

Henryk Kowalowski  
Politechnika Śląska

### MODELOWANIE W OPERATYWNYM STEROWANIU PRODUKCJĄ DYSKRETYCH PROCESÓW PRZEMYSŁU MASZYNOWEGO

**Streszczenie.** W pracy, obok uzasadnienia konieczności wdrażania operatywnego sterowania produkcją w dyskretnych procesach przemysłowych, rozpatruje się osobliwości modelowania tych procesów dla celów sterowania. Badanie wydajności systemów złożonych z agregatów wzajemnie powiązanych w większości przypadków bazuje na metodzie symulacji procesu dla różnych struktur systemów i różnych parametrów agregatów. Przedstawia się metody umożliwiające formalizację dyskretnych procesów dla potrzeb sterowania operatywnego. Ukazano zadania wymagające dalszych badań /uwzględnienie czynnika ludzkiego w systemach dyskretnych oraz stworzenia odpowiednio zorganizowanych zbiorów bazy danych dla potrzeb sterowania/.

#### 1. Konieczność rozwoju operatywnego sterowania produkcją w przemyśle maszynowym

Złożona problematyka operatywnego sterowania produkcją przemysłu maszynowego, a w szczególności najistotniejszych funkcji sterowania, planowania i harmonogramowania produkcji w oparciu o możliwości, jakie stwarza wykorzystanie struktur programowych i urządzeńowych maszyn cyfrowych, nie znalazła jak dotąd monograficznego opracowania w krajowej literaturze specjalistycznej.

Trudności, jakie napotyka się przy rozwiązywaniu zadań sterowania procesami produkcyjnymi typowymi dla przemysłu maszynowego, wynikają nie tylko z obszernego zakresu funkcji systemu dynamicznego stanowiącego obiekt sterowania - rozdziałów zasobów i zadań, obsługi i realizacji zadań - ale przede wszystkim rodzi je dyskretny charakter procesów wytwórczych właściwych temu przemysłowi. Technologię wytwarzania wyrobów tworzą określone operacje składowe, a wyrób końcowy otrzymuje się przy uwzględnieniu uwarunkowań czasowych wiążących poszczególne operacje w zamknięty proces produkcyjny.

Niejednokrotnie podkreślano, że jeśli podstawowe problemy dotyczące sterowania ciągłymi procesami technologicznymi przebiegającymi w różnych agregatach powiązanych stałym przepływem materiałów i energii są już dostatecznie głęboko opracowane, to syntetyczne opracowanie podstaw teoretycznych sterowania procesami dyskretnymi tworzącymi kompleksy operacji uwarunkowane czasowo znajdują się stale jeszcze w początkowej fazie rozwoju [1]. Współcześnie obserwuje się rozwój nowych działów matematyki dyskretniej i teorii decyzji optymalnych, a także teorii optymalnego harmonogramowania [2], które obok innych wybranych teorii stanowią podstawy rozwoju metod rozwiązywania zadań sterowania dyskretnymi procesami przemysłowymi.

Badania ogólnych zależności funkcjonalnych nad systemem sterowania produkcją w przemyśle maszynowym wymagają bardziej szczegółowego rozpatrywania sterowania produkcją na dwóch poziomach; sterowania perspektywicznego i sterowania operatywnego.

Wzajemne zależności pomiędzy obiektem sterowania, którego stan charakteryzują określone wskaźniki, parametry, dane, a procesem sterowania, jako procesem ruchu i przetwarzania informacji o obiekcie na poziomie sterowania perspektywicznego i operatywnego sterowania produkcją w typowym zakładzie przemysłu maszynowego przedstawia rys. 1.

Na poziomie sterowania perspektywicznego wydłużone horyzonty planowania, wobec dynamiczności i stochastyczności przebiegów, dopuszczają przy opracowaniu planów bieżących produkcji użycie uogólnionych wskaźników o produkcji /nomenklaturowych, asortymentowych, uśrednionych obciążeniach agregatów, zagregowanych norm zużycia materiałów itp./ Zawężone horyzonty planowania, oddające rzeczywiste określone zależności pomiędzy operacjami na poziomie sterowania operatywnego, będące podstawą do wypracowa-

nia harmonogramów produkcyjnych wymagają detalizacji, aktualizacji i uściślenia wszystkich danych decydujących o przebiegu dyskretnego procesu produkcyjnego. Planowanie na poziomie perspektywicznego sterowania produkcją ma zabezpieczyć przede wszystkim optymalne zbilansowanie zasobów w korelacji ze skalonymi planami rocznymi i kwartalnymi przedsiębiorstwa, zaś zadania sterowania operatywnego dotyczą rozwiązywania bieżących problemów realizacji tych planów, koordynacji i ilościowych powiązań w przestrzeni i w czasie przepływu licznych przedmiotów produkcji na wszystkich etapach technologii wytwarzania wyrobów.

