2.1.1. Techniczne przygotowanie produkcji

Techniczne przygotowanie produkcji (TPP) jest kompleksem przedsięwzięć związanych z realizacją zadań uruchomienia produkcji nowych wytworów lub zmodernizowanych wytworów. Do podstawowych funkcji TPP należy konstrukcyjne i technologiczne przygotowanie produkcji.

Konstrukcyjne przygotowanie produkcji obejmuje konstruowanie wytworów, w szczególności: określanie postaci geometrycznej wytworu, wymiarów nominalnych wraz z tolerancjami, weryfikację konstrukcji pod względem wytrzymałości i kolizyjności oraz symulację zachowania konstrukcji w różnych warunkach.

Przyspieszenie realizacji całej sekwencji danego procesu wytwórczego jest możliwe dzięki szybkiemu kształtowaniu przyrostowemu, które umożliwia szybkie wykonywanie prototypów (ang.: Rapid Prototyping) oraz szybkiego wykonywania narzędzi, form i matryc (ang.: Rapid Tooling) [Oczko, 1999a] i [Oczko, 1999b]. Techniki te zazwyczaj wykorzystują metodę przyrostowego kształtowania przedmiotu punkt po punkcie lub warstwa po warstwie.

W zakres **technologicznego przygotowania produkcji** wchodzi planowanie i opracowanie procesów technologicznych, przygotowanie dokumentacji technologicznej, programowanie

procedur sterowania wykonaniem poszczególnych operacji technologicznych (opracowanie programów numerycznych na urządzenia NC) zgodnie z wyznaczonymi marszrutami.

Wielość i zróżnicowanie zadań realizowanych w ramach TPP jest powodem powszechnego stosowania narzędzi programowych, wspomagających ich realizację. Systemy komputerowego wspomaganie prac inżynierskich (ang.: Computer Aided Engineering - CAE) są stosowane na etapie tworzenia koncepcji. Przygotowanie konstrukcji wspomaganie jest przez zastosowanie systemów komputerowego wspomaganie konstruowania (ang.: Computer Aided Design - CAD). Systemy te ułatwiają ocenę różnych wariantów konstrukcyjnych wytworu. W fazie projektowania (planowania) procesów technologicznych stosowane są systemy komputerowego wspomaganie planowania procesów technologicznych (ang.: Computer Aided Process Planning - CAPP). Systemy CAPP wspomagają wybór technologii wytwarzania oraz wariantowanie procesu produkcyjnego. Ponadto ułatwiają wybór operacji i ich kolejności przy uwzględnieniu takich kryteriów oceny, jak: koszt jednostkowy, czas wytwarzania, stopień wykorzystania urządzeń technologicznych. Zastosowanie CAPP wpływa na zwiększenie wykorzystania maszyn i urządzeń oraz lepsze reagowanie na bieżące zakłócenia przebiegu procesu produkcyjnego. Prace związane z przygotowaniem szczegółowych technologii w postaci programów sterujących urządzeniami technologicznymi są współcześnie realizowane z wykorzystaniem systemów komputerowego wspomaganie wytwarzania (ang.: Computer Aided Manufacturing - CAM).

Na etapie TPP, tj. przygotowania konstrukcji, planowania procesu i technologii, występuje konieczność powtarzania danych, co powoduje coraz częstsze realizowanie zadań TPP z wykorzystaniem zintegrowanych pakietów CAD/CAE/CAPP/CAM. Tylko niektóre z zadań TPP są określane za pomocą formalnych modeli optymalizacyjnych. Większość zadań rozwiązywana jest na podstawie modeli empirycznych, łączących charakterystyki narzędzia, obrabianego przedmiotu i parametry procesu.

2.1.2. Organizacyjne przygotowanie produkcji

Celem organizacyjnego przygotowania produkcji (OPP) jest utworzenie warunków umożliwiających pełne wykorzystanie rozwiązań, jakie otrzymano w wyniku projektowania konstrukcyjnego i technologicznego. W ramach OPP określone zostają wzajemne przyporządkowania zadań produkcyjnych do istniejących zasobów i mocy produkcyjnych systemu wytwórczego. Podstawowe funkcje OPP to [Banaszak, Jampolski, 1991]:

- projektowanie struktury produkcyjnej,

- planowanie produkcji,
- harmonogramowanie produkcji.

Przez **projektowanie struktury produkcyjnej** rozumie się utworzenie sieci powiązań elementów systemu produkcyjnego w odniesieniu do danej chwili [Jackowicz, Lis, 1987]. Łączenie stanowisk w komórki odbywa się według kryterium podobieństwa technologii wykonywanej na stanowiskach (gniazdo tokarek, szlifierek itp.). Innym kryterium jest specjalizacja przedmiotowa, która polega na zamknięciu w komórce całości procesu obróbki przedmiotu. Przy projektowaniu struktury przedsiębiorstwa uwzględnia się zmiany technologiczne w korelacji z jego możliwościami produkcyjnymi. Zmiany te polegają na przystosowaniu parametrów wytwarzania do zdolności produkcyjnych stanowiska roboczego, zmianie przydziału operacji obróbki do stanowiska lub na synchronizacji minimalnych okresów powtarzalności dla poszczególnych stanowisk. Celem zmian jest zmniejszenie przerw w pracy tych stanowisk. Przy zmieniających się asortymentach, których wprowadzanie do systemu ma charakter losowy, proponuje się symulacyjne projektowanie struktur produkcyjnych. Do tego celu wykorzystywane są zazwyczaj metody symulacji oparte na technikach Monte Carlo [Jackowicz, Lis, 1987], [Filipowicz, 1996]. Metody te są czasochłonne, a ze względu na kombinatoryczny charakter rozpatrywanego problemu wymagają wstępnej selekcji badanych rozwiązań [Lis, 1976], [Sawik, 1992], [Woolsey, 1990].

Planowanie produkcji polega na określeniu struktury asortymentowej produkcji. Rodzaj i wielkość produkcji ustalane są na podstawie zapotrzebowania i możliwości produkcyjnych przedsiębiorstwa. Wielkość produkcji stanowi zwykle kompromis pomiędzy liczebnością serii produkcyjnej a długością cyklu produkcyjnego.

W trakcie planowania zostaje określony wykaz wytworów przeznaczonych do wykonania w danym okresie planistycznym wraz z podaniem wielkości i asortymentu planowanej produkcji [Banaszak, Jampolski, 1991]. Planowanie obejmuje dwa podstawowe zadania [Sawik, 1992]. Pierwsze zadanie polega na wyznaczeniu partii produkcyjnej, tj. wyborze zestawów typów wytworów, które będą równocześnie wytwarzane przez system. Zadania drugie sprowadza się do wyznaczenia obciążenia maszyn i polega na rozdziale operacji i wymaganych narzędzi pomiędzy maszyny tak, aby ustaloną partię części wykonać przy najlepszym wykorzystaniu potencjału wytwórczego systemu. Zadanie obciążenia maszyn pozwala ustalić proporcje udziału poszczególnych marszrut przepływu elementów przez system, tak aby każdą partię produkcyjną wykonać przy najlepszym wykorzystaniu potencjału wytwórczego systemu. Oprócz tych zadań planowanie obejmuje: zagadnienia grupowania maszyn, zadania rozdziału minimalnej liczby palet

pomiędzy wybrane części oraz zadania ustalenia proporcji ilościowych, w jakich wykorzystane będą wybrane typy części.

Oprogramowanie wspomagające zadania planowania powinno mieć możliwości zastosowania go do częściowo rozwiązanych zadań oraz do wyznaczania rozwiązań w czasie rzeczywistym. Do podstawowych metod matematycznych stosowanych do rozwiązywania tego typu zagadnień należy programowanie matematyczne.

Zadanie **harmonogramowania** sprowadza się do wyznaczenia optymalnych programów produkcji wytworów, obciążeń stanowisk oraz określenia niezbędnych zapasów, potrzebnych do realizacji tych programów z uwzględnieniem skali czasu.

Harmonogramowanie jest zatem zadaniem wyznaczenia rozdziału, w czasie i przestrzeni, dostępnych zasobów produkcyjnych, tak by zaspokoić zapotrzebowanie na produkowane wytwory przy najlepszym wykorzystaniu zasobów [Sawik, 1992], [Dorn, Froeschl, 1993], [Pinedo, 1995], [Suwa, Morita, Fujii, 1996], [Daniels, Kouvelis, 1995]. Tworzenie harmonogramu jest jednym z zadań logistyki obok determinowania wielkości serii, czasu pakowania i magazynowania międzyoperacyjnego [Puttman, 1991]. Problem planowania i harmonogramowania produkcji jest często podejmowany w literaturze. W pracach [Selegna, 1996], [Lazaro *et al.*, 1994] pokazano dynamiczny charakter harmonogramowania. Selegna [Selegna, 1996] analizuje ponadto konieczność integracji etapu harmonogramowania dynamicznego z etapem statycznym, utożsamianym z planowaniem produkcji, przez zastosowanie odpowiednich reguł rozstrzygania konfliktów zasobowych. Złożoność zadań harmonogramowania wymusza potrzebę budowania cząstkowych modeli optymalizacyjnych dla określonych fragmentów produkcji [Lis, 1976]. Utworzenie harmonogramu optymalnego w zadowalającym czasie jest na ogół niemożliwe ze względu na NP-trudny charakter tego problemu [Ulfsby, 1990]. Również harmonogramowanie cykliczne należy do tej klasy problemów [Sawik, 1992], [McCormick, Rao, 1994], [Dorn, Froeschl, 1993], [Camus *et al.*, 1996], [Skołud, 1999c]. W pracach [Skołud, 1996a], [Skołud, 1996b], [Karabati, Kouvelis, 1996] przedstawiono metodę rozwiązania zadań harmonogramowania z wykorzystaniem algorytmów genetycznych, a w [Skołud, Krenczyk, 1999] zastosowano do tego celu „algorytm alpinisty”. Heurystyki tworzenia użytecznego, lecz nieoptymalnego harmonogramu przedstawiono w [Chen, Su, 1995], [Vancheeswaran, Townsend, 1993].

Wpływ przyjętej metody harmonogramowania i wielkości partii produkcyjnej na czas realizacji partii przedstawiono w [Benjaafar, Sheikhzadeh, 1997]. Patterson w [Patterson, 1992] zaproponował regulowanie wielkości partii poszczególnych elementów na podstawie analizy

funkcjonowania systemu produkcyjnego przy narzuconych zadaniach do realizacji. Wielość możliwych rozwiązań zadań tego typu daje bardzo małą szansę wyboru rozwiązania optymalnego. Jeśli zadanie jest zbyt złożone, to w pierwszym kroku badań proponuje się ograniczenie zbioru przeszukiwanych rozwiązań, a w kolejnym - prowadzenie badań symulacyjnych [Gregor *et al.*, 1998]. Stosowanie tego typu badań jest dopuszczalne, gdy zysk, jaki wynika z zastosowania badań, przewyższa nakłady związane z ich prowadzeniem. Dlatego też proponowane, w obszernej literaturze, rozwiązania problemów planowania produkcji i harmonogramowania ograniczają się do rozwiązań suboptymalnych, przybliżonych lub rozwiązań bardzo szczególnych. Zwykle analizowane są zawężone zagadnienia lub uwzględniane tylko niektóre z licznych kryteriów. W praktyce zadania planowania i harmonogramowania bazują na intuicji planistów i w większości przypadków nie można ich sformalizować.

Miarą poprawności uzyskanych rozwiązań są wartości przyjmowane przez wskaźniki oceny rozwiązań w odniesieniu do danego kryterium. Większość stosowanych metod opartych jest na prostych kryteriach, które nie uwzględniają wielu ważnych elementów i nie dają zadowalających rezultatów z punktu widzenia organizacyjnego i ekonomicznego. Spośród kryteriów i związanych z nimi wskaźników oceny funkcjonowania systemu wytwórczego wyróżnia się kryteria czasowe oraz kryteria kosztowe. Do kryteriów czasowych należą minimalizacje [Sawik, 1992], [Lis, 1976]:

- czasu wykonania zbioru zadań,
- czasu przebywania zadań w systemie,
- nieterminowości realizacji zadań,
- przestoju urządzeń, przebiegów transportowych,
- nakładów czasu na czynności przygotowawcze i zakończeniowe.

Kryteria kosztowe są przeważnie typu addytywnego i obejmują koszty [Sawik, 1992]:

- przygotowania produkcji,
- produkcji i przezbrojeń,
- magazynowania,
- braku zapasów,
- przekroczenia terminów.

Do najczęściej spotykanych wskaźników oceny zaliczane są: terminowość zakończenia wykonania wytworu [Pinedo, 1995] oraz wskaźnik obciążenia zasobów, rozumiany jako zakres prac przydzielonych zasobowi, odnoszący się do jego zdolności produkcyjnej [Wróblewski 1993], [Durlik, 1996], to jest możliwości wykonania dostępnych zadań w dogodnym czasie. Pomiędzy

wskaźnikami czasowymi i kosztowymi istnieje ścisła zależność. Niedotrzymanie terminu realizacji zadań ustalonych z odbiorcą powoduje poniesienie kosztów związanych z nieterminowością (tak zwane „kary umowne”). Z kolei podwyższenie kosztów wytwarzania może być spowodowane zbędnymi nakładami poniesionymi na zapasy magazynowe. Wielorakość kryteriów i wskaźników oceny harmonogramu produkcji powoduje konieczność klasyfikacji problemów harmonogramowania. W pracach Sawika i Pinedo [Sawik, 1992], [Pinedo, 1995] zaproponowano klasyfikację problemów w zależności od typu systemu produkcyjnego, złożoności procesu oraz przyjętego kryterium.

2.1.3. Systemy klasy MRP

Początki metody planowania potrzeb materiałowych (ang.: Material Requirement Planning – MRP) sięgają lat sześćdziesiątych, kiedy Joseph A. Orlicky, jeden z jej autorów, wprowadził do praktyki pojęcie popytu niezależnego i zależnego [Szyller, 1996]. Rozwój wiedzy o zarządzaniu oraz o technice komputerowej zaowocował pojawieniem się pierwszych systemów do sterowania zapasami (ang.: Inventory Control - IC). Opierały się one na prostych metodach statystycznych, ułatwiających kontrolę stanów magazynowych. Kolejny etap ewolucji systemów zarządzania produkcją stanowi system MRP oparty na rachunku materiałowym, będący skomputeryzowanym algorytmem stosowanym do zamawiania i dalej do sterowania zamówieniami [Weiss, Dostatni, Adanowicz, 1998]. Planowanie zasobów produkcyjnych (ang.: Manufacturing Resource Planning - MRP II) jest rozwinięciem koncepcji MRP o zamkniętą pętlę sterowania, pozwalającą na modyfikowanie nadrzędnego planu produkcji na podstawie konfrontowania go z planem zdolności produkcyjnych. Jest więc rozwinięciem MRP o: planowanie zdolności wytwórczych i planowanie uruchamiania zleceń.

Innymi słowy, systemy MRP II powstały w wyniku stopniowego wzbogacania metody MRP o nowe funkcje planistyczne i kontrolne w całym ciągu logistycznym realizacji zamówienia (zaopatrzenia, produkcji i zbytu) [Ramsay, Brown, Tabibzadeh, 1990], [Weiss, Dostatni, Grajewski, 2000]. Spełniają one funkcje planowania produkcji, doboru i zakupu składników wytworów finalnych. Zadania te wcześniej należały do procesu planowania produkcji mało- i średnioseryjnej. Typowy system klasy MRP pozwala zarządzać czynnościami związanymi z przygotowaniem produkcji, jej realizacją i sprzedażą. Systemy zaliczane do klasy MRP II realizują zadania [Knosala, 1995]:

- planowania potrzeb materiałowych (MRP),

- planowania obciążeń zdolności produkcyjnych (ang.: Capacity Resource Planning - CRP), tzn. badania prawdopodobieństwa realizacji utworzonych harmonogramów poprzez przełożenie ich na obciążenia zdolności produkcyjnych,
- bieżącego sterowania produkcją (ang.: Shop Floor Control System - SFC), tzn. przydziałem zleceń do stanowisk roboczych oraz monitorowaniem stanu zaawansowania ich realizacji (funkcja ta łączy się ściśle z harmonogramami splotu) [Smalec *et al*, 1997],
- zarządzania stanowiskiem roboczym (I/OC), tzn. kontrolą wykonania planu zdolności produkcyjnych, kontrolą kolejek na stanowiskach roboczych, określaniem dostępnych zdolności produkcyjnych.

Zadania te realizowane są przez standardowe moduły:

- obsługi sprzedaży,
- obsługi zakupów,
- planowania produkcji,
- zarządzania produkcją,
- zarządzania magazynem.

Do zadań planowania produkcji należy układanie ogólnego harmonogramu produkcji. Później na jego podstawie w module zarządzania produkcją generowany jest harmonogram uwzględniający obciążenia stanowisk roboczych. Horyzont czasowy przygotowanego harmonogramu wynosi zwykle od kilku do kilkunastu dni.

Obecnie w przemyśle wytwórczym występują dwie główne tendencje: pierwsza - produkcja małych ilości wytworów w wielu odmianach oraz druga - produkcja niewielu odmian wytworów, w różnych ilościach. W obu przypadkach serie produkcyjne są małe, co pociąga za sobą konieczność skrócenia horyzontu planowania.

Implementacje systemów klasy MRP II ze względu na trudności i koszty wdrożenia obserwowane są na ogół w dużych przedsiębiorstwach. Zakres zastosowań systemów MRP II, bez rozszerzeń, dotyczy produkcji seryjnej o stałym asortymencie. Prowadzone są prace nad utworzeniem systemów klasy MRP II, zorientowanych na zarządzanie procesami wytwarzania w przedsiębiorstwach małych i średnich [Landvater, 1989], [Popończyk, 1997]. Systemy MRP II noszą cechy uniwersalności. Nie uwzględniają jednak specyfiki poszczególnych firm i zakładów, często zorganizowanych na bazie systemu sterowania rozproszonego, gdzie decyzje podejmowane są lokalnie i zachodzi potrzeba zachowania globalnych uwarunkowań przepływu produkcji (np. fabryki przemysłu maszynowego).

Systemy klasy MRP obciążone są wadami wynikającymi ze stosowania metod symulacyjnych [Kłós, Gattner, Skołod, 1997], charakteryzujących się wysoką czasochłonnością i dużą pracochłonnością ich obsługi. Szybkość przygotowywania planów w tych systemach jest za mała w stosunku do wymagań sterowania operacyjnego systemem wytwarzania. Systemy klasy MRP nie sugerują żadnych decyzji, dostarczają jedynie informacji o ograniczeniach oraz umożliwiają symulacyjne sprawdzenie skutków różnych dopuszczalnych decyzji. Wiarygodność podejmowanych decyzji ogranicza się zatem do wariantów realizacji produkcji sprawdzonych poprzez symulację. Niedostatkami systemów klasy MRP jest to, że planowanie produkcji odbywa się tylko na poziomie harmonogramu. Analiza harmonogramu jest przeprowadzana wyłącznie ze względu na: konflikty zadań na stanowiskach roboczych, koszty produkcji, obciążenia stanowisk oraz terminy wykonania zadań. Lokalne zakłócenia pojawiające się w systemie wytwórczym nie są na tym poziomie brane pod uwagę. Braki te oznaczają, że reakcja systemu MRP na ewentualne zakłócenia (między innymi związane z rozstrzygnięciem konfliktów zasobowych) realizacji przyjętego planu sprowadza się do ponownego opracowania harmonogramu. Przewycięzaniu tych niedostatków poświęca się coraz więcej uwagi. Przykładem tego są prace [Chrobot, Rakowski, 1998], [Cechowicz, 1999].

2.1.4. Podsumowanie

Przygotowanie produkcji obejmuje zasadniczo dwie fazy: techniczne przygotowanie produkcji i organizacyjne przygotowanie produkcji. Druga z wymienionych faz ma za zadanie takie przygotowanie przepływu produkcji, by zagwarantować jej wykonanie zgodnie z wynikami uzyskanymi w TPP. Złożoność problemów w zakresie OPP powoduje szybki rozwój systemów komputerowych klasy MRP, wspomagających ich rozwiązywanie. Systemy te spełniają funkcje planowania produkcji, doboru i zakupu składników wyrobów finalnych. Typowy system klasy MRP pozwala zarządzać czynnościami związanymi z przygotowaniem produkcji, jej realizacją i sprzedażą. Niedostatkami systemów tej klasy jest to, że planowanie produkcji odbywa się tylko na poziomie uruchamiania harmonogramu, bez możliwości reakcji systemu na pojawiające się zakłócenia. Implikuje to potrzebę poszukiwania innych sposobów zarządzania produkcją.

2.2. Przepływ produkcji

W latach osiemdziesiątych zapoczątkowane zostały, a w latach dziewięćdziesiątych umocniły się nowe trendy związane z rynkiem, mające wpływ na przedsiębiorstwo. Należą do nich:

- skracanie czasu życia wytworu,
- wzrost zapotrzebowania na zróżnicowane wytwory,
- wzrost zapotrzebowania na uniwersalność wytworów,
- wzrost wymagań klienta,
- ukierunkowanie producenta na spełnienie tych wymagań.

O zysku producenta decydują poniesione koszty, których wielkość jest determinowana na etapie projektowania. Głównym zadaniem tego etapu jest udzielenie odpowiedzi na pytanie: jak podjąć właściwą decyzję we wczesnych stadiach wdrażania produkcji, kiedy przyjęty koszt jest jeszcze niski.

2.2.1. Techniki planowania

Dążenia współczesnych producentów do wytwarzania odchudzonego i żywotnego stały się powodem poszukiwania takich technik planowania, które zapewnią oczekiwany sposób funkcjonowania systemu wytwórczego.

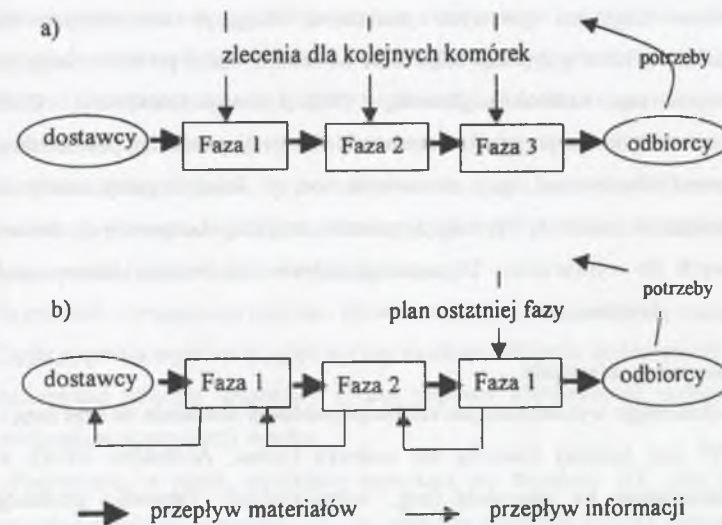
Techniki planowania są zależne od przyjętego modelu systemu i są z nim utożsamiane. W pracach [Lis, Santarek, Strzelczak, 1994], [Pinedo, 1995], [Ramsay, Brown, Tabibzadeh, 1990], [Zbroja *et al.*, 1997] wyróżniono trzy podstawowe modele planowania:

- **tłoczący** - system planowania do przodu,
- **ssący** - system planowania wstecz,
- **zorientowany na wydarzenia** - system planowania zorientowanego na wydarzenia, zgodny z założeniami produkcji dokładnie na czas (ang.: Just in Time, - JIT).

System typu tłoczącego

W systemach typu **tłoczącego** (ang.: push) [Cohen, Pyke, 1992] zlecenie realizowane jest w sposób scentralizowany. Impulsem do wytwarzania jest sygnał z działu planowania. Proces jest „przepychany” przez poszczególne stadia produkcji, a wielkości i terminy zleceń są ustalane centralnie z wyprzedzeniem (rys.2.1a). Takie postępowanie powoduje wzrost zapasów w toku

(ang.: work in process - WIP), a wydłużenie czasu przepływu nie gwarantuje terminowego zakończenia realizacji zadania. Proces jest realizowany zgodnie z harmonogramem opracowanym kolejno, w kierunku od pierwszej do ostatniej operacji. Typowymi przedstawicielami systemów, w których zastosowano technikę tłoczenia, są systemy planowania potrzeb materiałowych MRP, gdzie wielkość zlecenia jest funkcją planowanego popytu. Systemy te charakteryzuje duża wrażliwość na zakłócenia, które mogą być wynikiem zmian terminów realizacji, zmian popytu, niewykonania produkcji w zaplanowanej wielkości. W systemach tłoczących zakłócenia są wzmacniane w toku realizacji kolejnych faz produkcji.



Rys. 2.1. a) System tłoczący b) System ssący

Fig. 2.1. a) Push system b) Pull system

System typu ssącego

W systemach typu **ssącego** (ang.: pull) [Cohen, Pyke, 1992] wielkości zleceń dla kolejnych poprzedzających faz produkcji wynikają z aktualnego popytu zgłaszanego przez pozostałe komórki produkcyjne. Nie występuje zlecenie centralne. Funkcjonowanie systemu tego typu polega na przewidywaniu daty wysyłki gotowego produktu do klienta, następnie na planowaniu terminu poprzedzających operacji (rys.2.1b). Zakłócenia w systemach typu ssącego są tłumione. Łatwiejsze jest reagowanie na zmiany popytu, cykle produkcyjne są krótsze, a zapasy produkcyjne mniejsze.

Jednym z popularniejszych systemów ssących jest KANBAN, wdrożony w firmie Toyota. Wielkość i asortyment produkcji są planowane na podstawie faktycznie realizowanej sprzedaży, a nie na podstawie prognozy zapotrzebowania [Wiendahl, Vollmer, 1997]. Stacja poprzedzająca wykonuje tylko tyle produktów, na ile jest zapotrzebowanie w stacji następnej. Powstanie zapasu gotowych elementów powoduje natychmiastowe wstrzymanie produkcji. Elementem sterującym pracą systemu jest zapotrzebowanie na produkt. Regulowanie produkcji odbywa się poprzez utrzymanie pewnego poziomu zapasów w magazynach międzyoperacyjnych. Podobnym w swojej filozofii systemem, który gwarantuje utrzymanie jeszcze niższego poziomu zapasów, jest CONWIP (ang.: CONstant Work In Process). Jego strategia polega na utrzymaniu pustych magazynów w systemie, z wyjątkiem magazynu gotowych produktów. Magazyn umieszczony między stanowiskami zapełnia się tylko w przypadku zakłócenia na zasobie, który po nim występuje. Jest opróżniany po usunięciu tego zakłócenia [Bonvik, 1996]. Systemy KANBAN i CONWIP uwidaczniają swoje zalety tylko w przypadku stosowania ich przy produkcji powtarzalnej, we względnie dużych przedziałach czasu, gdy zamówienia, co do ilości i gamy asortymentów zmieniają się w niewielkim zakresie. Wymagają ponadto stabilnej kooperacji z dostawcami elementów wejściowych do wytwarzania. Dopuszczają jedynie nieznaczące zmiany odchyłeń obciążeń w porównaniu z planowanymi.

Planowanie zorientowane na zdarzenia

Tendencją współczesnego wytwarzania jest realizacja produkcji dokładnie na czas (ang.: **Just in Time - JIT**). JIT jest bardziej filozofią niż techniką [Sohal, Al-Hakim, 1994], zwane **planowaniem zorientowanym na zdarzenia** (ang.: event-oriented). Zapewnia produkcję na najwyższym poziomie w odpowiednim czasie i przy najniższych możliwych kosztach. Dąży do uzyskania doskonałości wytwarzania poprzez wyeliminowanie strat: „*zero braków, zero zapasów, zero awarii*” [Plenert, 1993], [Wu, 1988]. Przez straty w systemie wytwórczym rozumie się wszystko, co w trakcie produkcji nie dodaje wartości produktowi, a więc nie jest bezpośrednio związane z wytwarzaniem (dodatkowy czas spędzony na maszynie, czas transportu, czas operacji manipulacji, straty spowodowane wytwarzaniem wadliwych produktów).

JIT charakteryzuje:

- eliminowanie wszystkich strat, jakie pojawiają się w trakcie produkcji,
- spojrzenie na produkt i przewidywanie przyszłych potrzeb i wymagań co do czasu i ilości, co z kolei wiąże się z wykorzystaniem wyników badań rynku,

- prowadzenie produkcji w trybie ssącym, co umożliwi wyeliminowanie zapasów magazynowych, zarówno surowców, jak i gotowych produktów,
- dokładne przewidywanie terminów zakupów koniecznych do wykonania zaplanowanej ilości produktu na ściśle określony termin, wyznaczony przez klienta lub wynikający z badań rynku.

Schollaert w [Schollaert, 1994] przedstawił zasady, które umożliwiają osiągnięcie pełnej realizacji filozofii JIT:

1. Utrzymanie nieprzerwanego przepływu produkcji. Nadmierne zapasy pozbawiają przedsiębiorstwo zasobów finansowych, które mogą być wykorzystane bardziej produktywnie. System jest determinowany przez zapotrzebowanie pochodzące bezpośrednio od klienta.
2. Upraszczanie systemu produkcji poprzez zastosowanie bardziej uniwersalnych urządzeń lub urządzeń prostszych, które łatwiej i szybciej mogą być przezbrajane. Unikanie inwestycji w złożone skomputeryzowane systemy organizacyjne, dostarczające materiałów, które powodują konieczność generowania skomplikowanych umów określających warunki dostaw. Takie rozmieszczanie stanowisk, by produkcja w toku mogła być transportowana zgodnie z procesem produkcyjnym wytworu. Organizowanie zakupów w trybie dostaw na żądanie.
3. Poprawa efektywności systemu wytwórczego.
4. Utrzymanie wymaganego poziomu jakości na każdym stanowisku.
5. Ciągła poprawa organizacji, gdyż nie jest możliwe całkowite uniknięcie strat w systemie. Jest to realizowane poprzez stopniowy proces poprawy efektywności, redukcję liczby braków i synchronizację produkcji w toku.

Problemem, z jakim najczęściej spotykają się stosujący JIT, jest synchronizacja pracy kooperantów (zarówno wewnątrz jak i na zewnątrz przedsiębiorstwa), którzy muszą przestrzegać wymagań systemu JIT [Pun, Chin, Wong, 1998].

Koncepcją sterowania zbieżną z JIT jest teoria ograniczeń (ang.: **Theory of Constraints - TOC**) [Goldratt, Cox, 1987]. Zgodnie z TOC każdy system posiada przynajmniej jedno ograniczenie, powodujące, że system nie jest doskonały [Rizzo, 1997]. Zasoby stanowiące wąskie gardło w systemie (zasoby o największym wykorzystaniu) są jedynymi, które nie są w stanie przyjąć innych zadań. Powoduje to, że w celu zwiększenia efektywności systemu zamiast unikania wąskich gardeł dąży się do uzyskania jak największej ich liczby. O kluczowej roli wąskich gardeł w swoich pracach pisali [Lundrigan, 1986], [Hendry, Kingsman, 1989], [Coughlan, Darlington, 1993], [Lee, Plenert, 1993], [Spoede, Henke, Umble, 1994], [Harrison, Lewis, 1996], [Spencer, 1994], [Hurlay, Kadipasaoglu, 1998]. Wykrywanie i wykorzystywanie ograniczeń w systemie prowadzi

się do synchronizacji pracy zasobów krytycznych i niekrytycznych. Zasoby niekrytyczne pracują na potrzeby zasobów krytycznych. Autorzy pracy [Feather, Cross, 1988] wykazali, że przepływ produkcji determinuje relacje pomiędzy czasami realizacji operacji na zasobach. Współbieżność procesów oraz zróżnicowane wielkości serii powodują, że wąskie gardła ciągle się zmieniają, a proces jest regulowany (synchronizowany) według nich [Schragenheim, Ronen, 1990], [Lazaro *et al.*, 1994], [Hurlay, Kadipasaoglu, 1998]. Pojawianie się wąskich gardeł i ich liczba w systemie zależy od wielkości partii produkcyjnych [Patterson, 1992].

Na synchronizacyjnej roli zasobów krytycznych opiera się technika optymalnej produkcji (ang.: **Optimal Production Technique - OPT**), zwana też zsynchronizowanym wytwarzaniem (ang.: **Synchronised Manufacturing**). OPT polega na balansowaniu (równoważeniu) przepływów, a nie obciążeń, w systemie produkcyjnym [Wilson, 1988]. Efektywność systemu, określana współczynnikiem wykorzystania zasobów przez procesy w okresie trwania jednego cyklu, jest tym większa, im większa jest liczba wąskich gardeł w systemie. Osiąga ona wartość maksymalną, gdy wszystkie zasoby w systemie są zasobami krytycznymi. W pracach [Feather, Cross, 1988], [Lundrigan, 1986] przedstawione zostały zasady OPT:

1. System charakteryzuje balansowanie przepływu, a nie zwiększanie wydajności.
2. Poziom wykorzystania zasobów niekrytycznych jest zależny od zasobów krytycznych.
3. Zwiększenie wydajności przed wąskim gardłem nie zwiększa wydajności systemu.
4. Godzina stracona na zasobie krytycznym jest godziną straconą dla całego systemu.
5. Godzina zaoszczędzona na zasobie niekrytycznym jest tylko złudzeniem.
6. Tworzenie kolejki przed zasobem krytycznym nie zwiększa wydajności systemu.
7. Partia transferowa nie zawsze musi odpowiadać partii produkcyjnej.
8. Partie produkcyjne muszą być zmienne, nie stałe.
9. Harmonogram musi być ustalany przy uwzględnieniu wszystkich jednocześnie występujących ograniczeń.

Technice OPT poświęcono wiele miejsca w literaturze. Spencer w [Spencer, 1994] analizuje zagadnienie wyznaczania optymalnego czasu cyklu w zależności od ograniczeń finansowych i proponuje szereg metod zapewniających wzrost wykorzystania zasobów. W pracach [Skołud, Gattner, Kłós, 1997], [Szymański, Skołud, 1998], [Skołud, 1997a], [Skołud, 1997c], [Skołud, 1997e], [Skołud, 1998e] podjęto problem sterowania wąskimi gardłami w systemach produkcji rytmicznej. Autorzy określają warunki wystarczające na pojemności magazynów międzyoperacyjnych lub magazynu centralnego i dobór reguł rozstrzygnięcia konfliktów

zasobowych, zapewniających lokalną i globalną żywotność. Ponadto proponują procedurę harmonogramowania systemów produkcji rytmicznej. Z kolei autorzy pracy [Powell, Pyke, 1996] zajmują się optymalnym rozmieszczeniem i określeniem pojemności magazynów w niezbilansowanych liniach produkcyjnych z wąskim gardłem. Wykazali również, że optymalne rozmieszczenie magazynów międzyoperacyjnych zależy od pozycji „wąskiego gardła” w linii produkcyjnej oraz dostępnych pojemności magazynów. Według Cooka [Cook, 1994] TOC pozwala na uzyskanie produkcji na czas (jak w JIT) przy jednoczesnym ograniczeniu zapasów w toku.

JIT i OPT mają wspólny cel, którym jest zapewnienie zgodności między zapotrzebowaniem a produkcją [Ptak, 1991]. JIT kładzie szczególny nacisk na eliminowanie strat i utrzymanie wszelkich zapasów produkcyjnych na minimalnym poziomie. OPT skupia się na bilansowaniu przepływów, skracaniu cykli produkcyjnych i zapewnieniu terminowości realizacji zleceń.

2.2.2. Sterowanie przepływem produkcji

Zagadnienia związane ze sterowaniem przepływem produkcji w systemach procesów współbieżnych były wielokrotnie poruszane w literaturze, w szczególności w [Banaszak, Krogh, 1990], [Cho, Kumaran, Wysk, 1995], [Lis, Santarek, Strzelczak, 1994], [Upton, 1992].

W sterowaniu dyskretnymi procesami produkcyjnymi rozróżnia się koncepcje sterowania zorientowanego zadaniowo oraz sterowania zorientowanego zasobowo [Silver, Peterson, 1985].

Sterowanie zorientowane zadaniowo (materiałowo) polega na tym, że poza decyzjami o wielkościach i terminach realizacji zleceń podejmuje się decyzje o przydziale całych marszrut do zleceń, a nie o przydziale jednostek organizacyjnych i zasobów do zadań składających się na te zlecenia. Podejście to jest charakterystyczne dla produkcji jednostkowej typu projekt oraz dla produkcji seryjnej realizowanej w liniach produkcyjnych. Tego typu sterowanie wymaga odrębnego zlecenia na każdą sztukę produktu finalnego w przypadku produkcji jednostkowej albo stałego zlecenia na wyroby z linii.

Sterowanie zorientowane zasobowo polega na przydziale zadań do odpowiednio wyposażonych jednostek organizacyjnych i jest charakterystyczne dla produkcji wielosortymentowej, jaka jest realizowana w większości przedsiębiorstw przemysłu mechanicznego oraz w ESW. Sterowanie produkcją zorientowane zasobowo charakteryzuje się tzw. wytwarzaniem synchronicznym. Na poziomie wewnątrzkomórkowego sterowania przepływem materiałów do synchronizacji poszczególnych procesów współbieżnych służą lokalne algorytmy sterowania obciążeniem stanowisk roboczych.

W pracy [Zaborowski, 1992] przedstawiono projekt metody zasobowo zorientowanego sterowania produkcją, zwanego **sterowaniem nadążnym**.

Cechuje ją:

- hierarchiczna struktura funkcjonalna systemu sterowania, obejmująca warstwy selekcji, przetwarzania zamówień klientów, planowania operacyjnego, planowania wykonawczego oraz sterowania przepływem elementów wewnątrz komórki produkcyjnej,
- bieżąca ewidencja zaległości w nadążaniu decyzji poszczególnych warstw bezpośrednio wyższych i w wykorzystaniu tych zaległości jako źródeł odpowiednich sprzężeń zwrotnych,
- działanie warstwy planowania wykonawczego na podstawie algorytmu nadążnego produkcji.

W metodzie nadążnego sterowania produkcją zlecenia wykonawcze nie nadążają bezpośrednio za nadrzędnym harmonogramem produkcji, lecz za planami operacyjnymi lub roboczymi, które są wynikiem działania pośrednich warstw systemu sterowania.

Rozróżnia się dwa zasadnicze sposoby sterowania przebiegiem procesów współbieżnych: sterowanie centralne, z odmianą, jaką jest sterowanie hierarchiczne, oraz sterowanie zdecentralizowane (rozproszone). Pozorny porządek, panujący w warunkach sterowania centralnego, jest jednym z motywów rozwoju systemów scentralizowanych. W systemach ze **sterowaniem centralnym** koordynacja przepływu produkcji jest realizowana przez komputer centralny, który odpowiada za wykonanie następujących funkcji [Lis, Santarek, Strzelczak, 1994], [Upton, 1992], [Skołud, 1995], [Skołud, 1996c]:

- harmonogramowanie zadań na poszczególnych zasobach,
- wysyłanie instrukcji dla automatycznego systemu transportu,
- przesyłanie programów obróbki technologicznej do zasobów.

Program sterujący przebiegiem procesów obejmuje wzajemne oddziaływania w czasie rzeczywistym dużej ilości drogiego sprzętu oraz skomplikowanych procedur obsługi. Wraz ze wzrostem złożoności oprogramowania maleje elastyczność systemów wytwórczych, stanowiąca największy atut systemów ESW, przy wysokich kosztach ich wdrażania. W celu uproszczenia algorytmów i procedur systemów sterowanych centralnie w wielu z nich stosuje się tzw. hierarchiczny system sterowania [Upton, 1992], [Lis, Santarek, Strzelczak, 1994]. Scentralizowane planowanie znajduje zastosowanie tylko w małych przedsiębiorstwach, gdzie możliwa jest kontrola wszystkich informacji [Sorman, 1993]. Sterowanie scentralizowane nie zapewnia ponadto wysokiej

odporności na zakłócenia przy sporządzaniu harmonogramów i podczas sterowania, co jest wymogiem stawianym współczesnemu przedsiębiorstwu.

W ciągu ostatnich lat wzrosło zainteresowanie implementacją w systemach wytwarzania metod sterowania rozproszonego [Perkins, Humes, Kumar, 1994], [Upton, 1991], [Cyklis, Zając, 1998]. W opracowaniach naukowych proponowane są liczne koncepcje systemów sterowania produkcją tego typu.

Sterowanie rozproszone jest charakterystyczne między innymi dla koncepcji wytwarzania biologicznego i holonicznego. Systemy sterowania rozproszonego charakteryzują się decentralizacją podejmowanych decyzji [Hatano, Nishijama, Tamura, 1997]. W literaturze niezależnie sterowane obiekty nazywane są agentami inteligentnymi [Friedrich, Rogalla, Dillmann, 1998], [Fischer, 1998], [Bastos, Oliveira, Oliveira, 1998]. Agent jest inteligentną aplikacją, która potrafi wyszukiwać i analizować informacje [Machlis, 1999]. Informacje lokalne, dotyczące wyłącznie wewnętrznego funkcjonowania procesu, mają wpływ na jego funkcjonowanie w środowisku współpracujących procesów. Poszczególne zasoby w gniazdach oraz realizowane w nich procesy są traktowane jak indywidualności systemu (agenty). Systemy produkcyjne ze sterowaniem rozproszonym doskonale radzą sobie z nagłymi zmianami planu produkcji, zróżnicowanymi potrzebami klientów i automatyczną rekonfiguracją w przypadku awarii. Sterowanie takim systemem nie wymaga centralnego komputera. Zasoby są wyposażone w procesory [Cho, Smith, Wysk, 1997], [Cyklis, Zając, 1998], które określają kolejność wykonywania procesów. Podejście zdecentralizowane pozwala na samosynchronizujące się zachowanie systemu.

Samosynchronizacja następuje w sytuacji ustąpienia niepożądanych, wcześniej nie przewidywanych zakłóceń, takich jak: awarie, braki dostaw, itp. [McCormick, Rao, 1994], [Wiendhal, Ahrens, 1995], [Banaszak, Jędrzejek, 1993], [Skołud, 1997b], [Skołud, 1997d]. Procedurę kształtowania harmonogramów rozproszonych w przypadku rzeczywistego harmonogramowania zaproponowano w [Daniels, Kouvelis, 1995], wskazując na konieczność aplikacji takiego podejścia. W pracy [Upton, 1992] autor opisuje strukturę rozproszonego sterowania ESW, w której produkt może ciągle uczyć się systemu. Takie rozwiązanie umożliwia zmianę ilości zasobów bez wpływu na system jako całość.

Odmienne podejście do sterowania rozproszonego zaproponowano w [Skołud, Gattner, Kłos, 1998b], [Skołud, 1997d]. Bazuje ono na lokalnych regułach wyboru priorytetu i uwzględnia synchronizującą rolę wąskich gardeł systemu. Reguły wyboru priorytetu spełniają funkcje negocjacyjne, określające kolejność dostępu procesów do poszczególnych zasobów.

2.2.3. Podsumowanie

Rozwój nowoczesnych systemów wytwarzania wkracza w fazę, w której jedynie zintegrowane ujęcie różnych w swej naturze i charakterze problemów wytwarzania daje szansę budowy konkurencyjnych systemów produkcyjnych.

Istnieje zatem potrzeba logistycznego ujęcia problemów występujących na styku projektowania systemów oraz planowania i sterowania produkcją. Skłania do tego fakt przesunięcia punktu ciężkości z dążenia do maksymalnego wykorzystania dysponowanych zdolności produkcyjnych na rzecz dążenia do zapewnienia ciągłości przepływów, skracania cykli produkcyjnych i dotrzymywania terminowości realizacji zleceń.

Za zgodność realizacji zleceń, dotrzymanie terminów, wielkości i kosztów produkcji odpowiada system planowania i sterowania produkcją. Rozwój technologii wytwarzania i technologii informatycznych powoduje, że w tej dziedzinie obserwuje się tendencję do odchodzenia od rozwiązań scentralizowanych na rzecz systemów rozproszonych. Sterowanie w systemach rozproszonych polega na zadaniu zbioru reguł decyzyjnych, które lokalnie determinują sposób dostępu procesów do zasobów lub wzajemne oddziaływanie podsystemów składowych.

W proponowanym dalej podejściu przyjęto zasobowo zorientowane sterowanie realizacją zleceń. Elementem synchronizującym przydział zadań do zasobów są lokalne reguły wyboru priorytetu, a to z kolei implikuje fakt sterowania rozproszonego.

2.3. Optymalizacja jednoczesnej wieloasortymentowej produkcji rytmicznej

Nieustanne poszukiwania konkurencyjnych metod wytwarzania potwierdzają fakt, że do tej pory nie opracowano strategii uniwersalnej, sprawdzającej się we wszystkich warunkach produkcyjnych. Powstające techniki zorientowane są na współzawodnictwo firm poprzez minimalizację strat (odchudzenie) związanych z niskim poziomem wykorzystania zasobów, zapasami produkcji w toku oraz kosztami magazynowania. Jednocześnie są one odzwierciedleniem dążenia producenta do zwiększania zysku, a nie czystej satysfakcji z faktu wytwarzania. O konkurencyjności w znacznym stopniu decyduje umiejętność szybkiej oceny potrzeb rynku oraz reakcji na te potrzeby. Na współczesnym rynku konsumenta zauważalne jest, iż odbiorców często

nie interesuje najkrótszy możliwy termin dostawy gotowego wytworu ani przedział czasowy, w którym dostawa może nastąpić. Na ogół konsument jest zainteresowany precyzyjnie określonym terminem realizacji zlecenia. Ma to szczególne znaczenie dla produkcji realizowanej w ESW. Im decyzja podejmowana jest szybciej, tym bardziej konkurencyjny jest producent.

Oznacza to, że podstawowym celem planowania produkcji w wyżej omawianym kontekście jest bilans środków i możliwości systemu. Innymi słowy, z jednej strony parametry zasobów systemu (maszyn, magazynów, środków transportu itp.), takie jak pojemność, wydajność, muszą gwarantować terminowe zakończenie zlecenia, z drugiej zaś strony organizacja przepływów produkcji, sposób sterowania muszą gwarantować niezakłócone wykorzystanie zasobów systemu. Pierwszy z wymienionych czynników jest warunkiem koniecznym, a drugi wystarczającym. Spełnienie tych warunków stanowi gwarancję terminowej realizacji zlecenia.

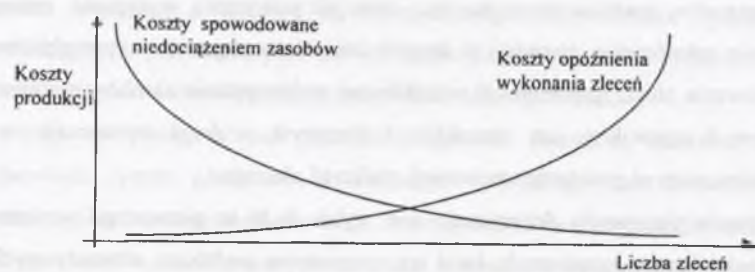
Tak więc w procesie planowania dokonywany jest wybór bądź to pierwszego wariantu przebiegu produkcji spełniającego ograniczenia, bądź też wyznaczenie podzbioru alternatywnych rozwiązań dopuszczalnych, spośród których na podstawie arbitralnie przyjętego dodatkowego kryterium, wybierany jest wariant najlepszy.

Kombinatoryczny charakter zagadnienia (tzw. eksplozja kombinatoryczna wariantów rozwiązań) uniemożliwia, w praktyce, znalezienie rozwiązania optymalnego. Tak jak pierwsze dopuszczalne (terminowe) z uzyskanych rozwiązań nie musi być optymalne, tak podzbiór alternatywnych rozwiązań nie musi wyczerpywać zbioru wszystkich rozwiązań dopuszczalnych.

Spośród rozwijających się technik programowania matematycznego, symulacji komputerowej i metod sztucznej inteligencji największą popularność zdobyły metody symulacji komputerowej [Chang, 1994], [Gregor *et al.*, 1998]. Do symulacji wykorzystywane są na przykład pakiety oprogramowania Taylor II, VRT, Arena. Wiedza, umożliwiająca ocenę uzyskanego rozwiązania, jest zazwyczaj zdobywana empirycznie. Niedostatkami badań symulacyjnych jest długi czas trwania tego typu badań oraz ich koszt. Wiarygodność decyzji bazujących na badaniach symulacyjnych w praktyce ogranicza się do uprzednio sprawdzonych wariantów. Badania symulacyjne umożliwiają jedynie odpowiedź na pytanie „*Co się stanie, gdy?*”. Ich ideę najlepiej wyraża fraza: „wykonuj tak długo, aż będzie dobrze” (ang.: re-do until right). W warunkach ostrej konkurencji liczy się zdolność do podejmowania szybkich i trafnych decyzji, gdyż błędna ocena może prowadzić nie tylko do wymiernych strat finansowych, ale również do utraty klientów, a przez to potencjalnych korzyści. Dlatego też producenta nurtuje pytanie „*Czy to, co mam na myśli,*

jest akceptowalne?”, co odpowiada założeniu „wykonuj dobrze za pierwszym razem” (ang.: do right first time).

Łatwo zauważyć, że interesy klienta i wytwórcy są na ogół rozbieżne. Przy rosnącej liczbie przyjętych zleceń wzrastają straty wynikające z opóźnień ich wykonania. Z kolei przyjęcie małej liczby zleceń zwiększa szansę ich terminowego wykonania, powoduje jednak straty wynikłe z niedociążenia systemu (rys. 2.2).



Rys. 2.2. Określenie optymalnej liczby zleceń

Fig. 2.2. Selection of optimal number of production orders

Podejmowanie decyzji przez producenta o przyjęciu zleceń do realizacji w danym systemie produkcyjnym jest procesem sprawdzania wielu ograniczeń. Przykładowe pytania brzmią:

- Jakie zlecenie, o jakiej charakterystyce należy przyjąć jako kolejne do realizacji w systemie, by poprawić wartości wskaźników oceny ilościowej funkcjonowania systemu?
- Jaka minimalna pojemność magazynu centralnego (lub magazynów międzyoperacyjnych) jest wymagana do realizacji tego zlecenia?

Rozróżnia się dwie podstawowe klasy stanów początkowych. Klasa pierwsza oznacza system produkcyjny oczekujący na zlecenia, w którym do chwili napływu zleceń nie przyjęto żadnego zadania. Do klasy drugiej zalicza się systemy, w których już są realizowane zlecenia i rozpatrywana jest możliwość przyjęcia do realizacji dodatkowych zleceń. Dla tak zdefiniowanych klas systemów wyznaczalne są następujące problemy.

1. Dany jest system produkcyjny, jego konfiguracja i sposób organizacji pracy. Jakie zlecenia można przyjąć do realizacji w systemie, by zapewnić 100% wykorzystanie zasobów tego systemu?

2. Dany jest system produkcyjny oraz zbiór zleceń, które są w nim realizowane. Jakie dodatkowe, nowe zlecenie może zostać zrealizowane bez naruszenia terminowości realizacji zleceń wcześniej przyjętych?

Przedstawione podejście jest charakterystyczne dla zachowania producenta, decydującego o przyjęciu zleceń do realizacji w zarządzanym przez siebie systemie.

Z kolei, decyzje podejmowane przez klienta, poszukującego systemu satysfakcjonującego go z punktu widzenia zlecenia, jakie chce w nim umieścić, są uwarunkowane odpowiedziami na następujące pytanie:

- Czy dane zlecenie może zostać zrealizowane w systemie w wymaganym terminie?

Podobnie jak w poprzednim przypadku, analiza możliwości realizacji zleceń w systemie produkcyjnym zależy od stanu systemu w momencie napływu zleceń. Podejmowanie decyzji przez klienta sprowadza się do odpowiedzi na pytania:

1. Dany jest zbiór zleceń produkcyjnych. Czy istnieje system produkcyjny (o jakiej konfiguracji i organizacji pracy), który jest w stanie te zlecenia wykonać w określonym terminie?
2. Dane jest nowe zlecenie. Jaki system (z wcześniej przyjętymi zleceniami) może przyjąć takie zlecenie do realizacji?

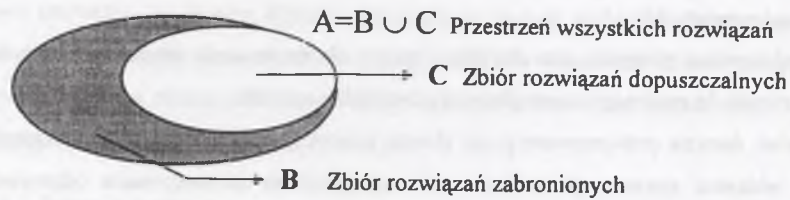
Wymienione zagadnienia charakteryzują sytuację, gdy klient poszukuje producenta spełniającego jego wymagania.

Konieczność wybrania jednej z wymienionych opcji oznacza poszukiwanie rozwiązań dedykowanych, to jest skojarzonych bądź to z punktem widzenia (interesem) producenta, bądź też z punktem widzenia konsumenta. **W niniejszej pracy zdecydowano się rozważać punkt widzenia producenta (zleceniobiorcy).**

Planowanie musi zatem uwzględniać sposób realizacji planu, tak by nie odbiegał on od poczynionych w nim założeń. W rozpatrywanej klasie systemów jednoczesnej wieloasortymentowej produkcji dochodzi do konfliktów, to znaczy do jednoczesnego zgłaszania się do zasobu dwóch lub więcej procesów.

Rozstrzygnięcie konfliktów zasobowych (sterowanie według pilności robót [Durlik, 1996]) winno zabezpieczać przed pojawieniem się blokady lub zagłodzenia procesów – stanów uniemożliwiających realizację przyjętego planu. Konieczne jest zatem takie określenie reguł rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych i taki ich przydział, który zapewni planowane przepływy produkcji w warunkach występowania ograniczeń zasobowych. Reguły gwarantujące takie zachowanie systemów wyznaczają w zbiorze wszystkich możliwych rozwiązań podzbiór rozwiązań

dopuszczalnych (rys. 2.3), tzn. podzbiór rozwiązań spełniających jakościowe oczekiwania bezzagłodzeniowego i bezblokadowego przepływu procesów.

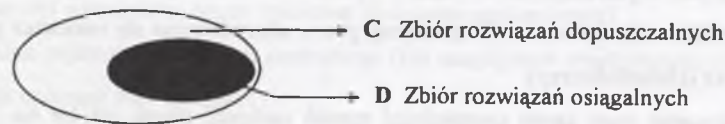


Rys. 2.3. Przestrzeń wszystkich możliwych rozwiązań

Fig. 2.3. Space of the all possible solutions

Spośród rozwiązań dopuszczalnych wybiera się z kolei te, które ekstremalizują określone wskaźniki ilościowe. Ocena rozwiązań jest dokonywana na podstawie modelu.

W dalszych rozważaniach skupiono się na określeniu warunków wystarczających, pozwalających na skonstruowanie metodyki planowania jednoczesnej wieloasortymentowej produkcji dedykowanej potrzebom producenta. Poszukiwane warunki wystarczające wyznaczają w zbiorze rozwiązań dopuszczalnych **C** pewien jego podzbiór **D**, nazywany zbiorem rozwiązań osiągalnych (rys. 2.4).



$$D \subseteq C$$

Rys. 2.4. Przestrzeń rozwiązań dopuszczalnych

Fig. 2.4. Space of permissible solutions

Oznacza to, że w miejsce problemów optymalnego planowania i harmonogramowania produkcji, optymalnego rozmieszczenia komórek produkcyjnych, to znaczy problemów optymalizacji kombinatorycznej, które są problemami NP-trudnymi, rozważa się problemy syntezy (o wielomianowej złożoności obliczeniowej) rozwiązań dopuszczalnych. Podejście to, warunkujące

zastosowania inżynierskie, okupione jest „niebezpieczeństwem suboptymalności” rozwiązań. Rozwiązanie optymalne może być poza wyznaczonym podzbiorem rozwiązań dopuszczalnych.

Uwzględniając kryteria o charakterze ilościowym, przechodzi się do problemu, gdzie na danym (niepustym) zbiorze rozwiązań osiągalnych (być może niezawierającym już rozwiązania optymalnego) poszukiwane jest rozwiązanie najlepsze w określonym, ilościowym sensie. Jest to osiągane poprzez dobór wielkości partii produkcyjnych poszczególnych zleceń, przydział reguł rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych oraz przydział pojemności magazynów. Dotrzymanie wskazanych warunków gwarantuje dotrzymanie oczekiwanych (obliczonych) wartości wskaźników jakościowych.

2.4. Podsumowanie rozdziału

W rozdziale uzasadniono potrzebę rozwoju OPP w celu zaistnienia na konkurencyjnym rynku. Przedstawiono kierunki rozwoju technik planowania oraz metod sterowania. O złożoności zadań z zakresu OPP świadczy nieustanny rozwój systemów zarządzania produkcją klasy MRP. Pomimo złożoności systemy te nie umożliwiają dynamicznej reakcji na zmiany zachodzące w systemie wytwórczym. Stan ten jest powodem nieustannego rozwijania poszukiwania nowych rozwiązań z zakresu planowania i sterowania produkcją.

3. Cel i teza pracy

Na tle dążeń współczesnego rynku (relacja klient-producent) sformułowano cel i tezę pracy oraz nakreślono problem. Będzie to przedmiotem dalszych rozważań.

3.1. Cel pracy

Klasa rozpatrywanych problemów planowania produkcji zaliczana jest do zadań o dużej złożoności kombinatorycznej. Złożoność problemów kombinatorycznych rośnie na ogół ze wzrostem liczby ograniczeń. Powoduje to konieczność wstępnego ograniczania zbioru możliwych rozwiązań (przeszukiwanego metodami algebraicznymi czy symulacyjnymi) w celu wyeliminowania z przeszukiwanego zbioru rozwiązania nie istniejącego lub niedopuszczalnego. Ze względu na wielość występujących ograniczeń w pierwszej kolejności sprawdzane są warunki, których spełnienie gwarantuje jakościowo pożądane funkcjonowanie systemu. Dopiero w drugiej kolejności badane są warunki wyznaczające zbiór rozwiązań dopuszczalnych, gwarantujących pożądaną ocenę ilościową (efektywność, terminowość). Warunki mają postać warunków wystarczających. Oznacza to, że w wyznaczonym w ten sposób zbiorze rozwiązań pominięty jest wariant rozwiązania optymalnego.