Sterowanie perspektywiczne przedsiębiorstwem trzeba więc interpretować jako ogólną strategię prowadzenia procesu produkcyjnego, zaś odpowiadające mu sterowanie operatywne - jako taktyczny całościowy kształt działań.

Kierowanie procesem produkcyjnym zakładu zależy bardzo istotnie od efektywnego sterowania produkcją przez racjonalne wypracowanie ko - niecznych oddziaływań decyzyjnych uwzględniających korektury zadań planowych wynikające na skutek zakłóceń zewnętrznych, stochastyczności procesów, a także konieczności uwzględniania "czynnika ludzkiego" /systemy produkcyjne w przemyśle maszynowym są w ogromnej większości systemami aktywnymi, stąd uwzględnianie kwalifikacji, a także psychofizycznych cech człowieka w procesie produkcyjnym ma zasadnicze znaczenie/.

Proces sterowania produkcją jak na rys. 1. został przedstawiony w postaci hierarchii modułów planowania, ewidencji, decyzji i harmonogramowania produkcją na poziomach sterowania perspektywicznego i operatywnego. Wzajemne korelacje perspektywicznego i operatywnego sterowania produkcją dokonują się poprzez moduły ewidencji kontroli i analizy, które wykorzystują do oceny stanu wykonywania zadań planowych i do wypracowania operatywnych decyzji korekcyjnych stałe informacje z bazy danych i informacje bieżące o procesie zdejmowania w czasie rzeczywistym.

Wielonomenklaturowość i złożoność konstrukcyjna wyrobów wpływa istotnie na technologiczno-organizacyjne relacje między kolejnymi stadiami procesów - przygotowania produkcji, obróbki mechanicznej i montażu wyrobów. Dla zabezpieczenia zbieżności pracy wszystkich wydziałów zakładu harmonogramy produkcji powinny ściśle i precyzyjnie odzwierciedlać potrzebą kolejność technologii wytwarzania wyrobu przy uwzględnieniu specyfiki organizacji całego procesu produkcyjnego. Znaczenie podstawowe posiada przy tym konieczność zapewnienia rytmicznej pracy wydziałów przy najwyższym stopniu wykorzystania agregatów, stanowisk pracy i powierzchni magazynowych.

Współczesna praktyka formułowania operatywnych harmonogramów produkcyjnych w przemyśle maszynowym z wielu przyczyn nie jest pozbawiona istotnych niedostatków. W zakładach przemysłu maszynowego o indywidualnej a nawet drobnoseryjnej wielonomenklaturowej produkcji obliczenia obciążeń agregatów dla celów optymalizowanych harmonogramów produkcji z krótkimi horyzontami nie były prowadzone. Zakresy produkcji w takich zakładach wytwórczych nie mogłyby być w zasadzie uzasadnione stopniem trudności wykonywania planów i zdolnością przepustową agregatów. Stan ten tłumaczy się przede wszystkim trudnościami przeprowadzania podobnych obliczeń natury metodologicznej.

Rzeczywiście, przy użyciu konwencjonalnych metod obliczeniowych obciążeń agregatów dla przygotowania harmonogramów produkcyjnych, a w szczególności w przypadkach wyrobów o dłuższych cyklach produkcyjnych dostatecznie trudno określa się np. jaką część z zaplanowanych wyrobów można wykonać w zakresie określonego horyzontu. Nieprecyzyjna w czasie i w przestrzeni inwentaryzacja niedokończonych produkcji powoduje odchylenia od zaplanowanych i rzeczywistych obciążeń agregatów wydziałów i przedsiębiorstwa. I tak niedostatecznie wierne rozpoznanie stanów przejściowych procesu produkcyjnego wpływa istotnie na nierytmiczność produkcji zakładu.

Operatywne sterowanie produkcją umożliwia skorelowaną pracę wydziałów /we wszystkich stadiach procesu produkcyjnego/ odpowiednio przyjętymi horyzontami jej harmonogramowania /zwykle zmianowo - dobowymi, tygodniowymi lub miesięcznymi/, a także zgodność asortymentową i liczbą produkowanych wyrobów.

Niektóre własne badania operatywnego sterowania produkcją i harmonogramowania produkcji w typowym zakładzie przemysłu maszynowego, jakim jest FSM, wykazały, że konwencjonalne, współcześnie tam stosowane metody nie uwzględniające specyfiki systemowego podejścia do organizacji, planowania i realizacji produkcji opierające się na tradycyjnych obli-

czeniuach ręcznych nie mogą zabezpieczyć rytmicznej i wzajemnie skorelowanej pracy wydziałów produkcyjnych zakładu zgodnie z zadawanymi planami perspektywicznymi [3].

Eliminacja wymienionych niedostatków sterowania procesem produkcyjnym będzie możliwa przez konsekwentne wdrażanie operatywnego sterowania produkcją w oparciu o metody modelowania cyfrowego umożliwiające układanie optymalizowanych harmonogramów produkcyjnych złożonych wyrobów przemysłu maszynowego. Podstawą praktycznej realizacji zamierzeń szerszego wdrożenia operatywnego sterowania produkcją tworzą możliwości wykorzystania do tego celu struktur programowych i dostępnych w kraju struktur urządzeniowych maszyn cyfrowych.

## 2. Osobliwości modelowania dyskretnych procesów produkcyjnych w prze-myśle maszynowym

W zależności od deterministycznego względnie probabilistycznego charakteru modelu procesu możliwe są różne drogi prowadzące do rozwiązania zadań operatywnego sterowania dyskretnymi procesami wytwórczymi.

Dominującą metodą umożliwiającą poszukiwania optymalizowanych w sensie przyjętych kryteriów efektywności rozwiązań dla większości klas dyskretnych procesów przemysłu maszynowego /ale nie tylko/ jest metoda symulacji cyfrowej [4]. Badania wydajności systemu złożonego z agregatów wzajemnie sprzężonych będzie polegać w większości przypadków na symulacji procesu dla różnych struktur systemu i różnych parametrów agregatów /probabilistyczny charakter procesu wymagać będzie założenia a priori własności statystycznych sygnałów wejściowych/.

W zależności od rodzaju zadania problemy do rozwiązania to optymalizacja przebiegu procesu dyskretnego przy zadanej strukturze systemu i parametrach agregatów, lub wybór struktury systemu i parametrów agregatów, dla których optymalny proces dyskretny ma postać zadaną. W większości zagadnień typowych dla dyskretnych procesów produkcyjnych przemysłu maszynowego - doboru struktur i parametrów agregatów dla sterowania optymalnego i optymalizacji harmonogramów produkcji, użytkowania systemów /gospodarki resursami/, metoda modelowania cyfrowego jest często jedyną efektywną metodą rozwiązania zadania [5].

Chociaż dla ułatwienia procesów symulacji zdarzeń stosowane są coraz to szerzej wyspecjalizowane języki programowania [6], to jednak, jak pokazały badania własne, potwierdza się w pełni przydatność do tego celu języka algorytmicznego FORTRAN.

Analizy i syntezy dyskretnych procesów przemysłowych dla potrzeb sterowania operatywnego /a także projektowania/ wymagają przeprowadzenia formalizacji, przy czym rozliczne możliwe ujęcia analityczne napotyka się na problemy teoretycznych uogólnień lub praktycznych wdrożeń.