Poszukiwane warunki określają związki zachodzące pomiędzy parametrami systemu produkcyjnego a ograniczeniami realizowanych w nim zleceń, umożliwiające planowanie przebiegu wieloasortymentowej produkcji rytmicznej. W szczególności zaś związki posiadają postać warunków wystarczających, których spełnienie zapewnia realizację zlecenia w systemie.

Celem prowadzonych badań jest opracowanie metodyki szybkiej weryfikacji zleceń produkcyjnych. Metodyka ta winna umożliwiać planowanie przepływu wieloasortymentowej produkcji rytmicznej, zapewniającej spełnienie zadanych wymagań jakościowych i ilościowych.

Istotą proponowanej metodyki jest **integracja** etapu planowania i etapu sterowania przepływem produkcji. Równoległe z decyzją typu planistycznego (przyjęcie zlecenia do realizacji) wyznaczana jest procedura rozproszonego sterowania przepływem produkcji, gwarantująca jej realizację z zadanymi wskaźnikami.

Zaproponowana metodyka pozwala na rezygnację z czaso- i pracochłonnej analizy możliwych wariantów obsługi pojawiającego się zlecenia na rzecz **wyznaczenia** warunków,

których sprawdzenie umożliwia stwierdzenie, czy zlecenie może być realizowane w danym systemie.

Warunki, o których mowa, określają lokalizację magazynów i ich pojemności, dla których zapewniony jest przebieg ustalony systemu oraz wpływ przyjętych lokalnych reguł rozstrzygania konfliktów zasobowych na wartości wskaźników ilościowej oceny systemu.

Wpływ na zapewnienie ciągłości przepływu produkcji mają zależności łączące wielkość partii produkcyjnych z pojemnościami dostępnych magazynów, terminami zakończenia partii produkcyjnych, czasami przestoju maszyn itp. Zależności te determinują warunki, których spełnienie gwarantuje określoną efektywność systemu. W szczególności oznacza to możliwość wykorzystania wyznaczonych warunków do budowy procedury wspomagającej użytkownika w podejmowaniu decyzji przy wyborze kolejnych zleceń.

3.2. Teza

W prezentowanym podejściu przyjmuje się, że struktura systemu, konfiguracja i sposób organizacji przepływu produkcji determinują efektywność obsługi przepływu produkcji. Znaczy to, że system, gwarantując pożądaną realizację danej klasy zleceń nie gwarantuje tego innej klasie zleceń. Można zatem powiedzieć, że system o danej strukturze i organizacji **jest dedykowany** do obsługi określonej klasy zleceń.

W rozważanym kontekście przez pojęcie dedykowanego systemu produkcji rytmicznej rozumiany jest system, którego konfiguracja oraz sposób sterowania umożliwiają planowanie produkcji i jej przepływ w warunkach istniejących ograniczeń zasobowych. Innymi słowy, systemem dedykowanym do obsługi danej klasy zleceń jest system, w którym w procesie planowania produkcji uwzględnia się:

- ograniczenia struktury systemu (maszyny, magazyny, transport),
- sposób sterowania (wg harmonogramu, wg pilności robót),
- ograniczenia realizowanych zleceń (terminowość, licznosc partii),
- strukturę i sposób realizacji (wykonania) planowanych zadań (przebiegów produkcji).

Przykładowo, system nie jest dedykowany do obsługi danego zlecenia wówczas, gdy można wykazać albo tylko możliwość jego terminowego wykonania (wynikającą z bilansu zdolności produkcyjnych) bez możliwości przedstawienia planu obsługi tego zlecenia, albo możliwość wykonania zlecenia bez zapewnienia jego terminowej realizacji.

Przyjęta koncepcja systemu dedykowanego zakłada prawdziwość poniższej tezy:

Istnieje obliczeniowo efektywna metoda planowania produkcji, umożliwiająca wariantowanie sposobów przepływu produkcji w warunkach istniejących ograniczeń zasobowych systemu, zorientowana na szybką weryfikację zleceń produkcyjnych zarówno pod kątem możliwości wytwórcy, jak i oczekiwań odbiorcy (zleceniodawcy), integrująca poziomy planowania zagregowanego oraz sterowania operacyjnego.

Do wykazania tej tezy należy wyznaczyć zależności łączące ograniczenia systemu produkcyjnego oraz realizowanych w nim zleceń. Poszukiwane związki mają postać warunków. Procedura planowania oparta na tak wyznaczonych warunkach stanowić będzie dowód na poparcie wymienionej tezy.

3.3. Sformułowanie problemu

Rozważana klasa systemów obejmuje dyskretne systemy produkcyjne (w szczególności systemy obróbkowe) typowe dla ESW produkcji średnio- i małoseryjnej. Przyjmuje się, że systemy te są również systemami jednoczesnej produkcji wieloasortymentowej, gdzie niektóre z ich zasobów są zasobami wspólnymi, wykorzystywanymi w marszrutach produkcyjnych różnych wytworów.

Zasoby systemu są niewywłaszczalne, co oznacza, że procesowi nie można odebrać zasobu przed ukończeniem operacji. Zasoby są odnawialne, tzn. że po wykonaniu procesu zasób jest gotowy do natychmiastowego wykonania następnego procesu.

Danej operacji technologicznej i operacji ją poprzedzającej przypisuje się magazyny międzyoperacyjne o skończonej pojemności. Miejsce w magazynie międzyoperacyjnym traktowane jest jako dodatkowy zasób, na którym czas wykonywania operacji jest równy zero.

Magazyn międzyoperacyjny może być zorganizowany na różne sposoby. Magazynem międzyoperacyjnym może być przenośnik między kolejnymi zasobami, magazyn palet przy obrabiarce lub część miejsca przewidziana w magazynie centralnym.

Zlecenia produkcyjne, określane przez: wielkość zlecenia, termin realizacji, marszrutę technologiczną z określonymi czasami wykonywania operacji na zasobach oraz licznosc partii produkcyjnej, realizowane są w systemie przy założeniu, że:

- Rozważane problemy mają charakter deterministyczny. Charakteryzują się skończoną sekwencją operacji wykonywanych w skończonym, ściśle określonym czasie, wzdłuż zadanej marszruty technologicznej.
- Dostęp procesów do zasobów dzielonych realizowany jest w trybie wzajemnego wykluczenia.
- Rozpoczęcie kolejnej operacji następuje po zakończeniu poprzedzającej, pod warunkiem dostępności zasobu; proces jest niewywłaszczalny.
- Czasy operacji są liczbami naturalnymi. Czasy operacji transportu i przebrojeń są wliczone w czas trwania operacji technologicznej.
- Oczekując na zajęty zasób (lub miejsce w magazynie międzyoperacyjnym przydzielone temu procesowi) proces nie zwalnia zasobu, na którym wykonał poprzednią operację.

Przyjmuje się, że każda marszruta może przebiegać co najwyżej raz przez ten sam zasób (brak nawrotów). Na wejściu każdej marszruty znajduje się magazyn o pojemności równej liczności partii produkcyjnej (określonej przez zlecenie produkcyjne), zaś na wyjściu znajduje się pusty magazyn o nieograniczonej pojemności.

Warunkiem realizacji zadanego celu, tzn. opracowania metodyki szybkiej weryfikacji zleceń produkcyjnych, jest wyznaczenie, przy wyżej przyjętych założeniach, warunków, których spełnienie gwarantuje realizację zlecenia.

Wyznaczanie takich warunków i związana z tym analiza układu system produkcyjny - zlecenie znajduje swój wyraz w sformułowaniu rozważanego dalej problemu wyznaczania warunków, determinujących realizację zlecenia, a w szczególności związków występujących pomiędzy:

- licznością partii produkcyjnej a dostępnymi pojemnościami magazynów,
- stanem początkowym systemu a wyznaczonymi regułami wyboru priorytetu,
- licznością partii produkcyjnej a terminowością realizacji zlecenia.

Umożliwia to analiza komponentów należących do trzech zasadniczych obszarów, a mianowicie: systemu produkcyjnego (dysponowany fundusz czasu pracy, zasoby, magazyny międzyoperacyjne), planowania procesu (marszruta, podział na partie, harmonogramowanie, minimalizacja zapasów w toku), zleceń (różnorodność produktów, procesy współbieżne, czas realizacji, termin uruchomienia). Kryteriami oceny są: poziom wykorzystania zasobów, długość cyklu wytwórczego, efektywność realizacji zlecenia, terminowość realizacji zlecenia.

W analizie przydatności systemu do realizacji określonej klasy zleceń badany jest wpływ innych aspektów determinujących ich realizację, do których można zaliczyć między innymi:

- dobór zleceń do jednoczesnej realizacji w systemie,
- określenie liczności partii dla każdego ze zleceń,
- lokalizację magazynów międzyoperacyjnych i wyznaczenie ich pojemności, gwarantujące bezkolizyjny przepływ planowanej produkcji,
- wpływ zakłóceń na realizację zleceń.

3.4. Zakres pracy

O poziomie konkurencyjności producenta decyduje terminowość realizowanych przez niego zleceń oraz odpowiednio niska cena i akceptowalna przez klienta jakość produktu finalnego. Terminowej realizacji zleceń musi zatem towarzyszyć wysoki stopień wykorzystania zasobów systemu oraz niski poziom zapasów produkcji w toku. Oznacza to potrzebę przeprowadzenia wstępnej selekcji zleceń. Wybrane w jej wyniku zlecenia optymalizują wskaźniki jakości funkcjonowania systemu przy gwarantowanej terminowości zakończenia zlecenia.

Przyjęta metoda wyboru zleceń zakłada istnienie tak zwanych dedykowanych systemów wytwórczych, zorientowanych na obsługę konkretnej klasy zleceń (dla której znany jest przepływ produkcji gwarantującej terminowe zakończenie).

Znamienną cechą takiej metodyki jest **integracja etapów**:

- planowania produkcji (przydział pojemności magazynów, wybór wielkości partii),
- sterowania operacyjnego (reguły wyboru priorytetu, termin uruchomienia zleceń).

Integracja wspomnianych etapów zakłada rytmiczny przepływ produkcji (pracę systemu wytwórczego w cyklicznym przebiegu ustalonym) oraz przyjęcie zasobowo zorientowanego sposobu sterowania jej przepływem. Oznacza to, że dla ustalonego zadania (marszruty przyjętego zlecenia) przydzielone są do zasobów systemu odpowiednie reguły wyboru priorytetu zabezpieczające rytmiczny i terminowy (nie zakłócony) przepływ produkcji.

Umiejscowienie podejmowanej problematyki na tle prac prowadzonych w kraju i na świecie przedstawiono w tabeli 3.1. Pole szare wskazuje obszar niniejszej pracy.

Przedstawiona w tabeli 3.1 klasyfikacja obszarów badań (zacytowane prace są reprezentantami prac z tego zakresu) znajduje swój wyraz w szeregu prac z zakresu mechaniki, zarządzania oraz informatyki. Spośród wykorzystywanych w nich technik na szczególne podkreślenie zasługują metody badań operacyjnych, a w szczególności programowania

matematycznego, metody masowej obsługi, symulacji komputerowej oraz metod sztucznej inteligencji.

Tabela 3.1

		Umiejscowienie problematyki badań	
		PRODUKCJA	
		rytmiczna	nierytmiczna
STEROWANIE	zorientowane materiałowo	[Ramsay, Brown, Tabibzadeh, 1990], [Landvater, 1989], [Iimura, 1993], [Bubnicki, 1987], [Błażewicz, 1981],	[Józefczyk, 1996], [Sawik, 1992], [Witkowski, 1993], [Witkowski, 1995]
	zorientowane zasobowo	[Skołud, 1999a], [Skołud, 1999b], [Skołud, 1998c], [Skołud, 1999c], [Skołud, Gattner, Klos, 1999], [Klos, Gattner, Skołud, 1997],	[Souilah, Boulif, Hamdache, 1998], [Skołud, 1996a], [Skołud, 1996b], [Gregor <i>et al.</i> , 1998].

Skuteczność stosowanych metod ograniczana jest zwykle zakresem przyjętych założeń (rodzajem produkcji, typem sterowania). Przykładowo, metody sztucznej inteligencji oraz metody symulacji komputerowej wykorzystywane są w badaniach systemów produkcji nierytmicznej [Souilah, Boulif, Hamdache, 1998], [Skołud, 1996a], [Skołud, 1996b], [Gregor, 1998], a metody masowej obsługi oraz badań operacyjnych dominują w zadaniach sterowania zorientowanego zadaniowo [Bubnicki, 1987], [Błażewicz, 1981], [Józefczyk, 1996], [Sawik, 1992], [Witkowski, 1993], [Witkowski, 1995] itd.

Nowe perspektywy, umożliwiające zintegrowane ujęcie problemów planowania i sterowania przepływem produkcji, wnoszą techniki programowania z ograniczeniami (ang.: Constraint Logic Programming - CLP), polegające na technice deklaratywnego opisu. Umożliwiają one efektywne rozwiązywanie złożonych, w szczególności kombinatorycznych problemów z zakresu planowania i harmonogramowania [Bartak, 1999], [Niederliński, 1999].

Istotnymi ograniczeniami wymienionych problemów są jednak bądź to niedokładności stosowanych modeli (metody masowej obsługi – nie uwzględniają przebiegów przejściowych), bądź długi czas obliczeń, uniemożliwiający ich zastosowanie w trybie on line, bądź też

pracochłonny, wymagający specjalistycznego przygotowania sposób specyfikacji problemu (specyfikacja ograniczeń w programowaniu CLP).

W proponowanym podejściu łączone są formalizmy logiki matematycznej, algebry liniowej oraz teorii mnogości. Składają się one na metodę problemowo ukierunkowanego przeglądu ograniczeń o charakterze logiczno – algebraicznym, zorientowaną na weryfikację zleceń.

3.5. Podsumowanie rozdziału

W rozdziale przedstawiono cel i tezę pracy. Sformułowano problem podejmowany w pracy oraz jej zakres. Ponadto przedstawiono klasyfikację obszarów badań i umiejscowienie podejmowanej problematyki na tle prac prowadzonych w kraju i na świecie.

4. Wytwarzanie zorientowane na potrzeby producenta

4.1. Zarządzanie logistyczne

Przedmiotem logistyki są strumienie różnej natury (jak np. strumienie materiałów, produktów, odpadów, energii, informacji) i charakteru (jak dyskretny lub ciągły, liniowy albo sieciowy) oraz sposoby zarządzania przepływem tych strumieni w warunkach istniejących ograniczeń zasobowych systemu, do których zalicza się dostępność technologii, dysponowaną powierzchnię hal produkcyjnych, terminy dostaw i odbioru materiałów. Celem logistyki jest poszukiwanie odpowiedzi na pytania: co, gdzie i kiedy oraz w jakiej ilości powinno być dostarczone dla produkcji wykonywanej terminowo i przy minimalnych kosztach?

Logistyka, w wąskim sensie, jest działaniem ukierunkowanym na to, by dostarczyć materiał i narzędzia w odpowiednim czasie do oczekującego na nie miejsca. W szerokim znaczeniu jest narzędziem integracji przepływów procesów wytwórczych, remontowych, transportowych i innych, które wzajemnie przenikają się. Logistyka w nowoczesnym ujęciu pojmowana jest jako zintegrowany system planowania, zarządzania i sterowania strukturą przepływów materiałowych oraz sprzężonych z nimi przepływów informacyjnych, kapitałowych w celu optymalnego tworzenia i transformacji wartości [Korzeń, 1995].

W rozważanym kontekście planowanie i harmonogramowanie produkcji należą do typowych zadań zarządzania logistycznego. Problemami spotykanymi w ESW są problemy poszukiwania takich marszrut i strategii sterowania przepływem produkcji, które zapewnią terminową realizację planowanych zleceń produkcyjnych. Wydajność maszyn, pojemności magazynów, przepustowość systemu transportowego itd. są jednak ograniczone. Ograniczenia te limitują osiągalne charakterystyki ilościowe systemu oraz synchronizują przebiegi realizowanych w nim procesów [Banaszak, Jampolski, 1998].

Podsystem sterowania przepływem produkcji musi rozwiązywać wiele problemów, jakie pojawiają się w trakcie pracy systemu. Należą do nich: awarie, braki dostaw, pojawianie się nowych zleceń. W systemach ze sterowaniem scentralizowanym wprowadzanie jakichkolwiek zmian w algorytmie sterowania jest bardzo kosztowne i wymaga długotrwałych analiz [Upton, 1992]. Alternatywne rozwiązanie wiąże się z systemami sterowania adaptacyjnego. Przykład takiego rozwiązania, oparty na strukturze systemu sterowania rozproszonego, przedstawiono w pracach [Skołud, Stańczyk, 1998], [Gattner, Skołud, Banaszak, 1999]. Proponowana procedura

sterowania rozproszonego zapewnia samosynchronizację i odporny na zakłócenia (powodowane na przykład zmianami czasu trwania operacji technologicznej) tryb koordynacji przepływu produkcji. Jej działanie bazuje na wyborze i przydziale reguł rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych oraz pojemności magazynów międzyoperacyjnych.

Rozpatrywane systemy produkcyjne należą do dyskretnych systemów dynamicznych (ang.: Discrete Event Dynamic Systems - DEDS). Współcześnie około 80% wartości produkcji całego przemysłu jest wytwarzana w procesach dyskretnych, a tylko 20% w procesach ciągłych [Durlik, 1996]. Większość systemów wytwórczych, a w szczególności systemy produkcyjne przemysłu maszynowego, w tym również ESW, należą do tej klasy. Dynamikę systemów dyskretnych charakteryzuje synchronizacja i współbieżność [Cohen *et al.*, 1989]. **Synchronizacja** polega na doprowadzeniu dwóch lub więcej przebiegów procesów do zgodności w czasie. Dwa procesy są **współbieżne**, jeśli wykonywanie jednego z nich zaczęło się po rozpoczęciu, ale przed zakończeniem drugiego. Przebiegi każdego z procesów mogą oddziaływać na siebie poprzez korzystanie ze wspólnych zasobów [Bacelli *et al.*, 1992]. Współbieżność jest cechą charakterystyczną produkcji wieloasortymentowej. Wieloasortymentowość wynika z rynkowego zorientowania wytwórców lub konieczności dostarczania wytworów w pakietach, umożliwiających kolejną fazę wytwarzania, jak na przykład montaż podzespołów lub gotowych wytworów.

4.1.1. Systemy produkcji rytmicznej

Formą organizacji produkcji, która umożliwia analityczne wyznaczenie charakteryzujących ją wskaźników, jest produkcja rytmiczna.

W odniesieniu do procesu produkcyjnego **rytmiczność** jest rozumiana jako regularne, równomierne powtarzanie się określonych elementów procesu produkcyjnego (operacji, czynności, zdarzeń) w komórkach produkcyjnych. Systemem produkcji rytmicznej nazywamy taki system, w którym po wykonaniu ostatniej operacji w sekwencji następuje powrót do pierwszej w sekwencji [Spencer, 1994].

Do najważniejszych cech systemu produkcji rytmicznej należą [Lis, 1982]:

- przyjęta technologia, wielkość produkcji, asortyment produkowanych wyrobów,
- podział długookresowych zadań produkcyjnych na mniejsze części realizowane w krótszych odstępach czasu, w tzw. okresach powtarzalności,
- przydział zadań produkcyjnych do poszczególnych stanowisk produkcyjnych z dokładnością do operacji.

Problemy związane z organizacją i prowadzeniem produkcji rytmicznej są przedmiotem wielu analiz podejmowanych w opracowaniach naukowych [Lis, 1982], [Jackowicz, Lis, 1987], [McCormick, Rao 1991], [Hubbard, Taylor, Bolander, 1992], [Dorn, Froeschl, 1993], [Spencer, 1994], [Ulfsby, 1996], [Kłos, Gattner, Skołod, 1997], [Kłos, Gattner, Banaszak, 1998], [Skołod, 1998a], [Skołod, Gattner, Kłos, 1998a], [Skołod, 1999c], [Skołod, Jurkojć, 1999d]. Zachowanie rytmiczne jest charakterystyczne również dla przeglądów okresowych, bieżących remontów oraz kapitalnych remontów urządzeń [Viswanadham, Ram, 1994], [Skołod, 1997a], [Skołod, 1997d], [Skołod, Stańczyk, 1998]. W pracach [Jackowicz, Lis, Wagner, 1980], [Jackowicz, Lis, 1987] przedstawiono algebraiczny opis systemów produkcji rytmicznej, uwzględniający dynamikę zmian struktury oraz zagadnienia dotyczące eliminacji i kompensacji zakłóceń w tych systemach.

Mankamentem organizacji produkcji rytmicznej jest to, że jej zastosowania są znane w odniesieniu do produkcji wielkoseryjnej i masowej. Produkcja tego typu charakteryzuje się wysoką specjalizacją stanowisk roboczych i powtarzalnym, jednorodnym przebiegiem procesów technologicznych oraz ustawieniem obrabiarek zgodnie z kolejnością operacji w procesie technologicznym. Z tych względów jest to produkcja o niewielkim zróżnicowaniu asortymentu produkowanych wytworów, w przeważającej liczbie przypadków produkcja jednoasortymentowa. W tym aspekcie zagwarantowanie rytmiczności jest przykładem produkcji dedykowanej potrzebom producenta. Zapotrzebowanie na tego typu produkcję jest coraz mniejsze na rynku, którego reguły ustala klient. Na spełnianie tych potrzeb zorientowane są ESW, w których, dzięki uniwersalności urządzeń, jednocześnie realizuje się wiele procesów, przepływających przez te same zasoby. Prowadzi to do powstania konfliktów na zasobach, tj. jednoczesnego ubiegania się przez dwa procesy (lub więcej) o dostęp do zasobów dzielonych. W konsekwencji prowadzi to do braku rytmiczności w przepływie poszczególnych asortymentów.

Organizacja produkcji rytmicznej umożliwia wyznaczenie parametrów charakteryzujących produkcję oraz ich kształtowanie na poziomie zbliżonym do optymalnego. Wskaźnikami oceny produkcji rytmicznej są: stopień wykorzystania zasobów, wielkość zapasów produkcji w toku, długość cykli produkcyjnych, koszt wytwarzania itp. Przyczynia się to do osiągnięcia przewagi nad potencjalnym konkurentem. Powstaje więc pytanie o założenia, jakie należy poczynić, by umożliwić zastosowanie organizacji produkcji rytmicznej do jednoczesnej produkcji wieloasortymentowej, realizowanej w małych i średnich seriach. Zamówienia wpływające do systemu nie mają charakteru cyklicznego. Zakładając, że reguły gry na rynku dyktuje klient, producent nie jest w stanie wymusić cyklicznego składania zamówień. Jediną możliwością

uczynienia produkcji wieloasortymentowej produkcją cykliczną jest podział zlecenia na partie produkcyjne, których przebieg jest zależny wyłącznie od producenta.

4.1.2. Współbieżne procesy produkcyjne

Przedmiotem dalszych rozważań są **systemy współbieżnych procesów produkcyjnych** (SWPP). SWPP jest zbiorem realizowanych równocześnie procesów, dla których nie jest znana kolejność ich wykonania. Procesy mogą współdziałać ze sobą poprzez korzystanie ze wspólnych zasobów [Baccelli *et al.*, 1992].

Przebieg produkcji w systemach zależy od realizowanych procesów, struktury systemu oraz wzajemnego oddziaływania procesów. Procesy współzawodniczą o dostęp do wspólnie wykorzystywanych zasobów systemu. Dostęp procesów jest regulowany zgodnie z trybem wzajemnego wykluczania albo zgodnie z trybem spotkaniowym. Tryb wzajemnego wykluczania (asynchroniczny) występuje wtedy, gdy na zasobie w danej chwili jest realizowany tylko jeden proces. Tryb spotkaniowy (synchroniczny) polega na takim współdziałaniu procesów, że proces jest realizowany na zasobie pod warunkiem spotkania z innym procesem. Asynchroniczny przebieg procesów może spowodować wystąpienie konfliktów na zasobach dzielonych. Przez **konflikt zasobowy** rozumie się przypadek jednoczesnego żądania, przez współzawodniczące procesy, dostępu do zasobu dzielonego w momencie zwolnienia tegoż zasobu przez proces, który go aktualnie zajmował.

Podjęcie decyzji o pierwszeństwie procesu, spośród oczekujących, w dostępie do zasobu nazywane jest **rozstrzygnięciem konfliktów zasobowych**. Od rodzaju przyjętych reguł rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych zależą charakter systemu (cykliczny, niecykliczny) oraz parametry takie, jak: efektywność realizacji procesów, efektywność wykorzystania zasobów, poziom zapasów produkcji w toku.

Rozpatrywane są systemy, w których procesy koordynowane są zgodnie z protokołem wzajemnego wykluczania. Wyróżnia się dwa rodzaje procesów współbieżnych:

- **Procesy równoległe** (rozłączne), które nie oddziałują na siebie. Przebiegi poszczególnych procesów nie wpływają na sposób realizacji pozostałych. Przebiegi procesów są deterministyczne. Oznacza to, że dla określonego zbioru danych wejściowych wielokrotne wykonanie operacji przez proces niezależny daje zawsze taki sam zbiór danych wyjściowych.
- **Procesy zależne**, które oddziałują na siebie. Przebieg jednego z procesów może mieć wpływ na przebieg pozostałych. Interakcyjne oddziaływanie procesów występuje w systemach, w

których procesy wykorzystują w sposób wyłączny zasoby dzielone. Procesy mogą być wstrzymywane z powodu niemożności wykorzystania zajętego zasobu dzielonego.

W dalszych rozważaniach przez pojęcie **zasobów** określa się maszyny i urządzenia (np. obrabiarki numeryczne lub centra obróbkowe) wykorzystywane podczas realizacji procesów technologicznych. Zasoby są powiązane ze sobą siecią transportu wewnętrznego. Zakłada się, że są znane czasy realizacji operacji, należące do procesów przebiegających przez zasoby. Zasoby, przez które przebiegają co najmniej dwa procesy, nazywane są **zasobami dzielonymi** lub **zasobami wspólnymi**. Zasoby, przez które przebiega co najwyżej jeden proces, nazywane są **zasobami własnymi**. Dostęp procesów do zasobów dzielonych regulowany jest przez **lokalne reguły rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych**, zwane również lokalnymi regułami wyboru priorytetu (ang.: dispatching rule).

Definicja 4.1. (Lokalna reguła rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych) [Kłos, Gattner, Skołod, 1997]

Lokalna reguła rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych $\sigma_i = (Pa_1, Pa_2, \dots, Pa_j, \dots, Pa_n)$ określa liczbę oraz kolejność procesów realizowanych na i -tym zasobie, gdzie:

Pa_j – proces,

$i \in \{1, 2, \dots, m\}$,

$a_j \in \{1, 2, \dots, n\}$,

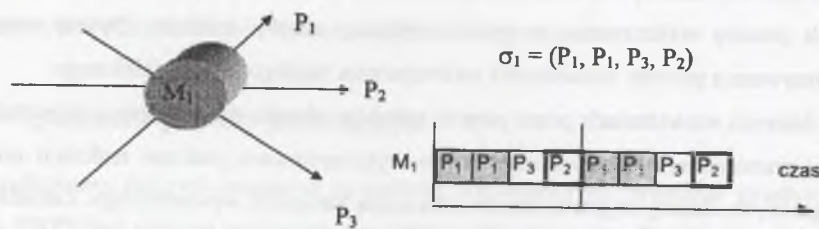
m - liczba zasobów,

n - liczba procesów przebiegających przez zasób dzielony M_i , zgodnie z regułą σ_i .

Warunkiem funkcjonowania systemu jest, by każdorazowe wykonanie reguły gwarantowało przynajmniej jednokrotną realizację operacji należącej do każdego z procesów przebiegających przez M_i . ■

Przykład 4.1

Reguła rozstrzygnięcia konfliktów $\sigma_1 = (P_1, P_1, P_2, P_3)$ oznacza, że zasób M_1 jest dzielony przez trzy procesy P_1, P_2, P_3 (Rys. 4.1). Proces P_1 jest wykonywany dwukrotnie, następnie jednokrotnie wykonywane są procesy P_2 i P_3 . Sekwencja procesów określona przez regułę rozstrzygnięcia konfliktów wyznacza kolejność i krotność wykonywania procesów przebiegających przez zasób dzielony.



Rys. 4.1. Reguła rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych przydzielona do zasobu M_1 (zapis)

Fig. 4.1. Dispatching rule assigned to the resource M_1 (notation)

Z definicji 4.1 wynika, że sekwencje reguł określają kolejność dostępu procesów do zasobów dzielonych, do których są one przydzielone. Aby zapewnić ustalony przebieg procesów, relacje pomiędzy regułami rozstrzygnięcia konfliktów przypisanych do zasobów uwzględniają tzw. **warunek bilansu systemu**. Spełnienie warunku bilansu świadczy o tym, że liczba elementów wprowadzanych do każdej marszruty produkcyjnej w przebiegu ustalonym systemu odpowiada liczbie elementów opuszczających ten system [Kłós, Gattner, Majdzik, 1997], [Kłós, Gattner, Skołud, 1997], [Kłós, Skołud, Gattner, 1998].

4.1.3. Modelowanie systemów współbieżnych procesów produkcyjnych

Projektowanie systemów współbieżnych procesów produkcyjnych wymaga dokładnej specyfikacji elementów składowych systemu i utworzenia modelu opisującego jego właściwości.

Do opisu przedsiębiorstwa wykorzystywane są następujące rodzaje modeli [Chrobot, Rakowski, 1998]:

- opisowe, które ułatwiają zrozumienie i komunikację dzięki formalnemu językowi opisu,
- formalne, wyrażane za pomocą narzędzi formalnego opisu z precyzyjną składnią i semantyką,
- programowe, w których każdy program komputerowy jest modelem,
- analityczne, będące modelami formalnymi o podstawie matematycznej.

W dalszych rozważaniach szczególną uwagę zwrócono na modele analityczne. Znanych jest wiele metod modelowania, opartych między innymi na teorii masowej obsługi, programowania matematycznego, symulacji komputerowej, sieciach Petriego itp. Systemy rozważane w pracy są reprezentantami obiektów zależnych od upływu czasu. Dlatego też modele systemów współbieżnych należą do klasy **modeli czasowych**. Ponadto, w pracy analizowany jest cykliczny przebieg ustalony, co implikuje budowę **modeli deterministycznych**.

Modele deterministyczne, łączące zbiór stanów i zdarzeń z czasem ich zaistnienia, można budować, stosując np. czasowe sieci Petriego [Lis, 1982], [Hillion, Proth, 1989], [Venkatesh, Zhou, Caudill, 1995], [Zuberek, 1998]. Zaletą sieci Petriego jest możliwość łatwego, oddającego intuicję projektanta opisu systemu wzajemnie warunkujących się stanów i zdarzeń. Przegląd metod modelowania z zastosowaniem sieci Petriego, ze szczególnym uwzględnieniem metod synchronizacji współbieżnie przebiegających procesów, przedstawiono w pracy [Banaszak, Jampolski, 1991]. W pracach [Cyklis, Pierzchała, 1995], [Cyklis, Krupa, 1998], [Cyklis, Krupa, Małopolski, 1999], [Cyklis, Pierzchała, Zając, 1999] zaprezentowano oryginalny model macierzowy, którego działanie jest równoważne działaniu sieci Petriego. Model systemu tworzony jest przez zbiory wyjść oraz macierz liczebności używanych elementów. Model pozwala wyznaczyć czynności, których rozpoczęcie jest możliwe ze względu na dostępność wszystkich niezbędnych elementów w wymaganej ilości. Natomiast w pracach [Cyklis, Słota, 1998], [Cyklis, Słota, 1999] została zdefiniowana obiektowo-obszernie sieć Petriego jako alternatywa w stosunku do modelu macierzowego.

Budowa modelu opartego na formalizmie sieci Petriego jest bardzo czasochłonna i skomplikowana, a badanie efektywności wymaga budowy środowiska symulacyjnego i prowadzenia skomplikowanej programowo symulacji systemu. Wad tych pozbawione są modele algebraiczne, umożliwiające modelowanie dynamiki systemów poprzez operacje na strukturach algebraicznych [Bacelli *et al.*, 1992], [Cohen *et al.*, 1989], [Jackowicz, Lis, 1987], [Kłós, Skołud, Gattner, 1998], [Kłós, Gattner, Skołud, 1997]. Metodami modelowania algebraicznego są algebra minimax [Cuninghame-Green, 1979] oraz algebra $(\max, +)$ [Cohen *et al.*, 1989], [Bacelli *et al.*, 1992], [Brat, Grag, 1998]. Formalizm algebry $(\max, +)$ bazuje na protokole rendez-vous (spotkaniowym). Opis systemów, w których procesy współpracują w trybie wzajemnego wykluczania, przedstawiono w pracach [Majdzik, Obuchowicz, 1995], [Obuchowicz, Banaszak, 1996], [Kłós, Skołud, Banaszak, 1999].

4.1.4. Harmonogramowanie produkcji i sterowanie jej przepływem

Formalne metody harmonogramowania nie są powszechnie stosowane w praktyce przemysłowej. Powodem takiego stanu rzeczy jest to, iż metody te nie są szerzej znane, nie jest też zrozumiały sposób ich matematycznej prezentacji. Sprowadzenie harmonogramowania do okresu powtarzalności [Eriksson, Lund, 1984], [Lee, Song, 1996] ułatwia planowanie i sterowanie dzięki prostocie struktury systemu i powtarzalności. Harmonogram taki nazywany jest harmonogramem cyklicznym i cechuje go stała liczba okresów pomiędzy zamówieniami

[Lis, 1982], [McCormic, Rao, 1994], [Campbell, 1995], [Kłós, Gattner, Majdzik, 1997]. Harmonogram opracowany dla okresu powtarzalnego jest normatywem produkcji dla każdego kolejnego powtórzenia i nazywany jest harmonogramem normatywnym. Powtarzalność realizacji zleceń pozwala na odejście od bilansowania obciążeń na rzecz bilansowania przepływów produkcji [Skołod, 1997c], [Skołod, 1998c], [Szymański, Skołod, 1998]. Umożliwia to planiście systemu skoncentrowanie się na polepszeniu wskaźników funkcjonowania systemu. O przewadze produkcji rytmicznej nad przeplywową pisali w swych pracach Erikson i Lund [Eriksson, Lund, 1984], koncentrując się na badaniach prowadzonych w fabrykach Volvo, w których wykazali, że średni czas oczekiwania produktu w kolejce przed stanowiskiem jest krótszy w przypadku takiej produkcji. W niniejszej pracy rozwinięto matematyczny opis problemu rytmiczności. Przedstawiono, ponadto, algorytm porównania kosztów harmonogramowania cyklicznego i acyklicznego.

Przepływy w systemie są zależne od ograniczeń zasobowych, które są wąskimi gardłami, decydującymi o przepustowości systemu. Problem kluczowej roli wąskich gardeł w wytwarzaniu podejmowany był w pracach [Hendry, Kingsman, 1989], [Skołod, Gattner, Kłós, 1997]. Z kolei autorzy pracy [Powell, Pyke, 1996] zajmowali się optymalnym rozmieszczeniem i określeniem pojemności magazynów w niezbilansowanych liniach produkcyjnych z wąskim gardłem.

Warunki wystarczające, pozwalające opracować metodę syntezy harmonogramu cyklicznego realizacji wielosortymentowej produkcji zorientowanej na potrzeby klienta (dedykowanej potrzebom klienta), są uzyskiwane przez dobór wielkości partii produkcyjnych poszczególnych zleceń. Determinuje to przydział magazynów międzyoperacyjnych oraz postać i przydział reguł rozstrzygania konfliktów zasobowych, określających kolejność dostępu procesów do zasobów dzielonych przez współzawodniczące procesy. Na podstawie analizy harmonogramu cyklicznej realizacji produkcji wyznaczane są parametry charakteryzujące wielosortymentową produkcję rytmiczną. Realizacja produkcji zgodnie z wypracowanym harmonogramem gwarantuje dotrzymanie ich wartości.

Z prowadzonych badań [Skołod, 1998b] wynika, że koncepcja sterowania rozproszonego opartego na doborze reguł rozstrzygania konfliktów zasobowych oraz przydziale pojemności magazynów międzyoperacyjnych pozwala na spełnienie powyższych wymogów. To właśnie deterministyczne (stałe) reguły wyboru priorytetu przydzielone do zasobów czynią produkcję rytmiczną.

4.1.5. Podsumowanie

Przedstawiono współczesne rozumienie logistyki jako integrację przepływających strumieni różnej natury. W dalszej części rozpatrywane będą systemy współbieżnych procesów produkcyjnych, charakteryzujące się powtarzalnością. W praktyce wyznaczanie rozwiązania dopuszczalnego dla produkcji niepowtarzalnej sprowadza się do określenia stopnia pilności zadań poprzez zastosowanie reguł wyboru priorytetu.

Wspomaganie komputerowe w takim przypadku ogranicza się do prowadzenia badań symulacyjnych. Złożoność eksperymentu symulacyjnego i konieczność jego wcześniejszego przygotowania implikuje poszukiwanie nowych, bardziej efektywnych metod.

4.2. Model przepływu wielosortymentowej produkcji rytmicznej

Prezentowana metoda oceny stopnia dedykowalności zleceń produkcyjnych korzysta z technik analitycznych, metod logiki klasycznej, algebry liniowej oraz teorii grafów. Umożliwia podejmowanie decyzji o możliwości realizacji danego zlecenia przy zadanych ograniczeniach związanych z rezerwami systemu i wymaganiami zleceniodawcy, bez potrzeby prowadzenia badań symulacyjnych. Podejście to stanowi pewien wariant zarządzania przez całościowe procesy [Eversheim, 1995], [Gattner, Kłós, 1996a], [Gattner, Kłós, 1996b].

Podstawą analitycznego wyznaczania jakościowych i ilościowych parametrów realizowanej wielosortymentowej produkcji jest model przepływu produkcji. Model przepływu produkcji wielosortymentowej, dedykowanej potrzebom producenta, winien uwzględniać również potrzeby klienta, dlatego też został podzielony na dwie zasadnicze części:

- model systemu, opisujący parametry systemu wytwórczego, będącego do dyspozycji wytwórcy,
- model zlecenia, wynikający z potrzeb klienta.

Interakcja tych dwóch modeli odzwierciedla sposób przyjęcia zlecenia do realizacji.

4.2.1. Model systemu

Przedstawiony model systemu pozwala uwzględniać parametry realizowanej w nim produkcji dedykowanej potrzebom klienta. W modelu uwzględniono zasoby systemu (maszyny), magazyny oraz realizowane w nim procesy. Procesy odpowiadają zleceniom produkcyjnym.

Założono, że realizacja wcześniej przyjętych zleceń produkcyjnych nie może ulec zmianie w wyniku przyjęcia kolejnego, nowego zlecenia. Rozważany system, z realizowanymi w nim procesami, znajduje się w stanie ustalonym, co umożliwia analityczną ocenę jego funkcjonowania.

Przedstawiono opis formalny stanu ustalonego oraz omówiono wskaźniki oceny systemu i realizowanej w nim produkcji.

4.2.1.1. Struktura systemu

Rozpatrywane w pracy systemy produkcyjne charakteryzują się mało- i średnioseryjną produkcją wieloasortymentową. Są to systemy o strukturze technologicznej, w których stanowiska są powiązane ze sobą w stopniu minimalnym. Pomiędzy każdą parą maszyn przydzielono magazyny międzyoperacyjne lub odpowiadające im pojemności magazynu centralnego. Procesy operujące w systemie charakteryzuje brak nawrotów. Marszruty procesów krzyżują się na zasobach. Marszruty, przebiegając przez zbiór zasobów w systemie produkcyjnym, tworzą sieć, której węzłami są zasoby dzielone. Schemat struktury systemu przedstawiono na rys. 4.2.

W systemie realizowany jest skończony zbiór asortymentów wytworów. Każdy asortyment identyfikowany jest przez proces produkcyjny. Zbiór procesów realizowanych w systemie może być zbiorem pustym, co oznacza, że do zasobu nie przyjęto do tej pory żadnego zlecenia. Proces odzwierciedla potokowy przepływ strumienia materiałów, półwyrobów lub gotowych elementów wzdłuż zadanej **marszruty produkcyjnej**. Marszruta produkcyjna jest zdeterminowana przez proces technologiczny, charakterystyczny dla danego rodzaju produktu. Określa liczbę i kolejność zasobów, przez które musi przejść materiał, aby otrzymać postać produktu finalnego.

Kierując się jedną z podstawowych zasad organizacji produkcji o jednokierunkowości przepływu produkcji [Wróblewski, 1993] przyjęto, że procesy przebiegają tylko raz przez ten sam zasób (brak nawrotów). Procesy realizowane w systemie odzwierciedlają potokowy i asynchroniczny przepływ materiału wzdłuż marszrut, realizując określone zlecenia produkcyjne.

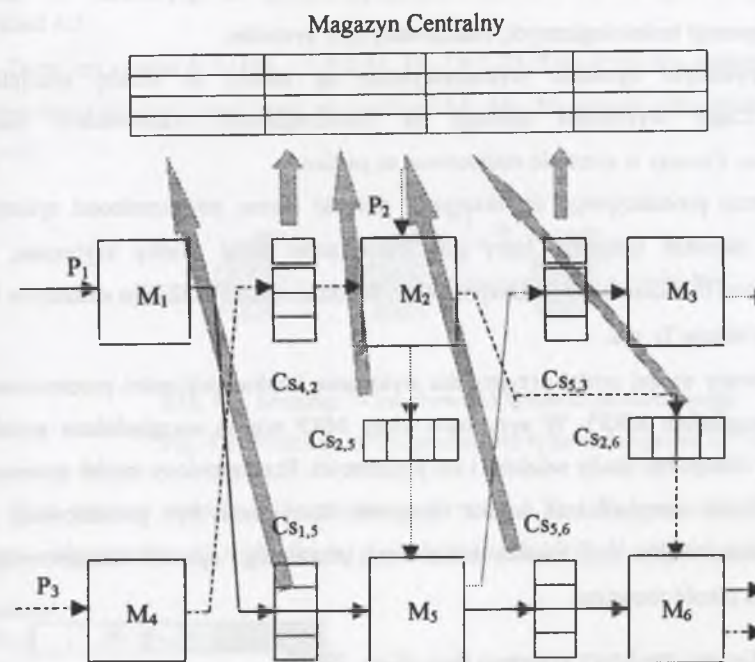
Definicja 4.2. (System produkcyjny)

Systemem produkcyjnym S nazywamy trójkę: $S = (\{M_i, i = 1, 2, \dots, m\}, \{P_j, j = 1, 2, \dots, n\}, C_s)$, która określa zbiór zasobów, zbiór procesów produkcyjnych oraz magazyn centralny o znanej pojemności, gdzie:

M_i – i -ty zasób,

P_j – j -ty proces,

C_s – magazyny o łącznej pojemności C_s .



$M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6$ - zasoby

P_1, P_2, P_3 - procesy

$Cs_{4,2}, Cs_{5,3}, Cs_{2,5}, Cs_{2,6}, Cs_{1,5}, Cs_{5,6}$ - magazyny międzyoperacyjne

Rys. 4.2. Struktura systemu produkcyjnego

Fig. 4.2. Structure of the production system

System procesów współbieżnych jest **spójny**, jeżeli pomiędzy dowolnymi dwoma zasobami istnieje możliwość przejścia, wzdłuż istniejących marszrut lub ich fragmentów, bez względu na kierunek przebiegu.

Pojęcie procesu jest równoznaczne z pojęciem procesu technologicznego, który określa wzajemne relacje między przetwarzanym materiałem a środkami produkcji. Realizacja każdego zlecenia produkcyjnego odbywa się wzdłuż marszruty produkcyjnej zdeterminowanej procesem technologicznym, charakterystycznym dla danego rodzaju produktu. W skład procesu wchodzi asynchronicznie (zachowując logiczne następstwo występowania zdarzeń) wykonywane operacje technologiczne, transportowe i kontrolne oraz operacje składowania. Przyjęto, że liczba i rodzaj operacji technologicznych są jednoznacznie określone dla każdego zlecenia. Czasy

trwania operacji transportu i kontroli międzyoperacyjnej uwzględniono w czasach jednostkowych operacji technologicznych, realizowanych w systemie.

W rozpatrywanym systemie wykorzystywane są zasoby o niskiej specjalizacji (uniwersalne). Czasy wykonania operacji na poszczególnych stanowiskach nie są zsynchronizowane. Procesy w systemie realizowane są partiami.

Pracę systemu produkcyjnego charakteryzuje długość okresu powtarzalności systemu T (zwanego dalej okresem systemu), który jest wyznaczony przez zasoby krytyczne, albo odpowiada okresowi rozliczeniowemu. Dysponowany fundusz czasu T_i każdego z zasobów M_i w okresie T spełnia relację $T_i \leq T$.

Zaproponowany model został przyjęty dla wykazania konkurencyjności proponowanego podejścia (np. względem MRP). W systemach klasy MRP nie są uwzględniane problemy transportu, czasu transportu, liczby wózków i ich pojemności. Przedstawiony model systemu nie wyklucza możliwości uwzględnienia środka transportu, który może być potraktowany jako zasób, a czas transportu jako czas trwania realizowanej przez niego operacji transportowej, co nie ma wpływu na jakość rozważań.

Definicja 4.3. (Macierz struktury systemu) (por. [Kłós, 1998])

Dany jest system $S = (\{M_i, i = 1, 2, \dots, m\}, \{P_j, j = 1, 2, \dots, n\}, C_s)$. Macierz struktury systemu M_s jest to macierz o wymiarach $m \times n$. Elementy macierzy przyjmują wartości:

$$n_{ij} = \begin{cases} k, & \text{jeżeli } j\text{-ty proces występuje } k \text{ razy w regule przydzielonej do } i\text{-tego zasobu,} \\ 1, & \text{jeżeli } j\text{-ty proces jest jedynym procesem operującym na } i\text{-tym zasobie lub } k=1, \\ 0, & \text{jeżeli } j\text{-ty proces nie przechodzi przez } i\text{-ty zasób.} \end{cases}$$

Definicja 4.4. (Reprezentacja przebiegu ustalonego) [Skołod, 1999b]

Dany jest system $S = (\{M_i, i = 1, 2, \dots, m\}, \{P_j, j = 1, 2, \dots, n\}, C_s)$. Macierzową reprezentacją przebiegu ustalonego procesów w systemie S nazywany jest zbiór macierzy

$$V = \{V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_m\}. \quad (4.1)$$

Każdy z elementów zbioru V jest macierzą V_i opisującą stan i -tego zasobu w chwili okresu T_i

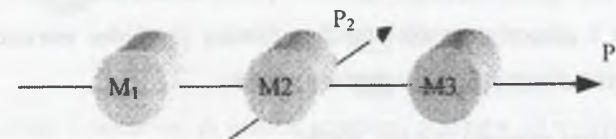
$$V_i = [v_1^i, v_2^i, \dots, v_k^i, \dots, v_T^i]. \quad (4.2)$$

Każdy z elementów v_k^i wektora V_i odnosi się do jednostki czasu i przyjmuje wartości:

$$v_k^i = \begin{cases} 0, & \text{jeżeli na } i\text{-tym zasobie w } k\text{-tej jednostce czasu nie jest realizowany żaden} \\ & \text{proces,} \\ j, & \text{jeżeli } i\text{-ty zasób jest zajęty w } k\text{-tej jednostce czasu przez } j\text{-ty proces.} \end{cases}$$

Przykład 4.2

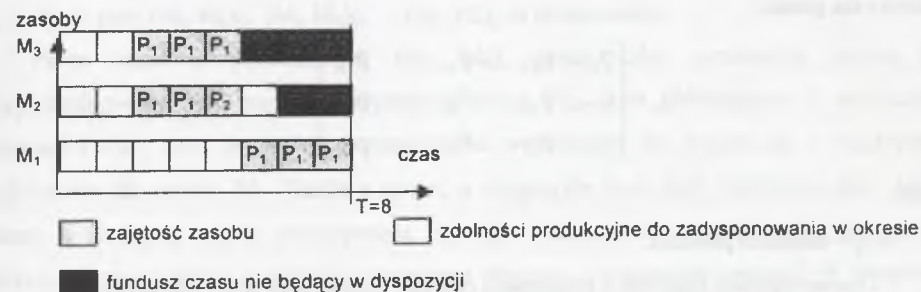
Dany jest system $S = (\{M_i, i = 1, 2, 3\}, \{P_j, j = 1, 2\}, 5)$ o przebiegu ustalonym o okresie T . Dysponowany fundusz czasu pracy na zasobach M_1, M_2, M_3 wynosi odpowiednio: $T_1 = 8, T_2 = 6, T_3 = 5$.



Rys. 4.3. Schemat 3-zasobowego systemu produkcyjnego

Fig. 4.3. Structure of the production system composed of 3 resources

Stan systemu opisuje zbiór wektorów $V = \{V_1, V_2 \text{ i } V_3\}$, opisujących stan zasobów systemu, odpowiednio: $V_1 = [0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1]$, $V_2 = [0, 0, 1, 1, 2, 0]$, $V_3 = [0, 0, 1, 1, 1]$.



Rys. 4.4. Diagram Gantta ilustrujący funkcjonowanie 3-zasobowego systemu procesów współbieżnych (z rys. 4.3)

Fig. 4.4. Gantt's chart illustrating an execution of 3-resources system (from Fig.4.3)

Proces produkcyjny może być wykonywany wzdłuż większej liczby marszrut, co oznacza, że operacje technologiczne z procesu produkcyjnego danego wytworu mogą być wykonane alternatywnie na większej liczbie niż na jednej maszynie. Czas wykonania danej operacji na maszynach alternatywnych może być różny.

Dopuszczalne marszrut w systemie tworzą macierz marszrut alternatywnych.

Definicja 4.5. (Macierz marszrut alternatywnych)

Macierzą marszrut alternatywnych M_{Aj} nazywamy macierz o wymiarach $m \times R$, gdzie m jest liczbą zasobów w systemie, R jest liczbą operacji do zrealizowania procesu P_j . Elementy macierzy przyjmują wartości:

$$a_{ij} = \begin{cases} t_{ij} - \text{czas realizacji operacji } j\text{-tego procesu na } i\text{-tym zasobie,} \\ 0, \text{ jeżeli } j\text{-ty proces nie przebiega przez } i\text{-ty zasób.} \end{cases}$$

Taka reprezentacja procesu daje pełny opis jego właściwości. Określa strukturę procesu, kolejność realizowanych operacji, podaje możliwe marszruty, zgodnie z którymi proces może przebiegać oraz czasy wykonania poszczególnych operacji na zasobach.

Dla każdego z procesów współbieżnych wybierana jest jedna marszruta do realizacji. Proces wraz z przyjętą marszrutą opisuje macierz procesu.

Definicja 4.6. (Macierz procesu) [Skołud, 1999b]

Proces opisuje macierz procesu M_{P_j} o wymiarach $3 \times R$. Pierwszy wiersz macierzy wskazuje zasób, na którym realizowane są operacje procesu. Drugi wiersz wskazuje czas trwania operacji na zasobie określonym w pierwszym wierszu tej samej kolumny. Trzeci wiersz macierzy zawiera czasy przygotowawczo-zakończeniowe związane z przystąpieniem do realizacji procesu określonego w pierwszym wierszu. R jest liczbą operacji j -tego procesu. Macierz ma postać:

$$M_{P_j} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1r} & \dots & P_{1R} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2r} & \dots & P_{2R} \\ P_{31} & P_{32} & \dots & P_{3r} & \dots & P_{3R} \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

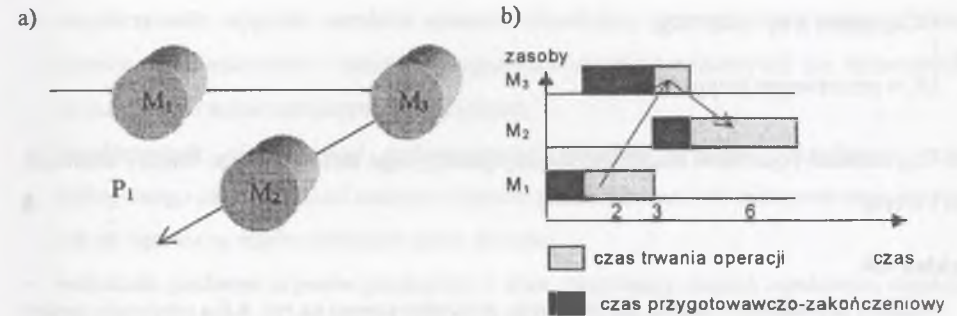
gdzie:

- M_{P_j} – macierz procesu,
- r – numer operacji (zgodnie z kolejnością operacji określonych przez marszrutę),
- R – liczba operacji w marszrucie j -tego procesu,
- p_{1r} – nr zasobu, na którym realizowana jest r -ta operacja,
- p_{2r} – czas trwania r -tej operacji,
- p_{3r} – czas przygotowawczo-zakończeniowy związany z przystąpieniem do realizacji r -tej operacji.

Przykład 4.3.

Dany jest 3-zasobowy system procesów współbieżnych. Przez zasoby M_1, M_2, M_3 przebiega proces P_1 , jak zilustrowano na rys. 4.5.

Macierz procesu ma postać $P_1 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 \\ 2 & 1 & 3 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$.



Rys. 4.5. System 3-zasobowy; a) schemat przebiegu procesów, b) wykres Gantta

Fig. 4.5. System composed of 3-resources: a) structure of processes flow, b) Gantt's chart

Definicja 4.7. (Para zasobów sąsiadujących) [Kłós, 1998]

Parę zasobów sąsiadujących $(M_i, M_k)_j$ stanowią dwa zasoby M_i i M_k , gdzie $i \neq k$, przez które przebiega proces P_j . Ponadto wykonanie operacji $P_j(M_i)$ bezpośrednio poprzedza wykonanie operacji $P_j(M_k)$. Jeśli przez zasoby M_i i M_k przebiega kilka marszrut procesów P_1, P_2, \dots, P_j , to pary $(M_i, M_k)_1, (M_i, M_k)_2, \dots, (M_i, M_k)_j$ są równoważne.

Parze zasobów sąsiadujących $(M_i, M_k)_j$, przez które przechodzi proces P_j , przyporządkowany jest magazyn międzyoperacyjny $C_{s_{ik}}$. Jest to magazyn o skończonej pojemności $C_{s_{ik}}$, przy czym jest on magazynem wejściowym dla zasobu M_k i magazynem wyjściowym dla zasobu M_i . Każde z miejsc w magazynie może być traktowane jako zasób własny o zerowym czasie wykonywania operacji. Nieobecność magazynu jest tożsama z założeniem, że pomiędzy zasobami umieszczono magazyn o pojemności zerowej. W literaturze dotyczącej ESW pojawia się wiele określeń magazynów rozmieszczonych pomiędzy stanowiskami [Sawik, 1992], [Lis, Santarek, Strzelczak, 1994], np.: międzyoperacyjne, międzystadialne, wejściowe, wyjściowe. W ogólnym przypadku pojemność magazynów jest określona przez ilość miejsca zarezerwowaną w magazynie centralnym. Projektując system współbieżnych procesów produkcyjnych, należy określić pojemności magazynów lokalnych (magazynów międzyoperacyjnych) i/lub magazynu centralnego. Magazyny lokalne pomagają w pełni wykorzystać zasoby, podczas gdy magazyn centralny zapewnia wyższą elastyczność całego systemu. Magazyny mogą stanowić oddzielne urządzenia lub być uzupełnieniem albo rozszerzeniem systemu transportowego [Sawik, 1992].

Definicja 4.8. (Macierz pojemności systemu)

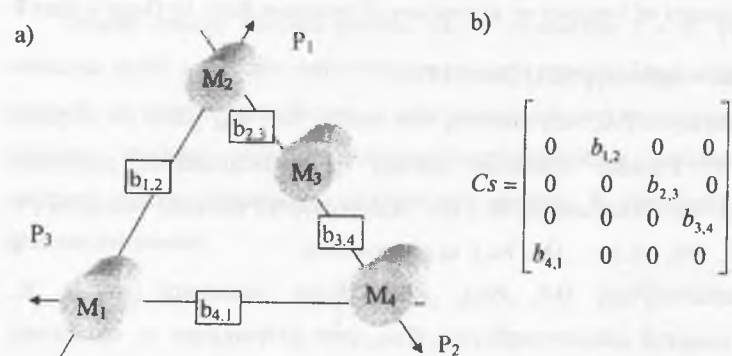
Macierzą pojemności systemu M_C , nazywana jest macierz o wymiarach $m \times m$, gdzie m jest liczbą zasobów w systemie. Elementy macierzy przyjmują wartości:

$$c_{ik} = \begin{cases} Cs_{ik}, & \text{jeżeli } \exists P_j: (M_i, M_k)_j, \\ 0, & \text{w przeciwnym przypadku,} \end{cases}$$

gdzie Cs_{ik} oznacza pojemność magazynu międzyoperacyjnego umieszczonego między zasobami i-tym i k-tym.

Przykład 4.4

Macierz pojemności systemu dla przebiegu przedstawionego na rys. 4.6.a przyjmuje postać jak na rys. 4.6.b.



Rys. 4.6. System 4-zasobowy, a) schemat przebiegu procesów, b) macierz pojemności systemu

Fig. 4.6. System composed of 4-resources: a) structure of processes flow, b) matrix of the system capacity

4.2.1.2. Wskaźniki oceny systemu

Wyróżnikiem wielosortymentowej produkcji rytmicznej jest powtarzalność stanów systemu, osiągalnych co stały przedział czasu równy okresowi systemu. Powtarzalność stanów dotyczy całego systemu, a więc również jego pojedynczych składników (zasobów, magazynów, procesów). Najczęściej spotykane kryteria i wskaźniki oceny funkcjonowania systemów produkcyjnych przedstawiono w rozdziale 2.

W systemach, których pracę charakteryzuje periodyczność stanu ustalonego, wyznaczona wartość wskaźnika dla jednego cyklu odpowiada jego wartości w całym okresie realizacji zlecenia.

Funkcjonowanie systemu można ocenić, bazując na następujących wskaźnikach:

- **współczynnik zajętości zasobów systemu**, określający stosunek czasu zajętości zasobów (czasów jednostkowych i czasów przygotowawczo-zakończeniowych) do dysponowanego czasu pracy w stanie ustalonym pracy systemu,
- **współczynnik efektywności wykorzystania zasobów systemu**, określający stosunek efektywnego czasu zajętości zasobów (czasów jednostkowych) do maksymalnego możliwego ich obciążenia w stanie ustalonym pracy systemu,
- **wskaźnik poziomu zapasów produkcji w toku**, określający stopień zapełnienia magazynów międzystanowiskowych (magazynu centralnego) podczas przebiegu ustalonego pracy systemu.

Współczynnik zajętości zasobów przez procesy proste w dysponowanym czasie, w okresie T , jest opisany przez zależność:

$$\eta_i = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{u=1}^m (m_u t_{uj} + tpz_{uj})}{\sum_{i=1}^m T_i}, \quad (4.4)$$

gdzie:

η_i - współczynnik zajętości zasobów,

T_i - dysponowany fundusz czasu pracy na i-tym zasobie w okresie T ,

m_{ij} - powtarzalność j-tego procesu na i-tym zasobie w okresie T ,

t_{ij} - czas trwania operacji j-tego procesu na i-tym zasobie,

tpz_{ij} - czas przygotowawczo-zakończeniowy j-tego procesu na i-tym zasobie,

m - liczba zasobów,

n - liczba procesów.

Zajętość zasobów nie jest miarą efektywności. W skrajnym przypadku, przy 100% zajętości, w systemie mogą być realizowane wyłącznie czasy przygotowawczo - zakończeniowe.

Współczynnik efektywności wykorzystania zasobów przez procesy proste w dysponowanym czasie w okresie T opisuje zależność (porównaj z [Banaszak, Jędrzejek, 1993]):

$$\eta = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{u=1}^m m_u t_{uj}}{\sum_{i=1}^m T_i}, \quad (4.5)$$

gdzie:

η - współczynnik efektywności wykorzystania zasobów,

T_i - dysponowany fundusz czasu pracy na i-tym zasobie w okresie T ,

m_{ij} - powtarzalność j-tego procesu na i-tym zasobie w okresie T ,

t_{ij} - czas trwania operacji j-tego procesu na i-tym zasobie,

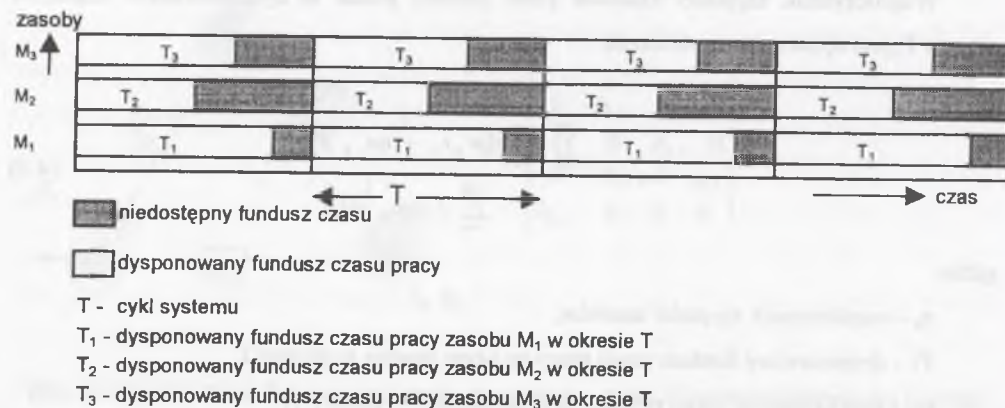
m - liczba zasobów,

n - liczba procesów.

W systemie, w którym $\forall i, \forall j, t_{pz}=0$, wartości współczynników zajętości zasobów oraz efektywności wykorzystania zasobów są identyczne ($\eta=\eta_z$).

Przykład 4.5. Dysponowany fundusz czasu pracy

Dany jest system 3 - zasobowy M_1, M_2, M_3 , o okresie T .



Rys. 4.7. Diagram dysponowanego funduszu czasu pracy zasobów w systemie

Fig. 4.7. Diagram of resources capacity disposal

W przypadku gdy dysponowane fundusze czasu (T_1, T_2, T_3) w okresie T wszystkich zasobów są równe T , zależność (4.5) przyjmuje postać:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n m_{ij} t_{ij}}{mT}, \quad (4.6)$$

gdzie T jest okresem systemu. Pozostałe oznaczenia jak w zależności (4.5).

Współczynnik η przyjmuje wartość z przedziału domkniętego $<0,1>$. Wartość „zero” jest przyjmowana wtedy, gdy na zasobach w okresie T nie jest wykonywany żaden proces. Wartość „jeden” przyjmowana jest, gdy wszystkie zasoby są nieustannie zajęte, a zmiana realizowanego procesu na inny nie wymaga nakładu czasu przygotowawczo-zakończeniowego.

Interpretacja współczynnika η znajduje bezpośrednie odniesienie do OPT, której podstawowe zasady przedstawiono w rozdziale 2.

Zapasy produkcji w toku, dla systemu o charakterze cyklicznym, dzieli się na [Durlik, 1996]:

- zapas operacyjny - elementy znajdujące się w obróbce i montażu,
- zapas międzyoperacyjny - elementy transportowane i znajdujące się w magazynach międzyoperacyjnych.

Szczegółowy podział zapasów międzyoperacyjnych wyróżnia:

- zapas obrotowy - wynikający z braku synchronizacji wydajności pomiędzy stanowiskami,
- zapas transportowy - elementy transportowane,
- zapas gwarancyjny - elementy znajdujące się na stanowiskach wprowadzane do produkcji w przypadku krótkookresowych braków narzędzi, braków materiałowych czy nieobecności obsługi na stanowisku roboczym,
- zapas kompensacyjny - elementy będące na stanowiskach odkładczych, służące do wyrównywania okresowych zmian wydajności pracy.

Wskaźnik poziomu zapasów produkcji w toku dla systemu współbieżnych procesów o strukturze regularnej jest sumą wszystkich elementów na zasobach i w magazynach międzyoperacyjnych w okresie pracy systemu T i jest równy:

$$D = \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^T (\sum_{i=1}^m Z_{jit} + \sum_{s=1}^w C_{jst}), \quad (4.7)$$

gdzie :

D - zapas produkcji w toku w systemie,

Z_{jit} - liczba przedmiotów j-tego asortymentu w t-tej jednostce czasu, na i-tym stanowisku,

C_{jst} - liczba przedmiotów j-tego asortymentu w t-tej jednostce czasu w s-tym magazynie międzyoperacyjnym,

m - liczba zasobów w systemie,

w - liczba magazynów międzyoperacyjnych w systemie,

n - liczba procesów realizowanych w systemie,

T - okres systemu.

Wskaźnik zapasów produkcji w toku D , dla systemu współbieżnych procesów produkcyjnych o strukturze regularnej, jest sumą wszystkich elementów na zasobach i w magazynach międzyoperacyjnych, w przebiegu ustalonym w okresie T systemu.

Zadaniem organizatora produkcji dedykowanej oczekiwaniom klienta jest obniżenie kosztów produkcji. W tym celu dąży się do maksymalizacji stopnia wykorzystania zasobów (wartość współczynnika η jest równa 1) oraz do utrzymania zapasów produkcji w toku na minimalnym dopuszczalnym poziomie.

4.2.2. Model zlecenia

Zlecenie produkcyjne reprezentuje oczekiwania klienta, których miarą są wielkość zlecenia oraz termin realizacji zlecenia. Reprezentuje również wyniki planowania, takie jak: wielkość partii produkcyjnej, okresowość wprowadzania partii oraz wymagana pojemność magazynów, umożliwiająca realizację zlecenia w określonych partiach.

4.2.2.1. Struktura zlecenia

Zlecenie zewnętrzne (klienta) może obejmować zestaw wielu asortymentów. W systemie współbieżnych procesów produkcyjnych zlecenie wewnętrzne (zwane produkcyjnym) obejmuje wykonanie określonej liczby jednorodnych produktów w ograniczonym czasie. Każdy proces traktowany jest jak niezależne zlecenie. Kilka zleceń może być realizowanych współbieżnie w systemie. Nazywane są portfelem zleceń.

Definicja 4.9. (Zlecenie produkcyjne)

Zleceniem produkcyjnym nazywamy szóstkę $Z_j = (P_j, I_j, tz_j, M_{A_j}, B_j, T'_j)$, gdzie:

P_j – j-ty proces produkcyjny,

I_j – wielkość serii (produkcji) – liczba elementów, jaką trzeba wykonać, żeby skompletować zlecenie (zgodnie z j-tym procesem),

tz_j – zadany termin zakończenia realizacji j-tego zlecenia; określa termin zakończenia realizacji zlecenia produkcyjnego, przy czym czas przewidywany na realizację zlecenia nie może być mniejszy od iloczynu najdłuższego czasu wykonania operacji w marszrucie przez wielkość serii produkcyjnej,

M_{A_j} – macierz alternatywnych marszrut produkcyjnych; określa liczbę i kolejność zasobów w j-tym procesie produkcyjnym (realizacja danego zlecenia może odbywać się wzdłuż kilku alternatywnych marszrut produkcyjnych),

B_j – wielkość partii produkcyjnej j-tego zlecenia,

T'_j – okres wprowadzania partii produkcyjnej j-tego zlecenia.

Zlecenie produkcyjne odpowiada procesowi. Każdy z procesów jest opisany przez macierz marszrut alternatywnych M_{A_j} oraz macierz procesu M_{P_j} . Decyzje o wielkości partii i terminie ich realizacji należą do producenta. Dobierane są tak, by zlecenie było wykonane w terminie. Wielkość partii produkcyjnej determinowana jest aktualnym stanem systemu oraz planowanym terminem zakończenia. Przy podejmowaniu decyzji o wielkości partii producent jest dodatkowo determinowany wielkością dostępnej pojemności magazynów międzyoperacyjnych lub magazynu centralnego.

4.2.2.2. Wskaźniki oceny zlecenia

Terminowość realizacji zlecenia określa, czy dane zlecenie produkcyjne realizowane wzdłuż zadanej marszruty zostanie wykonane nie później niż w założonym terminie. Jeśli, zgodnie z zasadą „lean manufacturing”, producent przyjmie punkt widzenia klienta, wówczas najistotniejszym wskaźnikiem realizacji zlecenia jest właśnie terminowość jego realizacji.

Niech n stanowi liczbę zleceń produkcyjnych realizowanych w systemie. Elementy wektora $\delta = [\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_j, \dots, \delta_n]$ określają przekroczenie terminu lub zapas czasu w stosunku do zaplanowanego terminu realizacji zleceń. Każdy z elementów wektora δ jest **wskaźnikiem terminowej realizacji zlecenia** i przyjmuje wartości:

$$\delta_j = \begin{cases} -k_j, & \text{jeżeli termin realizacji } j\text{-tego zlecenia jest przekroczony o } k_j \text{ jednostek czasu,} \\ 0, & \text{gdy zlecenie zostanie wykonane dokładnie w oczekiwanym terminie,} \\ k_j, & \text{jeżeli termin realizacji } j\text{-tego zlecenia zostanie wyprzedzony o } k_j \text{ jednostek czasu.} \end{cases}$$

Wskaźnikiem pozwalającym na ocenę terminowości realizowanych zleceń jest **współczynnik efektywności realizacji zlecenia** μ , który, podobnie jak w przypadku oceny funkcjonowania systemu, dotyczy systemu będącego w stanie ustalonym. Jest zależny od terminu zakończenia realizacji zlecenia wyznaczonego przez klienta (por. [Skołod, 1998e]). Opisuje go zależność:

$$\mu = \frac{tz_j - tr_j}{tz_j}, \quad (4.8)$$

gdzie:

tr_j – rzeczywisty możliwy do osiągnięcia termin realizacji zlecenia,

tz_j – planowany albo dyrektywny termin realizacji zlecenia (wyznaczony przez klienta, planistę lub wynikający z badań rynku).

Współczynnik efektywności realizacji zlecenia zależy od planowanego lub dyrektywnego terminu realizacji zlecenia tz_j oraz od rzeczywistego terminu realizacji zlecenia tr_j . Współczynnik ten określa, czy zlecenie zrealizowane zostało w założonym terminie.

Współczynnik μ przyjmuje wartość 1, gdy rzeczywisty termin realizacji zlecenia t_r pokrywa się z terminem wyznaczonym przez klienta t_z . Wartość μ większa od jedności ($\mu > 0$) oznacza, że termin realizacji zlecenia t_r wyprzedza termin planowany t_z , natomiast przyjmowanie przez μ wartości mniejszej od jedności ($\mu < 0$) oznacza, że termin realizacji zlecenia opóźnia się w stosunku do terminu planowanego. Zadaniem dyspozytora systemu jest takie zaplanowanie produkcji, by realizacja zlecenia została zakończona w terminie oczekiwanym przez klienta, to jest w chwili t_z . Jest to równoważne uzyskaniu wartości współczynnika μ równej 1.

Na podstawie podanych wskaźników możliwa jest ocena dedykowalności systemu do obsługi określonej klasy zleceń produkcyjnych. Dedykowalność rozumiana jest tutaj jako dopasowanie systemu do obsługi zbioru zleceń, wyznaczonego przez zadane wskaźniki oceny.

4.2.3. Podsumowanie

W rozdziale przedstawiono model przepływu wieloasortymentowej produkcji rytmicznej, który pozwala na analityczne wyznaczenie jakościowych i ilościowych parametrów systemu. Model systemu produkcyjnego umożliwia uwzględnienie struktury systemu i jego możliwości wytwórczych oraz parametrów realizowanej w nim produkcji dzięki uwzględnieniu zasobów systemu (maszyn), dostępnych pojemności magazynów, jak i realizowanych w nim w danej chwili procesów. Zaproponowano wektorową reprezentację przebiegu ustalonego procesów realizowanych w systemie. Ponadto przyjęto, iż każdy z zasobów systemu dysponuje różnym funduszem czasu pracy w okresie systemu.

4.3. Planowanie przepływu produkcji

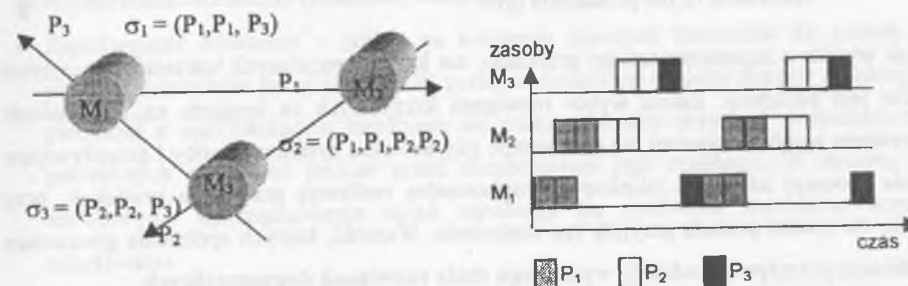
Przyjmuje się, że w rozważanych systemach sterowanie przepływem produkcji jest określone i realizowane za pomocą reguł wyboru priorytetu. Sterowanie to (patrz: reguły) musi gwarantować dopuszczalność realizacji tych przepływów (patrz rozdział 4.3.1). Oznacza to, że pozytywna odpowiedź na pytanie: czy dane zlecenie może być realizowane w danym systemie jest równoważne określeniu, jakie reguły, jak i gdzie powinny być przydzielone. Zagadnieniu temu poświęcony został rozdział 4.3.2. Dodatkową zaletą tak przyjętego sposobu obsługi przepływu jest możliwość realizacji sterowania przepływem produkcji, gwarantującej jej cykliczny przebieg bez względu na zakłócenia w poszczególnych przepływach.

4.3.1. Przepływy dopuszczalne

Przedstawiono (przykład 4.6) funkcjonowanie systemu wytwórczego przy różnych regułach wyboru priorytetu przydzielonych do zasobów.

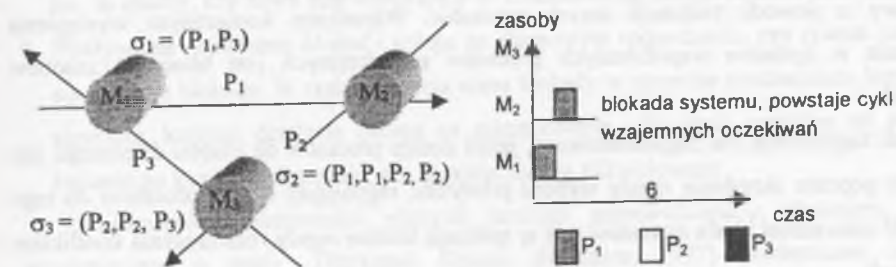
Przykład 4.6

Rozważmy system, w którym przyjęto sterowanie rozproszone. Do zasobów systemu przydzielono reguły wyboru priorytetu $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. Na rysunku 4.8 zilustrowano taki przydział reguł na zasobach, który zapewnia funkcjonowanie systemu bez blokad i bez zagłodeń. Rysunek 4.9, z kolei, przedstawia przydział reguł, który powoduje, że po zrealizowaniu procesu P_1 na zasobie M_1 powstaje cykl wzajemnych oczekiwań, gdyż proces P_3 może zostać wykonany dopiero po zrealizowaniu na M_3 , natomiast w regule przydzielonej do M_3 proces P_3 nie został przewidziany do realizacji. Z tego samego powodu na zasobie M_2 nie jest możliwe wykonanie drugiego w sekwencji procesu P_1 .



Rys. 4.8. Przydział reguł, umożliwiający dopuszczalną jakościowo realizację przepływu produkcji – dopuszczalna realizacja przepływu produkcji

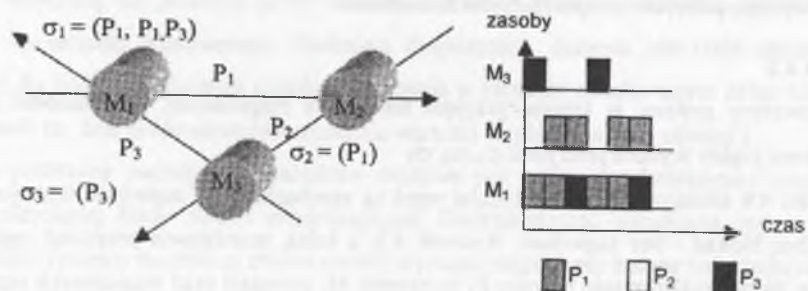
Fig. 4.8. Dispatching rules allocation guaranting feasible production



Rys. 4.9. Przydział reguł, powodujący powstanie cyklu wzajemnych oczekiwań (blokada systemu) - niedopuszczalna jakościowa realizacja przepływu produkcji

Fig. 4.9. Dispatching rules allocation causing the system's deadlock – non permissible realisation of the production flow

Rysunek 4.10 ilustruje sytuację, w której proces P_2 nie został uwzględniony w regułach przydzielonych do zasobów, tym samym proces ten nigdy nie będzie realizowany, co jest równoznaczne z jego zagłodzeniem.



Rys. 4.10. Przydział reguł, powodujący zagłodzenie procesu P_2 - niedopuszczalna jakościowo realizacja przepływu produkcji

Fig. 4.10. Dispatching rules allocation causing the process P_2 starvation - non permissible realisation of the production flow

Jak wynika z zaprezentowanego przykładu, nie każdy z możliwych wariantów przepływu procesów jest pożądany. Zatem wybór rozwiązań korzystnych ze względu na efektywność wykorzystania zasobów systemu ma sens wtedy, gdy struktura systemu (zasoby i przepływające przez nie procesy) zapewnia jakościowo dopuszczalną realizację przepływu produkcji, przy założeniu, że system posiada przyjęty typ sterowania. Warunki, których spełnienie gwarantuje taką realizację przepływu produkcji, wyznaczają zbiór **rozwiązań dopuszczalnych**.

Przez jakościowo dopuszczalną realizację rozumie się pracę systemu pozbawioną zagłodzeń oraz blokad. **Zagłodzenie** (ang.: starvation) następuje, gdy proces jest nieskończenie długo wstrzymywany przed zasobem. Dostęp tego procesu do zasobu dzielonego jest niemożliwy z powodu realizacji innych procesów. Warunkiem koniecznym wystąpienia zagłodzenia w systemie współbieżnych procesów produkcyjnych jest obecność zasobów dzielonych.

Brak zagłodzenia jest zagwarantowany, jeżeli dostęp procesów do zasobu dzielonego jest sterowany poprzez określenie reguły wyboru priorytetu, regulującej dostęp procesów do tego zasobu. W rozważanej klasie systemów rolę tę spełniają lokalne reguły rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych.

Przydzielanie reguł rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych do zasobów dzielonych gwarantuje, że każdy proces ma dostęp do systemu w skończonym czasie, gdyż zgodnie z definicją zapewnia dostęp każdego procesu do zasobu.

Definicja 4.10. (Blokada w systemie współbieżnych procesów produkcyjnych)

Blokada (ang.: deadlock) w systemie współbieżnych procesów produkcyjnych występuje, gdy równocześnie spełnione są następujące warunki konieczne:

- *wzajemne wykluczanie* - w danej chwili zasób może być zajęty tylko przez jeden proces,
- *niewywłaszczalność procesów* - zasób może zwolnić tylko ten proces, który go zajął,
- *częściowy przydział* - w czasie oczekiwania na zwolnienie zasobów przez inne procesy dany proces nie zwalnia przydzielonych mu i potrzebnych w dalszym ciągu zasobów,
- *cykl wzajemnych oczekiwań* - w systemie procesów współbieżnych musi istnieć pewna liczba procesów, z których każdy zajmuje zasób i oczekuje na zwolnienie kolejnego, zaś następny oczekuje na zwolnienie poprzedniego.

Problemy związane z powstawaniem blokad i zagłodzeń dotyczą systemów, w których zbiór zasobów jest dzielony przez zbiór procesów współbieżnych. Podstawowym warunkiem funkcjonowania systemu jest brak blokad. Istnieją trzy zasadnicze strategie prowadzące do funkcjonowania bez blokad [Banaszak, Jampolski, 1991]:

- *Zapobieganie blokadom* - polega na nałożeniu pewnych warunków na sposób żądania przydziału zasobów przez procesy. W praktyce stosowane są dwie metody zapobiegania. W pierwszej z nich blokadom zapobiega się przez całkowity przydział wszystkich zasobów potrzebnych procesowi jeszcze przed rozpoczęciem jego realizacji. W drugim, poprzez sekwencyjne uporządkowanie żądań zapobiega się spełnieniu warunków wzajemnego oczekiwania.
- *Unikanie blokad* - ma za zadanie przeprowadzanie systemu z jednego stanu bezpiecznego do drugiego. Innymi słowy, bada się, po zgłoszeniu każdego żądania przydziału zasobów, czy przejście stanów systemu związane ze zrealizowaniem tego żądania jest bezpieczne, czy też nie, to znaczy, czy nowy stan wynikający ze zrealizowania danego żądania jest bezpieczny.
- *Wykrywanie i usuwanie blokad* - polega na okresowym sprawdzaniu, czy system nie znajduje się w stanie blokady. W razie wykrycia stanu blokady w systemie uruchamiany jest specjalny algorytm, którego działanie polega na sukcesywnym odłączaniu zasobów od procesów i badaniu po każdym odłączeniu, czy blokada została zlikwidowana.

Porównanie efektywności różnych strategii przeciwdziałania blokadom w ESW przedstawiono w pracy [Barkaoui, Chaoui, Benamara, 1997]. Stwierdzono, że metoda wykrywania i usuwania blokad jest bardziej efektywna od metody zapobiegania ich występowaniu tylko wtedy, gdy czas odpowiadający fazie wykrywania jest mały w stosunku do całkowitego czasu obróbki zadań w systemie. Ma to miejsce jedynie w przypadku niewielkiej

liczby zleceń w toku produkcji. Problematyka zapobiegania, wykrywania, usuwania oraz unikania blokad w systemach produkcyjnych jest często poruszana w literaturze naukowej [Banaszak, Krogh, 1990], [Cho, Kumaran, Wysk, 1995], [Majdzik, 1998], [Venkatesh, Smith, 1995], [Gunther, 1981].

Zapewnienie warunków gwarantujących dopuszczalne jakościowo realizację procesów współbieżnych jest przedmiotem pracy [Kłos, Majdzik, Banaszak 1996]. Procedury służące do wykrywania i unikania blokad w ESW za pomocą grafów zaproponowano między innymi w pracy [Cho, Kumaran, Wysk, 1995]. Procedury te sprawdzają, czy przeniesienie półproduktu w systemie spowoduje blokadę. Podobnie autorzy pracy [Venkatesh, Smith, 1995] prezentują metodę wykrywania i usuwania blokad opartą na teorii grafów. Zagwarantowanie jakościowo dopuszczalnej realizacji przepływów w wielu przypadkach zapewnia samosynchronizację systemu. Na ten temat pisano w [Banaszak, Jędrzejek 1993], [Gattner, Kłos, Majdzik, 1997]. W pracach [McCormick, Rao, 1994] oraz [Wiendahl, Ahrens, 1995] wykazano, że decentralizacja sterowania umożliwi samosynchronizację systemu do zmian wprowadzanych przez nieprzewidziane zakłócenia systemu.

Uwaga. Prezentowane w dalszej części pracy algorytmy planowania przebiegu współbieżnych procesów produkcyjnych dopuszczają do realizacji tylko takie przepływy, które spełniają warunki zapobiegające powstawaniu blokad.

4.3.1.1. Struktura systemu a warunki dopuszczalności

Dostęp procesów do zasobów dzielonych regulują lokalne reguły rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych. Sekwencje reguł określają kolejność dostępu procesów do zasobów dzielonych, zapewniając tym samym rytmiczność pracy systemu. Aby zapewnić ustalony przebieg procesów, relacje pomiędzy regułami rozstrzygnięcia konfliktów przypisanych do zasobów uwzględniają **warunek bilansu systemu**. Oznacza on, że jeżeli dla zadanych reguł rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych i skończonych pojemności magazynów, w czasie odpowiadającym stałej wielokrotności okresu systemu, liczba elementów wprowadzonych do systemu odpowiada liczbie elementów z systemu wypływających, to spełniony jest warunek bilansu w systemie [Kłos, Majdzik, Banaszak, 1996], [Kłos, Gattner, Majdzik, 1997], [Kłos, Gattner, Skołod, 1997], [Kłos, Skołod, Gattner, 1998].

Definicja 4.11. (Wektor względnych powtórzeń reguł) [Kłos, Skołod, Gattner, 1998]

Wektor względnych powtórzeń reguł przydzielonych do zasobów systemu ma postać:

$$\chi = [\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_i, \dots, \chi_m], \forall i \in \{1, 2, \dots, m\}, \chi_i \in \mathbb{N}, \quad (4.9)$$

gdzie χ_i oznacza liczbę powtórzeń reguły wyboru priorytetu σ_i przydzielonej do i-tego zasobu względem pozostałych reguł przydzielonych do innych zasobów w systemie. ■

Warunek bilansu systemu jest podstawową zasadą determinującą przepływ produkcji w systemie współbieżnych procesów produkcyjnych.

Definicja 4.12. (Warunek bilansu systemu) (por. [Skołod, Gattner, Kłos, 1997])

Jeżeli do zasobów dzielonych przydzielono takie reguły rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych, że istnieje wektor względnych powtórzeń procesów χ spełniający warunki (4.9), to spełniony jest warunek bilansu systemu:

$$\begin{aligned} \chi_1 n_{1,1} &= \chi_2 n_{2,1} = \dots = \chi_i n_{i,1} = \dots = \chi_m n_{m,1}, \\ \chi_1 n_{1,2} &= \chi_2 n_{2,2} = \dots = \chi_i n_{i,2} = \dots = \chi_m n_{m,2}, \\ &\dots \\ \chi_1 n_{1,j} &= \chi_2 n_{2,j} = \dots = \chi_i n_{i,j} = \dots = \chi_m n_{m,j}, \\ &\dots \\ \chi_1 n_{1,n} &= \chi_2 n_{2,n} = \dots = \chi_i n_{i,n} = \dots = \chi_m n_{m,n}, \end{aligned} \quad (4.10)$$

gdzie:

χ - wektor względnych powtórzeń reguł,

χ_i - powtarzalność reguły przydzielonej do i-tego zasobu względem innych reguł w systemie,

n - liczba procesów operujących w systemie,

m - liczba zasobów w systemie,

$n_{i,j}$ - powtarzalność j-tego procesu w regule przydzielonej do i-tego zasobu. ■

Z założenia wiadomo, że parze zasobów sąsiadujących $(M_i, M_k)_j$ przyporządkowany jest magazyn międzyoperacyjny o ograniczonej pojemności różnej od zera. W przypadku gdy reguła przydzielona do zasobu poprzedzającego „produkuje” szybciej elementy, niż „konsumuje” je reguła przydzielona do zasobu następującego (nie jest spełniony warunek bilansu), to zapełnienie magazynu nastąpi po skończonej liczbie kroków. Zapełnienie wszystkich magazynów w systemie jest równoznaczne z ich brakiem (zerowa sumaryczna pojemność). Brak magazynów może być z kolei powodem występowania blokady. Zatem, by zapewnić równowagę systemu, liczba powtórzeń reguł pomnożona przez krotność wystąpień tego samego procesu występującego w tych regułach musi być identyczna.

Przykład 4.7

Dany jest system procesów współbieżnych (rys. 4.11). Na zasobach M_1, M_2, M_3 realizowane są procesy zgodnie z regułami wyboru priorytetu przydzielonymi do nich:

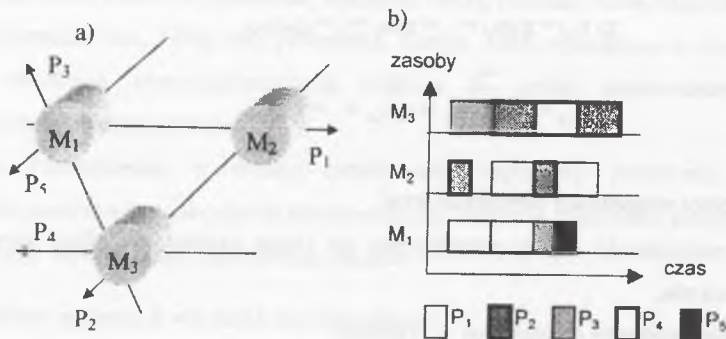
$$\sigma_1 = (P_1, P_1, P_3, P_5),$$

$$\sigma_2 = (P_2, P_1),$$

$$\sigma_3 = (P_3, P_2, P_4, P_2).$$

Macierze procesów przebiegających przez system są następujące:

$$P_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad P_2 = \begin{bmatrix} 2 & 3 \\ 1 & 2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad P_3 = \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 2 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad P_4 = \begin{bmatrix} 3 \\ 2 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad P_5 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$



Rys. 4.11. System procesów współbieżnych spełniający warunek bilansu systemu; a) schemat przebiegu procesów, b) diagram Gantta

Fig. 4.11. System of concurrent processes following the condition of the system balance; a) structure of the processes flow, b) Gantt's chart

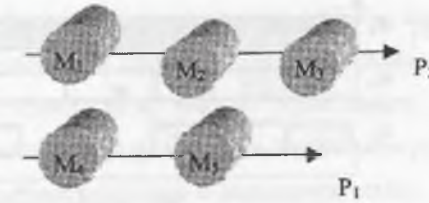
W systemie spełniony jest warunek bilansu, gdy elementy wektora względnych powtórzeń reguł wynoszą odpowiednio $\chi_1 = 1, \chi_2 = 2, \chi_3 = 1$.

Topologia systemu w znacznym stopniu wymusza jego zachowanie. Wyróżnia się trzy podstawowe struktury systemów produkcyjnych: liniową, otwartą oraz zamkniętą.

Uwaga: W dalszych rozważaniach przyjmuje się, że wszystkie struktury są spójne. Struktura systemu jest spójna, jeżeli istnieje możliwość przejścia pomiędzy dwoma zasobami wzdłuż istniejących marszrut.

System o strukturze liniowej

Systemy o strukturze liniowej, zwane w literaturze flow-shop [Pinedo, 1995], [Sawik, 1992], charakteryzują się brakiem zasobów współdzielonych.



Rys. 4.12. System procesów współbieżnych o strukturze liniowej

Fig. 4.12. Linear structure of system of concurrent processes

W systemach o takiej strukturze marszrut realizowanych procesów nie przecinają się, a tym samym nie oddziałują na siebie.

Jeżeli struktura systemu zapewnia równoległą realizację procesów, to zagwarantowane jest jego jakościowo dopuszczalne funkcjonowanie. Wynika to z niespełnienia warunków koniecznych występowania blokad i zagłódzeń. W systemach tego typu nie występują zasoby dzielone, a tym samym nie występuje cykl wzajemnych oczekiwań. Spełnienie warunków jakościowo dopuszczalnej realizacji procesów implikuje cykliczne zachowanie systemu [Majdzik, 1998].

Okres systemu o strukturze liniowej jest równy 1.

$$T = NWW(t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_m), \quad (4.11)$$

gdzie:

T – okres systemu,

$t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_m$ - najdłuższe czasy wykonania operacji w marszrutach $P_1, P_2, \dots, P_j, \dots, P_m$,

NWW - najmniejsza wspólna wielokrotność.

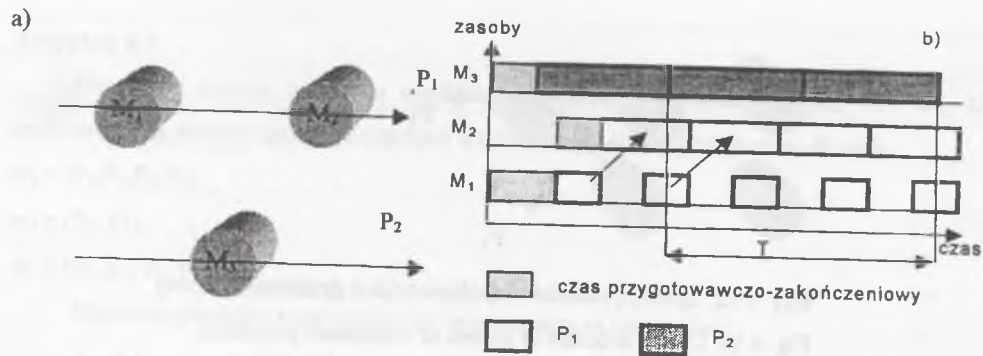
Czas przygotowawczo-zakończeniowy w systemach o strukturze liniowej może być pominięty, gdyż występuje jednorazowo, w czasie, gdy cykl pracy systemu nie został jeszcze ustalony.

Przykład 4.8

Dany jest system procesów współbieżnych o strukturze liniowej. Na zasobach M_1, M_2, M_3 realizowane są procesy P_1 i P_2 opisane przez macierze:

$$P_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 4 \\ 3 & 2 \end{bmatrix}, \quad P_2 = \begin{bmatrix} 3 \\ 6 \\ 2 \end{bmatrix}.$$

Okres systemu $T = 12$, co odpowiada najmniejszej wspólnej wielokrotności czasów trwania operacji realizowanych w systemie.

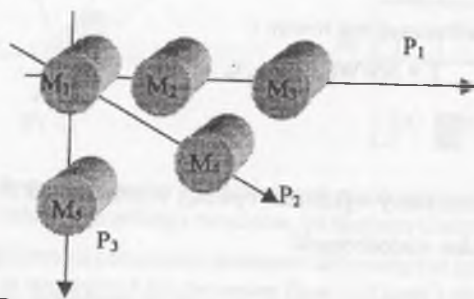


Rys. 4.13. System procesów współbieżnych o strukturze liniowej; a) schemat przebiegu procesów, b) diagram Gantta

Fig. 4.13. Linear structure of concurrent processes; a) structure of the production flow, b) Gantt's chart

System o strukturze otwartej

Systemem o strukturze otwartej nazywany jest taki system, w którym marszrutu produkcyjne nie zamykają się w cyklu i posiadają przynajmniej jeden zasób dzielony.



Rys. 4.14. System procesów współbieżnych o strukturze otwartej

Fig. 4.14. Open structure of the system of concurrent processes

Właściwość 4.1. (Warunki dopuszczalnej realizacji produkcji w systemie o strukturze otwartej)

Dany jest m -zasobowy system współbieżnych procesów produkcyjnych o strukturze otwartej. Jeżeli do zasobów dzielonych przydzielono reguły rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych, to zapewnione jest jakościowo dopuszczalne funkcjonowanie systemu.

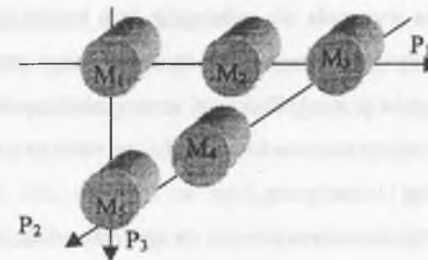
Właściwość ta wynika z faktu, że jakościowo dopuszczalną realizację procesów (brak blokad i zagłódzeń) gwarantuje odpowiedni przydział reguł rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych. Struktura otwarta nie tworzy cykli zamkniętych, a tym samym nie dopuszcza do

powstania cyklu wzajemnych oczekiwań, co jest jednym z warunków koniecznych powstania blokady. Przydział reguły rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych, zgodnie z definicją 4.1, nie dopuszcza do powstania zagłódzeń. Skończona liczba zasobów implikuje istnienie przebiegu nieustalonego. Zatem, są to warunki wystarczające, gwarantujące cykliczność systemu o strukturze otwartej, a więc gwarantujące dopuszczalne jakościowo jego funkcjonowanie, a także osiągnięcie przebiegu ustalonego w skończonym czasie.

System o strukturze zamkniętej

Systemem procesów współbieżnych o strukturze zamkniętej nazywany jest system, w którym marszrutu produkcyjne tworzą przynajmniej jeden cykl zamknięty.

Cykl zamknięty w systemie współbieżnych procesów produkcyjnych jest tworzony przez zbiór marszrutu przebiegających przez skończoną liczbę zasobów w taki sposób, że startując z dowolnego zasobu i poruszając się wzdłuż marszrutu lub ich fragmentów, bez względu na kierunek ich przebiegu, możliwy jest powrót do zasobu startowego, nie przechodząc dwukrotnie przez tę samą marszrutę.



Rys. 4.15. System procesów współbieżnych o strukturze zamkniętej

Fig. 4.15. Closed structure of the system of concurrent processes

Twierdzenie 4.1. (O pojemnościach magazynów międzyoperacyjnych) [Kłos, Skołod, Gattner, 1998]

Dany jest system współbieżnych procesów produkcyjnych $S = (\{M_i, i = 1, 2, \dots, m\}, \{P_j, j = 1, 2, \dots, n\}, Cs)$. Reguły rozstrzygnięcia konfliktów przydzielone do zasobów dzielonych gwarantują istnienie wektora względnych powtórzeń reguł χ , spełniającego warunek bilansu systemu. Jeżeli dowolnej parze $(M_i, M_k)_j$ zasobów sąsiadujących w systemie przydzielono pojemność magazynu międzyoperacyjnego, spełniającą zależność (4.12), to istnieje taki początkowy przydział procesów do zasobów, dla którego zagwarantowana jest jakościowo dopuszczalna realizacja procesów.

$$C_{s_{i,k}} \geq n_{i,j} \cdot \chi_i, \quad (4.12)$$

gdzie:

$C_{s_{i,k}}$ – dostępna pojemność magazynu międzyoperacyjnego,

$n_{i,j}$ – krotność wystąpienia j-tego procesu w regule przydzielonej do i-tego zasobu (element macierzy struktury systemu Ms),

j – proces produkcyjny przebiegający przez magazyn międzyoperacyjny $C_{s_{i,k}}$, i zasoby sąsiadujące $(M_i, M_k)_j$,

χ_i – liczba powtórzeń reguły wyboru priorytetu przydzielonej do i-tego zasobu (element wektora względnych powtórzeń reguł).

Dowód:

Blokada w rozważanym systemie może nastąpić w przypadku wystąpienia cyklu wzajemnych oczekiwań. Stan blokady systemu oznacza, że dla każdej pary sąsiadujących zasobów $(M_i, M_k)_j$, należących do cyklu wzajemnych oczekiwań, $C_{s_{i,k}}$ i zasób M_i zostały wypełnione przez elementy wytwarzane w procesie P_j . Przyjmijmy stan początkowy jako przydzielenie procesów do zasobów, przy opróżnionych magazynach międzyoperacyjnych.

1. Rozważmy przypadek, gdy reguła σ_i nie wykonała się całkowicie (nie wszystkie operacje występujące w sekwencji tej reguły zostały wykonane), zatem operacja j-tego procesu na i-tym zasobie została wykonana p_i razy, gdzie $p_i \leq n_{i,j}$. Z drugiej strony, aby wypełnić $C_{s_{i,k}}$ i zająć zasób M_i , proces P_j musi wykonać się p_i razy na zasobie M_i i p_k razy na zasobie M_k , przy czym $p_i - p_k = C_{s_{i,k}} + 1$. Stąd $p_i = C_{s_{i,k}} + p_k + 1$ oraz $p_i \leq n_{i,j}$.

Z twierdzenia wiadomo, że $n_{i,j} \cdot \chi_i \leq C_{s_{i,k}}$. Można zatem przyjąć, że $n_{i,j} \cdot \chi_i + L = C_{s_{i,k}}$, gdzie $L \in \mathbb{N}$ i $L \geq 0$. Ponieważ reguła σ_i nie wykonała się całkowicie (nie wszystkie procesy, które występują w sekwencji tej reguły wykonały się na zasobie dzielonym, do którego reguła została przypisana), zatem $\chi_i = 1$. Stąd otrzymujemy sprzeczność, gdyż $p_i = C_{s_{i,k}} + p_k + 1$, $n_{i,j} \cdot \chi_i + L = C_{s_{i,k}}$ i $p_i \leq n_{i,j}$. Czyli z jednej strony $p_i \leq n_{i,j}$, zaś z drugiej $p_i = C_{s_{i,k}} + p_k + 1 = n_{i,j} \cdot \chi_i + L + p_k + 1$, zatem nawet w przypadku, gdy $p_k = 0$ i $L = 0$, otrzymujemy $n_{i,j} + 1 \leq n_{i,j}$.

2. W przypadku, gdy reguła σ_i wykonała się dokładnie p_i razy, reguła σ_k wykona się p_k razy, stąd wynika, że $p_i \cdot n_{i,j} = p_k \cdot n_{k,j} \leq C_{s_{i,k}}$. Niemożliwe jest zatem wypełnienie magazynu międzyoperacyjnego $C_{s_{i,k}}$ i zasobu M_i .

3. Wszystkie inne przypadki można sprowadzić do jednej z wymienionych możliwości. ■

Z powyższego twierdzenia wynika, że przy zagwarantowaniu braku blokad w systemie i przydzielonych regułach rozstrzygania konfliktów zasobowych zapewniony jest również brak zagłódzeń.

Można wnioskować, że jeżeli reguły rozstrzygania konfliktów przydzielone do zasobów dzielonych gwarantują spełnienie warunku bilansu i dla każdej pary zasobów sąsiadujących spełniony jest warunek (4.12), to istnieje początkowy przydział procesów do zasobów, dla którego system współbieżnych procesów produkcyjnych charakteryzuje się cyklicznym przebiegiem ustalonym.

Z twierdzenia 4.1 wynika, że spełnienie warunku bilansu systemu i warunku na minimalne pojemności magazynów międzyoperacyjnych gwarantuje funkcjonowanie systemu współbieżnych procesów produkcyjnych o strukturze zamkniętej, pozbawione blokad i zagłódzeń. Spełnienie warunku bilansu systemu determinuje istnienie wektora względnych powtórzeń reguł. Wektor ten zapewnia z kolei periodyczne zachowanie systemu.

System współbieżnych procesów produkcyjnych posiada zatem przebieg **cykliczny** wtedy i tylko wtedy, gdy spełnia warunki jakościowo dopuszczalnej realizacji procesów oraz charakteryzuje się przebiegiem ustalonym. W przebiegu tym każdy proces składowy wykonuje się taką samą liczbę razy na zasobach z jego marszruty (tzn. spełniony jest warunek bilansu systemu). Czas trwania jednego cyklu przebiegu ustalonego jest **okresem pracy systemu T**.

4.3.1.2. Odporność na zakłócenia

Zadanie synchronizacji procesów w systemie polega na zdobyciu informacji o innych procesach współbieżnych w celu koordynacji ich wzajemnych oddziaływań. Jeżeli przebiegi wszystkich procesów są zsynchronizowane, system znajduje się w przebiegu ustalonym.

Jeżeli, bez względu na stan początkowy, system może w skończonej liczbie kroków osiągnąć przebieg ustalony, to ma własność samosynchronizacji [Dijkstra, 1974]. W systemie charakteryzującym się samosynchronizacją spełnione są warunki:

- brak występowania blokad,
- brak występowania zagłódzeń,
- każde przejście ze stanu dopuszczalnego systemu przeprowadza go w inny stan dopuszczalny,
- dla każdej pary stanów dopuszczalnych istnieje sekwencja stanów, pozwalająca na przejście z jednego stanu w drugi.

System współbieżnych procesów produkcyjnych ma własność samosynchronizacji wtedy i tylko wtedy, gdy niezależnie od stanu początkowego i priorytetów określonych dla kolejnych przejść system zawsze przechodzi do stanu ustalonego po skończonej liczbie przejść.

Właściwości

1. Jeżeli system współbieżnych procesów produkcyjnych posiada strukturę liniową lub otwartą i zagwarantowana jest w nim jakościowo dopuszczalna realizacja procesów, to posiada on

właściwość samosynchronizacji. Systemy o strukturze otwartej i liniowej mają charakter cykliczny. Wychodząc ze stanu dopuszczalnego zawsze osiągniemy inny stan dopuszczalny po skończonym okresie czasu.

2. Dany jest m-zasobowy system współbieżnych procesów produkcyjnych. Do zasobów dzielonych przydzielono reguły rozstrzygania konfliktów zasobowych, które gwarantują istnienie wektora względnych powtórzeń reguły, spełniającego warunek bilansu. Jeżeli pojemności magazynów międzyoperacyjnych spełniają zależność (4.12), to system ma własność samosynchronizacji.

Samosynchronizacja systemu umożliwi powrót systemu do przebiegu ustalonego po ustąpieniu zakłócenia. Nowy stan ustalony systemu może charakteryzować się innym okresem powtarzalności lub inną kolejnością realizacji procesów w cyklu.

Właściwość 2 określa warunki wystarczające, których spełnienie gwarantuje cykliczność systemu współbieżnych procesów produkcyjnych o strukturze zamkniętej. Cykl systemu po ustąpieniu zakłócenia może być inny niż przed jego pojawieniem się.

4.3.2. Dobór ograniczeń

W systemie określonym przez zbiór zasobów, procesów oraz przydzielone pojemności magazynów można sformułować następujące pytanie: jakie warunki musi spełnić zlecenie zgłaszające się do systemu, aby zostać zaakceptowanym do realizacji.

Rozwiązanie problemu sprowadza się między innymi do wyznaczenia zbioru dopuszczalnych wielkości partii produkcyjnych. Oznacza to, że dla każdej wielkości partii produkcyjnej z wyznaczonego zbioru zagwarantowana jest realizacja zlecenia w wymaganym terminie, która nie zakłóca przepływu procesów aktualnie realizowanych w systemie. Założenie to oznacza, że „wprowadzenie” nowego procesu do systemu, gdzie nie występuje blokada, nie zmienia tej właściwości systemu. Należy przy tym pamiętać, iż nie wszystkie z możliwych rozwiązań realizacji zleceń w systemie są dopuszczalne.

Ograniczenia służące syntezie systemu nie powinny być aplikowane w przypadkowy sposób. I tak w celu określenia terminu realizacji zlecenia konieczna jest znajomość dopuszczalnej wielkości partii produkcyjnej. Ta informacja, z kolei, ma sens tylko w przypadku, gdy w ogóle istnieje możliwość przyjęcia przynajmniej jednostkowej partii produkcyjnej. Tak więc sekwencja ograniczeń powinna zagwarantować ograniczenie zbioru rozwiązań. Ostateczne rozwiązanie jest wyznaczone przez koniunkcję ograniczeń. Kolejność ich stosowania, ze względu na logikę postępowania, nie jest zamienna. W przeciwnym razie, gdy ograniczenia są

przyjmowane w przypadkowej sekwencji, nie jest możliwe zastosowanie ograniczenia do syntezy systemu z powodu braku informacji zależnych od innego ograniczenia. I tak, w pierwszej kolejności uwzględniane są warunki, których spełnienie zapewnia jakościowo dopuszczalne funkcjonowanie systemu. Dopiero spełnienie tych warunków daje podstawę do oceny ilościowej funkcjonowania systemu. W rozpatrywanym przypadku kolejność sprawdzanych warunków jest następująca:

- I - wyznaczenie warunku gwarantującego dopuszczalne jakościowo funkcjonowanie systemu,
- II - dobór wielkości partii produkcyjnej,
- III - wyznaczenie przebiegu ustalonego systemu,
- IV - przydział pojemności magazynowej,
- V - sprawdzenie terminowości realizacji zlecenia.

Przykład 4.9. Przykład syntezy systemu

I. Sprawdza się, czy są spełnione warunki gwarantujące jakościowo dopuszczalną realizację procesów w systemie (warunek bilansu systemu).

II. Na podstawie analizy wykorzystania wspólnych zasobów z marszruty procesu ubiegającego się o dostęp do systemu wyznaczany jest zbiór dopuszczalnych wielkości partii produkcyjnych, dla których przepływ już realizowanych procesów nie jest zakłócony.

III. Dla każdej z wyznaczonych wielkości partii produkcyjnej określany jest przydział magazynów i ich pojemności, który gwarantuje realizację zlecenia bez zakłócania przepływu już realizowanych procesów. Wielkość partii zostaje ograniczona do takiej, dla której zapotrzebowanie na pojemność magazynową jest równe lub mniejsze od dysponowanej pojemności.

IV. Wyznaczany jest termin realizacji zlecenia dla wielkości partii określonej w poprzednich krokach. Jeżeli dla danej wielkości partii produkcyjnej termin ten przekracza zadany (przez klienta) termin realizacji, wówczas zlecenie nie jest przyjęte do realizacji. ■

Ostatecznie rozwiązanie problemu sprowadza się więc do wyznaczenia zbioru wielkości partii produkcyjnych, dla których określona jest organizacja produkcji gwarantująca terminową realizację zlecenia. Wielkości, które upoważniają do stwierdzenia, że dane zlecenie może zostać przyjęte do realizacji, to:

- okresowość wprowadzania partii produkcyjnych,
- reguły rozstrzygania konfliktów zasobowych oraz okresy ich aktywacji,
- przydział pojemności magazynowej,
- termin uruchomienia zlecenia.

4.3.3. Weryfikacja zleceń

Wyróżnia się trzy podejścia do problemu kolejności rozpatrywania zleceń oczekujących na realizację w systemie:

1. Zlecenia przyjmowane są do systemu w kolejności ich zgłaszania się.
2. Zlecenia przyjmowane są w kolejności odpowiadającej pilności zleceń (najkrótsze terminy dyrektywne lub planowane).
3. Zlecenia przyjmowane są zgodnie z wartościami wskaźników.

W dalszej części pracy przyjęto, że zlecenia są rozpatrywane w kolejności odpowiadającej pilności ich realizacji.

Proponowane podejście może być przydatne w sytuacjach, gdy zachodzi potrzeba podjęcia decyzji, czy w danym systemie, w którym realizowane są zlecenia produkcyjne dotyczące różnych asortymentów produkcji, można umieścić kolejne zlecenie. Łatwo zauważyć, że odpowiedź na to pytanie może być udzielona przy przyjęciu dwóch różnych założeń:

- nowo przyjęte do realizacji zlecenie zaburza przepływ procesów już realizowanych w systemie – oznacza to konieczność wyznaczenia nowego przebiegu ustalonego;
- nowo wprowadzone zlecenie nie zaburza przepływu procesów już realizowanych w systemie.

Przyjęcie pierwszego założenia oznacza konieczność wyznaczania nowego przebiegu ustalonego każdorazowo przy wprowadzaniu kolejnego zlecenia. Realizacja nowego przebiegu ustalonego pociąga za sobą konieczność każdorazowego sprawdzenia możliwości terminowej realizacji nowo wprowadzonego zlecenia oraz zleceń już realizowanych w systemie, a także sprawdzenia wcześniej przyjętych ograniczeń odnoszących się do: wielkości magazynu, (magazynów), wydajności zasobów, terminowości realizacji zleceń itp.

Przyjęcie drugiego założenia, zakładającego, że wprowadzanie nowych zadań nie może zakłócić przebiegu zleceń już realizowanych w systemie, gwarantuje ich bezblokadowy przebieg.

Przyjęty w pracy sposób podejścia do rozwiązania problemu odpowiada drugiemu założeniu, które można traktować jako jedną z wielu możliwych realizacji wariantu pierwszego.

4.3.4. Podsumowanie

Przedstawiono ograniczenia, których spełnienie gwarantuje jakościowo dopuszczalną realizację przepływów (bez blokad i bez zagłodzeń). Daje to możliwość analitycznego

wyznaczenia wartości wskaźników, będących podstawą oceny ilościowej funkcjonowania systemu. W rozpatrywanym przypadku ograniczenia przyjmują postać warunków wystarczających, a ich dotrzymanie zapewnia jakościowo dopuszczalną realizację procesów.

4.4. Podsumowanie rozdziału

W rozdziale zdefiniowano pojęcia związane z logistyką produkcji współbieżnej. Przedstawiono model przepływu wieloasortymentowej produkcji zbudowany z odrębnych modeli: modelu systemu i realizowanych w nim procesów oraz modelu napływających zleceń.

Sformułowano warunki wystarczające, których spełnienie gwarantuje zachowanie jakościowo dopuszczalnego funkcjonowania systemów o strukturach liniowej, otwartej i zamkniętej, a tym samym ograniczono zbiór wszystkich rozwiązań do zbioru rozwiązań dopuszczalnych. Scharakteryzowano dopuszczalne przepływy, które w dalszej części będą uwzględniane przy poszukiwaniu efektywnych rozwiązań.

Wykazano również, że zagwarantowanie dopuszczalnej jakościowo realizacji procesów jest możliwe przy spełnieniu warunku bilansu systemu i deterministycznych reguł wyboru priorytetu, co zapewnia cykliczne zachowanie systemu współbieżnych procesów produkcyjnych. W dalszej części pracy założono, że w rozpatrywanych systemach na etapie projektowania systemu zapewniono warunki gwarantujące dopuszczalne pod względem jakości funkcjonowanie systemu, tj. bez blokad i bez zagłodzeń.

5. Planowanie i sterowanie przepływem produkcji

Rozpatrywane w pracy systemy charakteryzują się współbieżną realizacją zadań i zmiennością jednocześnie produkowanego asortymentu. Zakłada się, że system współbieżnych procesów produkcyjnych jest systemem produkcji rytmicznej.

System produkcji rytmicznej może funkcjonować jedynie w warunkach całkowicie zdefiniowanych. W rzeczywistych systemach produkcyjnych takie warunki przebiegu procesu produkcyjnego w dłuższym przedziale czasu nie są możliwe do osiągnięcia. Zatem, system produkcji rytmicznej należy traktować jako pewien ideał, którego osiągnięcie powinno być celem działania w procesie planowania przepływu produkcji. Dla produkcji rytmicznej już na etapie planowania możliwa jest dokładna ocena funkcjonowania systemu. Zakłada się ponadto, że w systemie spełnione są warunki wystarczające, gwarantujące jakościowo dopuszczalną realizację procesów. Warunki te wyznaczają podzbiór dopuszczalnych realizacji procesów. Na tak określonym zbiorze formułowany jest tzw. problem satysfakcji, którego rozwiązanie sprowadza się do wyznaczenia realizacji procesu o wskaźniku oceny równym lub przekraczającym zadany poziom satysfakcji. Warunki te przedstawiono w poprzednim rozdziale pracy.

Oznacza to między innymi, że spełnienie warunków wystarczających, gwarantujących cykliczny przebieg ustalony, daje podstawę do analitycznego wyznaczania parametrów przepływu produkcji. Parametry te pozwalają sformułować problem planowania produkcji bądź to jako problem zorientowany na producenta (dedykowany producentowi), bądź też jako problem zorientowany na konsumenta (odbiorcę). W pierwszym przypadku, pod zadaną (dostępną) pojemność magazynów wyznaczany jest odbiorca, którego terminy realizacji zleceń pozwalają maksymalnie wykorzystać dostępne zasoby systemu. W drugim przypadku poszukiwany jest producent, którego stopień wykorzystania zasobów oraz pojemności dostępnych magazynów gwarantują terminową realizację zadanego zlecenia producenta.

Badanie wcześniej wyznaczonych warunków sprowadza się do sprawdzania kolejnych ograniczeń, tzn. do ograniczania domen zbioru rozwiązań dopuszczalnych.

Przedstawiono dwa podejścia do problemu:

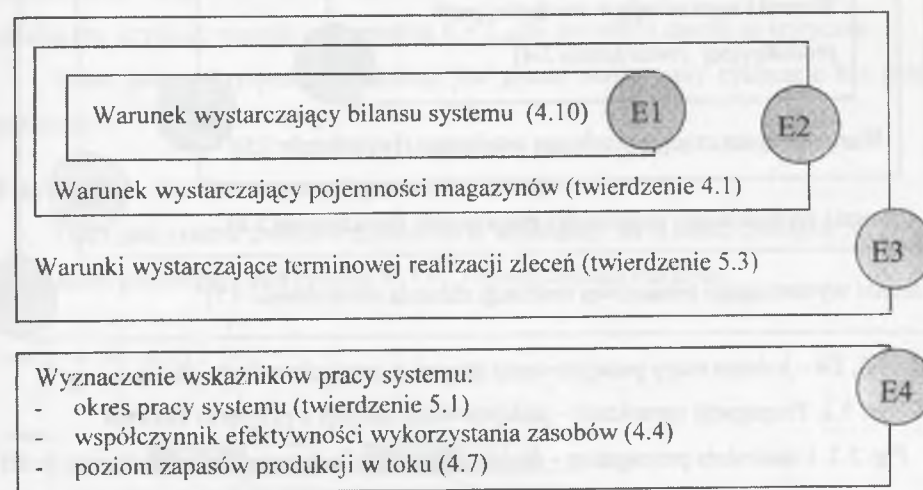
- Przyjmowanie pakietu zleceń do jednoczesnej realizacji w systemie, w którym wszystkie zasoby są nieobciążone (rozdział 5.2).
- Przyjmowanie pojedynczych zleceń do systemu, w którym już realizowana jest produkcja o charakterze powtarzalnym (rozdział 5.3), o ustalonym, rytmicznym przebiegu wcześniej

przyjętych zleceń. Akceptacja nowego zlecenia jest dopuszczalna pod warunkiem, że jego wprowadzenie nie zakłóca przebiegu zleceń już realizowanych.