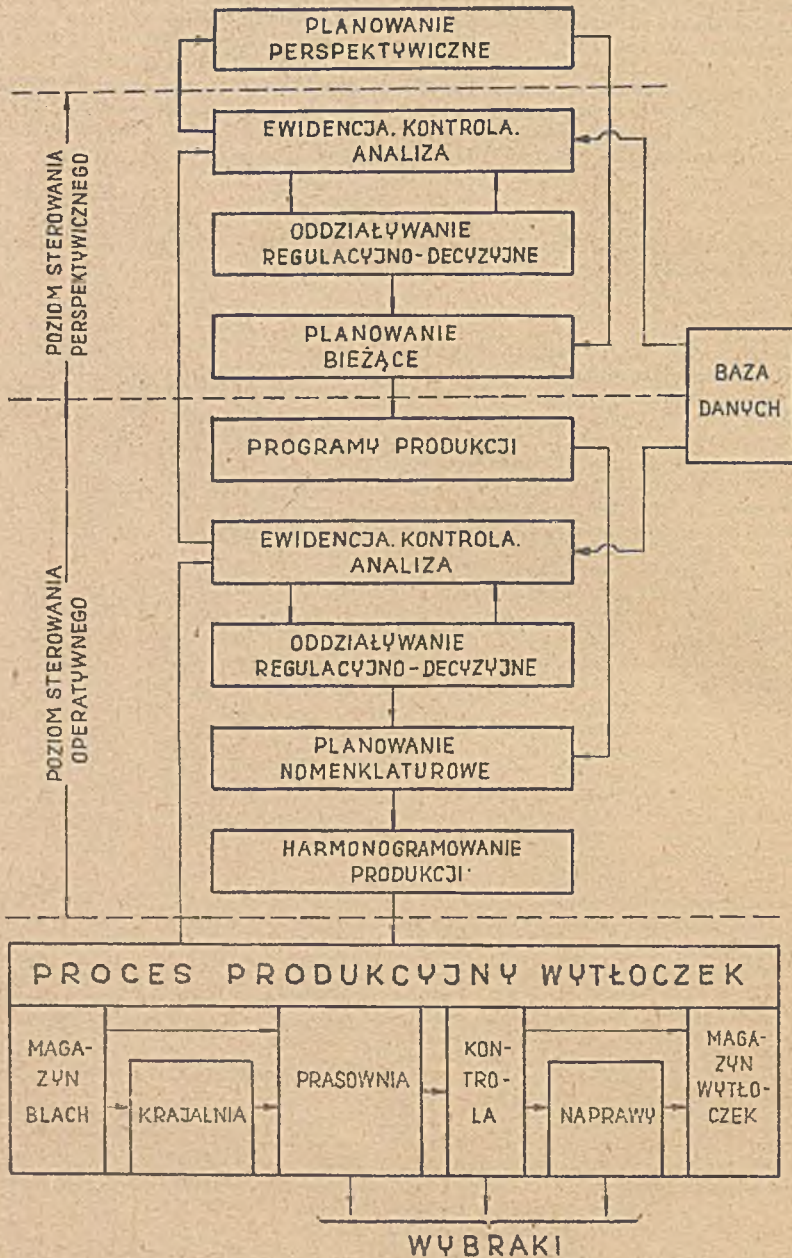
Na przykład, niektóre zadania teorii harmonogramów można rozwiązać metodami programowania liniowego lub dynamicznego, czyli metodami programowania dyskretnego [7].

Związły i ogólny opis określonych klas procesów dyskretnych można również przedstawiać w oparciu o teorię automatów skończonych [8] lub przy wykorzystaniu teorii gier [9], gdzie podstawą formalizacji procesu jest postać macierzy gier.

Gdy jednak czas trwania poszczególnych operacji nie jest stały, lub nie znany, co charakteryzuje aktywne klasy dyskretnych procesów produkcyjnych, zadania sterowania można rozwiązywać jedynie metodami modelowania cyfrowego. Duża efektywność metody modelowania cyfrowego do rozwiązywania zadań praktyki optymalizacji dyskretnych procesów w przemyśle maszynowym [3] rodzi jednak potrzebę dalszych prac naukowo - badawczych nad innymi bardziej doskonałymi metodami formalizacji tych procesów dla celów modelowania cyfrowego.

Stosowanie metody przeglądu zupełnego może łatwo doprowadzić do przekroczenia granicy kombinatoryki Bremermanna. Duże perspektywy w tym względzie stwarza metoda telegoiczna [10] z powodzeniem rozwijana w niektórych pracach Instytutu Automatyki, np. [11].

W zależności od rodzaju rozwiązywanego zadania wyróżnia się w modelowaniu cyfrowym procesów dyskretnych metody stałego kroku i kolejnych



Rys.1. Funkcjonalne powiązanie modułów planowania ewidencji i harmonogramowania w operatywnym sterowaniu produkcją wydziału tłoczni

zdarzeń, lub - śledzenie zmian agregatów systemu w procesie lub - śledzenie przepływu sygnałów pomiędzy agregatami systemu [12]. Zadanie wymaga określenia warunków początkowych i brzegowych oraz wyraźnego sprecyzowania funkcji celu badań modelowych.

Model matematyczny procesu dyskretnego, podstawa do budowy programu symulacyjnego formuje się identyfikując strukturę obiektu i procesu jako zespół agregatów /maszyn i stanowisk roboczych/ i jako kompleks uwarunkowanych czasowo operacji i ich parametrów [13]. W praktyce dokonuje się identyfikacji struktur i parametrów w oparciu o obserwacje obiektu rzeczywistego lub na podstawie zbiorów dokumentacji o procesie, a najczęściej korzystając z obu tych źródeł, co często wystarcza do budowy schematu blokowego programu symulacyjnego.