Obrazują one sposób podejścia do weryfikacji zleceń dla aktualnego stanu współbieżnych procesów produkcyjnych.

Pierwsze podejście ma szczególne znaczenie przy uruchamianiu produkcji i wyznaczaniu parametrów, gwarantujących terminową realizację zleceń oraz optymalne wykorzystanie zasobów systemu. Daje również informacje o konieczności odrzucenia pakietów zleceń, które nie mają szans być zrealizowane w wymaganym terminie.

Decyzja o przyjęciu pakietu zleceń podejmowana jest w czterech etapach (patrz rys. 5.1). W pierwszym etapie (E1) następuje sprawdzenie warunku bilansu systemu dla przyjętych reguł rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych. W drugim etapie (E2) wyznaczane są wymagane pojemności magazynów międzyoperacyjnych (magazynu centralnego). W trzecim etapie (E3) sprawdzana jest możliwość realizacji zleceń w zadanym terminie. Spełnienie warunków z etapów E1, E2, E3 jest podstawą realizacji etapu czwartego (E4), to jest wyznaczania wartości wskaźników pracy systemu.



E1, E2, E3, E4 – kolejne etapy podejmowanie decyzji o przyjęciu pakietu zleceń

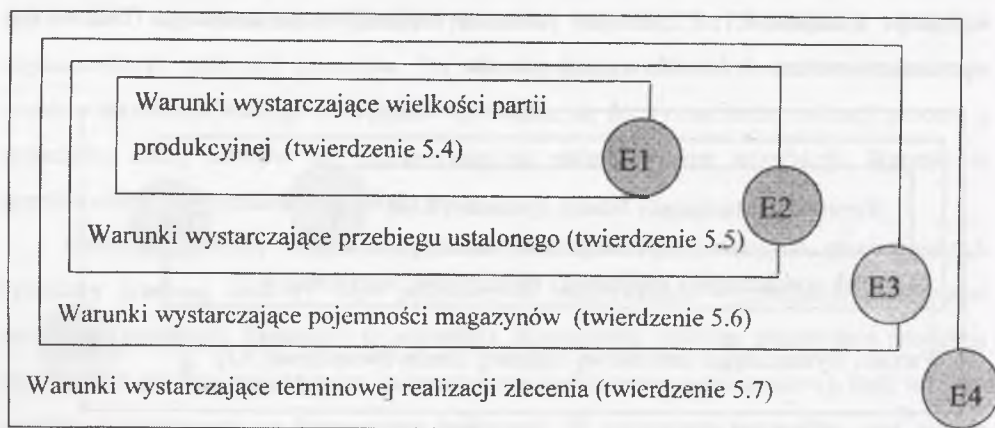
Rys.5.1. Propagacja ograniczeń - podejmowanie decyzji o przyjęciu pakietu zleceń

Fig. 5.1. Constraints propagation – decision making of acceptance of the set of production orders

W drugim podejściu weryfikacja zleceń polega na przeglądzie warunków wystarczających, gwarantujących realizację zleceń w oczekiwanym terminie, przy założeniu niezakłóconego przepływu procesów już realizowanych w systemie. Decyzja o przyjęciu

zlecenia do systemu podejmowana jest w czterech etapach (patrz rys. 5.2). W pierwszym etapie (E1) wyznaczana jest wielkość partii, która nie zakłóca realizacji zleceń już przyjętych do systemu. W drugim etapie (E2) wyznaczany jest okres uruchamiania partii, który jest równy okresowi systemu lub całkowitej wielokrotności tego okresu. W trzecim etapie (E3) wyznaczane są wymagane pojemności magazynów międzyoperacyjnych (magazynu centralnego). W czwartym etapie (E4) sprawdzana jest możliwość realizacji zleceń w zadanym terminie. Spełnienie warunków z etapów E1, E2, E3, E4 jest podstawą przyjęcia zlecenia do realizacji w systemie.

Planista ma możliwość sterowania realizacją zlecenia poprzez dobór wielkości partii produkcyjnej. Wielkość ta determinuje wskaźniki charakteryzujące realizację zlecenia. Rozwiązanie problemu sprowadza się do wyznaczenia zbioru wielkości partii produkcyjnych, dla których określona jest organizacja produkcji (okres uruchamiania partii, pojemności magazynów), gwarantująca terminową realizację zlecenia.



E1, E2, E3, E4 – kolejne etapy podejmowanie decyzji o przyjęciu pakietu zleceń

Rys. 5.2. Propagacja ograniczeń - podejmowanie decyzji o przyjęciu zlecenia

Fig. 5.2. Constraints propagation - decision making of acceptance of a production order

5.1. Parametry systemu

Parametrami rozpatrywanej klasy systemów wieloasortymentowej produkcji rytmicznej są: okres pracy systemu, liczba zasobów krytycznych, wymagane pojemności magazynów międzyoperacyjnych i/lub magazynu centralnego. Na podstawie wartości tych parametrów określa się, czy system jest **dedykowany** danej klasie zleceń, czy też nie.

Dla przykładu, rozważmy system umożliwiający realizację zleceń produkcyjnych w partiach produkcyjnych, nie przekraczających wielkości zdeterminowanej przez dostępną pojemność magazynów. Ta wielkość partii określa, z kolei, stopień wykorzystania zasobów systemu oraz możliwy termin realizacji zlecenia. Zatem, dany system produkcyjny traktowany jest jako dedykowany obsłudze takiej klasy zleceń produkcyjnych, w których możliwa jest realizacja określonej wielkości partii produkcyjnych.

5.1.1. Krytyczny zasób i krytyczny proces

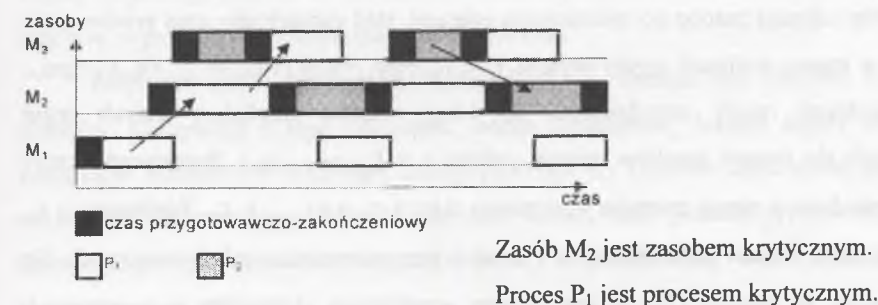
Zasób krytyczny, zwany „wąskim gardłem”, jest elementem synchronizującym przebieg produkcji. **Zasobem krytycznym** nazywany jest zasób wykorzystywany w sposób ciągły, bez przerw. Zasób krytyczny, zgodnie z TOC, wyznacza tempo pracy zasobów, występujących przed i za nim w marszrucie technologicznej. Decyduje on o wielkości i częstotliwości dostawy materiału oraz wydajności całego systemu produkcyjnego. W skrajnych przypadkach system ma bądź jeden zasób krytyczny, bądź też wszystkie jego zasoby są zasobami krytycznymi. Współczynnik efektywności wykorzystania zasobów w systemie, w stanie ustalonym, uzyskuje wartość maksymalną $\eta = 1$, gdy wszystkie zasoby są krytyczne.

Przez **proces krytyczny** rozumiany jest proces realizowany cyklicznie bez przerw i przestoju.

Przykład 5.1. Zasób krytyczny i proces krytyczny

Dany jest system procesów cyklicznych, składający się z trzech zasobów M_1, M_2, M_3 , przez które przebiegają dwa procesy P_1 i P_2 . Procesy opisują macierze:

$$P_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 4 & 3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad P_2 = \begin{bmatrix} 3 & 2 \\ 2 & 3 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$



Rys. 5.3. Przebieg procesów w 3-zasobowym systemie; wykres Gantt'a

Fig. 5.3. Processes flow in the system composed of 3-resources; Gantt's chart

Na rys. 5.3 przedstawiono taki przepływ procesów, w którym występuje zasób krytyczny (M_2) oraz proces krytyczny (P_1). ■

W systemie o strukturze liniowej, gdzie nie występują zasoby dzielone, krytyczny jest zasób, dla którego czasy realizacji operacji spełniają warunek:

$$t_{ij} = \text{MAX}(t_{i,1}, t_{i,2}, \dots, t_{i,n}), \quad (5.1)$$

gdzie t_{ij} jest czasem trwania operacji j -tego procesu na i -tym zasobie.

Wynika to z faktu, że okres pracy każdej z niezależnych marszrut wyznaczany jest przez najdłuższą trwającą operację w tej marszrucie (por. [Skołud, 1998d]).

Twierdzenie 5.1

Dany jest system procesów współbieżnych $S = (\{M_i, i = 1, 2, \dots, m\}, \{P_j, j = 1, 2, \dots, n\}, Cs)$. Jeżeli system charakteryzuje się przebiegiem cyklicznym oraz spełniony jest w nim **warunek bilansu systemu** (4.10) i warunek dostępnych pojemności magazynów międzyoperacyjnych (4.12), to istnieje taki początkowy przydział procesów, dla którego krytyczne są zasoby M_i , których suma czasów operacji w regule rozstrzygnięcia konfliktów σ_i powtórzona χ_i razy przyjmuje największą wartość:

$$T = \text{MAX}(\chi_1\tau_1, \chi_2\tau_2, \dots, \chi_i\tau_i, \dots, \chi_m\tau_m), \quad (5.2)$$

gdzie:

T - okres pracy systemu,

τ_i - suma czasów występujących w sekwencji reguły σ_i ,

χ_i - element wektora względnych powtórzeń reguł.

Dowód

Warunek bilansu systemu i pojemności magazynów gwarantują, że żaden z obrabianych elementów nie zajmuje zasobu po zakończeniu operacji, stąd sumaryczny czas przebywania na zasobie w czasie realizacji reguły wynosi $\tau_i = n_{i,1}t_{i,1} + tpz_{i,1} + n_{i,2}t_{i,2} + tpz_{i,2} + \dots + n_{i,n}t_{i,n} + tpz_{i,n}$. Liczbę powtórzeń reguły przydzielonej do i -tego zasobu względem innych reguł przydzielonych do innych zasobów opisuje wektor $\chi = [\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_m]$. Sumaryczne czasy obciążenia zasobów w czasie trwania cyklu tworzą ciąg: $\chi_1\tau_1, \chi_2\tau_2, \dots, \chi_m\tau_m$. Ponieważ $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m$ są sumami czasów jednostkowych i czasów przygotowawczo-zakończeniowych dla dowolnej reguły σ_i różnica $(T - \chi_i\tau_i)$ jest czasem oczekiwania elementów w magazynach międzyoperacyjnych. Zatem okres pracy jest zdeterminowany przez najdłuższy czas pracy systemu $\chi_i\tau_i$. Stąd $T = \text{MAX}(\chi_1\tau_1, \chi_2\tau_2, \dots, \chi_m\tau_m)$. ■

Z twierdzenia 5.1 wynika również, że w skończonym zbiorze zawsze istnieje przynajmniej jeden element, którego wartość jest największa. W szczególnym przypadku, wszystkie wartości mogą być sobie równe. Wówczas wszystkie zasoby są krytyczne, a zależność (5.2) przyjmuje postać:

$$T = \chi_1\tau_1 = \chi_2\tau_2, \dots, = \chi_i\tau_i, \dots, = \chi_m\tau_m, \quad (5.3)$$

gdzie:

T - okres pracy systemu,

τ_i - suma czasów występujących w sekwencji reguły σ_i ,

χ_i - element wektora względnych powtórzeń reguł.

Jeżeli suma obciążeń zasobów własnych nie jest większa od sumy obciążeń zasobów wspólnych, a ponadto spełnione są: warunek bilansu systemu, warunek pojemności magazynów oraz warunek (5.4), to istnieje realizacja procesów, w której wszystkie zasoby wspólne $(1, 2, \dots, i, \dots, M)$ są zasobami krytycznymi.

$$T = \chi_1\tau_1 = \chi_2\tau_2, \dots, = \chi_i\tau_i, \dots, = \chi_M\tau_M, \quad (5.4)$$

gdzie:

T - okres systemu,

M - liczba zasobów wspólnych w systemie,

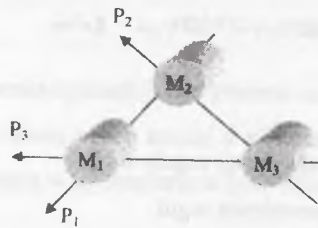
χ_i - element wektora względnych powtórzeń reguł zaalokowanych na zasobach wspólnych.

Wynika to z faktu, iż każdy proces przechodzi swoją marszrutę w czasie równym okresowi systemu T . Tryb wzajemnego wykluczania nie dopuszcza jednoczesnej realizacji więcej niż jednego procesu w tym samym czasie na jednym zasobie. Kolejność występowania zasobów w procesie jest zadana marszrutą i jest stała.

Otrzymane ustawienie nie jest na ogół jedyne. Spełnia ono warunek krytyczności zasobów. Korzystając z tego ustawienia, można „generować” lokalne reguły rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych regulujące dostęp procesów do zasobów dzielonych, gwarantujące cykliczność systemu i jego maksymalną efektywność. Jeżeli ponadto system charakteryzują zerowe czasy przygotowawczo-zakończeniowe, to efektywność wykorzystania zasobów systemu wynosi 100%.

Przykład 5.2

Dany jest system $S = (\{M_i, i = 1, 2, 3\}, \{P_j, j = 1, 2, 3\}, Cs)$. Przebieg procesów ilustruje rysunek 5.4. Założono, że przebrojenie systemu pod nowy asortyment nie wymaga czasu przygotowawczo-zakończeniowego.



Rys. 5.4. Schemat systemu procesów współbieżnych

Fig. 5.4. Structure of the system of concurrent processes

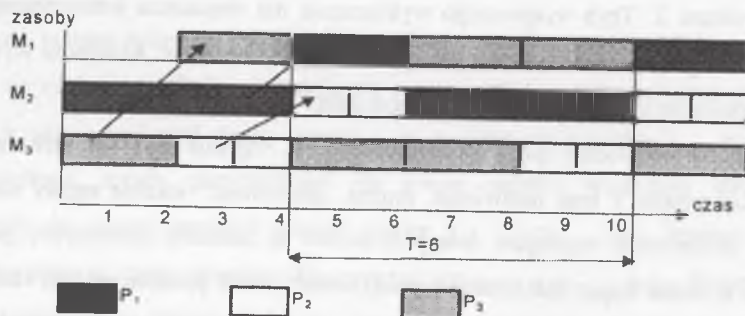
Macierze procesów przyjmują postać:

$$P_1 = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 4 & 2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad P_2 = \begin{bmatrix} 3 & 2 \\ 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad P_3 = \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 2 & 2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

System procesów jest zbilansowany, gdy procesy powtarzają się w regułach odpowiednio $n_{1,1} = 1, n_{3,1} = 1, n_{1,2} = 2, n_{2,2} = 2, n_{3,2} = 2, n_{3,2} = 2$ razy, podczas gdy elementy wektora względnych powtarzalności reguł wynoszą $\chi_1 = \chi_2 = \chi_3 = 1$.

Planowanie procesów odbywa się w następującej kolejności:

- 1) zaplanowanie procesu krytycznego P_1 ,
- 2) zaplanowanie procesu P_3 ,
- 3) zaplanowanie procesu P_2 .



Rys. 5.5. Realizacja zleceń w systemie, w którym spełniony jest warunek bilansu systemu; wykres Gantta

Fig. 5.5. Production orders execution in the system following the balance condition; Gantt's chart

5.1.2. Okres przepływu ustalonego

System produkcji rytmicznej charakteryzuje się powtarzalnością pewnej sekwencji operacji, zwanej okresem przepływu ustalonego. Długość trwania okresu determinują zasoby krytyczne.

Rozważmy system współbieżnych procesów produkcyjnych $S = (\{M_i, i = 1, 2, \dots, m\}, \{P_j, j = 1, 2, \dots, n\}, Cs)$. Do zasobów dzielonych systemu przydzielono reguły rozstrzygania konfliktów zasobowych. Jeżeli system charakteryzuje się przebiegiem cyklicznym, to istnieje wektor względnych powtórzeń reguł rozstrzygania konfliktów zasobowych $\chi = [\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_m]$, który gwarantuje, że w okresie przepływu ustalonego T spełniony jest warunek bilansu systemu (4.10). Cykliczne zachowanie systemu wynika z zachowania warunków wyznaczających zbiór rozwiązań dopuszczalnych, tj. warunków jakościowo dopuszczalnego funkcjonowania systemu.

Założmy, że dla pary sąsiadujących zasobów $(M_i, M_k)_j$ nie jest spełniony warunek bilansu systemu, zachodzi zatem jedna z następujących nierówności:

$$\chi_i n_{i,j} > \chi_k n_{k,j} \quad (5.5)$$

$$\text{albo} \quad \chi_i n_{i,j} < \chi_k n_{k,j}. \quad (5.6)$$

Spełnienie warunku (5.5) oznacza, że przez zasób i -ty przechodzi więcej elementów w wyniku realizacji procesu niż jest w stanie przyjąć zasób k -ty. Pamiętając o założeniu, że magazyn umieszczony pomiędzy parą zasobów ma skończoną i ograniczoną pojemność, nastąpi moment, gdy element wykonany na i -tym zasobie nie będzie mógł opuścić zasobu z powodu całkowitej zajętości magazynu międzyoperacyjnego. Tym samym inny proces oczekujący na dostęp do i -tego zasobu nie może być przyjęty do realizacji na tym zasobie. Funkcjonowanie systemu zagwarantowałby jedynie magazyn o pojemności $Cs = \infty, co$, z kolei, jest sprzeczne z założeniami.

W przypadku spełnienia warunku (5.6) liczba elementów opuszczająca zasób i -ty jest mniejsza niż liczba oczekiwana na zasobie k -tym. Zatem funkcjonowanie systemu byłoby możliwe jedynie wtedy, gdy w magazynie międzyoperacyjnym byłyby tworzone nowe elementy, co z kolei jest sprzeczne z założeniami.

W związku z powyższymi rozważaniami możliwe jest sformułowanie twierdzenia:

Twierdzenie 5.2. [Kłos, Skołod, Gattner, 1998]

Dany jest $S = (\{M_i, i = 1, 2, \dots, m\}, \{P_j, j = 1, 2, \dots, n\}, Cs)$. Jeżeli w systemie istnieje K zasobów krytycznych M_1, M_2, \dots, M_K takich, że $K \in \{1, 2, \dots, m\}$, to okres przepływu ustalonego jest równy: —

$$T = \chi_1 \tau_1 = \chi_2 \tau_2 = \dots = \chi_i \tau_i = \dots = \chi_K \tau_K, \quad (5.7)$$

gdzie:

T – okres systemu,

τ_i – czas realizacji reguły zaalokowanej na i -tym zasobie (jak w Twierdzeniu 5.1),

χ_i – element wektora względnych powtórzeń reguł, $i \in \{1, 2, \dots, K\}$.

Dowód

Wiadomo, że jeżeli SWPP ma przebieg cykliczny, to spełniony jest warunek bilansu systemu. Z definicji zasobu krytycznego wynika, że procesy na tym zasobie są realizowane bez przerwy. Oznacza to, że okres przepływu ustalonego zależy od sumy czasów operacji realizowanych na zasobie krytycznym oraz od powtórzenia reguły na tym zasobie względem innych reguł. ■

5.1.3. Podsumowanie

W rozdziale przedstawiono synchronizującą rolę zasobów krytycznych systemu. Wykazano, że w systemach, w których spełniony jest warunek bilansu oraz warunek przydziału pojemności magazynów, zasoby krytyczne wyznaczają rytm pracy systemu. Te cechy uwzględniono w utworzeniu metodyki przyjmowania zleceń do systemu wytwórczego.

5.2. Wybór zleceń do wspólnej realizacji

Jednym z aspektów dedykowalności jest określenie warunków decydujących o wyborze zleceń do jednoczesnej realizacji w systemie. Wyznaczone warunki gwarantują terminową realizację zlecenia, maksymalną efektywność systemu oraz minimalny poziom zapasów produkcji w toku.

5.2.1. Warunki wystarczające terminowej realizacji zlecenia

Na konkurencyjnym rynku warunkiem przyjęcia zlecenia do systemu wytwórczego jest zagwarantowanie terminowej jego realizacji.

Zlecenia produkcyjne, które ze względu na czasy trwania operacji nie mogą być zrealizowane wzdłuż żadnej z założonych, możliwych marszrut w wymaganym terminie, nie mogą być dopuszczone do realizacji.

Jeżeli istnieje element a_{ij} macierzy marszrut alternatywnych M_{Aj} zlecenia Z_j , dla którego prawdziwa jest zależność (5.8), to istnieje przynajmniej jedna marszruta, dla której nie jest możliwa terminowa realizacja.

$$I_j \varphi > tz_j - to_j, \quad (5.8)$$

gdzie:

I_j – liczba wyrobów potrzebna do skompletowania j -tego zlecenia,

φ – największy element macierzy M_{Aj} ($\text{MAX} [M_{Aj}]$),

tz_j – planowany (dyrektywny) termin zakończenia realizacji j -tego zlecenia,

to_j – najwcześniejszy termin uruchamiania j -tego zlecenia.

Zależność ta wynika wprost z definicji zlecenia produkcyjnego. Nawet jeżeli zlecenie jest realizowane w systemie równoległych procesów produkcyjnych, niemożliwa jest terminowa jego realizacja, gdyż I_j -krotne wykonanie najdłuższej z realizowanych operacji wymaga czasu dłuższego niż dysponowany równy różnicy $(tz_j - to_j)$. To z kolei oznacza, że realizacja zlecenia zakończy się po założonym terminie.

Zależność (5.8) jest podstawą wykluczenia z macierzy marszrut alternatywnych tych marszrut, dla których nie jest możliwa terminowa realizacja zlecenia produkcyjnego. Jeżeli φ , dla którego prawdziwa jest zależność (5.8), jest jedynym elementem w wierszu macierzy M_{Aj} , to nie istnieje marszruta, która umożliwi realizację zlecenia Z_j w wymaganym terminie.

Problem terminowej realizacji zleceń sprowadza się do wyznaczenia zależności łączących przydział reguł rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych z ustalonymi pojemnościami magazynów. Ocena efektywności systemu dotyczy przebiegu ustalonego. Przyjmuje się, że czas przebiegu nieustalonego jest pomijalnie mały w porównaniu z całkowitym czasem potrzebnym na wyprodukowanie określonej liczby elementów w przebiegu ustalonym.

Twierdzenie 5.3. (O terminowej realizacji zlecenia) [Kłos, Skołod, Gattner, 1998]

Dany jest system procesów współbieżnych $S = (\{M_i, i = 1, 2, \dots, m\}, \{P_j, j = 1, 2, \dots, n\}, Cs)$. Jeżeli system charakteryzuje się cyklicznym zachowaniem o okresie T , a ponadto pomiędzy każdą parą zasobów sąsiadujących $(M_i, M_k)_j$ umieszczony jest magazyn międzyoperacyjny o pojemności $Cs_{i,k} \geq n_{i,j} \chi_i$ lub przydzielono miejsce w magazynie centralnym o takiej pojemności, ponadto spełniona jest zależność (5.9), to istnieje zbiór

dopuszczalnych reguł wyboru priorytetu, pozwalający na skompletowanie zlecenia Z_j w terminie tz_j ,

$$\delta_j = tz_j - \left(to_j + \frac{I_j T}{Q_j} \right) \geq 0, \quad (5.9)$$

gdzie:

δ_j – wskaźnik terminowości realizacji zlecenia,

to_j – najwcześniejszy termin uruchamiania j-tego zlecenia,

tz_j – planowany (dyrektywny) termin zakończenia realizacji j-tego zlecenia,

T – okres pracy systemu,

I_j – liczba wytworów do skompletowania zlecenia Z_j ,

$Q_j = n_{ij} \chi_i$ – liczba elementów wykonywanych zgodnie z j-tym procesem w okresie T ,

n_{ij} – liczba wystąpień j-tego procesu w regule zaalokowanej na i-tym zasobie,

χ_i – element wektora względnych powtórzeń reguł.

Dowód

Zasoby krytyczne wyznaczają okres pracy systemu. Czas potrzebny na realizację zlecenia zależy od liczby cykli, jaką trzeba zrealizować dla jego skompletowania. Liczba cykli wynika, z kolei, ze stosunku liczby elementów do wykonania zgodnie ze zleceniem, do liczby elementów wykonywanych w jednym cyklu. Zatem, jeżeli termin realizacji j-tego zlecenia spełnia zależność (5.6), to zlecenie można przyjąć do realizacji przy jednoczesnym zapewnieniu terminowej jego realizacji. Jest to warunek wystarczający, którego spełnienie gwarantuje terminową realizację zlecenia Z_j w SWPP. ■

Podczas realizacji zleceń, ze względu na zróżnicowanie liczby wykonywanych elementów realizowanych zgodnie z marszrutami P_1, P_2, \dots, P_n , struktura systemu może ulec zmianie, gdyż pewne zlecenia opuszczają system, a inne wchodzi na ich miejsce. Zmiana struktury wpływa na terminowość pozostałych zleceń w systemie. Zmiana struktury jest związana ze zmianą okresu systemu, a to z kolei wpływa na termin realizacji zleceń.

Rozważmy system $S = (\{M_i, i = 1, 2, \dots, m\}, \{P_j, j = 1, 2, \dots, n\}, Cs)$, charakteryzujący się rytmiczną produkcją, w którym spełniona jest zależność:

$$\frac{I_1}{Q_1} > \frac{I_2}{Q_2} > \dots > \frac{I_{n-1}}{Q_{n-1}} = \frac{I_n}{Q_n}, \quad (5.10)$$

gdzie:

Q_j – liczba wystąpień j-tego procesu w cyklu T ,

I_j – liczba wytworów do skompletowania zlecenia Z_j ,

n – liczba zleceń w systemie.

Jeżeli dla każdego zlecenia Z_j liczba wytworów I_j niezbędnych do skompletowania zlecenia oraz krotności wystąpienia procesów w regułach rozstrzygania konfliktów zasobowych Q_j są stałe, to terminy realizacji zleceń produkcyjnych można wyznaczyć za pomocą następujących równań rekurencyjnych [Kłos, Skołod, Gattner, 1998]:

$$\begin{aligned} tr_n &= \frac{I_n}{Q_n} T^n, \\ tr_{n-1} &= tr_n + \left(\frac{I_{n-1}}{Q_{n-1}} - \frac{I_n}{Q_n} \right) T^{n-1}, \\ &\dots \\ tr_2 &= tr_3 + \left(\frac{I_2}{Q_2} - \frac{I_3}{Q_3} \right) T^2, \\ tr_1 &= tr_2 + \left(\frac{I_1}{Q_1} - \frac{I_2}{Q_2} \right) T^1, \end{aligned} \quad (5.11)$$

gdzie:

tr_1, tr_2, \dots, tr_n – terminy realizacji zleceń, odpowiednio Z_1, Z_2, \dots, Z_n ,

I_j – liczba wytworów potrzebna do skompletowania zlecenia Z_j ,

Q_j – krotność wystąpienia j-tego procesu w okresie T , gdzie

$$Q_j = n_{1j} \chi_1 = n_{2j} \chi_2 = \dots = n_{mj} \chi_m,$$

n_{ik} – element macierzy struktury (krotność wystąpienia procesu j-tego procesu w regule zaalokowanej na i-tym zasobie),

χ_i – element wektora względnych powtórzeń reguł (krotność reguły zaalokowanej na i-tym zasobie),

T^1, T^2, T^n – elementy wektora okresów systemu, gdzie $T = [T^1, T^2, \dots, T^n]$.

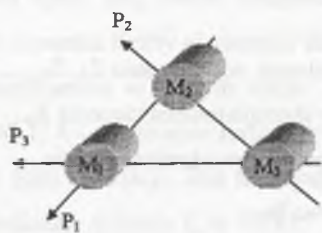
Zgodnie z założeniem (5.10) zlecenie oznaczone indeksem n jako pierwsze opuści system, co oznacza, że w trakcie jego realizacji okres systemu się nie zmieni. Zatem, kompletacja tego zlecenia nastąpi po czasie $tr_n = \frac{I_n}{Q_n} T^n$ od momentu wprowadzenia n-tego zlecenia, gdzie $\frac{I_n}{Q_n}$ jest liczbą powtórzeń cyklu konieczną dla skompletowania n-tego zlecenia.

Dla dowolnego zlecenia Z_j spełniającego warunek (5.10) po zakończeniu realizacji zlecenia Z_{j-1} następuje zmiana okresu systemu z T^{j-1} na T^j . W trakcie realizacji poprzednich zleceń (już zakończonych) wykonano pewną pulę wytworów f_j na rzecz zlecenia Z_j . Termin realizacji zlecenia można zapisać jako $tr_j = tr_{j+1} + [(I_j - f_j)/Q_j]T^{j+1}$. Z założenia współczynniki Q_j nie ulegają zmianie, a z tego wynika, że w czasie tz_{j+1} proces P_j realizujący zlecenie Z_j został powtórzony I_{j+1}/Q_{j+1} razy. Zatem proces P_j został powtórzony $\varphi_j = Q_j I_{j+1}/Q_{j+1}$ razy. Po podstawieniu otrzymujemy $tr_j = tr_{j+1} + [(I_j - Q_j I_{j+1}/Q_{j+1})/Q_j]T^j = [Z_{j+1} + (I_j/Q_j - I_{j+1}/Q_{j+1})]T^j$.

Dla zlecenia Z_1 , dla skompletowania którego konieczne jest wykonanie największej liczby przejść cyklu, iloraz I_1/Q_1 przyjmuje wartość maksymalną. Zlecenie to jest ostatnim zleceniem opuszczającym system. Liczba elementów zlecenia Z_1 wykonanych do tej pory jest określona przez powtórzenie $\varphi_j = Q_1 I_2/Q_2$. Stąd termin realizacji Z_1 wynosi $tr_1 = tr_2 + (I_1 - I_2 Q_1/Q_2)T^1$.

Przykład 5.3

Dany jest system $S = (\{M_i, i = 1, 2, 3\}, \{P_j, j = 1, 2, 3\}, Cs)$. Przebieg procesów ilustruje rysunek 5.6.



Rys. 5.6. Przebieg procesów w 3-zasobowym systemie

Fig. 5.6. Processes flow in the system composed of 3 resources

Macierze procesów mają postać:

$$P_1 = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 4 & 2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad P_2 = \begin{bmatrix} 3 & 2 \\ 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad P_3 = \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 2 & 2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

System procesów jest zbilansowany, gdy procesy powtarzają się odpowiednio: $n_{1,1} = 1$, $n_{3,1} = 1$, $n_{1,2} = 2$, $n_{2,2} = 2$, $n_{1,3} = 2$, $n_{3,3} = 2$ razy przy względnej powtarzalności reguł: $\chi_1 = \chi_2 = \chi_3 = 1$.

Liczba wystąpień poszczególnych procesów w okresie T jest równa: $Q_1 = n_{1,1}\chi_1 = 1$, $Q_2 = n_{2,2}\chi_2 = 2$, $Q_3 = n_{3,3}\chi_3 = 2$.

Do realizacji w systemie przewiduje się następujące wielkości zleceń produkcyjnych: $I_1 = 10$, $I_2 = 10$, $I_3 = 8$.

Ponadto spełniona jest zależność (5.10), która przyjmuje postać: $\frac{I_1}{Q_1} > \frac{I_2}{Q_2} > \frac{I_3}{Q_3}$.

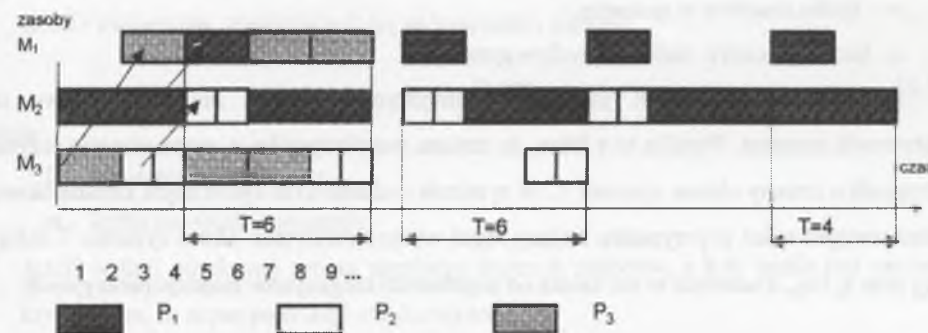
Terminy realizacji poszczególnych zleceń wyznaczone zgodnie z zależnościami (5.11) są następujące:

$$tr_3 = \frac{I_3}{Q_3} T^3 = \frac{8}{2} 6 = 24,$$

$$tr_2 = tr_3 + \left[\frac{I_2}{Q_2} - \frac{I_3}{Q_3} \right] T^2 = 24 + \left[\frac{10}{2} - \frac{8}{2} \right] 6 = 30,$$

$$tr_1 = tr_2 + \left[\frac{I_1}{Q_1} - \frac{I_2}{Q_2} \right] T^1 = 30 + \left[\frac{10}{1} - \frac{10}{2} \right] 4 = 50.$$

Zmianę przebiegu procesów w systemie przedstawia rysunek 5.7.



Rys. 5.7. Wykres Gantta ilustrujący przebieg przejściowy procesów w systemie

Fig. 5.7. Gantt's chart representation of transient period of processes flow

5.2.2. Stopień wykorzystania zasobów

W poprzednim rozdziale przedstawiono warunki wystarczające spełnienia wymagań klienta (terminowość realizacji zleceń). Jeśli warunki te są możliwe do spełnienia w rozpatrywanym systemie, dopiero wówczas ma sens sprawdzanie opłacalności realizacji przedsięwzięcia. Problem producenta polega na takim doborze zleceń produkcyjnych do współbieżnej realizacji, by zapewnić jak największy stopień wykorzystania zasobów systemu.

Wzrost stopnia wykorzystania zasobów może doprowadzić do ujawnienia się zasobów krytycznych, a wówczas możliwe jest analityczne wyznaczanie parametrów systemu. Zwiększenie obciążenia zasobów powoduje skrócenie okresu pracy systemu, a to z kolei wpływa na wskaźnik terminowości realizacji zleceń produkcyjnych.

Jeżeli do zasobów systemu przydzielono reguły rozstrzygania konfliktów zasobowych i znane są czasy trwania poszczególnych operacji, to współczynnik wykorzystania zasobów systemu wyraża zależność:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (n_{i,j} t_{i,j}) \chi_i}{mT}, \quad (5.12)$$

gdzie:

η - współczynnik efektywności wykorzystania zasobów,

T - okres systemu,

χ_i - element wektora względnych powtórzeń reguł na i -tym zasobie,

$n_{i,j}$ - powtarzalność wystąpienia j -tego procesu w regule przydzielonej do i -tego zasobu,

$t_{i,j}$ - czas trwania operacji j -tego procesu realizowanej na i -tym zasobie,

m - liczba zasobów w systemie,

n - liczba procesów realizowanych w systemie.

Zwiększenie pojemności magazynów międzyoperacyjnych nie ma wpływu na efektywność systemu. Wynika to z faktu, że zmiana współczynnika η może nastąpić jedynie w przypadku zmiany okresu systemu T . W systemie o charakterze cyklicznym zmiana okresu może nastąpić tylko w przypadku zmiany reguł wyboru priorytetu. Okres systemu T zależy od χ_{ij} oraz t_{ij} i n_{ij} , a wartości te nie zależą od pojemności magazynów międzyoperacyjnych.

5.2.3. Wielkość zapasów produkcji w toku

Prace nie zakończone, znajdujące się w różnej fazie zaawansowania, nazywane są produkcją w toku [Wróblewski, 1993]. Ilość tych prac jest bezpośrednio związana z ilością zapasów, jakie znajdują się w toku produkcji. Pociąga to za sobą konieczność zamrożenia kapitału obrotowego przedsiębiorstwa. Najmniejszy możliwy poziom zapasów odpowiada ilości elementów na zasobach przy zerowym zapełnieniu magazynów. Z jednej strony celowe jest ograniczanie do minimum pojemności magazynów, z drugiej zaś strony magazyny dają możliwość utrzymania powtarzalnego charakteru produkcji.

Wielkość zapasu produkcji w toku zależna jest od relacji pomiędzy czasami realizacji operacji na poszczególnych stanowiskach.

Rozważmy system produkcyjny, w którym proces jest realizowany w m -zasobowym systemie o strukturze liniowej.

1. Jeżeli czasy realizacji kolejnych operacji j -tego procesu na poszczególnych zasobach spełniają warunek $t_{1j} < t_{2j} < \dots < t_{mj}$, a magazyny międzyoperacyjne zaalokowano pomiędzy każdą parą sąsiadujących zasobów $(M_i, M_k)_j$, to zapas produkcji w toku jest równy:

$$D = Cs + m, \quad (5.13)$$

gdzie:

D - zapas produkcji w toku,

Cs - sumaryczna pojemność magazynów umieszczonych pomiędzy zasobami lub pojemność magazynu centralnego,

m - liczba zasobów w systemie.

2. Jeżeli relacja czasów operacji j -tego procesu na poszczególnych zasobach m -zasobowej linii potokowej jest następująca: $t_{1j} \geq t_{2j} \geq \dots \geq t_{mj}$, to zapas produkcji w toku jest równy liczbie elementów, znajdujących się na zasobach i i wynosi:

$$D = m, \quad (5.14)$$

gdzie:

D - zapas produkcji w toku,

m - liczba zasobów w systemie.

3. Jeżeli w linii potokowej proces przebiega przez m zasobów, a k -ty zasób jest zasobem krytycznym, to zapas produkcji w toku wynosi:

$$D = \sum_{i=1}^k Cs_{i-1,j}, \quad (5.15)$$

gdzie:

D - zapas produkcji w toku,

k - numer zasobu (krytycznego) dla m zasobowej linii potokowej,

$Cs_{i-1,i}$ - pojemność magazynu pomiędzy zasobami $(i-1)$ -szym oraz i -tym.

Przedstawione zależności (5.13), (5.14) oraz (5.15) znajdują zastosowanie w budowie procedury wyznaczającej zapas produkcji w toku w systemach współbieżnych procesów produkcyjnych. Oszacowanie poziomu zapasu produkcji w toku w systemach o złożonych

strukturach dokonuje się na podstawie minimalnej sumarycznej pojemności magazynów, koniecznej dla zapewnienia cyklicznego przebiegu procesów.

5.2.4. Metodyka weryfikacji zbioru zleceń

Na podstawie twierdzeń i wniosków przedstawionych w rozdziałach 4 i 5 skonstruowano algorytm weryfikacji terminowej realizacji pakietu zleceń produkcyjnych.

Planowanie przebiegu procesów polega na realizacji następujących etapów:

1. Wyznaczenie przebiegu marszrut procesów produkcyjnych.
2. Przydział pojemności magazynów i reguł rozstrzygania konfliktów zasobowych.
3. Wyznaczanie zasobów krytycznych i okresu pracy systemu.
4. Ocena terminowej realizacji zleceń oraz poziomu obciążenia zasobów.

W wyniku realizacji tych etapów uzyskiwana jest ocena zleceń pod kątem możliwości ich realizacji w systemie.

Planowanie przebiegu procesów współbieżnych w systemie produkcyjnym ze sterowaniem rozproszonym odbywa się według schematu przedstawionego na rysunku 5.8.

Etap 1. Szeregowanie zleceń

Każde ze zleceń może być realizowane wzdłuż jednej, ze zbioru różnych, marszrut (marszrut alternatywnych). By zoptymalizować przebiegi, tj. zapewnić realizację zleceń w najkrótszym czasie, konieczne jest wykonanie przeglądu zupełnego wszystkich możliwych rozwiązań.

Jednakże synteza struktury systemu umożliwia uporządkowanie zleceń według pewnego, przyjętego wcześniej kryterium, np. kryterium największej rezerwy czasowej, które określa różnicę między terminem dyrektywnym (oczekiwanym) realizacji zlecenia a czasem niezbędnym na wykonanie serii. Jeżeli długość rezerwy czasowej jest identyczna dla dwóch lub większej liczby zleceń, wówczas uwzględnia się inne kryterium lub też wyboru dokonuje się arbitralnie.

Procedura:

1. Wybrać marszruty o najdłuższych czasach realizacji $\varphi_j = \text{MAX}[M_{Aj}]$.
2. Uporządkować rosnąco zlecenia według kryterium najkrótszego czasu pozostałego do wymaganego terminu realizacji zlecenia:

$$\forall j=1,2,\dots, n, \quad \omega_j = (t_{z_j} - t_{o_j}) - I_j \varphi_j, \quad (5.16)$$

gdzie:

- ω_j – czas pozostały do wymaganego terminu realizacji zlecenia,
- t_{z_j} – oczekiwany (dyrektywny) termin zakończenia,
- t_{o_j} – najwcześniejszy możliwy termin uruchomienia realizacji j-tego zlecenia,
- I_j - liczebność zlecenia,
- φ_j - najdłuższy czas realizacji operacji z marszruty zlecenia Z_j .

Wynikiem realizacji procedury jest uszeregowanie wejściowe zleceń i uzyskanie zbioru marszrut produkcyjnych w celu ich realizacji. W praktyce mogą być też zastosowane inne kryteria, takie jak: priorytet zlecenia, opłacalność itp.

Problem doboru kryteriów nie został objęty zakresem niniejszej pracy.

Etap 2. Wybór marszruty

Spośród dostępnych marszrut określonych przez M_{Aj} wybierana jest marszruta według ustalonego dodatkowego kryterium. Kryterium wyboru marszruty może stanowić najkrótszy czas realizacji zlecenia, stopień obciążenia zasobów, zapas produkcji w toku itp.

Etap 3. Dobór lokalnych reguł rozstrzygania konfliktów zasobowych

Dobór lokalnych reguł rozstrzygania konfliktów zasobowych realizowany jest w dwóch krokach:

- **Budowa macierzy struktury systemu M_s** o wymiarach $m \times n$. Elementy macierzy n_{ij} przyjmują wartości odpowiadające liczbie wystąpień j-tego procesu w regule rozstrzygania konfliktów zaalokowanej na i-tym zasobie.
- **Wyznaczenie wektora względnych powtórzeń reguł $\chi = [\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_i, \dots, \chi_m]$** , spełniającego warunek bilansu systemu (twierdzenie 5.1).

Etap 4. Wyznaczenie sumarycznej pojemności magazynów międzyoperacyjnych

Zgodnie z przyjętą regułą rozstrzygania konfliktów zasobowych (twierdzenie 4.1) alokowane są pojemności magazynów międzyoperacyjnych, gwarantujące realizację tej reguły.

Procedura:

1. Zainicjowanie początkowej pojemności magazynów $C_s = 0$.
2. Wyznaczenie wymaganej pojemności magazynu międzyoperacyjnego $C_{s_{ik}}$ dla każdej pary zasobów sąsiadujących $(M_i, M_k)_j$.

Etap 5. Wyznaczanie zasobów krytycznych oraz okresu pracy systemu (twierdzenie 5.2)

• **Wyznaczenie okresu systemu**

Okres pracy systemu jest wyznaczany na podstawie zależności $T = \text{MAX}(\tau_i \chi_i)$, gdzie

$$\tau_i = (t_{i,1}n_{i,1} + tpz_{i,1}) + (t_{i,2}n_{i,2} + tpz_{i,2}) + \dots + (t_{i,n}n_{i,n} + tpz_{i,n}).$$

Procedura:

1. Zainicjowanie początkowej wartości $T = \tau_1 \chi_1$.
2. Dla $i = 2, 3, \dots, m$, Jeżeli $(T < \tau_i \chi_i)$ to $T = \tau_i \chi_i$.

• **Wyznaczanie zasobów krytycznych**

Następnie tworzony jest wektor zasobów krytycznych $R = [r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_m]$, którego poszczególne elementy odpowiadają zasobom systemu. Elementy wektora przyjmują wartości:

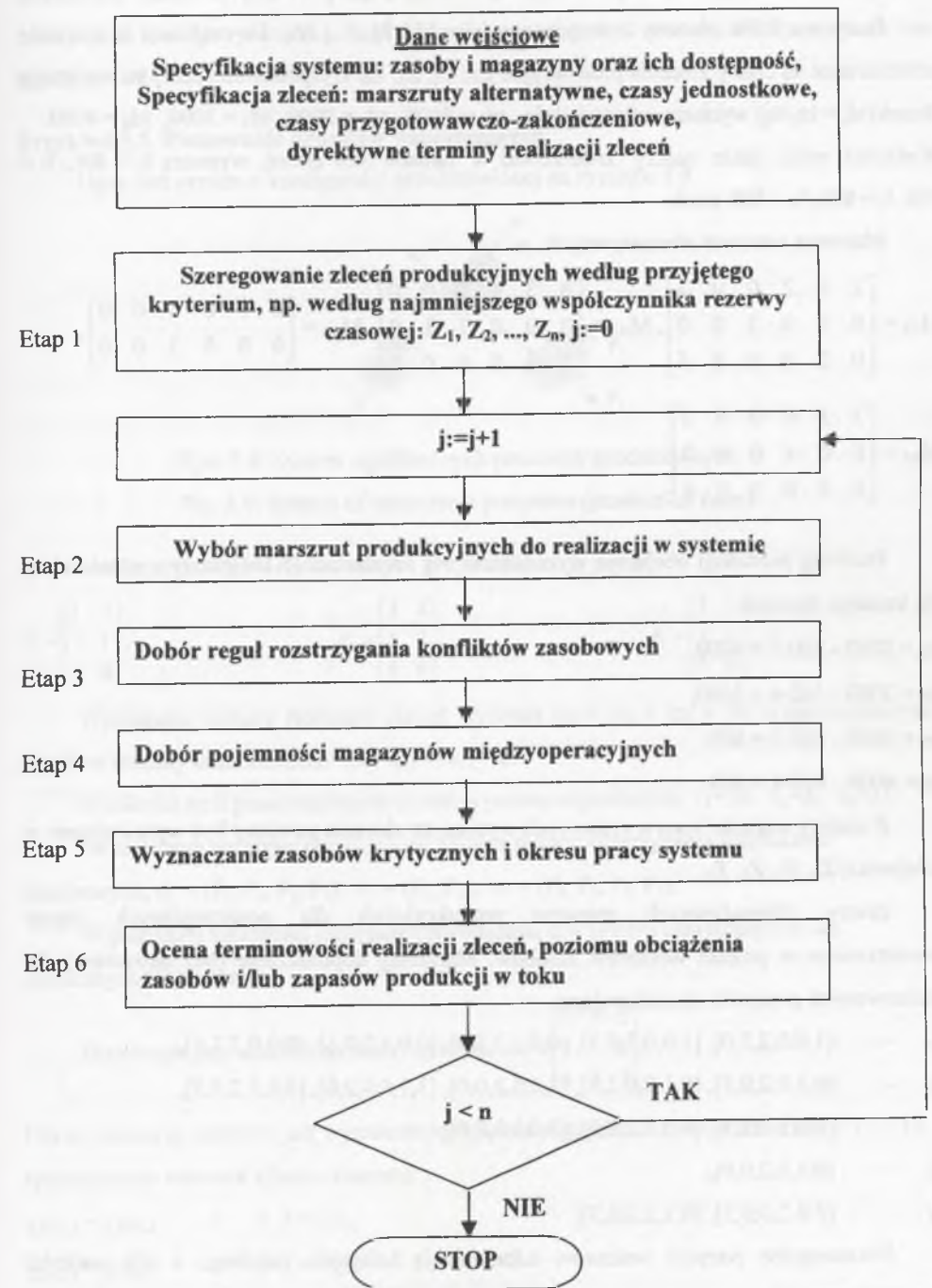
$$r_i = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli } i\text{-ty zasób jest krytyczny} \\ 0, & \text{w przeciwnym przypadku.} \end{cases}$$

Etap 6. Ocena terminowości realizacji zleceń (twierdzenie 5.3)

Dla każdego ze zleceń przyjmowanych do realizacji w systemie sprawdzany jest warunek (5.8), którego spełnienie świadczy o tym, że możliwe jest zrealizowanie w dysponowanym czasie przynajmniej jednej z marszrut zawartych w zbiorze marszrut alternatywnych. Jeśli ponadto dla danego zlecenia spełniony jest warunek (5.9) z twierdzenia 5.3, wówczas przy zaalokowanej regule możliwa jest terminowa realizacja tego zlecenia. W przeciwnym przypadku, gdy warunek (5.9) nie jest spełniony, zwiększa się krotność występowania zlecenia w regułach zaalokowanych na zasobach, przez które przechodzi jego marszruta (z zachowaniem bilansu systemu) i następuje powtórne sprawdzenie etapów 4 i 5. ■

Kolejnym krokiem jest wyznaczanie parametrów funkcjonowania systemu. Parametrami są: termin realizacji zleceń, zapas produkcji w toku, poziom wykorzystania zasobów systemu. Na zmianę ich wartości mają wpływ zmiany reguł rozstrzygania konfliktów zasobowych oraz zmiany pojemności magazynów.

Ocena zleceń może być uzupełniona o wskaźniki kosztowe, jak np. ocena opłacalności przedsięwzięcia.



Rys. 5.8. Metodyka planowania współbieżnej produkcji wieloasortymentowej, algorytm
Fig. 5.8. Methodology for multi-product production planning: an algorithm

Przykład 5.4. Szeregowanie zleceń i wybór marszruty (etap 1 i 2)

Dany jest ESW złożony z sześciu zasobów M_1, M_2, \dots, M_6 . Do realizacji w systemie przeznaczone są cztery zlecenia produkcyjne Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 . Dysponowane czasy na realizację zleceń ($td_j = tz_j - to_j$) wynoszą odpowiednio $td_1 = 8000, td_2 = 3000, td_3 = 3000, td_4 = 4000$. Wielkości serii, jakie należy zrealizować w ramach tych zleceń, wynoszą $I_1 = 800, I_2 = 500, I_3 = 800, I_4 = 900$ sztuk.

Macierze marszrut alternatywnych:

$$M_{A1} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 2 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 5 \end{bmatrix}, M_{A2} = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}, M_{A3} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$M_{A4} = \begin{bmatrix} 3 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix}.$$

Przebieg produkcji obejmuje wyznaczenie wg zależności (5.16) rezerwy czasowej ω_j dla każdego zlecenia.

$$\omega_1 = 8000 - 800 \cdot 5 = 4000,$$

$$\omega_2 = 3000 - 500 \cdot 4 = 1000,$$

$$\omega_3 = 3000 - 800 \cdot 3 = 600,$$

$$\omega_4 = 4000 - 900 \cdot 4 = 400.$$

Z analizy wartości rezerw czasowych wynika, że zlecenia powinny być wprowadzane w kolejności: Z_4, Z_3, Z_2, Z_1 .

Zbiory alternatywnych marszrut produkcyjnych dla poszczególnych zleceń przedstawiono w postaci wektorów zasobów. Marszruty dopuszczalne (bez nawrotów) dla realizowanych procesów są następujące:

$$Z_1 - [1, 0, 0, 2, 3, 0], [1, 0, 0, 2, 0, 3], [0, 0, 1, 2, 3, 0], [0, 0, 1, 2, 0, 3], [0, 0, 0, 2, 3, 1],$$

$$Z_2 - [0, 1, 0, 2, 0, 3], [0, 1, 0, 0, 2, 3], [3, 1, 0, 2, 0, 0], [3, 1, 0, 0, 2, 0], [0, 0, 1, 2, 0, 3],$$

$$[0, 0, 1, 0, 2, 3], [3, 0, 1, 2, 0, 0], [3, 0, 1, 0, 2, 0],$$

$$Z_3 - [0, 1, 0, 2, 0, 0],$$

$$Z_4 - [1, 0, 2, 0, 0, 3], [0, 1, 2, 0, 0, 3].$$

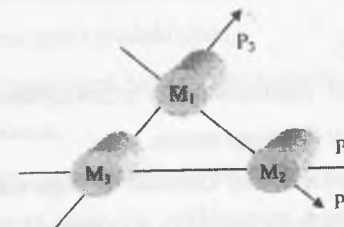
Poszczególne pozycje wektorów odpowiadają kolejnym zasobom, a ich wartości numerom operacji.

Spośród otrzymanego zbioru dopuszczalnych marszrut w trakcie wprowadzania kolejnych zleceń do systemu wybierane są te, które spełniają inne kryteria (np. stopień

obciążenia zasobów, poziom zapasu produkcji w toku, priorytet zlecenia, opłacalność, zdobywanie nowego rynku itd.). W praktyce istotne mogą być również nie wymienione, inne kryteria. ■

Przykład 5.5. Planowanie procesów współbieżnych

Dany jest system o konfiguracji przedstawionej na rysunku 5.9.



Rys. 5.9. System współbieżnych procesów produkcyjnych
Fig. 5.9. System of concurrent processes (production rates)

Macierze procesów realizowanych w systemie mają postać:

$$P_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, P_2 = \begin{bmatrix} 3 & 2 \\ 3 & 2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, P_3 = \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 2 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Wymagane terminy realizacji zleceń wynoszą $tz_1 = tz_2 = tz_3 = 50$, a najwcześniejsze możliwe terminy uruchomienia: $to_1 = to_2 = to_3 = 0$.

Wielkości serii poszczególnych zleceń wynoszą odpowiednio: $I_1=10, I_2=8, I_3=15$.

Na zasobach wstępnie przydzielono lokalne reguły rozstrzygania konfliktów

zasobowych: $\sigma_1 = (P_1, P_1, P_3, P_3)$, $\sigma_2 = (P_1, P_2)$, $\sigma_3 = (P_2, P_2, P_3, P_3)$.

W pierwszej kolejności następuje sprawdzenie, czy system charakteryzuje się cyklicznym zachowaniem.

$$\text{Budowana jest macierz struktury systemu } M_S = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 2 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 2 \end{bmatrix}.$$

Dla tej macierzy możliwe jest wyznaczenie wektora względnych powtórzeń reguł $\chi = [1, 2, 1]$, spełniającego warunek bilansu systemu:

$$\chi_1 n_{1,1} = \chi_2 n_{2,1} \rightarrow 1 \cdot 2 = 2 \cdot 1,$$

$$\chi_2 n_{2,2} = \chi_3 n_{3,2} \rightarrow 2 \cdot 1 = 1 \cdot 2,$$

$$\chi_1 n_{3,2} = \chi_3 n_{3,3} \rightarrow 1 \cdot 2 = 1 \cdot 2.$$

Wymagana sumaryczna pojemność magazynów międzyoperacyjnych

$$C_S = C_{S1,2} + C_{S3,2} + C_{S3,1} = 2 + 2 + 2 = 6.$$

Okres systemu wyznaczany jest z zależności (5.2) $T = \text{MAX}(\chi_i \tau_i)$

$T = \text{MAX}(1 \cdot 2 \cdot 2 + 1 \cdot 2 \cdot 1, 2 \cdot 1 \cdot 1 + 2 \cdot 1 \cdot 2, 1 \cdot 2 \cdot 3 + 1 \cdot 2 \cdot 2) = \text{MAX}(6, 6, 10)$.

Zasób M_3 jest zasobem krytycznym. Okres systemu $T = 10$.

Terminowości realizacji zleceń zgodnie z zależnością (5.9) wynoszą:

$$\delta_1 = 50 - (10 \cdot 10) / (1 \cdot 2) = 50 - 50 = 0,$$

$$\delta_2 = 50 - (8 \cdot 10) / (2 \cdot 1) = 50 - 40 > 0,$$

$$\delta_3 = 50 - (15 \cdot 10) / (1 \cdot 2) = 50 - 75 < 0.$$

Zlecenia Z_1 i Z_2 mogą być zrealizowane w przewidywanym terminie, zaś realizacja zlecenia Z_3 przekracza wymagany dla niego termin.

W kolejnym kroku jest zwiększana krotność występowania procesu P_3 w regułach zaalokowanych na zasobach, przez które proces P_3 przechodzi i następuje powrót do realizacji etapów 2 – 5.

5.2.5. Podsumowanie

Metodyka przedstawiona w tym rozdziale zmierza do oceny dedykowalności, polegającej na odpowiedzi na pytanie: czy warto podejmować się realizacji pakietu zleceń, które zgłoszone zostały do realizacji w systemie. Charakterystyczne dla tego podejścia jest to, iż zlecenia zgłaszane są do nieobciążonego (pustego) systemu. Wyznaczone reguły wyboru priorytetu odnoszą się zarówno do przepływu pojedynczych elementów, jak i do całych partii produkcyjnych.

Przedstawione procedury obejmują:

- szeregowanie wejściowe zleceń poprzez ustalenie priorytetu,
- określenie wymagań marszrut na pojemności magazynów międzyoperacyjnych,
- sprawdzenie terminowości realizacji zlecenia.

Procedury te stanowią rolę „filtra”, który przepuszcza do dalszych etapów tylko te zlecenia, których realizacja jest możliwa ze względu na wcześniej spełnione ograniczenia.

5.3. Wybór dodatkowych zleceń

W systemach wytwórczych obok przyjmowania pakietów zleceń występuje problem przyjmowania zleceń do systemu, w którym już są realizowane wcześniej przyjęte zlecenia

produkcyjne. Takie funkcjonowanie systemu jest charakterystyczne dla ESW, produkującego w małych i średnich seriach.

Dyspozytor systemu ma możliwość sterowania realizacją zlecenia poprzez dobór wielkości partii produkcyjnej. Wielkość partii determinuje takie parametry, charakteryzujące realizację zlecenia, jak:

- zapotrzebowanie na pojemność magazynową,
- okresowość wprowadzania partii produkcyjnej,
- postać oraz procesy aktywacji reguł rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych,
- termin uruchomienia zlecenia.

Wyznaczone parametry są podstawą stwierdzenia, czy możliwe jest zagwarantowanie terminowej realizacji zlecenia przy nie zakłóconym przepływie procesów Z_1, Z_2, \dots, Z_n wcześniej przyjętych do wykonania w systemie. System, do którego przyjmowane są zlecenia, znajduje się w stanie ustalonym. Okres systemu jest równy najmniejszej wspólnej wielokrotności okresów wprowadzania partii procesów składowych.