Dążąc do stworzenia opisu analitycznego systemu dyskretnego wygodnie formułuje się jego model matematyczny metodą wektorów stanów istotnych [14].

Wyciąganie wniosków z badań modelowych wymagać będzie weryfikacji modelu symulacyjnego procesu dyskretnego. W przypadku systemów dyskretnych stanowi to złożony problem, gdyż zasadność modelu można sprawdzić tylko w pewnych przypadkach przez porównywanie z wynikami uzyskiwanymi na obiektach rzeczywistych.

Dyskretny proces technologii wytwarzania na poziomie sterowania operatywnego wymaga dużego stopnia detalizacji poszczególnych jej elementów. Na poziomie sterowania perspektywicznego produkcją modelowanie technologii wytwarzania wyrobów w przemyśle maszynowym rodzi potrzebę zagregowanego podejścia przy formalizacji tych procesów.

Do scalenia prac wchodzących w skład procesu technologicznego złożonego wyrobu wykorzystuje się zarówno konstrukcyjne jak i technologiczne cechy agregowanych elementów detaloooperacyjnego przebiegu produkcji. Można więc w procesie scalania wydzielać technologie ogólnego montażu wyrobu /np. linia montażu samochodu/, technologie produkcji części, węzłów czy podzespołów /np. montaż silnika, skrzynki biegów/, technologie obróbki mechanicznej i inne /np. kucie, prasowanie, odlewanie/.

Modele sieciowe, budowane na podstawie konstruktorskiego rozkładu wyrobu tworzą w praktyce harmonogramowania problem wielowymiarowy /konieczność zgrupowania wielu sieci w jednym harmonogramie/ nierozwiązalny w aspekcie detaloooperacyjnym. Z drugiej strony możliwe zakłócenia procesu produkcyjnego generują taką liczbę odchyłek, że model sieciowy traci swą praktyczną wartość już po kilku godzinach od chwili jego sporządzenia.

Uogólniony przykładowy zapis scalonej technologii wytwarzania wyrobu R rekomendowany w [15] formalizuje się tak:

$$R = \{ j, \mu, \alpha, \beta, D, z, /t_{10}/ \}.$$

gdzie:  $j \in J$  - kod wyrobu,  $\mu \in G/j$  - kody montowanych elementów wchodzących bezpośrednio w skład  $j$ -go wyrobu,

$\alpha \in \overline{1, \mu_j}$  - numer kolejnego etapu obróbki  $j$ -go wyrobu /wyrob uczestniczy w procesie wytwarzania podczas  $\alpha$  kalendarzowych okresów/,

$\beta$  - cecha stadium technologii wytwarzania wyrobu / $\beta = 1, 2, 3$  - prace przygotowawcze, obróbcze montażowe/,  $D$  - długości cyklu wykonywanych prac,  $z$  - czas wyprzedzania /czas, który chwila początkowa wykonywanej pracy wyprzedza zakończenie montażu wyrobu, / $t_{10}$ / - macierz scalonych norm pracochłonności wykonywania pracy  $i \in I$  - kod rodzaju agregatu,  $c \in C$  - kod wydziału zakładu,  $C = c_1 \cup c_2 \cup c_3$  -  $c_1$  odlewanie,  $c_2$  kuźnie,  $c_3$  montaż.

Znalezienie formuły oddającej scaloną technologię wytwarzania wyrobu umożliwi zbudowanie cyklogramu produkcji w postaci poszczególnych etapów obróbki, okresów trwania cykli produkcyjnych, koniecznych wyprzedzeń etapów obróbki i pracochłonności wykonywania każdego prac przy uwzględnieniu koniecznych ograniczeń.

Wdrożenie modelowania matematycznego do praktyki operatywnego sterowania produkcją zakładów przemysłu maszynowego jest ściśle związane z zaprojektowaniem odpowiednio zorganizowanych zbiorów bazy danych zabezpie-

czających potrzebne informacje dla prawidłowej pracy systemu.

Zasady tworzenia informatycznego systemu sterowania jako procesu zintegrowanego przetwarzania danych o produkcji powinny być rozpatrywane i rozwiązywane kompleksowo w aspekcie organizacyjnym /współpracy elementów systemu informatycznego/ technologicznym /metod przetwarzania i opracowywania informacji i technologii ich realizacji/ oraz technicznym /uwzględnienia dostępnych środków techniki obliczeniowej i organizacyjnej/.