Zakłada się, że dopuszczalny jest przepływ produkcji w układzie szeregowym, szeregowo-równoległym [Wróblewski, 1993] oraz każdy rodzaj przepływu, który nie rozdzieli partii realizacją innych zleceń.

Realizacja zlecenia w systemie, w terminie wyznaczonym przez klienta (lub terminie dyrektywnym), jest możliwa pod warunkiem istnienia partii produkcyjnej, której wielkość gwarantuje terminową realizację zleceń bez naruszenia terminów i cyklu realizacji zleceń wcześniej przyjętych [Gattner, Kłós, Skołod, 1999].

5.3.1. Warunki wystarczające wielkości partii produkcyjnej

Przyjęcie nowego zlecenia Z_{n+1} do systemu tak, by nie naruszyć dotychczasowego przebiegu procesów, warunkowane jest marszrutą procesu P_{n+1} . Nie może ona przechodzić przez żaden z zasobów krytycznych systemu. Ponadto, na zasobach, na których realizowane są operacje procesu P_{n+1} , przerwy w pracy muszą być nie mniejsze niż suma czasu trwania operacji i czasu przygotowawczo-zakończeniowego, związanego z operacją realizowaną na tym zasobie. Przedstawiony warunek został sformułowany w postaci twierdzenia 5.4 i jest warunkiem wystarczającym, którego spełnienie umożliwia przyjęcie zlecenia do realizacji w systemie.

Twierdzenie 5.4. (O możliwości przyjęcia nowego zlecenia) [Skołud, Gattner, Klos, 1999]

Dany jest system $S = (\{M_i, i = 1, 2, \dots, m\}, \{P_j, j = 1, 2, \dots, n\}, Cs)$ o przebiegu ustalonym T . Dane jest nowe zlecenie $Z_{n+1} = (P_{n+1}, I_{n+1}, tz_{n+1}, M_{An+1}, B_{n+1}, T_{n+1})$, oczekujące na realizację w systemie S . Jeżeli spełnione są warunki (5.17) oraz (5.18), to istnieje partia produkcyjna, dla której realizacja zlecenia nie spowoduje zakłócenia procesów już realizowanych w tym systemie.

$$\forall i \in M_{n+1}, \exists k \in \{1, \dots, T_i\}, v_k^i = 0, \quad (5.17)$$

$$\exists t \in \{1, \dots, T_i\}, \forall k \in \langle t, \dots, t + tpz_{i,n+1} + t_{i,n+1} - 1 \rangle, v_k^i = 0, \quad (5.18)$$

gdzie:

T - okres systemu,

$tpz_{i,n+1}$ - czas przygotowawczo-zakończeniowy na i -tym zasobie związany z $(n+1)$ -szym procesem,

M_{n+1} - marszruta, wg której realizowane jest zlecenie Z_{n+1} ,

$t_{i,n+1}$ - czas realizacji operacji procesu P_{n+1} na zasobie i -tym z marszruty tego procesu,

v_k^i - element wektora V_i .

Dowód

Minimalna wielkość partii możliwa do przyjęcia do realizacji w systemie jest partią jednostkową. Jeśli jest możliwe przyjęcie takiej partii, to powyższe twierdzenie jest prawdziwe.

Warunek (5.17). Uwzględnijmy jednostkową partię zlecenia Z_{n+1} , które odpowiada procesowi opisanemu przez macierz P_{n+1} . Przyjęcie zlecenia do systemu tak, by nie zakłócić przebiegu wcześniej przyjętych zleceń jest możliwe, gdy w wektorach V_i odpowiadających zasobom, przez które przechodzi marszruta procesu, występuje przynajmniej jedna wartość zero. Oznacza to, że zasoby te nie są krytyczne.

Warunek (5.18). Sprawdzenie poprawności ze względu na warunek (5.18) polega na stwierdzeniu, czy w wektorach ze zbioru V_i , przez które przechodzi proces $(n+1)$ -szy, wyróżnia się przedział, w którym występują wyłącznie zera, odpowiadający co najmniej wartości $tpz_{i,n+1} + t_{i,n+1}$. Oznacza to, że możliwe jest przyjęcie co najmniej partii jednostkowej. ■

Warunki (5.17) i (5.18) są warunkami wystarczającymi, gwarantującymi niezakłócony przepływ zleceń realizowanych w systemie po przyjęciu do realizacji nowego zlecenia. Spełnienie warunku (5.17) zapewnia, że zasoby wspólne dla zleceń wcześniej przyjętych i nowych (zgłoszonych do realizacji) nie są zasobami krytycznymi. Zaś spełnienie warunku (5.18) zapewnia, że możliwa jest realizacja co najmniej partii jednostkowej zlecenia Z_{n+1} .

Spełnienie warunków twierdzenia 5.4 upoważnia jedynie do stwierdzenia, że możliwe jest przyjęcie zlecenia. Dopuszczalna wielkość partii produkcyjnej zależy od długości przestoju na zasobach wspólnych dla zlecenia, którego przyjęcie jest rozpatrywane oraz zleceń już realizowanych w systemie.

Definicja 5.1. (Dopuszczalna licznosc partii) (por.: [Gattner, 1999] i [Skołud, Gattner, Klos, 1999])

Dopuszczalna wielkość partii produkcyjnej $B_{w,n+1}$ zlecenia Z_{n+1} na w -tym zasobie wspólnym jest wyznaczana jako największa wartość całkowita nie większa od ilorazu czasu maksymalnego przestoju tego zasobu wspólnego do czasu $t_{w,n+1}$ trwania operacji procesu P_{n+1} wykonywanej na tym zasobie.

$$B_{w,n+1} = \left\lfloor \frac{MAX(H^{w,n+1}) - tpz_{w,n+1}}{t_{w,n+1}} \right\rfloor, \quad (5.19)$$

gdzie :

$B_{w,n+1}$ - dopuszczalna licznosc partii produkcyjnej $(n+1)$ -go zlecenia na w -tym zasobie wspólnym,

w - zasób wspólny marszruty zlecenia Z_{n+1} i zlecenia ze zbioru zleceń $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_n\}$ realizowanych w systemie,

$H^{w,n+1}$ - długość maksymalnego przestoju zasobu wspólnego obliczana jako różnica górnej (powiększonego o 1) i dolnej granicy odpowiadającego mu przedziału

$H = (h+1) - t$, dla którego spełniony jest warunek $\forall k \in \langle t, \dots, h \rangle, v_k^w = 0$,

$t_{w,n+1}$ - czas trwania operacji $(n+1)$ -go procesu na w -tym zasobie wspólnym,

$tpz_{w,n+1}$ - czas przygotowawczo-zakończeniowy związany z realizacją $(n+1)$ -go procesu na w -tym zasobie wspólnym. ■

Obciążenie zasobu nowym zleceniem jest nie większe niż maksymalny przestój tego zasobu. Każdy element zbioru $B_{w,n+1}$ jest maksymalną wielkością partii procesu Z_{n+1} dopuszczalną z punktu widzenia danego zasobu wspólnego.

Gdy ostatni i pierwszy element wektora V_i przyjmują wartość 0, wówczas należą one do tego samego przestoju. Aby nie pominąć tego przestoju, wektor V_i zostaje tak przekształcony, by pierwszy element wektora był różny od zera. Elementy początkowe wektora, przyjmujące wartość 0, są „odcinane” od wektora. Następnie są one dodawane do ostatniego elementu wektora przy wskazaniu na rzeczywistą długość przestoju, wynikającą z połączonych dwóch cykli.

$$q_{n+1} = \left\lceil \frac{tpz_{n+1} + MAX(S_{1,n+1})}{T} \right\rceil, \quad (5.24)$$

gdzie:

q_{n+1} – liczba okresów systemu, co jaką wprowadzana jest kolejna partia (n+1)-go zlecenia;

pozostałe oznaczenia jak w zależności (5.23).

Załóżmy, że partia B_{n+1} wprowadzana jest co $q'_{n+1} = q_{n+1} - 1$. Oznacza to, że nowa partia elementów zgłasza się do realizacji na zasobie, podczas gdy poprzednia jeszcze nie została zakończona. Do zrealizowania pozostało jeszcze $B_{n+1} [1 - Tq'_{n+1}/t_j B_{n+1}]$ elementów z poprzedniej partii. W tym czasie dojdzie do „zdublowania” partii tego samego asortymentu, co nie jest dopuszczalne.

Jeżeli założyć, że $q'_{n+1} = q_{n+1} + 1$, to znaczy, że nowa partia B_{n+1} jest wprowadzana do systemu co okres równy iloczynowi Tq'_{n+1} . W systemie każda kolejna partia jest wprowadzana po przerwie równej T . Taka decyzja opóźni realizację zlecenia i spowoduje obniżenie efektywności wykorzystania zasobów. ■

Wyznaczona wartość T' jest krotnością okresu T . Zlecenie Z_{n+1} jest wprowadzone do realizacji w systemie co $T'_{n+1} = T'$. System charakteryzuje się wtedy nowym okresem $T' = Tq_{n+1}$, który jednak nie spowoduje zmiany w realizacji zleceń wcześniej przyjętych.

Przykład 5.7

Dany jest system czterech zasobów M_1, M_2, M_3, M_4 . W systemie realizowane są zlecenia Z_1, Z_2, Z_3 , odpowiadające procesom P_1, P_2, P_3 , które opisują macierze:

$$P_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 4 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad P_2 = \begin{bmatrix} 3 & 2 \\ 2 & 3 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad P_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Stan systemu opisuje zbiór wektorów $V = [V_1, V_2, V_3, V_4]$, gdzie:

$$V_1 = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1],$$

$$V_2 = [0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1],$$

$$V_3 = [1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0],$$

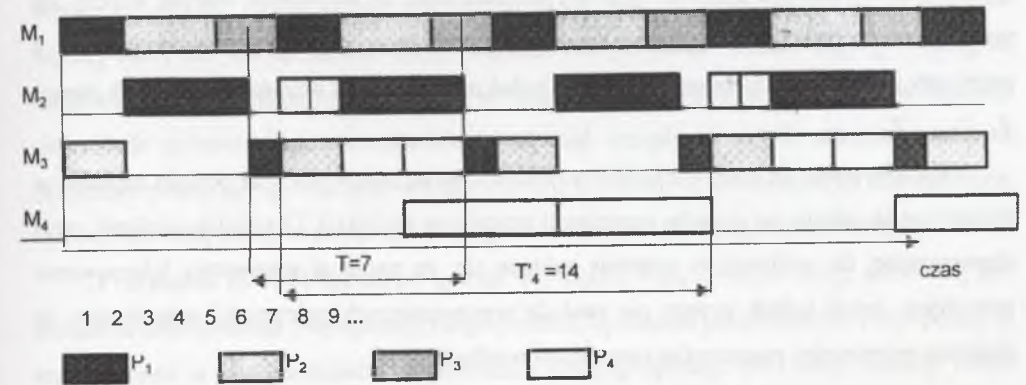
$$V_4 = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0].$$

Do systemu zgłasza się zlecenie Z_4 , realizowane zgodnie z procesem P_4

$$P_4 = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 4 \\ 1 & 2 & 5 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Maksymalna dopuszczalna wielkość partii zlecenia Z_4 , jaka może zostać przyjęta do realizacji na zasobach wspólnych z procesem P_4 , zgodnie z twierdzeniami 5.4 i 5.5, wynosi $B_4 = 2$.

Zlecenie Z_4 może być przyjęte do realizacji w systemie zgodnie z okresem $T' = T'_4 = 14$.



Rys. 5.10. Wykres ilustrujący zmianę okresu systemu w związku z przyjęciem do realizacji zlecenia Z_4

Fig. 5.10. Chart representation of the system cycle change caused by Z_4 production order ■

5.3.3. Warunki wystarczające przydziału pojemności magazynów

Rozpatrywana jest klasa systemów jednoczesnej wieloasortymentowej produkcji rytmicznej. Zasoby systemu są dzielone między n procesów. Oznacza to, że wprowadzenie nowego zlecenia Z_{n+1} do realizacji w systemie jest zazwyczaj związane z koniecznością przydzielenia dodatkowych pojemności magazynu centralnego lub magazynów międzyoperacyjnych. Wstrzymanie procesu na zasobie może spowodować wstrzymanie realizacji innego procesu w systemie. To z kolei pociąga za sobą zmianę dotychczasowego rytmu realizacji procesów, co może doprowadzić do powstania cyklu wzajemnych oczekiwań wywołujących blokadę w systemie.

Przyjęto założenia, że po zakończeniu operacji na i -tym stanowisku element przenoszony jest na $(i+1)$ -sze stanowisko, do magazynu centralnego, albo do magazynu międzyoperacyjnego.

Założono również, że partia produkcyjna jest nierozdzielna, tzn. w pracy zasobów nie występują przerwy pomiędzy realizacją poszczególnych elementów należących do tej samej partii produkcyjnej. Przyjęto, że zgodnie z OPT partia transportowa jest zmienna. Ze względu

na współbieżną realizację zleceń konieczne jest zaplanowanie magazynu międzyoperacyjnego tak, by możliwy był odbiór elementów ze stanowiska poprzedzającego zaraz po zakończeniu realizacji operacji. Wstrzymanie pracy zasobu może spowodować zakłócenia w przepływie innych procesów aktualnie realizowanych w systemie. Założono, że do chwili zgłoszenia się zlecenia Z_{n+1} zostały przyjęte już pewne zlecenia. Powoduje to, iż niezależnie od czasów trwania poszczególnych operacji możliwy jest taki stan, że na jednym zasobie kończy się wykonywanie operacji na ostatnim elemencie z partii B_{n+1} , podczas gdy kolejny zasób z marszruty jest jeszcze zajęty przy realizacji zadań należących do wcześniej przyjętych zleceń Z_1, Z_2, \dots, Z_n .

Kształtowanie się dopływu i odpływu elementów do magazynu oraz poziom zapasów w magazynie są zależne od sposobu organizacji przepływu produkcji. Określając wielkość partii dopuszczalnej do realizacji w systemie zakłada się, że partia ta gwarantuje bilansowanie przepływu. Jeżeli jednak system nie posiada wystarczających pojemności magazynów, to dostępne pojemności magazynów ograniczają wielkość partii.

Twierdzenie 5.6. (O pojemnościach magazynów) (por. [Skołud, Gattner, Kłos, 1999])

Dany jest system $S = (\{M_i, i = 1, 2, \dots, m\}, \{P_j, j = 1, 2, \dots, n\}, Cs)$ o przebiegu ustalonym T . W systemie tym dostępne są pojemności magazynów międzyoperacyjnych $Cs_{1,2}, Cs_{2,3}, \dots, Cs_{m-1,m}$. Przyjmowane jest do niego zlecenie Z_{n+1} . Ze względu na pojemności magazynów do systemu może zostać przyjęte zlecenie o liczebności spełniającej warunek (5.25), co gwarantuje możliwość przyjęcia partii produkcyjnej wielkości B_{n+1} ,

$$\text{MIN}(Cs_{1,2}, Cs_{1,3}, \dots, Cs_{2,3}, \dots, Cs_{m-1,m}) \geq 2B_{n+1}-1, \quad (5.25)$$

gdzie:

B_{n+1} - wielkość partii produkcyjnej zlecenia Z_{n+1} ,

$Cs_{m-1,m}$ - wielkość magazynu, zaalokowanego pomiędzy zasobami $(m-1)$ -szym i m -tym.

Dowód

Zakłada się, że nie dochodzi do podziału partii produkcyjnej. Rozpatrzmy dwa przypadki:

Przypadek I. Jeśli $B_{n+1}t_{ij} \leq t_{i+1,j}$ oraz $t_{i,j}+t_{ij} > t_{i+1,j}$, gdzie: $t_{i,j}$ jest terminem uruchomienia operacji j -tego procesu na i -tym zasobie w realizowanej partii, t_{ij} jest czasem jednostkowym operacji j -tego procesu realizowanej na i -tym zasobie, a $t_{i+1,j}$ - czasem uruchomienia operacji j -tego procesu na $(i+1)$ -szym zasobie, to wymagany jest magazyn o pojemności wskazanej w twierdzeniu. Na zasobach i -tym i $(i+1)$ -szym realizowane są kolejne operacje j -tego procesu. Są one zasobami sąsiadującymi.

Wykonane elementy w liczbie B_{n+1} przechodzą do magazynu międzyoperacyjnego i oczekują na kolejny okres systemu. W następnym okresie realizowana jest kolejna partia. W skrajnym przypadku możliwe jest, że podczas realizowania ostatniego elementu z partii zacznie się realizacja $(i+1)$ -szej operacji. To znaczy, że w magazynie międzyoperacyjnym już oczekuje na wykonanie B_{n+1} elementów z poprzedniego okresu oraz $B_{n+1}-1$ elementów z bieżącego okresu. Liczba ta nie zostanie przekroczona, bo oznaczałoby to, że warunek $t_{i,j}+t_{ij} > t_{i+1,j}$ nie jest spełniony. Jeżeli warunek ten przyjmuje postać: $t_{i,j}+t_{ij} = t_{i+1,j}$, to możliwe jest wykonanie obu operacji w jednym cyklu systemu, a realizacja operacji odpowiada trybowi szeregowo-równoległej obsługi przepływu. Jeżeli natomiast warunek przyjmuje postać $t_{i,j}+t_{ij} < t_{i+1,j}$, to w jednym cyklu jest możliwe wykonanie, na obu zasobach, operacji dla całej partii, w czasie nie dłuższym niż dla obsługi szeregowo-równoległej.

Przypadek II. Jeśli $B_{n+1}t_{i+1,j} \leq t_{ij}$ oraz $t_{i,j}+B_{n+1}t_{ij} > t_{i+1,j}+(B_{n+1}-1)t_{i+1,j}$, gdzie: $t_{i,j}$ jest terminem uruchomienia i -tej operacji j -tego procesu, t_{ij} - czasem jednostkowym i -tej operacji j -tego procesu, a $t_{i+1,j}$ - terminem uruchomienia kolejnej operacji $(n+1)$ -szej operacji j -tego procesu, to wymagany jest magazyn o pojemności wskazanej w twierdzeniu. Jeżeli ten warunek przyjmuje postać $t_{i,j}+B_{n+1}t_{ij} = t_{i+1,j}+(B_{n+1}-1)t_{i+1,j}$, to, jak w poprzednim przypadku, realizacja operacji odpowiada trybowi obsługi szeregowo-równoległej. Jeżeli warunek przyjmuje postać $t_{i,j}+B_{n+1}t_{ij} < t_{i+1,j}+(B_{n+1}-1)t_{i+1,j}$, to w jednym cyklu jest możliwe wykonanie dwóch operacji z marszruty dla całej partii, w czasie nie dłuższym niż dla obsługi szeregowo-równoległej. Nie ma zatem potrzeby rezerwowania większej pojemności magazynów międzyoperacyjnych niż wykazano w tezie twierdzenia. ■

Przykład 5.8. Przydział pojemności magazynów międzyoperacyjnych

Dany jest system S oraz zlecenie Z_{n+1} . Marszruta procesu P_{n+1} przechodzi przez zasoby M_1 i M_2 . Czasy realizacji na tych zasobach wynoszą odpowiednio $t_{1,n+1} = 1$ i $t_{2,n+1} = 4$. Dopuszczalna wielkość partii wynosi $B_{n+1} = 3$. Na rys. 5.11 przedstawiono przebieg procesów i pojemności magazynów międzyoperacyjnych, które umożliwiają poprawne funkcjonowanie systemu.

Twierdzenie 5.7. (O terminowej realizacji zlecenia)

Dany jest system $S = (\{M_i, i=1,2,\dots,m\}, \{P_j, j = 1,2,\dots,n\}, Cs)$ o przebiegu ustalonym o okresie T . Dane jest zlecenie $Z_{n+1} = (P_{n+1}, I_{n+1}, tz_{n+1}, M_{Aj}, B_{n+1}, T'_{n+1},)$ planowane do realizacji w systemie z wielkością partii B_{n+1} . Jeżeli spełniony jest warunek (5.29), to zagwarantowana jest terminowa realizacja zlecenia.

$$\frac{I_{n+1}}{B_{n+1}} T' \leq tz_{n+1} - to_{n+1}, \quad (5.29)$$

gdzie:

B_{n+1} – wielkość partii (n+1)-go zlecenia możliwa do realizacji w jednym cyklu T' ,

I_{n+1} - liczba sztuk dla kompletacji (n+1)-go zlecenia,

T' - okres wprowadzania partii,

tz_{n+1} - wymagany termin realizacji zlecenia,

to_{n+1} – możliwy termin uruchomienia zlecenia Z_{n+1} .

Dowód

Dowód sprowadza się do wykazania, że zlecenie może zostać wykonane w czasie dysponowanym, tj. w czasie, jaki upływa pomiędzy możliwym terminem uruchomienia zlecenia a terminem realizacji oczekiwanym przez klienta. W okresie T' zlecenie (n+1)-sze jest realizowane w partiach liczących B_{n+1} sztuk, a to z kolei implikuje liczbę uruchomień partii o takiej wielkości w celu zrealizowania całego zlecenia. Liczba uruchomień partii jest równa ilorazowi wielkości całego zlecenia do wielkości partii. Zaś iloczyn liczby uruchomień przez czas T' , co jako partia wchodzi do realizacji, wyznacza czas niezbędny na realizację partii. ■

W niektórych przypadkach dopuszczalne jest pewne przekroczenie terminu realizacji wyznaczonego przez klienta. Odchylenie dopuszczalne określa wskaźnik „A”, będący udziałem opóźnienia w terminie realizacji zlecenia. Jeżeli takie przekroczenie jest dopuszczalne w rozważanym systemie, to zależność (5.29) przyjmuje postać:

$$\frac{I_{n+1}}{B_{n+1}} T'(1 - A) \leq tz_{n+1} - to_{n+1}, \quad (5.30)$$

gdzie:

A – dopuszczalny udział opóźnienia w terminie realizacji zlecenia;

pozostałe oznaczenia jak w zależności (5.29).

Uwzględnienie wymagań producenta gwarantuje funkcjonowanie systemu bez pojawiania się blokad i zagłódzeń. Fakt ten nie zapewnia jednak realizacji zlecenia w

oczekiwanym terminie. Z tego względu kolejnym ograniczeniem, które powinno być brane pod uwagę, jest termin kompletacji zlecenia, a więc odpowiedź na pytanie: czy dane zlecenie może zostać zrealizowane w oczekiwanym terminie.

Możliwe jest ponadto określenie najpóźniejszego dopuszczalnego terminu uruchamiania serii. Termin ten gwarantuje realizację zlecenia dokładnie na czas, zgodnie z JIT (patrz rozdział 2). Oznacza to realizację zlecenia w precyzyjnie określonym terminie, a nie tak szybko, jak to jest możliwe. Z tego też powodu konieczne jest zastosowanie strategii planowania przepływów zleceń opartej na koncepcji KANBAN (rys. 5.13).

Jeżeli jest spełniony warunek (5.31), to możliwa jest realizacja zlecenia w terminie oczekiwanym przez klienta [Skołud, 1999b].

$$K_{n+1} - (b_{n+1} - 1) * B_{n+1} \geq I_{n+1}, \quad (5.31)$$

gdzie:

$$K_{n+1} = \left\lceil \frac{tz_{n+1} - to_{n+1}}{T} \right\rceil, \quad (5.32)$$

K_{n+1} - liczba cykli pomiędzy oczekiwanym terminem realizacji a terminem, w którym możliwe jest uruchomienie zlecenia,

B_{n+1} wielkość partii (n+1)-go zlecenia możliwa do realizacji w jednym cyklu T ,

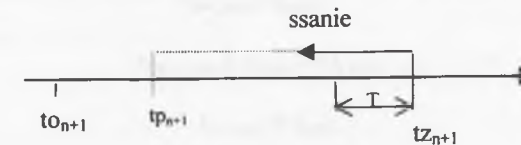
I_{n+1} – liczba elementów do wykonania zgodnie ze zleceniem,

tz_{n+1} – oczekiwany termin realizacji zlecenia Z_{n+1} ,

to_{n+1} – najwcześniejszy możliwy termin uruchomienia zlecenia,

T – okres systemu,

b_{n+1} – liczba operacji realizowanych w zleceniu Z_{n+1} .



Rys. 5.13. Strategia planowania bazująca na koncepcji KANBAN

Fig. 5.13. Planning strategy based on KANBAN concept

Ostateczny, dopuszczalny termin tp_{n+1} uruchomienia zlecenia Z_{n+1} , zapewniający terminową realizację partii B_{n+1} wprowadzanej do systemu co okres T' , wyznacza następująca zależność [Skołud, 1999b]:

$$tp_{n+1} = tz_{n+1} - \left[\frac{I_{n+1}}{B_{n+1}} T' + (b_{n+1} - 1) T' \right], \quad (5.33)$$

gdzie:

tz_{n+1} – oczekiwany termin realizacji,

tp_{n+1} – wymagany termin uruchomienia zlecenia w celu zagwarantowania tz_{n+1} ,

B_{n+1} – wielkość partii (n+1)- szego zlecenia możliwa do realizacji w jednym cyklu T,

I_{n+1} – liczba elementów do wykonania zgodnie ze zleceniem,

T' – okres wprowadzania partii (n+1)-go zlecenia.

Człon $\frac{I_{n+1}}{B_{n+1}} T'$ zależności (5.33) wyznacza liczbę cykli, jaka jest niezbędna do realizacji

serii I_{n+1} . W drugim członie zależności $(b_{n+1}-1)T'$ uwzględniono, że kolejne operacje mogą być wykonywane w następujących po sobie cyklach, a nie w jednym okresie. Wartość w nawiasie odpowiada czasowi, jaki jest niezbędny do realizacji serii produkcyjnej. Termin uruchomienia realizacji zlecenia odpowiada różnicy przewidywanego terminu zakończenia i czasu przeznaczanego na jego realizację.

Przykład 5.10

Dany jest 3-zasobowy system (M_1, M_2, M_3). Stan systemu opisuje zbiór wektorów $V = \{V_1, V_2, V_3\}$, gdzie:

$$V_1 = [1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0],$$

$$V_2 = [0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1],$$

$$V_3 = [0, 0, 0, 1, 1, 1].$$

Na wejście do systemu oczekuje proces P_4 opisany macierzą:

$$P_4 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



Rys. 5.14. Przyjmowanie zleceń do systemu; wykres Gantta

Fig. 5.14. Entering of production orders. Gantt's chart

Maksymalna dopuszczalna partia, jaka może być przyjęta do realizacji w systemie, wynosi $B_4 = 3$ elementy. Wielkość ta podyktowana jest ograniczeniami producenta, to jest stanem systemu w chwili napływu nowego zlecenia. ■

Uruchomienie zlecenia w terminie tp_{n+1} , określonym przez zależność (5.33), gwarantuje wykonanie zlecenia w wymaganym terminie (nie dłuższym niż tz_{n+1}). W wielu przypadkach czas realizacji jest krótszy. Jeżeli możliwe jest przyjęcie do partii produkcyjnej wielkości B_{n+1} , która zapewnia terminową realizację tego zlecenia, to ostateczny, wymagany termin uruchomienia realizacji tego zlecenia określa zależność [Skołod, 1999b]:

$$tp_{n+1} = tz_{n+1} - \left[\frac{I_{n+1}}{B_{n+1}} T' + (b_{n+1} - 1 - k) T' \right], \quad (5.34)$$

gdzie:

tz_{n+1} – oczekiwany termin realizacji,

tp_{n+1} – wymagany termin uruchomienia zlecenia w celu zagwarantowania tz_{n+1} ,

B_{n+1} – wielkość partii (n+1)- szego zlecenia możliwa do realizacji w jednym cyklu T,

I_{n+1} – liczba elementów do wykonania zgodnie ze zleceniem,

b_{n+1} – liczba operacji w procesie P_{n+1} ,

$$k = \sum_{i=1}^{b-1} k_i, \quad (5.35)$$

$$k_i = \begin{cases} 0 & \text{jeśli spełnione są warunki (5.36) i (5.37) albo (5.38) i (5.39)} \\ 1 & \text{w pozostałych przypadkach,} \end{cases}$$

$$t_{i+1, n+1} \geq t_{i, n+1}, \quad (5.36)$$

$$to_{i+1, n+1} \geq to_{i, n+1} + t_{i, n+1}, \quad (5.37)$$

$$t_{i+1, n+1} < t_{i, n+1}, \quad (5.38)$$

$$to_{i+1, n+1} > to_{i, n+1} + B_{n+1} t_{i, n+1} - (B_{n+1} - 1) t_{i+1, n+1}, \quad (5.39)$$

gdzie:

$t_{i, n+1}$ – czas trwania operacji (n+1)-go procesu na i-tym zasobie,

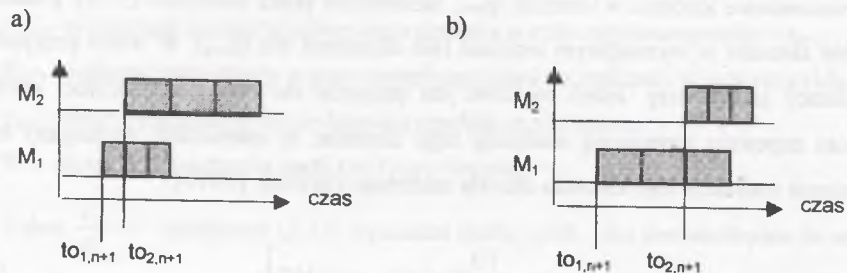
$t_{i+1, n+1}$ – czas trwania operacji (n+1)-go procesu na (i+1)-ym zasobie,

$to_{i, n+1}$ – możliwy termin uruchomienia partii na i-tym zasobie (n+1)-go procesu,

$to_{i+1, n+1}$ – możliwy termin uruchomienia partii na (i+1.) zasobie (n+1)-go procesu,

T' – okres wprowadzania partii.

Warunki (5.36) i (5.37) przedstawiają sytuację, gdy czas trwania kolejnej operacji jest nie krótszy od operacji poprzedzającej ją (rys. 5.15a). Warunki (5.38) i (5.39) dotyczą przypadku, gdy czas kolejnej operacji jest krótszy od bezpośrednio ją poprzedzającej (rys. 5.15 b).



Rys. 5.15. Przepływ szeregowo-równoległy; a) czas trwania kolejnej operacji jest nie krótszy od poprzedniej, b) czas kolejnej operacji jest krótszy od poprzedniej

Fig. 5.15. Serial-parallel production flow; a) operations time of the next operation is not shorter than previous one, b) operations time of next operation is shorter than the previous one

Spełnienie warunków (5.36) i (5.37) albo (5.38) i (5.39) gwarantuje, że kolejne operacje i -ta i $(i+1)$ -sza są wykonywane w jednym cyklu.

Przykład 5.11

Dany jest 3-zasobowy system (M_1, M_2, M_3). Stan systemu opisuje zbiór wektorów:

$V = \{V_1, V_2, V_3\}$, gdzie:

$$V_1 = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0],$$

$$V_2 = [0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1],$$

$$V_3 = [0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1].$$

Macierz opisująca proces P_4 zgłaszający się do systemu ma postać:

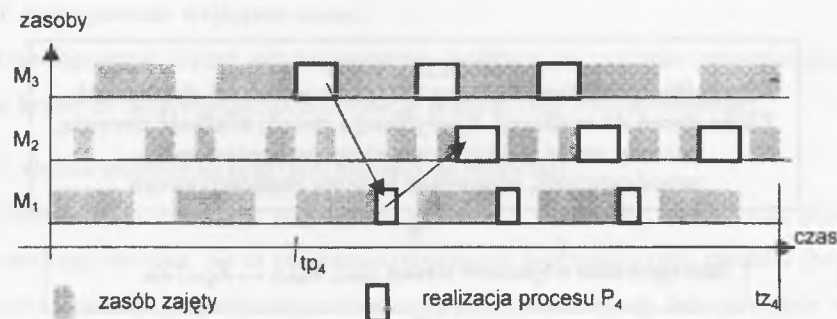
$$P_4 = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Wielkość serii $L_4 = 6$ elementów.

W systemie dopuszczalny rozmiar partii wynosi $B_4 = 2$ sztuki.

Termin realizacji jest równy $tz_4 = 72$.

Ostateczny termin uruchomienia zlecenia dla zapewnienia realizacji zgodnie z oczekiwaniami wynosi $tp_4 = 72 - 6/2 \cdot 12 + (3-1) \cdot 12 = 12$.



Rys. 5.16. Wykres ilustrujący wyznaczanie ostatecznego terminu uruchamiania zlecenia

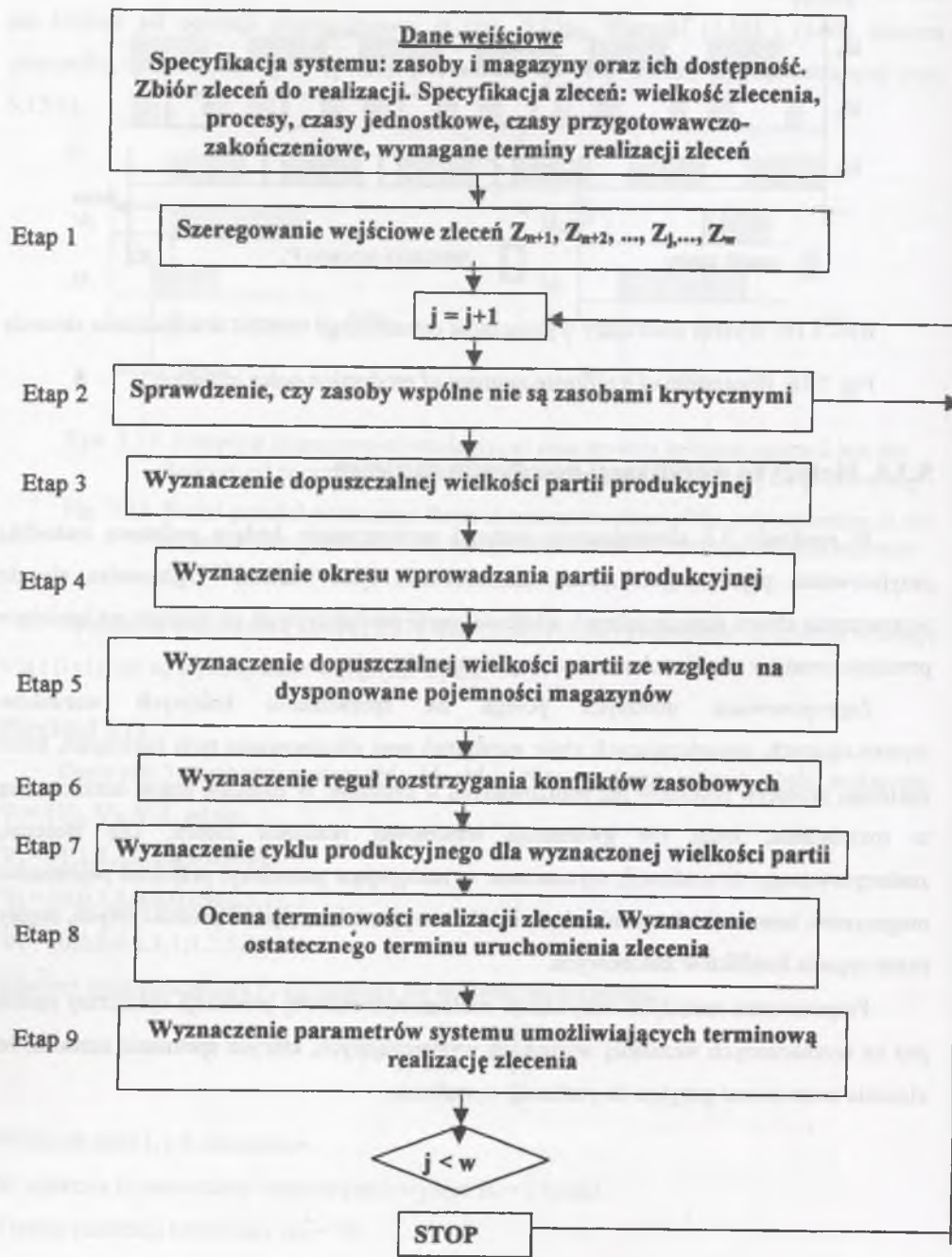
Fig. 5.16. Illustration of a ultimate moment of production order initiation

5.3.5. Metodyka weryfikacji pojedynczych zleceń

W rozdziale 5.3 sformułowano warunki wystarczające, będące podstawą metodyki przyjmowania pojedynczych zleceń. Zastosowanie tych warunków sprowadza się do wyznaczania zbioru dopuszczalnych wielkości partii produkcyjnych ze względu na istniejące przestoje zasobów wspólnych z marszrutą nowego zlecenia.

Zaproponowana metodyka polega na sprawdzeniu kolejnych warunków wystarczających, ograniczających zbiór rozwiązań oraz eliminowaniu tych rozwiązań, które zakłócają przepływ procesów już realizowanych w systemie. W ostatnim etapie odrzucane są te rozwiązania, które nie gwarantują terminowej realizacji zleceń. Dla zlecenia, zaakceptowanego do realizacji, wyznaczane są następujące parametry: przydział pojemności magazynów, termin uruchomienia zlecenia, okres wprowadzania partii produkcyjnych, reguły rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych.

Proponowana metodyka weryfikacji wieloasortymentowej produkcji cyklicznej oparta jest na wyznaczonych wcześniej warunkach wystarczających, których spełnienie oznacza, że zlecenie może zostać przyjęte do realizacji w systemie.



Rys. 5.17. Metodyka przyjmowania dodatkowych zleceń do SWPP- algorytm

Fig. 5.17. Methodology for a new production order (workflow) allocation, an algorithm

Etap 1. Szeregowanie wejściowe zleceń

Uszeregowanie zleceń oczekujących na realizację w systemie przeprowadzone jest według kryterium najkrótszego, oczekiwanego przez klienta, terminu realizacji.

Etap 2. Ocena możliwości przyjęcia zlecenia do realizacji

Zlecenie Z_{n+1} może być przyjęte do systemu, o ile zasoby, przez które przechodzi marszruta tego zlecenia, nie są zasobami krytycznymi, a przestoje tych zasobów gwarantują możliwość realizacji przynajmniej jednostkowej partii produkcyjnej. Jeśli powyższe warunki nie są spełnione, zlecenie jest usuwane z listy zleceń oczekujących na realizację (twierdzenie 5.4).

Etap 3. Wyznaczanie dopuszczalnej wielkości partii

Zgodnie z przyjętym założeniem przyjęcie nowego zlecenia nie może spowodować zmian w realizacji zleceń dotychczas realizowanych. Wielkość partii jest więc limitowana przez przestoje zasobów wspólnych. Dla każdego z tych zasobów wyznacza się maksymalną, możliwą do przyjęcia, wielkość partii. Z tego zbioru wybrana jest wartość minimalna (definicja 5.1, zależność (5.14)).

Etap 4. Wyznaczanie okresu wprowadzania partii produkcyjnej

Wyznaczona w etapie 3 wielkość partii jest określona na podstawie przestojów zasobów dzielonych. Zasoby własne dla tak przyjętej wielkości partii mogą być zajęte w okresie dłuższym niż T . Wymusza to konieczność wyznaczenia nowego okresu systemu T' , który jest równoznaczny z okresem wprowadzania partii i jest całkowitą wielokrotnością okresu T (twierdzenie 5.5).

Etap 5. Wyznaczanie dopuszczalnej wielkości partii ze względu na dostępne magazyny

Obliczana jest wymagana pojemność magazynów dla nowego zlecenia. Jeżeli dysponowana w systemie pojemność magazynów jest mniejsza od wyznaczonej, to konieczne jest wyznaczenie wielkości partii, dopuszczalnej ze względu na dysponowane pojemności magazynów międzyoperacyjnych (definicja 5.1, twierdzenie 5.6).

Etap 6. Wyznaczenie reguł rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych

Sposób wprowadzania partii produkcyjnej wyznaczonej w etapach 4 i 5 determinuje postać reguł rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych alokowanych na zasobach.

Etap 7. Wyznaczenie cyklu produkcyjnego

Wyznaczona w kroku 5 dopuszczalna wielkość partii determinuje cykl produkcyjny realizacji zlecenia.

Etap 8. Ocena terminowości realizacji zlecenia

W tym etapie sprawdzana jest możliwość terminowej realizacji zlecenia. Jeśli terminowa realizacja nie jest możliwa, to obliczony będzie najbliższy, realny termin zakończenia zlecenia. O jego odrzuceniu lub akceptacji decyduje planista (dyspozytor). Jeżeli zapewniona jest terminowa realizacja, albo decyzja planisty jest pozytywna, to następuje przejście do etapu 9. W przeciwnym przypadku zlecenie nie będzie przyjęte do realizacji (twierdzenie 5.7).

Etap 9

Wyznaczenie parametrów systemu umożliwiających terminową realizację zlecenia (termin uruchamiania zlecenia).

Przykład 5.12

Dany jest 4-zasobowy (M_1, M_2, M_3, M_4) system wytwórczy w stanie ustalonym opisanym przez zbiór wektorów $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\}$, gdzie:

$$V_1 = [1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1],$$

$$V_2 = [1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1],$$

$$V_3 = [1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1],$$

$$V_4 = [0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0].$$

Reguły alokowane na zasobach mają postać:

$$\sigma_1 = (P_2, P_3, P_3),$$

$$\sigma_2 = (P_1, P_2),$$

$$\sigma_3 = (P_1, P_1, P_3),$$

$$\sigma_4 = (P_2).$$

Cykl systemu wynosi $T = 12$.

Do realizacji w systemie oczekuje zlecenie Z_4 . Zlecenie odpowiada procesowi opisanemu macierzą P_4 . Wielkość zlecenia $I_4 = 20$ elementów. Klient oczekuje realizacji zlecenia w terminie $tz_4 = 90$.

$$P_4 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 2 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Zasób M_5 jest zasobem własnym dla zlecenia Z_4 . Dysponowany fundusz wynosi 10 jednostek w cyklu. Żaden z zasobów wspólnych nie jest zasobem krytycznym. Uwzględniając czasy jednostkowe i czas przygotowawczo-zakończeniowy, dopuszczalna wielkość partii na poszczególnych zasobach wynosi odpowiednio: $B_1 = 3, B_3 = 3, B_4 = 4$. Zatem, dopuszczalna

wielkość partii wynosi $\text{MIN}(B_4) = 3$. Zasób M_5 nie jest zasobem wspólnym. Iloczyn czasu realizacji jednostkowej operacji realizowanej na tym zasobie przez liczbę elementów w partii $t_{5,n+1} * \text{MIN}(B_4) = 2 * 3 = 6$ jest mniejszy od długości cyklu $T = 12$. Zatem okres wprowadzania partii odpowiada okresowi systemu $T' = T = 12$.

Nowe reguły przydzielone do zasobów po przyjęciu zlecenia Z_4 mają postać:

$$\sigma_1 = (P_2, P_4, P_4, P_4, P_3, P_3),$$

$$\sigma_2 = (P_1, P_2),$$

$$\sigma_3 = (P_1, P_1, P_4, P_4, P_4, P_3),$$

$$\sigma_4 = (P_2, P_4, P_4, P_4),$$

$$\sigma_5 = (P_4, P_4, P_4).$$

Wymagana pojemność magazynów międzyoperacyjnych gwarantująca realizację zlecenia bez zakłóceń wynosi:

$$2B_4 - 1 = 2 \cdot 3 - 1 = 5.$$

Jeżeli w systemie zakłada się obecność magazynu centralnego, to jego pojemność powinna być równa:

$$(b_4 - 1)B_{n+1} = (4 - 1)3 = 9.$$

Cykl produkcyjny Cp_4 wynosi:

$$\lceil I_4 / \text{MIN}(B_4) \rceil \cdot T = \lceil 20 / 3 \rceil \cdot 12 = 7 \cdot 12 = 84.$$

Terminowa realizacja zlecenia jest możliwa, gdy nastąpi nie później niż w terminie:

$$tp_4 = 90 - 84 = 6,$$

zakładając, że moment rozpatrywania problemu odpowiada $to_4 = 0$.

5.3.6. Podsumowanie

Metodyka przyjmowania pojedynczych zleceń zakłada nienaruszalność rytmu produkcji już realizowanej i jest stosowana w przypadku przyjmowania kolejnych zleceń do systemu. Umożliwia również wprowadzanie zleceń do systemu „pustego”. Wymaga to jednak wskazania okresu systemu przez operatora, gdyż w przeciwnym przypadku, zgodnie z algorytmem, pierwsze zlecenia będą przyjęte jako jedna, nierozdzielna partia, a czas zajętości zasobu krytycznego wyznaczy okres systemu.

Przedstawione procedury obejmują:

- dobór partii produkcyjnej (ze względu na przestoje zasobów wspólnych),
- wyznaczenie wymaganej pojemności magazynów oraz wyznaczenie wielkości partii ze względu na dostępne pojemności,
- sprawdzenie terminu realizacji zlecenia.

5.4. Porównanie metodyk weryfikacji zbioru zleceń i weryfikacji pojedynczych zleceń

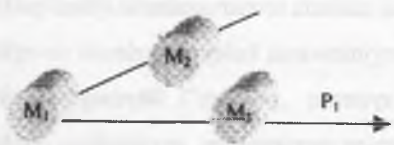
Przedstawione metodyki: „Przyjmowania pakietów zleceń” oraz „Przyjmowania pojedynczych zleceń” różnią się podejściem do rozwiązywania zadań. W pierwszym przypadku pakiet zleceń jest nierozdzielny. Pakiet zleceń może być bądź to przyjęty w całości, bądź też w całości odrzucony. W drugim przypadku zlecenia przyjmowane są w kolejności ich pilności wykonania. Dopuszczalne jest przyjęcie niektórych zleceń i odrzucenie innych. O przyjęciu lub odrzuceniu zleceń decyduje okres systemu, do którego wprowadzane są kolejne zlecenia. Jeżeli w systemie do chwili zgłoszenia się zlecenia nie przyjęto jeszcze do realizacji innych zleceń, to okres systemu wskazuje operator lub zasób krytyczny, który jest związany z realizacją pierwszego z rozpatrywanych zleceń.

Przedstawione metodyki różnią się sposobem podejścia do rozwiązania zadania, jednakże w przypadku przyjmowania pojedynczego zlecenia do systemu w obu przypadkach wynik działania metodyk jest taki sam. Zilustrowano to przykładem 5.13.

Przykład 5.13

Dany jest system 3-zasobowy M_1, M_2, M_3 . Do realizacji w systemie zgłosił się proces P_1 . Przebieg procesu i macierz opisującą proces P_1 przedstawiono na rys. 5.18. Wielkość zlecenia $I = 25$ sztuk, termin planowany $t_{z1} = 150$, dostępna pojemność magazynu $C_s = 14$.

a)



b)

$$P1 = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Rys. 5.18. System 3-zasobowy; a) przebieg procesu P_1 w systemie b) macierz procesu P_1

Fig. 5.18. System composed of 3 resources; a) flow of process P_1 b) matrix of the process P_1

a. Przyjmowanie zlecenia zgodnie z metodyką przyjmowania pakietów zleceń

Okres pracy systemu $T = 3$.

$$\text{Macierz struktury } M_s = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Możliwy termin realizacji zadania $t_{z1} = 75$.

Wymagana pojemność magazynu centralnego $C_s = 2$.

Wskaźnik wykorzystania zasobów $\eta = 0.667$.

b. Przyjmowanie zlecenia zgodnie z metodyką przyjmowania pojedynczych zleceń

Jako okres systemu został przyjęty czas realizacji operacji na zasobie krytycznym $T = 3$. Na wejściu system opisują wektory: $V_1 = [0, 0, 0]$, $V_2 = [0, 0, 0]$, $V_3 = [0, 0, 0]$.

Po przyjęciu zlecenia P_1 wektory przyjmują postać: $V_1 = [1, 1, 1]$, $V_2 = [1, 1, 0]$, $V_3 = [1, 0, 0]$.

Czas realizacji całego zlecenia wynosi $t_{z1} = 75$.

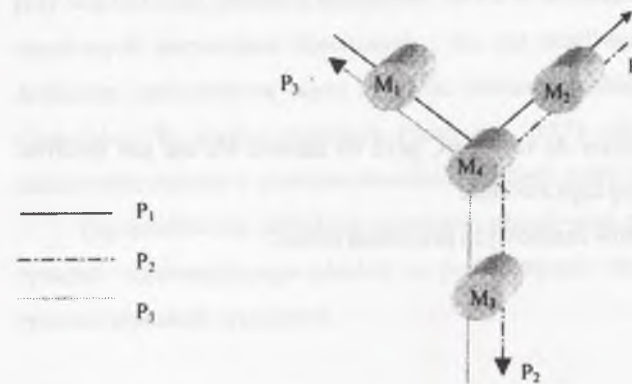
Współczynnik efektywności wykorzystania zasobów $\eta = 0.667$. ■

Łatwo zauważyć, że w przykładzie 5.13.b rozwiązanie zależne jest od decyzji co do długości trwania cyklu. Przyjęcie dłuższego cyklu spowoduje wydłużenie czasu realizacji zlecenia oraz obniżenie wartości współczynnika efektywności wykorzystania zasobów.

Kolejny przykład (przykład 5.14) ilustruje porównanie wyników działania obu metodyk w przypadku przyjmowania do systemu więcej niż jednego zlecenia.

Przykład 5.14

Dany jest system 4-zasobowy (M_1, M_2, M_3, M_4). Do realizacji w systemie zgłosiły się zlecenia Z_1, Z_2, Z_3 . Przebieg procesu przedstawiono na rys. 5.19 i opisano macierzami P_1, P_2, P_3 . Wielkość zleceń $I_1 = I_2 = I_3 = 20$ sztuk, planowany termin realizacji zleceń $t_{z1} = t_{z2} = t_{z3} = 160$, dostępna pojemność magazynu $C_s = 10$.



Rys. 5.19. Przebieg procesów P_1, P_2, P_3 w 4-zasobowym systemie

Fig. 5.19. Flow of processes P_1, P_2, P_3 in the system composed of 4 resources

$$P_1 = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 2 \\ 2 & 3 & 4 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad P_2 = \begin{bmatrix} 2 & 4 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad P_3 = \begin{bmatrix} 3 & 4 & 1 \\ 2 & 3 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

a. Przyjmowanie zleceń zgodnie z metodyką przyjmowania pakietów zleceń

Do zasobów przydzielono reguły rozstrzygania konfliktów zasobowych

$$\sigma_1 = (P_1, P_3), \quad \sigma_2 = (P_1, P_2), \quad \sigma_3 = (P_2, P_3), \quad \sigma_4 = (P_1, P_2, P_3).$$

Bilans systemu jest zachowany przy względnej powtarzalności reguł:

$$\chi_1 = 1, \quad \chi_2 = 1, \quad \chi_3 = 1, \quad \chi_4 = 1,$$

Okres systemu $T = 7$.

Terminy realizacji zleceń są sobie równe i wynoszą $tr_1 = tr_2 = tr_3 = 140$ (< 160)

Współczynnik efektywności wykorzystania zasobów $\eta = 0,821$

Wymagana pojemność magazynu wynosi $C_s = 6$.

b. Przyjmowanie zlecenia zgodnie z metodyką przyjmowania pojedynczych zleceń

Ustalono okres systemu (okres rozliczeniowy). Przyjęto $T = 10$.

Zlecenia oczekujące na realizację w systemie zostają uszeregowane wg najmniejszej rezerwy czasowej, jaka pozostaje do wymaganego terminu realizacji Z_2, Z_3, Z_1 i przyjmowane w takiej kolejności do realizacji.

Zlecenie Z_2 do realizacji zostaje przyjęte z wielkością partii $B_2 = 3$

Zlecenie Z_3 do realizacji zostaje przyjęte z wielkością partii $B_3 = 2$.

Wektory zajętości zasobów po przyjęciu zleceń Z_2 i Z_3 przyjmują postać:

$$V_1 = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0],$$

$$V_2 = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0],$$

$$V_3 = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1],$$

$$V_4 = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0].$$

Zlecenie Z_1 nie zostanie przyjęte do realizacji, gdyż na zasobie M_4 nie jest możliwe wykonanie nawet partii jednostkowej tego zlecenia.

Reguły rozstrzygania konfliktów zasobowych przyjmują postać:

$$\sigma_1 = (P_3, P_3),$$

$$\sigma_2 = (P_2, P_2, P_2),$$

$$\sigma_3 = (P_2, P_2, P_2, P_3, P_3),$$

$$\sigma_4 = (P_2, P_2, P_2, P_3, P_3),$$

Termin realizacji zlecenia Z_1 nie jest dotrzymany.

Termin realizacji zlecenia Z_2 , $tr_2 = 66$ jest dotrzymany (< 160). Termin realizacji zlecenia Z_3 , $tr_3 = 100$ jest dotrzymany (< 160). ■

Z przedstawionego porównania można wnioskować, że podejścia (metodyki) różnią się rozwiązaniami. Pierwsza zapewnia zachowanie ilościowych proporcji realizowanych zleceń. Druga z kolei daje większą szansę na przyjęcie do realizacji zleceń, które jako pierwsze zgłoszą się do systemu i wykonania ich w krótszym terminie, natomiast zmniejsza szansę na przyjęcie kolejnych zleceń.

5.5. Podsumowanie rozdziału

Przedstawione metodyki przyjmowania zleceń polegają na ograniczaniu (zawężaniu) zbioru rozwiązań. Efektem takiego postępowania jest realizacja zlecenia przy najmniejszym dopuszczalnym zapotrzebowaniu na pojemność magazynu centralnego (sumę pojemności magazynów międzyoperacyjnych). Metodyka przyjmowania dodatkowych zleceń do już funkcjonującego systemu nie pozwala na zmiany rytmu produkcji już realizowanej oraz zmiany w sposobie realizacji już przyjętych zleceń.

Przedstawiono dwa podejścia do problemu szybkiego wariantowania zleceń. Pierwsze z nich (zgodne z algorytmem, patrz rys. 5.8) rozwiązuje problem przyjmowania pakietu zleceń do współbieżnej realizacji w systemie. Podejście to znajduje zastosowanie, w szczególności, na etapie planowania produkcji w nowym przedsiębiorstwie. Może być zastosowane również przy współbieżnej produkcji elementów, takich że wymuszona jest realizacja asortymentów w określonych proporcjach ilościowych i nie ma możliwości rezygnacji z któregoś z nich. Jednostkę rozliczeniową może stanowić element obrabiany lub cała (niepodzielna) partia elementów. W drugim podejściu (patrz rys. 5.17) zakłada się, że w systemie już są realizowane zadania w pewnym określonym rytmie, który nie może ulec zmianie.

Zaprezentowana metodyka sterowania przepływem produkcji jest podstawą utworzenia systemu wspomagającego planistę w podejmowaniu decyzji o przyjmowaniu zleceń do systemu produkcji rytmicznej.

6. Prototypowanie wariantów organizacji produkcji rytmicznej

Dostępne na rynku pakiety klasy MRP umożliwiają zaplanowanie przepływów procesów. Efektem planowania na poziomie taktycznym w systemach klasy MRP, czy szerzej – w systemach zarządzania zasobami przedsiębiorstwa (ang.: Enterprise Resource Planning-ERP), jest główny harmonogram produkcji. Realizacja funkcji planowania, a w szczególności harmonogramowania następuje z wykorzystaniem metod symulacji komputerowej, przy założeniu nieskończonej wydajności systemu wytwórczego. Złożoność odpowiedniego eksperymentu symulacyjnego, konieczność jego zaplanowania i zaprogramowania, a także konieczność przeprowadzenia jego eksperymentalnej weryfikacji wymusza poszukiwanie innych bardziej efektywnych rozwiązań. MRP nie mają możliwości dynamicznego reagowania na zakłócenia występujące przy realizacji zadań wcześniej zaplanowanych i tym samym nie umożliwiają integracji w zakresie planowania przepływu i sterowania operacyjnego (np. zadanego poprzez określenie stopnia pilności robót). Przewycięzaniu tych niedostatków poświęca się ostatnio coraz więcej uwagi [Chrobot, Rakowski, 1998]. Warto zwrócić uwagę na dwa kierunki badań związane odpowiednio z wykorzystaniem aparatu algebry abstrakcyjnej oraz technik symulacji komputerowej.

Pierwszy z nich wykorzystuje formalizm algebry (max,+) [Kłós, 1996], [Obuchowicz, Honczarenko, Banaszak, 1996], [Bacelli *et al.*, 1992], [Kłós, Skołud, Banaszak, 1999]. Formalizm ten jest stosowany do modelowania systemów komunikacji miejskiej, systemów produkcyjnych oraz sieci komputerowych, których zachowanie ma charakter cykliczny. Jest wykorzystywany do budowy algorytmów syntezy systemów współbieżnych procesów produkcyjnych. Umożliwia analityczne, bez konieczności prowadzenia badań symulacyjnych, wyznaczenie parametrów systemu jednoczesnej wieloasortymentowej produkcji rytmicznej. Model systemu współbieżnych procesów produkcyjnych jest budowany na podstawie grafu porządku operacji. Podstawy formalizmu algebry (max,+) oraz przykład zastosowania przedstawiono w dodatku A.

Reprezentantem drugiego kierunku jest powszechnie dostępny *komputerowy system wspomagania harmonogramowania przebiegu współbieżnych procesów produkcyjnych*, napisany w środowisku JAVA [GEP]. Umożliwia on modelowanie i ocenę efektywności funkcjonowania rozproszonych systemów procesów cyklicznych. W szczególności pozwala,

w danej strukturze systemu, na analizę zależności występujących pomiędzy wielkościami pojemności magazynów międzyoperacyjnych a regułami wyboru priorytetu, stanem początkowym systemu (początkowy przydział procesów do zasobów) a regułami wyboru priorytetu itp. Możliwości te pozwalają wykorzystać go jako narzędzie rozwijające intuicję dyspozytora systemu [Kłós, Stańczyk, Skołud, 1998].

Alternatywę do podejścia stosowanego w systemach MRP stanowi również metodyka analityczna, polegająca na etapowym podejmowaniu decyzji. Zintegrowane ujęcie etapów planowania produkcji i sterowania operatywnego, przedstawione w metodach szybkiej weryfikacji zleceń produkcyjnych, znalazło swoją implementację w pakiecie System Weryfikacji Zleceń (SWZ)*. Do zadań SWZ należy wyznaczanie dopuszczalnych przebiegów procesów w systemie o zdeterminowanej strukturze, a więc określenie dedykowalności systemu produkcyjnego do realizacji określonych zleceń, wyznaczanie parametrów charakteryzujących system wytwórczy, gwarantujących terminową realizację zleceń w warunkach występowania ograniczeń zasobowych tego systemu. Wspomaga planistę w podejmowaniu decyzji przy projektowaniu organizacji systemów produkcji rytmicznej oraz przy przyjmowaniu zleceń do systemu już funkcjonującego. Wynikiem działania pakietu, w przypadku akceptacji zlecenia produkcyjnego, jest procedura sterowania rozproszonego przepływem produkcji. Procedurę tę tworzy przydział zbioru reguł wyboru priorytetu, koordynujących przepływy planowanej wieloasortymentowej produkcji rytmicznej.

W rozdziale 6.1 przedstawiono podstawy działania SWZ. Szczegóły budowy interfejsu użytkownika oraz przykładowe ekrany zawarto w dodatku B. Funkcjonowanie opracowanego pakietu zweryfikowano, wykorzystując do tego celu dane z Fabryki Reduktorów i Motoreduktorów „BEFARED” S.A. w Bielsku-Białej. Weryfikację przedstawiono w rozdziale 6.2.

6.1. System weryfikacji zleceń

W niniejszym rozdziale zajęto się wykazaniem, iż korzystając z twierdzeń sformułowanych w rozdziałach 4 i 5 oraz wcześniej przedstawionych algorytmów, możliwa jest natychmiastowa odpowiedź na pytanie dotyczące możliwości przyjęcia zlecenia

* Pakiet SWZ jest dostępny na serwerze Politechniki Śląskiej pod adresem <http://zeus.polsl.gliwice.pl/~skolud/>

(pakietów zleceń) do realizacji w systemie produkcyjnym, bez uciekania się do kosztownych symulacji.

Etapy projektowania pakietu SWZ są analogiczne do etapów wyboru odpowiedniego narzędzia symulacyjnego. Sprowadzają się one do [Gregor *et al.*, 1998]:

- wskazania obszaru aplikacji, użytkownika oraz kosztów dopuszczalnych dotyczących sprzętu i oprogramowania,
- określenia koncepcji oprogramowania (obliczeniowe, dialogowe, graficzne itp.),
- szczegółowego określenia zakresu funkcjonowania projektowanego pakietu, jego modelu, sposobu użytkowania oraz stopnia złożoności obsługi systemu i dokumentacji użytkownika.

W odróżnieniu od pracochłonnych badań symulacyjnych zastosowanie modelu algebraicznego daje natychmiastową odpowiedź na pytanie o wartości wybranych wskaźników jakościowych i ilościowych.

Rozpatrywany pakiet może znaleźć zastosowanie w komórkach:

- zajmujących się bezpośrednio planowaniem,
- w dziale sprzedaży do szybkiego szacowania możliwej terminowej realizacji zlecenia,
- na etapie projektowania nowych komórek produkcyjnych (wyznaczanie pojemności magazynów).

Różnorodność użytkowników (planiści, obsługa biur kontaktu z klientem, projektanci systemu) powoduje konieczność przygotowania aplikacji w powszechnie dostępnym środowisku, charakteryzującym się prostą budową i łatwą obsługą. Spełnienie tych wymogów gwarantuje implementacja w języku programowania Visual Basic w środowisku MS Windows.

Obsługę SWZ ułatwiają okna dialogowe do wprowadzania danych wejściowych. Programowanie obiektowe umożliwia rozbudowę pakietu bez potrzeby modyfikacji wcześniej utworzonych modułów.

Interfejs użytkownika przygotowany jest w postaci okien dialogowych. Na strukturę SWZ składają się dwie grupy okien dialogowych:

- okna dialogowe wprowadzania danych - *dane wejściowe*,
- okna, zawierające wyniki przeprowadzonych eksperymentów – *wyniki*.

6.1.1. Specyfikacja danych

Użytkownik wprowadza dane w trybie dialogowym do arkuszy *dane wejściowe*. Dane wejściowe, analogicznie do modelu przedstawionego w rozdziale 4, są podzielone na dwie grupy: dane o systemie wytwórczym oraz dane o zleceniach oczekujących na realizację.

Specyfikacja systemu wytwórczego

Specyfikacja systemu wytwórczego obejmuje informacje o zasobach systemu, wprowadzonych jako niezależne pliki zewnętrzne do SWZ oraz dane o procesach już w nim realizowanych.

W zależności od stanu systemu wytwórczego w momencie napływu zleceń wybierana jest opcja **PUSTY** albo **ZAJĘTY**. Wybór opcji **PUSTY** powoduje realizację programu zgodnie z algorytmem *Metodyka planowania współbieżnej produkcji wieloasortymentowej* (rys. 5.8). Z kolei opcja **ZAJĘTY** jest wybierana, gdy w systemie wytwórczym już są wykonywane przyjęte wcześniej zlecenia. Program jest realizowany zgodnie z procedurą przedstawioną w algorytmie *Metodyka przyjmowania dodatkowych zleceń* (rys. 5.17).

Dane specyfikujące system to:

- liczba zleceń planowanych do realizacji,
- liczba zasobów w systemie wytwórczym,
- rodzaj magazynu: centralny albo międzyoperacyjny,
- dysponowana pojemność magazynu.

Ponadto w razie wyboru opcji **ZAJĘTY** użytkownik wprowadza dodatkowe informacje o stanie każdego z zasobów w każdej jednostce czasu trwania cyklu.

Specyfikacja zleceń

Specyfikacja zleceń zgłaszających się do realizacji w systemie produkcyjnym obejmuje następujące dane:

- wielkość zlecenia,
- wymagany (dyrektywny lub planowany) termin realizacji zlecenia,
- liczba operacji dla każdego procesu,
- marszruty alternatywne,
- czasy jednostkowe operacji oraz czasy przygotowawczo-zakończeniowe.

6.1.2. Struktura i działanie systemu

Podstawowym celem zastosowania SWZ jest prototypowanie wariantów organizacji systemów produkcji rytmicznej. W szczególności zadanie to sprowadza się do szybkiej weryfikacji zleceń produkcyjnych, czyli odpowiedzi na pytanie: czy dane zlecenie (pakiet zleceń) może być zrealizowane w danym systemie wytwórczym, nie zakłócając przepływu produkcji aktualnie w nim realizowanej. Pozytywnej odpowiedzi systemu towarzyszy wykaz alokowanych reguł wyboru priorytetu, stanowiący zapis zmodyfikowanej procedury sterowania rozproszonego. Ponadto SWZ umożliwia wyznaczenie:

- terminu realizacji zlecenia,
- ostatecznego terminu uruchamiania zlecenia gwarantującego dotrzymanie planowanego terminu realizacji, wyznaczonego przez klienta,
- wskaźnika efektywności wykorzystania zasobów,
- wymaganych pojemności magazynów, jakie gwarantują realizację zleceń w danym systemie,
- najwcześniejszego z możliwych terminów realizacji zlecenia i przedstawia propozycje takich terminów (na podstawie wskaźnika terminowości realizacji zlecenia).

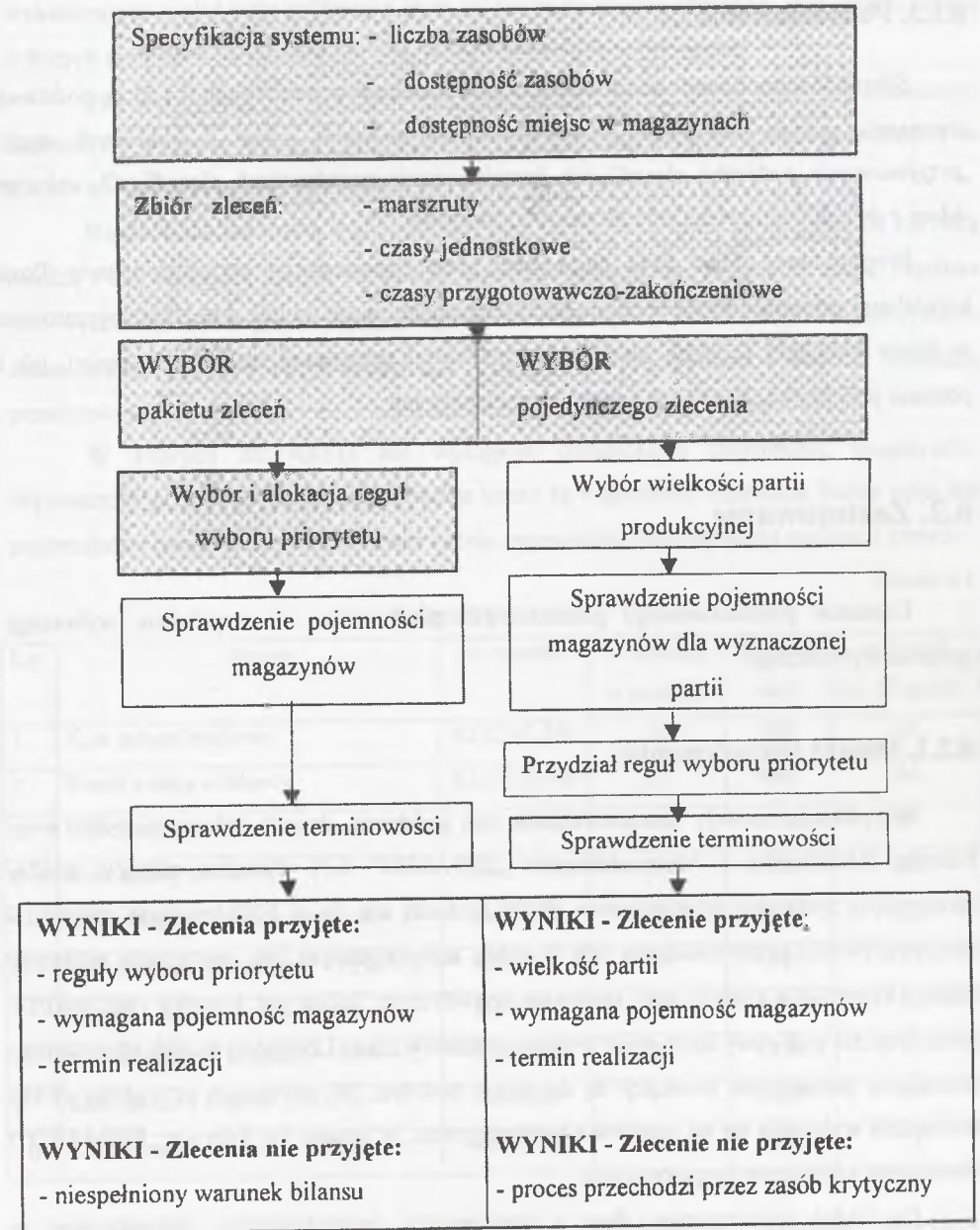
Pakiet SWZ działa na podstawie algorytmów przedstawionych w rozdziałach 5.2 i 5.3. Od wyboru opcji system **PUSTY / ZAJĘTY** zależy dalsze działanie SWZ, co przedstawiono w postaci algorytmu (rys. 6.1).

W przypadku gdy zlecenie może być przyjęte do realizacji w systemie wytwórczym, (spełniając wcześniej określone założenia), SWZ generuje komunikaty informujące o:

- możliwości realizacji zlecenia w założonym terminie,
- możliwym najwcześniejszym terminie realizacji zlecenia,
- dopuszczalnej wielkości partii do realizacji w systemie,
- częstotliwości uruchamiania partii zlecenia,
- wyborze i przydziale reguł wyboru priorytetu dla poszczególnych zasobów,
- efektywności wykorzystania zasobów.

Jeżeli natomiast zlecenie nie zostaje przyjęte do realizacji, wówczas SWZ generuje następujące komunikaty o:

- braku wystarczających przestojów na zasobach wspólnych,
- braku wystarczającej pojemności magazynów,
- braku możliwości terminowej realizacji zlecenia.



Rys. 6.1. Algorytm funkcjonowania SWZ

decyzje podejmowane przez planistę, sprawdzanie warunków przez SWZ

Fig. 6.1. Algorithm of the system SWZ operation

planist's decision, examination of conditions SWZ

6.1.3. Podsumowanie

Sformułowane twierdzenia i wnioski (przedstawione w rozdziałach 4 i 5) są podstawą utworzenia pakietu SWZ. Pakiet ten umożliwi realizację jednej z wybranych opcji: „*przyjmowanie pakietów zleceń*” lub „*przyjmowanie pojedynczych zleceń*”. O wyborze jednej z dwóch opcji ostatecznie decyduje użytkownik.

Proponowany pakiet SWZ może mieć wiele zastosowań w przedsiębiorstwie. Poza komórkami zajmującymi się bezpośrednio planowaniem może on być wykorzystany zarówno w dziale sprzedaży (szybkie szacowanie możliwości terminowej realizacji zlecenia), jak i podczas projektowania nowych komórek produkcyjnych.

6.2. Zastosowanie

Działanie przedstawionego pakietu SWZ zilustrowano na przykładzie wybranego systemu wytwórczego.

6.2.1. Obiekt eksperymentu

Weryfikację metody przeprowadzono na podstawie danych udostępnionych przez Fabrykę Reduktorów i Motoreduktorów „BEFARED” S.A. Pomimo różnicy między elastycznym systemem produkcyjnym (ESP) (zakłada się, że w ESP wymiana narzędzi i oprzyrządowania przeprowadzana jest w cyklu automatycznym bez ponoszenia nakładów czasu i kosztów) a tradycyjnym systemem wytwórczym, jakim jest Fabryka „BEFARED” (przezbieranie pod nowy asortyment wymaga nakładów czasu i kosztów) sposób planowania i sterowania przepływem produkcji są do siebie podobne. W pierwszym przypadku (ESP) sterowanie wykonuje się na podstawie harmonogramu, w drugim (w Fabryce „BEFARED”) obowiązuje sterowanie dyspozytorskie.

Do badań wykorzystano dane z dokumentacji technologicznej, obowiązującej w Fabryce. Nie wprowadzono żadnych zmian do obowiązującej technologii i normatywów.

Podstawową produkcję w Fabryce stanowią elementy uzębione. Najważniejszymi metodami obróbki są: frezowanie obwiedniowe, dłutowanie metodą Fellowsa, a do uzębienia wewnętrznych (otoczki sprzęgieł) stosuje się przeciąganie. Uzębienie stożkowe, dla uzębienia zbieżnego i zębów prostych, śrubowych oraz łukowych, wykonywane jest metodą Gleasona, zaś uzębienie o jednakowej wysokości i zębach łukowych metodą Kurvex. Obróbka

wykańczająca: wałki małe szlifowane są na szlifierce Reishauer, natomiast koła i wałki zębate o dużych modułach na szlifierkach typu Niles. Niektóre są wiórkowane.

Do weryfikacji, z programu produkcyjnego na wydziale obróbki elementów uzębionych, wybrano elementy produkowane w przedsiębiorstwie w sposób powtarzalny w stałych wielkościach serii i przez wiele lat.

Najmniejszą jednostką rozliczeniową, jaka jest dopuszczalna ze względu na obróbkę cieplną i obowiązujący system transportu, jest minimalna partia, licząca 25 sztuk. Możliwe jest wykonanie kilku partii identycznego asortymentu przy jednokrotnym wykorzystaniu czasu przygotowawczo-zakończeniowego. Przyjęty do eksperymentu program produkcji przedstawiono w tabeli 6.1.

W Fabryce BEFARED nie występują ograniczenia pojemności magazynów. Wyznaczone przez SWZ pojemności można uznać za wskazówkę dotyczącą liczby palet lub pojemników, jaką należy zarezerwować w celu zapewnienia nieprzerwanej realizacji zleceń.

Tabela 6.1

Program produkcji					
Lp.	Nazwa	Nr rysunku	L. operacji w procesie	Wielkość serii	L. jednostek (po 25 sztuk)
1	Koło zębate stożkowe	KZS33/2,5/A	14	600	24
2	Wałek zębaty stożkowy	KZS16/2,5/D	20	600	24
3	Wałek zębaty stożkowy	KZS16/4/D	19	300	24
4	Koło zębate stożkowe	KZS33/4/A	17	300	24
5	Koło zębate III stopnia $z = 52$ $m = 2$	3M01403	16	1800	72
6	Wałek zębaty II stopnia $z = 12$ $m = 2$	4M01002	18	1800	72
7	Zębnik I stopnia $z = 16$ $m = 1$	2M00704	18	2400	96
8	Wałek zębaty II stopnia $z = 21$ $m = 2$	5M01302	19	1800	72
9	Koło zębate I stopnia $z = 75$ $m = 1$	3M00802	17	2400	96
10	Koło zębate I stopnia $z = 69$ $m = 2$	6M00802	18	1800	72

Każde zlecenie jest wykonywane wzdłuż jednoznacznie określonej marszruty. Współbieżna realizacja wszystkich zleceń w systemie determinuje istnienie zasobów dzielonych.

Schemat marszrut procesów oraz wykaz maszyn i urządzeń, na których realizowany jest przyjęty program produkcyjny, zawarto w dodatku C.

6.2.2. Przedmiot weryfikacji

Przedmiotem weryfikacji jest metoda przedstawiona w rozdziałach 3 i 4 oraz działanie pakietu SWZ utworzonego na jej podstawie.

Celem weryfikacji jest wykazanie możliwości zastosowania metody i utworzonego pakietu SWZ do planowania i sterowania przepływem produkcji. W szczególności weryfikacja obejmuje aspekty:

- przyjmowania pakietu zleceń do jednoczesnej realizacji w systemie wytwórczym – dobór reguł wyboru priorytetu dokonywany jest przez SWZ,
- przyjmowania pakietu zleceń do jednoczesnej realizacji w systemie wytwórczym – dobór reguł wyznaczania priorytetu dokonywany jest w trybie interakcyjnym (dialog SWZ - planista),
- przyjmowanie pojedynczych zleceń do realizacji w systemie wytwórczym.

W rozpatrywanych przypadkach wyznaczone są reguły wyboru priorytetu, gwarantujące jakościowo dopuszczalne funkcjonowanie systemu oraz wskaźniki oceny ilościowej, takie jak: okres systemu, terminowość realizacji zleceń, współczynnik wykorzystania zasobów i wymagana pojemność magazynów. Wyznaczone wartości stanowią dla planisty podstawę przy podejmowaniu decyzji o przyjęciu (ewentualnie rezygnacji z przyjęcia) zlecenia (pakietu zleceń) zgłaszającego się do danego systemu produkcyjnego.

6.2.3. Eksperyment komputerowy

Weryfikację metody przeprowadzono wykonując eksperyment komputerowy z wykorzystaniem pakietu SWZ. Przeprowadzone eksperymenty obejmują dwie podstawowe grupy, tj. przyjmowania pakietów zleceń oraz przyjmowania pojedynczych zleceń (tab. 6.2).

W ramach pierwszej z nich przeprowadzono dwa niezależne eksperymenty. Eksperyment 1, którego celem było wykazanie możliwości doboru reguł wyboru priorytetu w trybie automatycznym, gwarantujących terminową realizację pakietu zleceń w rozpatrywanym systemie. Celem eksperymentu 2 było przedstawienie możliwości interaktywnego działania SWZ i operatora systemu w celu poprawienia wskaźników ilościowych pracy systemu.

Druga grupa eksperymentów obejmuje badanie możliwości przyjmowania pojedynczych zleceń do systemu (eksperyment 3). Zlecenia kolejno są przyjmowane do systemu. Pierwsze zlecenie jest przyjmowane do systemu, w którym nie są realizowane żadne

inne zlecenia, a kolejne już do systemu o zadanym okresie i pewnym poziomie wykorzystania zasobów. Przyjmowanie zleceń (jak w eksperymencie 3) powoduje, że terminy zakończenia realizacji poszczególnych zleceń są bardzo zróżnicowane. W eksperymencie 4 przedstawiono możliwość przyjmowania zleceń w miejsce zleceń opuszczających system po zakończeniu realizacji.

W wyniku przeprowadzonych eksperymentów, oprócz przedstawienia sposobu znajdowania rozwiązania dopuszczalnego ze względu na wymagane wskaźniki oceny ilościowej, każdorazowo tworzona jest lista reguł wyboru priorytetu dla każdego zasobu systemu.

Tabela 6.2

Plan eksperymentu	
Przyjmowanie pakietu zleceń	
EKSPERYMENT 1 dobór reguł (tryb automatyczny)	KROK 1 przyjęcie reguł wyboru priorytetu KROK 2 modyfikacja reguł przyjętych w KROKU 1
EKSPERYMENT 2 modyfikacja reguł (tryb interaktywny)	KROK 1 modyfikacja reguł w celu poprawienia wskaźników pracy systemu KROK 2 kolejna modyfikacja reguł
Przyjmowanie pojedynczych zleceń	
EKSPERYMENT 3 przyjmowanie zleceń kolejno (tryb automatyczny)	przyjmowanie zleceń kolejno, zgodnie z numeracją ich oznaczeń; przyjęto arbitralnie okres systemu T=165
EKSPERYMENT 4 przyjmowanie zleceń w miejsce zakończonych (tryb interaktywny)	analiza możliwości przyjęcia do realizacji zleceń oczekujących w miejsce zleceń wcześniej zakończonych

Przygotowanie eksperymentu

Po przeanalizowaniu dokumentacji technologicznej, udostępnionej przez Fabrykę BEFARED, stwierdzono, że:

- obciążenia maszyn wynikające z normatywów zawartych w dokumentacji technologicznej nie przekraczają zdolności produkcyjnych maszyn i urządzeń;
- realizacja zadań w zadanych wielkościach serii nie jest możliwa bez podziału na partie, przy założonym horyzoncie czasowym i pracy na jedną zmianę. Na przykład, realizacja serii 150 sztuk elementu M00802 bez podziału na partie wymaga 493 godzin. Przyjęcie sześciu partii, każda po 25 elementów, skraca ten czas do ok. 130 godzin;
- w systemie produkcyjnym nie wprowadza się żadnych ograniczeń, jeśli chodzi o miejsca magazynowe.

Ze względu na model systemu i model zlecenia przyjęte w pracy założono, że:

- realizacja procesów przebiega bez nawrotów (zasoby zostały tak przydzielone do marszrut procesów, by nie wystąpiły nawroty);
- przebieg procesów jest realizowany w trybie wzajemnego wykluczania. W przypadku obróbki cieplnej założono, że dostępne są wymagane liczby pieców do nawęglania i hartowania, gwarantujące również taki tryb obsługi;
- przeprowadzone eksperymenty dotyczą wyłącznie przebiegu ustalonego, gdyż zadany asortyment realizowany jest przez lata;
- czasy jednostkowe i czasy przygotowawczo-zakończeniowe przyjmują wartości całkowite (przyjętą jednostką czasu jest kwadrans);
- przyjęty roczny fundusz czasu wynosi 8000 jednostek czasu;
- najmniejszą niepodzielną jednostką produkcyjną jest partia licząca 25 sztuk.

Eksperyment 1

Celem eksperymentu 1 jest wykazanie, iż SWZ umożliwia utworzenie takich reguł wyboru priorytetu, które zapewniają terminową realizację zleceń. Eksperyment przeprowadzono wykorzystując opcję *przyjmowania pakietów zleceń*.

Krok 1. Przyjęto reguły wyboru priorytetu proponowane przez SWZ. Reguły te gwarantują realizację jednostki każdego asortymentu (minimalnej partii 25 sztuk) w czasie jednego cyklu systemu (tabela 6.3).

Tabela 6.3

Krotność wystąpienia procesów w regułach

Procesy	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀
Liczba wystąpień w regułach	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Wyniki eksperymentu 1, krok 1

Okres systemu $T=158$. Zasób nr 28 jest zasobem krytycznym.

Czas realizacji zleceń Z_1, Z_2, Z_3 i Z_4 wynosi 3792 jednostek i jest dopuszczalny (tzn. czas realizacji jest krótszy od dysponowanego funduszu czasu pracy).

Czas realizacji zleceń Z_5, Z_6, Z_8, Z_{10} wynosi 11376 jednostek i jest niedopuszczalny.

Czas realizacji zleceń Z_7, Z_9 wynosi 15168 jednostek i jest niedopuszczalny.

W wyniku tak przyjętej realizacji zleceń dotrzymanie wymaganego terminu jest możliwe jedynie w przypadku czterech zleceń: Z_1, Z_2, Z_3 i Z_4 spośród dziesięciu zgłoszonych do realizacji w systemie produkcyjnym. W przypadku pozostałych sześciu zleceń wymagany termin nie został dotrzymany. Ponieważ rozpatrywana jest opcja *przyjmowania pakietu zleceń*, wobec tego powyższe rozwiązanie nie jest satysfakcjonujące.

Planista może bądź zrezygnować z przyjęcia pakietu zleceń do realizacji, bądź dalej poszukiwać rozwiązania dopuszczalnego. Przy podjęciu drugiej decyzji SWZ proponuje zwiększenie liczby wystąpień procesów opóźnionych (ich czas realizacji jest niedopuszczalny) w regułach przydzielonych do zasobów systemu (krok 2).

Krok 2. Ze względu na przekroczenie dopuszczalnego terminu realizacji przez zlecenia $Z_5, Z_6, Z_7, Z_8, Z_9, Z_{10}$ SWZ zaproponował zwiększenie krotności wystąpień procesów (odpowiadających zleceniom opóźnionym) w regułach przydzielonych do zasobów, przez które przebiegają te procesy. W wyniku tego otrzymano krotności wystąpienia procesów w regułach przedstawione w tabeli 6.4.

Tabela 6.4

Krotność wystąpienia procesów w regułach

Procesy	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀
Liczba wystąpień w regułach	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2

Wyniki eksperymentu 1, krok 2

Okres systemu $T=158$. Zasób nr 28 jest zasobem krytycznym.

Czas realizacji zleceń Z_1, Z_2, Z_3 i Z_4 wynosi 3792 jednostek i jest dopuszczalny.

Czas realizacji zleceń Z_5, Z_6, Z_8, Z_{10} wynosi 5688 jednostek i jest dopuszczalny.

Czas realizacji zleceń Z_7, Z_9 wynosi 7584 jednostek i jest dopuszczalny.

Współczynnik wykorzystania zasobów $\eta = 0.251$.

Wymagana pojemność magazynu 266.

Reguły rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych przydzielone do zasobów mają postać:

- | | |
|---|--|
| $\sigma_1 = (P_4)$ | $\sigma_{33} = (P_2P_3)$ |
| $\sigma_2 = (P_5P_5P_6P_6P_7P_7P_9P_9P_{10}P_{10})$ | $\sigma_{34} = (P_4)$ |
| $\sigma_3 = (P_8P_8)$ | $\sigma_{35} = (P_5P_5P_9P_9P_{10}P_{10})$ |
| $\sigma_4 = (P_1P_4)$ | $\sigma_{36} = (P_5P_5P_9P_9P_{10}P_{10})$ |
| $\sigma_5 = (P_4)$ | $\sigma_{37} = (P_5P_5P_9P_9P_{10}P_{10})$ |
| $\sigma_6 = (P_1P_5P_5P_6P_6P_{10}P_{10})$ | $\sigma_{38} = (P_6P_6P_7P_7)$ |
| $\sigma_7 = (P_8P_8)$ | $\sigma_{39} = (P_6P_6)$ |
| $\sigma_8 = (P_1P_4)$ | $\sigma_{40} = (P_7P_7)$ |
| $\sigma_9 = (P_4)$ | $\sigma_{41} = (P_7P_7)$ |
| $\sigma_{10} = (P_9P_9)$ | $\sigma_{42} = (P_8P_8)$ |
| $\sigma_{11} = (P_7P_7)$ | $\sigma_{43} = (P_8P_8)$ |
| $\sigma_{12} = (P_2P_9P_9P_{10}P_{10})$ | $\sigma_{44} = (P_1P_3P_6P_6P_7P_7)$ |
| $\sigma_{13} = (P_5P_5P_9P_9P_{10}P_{10})$ | $\sigma_{45} = (P_1P_2P_3P_6P_6P_{10}P_{10})$ |
| $\sigma_{14} = (P_5P_5P_9P_9P_{10}P_{10})$ | $\sigma_{46} = (P_4P_5P_5P_7P_7P_9P_9)$ |
| $\sigma_{15} = (P_9P_9P_{10}P_{10})$ | $\sigma_{47} = (P_1)$ |
| $\sigma_{16} = (P_2P_6P_6)$ | $\sigma_{48} = (P_2P_3)$ |
| $\sigma_{17} = (P_2P_6P_6)$ | $\sigma_{49} = (P_4)$ |
| $\sigma_{18} = (P_7P_7)$ | $\sigma_{50} = (P_2P_4P_5P_5P_8P_8P_8P_9P_9P_{10}P_{10}P_{10})$ |
| $\sigma_{19} = (P_7P_7)$ | $\sigma_{51} = (P_8P_8P_8)$ |
| $\sigma_{20} = (P_7P_7)$ | $\sigma_{52} = (P_1P_2P_3P_4P_5P_5P_7P_7P_8P_8P_{10}P_{10}P_{10})$ |
| $\sigma_{21} = (P_2P_3P_6P_6P_8P_8)$ | $\sigma_{53} = (P_1P_2P_3P_4P_5P_5P_7P_7P_8P_8P_9P_9P_{10}P_{10}P_{10})$ |
| $\sigma_{22} = (P_3P_8P_8)$ | $\sigma_{54} = (P_1P_2P_3P_4P_5P_5P_7P_7P_8P_8P_9P_9P_{10}P_{10})$ |
| $\sigma_{23} = (P_3P_8P_8)$ | $\sigma_{55} = (P_2P_3P_6P_6P_8P_8)$ |
| $\sigma_{24} = (P_6P_6P_8P_8)$ | $\sigma_{56} = (P_1P_2P_3P_4P_5P_5P_7P_7P_8P_8P_{10}P_{10})$ |
| $\sigma_{25} = (P_6P_6P_8P_8)$ | $\sigma_{57} = (P_2P_3P_4)$ |
| $\sigma_{26} = (P_2P_3)$ | $\sigma_{58} = (P_8P_8P_8)$ |
| $\sigma_{27} = (P_1P_4)$ | $\sigma_{59} = (P_5P_5P_7P_7P_8P_8P_9P_9P_{10}P_{10})$ |
| $\sigma_{28} = (P_1P_4)$ | $\sigma_{60} = (P_7P_7)$ |
| $\sigma_{29} = (P_2P_3)$ | $\sigma_{61} = (P_1P_4P_5P_5P_7P_7P_9P_9)$ |
| $\sigma_{30} = (P_2P_3)$ | $\sigma_{62} = (P_5P_5P_9P_9)$ |
| $\sigma_{31} = (P_2P_3)$ | $\sigma_{63} = (P_1P_2P_3P_4)$ |
| $\sigma_{32} = (P_2P_3)$ | $\sigma_{64} = (P_6P_6)$ |

Wyznaczone w eksperymencie reguły wyboru priorytetu gwarantują terminową realizację wszystkich zleceń ze zgłoszonego pakietu.

Zadanie planisty ograniczyło się jedynie do zatwierdzenia proponowanych przez SWZ rozwiązań (tj. zmian krotności wystąpienia procesów w regułach).

Wyznaczona sumaryczna pojemność magazynów wymagana przy takiej realizacji zleceń gwarantuje systemowi jakościowo dopuszczalne funkcjonowanie bez blokad i zagłódzeń. Ponieważ w rozpatrywanym systemie nie są znane ograniczenia pojemności magazynów, to wyznaczona wartość może stanowić ważną informację dla organizatora systemu podejmującego decyzję o budowie magazynu, ewentualnie o rezerwowaniu pojemności dostępnych dla rozpatrywanej produkcji.

Eksperyment 2

Celem eksperymetu 2 jest wykazanie możliwości interakcyjnego doboru reguł wyboru priorytetu. Pomimo uzyskania w eksperymencie 1 rozwiązania dopuszczalnego, z powodu

dużego opóźnienia realizacji zleceń Z_7 i Z_9 względem pozostałych zleceń, planista zwiększa liczę wystąpień procesów P_7 i P_9 w regułach zaalokowanych na zasobach, przez które przechodzą. Jako stan wejściowy do przeprowadzenia tego eksperymentu przyjęto stan systemu po zrealizowaniu kroku 2 eksperymentu 1.

Krok 1. Planista zwiększa liczbę wystąpień procesów P_7 i P_9 , charakteryzujących się najdłuższymi czasami realizacji, w regułach przydzielonych do zasobów, przez które te procesy przechodzą. Uzyskano w ten sposób krotności wystąpień procesów w regułach przedstawione w tabeli 6.5.

Tabela 6.5

Kolejny krok doboru reguł										
Procesy	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}
Liczba wystąpień w regułach	1	1	1	1	2	2	3	2	3	2

Wyniki Eksperymentu 2, Krok 1

Okres systemu $T=158$. Zasób nr 28 jest zasobem krytycznym.

Czas realizacji zleceń Z_5, Z_6, Z_8, Z_{10} wynosi 5688 jednostek i jest dopuszczalny.

Czas realizacji zleceń Z_7, Z_9 wynosi 5056 jednostek i jest dopuszczalny.

Współczynnik wykorzystania zasobów $\eta = 0.270$.

Wymagana pojemność magazynu 299.

Czas realizacji zleceń Z_1, Z_2, Z_3 i Z_4 wynosi 3792 jednostek i jest dopuszczalny.

Reguły rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych przydzielone do zasobów mają postać:

- | | |
|---|---|
| $\sigma_1 = (P_4)$ | $\sigma_{33} = (P_2P_3)$ |
| $\sigma_2 = (P_5P_5P_6P_6P_7P_7P_9P_9P_{10}P_{10})$ | $\sigma_{34} = (P_4)$ |
| $\sigma_3 = (P_8P_8)$ | $\sigma_{35} = (P_5P_5P_9P_9P_{10}P_{10})$ |
| $\sigma_4 = (P_1P_4)$ | $\sigma_{36} = (P_5P_5P_9P_9P_{10}P_{10})$ |
| $\sigma_5 = (P_4)$ | $\sigma_{37} = (P_5P_5P_9P_9P_{10}P_{10})$ |
| $\sigma_6 = (P_1P_5P_5P_6P_6P_{10}P_{10})$ | $\sigma_{38} = (P_6P_6P_7P_7)$ |
| $\sigma_7 = (P_8P_8)$ | $\sigma_{39} = (P_6P_6)$ |
| $\sigma_8 = (P_1P_4)$ | $\sigma_{40} = (P_7P_7P_7)$ |
| $\sigma_9 = (P_4)$ | $\sigma_{41} = (P_7P_7P_7)$ |
| $\sigma_{10} = (P_9P_9P_9)$ | $\sigma_{42} = (P_8P_8)$ |
| $\sigma_{11} = (P_7P_7P_7)$ | $\sigma_{43} = (P_8P_8)$ |
| $\sigma_{12} = (P_2P_9P_9P_{10}P_{10})$ | $\sigma_{44} = (P_1P_3P_6P_6P_7P_7)$ |
| $\sigma_{13} = (P_5P_5P_9P_9P_{10}P_{10})$ | $\sigma_{45} = (P_1P_2P_3P_6P_6P_{10}P_{10})$ |
| $\sigma_{14} = (P_5P_5P_9P_9P_{10}P_{10})$ | $\sigma_{46} = (P_4P_5P_5P_7P_7P_9P_9P_9)$ |
| $\sigma_{15} = (P_9P_9P_{10}P_{10})$ | $\sigma_{47} = (P_1)$ |
| $\sigma_{16} = (P_2P_6P_6)$ | $\sigma_{48} = (P_2P_3)$ |
| $\sigma_{17} = (P_2P_6P_6)$ | $\sigma_{49} = (P_4)$ |
| $\sigma_{18} = (P_7P_7P_7)$ | $\sigma_{50} = (P_2P_4P_5P_5P_8P_8P_8P_9P_9P_9P_{10}P_{10}P_{10})$ |
| $\sigma_{19} = (P_7P_7P_7)$ | $\sigma_{51} = (P_8P_8P_8)$ |
| $\sigma_{20} = (P_7P_7P_7)$ | $\sigma_{52} = (P_1P_2P_3P_4P_5P_5P_7P_7P_7P_8P_8P_8P_{10}P_{10}P_{10})$ |
| $\sigma_{21} = (P_2P_3P_6P_6P_8P_8)$ | $\sigma_{53} = (P_1P_2P_3P_4P_5P_5P_7P_7P_8P_8P_8P_9P_9P_{10}P_{10}P_{10})$ |
| $\sigma_{22} = (P_3P_8P_8)$ | $\sigma_{54} = (P_1P_2P_3P_4P_5P_5P_7P_7P_8P_8P_9P_9P_{10}P_{10})$ |
| $\sigma_{23} = (P_3P_8P_8)$ | $\sigma_{55} = (P_2P_3P_6P_6P_8P_8)$ |

$$\begin{aligned}\sigma_{24} &= (P_6P_6P_8P_8) \\ \sigma_{25} &= (P_6P_6P_8P_8) \\ \sigma_{26} &= (P_2P_3) \\ \sigma_{27} &= (P_1P_4) \\ \sigma_{28} &= (P_1P_4) \\ \sigma_{29} &= (P_2P_3) \\ \sigma_{30} &= (P_2P_3) \\ \sigma_{31} &= (P_2P_3) \\ \sigma_{32} &= (P_2P_3)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{56} &= (P_1P_2P_3P_4P_5P_5P_7P_7P_8P_8P_{10}P_{10}) \\ \sigma_{57} &= (P_2P_3P_4) \\ \sigma_{58} &= (P_8P_8P_8) \\ \sigma_{59} &= (P_3P_5P_7P_7P_8P_8P_9P_9P_{10}P_{10}) \\ \sigma_{60} &= (P_7P_7P_7) \\ \sigma_{61} &= (P_1P_4P_5P_5P_7P_7P_9P_9P_9) \\ \sigma_{62} &= (P_5P_5P_9P_9P_9) \\ \sigma_{63} &= (P_1P_2P_3P_4) \\ \sigma_{64} &= (P_6P_6)\end{aligned}$$

W wyniku realizacji eksperymentu uzyskano parametry, które umożliwiają dopuszczalną realizację zleceń ze względu na wymagania jakości (brak blokad i zagłódzeń) i wymagania oceny ilościowej (dotrzymanie terminów). Zauważalne jest jednak znaczne zróżnicowanie czasu realizacji poszczególnych zleceń. Zmniejszenie tych różnic jest przedmiotem kroku 2 tego eksperymentu.

Krok 2. Po realizacji kroku 1 zaobserwowano opóźnienie w realizacji zleceń $Z_5, Z_6, Z_7, Z_8, Z_9, Z_{10}$ względem pozostałych. SWZ umożliwia przeprowadzenie natychmiastowych zmian w regułach wyboru priorytetu. Wykorzystując tę cechę pakietu, zwiększono liczbę wystąpień procesów $P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}$ w regułach (tabela 6.6).

Tabela 6.6

Krotność wystąpienia procesów w regułach

Procesy	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}
Liczba wystąpień w regułach	1	1	1	1	3	3	4	3	4	3

Wyniki eksperymentu 2 krok 2

Okres systemu $T=185$. Zasób nr 39 jest zasobem krytycznym.

Czas realizacji wszystkich zleceń jest identyczny dla wszystkich zleceń ze zgłoszonego pakietu i wynosi 4440 jednostek (kwadransów).

Współczynnik wykorzystania zasobów $\eta = 0.277$.

Wymagana pojemność magazynu 368.

Reguły rozstrzygania konfliktów zasobowych przydzielone do zasobów mają postać :

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= (P_4) \\ \sigma_2 &= (P_5P_5P_5P_6P_6P_7P_7P_7P_9P_9P_9P_{10}P_{10}P_{10}) \\ \sigma_3 &= (P_8P_8P_8) \\ \sigma_4 &= (P_1P_4) \\ \sigma_5 &= (P_4) \\ \sigma_6 &= (P_1P_5P_5P_5P_6P_6P_6P_{10}P_{10}P_{10}) \\ \sigma_7 &= (P_8P_8P_8) \\ \sigma_8 &= (P_1P_4) \\ \sigma_9 &= (P_4) \\ \sigma_{10} &= (P_9P_9P_9P_9) \\ \sigma_{11} &= (P_7P_7P_7P_7) \\ \sigma_{12} &= (P_2P_9P_9P_9P_{10}P_{10}P_{10}P_{10})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{33} &= (P_2P_3) \\ \sigma_{34} &= (P_4) \\ \sigma_{35} &= (P_5P_5P_5P_9P_9P_9P_9P_{10}P_{10}P_{10}) \\ \sigma_{36} &= (P_5P_5P_5P_9P_9P_9P_9P_{10}P_{10}P_{10}) \\ \sigma_{37} &= (P_5P_5P_5P_9P_9P_9P_9P_{10}P_{10}P_{10}) \\ \sigma_{38} &= (P_6P_6P_6P_7P_7P_7P_7) \\ \sigma_{39} &= (P_6P_6P_6) \\ \sigma_{40} &= (P_7P_7P_7P_7) \\ \sigma_{41} &= (P_7P_7P_7P_7) \\ \sigma_{42} &= (P_8P_8P_8) \\ \sigma_{43} &= (P_8P_8P_8) \\ \sigma_{44} &= (P_1P_3P_6P_6P_6P_7P_7P_7P_7)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{13} &= (P_5P_5P_5P_9P_9P_9P_9P_{10}P_{10}P_{10}P_{10}) \\ \sigma_{14} &= (P_5P_5P_5P_9P_9P_9P_9P_{10}P_{10}P_{10}P_{10}) \\ \sigma_{15} &= (P_9P_9P_9P_9P_{10}P_{10}P_{10}P_{10}) \\ \sigma_{16} &= (P_2P_6P_6P_6) \\ \sigma_{17} &= (P_2P_6P_6P_6) \\ \sigma_{18} &= (P_7P_7P_7P_7) \\ \sigma_{19} &= (P_7P_7P_7P_7) \\ \sigma_{20} &= (P_7P_7P_7P_7) \\ \sigma_{21} &= (P_2P_3P_6P_6P_6P_8P_8P_8) \\ \sigma_{22} &= (P_3P_8P_8P_8) \\ \sigma_{23} &= (P_3P_8P_8P_8) \\ \sigma_{24} &= (P_6P_6P_6P_8P_8P_8) \\ \sigma_{25} &= (P_6P_6P_6P_8P_8P_8) \\ \sigma_{26} &= (P_2P_3) \\ \sigma_{27} &= (P_1P_4) \\ \sigma_{28} &= (P_1P_4) \\ \sigma_{29} &= (P_2P_3) \\ \sigma_{30} &= (P_2P_3) \\ \sigma_{31} &= (P_2P_3) \\ \sigma_{32} &= (P_2P_3)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{45} &= (P_1P_2P_3P_6P_6P_6P_{10}P_{10}P_{10}) \\ \sigma_{46} &= (P_4P_5P_5P_5P_7P_7P_7P_9P_9P_9P_9) \\ \sigma_{47} &= (P_1) \\ \sigma_{48} &= (P_2P_3) \\ \sigma_{49} &= (P_4) \\ \sigma_{50} &= (P_2P_4P_5P_5P_5P_8P_8P_8P_9P_9P_9P_{10}P_{10}P_{10}) \\ \sigma_{51} &= (P_8P_8P_8) \\ \sigma_{52} &= (P_1P_2P_3P_4P_5P_5P_5P_7P_7P_7P_8P_8P_8P_{10}P_{10}P_{10}) \\ \sigma_{53} &= (P_1P_2P_3P_4P_5P_5P_5P_7P_7P_7P_8P_8P_8P_9P_9P_9P_{10}P_{10}P_{10}) \\ \sigma_{54} &= (P_1P_2P_3P_4P_5P_5P_5P_7P_7P_7P_8P_8P_8P_9P_9P_9P_{10}P_{10}P_{10}) \\ \sigma_{55} &= (P_2P_3P_6P_6P_6P_8P_8P_8) \\ \sigma_{56} &= (P_1P_2P_3P_4P_5P_5P_5P_7P_7P_7P_8P_8P_8P_{10}P_{10}P_{10}) \\ \sigma_{57} &= (P_2P_3P_4) \\ \sigma_{58} &= (P_8P_8P_8) \\ \sigma_{59} &= (P_5P_5P_5P_7P_7P_7P_8P_8P_8P_9P_9P_9P_{10}P_{10}P_{10}) \\ \sigma_{60} &= (P_7P_7P_7P_7) \\ \sigma_{61} &= (P_1P_4P_5P_5P_5P_7P_7P_7P_9P_9P_9P_9) \\ \sigma_{62} &= (P_5P_5P_5P_9P_9P_9P_9) \\ \sigma_{63} &= (P_1P_2P_3P_4) \\ \sigma_{64} &= (P_6P_6P_6)\end{aligned}$$

Warto zauważyć, że rozwiązanie uzyskane w wyniku tego eksperymentu gwarantuje równomierną realizację zleceń; wszystkie zlecenia są wykonane w tym samym terminie. Takie rozwiązanie jest korzystne szczególnie wtedy, gdy produkowane elementy są dostarczane klientowi w pakietach z zachowaniem proporcji ilościowych. Odpowiedź uzyskana w wyniku tego eksperymentu jest alternatywna (również dopuszczalną) w stosunku do rozwiązań uzyskanych w wyniku realizacji eksperymentu 1 krok 2 oraz eksperymentu 2 krok 1.

Wygenerowane reguły wyboru priorytetu są podstawą sterowania rozproszonego pracą systemu.

Eksperyment 3

Przedmiotem eksperymentu 3 jest funkcjonowanie SWZ przy doborze zleceń do realizacji w systemie zgodnie z opcją *przyjmowania pojedynczych zleceń*. Zlecenia przyjmowane są do systemu kolejno (w kolejności numerów), gdyż wymagane terminy realizacji zleceń są takie same dla wszystkich zleceń. Pierwsze ze zleceń przyjmowane jest do systemu, w którym do tej pory nie były realizowane inne zlecenia (systemu „pustego”), zatem do systemu, który nie jest charakteryzowany przez okres powtarzalności.

Okres systemu przyjęto zatem arbitralnie jako $T=165$ (co odpowiada tygodniowi pracy systemu). Sposób przyjmowania zleceń, realizowany w tym eksperymencie, powoduje szybkie ujawnienie się zasobów krytycznych, a tym samym może uniemożliwić realizację wszystkich zleceń zgłaszających się do systemu. Takie działanie wynika z przyjętego sposobu wyznaczania dopuszczalnej partii produkcyjnej. Zlecenia są kolejno analizowane pod kątem

Reguły rozstrzygania konfliktów zasobowych przydzielone do zasobów mają postać:

$\sigma_1 = (P_4 P_4)$	$\sigma_{33} = (P_3 P_3)$
$\sigma_2 = (P_5 P_5 P_5 P_5 P_6 P_6)$	$\sigma_{34} = (P_4 P_4)$
$\sigma_3 = (P_8 P_8)$	$\sigma_{35} = (P_5 P_5 P_5 P_5)$
$\sigma_4 = (P_4 P_4)$	$\sigma_{36} = (P_5 P_5 P_5 P_5)$
$\sigma_5 = (P_4 P_4)$	$\sigma_{37} = (P_5 P_5 P_5 P_5)$
$\sigma_6 = (P_5 P_5 P_5 P_5 P_6 P_6)$	$\sigma_{38} = (P_6 P_6)$
$\sigma_7 = (P_8 P_8)$	$\sigma_{39} = (P_6 P_6)$
$\sigma_8 = (P_4 P_4)$	$\sigma_{40} = \text{nie przydzielono reguły}$
$\sigma_9 = (P_4 P_4)$	$\sigma_{41} = \text{nie przydzielono reguły}$
$\sigma_{10} = \text{nie przydzielono reguły}$	$\sigma_{42} = (P_8 P_8)$
$\sigma_{11} = \text{nie przydzielono reguły}$	$\sigma_{43} = (P_8 P_8)$
$\sigma_{12} = \text{nie przydzielono reguły}$	$\sigma_{44} = (P_6 P_6 P_3 P_3)$
$\sigma_{13} = (P_5 P_5 P_5 P_5)$	$\sigma_{45} = (P_5 P_5 P_5 P_5)$
$\sigma_{14} = (P_5 P_5 P_5 P_5)$	$\sigma_{46} = (P_6 P_6 P_4 P_4)$
$\sigma_{15} = \text{nie przydzielono reguły}$	$\sigma_{47} = (P_5 P_5 P_5 P_5 P_8 P_8 P_3 P_3)$
$\sigma_{16} = (P_6 P_6)$	$\sigma_{48} = (P_6 P_6)$
$\sigma_{17} = (P_6 P_6)$	$\sigma_{49} = (P_4 P_4)$
$\sigma_{18} = \text{nie przydzielono reguły}$	$\sigma_{50} = (P_5 P_5 P_5 P_5 P_8 P_8 P_4 P_4)$
$\sigma_{19} = \text{nie przydzielono reguły}$	$\sigma_{51} = (P_8 P_8)$
$\sigma_{20} = \text{nie przydzielono reguły}$	$\sigma_{52} = (P_5 P_5 P_5 P_5 P_6 P_6 P_3 P_3 P_4 P_4 P_8 P_8)$
$\sigma_{21} = (P_6 P_6 P_8 P_8 P_3 P_3)$	$\sigma_{53} = (P_5 P_5 P_5 P_5 P_6 P_6 P_3 P_3 P_4 P_4 P_8 P_8)$
$\sigma_{22} = (P_8 P_8 P_3 P_3)$	$\sigma_{54} = (P_5 P_5 P_5 P_5 P_6 P_6 P_3 P_3 P_4 P_4 P_8 P_8)$
$\sigma_{23} = (P_8 P_8 P_3 P_3)$	$\sigma_{55} = (P_6 P_6 P_8 P_8 P_3 P_3)$
$\sigma_{24} = (P_6 P_6 P_8 P_8)$	$\sigma_{56} = (P_6 P_6 P_3 P_3 P_8 P_8)$
$\sigma_{25} = (P_6 P_6 P_8 P_8)$	$\sigma_{57} = (P_2 P_2)$
$\sigma_{26} = (P_3 P_3)$	$\sigma_{58} = (P_8 P_8)$
$\sigma_{27} = (P_4 P_4)$	$\sigma_{59} = (P_5 P_5 P_5 P_5 P_8 P_8)$
$\sigma_{28} = (P_4 P_4)$	$\sigma_{60} = \text{nie przydzielono reguły}$
$\sigma_{29} = (P_3 P_3)$	$\sigma_{61} = (P_5 P_5 P_5 P_5 P_4 P_4)$
$\sigma_{30} = (P_3 P_3)$	$\sigma_{62} = (P_5 P_5 P_5 P_5)$
$\sigma_{31} = (P_3 P_3)$	$\sigma_{63} = (P_3 P_3 P_4 P_4)$
$\sigma_{32} = (P_3 P_3)$	$\sigma_{64} = (P_6 P_6)$

Rozwiązanie proponowane w eksperymencie 4 jest dopuszczalne pod warunkiem, że rozpatrywany dopuszczalny czas realizacji zlecenia oraz wielkość serii są powtarzalne i stanowi rodzaj zewnętrznego cyklu pracy systemu.

6.2.4. Wnioski

W celu zweryfikowania poprawności podejścia i działania pakietu SWZ utworzonego na podstawie zaproponowanego modelu oraz twierdzeń i wniosków przeprowadzono dwie grupy eksperymentów. Na ich podstawie można wysunąć następujące wnioski:

Potwierdzono poprawność działania opcji *przyjmowania pakietów zleceń*. W szczególności wykazano, że SWZ analizując stan systemu oraz wynikające z niego parametry sam może wyznaczyć rozwiązanie dopuszczalne (eksperyment 1).

Wykazano, że możliwe jest wyznaczanie, w trybie interakcyjnym (w dialogu SWZ-planista), alternatywnych rozwiązań dopuszczalnych, korzystnych ze względu na jednakowe terminy zakończenia realizacji wszystkich zleceń z pakietu (eksperyment 2).

Przedstawiono działanie opcji *przyjmowania pojedynczych zleceń*. W tym przypadku nie wszystkie zlecenia są zaakceptowane do realizacji, co wynika z działania przyjętego algorytmu. Zlecenia rozpatrywane jako pierwsze zapełniają system, zmniejszając szansę przyjęcia kolejnych, z którymi dzielą zasoby (eksperyment 3).

W przeprowadzonym eksperymencie 4 przedstawiono podejście polegające na podziale całego dysponowanego okresu rozliczenia 8000 jednostek czasu na przedziały. W pierwszym realizowane są zlecenia przyjęte do realizacji. Za początek kolejnego przedziału uznawany jest termin opuszczenia systemu przez zlecenie (zlecenia) zakończone i stan systemu, jaki zaistnieje w tym momencie. Zaistniały nowy stan daje szansę na przyjęcie kolejnych zleceń. W rozpatrywanym przypadku umożliwiło to przyjęcie dwóch zleceń (Z_3 i Z_4) spośród czterech odrzuconych na początku. Takie rozwiązanie ma jednak uzasadnienie jedynie wówczas, gdy wspomniany, dysponowany okres rozliczenia oraz zlecenia zgłaszające się do realizacji powtarzają się, tworząc rodzaj rytmu produkcyjnego o okresie odpowiadającym temu okresowi rozliczenia.

W wyniku wszystkich przeprowadzonych eksperymentów uzyskano niski stopień wykorzystania zasobów. Wynika to z faktu, że wiele z zasobów jest zasobami własnymi dla jednego z realizowanych procesów, np. na zasobach o numerach 1,5,9,34,49 realizowany jest wyłącznie proces P_4 , zaś na zasobie 47 proces P_1 .

W eksperymentach wyznaczono również wymagane pojemności magazynów. Jak wspomniano wcześniej, nie są znane dane dotyczące ograniczeń pojemności magazynowych. Obliczone wartości mogą stanowić informację dla organizatora produkcji oraz projektanta systemu transportowego i magazynowego co do wymaganej liczby miejsc w magazynach, która gwarantuje jakościowo dopuszczalne realizacje zleceń.

Opracowany pakiet SWZ pozwala na projektowanie wariantów organizacji przepływu wieloasortymentowej produkcji rytmicznej. Może być wykorzystywany do:

- projektowania struktur produkcyjnych poprzez generowanie reguł wyboru priorytetu i wyznaczania pojemności magazynów,
- oceny zleceń pod kątem możliwości ich realizacji w systemie o zadanej strukturze i parametrach czasowych,
- wariantowania przepływów produkcji.

6.3. Podsumowanie rozdziału

W rozdziale tym przedstawiono zastosowanie wcześniej zaprezentowanej metodyki. Na jej podstawie utworzony został pakiet SWZ. Metodykę i działanie pakietu zweryfikowano na przykładzie wybranego systemu wytwórczego.

Rezultaty pracy mogą wspomagać proces planowania (wielkości partii produkcyjnych, terminowość realizacji zleceń), sterowania (wyznaczone reguły wyboru priorytetu) oraz strategiczne decyzje związane z przyjmowaniem zleceń.

Zastosowanie przedstawionej metodyki w pakiecie SWZ daje następujące korzyści:

1. Rozproszony system sterowania dzięki własności samosynchronizacji i możliwości niezależnej pracy części systemu jest mniej podatny na zakłócenia i awarie.
2. Poprzez wbudowane mechanizmy gwarantuje pracę systemu bez blokad i zagłódzeń i z tym związany cykliczny przebieg produkcji.
3. Umożliwia analityczne wyznaczenie parametrów systemu, takich jak okres, oraz wyznaczenie zasobów krytycznych.
4. Umożliwia analityczną ocenę zleceń pod kątem możliwości ich realizacji w posiadanym systemie produkcyjnym.

Zalety pakietu SWZ w porównaniu z pakietami klasy MRP przedstawia poniższa tabela.

Tabela 6.9

Porównanie pakietów planowania produkcji MRP i SWZ

MRP	SWZ
Wykorzystuje metody symulacyjne.	Wykorzystuje metodę analityczną.
Nie uwzględnia ograniczeń zasobowych.	Uwzględnia ograniczenia zasobowe.
Nie uwzględnia konfliktów w dostępie do zasobów; planowanie przy założeniu nieskończonej wydajności, co powoduje powstanie blokad i zagłódzeń w systemie.	Uwzględnia konflikty w dostępie do zasobów, planowanie przy założeniu skończonej wydajności, pozwala to zapobiec powstawaniu blokad i zagłódzeń w systemie.
Prowadzi bilans obciążeń ze zdolnością produkcyjną.	Prowadzi bilans obciążenia z istniejącymi przestojami zasobów.
Obejmuje zakres planowania, nie uwzględnia wymagań poziomu sterowania operacyjnego.	Integracja poziomów planowania (wyznaczenie pojemności magazynów, wybór wielkości partii) i sterowania rozproszonego poprzez reguły wyboru priorytetu.
Nie zapewnia terminowej realizacji zleceń produkcyjnych.	Zapewnia terminową realizację przyjętych zleceń.

Przedstawiony pakiet SWZ można zaadaptować do weryfikacji zleceń produkcyjnych pod względem ich dopasowania do systemu produkcyjnego. Rozwój prezentowanego oprogramowania powinien zmierzać do uzupełnienia o dodatkowe funkcje oceny kosztów oraz o moduł związany z rozbiegiem i wybiegiem systemu (zapełnianiem systemu przez zlecenia i opuszczaniem systemu przez nie), co ma szczególne znaczenie przy produkcji realizowanej w krótkich, nie powtarzających się seriach.

Pakiet SWZ może być również zastosowany do rozwiązywania problemów związanych z zarządzaniem transportem wewnątrzzakładowym, procesami remontowymi, wymianą narzędzi i oprzyrządowaniem.

Rola SWZ nie ogranicza się jedynie do odpowiedzi na pytanie, czy dane zlecenie może być realizowane w systemie. Jednocześnie z odpowiedzią na to pytanie tworzy reguły wyboru priorytetu i wyznacza wymagane pojemności magazynów, będące parametrami sterowania rozproszonego.