Prace naukowo-badawcze i wdrożeniowe w zakresie metod i aplikacji z dziedziny automatyzacji dyskretnych procesów przemysłowych stanowią grupę problemów rozwijanych w Instytucie Automatyki Politechniki Śląskiej.

#### LITERATURA

- [1] Z.Bubnicki - Problemy optymalnego sterowania kompleksami operacji. Materiały Jubileuszowej Konferencji Naukowej Wydziału Automatyki i Informatyki Politechniki Śląskiej. Gliwice IX 1973 r. str. 145 - 167.
- [2] W.Szkurba "Zadacza trzech szłankow" Wyd. Nauka Moskwa 1976.
- [3] H.Kowalowski, F.Marecki, S.Pawlik, E.Zielińska i inni "Optymalizacja prac linii montażowej silnika" Raport z pracy naukowo - badawczej I.K i T.U.A i I Gliwice 1977 r.  
H.Kowalowski, F.Marecki, Z.Jurczyk, K.Szendzielorz i inni "Optymalizacja harmonogramowania produkcji wydziału Tłoczni FSM Tychy. Raport z pracy naukowo - badawczej Instytutu Automatyki Gliwice 1977 r.  
H.Kowalowski, F.Marecki, M.Torońska i inni "Koncepcja harmonogramowania produkcji Kuźni FSM Skoczów. Raport z pracy naukowo - badawczej Instytutu Automatyki, Gliwice 1977 r.
- [4] S.Krueger: Simulation, Grundlagen, Techniken, Anwendungen Wde G Berlin New York 1975.
- [5] H.Kowalowski, F.Marecki, M.Torońska, A.Staszulonek i inni "Opracowanie podstaw teoretycznych modelowania cyfrowego dla celów automatyzacji projektowania". Raport z pracy naukowo - badawczej I.K.i T.U.A.i I. cz. I Gliwice 1976 r.
- [6] L.Kondratowicz "Symulacja cyfrowa w języku CSL PWN Warszawa 1974 r.
- [7] L.Korbut, J.Finkelsztein "Programowanie dyskretne" PWN Warszawa 1974 r.
- [8] Instytut of Control Engineering Technical University of Poznań Vol. 1 Nr 1 1975.
- [9] S. Zdrzałka, Application of Game Theory to Control of a Complex of Independent Operations. System Science Wrocław T.U. Vol 1 N 2 1975.
- [10] M.D.Mésarowicz "Matematyczna teoria systemów ogólnych w pracy "Ogólna teoria systemów" red. G.J.Klira WNT Warszawa 1976 r. str. 246-262.
- [11] H.Kowalowski, F.Marecki, J.Duda Modelowanie cyfrowe dynamiki procesu przepływu materiału w piecowni zgniatacza". Prace VII KKA IX 1977 tom II str. 639 - 648.
- [12] Gorden G. "Symulacja systemów WNT Warszawa 1975.
- [13] Z.Bubnicki "Identyfikacja obiektów sterowania PWN Warszawa 1974 r.
- [14] W.Bohrzycki, B.Filipowicz i inni, "Modelowanie wybranych dyskretnych złożonych procesów przemysłowych ZN AGH Automatyka z. 8.
- [15] Akademia Nauk Ukrainской SSR Instytut Ekonomiki Promyszlennosti "Ekonomiczno - matematyczne modelowanie obiektów i procesów uprzedzenia w usłowjach ASUP. Kiew "Naukowa Dumka"1977.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ В ОПЕРАТИВНОМ УПРАВЛЕНИИ ДИСКРЕТНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ МАШИНО-СТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

## Р е з ю м е

Математические модели объектов и процессов, отображающие все аспекты и функции управления в автоматизированных системах управления (АСУ) машиностроительным производством, являются основой всяких проектируемых, внедряемых, а также уже работающих систем оперативного управления производством.

Широкая проблематика формализации и идентификации объектов и процессов в машиностроительных заводах, из-за дискретного характера производственных процессов, требует разработки многих методов решения задач управления.

В работе представляются основные методы построения математических моделей для оперативного управления. Обосновывается метод цифрового моделирования как средство решения проектной задачи оперативного управления дискретным производством.

MODELLING OF DISCRETE PROCESSES IN THE MACHINE INDUSTRY  
IN THE OPERATIVE PRODUCTION CONTROL

## S u m m a r y

The paper justifies the necessity of implementing operative production control in discrete industrial processes and discusses special aspects of modeling of those processes for control purposes. Methods of the formalization of discrete processes for operative control purposes are presented.