7. Zakończenie

Techniki oraz środki automatyzacji i podejmowania decyzji, w szczególności w zakresie szeroko pojmowanego przygotowania produkcji (obejmującego między innymi projektowanie wyrobu i procesu technologicznego, planowanie i harmonogramowanie produkcji, sterowanie operacyjne), stanowią o poziomie konkurencyjności współczesnych przedsiębiorstw. Rosnące wymagania rynku klienta, a w szczególności wymagania wysokiej jakości (np. terminowej) obsługi zleceń produkcyjnych, wymuszają dynamiczny rozwój nowych technik wytwarzania, technik integrujących dostępne środki techniczne i ich oprogramowanie oraz stosowane metody organizacji wytwarzania.

Większość stosowanych obecnie narzędzi wspomagania komputerowego przyjmuje za swój paradygmat* technikę analizy (optymalizacji) – poszukiwanie sposobów integracji ekstremali-zujących dane kryteria, które determinują funkcjonowanie systemu produkcyjnego. Możliwości takiego podejścia są siłą rzeczy bardzo ograniczone, gdyż zawężają rozważania do jednego z dostępnych wskaźników jakości funkcjonowania. W szczególności podejście takie koncentruje się na optymalizacji cząstkowych (lokalnych) zadań (wyboru i lokalizacji maszyn, wyboru środków i struktury systemu transportowego, harmonogramowania produkcji itp.) nie gwarantujących lokalnie optymalnego zachowania systemu, decydującego o konkurencyjności na rynku konsumenta.

Przyjęcie paradygmatu eksponującego techniki syntezy pozwala rozważać systemy wspomagania komputerowego, których działanie sprowadza się do poszukiwania struktur, złożonych z optymalnie dobranych komponentów (ekstremalizujących koszty własne przedsiębiorstwa), gwarantujących zadany, np. satysfakcjonujący poziom funkcjonowania (klasyfikujący np. wg innego wskaźnika jakości). Zaletą takiego podejścia jest jego duża efektywność, wyrażająca się między innymi:

- niską, wyrażającą się funkcją wielomianową, złożonością obliczeniową algorytmów wyszukiwania (podejmowania) decyzji,
- możliwością ukierunkowanego wyboru (priorytetowania) stosowanych kryteriów i przyjmowanych ograniczeń.

* Paradygmat-powszechnie przyjęte przekonanie teoretyczne oraz metody eksperymentalne stanowiące tradycję badawczą; termin wprowadzony do filozofii nauki w 1962 roku przez Th.S. Kuhna [Nowy leksykon, 1998]

W szczególności podejście to umożliwia ujęcie układu producent - konsument w kontekście optymalizacji sprzecznych celów bądź to optymalizacji interesów producenta, bądź też optymalizacji celów konsumenta.

Przedstawione w pracy podejście zawarto w rozwijanej koncepcji dedykowanych systemów produkcji rytmicznej. W systemach tego typu możliwa jest integracja planowania produkcji i syntezy sterowania koordynującego jej przepływ. Umożliwia to w efekcie szybką i wiarygodną (znajdującą swoje uzasadnienie w planie i sposobie realizacji planowanej produkcji) weryfikację przyjętych zleceń produkcyjnych.

Rozwinięcie, związanej z tą koncepcją tezy o możliwości efektywnego wyznaczania zintegrowanych planów produkcji (ze sposobem ich wykonania oraz istniejącymi ograniczeniami systemu), znalazło swój wyraz w uzyskanych wynikach.

Przeprowadzona analiza dominujących i rozwijanych trendów rozwojowych systemów produkcji dyskretnych, a w szczególności związanych z ich implementacją technik planowania produkcji, wskazała na potrzebę zintegrowanego ujęcia problemów technicznego i organizacyjnego przygotowania produkcji. W szczególności zaś ukazała korzyści wynikające z:

- „dedykowanego” ujęcia układu producent - konsument,
- z integracji etapów planowania produkcji,
- syntezy procedur sterowania operacyjnego.

Opracowany, dla przyjętych założeń upraszczających (tj.: brak nawrotów, wzajemne wykluczanie, itd.), model układu producent - konsument umożliwił sformułowanie problemu pracy, sprowadzającego się do wyznaczania związków między wybranymi parametrami opracowanego modelu, determinujących możliwość realizacji zleceń produkcyjnych. Wyznaczone, w wyniku przeprowadzonej analizy modelu, związki mają postać odpowiednich warunków wystarczających, których spełnienie gwarantuje realizację wariantowanego zlecenia.

Uzyskane warunki wykorzystane zostały w opracowanej metodyce szybkiej weryfikacji zleceń. Metodyka, potwierdzająca tezę pracy, przedstawia dwa warianty planowania produkcji. Pierwszy z nich weryfikuje możliwości jednoczesnej realizacji pakietu zleceń produkcyjnych, drugi zaś weryfikuje możliwości wprowadzania oddzielnych zleceń do systemu realizującego już wcześniej zaplanowaną produkcję.

Implementacja komputerowa opracowanej metodyki w pakiecie użytkowym systemu weryfikacji zleceń (SWZ) stanowi zwińczenie celu pracy, jakim była budowa komputerowo wspomaganego planowania jednoczesnej wielosortymentowej produkcji rytmicznej.

Załączony przykład zastosowania pakietu wskazuje na jego dużą praktyczną użyteczność, jak również na konieczność prowadzenia dalszych badań. Ich zakres obejmuje między innymi procesy montażu, konieczność uwzględnienia procesów pomocniczych, np. transportu między-komórkowego, analizy kosztów itp.

Posłowie (synteza własnych dokonań)

Patrząc retrospektywnie, punktem wyjściowym badań było przyjęcie paradygmatu syntezy umożliwiającego budowę efektywnych obliczeniowo procedur planowania produkcji. Jego wybór stanowił konsekwencję przeprowadzonej analizy metod i technik wykorzystywanych we współczesnych strategiach zintegrowanego zarządzania. Złożoność i kompleksowość zagadnień związanych z planowaniem produkcji, z jednej strony, a dynamiką związków zachodzących na rynkach producenta i konsumenta, z drugiej strony, uniemożliwiają w praktyce podejmowanie decyzji optymalnych globalnie.

Konsekwencją, stanowiącą wniosek z dokonanej analizy, stała się więc teza zakładająca istnienie efektywnych obliczeniowo metod zintegrowanego planowania przepływu produkcji (obejmujących między innymi dobór marszrut technologicznych, partii produkcyjnych, reguł wyboru priorytetu) - metod umożliwiających wyznaczanie rozwiązań dopuszczalnych. Poszukiwane metody winny udzielać, w trybie on-line, odpowiedzi na pytania, np. typu: czy dane zlecenie produkcyjne może być terminowo zrealizowane w systemie dysponującym znanymi, a nie wykorzystanymi mocami produkcyjnymi?

Wykazanie powyższej tezy wymagało opracowania oryginalnego, kompleksowego modelu układu producent-konsument, składającego się z modelu systemu i modelu zlecenia, stanowiącego platformę badań teoretycznych. W ich wyniku wykazano szereg własności, spełnienie których gwarantuje jakościowo pożądaną charakter przepływu produkcji. Wyprowadzone związki, łączące parametry systemu wytwórczego i zlecenia produkcyjnego z parametrami aktualnie realizowanej produkcji, mają charakter warunków wystarczających, których spełnienie gwarantuje określone cechy funkcjonowania systemu.

Wyniki przeprowadzonych badań teoretycznych znalazły swoje praktyczne zastosowanie w metodyce szybkiej weryfikacji zleceń produkcyjnych. W proponowanym podejściu odpowiedź na pytanie: czy w systemie o znanych mocach produkcyjnych, dane zlecenie może być terminowo wykonane uzyskiwana jest w wyniku przeglądu zadanej sekwencji warunków wystarczających. Pozytywna odpowiedź uwarunkowana jest spełnieniem wszystkich warunków. Niespełnienie któregośkolwiek z nich oznacza, że zlecenie może być zrealizowane ale przy rezygnacji z przyjętych założeń, dotyczących np. terminowości realizacji zlecenia, zakładanej wielkości partii produkcyjnej, itp. Ważną, odróżniającą ją od aktualnie oferowanych, cechą opracowanego podejścia jest możliwość integracji (zwykle oddzielnie realizowanych) faz planowania produkcji: marszrutowania, porcjowania i szeregowania. Oznacza to, że plan przepływu produkcji obejmuje specyfikację

marszruty produkcyjnej, wielkości partii produkcyjnych, niezbędne pojemności magazynów składowania międzyoperacyjnego oraz reguły wyboru priorytetu (składające się na procedurę sterowania rozproszonego).

Komputerową implementację opracowanej metodyki stanowi pakiet „System Weryfikacji Zleceń – SWZ”, którego weryfikacja przeprowadzona została na przykładzie wielosortymentowej produkcji rytmicznej w Fabryce „BEFARED”. Przeprowadzone eksperymenty potwierdziły przydatność zaproponowanego podejścia. Czas odpowiedzi uwarunkowany jest wielkością rozpatrywanego zadania (liczba niezbędnych do wprowadzenia danych wejściowych). Odpowiedź zawiera również zapis procedury sterowania. Cechy te stanowią o istotnych, w porównaniu z dostępnymi systemami klasy MRP, zaletach opracowanego systemu.

Przedstawione podejście łatwo rozszerza się na pozostałe, nie poruszone w pracy, aspekty funkcjonowania systemów produkcyjnych. Niektóre z nich, obejmujące podsystemy transportu i składowania, procesy pomocnicze oraz analizę kosztów, stanowią przedmiot aktualnie prowadzonych prac badawczych.

Dodatek A. Algebraiczna reprezentacja systemu współbieżnych procesów produkcyjnych

A.1. Formalizm algebry (max, +)

Formalizm algebry (max,+) opisano szeregiem definicji [Bacelli *et al.*, 1992].Poniżej przytoczono najważniejsze z nich:

Definicja A.1

Algebra (max,+) ($\mathbf{R}, \oplus, \otimes$) jest zdefiniowana następująco:

- $\mathbf{R}_{\max} = \mathbf{R} \cup \{-\infty\}$,

gdzie \mathbf{R} jest zbiorem liczb rzeczywistych;

- $\forall a, b \in \mathbf{R}_{\max} : a \oplus b = \max(a, b)$;

\oplus - to operator addytywny (“suma”) będący operatorem maksimum zgodnie z porządkiem liczb rzeczywistych;

- $\forall a, b \in \mathbf{R}_{\max} : a \otimes b = a + b$

\otimes to operator multiplikatywny (“iloczyn”) będący zwykłym dodawaniem, gdzie

$$\forall a \in \mathbf{R}_{\max} : a + (-\infty) = (-\infty) + a = (-\infty).$$

Algebra (max,+) posiada następujące własności:

- łączność i przemienność operatora addytywnego \oplus ;
- łączność operatora multiplikatywnego \otimes ;
- prawa i lewa rozdzielność \oplus względem \otimes ;
- istnienie elementu neutralnego (“zera”) dla \oplus i absorbującego dla \otimes : $\varepsilon = (-\infty)$;
- istnienie elementu neutralnego (“jedyński”) dla \otimes : $e = 0$.

Dowolny element przestrzeni \mathbf{R}_{\max} nie posiada elementu odwrotnego względem operatora addytywnego, ponieważ równanie $a \oplus x = \varepsilon$ posiada rozwiązanie tylko dla $a = x = \varepsilon$.

Operacje na macierzach w algebrze (max,+) zostały zdefiniowane następująco:

- Jeżeli $\mathbf{A}, \mathbf{B} \in \mathbf{R}_{\max}$ (gdzie \mathbf{A} i \mathbf{B} są macierzami o wymiarach $m \times n$), to suma macierzy jest zdefiniowana równaniem:

$$(\mathbf{A} \oplus \mathbf{B})_{ij} = a_{ij} \oplus b_{ij}. \quad (\text{A.1})$$

- Jeżeli $A, B \in \mathbf{R}_{\max}$ (gdzie A ma rozmiar $m \times p$ zaś B ma rozmiar $p \times n$), to iloczyn macierzy jest zdefiniowany równaniem:

$$(A \otimes B)_{ij} = (AB)_{ij} = \bigoplus_{k=1}^p (a_{ik} \oplus b_{kj}), \quad (\text{A.2})$$

gdzie, podobnie jak w klasycznej algebrze liniowej, rezygnuje się w zapisie równań ze znaku operatora \otimes .

- Równanie spektralne w algebrze $(\max, +)$ ma postać:

$$A \otimes x = \lambda \otimes x. \quad (\text{A.3})$$

Właściwości

- Każda ścieżka zamknięta $e_1 e_2 \dots e_n$, długości $l_p \geq 3$ o różnych wierzchołkach $x_1 x_2 \dots x_n$ jest cyklem.
- Jeżeli graf jest spójny, to stowarzyszona z nim macierz jest **nieredukowalna**.
- Dla grafów spójnych najwyższa średnia cyklu, spośród wszystkich cykli grafu, jest równa wartości własnej macierzy stowarzyszonej.

Przedstawione definicje i własności, opisujące formalizm algebry $(\max, +)$, umożliwiają budowę modelu systemu, który charakteryzuje się cyklicznym zachowaniem. Konstruowanie algebraicznego modelu rozpoczyna się od budowy grafu porządku operacji, który opisuje przestrzeń stanów systemu.

Graf porządku operacji i równanie stanu

Algebra $(\max, +)$ jest naturalnym formalizmem opisu dla procesów komunikujących się w trybie spotkaniowym (*rendez-vous*). Systemy współbieżnych procesów produkcyjnych analizowane w pracy charakteryzuje wykonywanie operacji na zasobach dzielonych. Dostęp do tych zasobów jest realizowany w trybie wzajemnego wykluczania. Zatem, aby za pomocą formalizmu algebry $(\max, +)$ opisać współpracę procesów w trybie wzajemnego wykluczania, wprowadzono pojęcie procesu koordynującego. Proces koordynujący nie wykonuje rzeczywistej pracy w systemie, pozwala jedynie zastąpić koordynację procesów opartą na protokole wzajemnego wykluczania przez protokół spotkaniowy. Proces koordynujący musi realizować spotkanie z procesem rzeczywistym. Realizacja spotkań procesów koordynujących i rzeczywistych musi spełniać warunek wzajemnego wykluczania tych ostatnich. Liczba wprowadzonych procesów koordynujących jest dowolna, ich wypadkowe działanie musi zapewnić wzajemne wykluczanie oraz określoną, przez regułę rozstrzygnięcia konfliktów

zasobowych, kolejność dostępu procesów do zasobu dzielonego. Pojęcie procesu koordynującego zostało również wprowadzone w pracach [Skołud, 1997b], [Skołud, 1997d].

W celu utworzenia modelu algebraicznego SWPP konieczne jest ustalenie zależności czasowych, pomiędzy poszczególnymi operacjami współpracujących procesów. Zależności te przedstawia się w postaci grafu porządku rozpoczęcia operacji, którego wierzchołki reprezentują poszczególne operacje procesów. Wagi krawędzi wychodzących z danego wierzchołka oznaczają czasy wykonywania operacji, reprezentowanej przez ten wierzchołek. Krawędzie wchodzące do wierzchołka określają warunki, jakie muszą zaistnieć w systemie, aby proces mógł wykonać daną operację. Dana operacja reprezentowana przez wierzchołek grafu może być wykonana, gdy zostaną zakończone wszystkie te operacje, których czasy wykonania są wagami krawędzi wchodzących do danego wierzchołka.

Definicja A.2

Wektor stanu $x(k)$ określa momenty rozpoczęć poszczególnych operacji systemu współbieżnych procesów produkcyjnych w k -tej iteracji. ■

Jako początek iteracji przyjęto pewien dowolny moment cyklicznej zmiany stanu systemu. Określenie początku iteracji polega na wyznaczeniu początkowych operacji wszystkich procesów w danej iteracji. Na podstawie grafu porządku rozpoczęć operacji można odtworzyć równanie stanu (A.4), które opisuje dynamikę zmian wektora stanu w kolejnych iteracjach.

$$\begin{aligned} x(k) &= Ax(k-1) \oplus Bx(k) \\ x(0) &= x_0 \\ y(k) &= Cx(k), \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

gdzie:

B - macierz o rozmiarze $n \times n$ (rozmiar wektora stanu), stowarzyszona z grafem porządku rozpoczęć operacji z wyłączeniem krawędzi, które poprzedzają początek cyklu. Graf porządku rozpoczęć operacji jest zdefiniowany przez parę zbiorów $(\mathcal{V}, \mathcal{E})$, gdzie \mathcal{V} jest zbiorem wierzchołków, a \mathcal{E} jest zbiorem krawędzi. Jeżeli zbiór krawędzi poprzedzających cykl oznaczymy przez \mathcal{E}_s , to graf $G=(\mathcal{V}, \mathcal{E} \setminus \{\mathcal{E}_s\})$ jest grafem stowarzyszonym z macierzą B . Macierz B zawiera zatem elementy $b_{ij} > \varepsilon$ wtedy i tylko wtedy, gdy warunkiem rozpoczęcia j -tej operacji jest zakończenie wykonywania f -tej operacji oraz j -ta operacja nie poprzedza bezpośrednio początku cyklu. Wartością elementu b_{ij} jest czas wykonania f -tej operacji.

A - macierz o rozmiarze $n \times n$ stowarzyszona z grafem porządku rozpoczęć operacji z wyłączeniem krawędzi, które nie poprzedzają początku cyklu. Macierz A zawiera elementy $a_{ij} > \varepsilon$ wtedy i tylko wtedy, gdy warunkiem rozpoczęcia j-tej operacji jest zakończenie operacji f-tej oraz j-ta operacja poprzedza bezpośrednio początek cyklu. Wartością elementu a_{ij} jest czas wykonania f-tej operacji.

C - macierz filtrująca, która usuwa z wektora stanu $x(k)$ elementy związane z operacjami procesów koordynujących pozostawiając w wektorze odpowiedzi $y(k)$ jedynie czasy rozpoczęć operacji procesów realnych. Dla n-elementowego wektora stanu $x(k)$, gdzie m elementów odpowiada momentom rozpoczęć operacji procesów rzeczywistych, a p elementów momentom rozpoczęć operacji procesów koordynujących. Macierz C jest rozmiaru $n \times m$, zaś jej elementy przyjmują następujące wartości:

$$C_{ij} = \varepsilon \text{ dla } f = j,$$

$$C_{ij} = \varepsilon \text{ dla } f \neq j, \text{ gdzie } f=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m,$$

$x(0)$ - wektor stanu zawierający momenty rozpoczęć operacji w zerowej iteracji.

Równanie stanu (A.4) jest równoważne równaniu

$$\begin{aligned} x(k) &= Dx(k-1) \\ x(0) &= x_0 \\ y(k) &= Cx(k), \end{aligned} \quad (A.5)$$

gdzie:

$$D = \left(\bigoplus_{f=0}^{\infty} B^f \right) A. \quad (A.6)$$

Należy znaleźć rozkład rozpoczęć poszczególnych operacji tak, aby została zachowana kolejność dostępu określona protokołem oraz okres pracy całego systemu. Jeżeli przez $d(k)$ oznaczony będzie poszukiwany rozkład rozpoczęć operacji, to podlega on równaniu (A.7):

$$\begin{aligned} d(k) &= Td(k-1) \\ d(0) &= d_0, \end{aligned} \quad (A.7)$$

gdzie: T - okres systemu,

$d(0)$ - wektor, którego elementy stanowią momenty rozpoczęć operacji w zerowej iteracji.

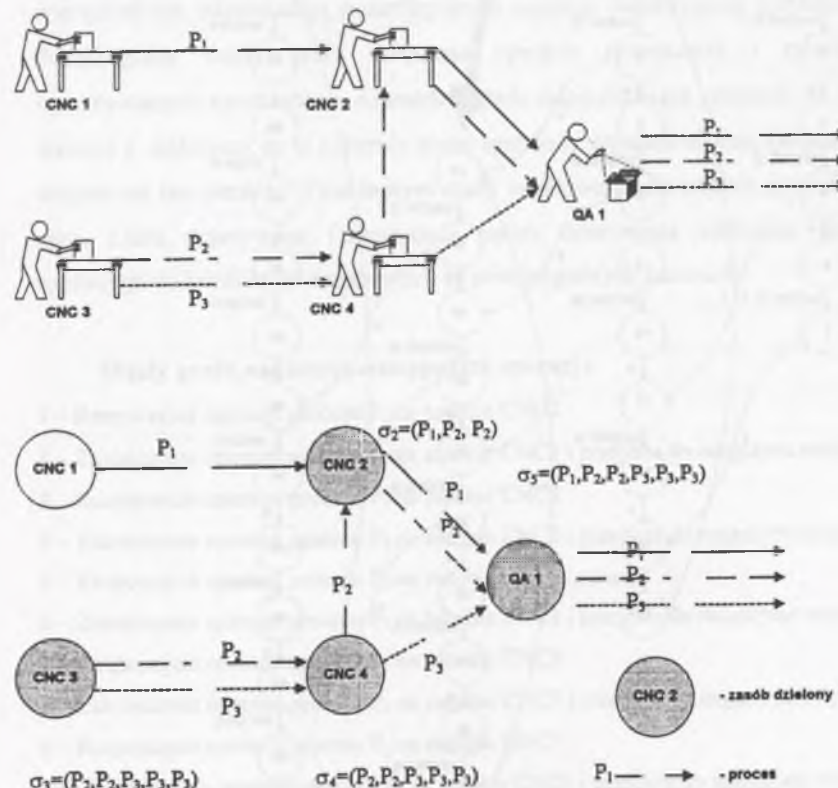
Jednocześnie wektor $d(k)$ musi spełniać równanie stanu (A.5), co prowadzi do równania spektralnego macierzy D:

$$d(k) = Dd(k-1) = Td(k-1). \quad (A.8)$$

Tak więc rozkład $d(k)$ jest wektorem własnym, a T- wartością własną tej macierzy. Dla określonych pojemności buforów międzyzasobowych i alokowanych reguł rozstrzygania konfliktów zasobowych zaproponowany model algebraiczny pozwala wyznaczyć okres pracy systemu T i początkowy rozkład rozpoczęć poszczególnych operacji procesów $d(0)$. Znając okres i wektor $d(0)$ możliwe jest określenie stanu poszczególnych procesów w k-tej iteracji.

A.2. Zastosowania formalizmu algebry (max,+)

Rozważmy system produkcyjny złożony z czterech obrabiarek CNC₁, CNC₂, CNC₃, CNC₄ oraz stacji montażowej (QA₁), co przedstawiono na rys.A.1. W systemie realizowane są procesy: P₁, P₂, P₃. Marszruty tych procesów oraz czas realizacji poszczególnych operacji przedstawiono w tabeli A.1.



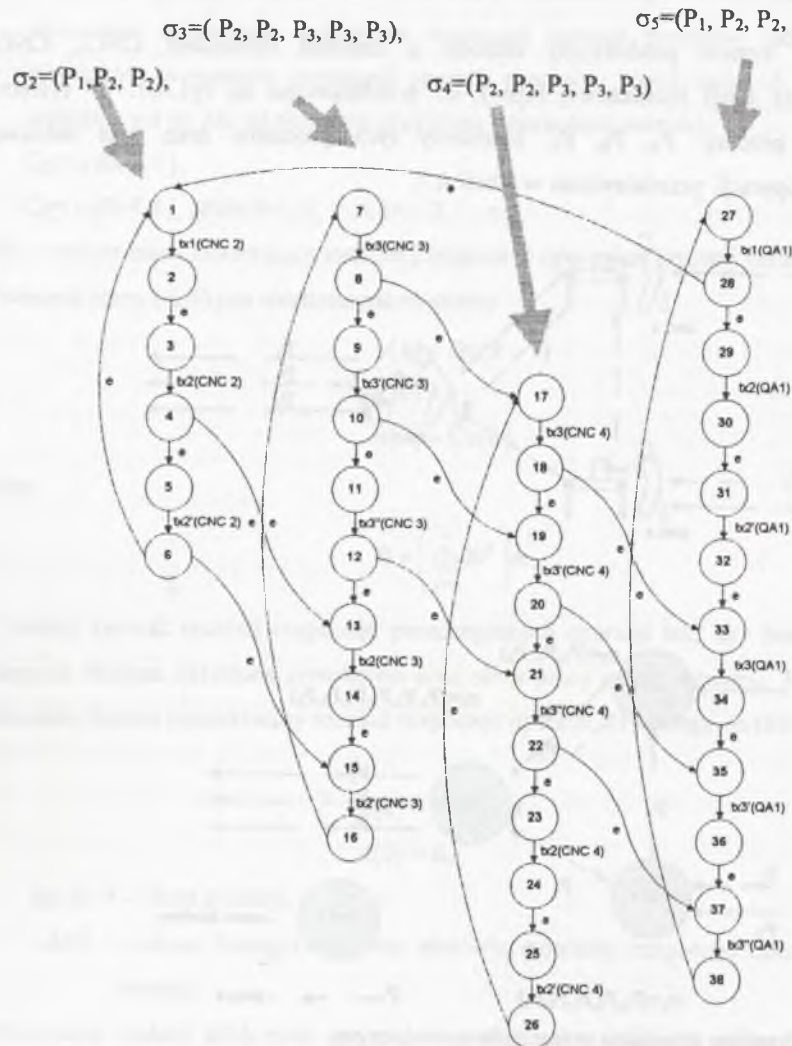
Rys. A.1. Przebieg procesów w systemie wytwórczym

Fig. A.1. Processes flow in the manufacturing system

Tabela A.1

Czasy poszczególnych operacji

	CNC 1	CNC 2	CNC 3	CNC 4	QA 1
P ₁	5	4	-	-	3
P ₂	-	3	1	2	2
P ₃	-	-	2	1	2



Rys. A.2. Graf porządku operacji systemu

Fig. A.2. Graf of operations precedence

Zakłada się, że przeprowadzono proces syntezy struktury systemu. Zatem macierze marszrut alternatywnych jednoznacznie określają marszrutu produkcyjne, wzdłuż których realizowane będą poszczególne zlecenia. W gnieździe produkcyjnym, na zasobach dzielonych (wszystkich z wyjątkiem zasobu CNC₁) alokowano następujące reguły rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych: $\sigma_2 = (P_1, P_2, P_2)$, $\sigma_3 = (P_2, P_2, P_3, P_3, P_3)$, $\sigma_4 = (P_2, P_2, P_3, P_3, P_3)$, $\sigma_5 = (P_1, P_2, P_2, P_3, P_3, P_3)$. Założono ponadto, że pomiędzy poszczególnymi zasobami alokowano magazyny międzyoperacyjne, wystarczające do zgromadzenia wszystkich elementów, które zostały wytworzone na zasobie podczas wykonania jednej reguły.

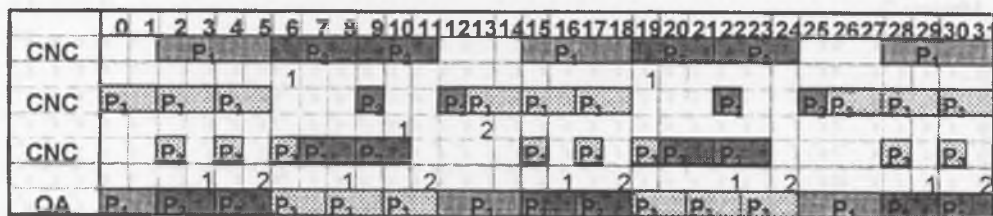
Pomiędzy każdą parą zasobów alokowano magazyny międzyoperacyjne, które umożliwiają przechowanie takiej ilości elementów jaka zostanie wytworzona na zasobie podczas wykonania jednej reguły.

Przy danych czasach operacji, regułach rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych oraz pojemnościach buforów możliwe jest utworzenie grafu porządku operacji. Sekwencje wierzchołków odpowiadają poszczególnym regułom rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych. Poszczególne węzły grafu oznaczają operacje rozpoczęcia i zakończenia operacji wykonywanych na zasobach. Krawędzie grafu odpowiadające przejściu do bufora przyjmują wartość e . Założono, że w systemie został spełniony warunek bilansu systemu i w buforze jest miejsce na ten element. Tym samym czasy oczekiwania na wejście do bufora mają wartość zero. Linie przerywane (zamykające pętle) determinują cykliczne powtarzanie reguł rozstrzygnięcia konfliktów zasobowych na poszczególnych zasobach.

Węzły grafu oznaczają następujące operacje

- 1 – Rozpoczęcie operacji procesu P₁ na zasobie CNC2
- 2 – Zakończenie operacji procesu P₁ na zasobie CNC2 i przejście do magazynu międzyoperacyjnego
- 3 – Rozpoczęcie operacji procesu P₁ na zasobie CNC2
- 4 – Zakończenie operacji procesu P₂ na zasobie CNC2 i przejście do magazynu międzyoperacyjnego
- 5 – Rozpoczęcie operacji procesu P₂ na zasobie CNC2
- 6 – Zakończenie operacji procesu P₂ na zasobie CNC2 i przejście do magazynu międzyoperacyjnego
- 7 – Rozpoczęcie operacji procesu P₂ na zasobie CNC3
- 8 – Zakończenie operacji procesu P₂ na zasobie CNC3 i przejście do magazynu międzyoperacyjnego
- 9 – Rozpoczęcie operacji procesu P₂ na zasobie CNC3
- 10 – Zakończenie operacji procesu P₂ na zasobie CNC3 i przejście do magazynu międzyoperacyjnego
- 11 – Rozpoczęcie operacji procesu P₃ na zasobie CNC3
- 12 – Zakończenie operacji procesu P₃ na zasobie CNC3 i przejście do magazynu międzyoperacyjnego
- 13 – Rozpoczęcie operacji procesu P₃ na zasobie CNC3

Na tej podstawie wyznaczono przebieg procesów współbieżnych w rozwiązany systemie produkcyjnym, a przedstawiono go w postaci diagramu Gantta (rys. A.3.)



Rys. A.3. Diagram Gantta – przebieg procesów w systemie (rys. A.1)

Fig. A.3. The Gantt's chart of processes flow see the system from (fig. A.1)

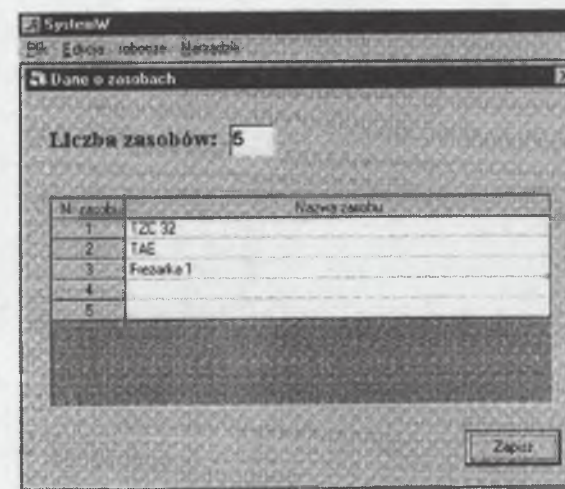
Formalizm algebry $(max,+)$ w powiązaniu z warunkiem bilansu systemu umożliwia wyznaczenie harmonogramu pracy systemu w stanie ustalonym i okresu pracy systemu przy uwzględnieniu warunków początkowych.

Dla ustalonej struktury i reguł rozstrzygania konfliktów zasobowych, algebra $(max,+)$ pozwala na badanie zachowania systemu w zależności od zmieniających się czasów operacji. Umożliwia ponadto wyznaczenie okresu pracy systemu współbieżnych procesów produkcyjnych, w którym nie występują zasoby krytyczne.

Dodatek B. System Weryfikacji Zleceń

B.1. Wprowadzanie danych

Dane do systemu weryfikacji zleceń (SWZ) są wprowadzane przez formularze wprowadzania danych, mających postać okien dialogowych, prowadzące użytkownika krok po kroku. Przed uruchomieniem SWZ tworzone są pliki **dane o zasobach** zawierające nazwy zasobów systemu wytwórczego, którym zostają przyporządkowane kolejne numery. Istnieje możliwość jednoczesnego wprowadzenia więcej niż jednego pliku z zasobami. Każdy z nich może odpowiadać innemu wydziałowi produkcyjnemu.



Rys. B.1. Formularz elektroniczny wprowadzania danych o zasobach

Fig.B.1. Electronic specification of resources

Przed uruchomieniem SWZ wprowadzane są następujące dane:

- **Stan systemu w momencie napływu zleceń.** W komórce tej zaproponowana jest domyślna opcja stan **PUSTY** oznaczająca, że do systemu do tej pory nie przyjęto żadnego zlecenia. Pozostawienie tej opcji oznacza, że zlecenia są przyjmowane jednocześnie. Realizacja programu przebiega zgodnie z algorytmem *Metodyka planowania współbieżnej produkcji wielosortymentowej*. Opcja **ZAJĘTY** jest wybierana w przypadku, gdy w systemie albo operują wcześniej przyjęte zlecenia, a zadanie sprowadza się do podjęcia decyzji o akceptacji kolejnego, albo zlecenia przyjmowane są jedno po

drugim (dobierane) do realizacji w systemie. Realizacja programu przebiega zgodnie z algorytmem *Metodyka przyjmowania dodatkowych zleceń*.

The screenshot shows a window titled 'System' with a menu bar containing 'Edycja', 'robocze', and 'Narzędzia'. The main area contains several input fields and controls:

- Stan systemu:** Radio buttons for 'PUSTY' (selected) and 'ZAJĘTY'.
- Liczba zleceń i zasobów:** A text box containing the number '5'.
- Liczba zleceń w kolejkach:** A text box containing the number '5'.
- Dane o zasobach:** A button labeled 'C:\Moje dok...'.
- Magazyn:** Radio buttons for 'CENTRALNY' and 'MIĘDZYOPERACYJNY' (selected).
- Pojemności magazynów międzyoperacyjnych:** A table with 10 rows (M1 to M10) and 10 columns (M1 to M10). The table contains numerical values representing capacities between resources.

Rys. B.2. Formularz elektroniczny wprowadzania danych o systemie

Fig. B.2. Electronic specification for the input data

- **Liczba zleceń planowanych do realizacji.** Do formularza zostaje wpisana liczba zleceń oczekujących na przyjęcie do realizacji w rozpatrywanym systemie wytwórczym.
- **Dane o zasobach.** Dane o zasobach są wczytywane z zewnętrznego pliku (jeśli system doradczy przeznaczony jest dla większej liczby systemu, opcja wyboru umożliwia wskazanie właściwego, dla którego rozpatrywany jest problem) albo plik taki jest tworzony.
- **Rodzaj magazynu: magazyn centralny albo magazyny międzystanowiskowe.** Operator przez podświetlenie odpowiedniego pola wybiera rodzaj magazynu. Od tego wyboru zależy kolejne pytanie systemu.
- **Dysponowana pojemność magazynu centralnego C_s .** Do tej komórki wprowadzana jest liczba odpowiadająca pojemności magazynu centralnego. Jeśli wybrano magazyny

międzyoperacyjne, wówczas wyświetlony zostaje arkusz **Dysponowana pojemność magazynów międzyoperacyjnych** o pojemności mxm (gdzie m jest liczbą zasobów w systemie). W odpowiednie pozycje macierzy wprowadzane są wartości odpowiadające pojemności magazynów zaalokowanych pomiędzy daną parą zasobów. Jeżeli nie zostanie wprowadzona żadna wartość, to system przyjmuje wartości zero.

- **Przebieg ustalony.** Ten szablon danych wejściowych zostaje wywołany i wypełniany jedynie w przypadku, gdy w momencie uruchamiania systemu jako stan początkowy wprowadzono stan **ZAJĘTY**. Wprowadza się długość wektora, która odpowiada zdolności produkcyjnej zasobu w okresie T ; zazwyczaj zdolność produkcyjna wynosi T . Kolejne pozycje szablonu odpowiadają kolejnym (przyjętym) jednostkom czasu w cyklu. Wartość zero oznacza, że w danej jednostce zasób jest wolny, wartość jeden, że jest zajęty. Jeśli operator nie wprowadzi zmian, to system przyjmuje wartości zero dla każdej jednostki czasu. Przebieg ustalony ulega zmianie po akceptacji każdego kolejnego zlecenia do realizacji w systemie. Dlatego też przyjęcie zlecenia jest związane ze zmianą stanu ustalonego i uznaniem go za obowiązujący, aż do zatwierdzenia kolejnego zlecenia.

The screenshot shows a window titled 'Przebieg ustalony' with the following elements:

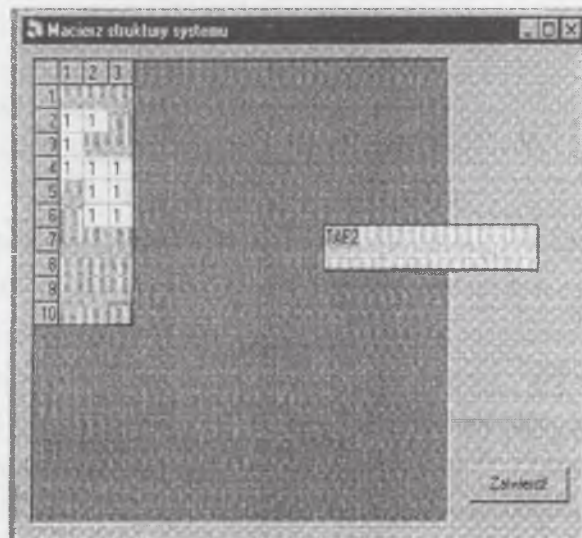
- Numer zasobu:** A text box containing the number '1'.
- Długość wektora:** A text box containing the number '10'.
- Wprowadź stan zasobu 0 - wolny, 1 - zajęty:** A button for selecting the resource status.
- Table:** A table with 10 columns labeled 'Czas' (1 to 10) and 1 row labeled 'Stan'. The 'Stan' row contains ten '0' values.
- Następny:** A button at the bottom right.

Rys. B.3. Formularz elektroniczny wprowadzania danych o przebiegu ustalonym

Fig. B.3. Electronic specification of input data regarding the steady state

- **Macierz struktury systemu M_s .** Kolejne wiersze macierzy odpowiadają zasobom kolumny - procesom realizowanym w systemie. Elementy macierzy odpowiadają liczbie wystąpień danego procesu w regule alokowanej na danym zasobie. Odzwierciedlają tym samym powtarzalność danego procesu na zasobie w trakcie jednokrotnej realizacji reguły. Wypełniane są tylko te pozycje w macierzy, które odpowiadają wybranym marszrutom. System proponuje wartości jeden. Oznacza to, że każdy z procesów przechodzi w trakcie

realizacji reguły tylko jeden raz przez każdy z zasobów swojej marszruty. Operator może zmienić proponowane przez system wartości. Wprowadzenie nowego procesu do systemu powoduje zwiększenie liczby kolumn o jedną.



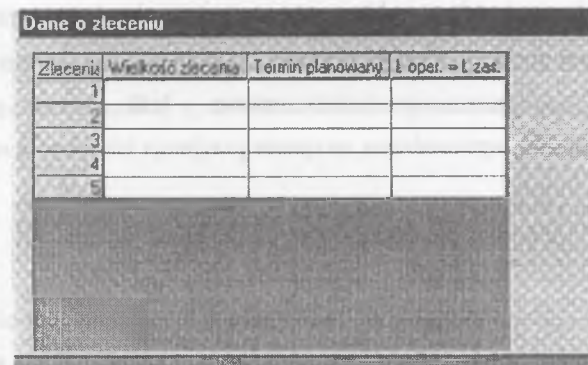
Rys. B.4. Formularz elektroniczny wprowadzania powtarzalności procesów w regułach alokowanych na zasobach systemu

Fig. B.4. Electronic specification of the input data regarding repetitiveness of processes caused by dispatching rules allocated

Specyfikacja zlecenia

Informacje o zleceniach oczekujących na realizację w systemie są wprowadzane przez operatora do tabeli „dane o zleceniach”

- **Wielkość zlecenia - I_j .** Do komórek tej kolumny, w miejsca odpowiadające zleceniu operator wprowadza wielkości zleceń produkcyjnych.
- **Wymagany (dyrektywny lub planowany) termin realizacji zlecenia.** Do tych komórek wprowadza się oczekiwane (dyrektywne) terminy realizacji poszczególnych zleceń.
- **Liczba operacji.** Do tej kolumny wprowadzana jest liczba operacji, jaka jest wykonywana w systemie w celu zrealizowania procesu specyfikującego zlecenie produkcyjne. Liczba operacji determinuje liczbę zasobów, jaką należy uwzględnić przy realizacji każdego ze zleceń.



Rys. B.5. Formularz elektroniczny wprowadzania danych o zleceniu

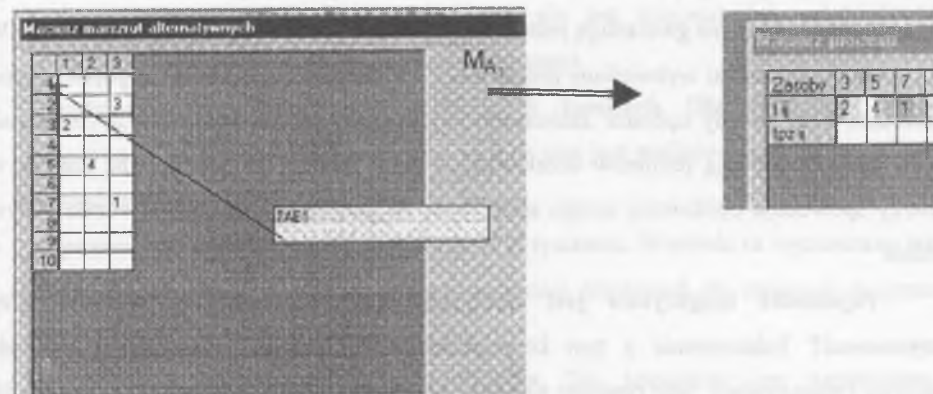
Fig. B.5. Electronic specification of the input data regarding production order

- **Macierz marszrut alternatywnych M_{Aj}**

Macierz marszrut alternatywnych ma wymiary $m \times k$, gdzie m jest liczbą zasobów w systemie, a k jest liczbą operacji w j -tym procesie. Elementami macierzy są czasy realizacji poszczególnych operacji na zasobach. Pole nie wypełnione oznacza, że dana operacja nie może być wykonywana na danym zasobie.

- **Macierz procesu M_{Pj}**

Po zrealizowaniu przez system procedury wyboru marszruty z macierzy M_{Aj} dane dotyczące zasobów oraz czasów jednostkowych realizacji operacji na tych zasobach zostają automatycznie wprowadzone do dwóch pierwszych wierszy macierzy procesu M_{Pj} .



Rys. B.6. Formularze elektroniczne: macierz marszrut alternatywnych, macierz procesu

Fig. B.6. Electronic specifications of matrix of the alternative routes and matrix of a process

System zgodnie z procedurą wybiera marszrutę i do pierwszego wiersza wprowadza numery zasobów, a do drugiego wiersza - czasy jednostkowe. Do trzeciego wiersza operator wprowadza czasy przygotowawczo-zakończeniowe. Jeśli czasy przygotowawczo-zakończeniowe nie zostaną wprowadzone, to system przyjmuje ich wartość równą zeru.

B.2. Obsługa

Potwierdzenie poprawności wprowadzonych danych jest równoznaczne z uruchomieniem realizacji programu. W przypadku wystąpienia stanów, które wymagają decyzji operatora, system generuje komunikat i oczekuje na decyzję operatora. Od niej zależy dalsza praca SWZ. Możliwe jest pojawienie się następujących komunikatów:

Nie jest spełniony warunek bilansu systemu, wprowadź inne wartości do macierzy systemu. Operator wprowadza inne wartości do macierzy systemu, odpowiadające liczbie wystąpienia poszczególnych procesów w regułach alokowanych na zasobach.

Termin realizacji zlecenia nie jest dotrzymany. Czy zaakceptować? Akceptacja oznacza, że operator zgadza się na wyznaczony termin. W przypadku braku akceptacji system podpowiada możliwość zwiększenia krotności występowania tego zlecenia w regułach alokowanych na zasobach, przez które przechodzi (wartości elementów macierzy Ms). Jeśli operator nie wprowadzi innych zmian, to system automatycznie doda do tych elementów macierzy Ms wartość „jeden”. Oznacza to, że w regule alokowanej na zasobach, przez które przechodzi rozpatrywany proces, będzie on dodatkowo jeszcze jeden raz realizowany. Wprowadzone zmiany nie gwarantują jednak pozytywnego wyniku (dotrzymania terminu). W takiej sytuacji komunikat wyświetlany jest ponownie. Komunikat przestanie się pojawiać pod warunkiem, bądź to gdy operator zaakceptuje wyznaczony termin realizacji, że obliczone terminy nie przekraczają terminów oczekiwanych przez klienta lub gdy kolejna zmiana w macierzy spowoduje opóźnienie innego zlecenia do tej pory realizowanego w oczekiwanym terminie.

Pojemność magazynów jest niewystarczająca do realizacji zadania. Czy kontynuować? Jednocześnie z tym komunikatem SWZ podaje wymaganą pojemność magazynu (magazynów). Jeśli operator wybierze odpowiedź „tak”, to program dalej zakłada, że obliczone pojemności magazynów będą dostępne i dla takich oblicza pozostałe parametry. W przeciwnym przypadku (odpowiedź operatora „nie”) przy realizacji opcji **PUSTY** system wskazuje na potrzebę zmian w macierzy systemu. W przypadku realizacji opcji **ZAJĘTY**

wskazuje na potrzebę zmian w macierzy systemu. W przypadku realizacji opcji **ZAJĘTY** obliczane są nowe wielkości partii dopuszczalne ze względu na dostępne pojemności magazynów. Pozostałe parametry są obliczane dla tak wyznaczonej wielkości partii.

B.3. Wyniki

Zakończenie działania SWZ poprzedzone jest wygenerowaniem raportu końcowego, który składa się z dwóch części:

- specyfikacja systemu i zlecenia podane przez operatora,
- informacje wygenerowane przez system.

Następujące informacje zawarte są w drugiej części raportu:

- **Możliwość realizacji zlecenia w założonym terminie.** Komunikat ten zostaje wygenerowany, gdy zadane nowe zlecenie wykonane jest w terminie planowanym (dyrektywnym) bez zakłócenia realizacji zleceń wykonywanych lub zaakceptowanych wcześniej do wykonywania w systemie.
- **Możliwy najwcześniejszy termin realizacji zlecenia.** Wartość ta jest wyznaczana dla każdego zlecenia.
- **Wymagany ostateczny termin uruchomienia zlecenia dla realizacji w terminie dyrektywnym.** Podana wartość jest ostatecznym terminem uruchomienia zlecenia. Wcześniejsze uruchomienie zlecenia daje możliwość wcześniejszego zakończenia realizacji zlecenia, późniejsze uruchomienie nie jest dopuszczalne, gdyż powoduje przekroczenie terminu planowanego (dyrektywnego).
- **Reguły priorytetowania na poszczególnych zasobach.** Dla każdego z zasobów generowana jest reguła priorytetowania, jaka na nim jest realizowana, oraz współczynnik względnej powtarzalności tej reguły.
- **Dopuszczalna wielkość partii do realizacji w systemie.** Wielkość ta wyznaczana jest na podstawie danych o przepływie zleceń wcześniej przyjętych do realizacji w systemie (opcja „ZAJĘTY”).
- **Częstotliwość uruchamiania partii zlecenia.** Ten komunikat jest generowany w przypadku, gdy rozpatrywane jest przyjmowanie kolejnych zleceń do systemu już działającego (opcja „ZAJĘTY”).

- **Efektywność wykorzystania zasobów w systemie.** Ocena funkcjonowania systemu z punktu widzenia producenta dokonywana na podstawie tego wskaźnika. Mała wartość wskaźnika świadczy o tym, że system może jeszcze przyjąć do realizacji kolejne zlecenia.

W przypadku, gdy zlecenie nie zostaje przyjęte do realizacji, SWZ generuje komunikaty:

- **Brak wystarczających przestoju na zasobach wspólnych.** Taki komunikat zostaje utworzony, gdy przynajmniej jeden z zasobów wspólnych jest zasobem krytycznym lub przestój przynajmniej na jednym z zasobów jest krótszy niż suma czasu przygotowawczo-zakończeniowego i czasu jednostkowego operacji przewidzianej do realizacji na tym zasobie.
- **Brak wystarczającej pojemności magazynów.** Ten komunikat jest generowany, gdy wyznaczona maksymalna dopuszczalna wielkość partii ze względu na przestoje systemu nie może być realizowana z powodu ograniczonej pojemności magazynu (magazynów), a operator wstrzymał dalsze obliczenia. Jeżeli istnieje wielkość partii, dla której dostępna pojemność magazynów jest wystarczająca, to zostaje ona wyznaczona. System podpowiada tę wielkość i dla niej wyznaczony będzie termin realizacji zlecenia.
- **Brak możliwości terminowej realizacji zlecenia.** Ten komunikat oznacza, że możliwe jest przyjęcie do realizacji zlecenia, jednakże nie jest możliwa jego realizacja w terminie dyrektywnym. System, w takiej sytuacji, podpowiada najwcześniejszy termin umożliwiający realizację zlecenia oraz dopuszczalną wielkość partii.

Dodatek C. Dane wejściowe do przeprowadzenia eksperymentu

W dodatku przedstawiono dane, które wykorzystano do przeprowadzenia eksperymentu przedstawionego w rozdziale 5.

Na rysunku C.1 przedstawiono schemat przepływu procesów. Ograniczono się jednak do przedstawienia tylko tych urządzeń, przez które przebiegają procesy technologiczne elementów przyjętych do weryfikacji.

Tabela C.1 zawiera wykaz urządzeń, które opisano za pomocą kodu obowiązującego w fabryce, nazwy i numery zastosowane na schemacie (rys. C.1).

W tabelach C.2 - C.11 przedstawiono plany operacyjne procesów, zgodnie z którymi realizowane są zlecenia.

Urządzenie	Nazwa	Numery
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

Tabela C.1

Wykaz stanowisk

Lp.	KOD	NAZWA STANOWISKA	Numer na schemacie
1	DD03	DLUTOWNICA	41
2	DP02	PRZECIĄGARKA POZIOMA	8
3	DP04	PRZECIĄGARKA PIONOWA	37
4	DZ01	DOCIERACZKA DO ZĘBÓW STOŻKOWYCH	57
5	FC01	FREZARKO-NAKIEŁCZARKA	21
6	FG01	FREZARKA DO KÓŁ STOŻKOWYCH GLEASONA	27
7	FG01	FREZARKA DO KÓŁ STOŻKOWYCH GLEASONA	28
8	FG01	FREZARKA DO KÓŁ STOŻKOWYCH GLEASONA	29
9	FG01	FREZARKA DO KÓŁ STOŻKOWYCH GLEASONA	30
10	FO03	FREZARKA OBWIEDNIOWA	42
11	FO14	FREZARKA OBWIEDNIOWA	38
12	FO16	FREZARKA OBWIEDNIOWA	35
13	FR02	FREZARKA DO ROWKÓW	33
14	FR02	FREZARKA DO ROWKÓW	32
15	FR02	FREZARKA DO ROWKÓW	39
16	FR02	FREZARKA DO ROWKÓW	43
17	HC02	PIASZCZARKA	52
18	HE02	PIEC ELEKTRYCZNY WGLĘBNY	54
19	HE03	PIEC ELEKTRYCZNY WGLĘBNY	11
20	HN01	PIEC ELEKTRYCZNY WGLĘBNY DO NAWĘGLANIA	1
21	HN01	PIEC ELEKTRYCZNY WGLĘBNY DO NAWĘGLANIA	45
22	HN02	PIEC ELEKTRYCZNY WGLĘBNY DO NAWĘGLANIA	7
23	HN02	PIEC ELEKTRYCZNY WGLĘBNY DO NAWĘGLANIA	46
24	HN03	PIEC ELEKTRYCZNY WGLĘBNY	10
25	HO01	PIEC KOMOROWY ELEKTRYCZNY	47
26	HO03	PIEC KOMOROWY ELEKTRYCZNY	48
27	HP01	PRASA HARTOWNICZA	49
28	HW01	PIEC ELEKTRYCZNY WGLĘBNY	6
29	HW01	PIEC ELEKTRYCZNY WGLĘBNY	51
30	LW16	WIÓRKOWNICA	64
31	OC02	WANNA DO MYCIA ZANURZENIOWEGO	44
32	OC02	WANNA DO MYCIA ZANURZENIOWEGO	50
33	OC02	WANNA DO MYCIA ZANURZENIOWEGO	53
34	OC06	STANOWISKO DO MYCIA	63
35	PH01	PRASA HYDRAULICZNA DO PROSTOWANIA	55
36	SG03	SZLIFIERKA KŁOWA	40
37	SG03	SZLIFIERKA KŁOWA	36
38	SG04	SZLIFIERKA KŁOWA	34
39	SK04	SZLIFIERKA KŁOWA	26
40	SK04	SZLIFIERKA KŁOWA	56

c.d. Tabeli C.1

41	SK04	SZLIFIERKA KŁOWA	58
42	SK05	SZLIFIERKA KŁOWA	62
43	SO02	SZLIFIERKA DO OTWORÓW	61
44	SP04	SZLIFIERKA	60
45	SR02	SZLIFIERKA REISHAUER	59
46	TN01	TOKARKA KŁOWA NC	22
47	TN01	TOKARKA KŁOWA NC	23
48	TO01	TOKARKO-KOPIARKA	16
49	TO02	TOKARKO-KOPIARKA	17
50	TP02	TOKARKA POCIĄGOWA	31
51	TP02	TOKARKA POCIĄGOWA	12
52	TP03	TOKARKA POCIĄGOWA	13
53	TP08	TOKARKA POCIĄGOWA	14
54	TU01	TOKARKA UNIWERSALNA	15
55	TU01	TOKARKA UNIWERSALNA	20
56	TU02	TOKARKA UNIWERSALNA	18
57	TU02	TOKARKA UNIWERSALNA	19
58	TW01	TOKARKA WIELONOŻOWA	24
59	TW01	TOKARKA WIELONOŻOWA	25
60	TZ01	TOKARKA UCHWYTOWA NC	4
61	TZ01	TOKARKA UCHWYTOWA NC	5
62	TZ01	TOKARKA UCHWYTOWA NC	9
63	XW01	PIŁA TAŚMOWA	2
64	XW01	PIŁA TAŚMOWA	3

W poniższych tabelach przedstawiono zestawienie planów operacyjnych elementów przyjętych do weryfikacji. Numery stanowisk odpowiadają numerom przedstawionym na schemacie (rysunek C.1) i w tabeli C.1.

Tabela C.2

Zlecenie 1, Symbol części: KZS33/2,5/A

Nr operacji	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Stanowisko	4	8	5	27	28	44	45	47	52	53	55	62	57	64
tpz	5	1	5	14	14	0	0	0	0	0	0	2	3	0
tj	10	5	14	29	66	1	8	9	2	1	4	4	12	12

Tabela C.3

Zlecenie 2, Symbol części: KZS16/2,5/D

Nr operacji	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Stanowisko	21	16	17	12	26	29	30	31	32	33	50	46	47	52	55	53	56	57	58	64
tpz	2	1	1	1	0	14	14	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
tj	6	10	6	5	6	48	53	4	5	7	1	8	9	2	4	1	6	9	12	1

Tabela C.4

Zlecenie 3, Symbol części: KZS16/4/D

Nr operacji	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Stanowisko	21	22	23	26	29	30	31	32	33	44	45	47	52	53	55	56	57	58	64
tpz	2	3	3	1	14	14	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	1	4	0
tj	5	16	5	6	48	56	6	6	8	1	14	10	6	1	8	7	14	8	2

Tabela C.5

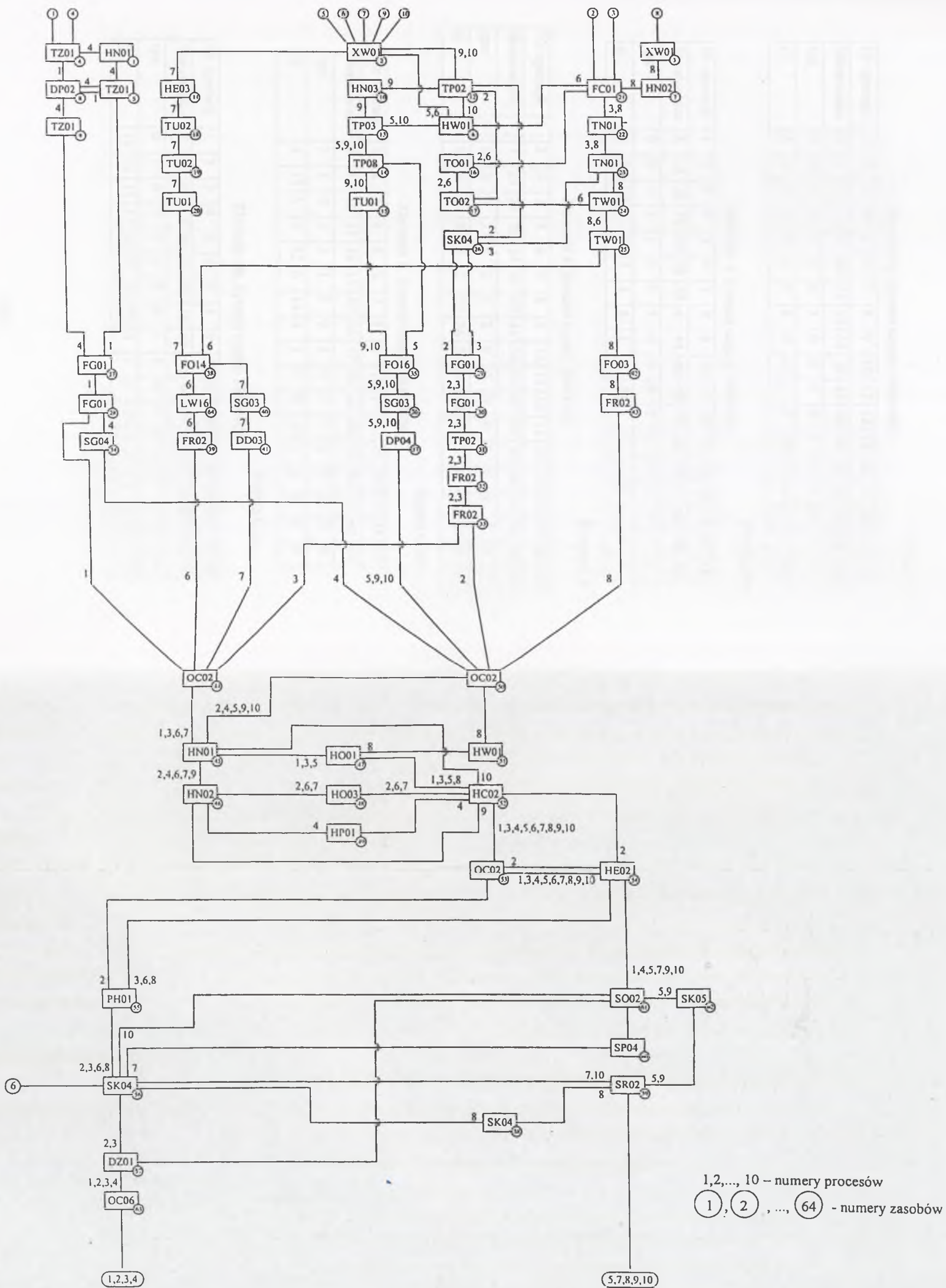
Zlecenie 4, Symbol części: KZS33/4/A

Nr operacji	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Stanowisko	4	1	5	8	9	27	28	34	50	46	49	52	53	55	62	58	64
tpz	5	0	5	1	5	14	14	0	0	0	0	0	0	0	3	4	0
tj	6	1	13	6	15	34	64	8	1	4	14	6	1	8	3	16	2

Tabela C.6

Zlecenie 5, Symbol części: 3M01403

Nr operacji	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Stanowisko	2	6	13	14	35	36	37	50	45	47	52	53	54	61	62	59
tpz	0	0	2	2	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
tj	7	8	22	32	10	23	6	2	8	10	5	2	4	2	3	10



Rys. C.1. Schemat ilustrujący przepływ procesów w Fabryce „BEFARED”

Tabela C.7

Zlecenie 6, Symbol części: 4M01002

Nr operacji	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Stanowisko	2	6	21	16	17	24	25	38	64	39	44	46	48	52	53	54	55	56
tpz	0	0	2	2	2	2	2	3	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1
tj	2	5	6	4	5	3	3	8	4	61	1	8	10	2	4	1	6	10

Tabela C.8

Zlecenie 7, Symbol części: 2M00704

Nr operacji	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Stanowisko	2	11	18	19	20	38	40	41	44	46	48	52	53	54	61	60	56	59
tpz	0	0	1	1	1	3	0	2	0	0	0	0	0	0	2	1	1	0
tj	2	5	10	6	4	7	4	4	1	8	10	2	1	4	9	1	3	3

Tabela C.9

Zlecenie 8, Symbol części: 5M01302

Nr operacji	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Stanowisko	3	7	21	22	23	24	25	42	43	50	51	47	52	53	54	55	56	58	59
tpz	0	0	2	3	3	2	2	3	2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
tj	3	8	6	7	8	2	2	22	26	2	8	10	5	2	4	15	21	4	9

Tabela C.10

Zlecenie 9, Symbol części: 3M00806

Nr operacji	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Stanowisko	2	12	10	13	14	15	35	36	37	50	46	48	53	54	61	62	59
tpz	0	1	0	1	1	1	3	0	1	0	0	0	0	0	2	1	0
tj	4	12	5	9	12	6	14	4	3	1	8	10	1	4	8	2	8

Tabela C.11

Zlecenie 10, Symbol części: 3M00802

Nr operacji	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Stanowisko	2	12	6	13	14	15	35	36	37	50	45	47	52	53	54	61	56	59
tpz	0	1	0	1	1	1	2	0	1	0	0	0	0	0	2	1	0	
tj	10	32	13	17	12	7	12	30	4	3	8	10	2	2	4	15	3	15

Literatura

- [AWF, 1985] AWF (Hrsg), (1985), *Integrierter EDV- Einsatz in der Produktion- Begriffe, Definitionen Funktionszuordnungen*, Ausschuss für Wirtschaftliche Fertigung e.V. Eschborn.
- [Baccelli *et al.*, 1992] Baccelli F. L., Cohen G., Olsder G. J., Quadrat J-P., (1992), *Synchronization and Linearity: An Algebra for Discrete Event Systems*, Wiley & Sons Ltd., Chichester, England.
- [Bajic, Chaxel, 1997] Bajic E., Chaxel F., (1997), *Towards a holon oriented management*, Proceedings of the 4th Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Seoul, Korea, s. 121-126.
- [Banaszak, Jampolski, 1991] Banaszak Z., Jampolski L., (1991), *Komputerowo wspomagane modelowanie elastycznych systemów produkcyjnych*, WNT, Warszawa.
- [Banaszak, Jędrzejek, 1993] Banaszak Z., Jędrzejek K. (1993), *On self synchronisation of cascade-like coupled processes*, Application Mathematics and Computer Science, vol. 3, no. 4, s. 751-776.
- [Banaszak, Krogh, 1990] Banaszak Z., Krogh B.H., (1990), *Deadlock Avoidance In Flexible Manufacturing Systems with Concurrently Competing Process Flow*, IEEE Trans. Robot. and Automat., vol. 6, s. 724-734.
- [Banaszak, Jampolski, 1998] Banaszak Z., Jampolski L.S., (1998), *Mechanizmy synchronizacji przepływu produkcji w systemach jednoczesnej produkcji wieloasortymentowej*, Inżynieria Maszyn, R.3, z. 2-3, Symulacja procesu wytwarzania i inżynieria współbieżna (red.: J.Jędrzejewski, B. Skołod), Agenda Wydawnicza SIMP, Wrocław, s. 87-103.
- [Banaszak *et al.*, 1998] Banaszak Z.A., Tang X.Q., Wang S.C., Zaremba M.B., (1998), *Logistic Models in Flexible Manufacturing*, Preprints of the 9th IFAC Symposium on Information Control in Manufacturing, Nancy, France, June 24-26, vol. 2, s. 301-306.
- [Barkaoui, Chaoui, Benamara, 1997] Barkaoui K., Chaoui A., Benamara R., (1997), *The Performance of Alternative Strategies for Dealing with Deadlock in FMS*, Proceedings of the IFAC/IFIP Conference on Management and Control of Production and Logistics, August 31-September 03, Campinas, Brasil, s. 463 – 468.
- [Bartak, 1999] Bartak, R., (1999), *Constraint programming – what is behind*. Proceedings of the Workshop on Constraint Programming for Decision and Control, Gliwice, June 28th, s. 7-16.
- [Bastos, Oliveira, Oliveira, 1998] Bastos R.M., Oliveira F.M., Oliveira J.P.M., (1998), *Decentralised Resource Allocation Planning through Negotiation*, Proceedings of the Intelligent Systems for Manufacturing: Multi-Agent Systems and Virtual Organizations, BASYS'98-er IEEE/IFIP International Conference on Information Technology for Balanced Automation Systems in Manufacturing, Praga, Czech Republic, August, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, s. 367-376.
- [Benjaafar, Sheikhzadeh, 1997] Benjaafar S., Sheikhzadeh M., (1997), *Scheduling Policies, Batch Sizes, and Manufacturing Lead Times*, IIE Transactions, no. 29, s. 159-166.
- [Błażewicz *et al.*, 1981] Błażewicz J., Cellary W., Słowiński R., Węglarz J., (1981), *Algorytmy sterowania rozdziałem zadań i zasobów w kompleksie operacji*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- [Bonvik, 1998] Bonvik A.M., (1998), *How to Control a Lean Manufacturing System*, Strona www: <http://www.//c/2/lean1.htm>.
- [Boucher, Cauvin, Kieffer, 1998] Boucher X., Cauvin A., Kieffer JP., (1998), *Towards concurrent Design: Cognitive and Cooperative Aspects Integrated in a Model of design activity*, Preprints of the 9th IFAC Symposium on Information Control in Manufacturing, Nancy, France, June 24-26, vol. 2, s. 517- 522.
- [Brat, Grag, 1998] Brat G.P., Grag V.K., (1998), *A Max-Plus Algebra of Signals of the Supervisory Control of Real-Time Discrete Event Systems*, Preprints of the 9th IFAC Symposium on Information Control in Manufacturing, Nancy, France, June 24-26, vol. 2, s. 9-14.
- [Bubnicki, 1987] Bubnicki Z., (1987), *The Optimal Control of Large Scale Operation Systems with the Use of Globally Optimal Models*, System Science, vol. 13, no. 3/4
- [Campbell, 1995] Campbell G.M., (1995), *Cyclic Assably Schedules for Dynamic Demands*, IIE Transactions, no.28, s.643-651.
- [Camus *et al.*, 1996] Camus H., Ohl W., Korbaa O., Gentina FJ-C., (1996), *Cyclic Schedules in Flexible Manufacturing Systems with Flexibilities in Operating Sequences*, Proceedings of the 17th International Conference on Application and Theory of Petrii Nets, Manufacturing and Petrii Nets, M. Silva, R. Valette, K. Takahashi (Eds.) Osaka , Japan, June 26, s.97-116.
- [Cechowicz, 1999] Cechowicz R., (1999), *Komputerowy system sterowania szeregowaniem zadań w wielomaszynowym środowisku wytwarzania*, Praca doktorska, Katedra Automatyki, Politechnika Lubelska.
- [Chang, 1994] Chang F.R., (1994), *A Study of Factors Affecting Due-Date Predictability in a Simulated Dynamic Job Shop*, Journal of Manufacturing Systems, vol. 13, no.6, s. 393-400.
- [Chen, Su, 1995] Chen F.F., Su Q., (1995), *Shedulling Single Gripper Gantry Robot in Tightly Coupled Serial Production Lines: Optimum vs.Push/Pull Concept Based Sequences*, Journal of Manufacturing Systems, vol. 14, no. 3, s. 139-147.
- [Chlebus, 1998] Chlebus E., (1998), *Integracja techniki i narzędzi Cax sposobem na poprawę elastyczności i efektywności produkcji*, Materiały II krajowej konferencji "Komputerowo zintegrowane zarządzanie", Zakopane, s. 51-60.
- [Chlebus, 1999] Chlebus E., (1999), *Metody i narzędzia komputerowe integrujące przedsiębiorstwo*, Materiały III szkoły komputerowego wspomaganie projektowania, wytwarzania i eksploatacji, Szczyrk, 10-14 maj, s. 321-329.
- [Cho, Kumaran, Wysk, 1995] Cho H., Kumaran T. K., Wysk R. A., (1995), *Graph-Theoretic Deadlock Detection and Resolution for Flexible Manufacturing Systems*, IEEE Transaction on Robot. and Automat., vol. 11, no. 3, s. 413-421.

26. [Cho, Smith, Wysk, 1997] Cho H., Smith J. Wysk R., (1997), *A Robust Workstation Controller for Computer Integrated Manufacturing: Experimental Design and Results*, *Productions Planning and Control*, vol. 8, no. 6, s. 1-17.
27. [Chrobot, Rakowski, 1998] Chrobot J. Rakowski J., (1998), *System operacyjnego sterowania wytwarzaniem*. Praca doktorska. Instytut Technologii Mechanicznej, Politechnika Wrocławska.
28. [Cohen *et al.*, 1989] Cohen G., Moller P., Quadrat J.P., Viot M., (1989), *Algebraic Tools for the Performance Evaluation of Discrete-Event Systems*, *Proceedings of the IEEE*, vol. 77, no. 1, s. 39-58.
29. [Cohen, Pyke, 1992] Cohen M.A., Pyke D.F., (1992), *Push and Pull in Manufacturing and Distribution Systems*, *Journal of Operations and Management*, vol. 9, no. 3.
30. [Cook, 1994] Cook D., (1994), *A Simulation Comparison of Traditional, JIT and TOC Manufacturing Systems in a Flow Shop with Bottlenecks*, *Production and Inventory Management Journal*, First quarter, s.73-78.
31. [Coughlan, Darlington, 1993] Coughlan P. Darlington J., (1993), *As Fast as the Slowest Operation: The Theory of Constraints*, *Management Accounting*, June, s. 14-17.
32. [Cuninghame-Green, 1979] Cuninghame-Green R. A., (1979), *Minimax Algebra*, Springer-Verlag, New York.
33. [Cyklis, Krupa, 1998] Cyklis J., Krupa K., (1998), *Integracja informacji systemowej i technologicznej dla sterowania ESP*, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, s. Automatyka, z. 124, Gliwice, s. 19-29.
34. [Cyklis, Krupa, Małopolski, 1999] Cyklis J., Krupa K., Małopolski W., (1998), *Algorytmizacja tworzenia modelu sterowania elastycznym systemem produkcyjnym*, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, Seria Automatyka, z. 124, s. 28-36
35. [Cyklis, Pierzchała, 1995] Cyklis J., Pierzchała W., (1995), *Modelowanie procesów dyskretnych w elastycznych systemach produkcyjnych*. Politechnika Krakowska, nr 3.
36. [Cyklis, Pierzchała, Zając, 1999] Cyklis J., Pierzchała W., Zając J. (1999), *Próba klasyfikacji systemów sterowania zautomatyzowanym wytwarzaniem*, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, s. Automatyka, z. 124, Gliwice, s. 38-46.
37. [Cyklis, Słota, 1998] Cyklis J., Słota A., (1998), *Obiektowo-obserwowalna sieć Petriego w zastosowaniu do modelowania elastycznych systemów wytwarzania*, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, s. Automatyka, z. 124, Gliwice, s. 31-41.
38. [Cyklis, Słota, 1999] Cyklis J., Słota A., (1999), *Obiektowo-obserwowalna sieć petriego jako alternatywa dla modelu macierzowego ESP*, *Prace Instytutu Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji*, Kraków 24-25 marzec, s. 47-54
39. [Cyklis, Zając, 1998] Cyklis J., Zając J., (1998), *Koncepcja rozproszonego systemu sterowania dyskretnymi systemami wytwarzania, planowanie przebiegu zleceń w systemach produkcji rytmicznej*, *Automation'98*, 11-12 marzec, Warszawa, s. 47-52.
40. [Daniels, Kouvelis, 1995] Daniels R.L., Kouvelis P., (1995), *Robust Scheduling to Hedge Against Processing Time Uncertainty in Single Stage Production*, *Management Science*, vol. 41, no. 2, s. 363-376.

41. [Dijkstra, 1974] Dijkstra E., (1974), *Self-Stabilising Systems in Spite of Distributed Control*, *Commun. ACM*, vol. 17, no.11, s. 643-644.
42. [Dorn, Froeschl, 1993] Dorn J., Froeschl K., (1993), *Scheduling of Production Processes*, Ellis Horwood Ltd.
43. [Durlik, 1996] Durlik I., (1996), *Inżynieria zarządzania. Strategia i projektowanie systemów produkcyjnych*, Część I i II, Agencja Wydawnicza Placet, Warszawa.
44. [Eriksson, Lund, 1984] Eriksson S., Lund K., (1984), *Reasons why Trough-put Times are Shorter for Cyclic Product Sequences than for Other Planning Methods*, *Production Management Systems: Strategies and Tool for Design*, H. Hubner (editor), Elsevier, North Holland, s.123-131.
45. [Eversheim, 1995] Eversheim, W., (1995), *Prozeßorientierte Unternehmensorganisation - Konzepte und Methoden zur Gestaltung schlanker Organisationen*, Springer Verlag, Berlin, Heilderberg, New York.
46. [Feather, Cross, 1988] Feather J. J., Cross K. F., (1988), *Workflow Analysis, Just in Time Techniques Simplify Administrative Process in Paperwork Operation*, *Industrial Engineering* 1988, s. 32-40.
47. [Filipowicz, 1996] Filipowicz B., (1996), *Modele stochastyczne w badaniach operacyjnych*, WNT, Warszawa.
48. [Fischer, 1998] Fischer K., (1998), *An Agent Based Approach to Holonic Manufacturing Systems*, *Proceedings of the BASYS'98-er IEEE/IFIP International Conference on Information Technology for Balanced Automation Systems in Manufacturing*, Praga, Czech Republic, August, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, s. 3-12.
49. [Friedrich, Rogalla, Dillmann, 1998] Friedrich H., Rogalla O., Dillmann R., (1998), *Propagation of Action Knowledge in Multi-agent Systems*, *Preprints of the 9th IFAC Symposium on Information Control in Manufacturing*, Nancy, France, June 24-26, vol. 3, s. 59-64.
50. [Gattner, 1999] Gattner D., (1999) *Algorytmy sterowania przepływem wieloasortymentowej produkcji cyklicznej w warunkach deterministycznych ograniczeń zasobowych*. Praca doktorska. Wydział Informatyki i Zarządzania, Politechnika Wrocławska.
51. [Gattner, Kłós, Banaszak, 1997] Gattner D., Kłós S., Banaszak Z., (1997), *Wytwarzanie biologiczne synteza procedur sterowania rozproszonego*, *Materiały III konferencji naukowo – technicznej "Mechatronika '97"*, Warszawa 20-22 listopad, s. 464-469.
52. [Gattner, Kłós, 1996a] Gattner D., Kłós S., (1996), *Planowanie i sterowanie produkcją jako element systemu logistycznego przedsiębiorstwa*, *Materiały konferencji naukowej "Nowoczesne Zarządzanie Przedsiębiorstwem"*, Zielona Góra, s. 194-203.
53. [Gattner, Kłós, 1996b] Gattner D., Kłós S., (1996), *Model oceny obsługi wieloasortymentowej produkcji cyklicznej*, *Materiały międzynarodowej konferencji "Zarządzanie logistyczne"*, Poznań, s. 159-172.
54. [Gattner, Kłós, Majdzik, 1997] Gattner D., Kłós S., Majdzik P., (1997), *Zasady samoorganizacji cyklicznych procesów produkcyjnych*, *Materiały VIII konferencji "Tendencje rozwojowe w procesach produkcyjnych"*, Zielona Góra, s. 181-186.

55. [Gattner, Kłos, Skołod, 1999] Gattner D., Kłos S., Skołod B., (1999), *Szybka weryfikacja zleceń w warunkach wieloasortymentowej produkcji powtarzalnej*, WNT (red. Knosala), s. 80-85.
56. [Gattner, Skołod, Banaszak, 1999] Gattner D., Skołod B., Banaszak Z., (1999), *Procedura rozproszonego sterowania przepływem wieloasortymentowej produkcji cyklicznej*, Przegląd Mechaniczny, nr 15, s. 7-14.
57. [GEP, 1998] Graficzny Edytor Procesów Współbieżnych, (1998), strona www: <http://www.pz.zgora.pl/gep>.
58. [Goldham, Nagel, Preiss, 1995] Goldham S., Nagel R., Preiss K., (1995), *Agile Competitors and Virtual Organisations*, New York, Van Nostrand Reinhold.
59. [Goldratt, Cox, 1987] Goldratt E., Cox J., (1987), *The Goal*, Rev.ed. Croton on Hudson, NY, North River Press.
60. [Gornev et al., 1997] Gornev V.F., Tarassov V.B, Soenen R., Tahon K., (1997), *Virtual Enterprise: Reason, Sources and Tools*, IFAC/IFIP Conference on Management & Control of Production and Logistics August 31-September 03, Campinas, Brasil, s. 53-58.
61. [Goto, Kimura, Asamori, 1997] Goto H., Kimura T., Asamori M.K., (1997), *Remote Renewal by Aggregating Real and Virtual Models in Manufacturing Systems*, Proceedings of the 4th IFAC Workshop on Integrated Manufacturing Systems IMS, Seul Korea, s. 77-81.
62. [Gregor, et al., 1998] Gregor M., Haluskova M., Hromada J., Kosturiak J., Matuszek J., (1998), *Simulation Manufacturing Systems*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej.
63. [Gunther, 1981] Gunther K.D., (1981), *Prevention of Deadlocks in Packet Switched Data Transport System*, IEEE Transaction on Communication, COM-29, no. 4, s. 512-524.
64. [Hancock, Zayko, 1998] Hancock W.M., Zayko M.J., (1998), *Lean Production: Implementation Problems*, IIE Solutions, vol. 30, no. 6, s. 38-42.
65. [Harrison, Lewis, 1996] Harrison T.P., Lewis H. S., (1996), *Lot Sizing in Serial Assembly Systems with Multiple Constrained Resources*, Management Science, vol. 42, no.1, s. 19-36.
66. [Hatano, Nishijama, Tamura, 1997] Hatano I., Nishijama T., Tamura H., (1997), *Real-Time Scheduling for Distributed Production Management Systems*, 4-th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems IMS'97, July 21-23, Seul, Korea, s. 329-334.
67. [Hendry, Kingsman, 1989] Hendry L.C., Kingsman B.G., (1989), *Production Planning Systems and their Applicability to Make to Order Companies*, European Journal of Operational Research, no.40, s. 1-15.
68. [Hillion, Proth, 1989] Hillion H. P., Proth J.M., (1989), *Performance Evaluation of Job-Shop Systems Using Timed Event-Graphs*, IEEE Trans. on Automatic Control, vol. 34, no. 1, s. 3-9.
69. [Hubbard, Taylor, Bolander, 1992] Hubbard D.T. Taylor S.G. Bolander S.F., (1992), *Process Flow Scheduling in a High-Volume Repetitive Manufacturing Environment*, Production and Inventory Management Journal, Fourth quarter, s. 21-26.
70. [Hurlay, Kadipasaoglu, 1998] Hurlay S.F., Kadipasaoglu S., (1998), *Wandering Bottlenecks: Speculating on the True Causes*, Production and Inventory Management Journal, vol. 39, no. 4, s.1-4.
71. [Iimura, 1993] Iimura J., (1993), *Unskilled Worker Oriented Manufacturing*, Human Intelligence Based Manufacturing, Advanced Manufacturing Series, Springer Verlag, 1993.
72. [Iwata et al., 1995] Iwata K., Onosato M., Teramoto K., Osaki S., (1995), *A Modelling and Simulation Architecture for Virtual Manufacturing Systems*, Annals of the CIRP, vol. 44 no.1, s. 399-402.
73. [Jackowicz, Lis, 1987] Jackowicz R., Lis S., (1987), *Podstawy projektowania struktur przedsiębiorstw przemysłowych*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
74. [Jackowicz, Lis, Wagner, 1980] Jackowicz R., Lis S., Wagner K., (1980), *Projektowanie Organizacji Komórki w Warunkach Produkcji Powtarzalnej*, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej.
75. [Józewczyk, 1996] Józewczyk J., (1996), *Szeregowanie zadań w kompleksie operacji z uwzględnieniem ruchu realizatorów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, monografia
76. [Kaizen, 1999] Kaizen, (1999), Strona www: <http://Kaizen-lean.com>.
77. [Karabati, Kouvelis, 1996] Karabati S., Kouvelis P., (1996), *Flow-Line Scheduling Problem with Controllable Processing Time*, IIE Transactions, vol. 29, s. 1-14.
78. [Kawamura, 1997] Kawamura K., (1997), *Holonic Manufacturing Systems: An Overview and Key Technical Issues*, Proceedings of the 4th Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Seul, Korea, s. 33-36.
79. [Kazuaki et al., 1996] Kazuaki I., Masahiko O., Teramoto K., Osaki S., (1996), *Virtual Manufacturing Systems as Advanced Information Infrastructure for Integrating Manufacturing Resources and Activities*, Annals of the CIRP, vol. 45, no. 1, s. 335-339.
80. [Kłos, 1996] Kłos S., (1996), *Algebraiczne metody analizy protokołów w złożonych strukturach sieci komputerowych*, Raport 1/96 Instytut Robotyki i Inżynierii Oprogramowania, Zielona Góra.
81. [Kłos, 1998] Kłos S., (1998), *Algorytmy planowania współbieżnych procesów produkcyjnych*, Praca Doktorska, Wydział Inżynierii Produkcji, Politechnika Warszawska.
82. [Kłos, Gattner, Banaszak, 1998] Kłos S., Gattner D., Banaszak Z., (1998), *Planowanie przebiegu zleceń w systemach produkcji rytmicznej*, Automation'98, 11-12 marzec, Warszawa, s. 263-270.
83. [Kłos, Gattner, Majdzik, 1997] Kłos S., Gattner D., Majdzik P., (1997), *Periodic Schedule Design: A Searching Procedure*. Proceedings of the Fourth International Symposium on Methods and Models in Automation and Robotics, 26-29 August, Międzyzdroje, Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej, s. 1043-1048.
84. [Kłos, Gattner, Skołod, 1997] Kłos S., Gattner D., Skołod B., (1997), *Towards the Distributed Control Design Repetitive Processes for Limited Capacity Buffers*, Proceedings of the Concurrent Engineering, Europe'97 on Building Tomorrow's Virtual Enterprise, April 16-18, Erlangen, Germany, s. 72-76.
85. [Kłos, Majdzik, Banaszak, 1996] Kłos S., Majdzik P., Banaszak Z., (1996), *Algebraic Verification of the Concurrent Systems Operation of Sequential Processes*, Proceedings of the 8th European Simulation Symp. & Exhibition Genoa, Italy, vol. 2, s. 245-251.

86. [Kłos, Skołod, Banaszak, 1999] Kłos S., Skołod B., Banaszak Z., (1999), *Algebraiczna metoda harmonogramowania cyklicznego*, Materiały III krajowej konferencji „Komputerowo zintegrowane zarządzanie”, Knosala (red.), WNT, Warszawa, s. 185-194.
87. [Kłos, Skołod, Gattner, 1998] Kłos S., Skołod B., Gattner D., (1998), *Terminowość realizacji zleceń w systemie współbieżnych procesów produkcyjnych* Materiały II krajowej konferencji „Komputerowo zintegrowane zarządzanie”, Zakopane 12-14 .01.1998, ss. 161-168.(30%).
88. [Kłos, Stańczyk, Skołod, 1998] Kłos S., Stańczyk J., Skołod B., (1998), *Computer Aided Scheduling of Repetitive Production*, Proceedings of the JCKBSE, Knowledge-Based Software Engineering, Słowacja, Navrat and Ueno (Eds.) IOS Press, Amsterdam, s.317-320.
89. [Knosala 1995] Knosala R.: (1995), *Komputerowe systemy zarządzania produkcją*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, ss.161.
90. [Knosala, 1998] Knosala R.: (1998), *Metody wspomaganie przygotowania technologii i organizacji produkcji*. Seminarium projektów badawczych finansowanych przez KBN w 1998 roku, Radom, s.53-70.
91. [Koch, et al., 1999] Koch J. Chrobot J., Rakowski J., Smalec Z., (1999), *A New Concept of the Shop Floor Control in a Polish Manufacturing Company*. Proceedings of the International Conference on Computer Integrated Manufacturing, vol. II, WNT, Warszawa, s. 268-275.
92. [Koch,1999] Koch J.,(1999), *Rola nauki w transferze technologii*, Zarządzanie produkcją nr 1-2, s.19-26.
93. [Korzeń, 1995] Korzeń Z., (1995), *Podstawowe problemy logistyki w budowie i eksploatacji maszyn*, Przegląd Mechaniczny, nr11, s.5-11.
94. [Korzeń, 1999] Korzeń Z., (1999), *Logistyczne systemy transportu bliskiego i magazynowania, tom 2*, Wydawnictwo: Instytut Logistyki Magazynowania, Poznań.
95. [Kowalowski, 1984] Kowalowski H., (1984), *Automatyzacja dyskretnych procesów przemysłowych*, WNT, Warszawa.
96. [Landvater, 1989] Landvater D.V., Gray D.D., (1989), *MRPII Sytandard System*, Olivier Wright Publications.
97. [Lazaro, et al., 1994] Lazaro J., Maseda J., Diaz F., Sturesson H., Escalada G., (1994), *INTESIMPO Simple Dynamic Scheduling for Discrete Manufacturing*, Scheduling of Production Processes, Ellis Horwood Limited, s. 130-138.
98. [Lee, Song, 1996] Lee T.E., Song J.S., (1996), *Petri Net Modeling and Scheduling for Periodic Job Shop with Blocking*, Proceedings of the Workshop on Manufacturing and Petri Nets and the International Conference on Application and Theory of Petri Nets, Osaka, Japan, June, s. 197-214.
99. [Lee, Plenert, 1993] Lee T. N., Plenert G., (1993), *Optimising Theory of Constraints when New Products Alternative Exist*, Production and Inventory Management Journal, Third Quarter, s. 51-57.
100. [Lee, Noh, 1997] Lee K.I., Noh S.D.,(1997), *Virtual Manufacturing System - a Test-bed of Engineering Activities*, Annals of the CIRP, Vol 46, no.1, s.347-350.
101. [Lee, 1998] Lee S.S., (1998), *Lean Manufacturing*, Strona www: <http://nensho.me.engr.uky.edu/lm/lm.html>.
102. [Liker, 1998] Liker J.K., (1998), *“Lean” Manufacturing Engineering*, Manufacturing Engineering, Dearborn, vol. 120, s.120-121.
103. [Lis, 1976] Lis S., (1976), *Podstawy projektowania systemu rytmicznej produkcji*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
104. [Lis, 1982] Lis S., (1982), *Rytmiczność procesu produkcyjnego. Zakłócenia i ich kompensacja*. Praca zbiorowa, PWE, Warszawa.
105. [Lis, Santarek, Strzelczak, 1994] Lis S., Santarek K., Strzelczak S., (1994), *Organizacja elastycznych systemów produkcyjnych*, PWN, Warszawa.
106. [Lundrigan, 1986] Lundrigan R., (1986), *What is this Thing Called OPT*, Production and Inventory Management, Second Quarter, s. 2-12.
107. [Machlis, 1999] Machlis S., (1999), *Agent technology*, Computerworld, vol. 33, no. 12, s.69.
108. [Majdzik, 1998] Majdzik P., (1998), *Algorytmy synchronizacji systemów sekwencyjnych procesów cyklicznych*. Praca doktorska, Wydział Elektryczny, Politechnika Poznańska.
109. [Majdzik, Obuchowicz, 1995] Majdzik P., Obuchowicz A., (1995), *Programowanie współbieżne: próba opisu algebraicznego*, Materiały czwartej krajowej konferencji „Badania operacyjne i Systemowe”, Gdynia, s.123-130.
110. [Masahiko, Iwata, 1993] Masahiko O., Iwata K., (1993), *Development of a virtual manufacturing system by integrating product models and factory models*, Annals of the CIRP, vol. 42, no.1, s. 475-478.
111. [Maskell, 1998] Maskell B.H., (1998), *An Introduction to Agile Manufacturing*, <http://www.maskell.com/agiout.htm>.
112. [McCormick, Rao, 1994] McCormick S.T., Rao U.S., (1994), *Some Complexity Results in Cyclic Scheduling*, Math. Comput. Modelling, vol. 20, no. 2, s.107-122.
113. [Melnik et al., 1998] Melnyk S.A., Calantone M.R., Montaborn F.L., Smith R.T., (1998), *Short term atrion in pursuit of long term improvements: Introducing Kaizen*, Production and Inventory Management Journal, vol. 39, no. 4, s. 69-76.
114. [Müller, 1998] Müller H. J., (1998), *An Agent Holons and the Design of Flexible Manufacturing Systems*, Preprints of the 9th IFAC Symposium on Information Control in Manufacturing, Nancy, France, June 24-26, vol. 1, s. 71-75.
115. [Niederliński, 1999] Niederliński A.,(1999),*Constraint Logic programming – From Prolog to CHIP*, Proceedings of the Workshop on Constraint Programming for Decision and Control, Gliwice, June 28th, s. 27-34.
116. [Nowosielski, 1997] Nowosielski S., (1997), *Zarządzanie współczesnym przedsiębiorstwem przemysłowym*, Inżynieria Maszyn (red. Jędrzejewski), vol. 2, no. 2/3, s.19-31.
117. [Nowy Leksykon, 1998] Nowy Leksykon, (1998), PWN, Warszawa.
118. [Obuchowicz, Banaszak, 1996] Obuchowicz A., Banaszak Z., (1996), *The Mutual Exclusion Synchronisation of Flexible Manufacturing Systems: An Algebraic Approach*, Forth

International Workshop on Artificial Intelligence in Economics and Management, Tel-Aviv, January 8-10, s.39-43.

119. [Obuchowicz, Honczarenko, Banaszak, 1996] Obuchowicz A., Honczarenko J., Banaszak Z.A., (1996), *Modelling and Control Design of Repetitive Process Using Max Plus Algebra*, Proceedings of the 12th International Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future, 14-16 August, London, s. 679-684.
120. [Oczoś, 1999a] Oczoś K., (1999), *Postęp w szybkim kształtowaniu przyrostowym – Rapid Prototyping*, Mechanik 4/99, s.197-208.
121. [Oczoś, 1999b] Oczoś K., (1999), *Postęp w szybkim wykonywaniu oprzyrządowania – Rapid Tooling*, Mechanik 7/99, s. 471-479.
122. [Papaioannou, Edwards, 1998] Papaioannou T., Edwards J., (1998), *Mobile Agent Technology in Support of Sales Order Processing in the Virtual Enterprise*, Proceedings of the Intelligent Systems for Manufacturing: Multi-Agent Systems and Virtual Organizations, BASYS'98-er IEEE/IFIP International Conference on Information Technology for Balanced Automation Systems in Manufacturing, Praga, Czech Republic, August, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, s. 23-32.
123. [Patterson, 1992] Patterson M.C., (1992), *The Product-mix Decision: a Comparison of Theory of Constraints and Labor Based Management Accounting*, Production and Inventory Management Journal, Third Quarter, s. 127-132.
124. [Perkins, Humes, Kumar, 1994] Perkins J.R., Humes C., Kumar P.R., (1994), *Distributed Scheduling of Flexible Manufacturing Systems*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.10, no. 2., s. 133-141.
125. [Pinedo, 1995] Pinedo M., (1995), *Scheduling, Algorithms and Systems*, Prentice Hall, New Jersey.
126. [Plenert, 1993] Plenert G., (1993), *An Overview of JIT*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, no.8, s. 91-95.
127. [Popończyk, 1997] Popończyk A., (1997), *Spirala wdrożenia MRP II*, Informatyka, nr 2, s. 9-13.
128. [Powell, Pyke, 1996] Powell S. G., Pyke D. F., (1996), *Allocation of Buffers to Serial Production Lines with Bottlenecks*, IIE Transactions, no. 28, s.18-29.
129. [Prasad, 1994] Prasad B., (1994), *Modern Manufacturing. Modern Manufacturing, Information Control and Technology*, Zaremba, Prasad (Eds), Springer Verlag, s.1-25.
130. [Ptak, 1991] Ptak C. A., (1991), *MRP, MRP II, OPT, JIT and CIM - Succession, Evolution or Necessary Combination*, Production and Inventory Management Journal, Second Quarter, s. 7-11.
131. [Pun, Chin, Wong, 1998] Pun K.F., Chin K.S., Wong K.H., (1998), *Implementing JIT/MRP in PCB Manufacturer*, Production and Inventory Management Journal, vol. 39, no. 1, s.10-16.
132. [Puttman, 1991] Puttman M.T., (1991), *Logistics in Process Industries: Is It a Specific Problem?*, Production and Inventory Management Journal, Third Quarter, s. 61-66.

133. [Ramsay, Brown, Tabibzadeh, 1990] Ramsay M.L., Brown S., Tabibzadeh K. (1990): *Push, Pull and Squeeze Shop Floor Control with Computer Simulation*, Industrial Engineering, s. 39-45.
134. [Rizzo, 1997] Rizzo T., (1997), *Corporate Rightsizing and the Theory of Constraints*, Strona www: <http://www.rogo.com/cac/rizzo1.html>.
135. [Santarek, Strzelczak, 1989] Santarek K., Strzelczak S., (1989), *Elastyczne Systemy Produkcyjne*, WNT, Warszawa.
136. [Sawik, 1992] Sawik T., (1992), *Optymalizacja dyskretna w elastycznych systemach produkcyjnych*, WNT, Warszawa.
137. [Scheer, 1991] Scheer A.W., (1991), *CIM - Towards the Factory of the Future*, Springer Verlag, New York.
138. [Schollaert, 1994] Schollaert F., (1994), *Money Resource Planning- MRP III*, Library Albert I Brussels
139. [Schrageheim, Ronen, 1990] Schrageheim E., Ronen B., (1990), *Drum-Buffer-Rope Shop Floor Control*, Production and Inventory Management Journal, Third Quarter, s.18 - 23.
140. [Selegna, 1996] Selegna G., (1996), *Integrated the Planning and Scheduling in a Job Shop*, Production and Inventory Management Journal, Forth Quarter, s. 1-6.
141. [Silver, Peterson, 1985] Silver E.A., Peterson R., (1985), *Decision System for Inventory Management and Production Planning*, Wiley, New York.
142. [Skołod, 1995] Skołod B., (1995), *Opracowanie systemu sterowania przepływem narzędzi w zrobotyzowanym elastycznym gnieździe produkcyjnym*. Praca doktorska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska.
143. [Skołod, 1996a] Skołod B., (1996), *The Genetic Algorithm Application in the Tool Management System*, Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Integrated Manufacturing, vol. II, Zakopane, 14-17 maj, s. 353-360
144. [Skołod, 1996b] Skołod B., (1996), *Genetic Algorithm in Scheduling*, Proceedings of 7th International Symposium DAAAM, ISBN 3-901509-02-X, Katalinic (Ed), Vienna, Austria 17-19.10, s. 413-414.
145. [Skołod, 1996c] Skołod B., (1996), *System sterowania przepływem narzędzi w elastycznym gnieździe produkcyjnym*, Przegląd Mechaniczny, nr 2, s. 7-16.
146. [Skołod, 1997a] Skołod B., (1997), *OPT Metodologia harmonogramowania i sterowania produkcją*, Materiały VIII międzynarodowej konferencji naukowo-technicznej "Tendencje rozwojowe w procesach produkcyjnych", Zielona Góra, 18-19 październik, s. 163-167.
147. [Skołod, 1997b] Skołod B., (1997), *Harmonogramowanie procesów cyklicznych z uwzględnieniem dynamicznych odchyłeń procesu*, Materiały II KKNT "Diagnostyka Procesów Przemysłowych", Łagów, 8-10 wrzesień, s. 271-276.
148. [Skołod, 1997-c] Skołod B., (1997), *Repetitive Process Scheduling the OPT Approach*. Proceedings of the IVth International Symposium Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Międzyzdroje, August 26-29, s.1053-1058.

149. [Skołod, 1997-d] Skołod B., (1997), *Harmonogramowanie cykliczne : Reguły wyboru priorytetu*, Materiały III Konferencji naukowo technicznej "Mechatronika'97" Warszawa 20-22 listopad, s. 573-578.
150. [Skołod, 1997-e] Skołod B., (1997), *Scheduling of Repetitive Processes: Priority Rules Allocation*, Proceedings of the 8th International DAAAM Symposium, Dubrovnik, Chorwacja, October 22-25, s. 311-312.
151. [Skołod, Gattner, Kłós, 1997] Skołod B., Gattner D., Kłós S., (1997), *Batch Sizing: The OPT Approach*. Proceedings of the 8th International DAAAM Symposium, Dubrovnik, Chorwacja, October 22-25, s. 313-314.
152. [Skołod, Gattner, 1998] Skołod B., Gattner D., (1998), *Modelling of the System Organisation: Concurrent Engineering Approach*. Proceedings of the IX Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining Systems. Manufacturing simulation for industrial use, Karpacz, 22-27 Marzec, (ed.J. Jędrzejewski). Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, s. 50-59.
153. [Skołod, Stańczyk, 1998] Skołod B., Stańczyk J., (1998), *Planowanie procesów pomocniczych w systemach produkcji rytmicznej*, Materiały III KKNT "Diagnostyka procesów przemysłowych", Jurata 7-10 wrzesień, s. 385-390.
154. [Skołod, Gattner, Kłós, 1998 a] Skołod B., Gattner D., Kłós S., (1998), *Systemy procesów cyklicznych: własności*, Przegląd Mechaniczny, nr1, s. 21-26.
155. [Skołod, Gattner, Kłós, 1998b] Skołod B., Gattner D., Kłós S., (1998), *Zdecentralizowane sterowanie gniazdami wytwórczymi*. Materiały II szkoły komputerowego wspomaganie projektowania, wytwarzania i eksploatacji, Żegiestów, 11-15 maj, s. 91-96.
156. [Skołod, 1998a] Skołod B., (1998), *A Logistics Approach to Integrating AGVs and Workflow Control*, MMAR, August 25-29, Miedzzydroje, s.967-972.
157. [Skołod, 1998b] Skołod B., (1998), *Dedykowane systemy wytwarzania*, VI krajowa konferencja robotyki, Świeradów, 9-12 wrzesień, Prace Naukowe Instytutu Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej nr 99, seria: Konferencje, nr 44, tom 2, s. 75-82.
158. [Skołod, 1998c] Skołod B., (1998), *Koncepcja wytwarzania dedykowanego: model ograniczeń uwzględniający oczekiwania klienta i możliwości producenta*, Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, seria Automatyka, z.124/1998 XI krajowa konferencja "Automatyzacja dyskretnych procesów przemysłowych", s. 153-162.
159. [Skołod, 1998d] Skołod B., (1998), *Organizacyjne przygotowanie produkcji w kontekście inżynierii współbieżnej*, Inżynieria Maszyn R3, z. 2-3, Symulacja procesu wytwarzania i inżynieria współbieżna (red.: J.Jędrzejewski , B. Skołod), Agenda Wydawnicza SIPM, Wrocław, s. 105-122.
160. [Skołod, 1998e] Skołod B., (1998), *Organizacja systemów wytwarzania zorientowanych na potrzeby rynku*, Materiały II krajowej konferencji „Komputerowo zintegrowane zarządzanie”, Zakopane 12-14 styczeń, s. 305-310.
161. [Skołod, 1998f] Skołod B., (1998), *Dedykowane systemy wytwarzania*, Zarządzanie Produkcją nr 1/2, s. 17 - 23.

162. [Skołod, 1999a] Skołod B., (1999), *Współczesne koncepcje zarządzania produkcją i wytwarzania*, Materiały III krajowej konferencji "Komputerowo zintegrowane zarządzanie", Knosala (red.), WNT, Warszawa, s. 368-377.
163. [Skołod 1999b] Skołod B., (1999), *Production Order Control: Constraints Approach*, Proceedings of the International Conference on Computer Integrated Manufacturing, vol. II, WNT, Warszawa 1999, s. 219-226.
164. [Skołod 1999c] Skołod B., (1999), *Models of cyclic production systems*, Journal of Production Planning and Control, vol. 10, no. 3, s.230-237.
165. [Skołod, Gattner, Kłós, 1999] Skołod B., Gattner D., Kłós S., (1999), *Synthesis of the Repetitive Production Systems*, X Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining Systems, Innovative and Integrated Manufacturing, Karpacz, s. 103-110.
166. [Skołod, Jurkojć, 1999] Skołod B., Jurkojć J., (1999), *Modelowanie systemów wytwórczych*, XXXVIII sympozjon "Modelowanie w Mechanice", Zeszyty Naukowe Katedry Mechaniki Stosowanej, nr10, Gliwice, s. 261-266.
167. [Skołod, Krenczyk, 1999] Skołod B., Krenczyk D., (1999), *Zastosowanie prostego algorytmu alpinisty w systemie produkcyjnym*, Mechanik, nr 1, s.14-16.
168. [Smalec et al., 1997] Smalec Z., red., (1997), *Systemy planowania i Sterowania produkcją*, Prace naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wrocławskiej, Seria: Konferencje nr 29, "Automatyzacja produkcji'97", Innowacje w technice i zarządzaniu, s.131- 156.
169. [Sohal, Al-Hakim, 1994] Sohal A.S., Al-Hakim L.A.R., (1994), *Implementation of JIT Technology*, Modern Manufacturing, Information Control and Technology, Zaremba, Prasad (Eds), Springer Verlag, s. 378-400.
170. [Sohlenius, 1992] Sohlenius G., (1992), *Concurrent Engineering*, Annals of the CIRP, no.2/ 41, s. 645-655.
171. [Souilah, Boulif, Hamdache, 1998] Souilah A., Boulif M., Hamdache S., (1998), *Manufacturing Cells Formation: A Genetic Algorithms Approach*, Preprints of the 9th IFAC Symposium on Information Control in Manufacturing, Nancy, France, June 24-26, vol. 2, s. 357-362
172. [Spencer, 1994] Spencer M.S., (1994), *Production Planning in a Make-to-order Repetitive Environment*, Production Planning and Control, vol. 5, no. 6, s. 575-584.
173. [Spoede, Henke, Umble, 1994] Spoede C., Henke E. O., Umble M., (1994), *Using Activity Analysis to Locate Profitability Drivers*, Management Accounting, no.5, s. 43-48.
174. [Sorman, 1993] Sorman G., (1993), *Prawdziwi myśliciele naszych czasów*, Czytelnik, Warszawa
175. [Suwa, Morita, Fujii, 1996] Suwa H., Morita H., Fujii S., (1996), *Heuristic Rule Acquisition for Flow-Shop Scheduling*, Proceedings of the Japan/USA Symposium on Flexible Automation, vol. 2. ASME, s. 1345-1351.
176. [Syan, Menon, 1994] Syan C., Menon U., (1994), *Concurrent Engineering. Concept, Implementation and Practice*, Chapman & Hall, London.

177. [Szyller, 1996] Szyller J., (1996), *MRP II- kolejny kłopot z nazewnictwem*, Informatyka 10/1996.
178. [Szymański, Skołod, 1998] Szymański K., Skołod B., (1998), *The Flow Frequency in Cyclic Production Systems*, Proceedings of the 6th International Conference CO-MAT-TECH, Trnava, October 22-23, s. 283-288.
179. [Teixeira, Makatsoris, Besant, 1997] Teixeira E., Makatsoris C., Besant C., (1997), *Distributed Capacity Analysis for Proactive Planning in Semiconductor Virtual Enterprises*, Proceedings of the IFAC/IFIP Conference on Management and Control of Production and Logistics, August 31 - September 3, 1997, Campinas, Brasil, s. 307- 311.
180. [Tian, et al., 1998] Tian H., Xu W., Wend H.D., Wu Q., (1998), *A Review Upon Concurrent Engineering*, Preprints of the 9th IFAC Symposium on Information Control in Manufacturing, Nancy, France, June 24-26, vol. 2, s. 511-516.
181. [Tonshoff, Winkler, Ehrmann, 1998] Tonshoff E., Winkler M., Ehrmann M., (1998), *Holonic Manufacturing the Route to Autonomous and Cooperative Manufacturing Systems*, Preprints of the 9th IFAC Symposium on Information Control in Manufacturing, Nancy, France, June 24-26, vol. 2, s. 135-140.
182. [Tymowski, 1966] Tymowski J., (1966), *Automatyzacja procesów technologicznych w przemyśle maszynowym*, WNT, Warszawa.
183. [Ueda, 1997] Ueda K., (1997), *The Biological Manufacturing System and Interactive Manufacturing*, Panel Discussion, June, 10, CIRP/WCIMPS.
184. [Ulfsby, 1990] Ulfsby S., (1990), *Dynamic Production Scheduling*, Proceedings of the 6th CIM Europe Annals Conference, 15-17 May, Lisbon , Portugal, s. 153-172
185. [Upton, 1992] Upton D., (1992), *Flexible Structure for Computer-Controlled Manufacturing Systems*, Manufacturing Review, vol. 5, s. 58-74.
186. [Vaario, Ueda, 1996] Vaario J., Ueda K., (1996), *Self Organization in Manufacturing Systems*, Japan USA Symposium on Flexible Automation, vol. 2, s. 1481-1484.
187. [Vanceeswaran, Townsend, 1993] Vanceeswaran R., Townsend M.A., (1993), *Two Stage Heuristic Procedure for Scheduling Job Shop*, Journal of Manuf Systems, vol.2, no.4, s. 315-325.
188. [Valckenaers et al., 1998] Valckenaers P., Van Brussel H., Bongaerts L., Wyns J., Peeters P., (1998), *Holonic Manufacturing Control at K.U. Leuven*, Preprints of the 9th IFAC Symposium on Information Control in Manufacturing, Nancy, France, June 24-26, vol. 2, s. 143-148.
189. [Venkatesh, Smith, 1995] Venkatesh S., Smith J.S., (1995), *Deadlock Detection and Resolution in the Real-Time Control of Flexible Manufacturing Cell*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Working Paper INEM/MSWP04/8-95.
190. [Viswanadham, Ram, 1994] Viswanadham N., Ram R., (1994), *Composite Performance Dependability Analysis of Cellular Manufacturing Systems*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 10, no. 2, s. 245-258.
191. [Westkamper, Freese, 1998] Westkamper E., Freese J., (1998), *Integrated Concept for Innovative Product and Production Development*, Proceedings of the IX Workshop on Supervising and Diagnostics of Msachining Systems. Manufacturing Simulation for Industrial

- Use, March 22-27, Karpacz Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, s. 259-267.
192. [Weiss, Dostatni, Grajewski, 2000] Weiss Z., Dostatni E., Grajewski M., (2000), *Planowanie produkcji w zintegrowanym komputerowo elastycznym gnieździe wytwarzania*, III konferencji „Komputerowo zintegrowane zarządzanie” Zakopane, WNT, Warszawa.
193. [Weiss, 1998] Weiss Z., (1998), *Techniki komputerowe w przedsiębiorstwie*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
194. [Weiss, Dostatni, Adanowicz, 1998] Weiss Z., Dostatni E., Adanowicz P., (1998), *Zarządzanie zleceniem w systemie PPC*. Materiały I konferencji „Komputerowo zintegrowane zarządzanie”, Zakopane, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
195. [Wilson, 1988] Wilson I.B., (1988), *Synchronised Manufacturing - the Route to Zero Inventory and Maximum Profitability*, Morimer J (Eds), Logistics in manufacturing an IFS executive briefing, Springer Verlag, New York, s.111-117.
196. [Wiendhal, Ahrens, 1995] Wiendhal H. P., Ahrens V., (1995), *Planning and Control in Self-organized Production Systems*; Production Engineering, vol. II/2, s.143-148.
197. [Wiendahl, Vollmer, 1997] Wiendahl H. P., Vollmer L., (1997), *Design of a Pull Oriented Production Cell*, Proceedings of the Second World Congress on Intelligent Manufacturing Processes & Systems, Budapest, Hungary, June 10-13, s.148-157.
198. [Witkowski, 1993] Witkowski T., (1993), *Algorytmy rozpoznawania problemu szeregowania zadań*, Informatyka, nr 6, s. 20-26.
199. [Witkowski, 1995] Witkowski T., (1995), *Optymalizacja przydziału maszyn w problemie harmonogramowania*, Przegląd Mechaniczny, nr 5, s. 22- 27.
200. [Womack, Jones, 1996] Womack J.P., Jones D.T., (1996), *Lean Thinking - Banish Waste and Create Wealth in your Corporation*, Simon & Schuster, New York.
201. [Woolsey, 1990] Woolsey R.E.D., (1990), *Production Scheduling Quick and Dirty Methods for Parallel Machines*, Production and Inventory Management Journal, Third Quarter, s. 84-87.
202. [Wróblewski, 1993] Wróblewski S., (1993), *Podstawy sterowania przepływem produkcji*, WNT, Warszawa.
203. [Wu, 1988] Wu N.L., (1988), *Understanding Production Systems Through Human Simulation: Experiencing JIC, JIT and OPT Production Systems*, International Journal of Operations and Production Management, vol. 9, no.1, s. 27-34.
204. [Zaborowski, 1992] Zaborowski M., (1992), *Harmonogramowanie nadążne jako metoda dekompozycji złożonych zadań harmonogramowania produkcji*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Automatyka, z.109, Gliwice, s. 343-352.
205. [Zbroja et al., 1997] Zbroja T., red.,(1997), *Współczesne systemy zarządzania produkcją*. Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, Seria: Konferencje nr 29, “Automatyzacja produkcji’97”, Innowacje w technice i zarządzaniu, s. 331-358.
206. [Zuberek, 1998] Zuberek W., (1998), *Hierarchical Derivation of Schedules for Manufacturing Cells*, Preprints of the 9th IFAC Symposium on Information Control in Manufacturing, Nancy, France, June 24-26, vol. 2, s. 423-428.

Większość stosowanych obecnie narzędzi wspomaganie komputerowe przyjmuje za swój paradygmat technikę analizy (optymalizacji) – poszukiwanie sposobów integracji ekstremalizujących dane kryteria, które determinują funkcjonowanie systemu produkcyjnego. W pracy przyjęto paradygmat eksponujący techniki syntezy, pozwalający rozważać systemy wspomaganie komputerowe, których działaniem sprowadza się do poszukiwania struktur, złożonych z optymalnie dobranych komponentów, gwarantujących zadany poziom funkcjonowania. Zaletą takiego podejścia jest jego duża efektywność, wyrażająca się między innymi niską złożonością obliczeniową algorytmów wyszukiwania oraz możliwością ukierunkowanego wyboru stosowanych kryteriów i przyjmowanych ograniczeń. W szczególności podejście to umożliwia ujęcie układu producent - konsument w kontekście optymalizacji sprzecznych celów - bądź to optymalizacji interesów producenta, bądź też optymalizacji celów konsumenta. Poszukiwana jest metoda wyznaczania rozwiązań dopuszczalnych. Powinna ona odpowiadać na pytania: Czy dane zlecenie może być zrealizowane w oczekiwanym terminie w systemie dysponującym znanymi zdolnościami produkcyjnymi i pojemnościami magazynów.

Przedstawione w pracy podejście zawarto w rozwijanej koncepcji dedykowanych systemów produkcji rytmicznej. W systemach tego typu możliwa jest integracja planowania produkcji i syntezy sterowania koordynującego jej przepływ. Pozwala to w efekcie na szybką i wiarygodną weryfikację przyjętych zleceń produkcyjnych. Rozwinięcie związanej z tą koncepcją tezy o możliwości efektywnego wyznaczania zintegrowanych planów produkcji znalazło swój wyraz w uzyskanych wynikach.

Przeprowadzona analiza dominujących i rozwijanych trendów rozwojowych systemów produkcji dyskretnych, a w szczególności związanych z ich implementacją technik planowania produkcji ukazała korzyści wynikające z: „dedykowanego” ujęcia układu producent - konsument, integracji etapów planowania produkcji oraz syntezy procedur sterowania operacyjnego.

Opracowany, dla przyjętych założeń upraszczających (tj.: brak nawrotów, wzajemne wykluczanie, itd.), model układu producent - konsument umożliwił sformułowanie problemu pracy sprowadzającego się do wyznaczania związków między wybranymi parametrami opracowanego modelu, determinujących możliwość realizacji zleceń produkcyjnych.

Wyznaczone, w wyniku przeprowadzonej analizy modelu, związki mają postać odpowiednich warunków wystarczających, których spełnienie gwarantuje realizację wariantowanego zlecenia. Uzyskane warunki wykorzystane zostały w opracowanej metodyce szybkiej weryfikacji zleceń.

Metodyka, potwierdzająca tezę pracy, przedstawia dwa warianty planowania produkcji. Pierwszy z nich weryfikuje możliwości jednoczesnej realizacji pakietu zleceń produkcyjnych, drugi zaś weryfikuje możliwości wprowadzania oddzielnych zleceń do systemu realizującego już wcześniej zaplanowaną produkcję. Implementacja komputerowa opracowanej metodyki w pakiecie użytkowym systemu weryfikacji zleceń (SWZ) stanowi zwięźczenie celu pracy jakim była budowa komputerowo wspomaganego planowania jednoczesnej, wielosortymentowej produkcji rytmicznej.

Weryfikację funkcjonowania SWZ przeprowadzono na podstawie danych z Fabryki BEFARED. Eksperyment wykazał praktyczność i zalety SWZ w porównaniu z systemami klasy MRP. Wskazuje również na konieczność dalszych badań, ich zakres obejmuje między innymi procesy montażu, konieczność uwzględnienia procesów pomocniczych, np. transportu międzykomórkowego, analizy kosztów itp.

Nowadays, most computer aided tools used analysis technique (optimisation) as its paradigm - the search for integration methods of finding the extreme of the particular criteria that determine functioning of the manufacturing system. In this work, the synthesis paradigm is assumed, making it possible to analyse the computer-aided systems, whose functioning limits a search for structures consisting of the optimally selected components, ensuring the required operation level. The advantage of this approach is its significant effectiveness demonstrated, among others, by its low calculation complexity of search algorithms, and the possibility of the directed selection of the used criteria and assumed constraints.

This approach concentrates on formulating the manufacturer - consumer system in the context of optimisation of contradictory goals, or optimisation of manufacturer interests, or else optimisation of the consumer's goals. The method of permissible solutions determination is search. The method should answer (on-line) the question: If the given production order can be realised in the system determined by free capacities and buffers sizes in due time. The approach presented in this work consists in the development of the concept of the dedicated systems for repetitive production. Integration of production planning and synthesis of control co-ordination its flow is possible in systems of this kind. It makes possible to carry out the quick and reliable validation of the accepted manufacturing orders. Development of the thesis, connected with this concept, of the possibility of the effective determining of the integrated manufacturing plans, has been demonstrated in the results mentioned below.

The analysis of the dominating development trends of the discrete production carried out, especially connected with the implementation of the production planning techniques. It demonstrated the benefits resulting from: the formulation of the manufacturer - consumer system, the integration of the stages of production planning and the synthesis of the operational control procedures.

The manufacturer - consumer model, developed using the simplifying assumptions, e.g., route cannot run twice across the same resource, mutual exclusion protocol, etc. It make possible to formulate the thesis problem reduce to identification of relationships between the selected parameters of the developed model, determining the possibility of the production order realisation. The relationships, identified in the course of analysis of the model, have the form of the relevant sufficient conditions, that satisfied, guarantee fulfilment of the variant order. The obtained conditions have been used in the developed methodology of the quick job order verification.

This methodology, confirming the thesis of the work, presents two variants of production planning. The first one verifies the possibility of the simultaneous carrying out of the production order package, whereas the second one verifies the possibility of acceptance of the separate production order into the system under the condition to not disturb the processes already realised in the system. Computer implementation of this methodology in the job order application system (pol.: System Weryfikacji Zleceń -SWZ). The system functioning consists in development of the computer-aided planning system for the simultaneous, multi-assortment, repetitive production.

Verification of the SWZ functioning were provided on the base of repetitive production in the Factory BEFARED. An experiment points at its significant practicality and advantages comparing to MRP. The scope of the further research includes, among others, assembly processes, the need to take into consideration the auxiliary processes, e.g., intercellular transport, cost analysis, etc.

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Śląskiej

P. 3361/00/136

Druk: Drukarnia Gliwice, ul. Zwycięstwa 27, tel. 230 48 50