ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1998
Seria: AUTOMATYKA z. 125 Nr kol. 1391

Józef GRABOWSKI, Czesław SMUTNICKI
Politechnika Wrocławska
Mieczysław WODECKI
Uniwersytet Wrocławski

SYSTEM DORADCZY DLA PROBLEMU OPTYMALNEGO WYBORU ZESTAWU MASZYN W DYSKRETNYM SYSTEMIE PRODUKCYJNYM

Streszczenie. W pracy rozważa się zagadnienie kolejnościowe, w którym należy dokonać wyboru zestawu maszyn do wykonania zadania produkcyjnego w określonym terminie, aby koszt zakupu i eksploatacji maszyn był minimalny. Przedstawiono system ekspertowy, wspomagający proces podejmowania decyzji, tj. dobór optymalnej struktury wyposażenia (maszyn i urządzeń) oraz określenie kolejności wykonywanych operacji na wybranych maszynach (harmonogramowanie produkcji).

AN EXPERT SYSTEM FOR OPTIMAL CHOOSING OF A SET OF MACHINES FOR JOB-SHOP PROBLEM

Summary. This paper is devoted to a job-shop problem in which it is required that a completion time of processing of all operations is not greater than a due date. Then the problem arises to choice a set of machines that a total costs of machines is minimal. An expert system for optimal choosing of machines is also present.

1. Wstęp

W klasycznych problemach szeregowania zadań dany jest zbiór zadań (operacji), które mają być wykonane przy użyciu maszyn z ustalonego zbioru. Należy określić kolejność wykonywania operacji na tych maszynach tak, aby zminimalizować funkcję celu związaną najczęściej ściśle z terminem zakończenia wykonywania wszystkich operacji.

W pracy przedstawiamy system doradczy dla zagadnienia kolejnościowego, gdzie również określony jest zbiór operacji, które mają być wykonane na maszynach. W tym przypadku jednak należy wyznaczyć podzbiór maszyn (z pewnego obszerniejszego zbioru) oraz określić ko-

lejność wykonywania operacji na tym podzbiorze maszyn tak, aby koszty ich użycia (np. zakupu, eksploatacji, dzierżawy lub leasingu) były minimalne. Dodatkowym wymaganiem jest żądanie, aby termin zakończenia wykonywania wszystkich operacji nie przekroczył z góry ustalonego terminu. Zagadnienie to należy do klasy problemów *silnie NP - zupełnych*. Można stwierdzić, że jest ono "dualne" w stosunku do zagadnień klasycznych spotykanych do tej pory w literaturze.

W ostatnich latach nastąpił intensywny rozwój metod sztucznej inteligencji, które posiadają już ponad dwudziestoletnią historię i dzisiaj znajdują coraz szersze zastosowanie. Systemy ekspertowe stanowią jedną z nielicznych jej gałęzi, powszechnie stosowanych w przemyśle. Są to programy komputerowe służące do rozwiązywania złożonych specjalistycznych problemów, między innymi w medycynie, przemyśle i nauce. Mogą mieć i mają zastosowanie wszędzie tam, gdzie podejmowanie decyzji wymaga profesjonalnej ekspertyzy, niekoniecznie pochodzącej od człowieka. Funkcje eksperta przejmuje niezależny system, który należy odpowiednio wyposażyć w wiedzę, zasady wnioskowania oraz sprawny sposób komunikowania się z otoczeniem. Planowanie oraz sterowanie produkcją jest procesem bardzo złożonym i wymaga dużej wiedzy z dziedziny technologii, zarządzania, sterowania, ekonomi itp. Warunki ekonomiczne wymuszają racjonalność tych procesów, a co za tym idzie - konieczność ich optymalizacji. Dlatego coraz częściej w procesie tym jest wykorzystywany komputer (odpowiedni program – system ekspertowy).

Prezentowany w dalszej części pracy system można zaliczyć do grupy doradczych systemów planistycznych (Bubnicki [1], Mulawka [7]), wspomagających proces podejmowania decyzji. Proces ten polega na doborze optymalnej struktury wyposażenia (maszyn i urządzeń) oraz określeniu kolejności wykonywania operacji na wybranych maszynach (harmonogramowaniu produkcji). System obejmuje wszystkie etapy procesu optymalnego planowania produkcji dla rozpatrywanego zagadnienia. Począwszy od wprowadzania i edycji danych (zbiorów zadań i maszyn), poprzez możliwość stosowania różnych strategii przydziału zadań dla maszyn, na których będą one wykonywane, do graficznej prezentacji otrzymanych wyników.

Bazę wiedzy stanowi zestaw procedur heurystycznych służących do rozwiązywania problemu optymalnego doboru zestawu maszyn. Procedury zawierają pełny stan wiedzy na temat efektywnych metod jego rozwiązywania.

Wbudowane w system **mechanizmy wnioskowania** umożliwiają wykorzystanie różnych strategii dla efektywnej konstrukcji rozwiązania, tj. właściwego wyboru zestawu maszyn oraz

wyznaczenia (poprzez rozwiązanie zadania kolejnościowego z równoległymi maszynami) odpowiedniego harmonogramu produkcji.

Komunikacja z użytkownikiem występuje na każdym etapie działania systemu. Obejmuje ona proces wprowadzania danych (formułowanie zadania), bieżącą obserwację przebiegu działania oraz bogatą prezentację wyników.

2. Opis zagadnienia

Dokładny opis rozpatrywanego zagadnienia, podstawy teoretyczne konstrukcji algorytmów, a także algorytmy jego rozwiązywania są zamieszczone w pracy [5]. Poniżej przedstawiamy jedynie krótkie jego fragmenty.

Dany jest zbiór zadań:

$$J = \{ J_1, J_2, \ldots, J_n \}$$

oraz zbiór maszyn:

$$M = \{ M_1, M_2, \ldots, M_n \}.$$

Zadanie $J_i \in J$ składa się z ciągu operacji:

$$J_i = \langle O_{i,1}, O_{i,2}, \ldots, O_{i,n_i} \rangle,$$

które mają być wykonywane w zadanym porządku technologicznym, tzn. każda operacja $O_{i,k}$ ma być wykonywana po operacji $O_{i,k-1}$, a przed rozpoczęciem wykonywania operacji $O_{i,k+1}$, ($k=2,3, \ldots ,n_i$). Każda maszyna może w dowolnej chwili wykonywać co najwyżej jedną operację oraz realizacja operacji nie może być przerywana. Zbiór maszyn M jest podzielony na q rozłącznych podzbiorów, zawierających maszyny tego samego typu, lecz być może o różnej wydajności. Maszyny k-tego typu (tzn. ze zbioru M^k) są usytuowane w k-tym stanowisku produkcyjnym, a pewne operacje zadań, które mają być realizowane na tym stanowisku, mogą być wykonywane na jednej (dowolnej) maszynie ze zbioru M^k. Czas wykonywania danej operacji może być różny i zależy od maszyny, do której jest przydzielona.

Dla każdego zadania $J_i \in J$ określony jest ciąg v_i zawierający n_i indeksów stanowisk:

$$v_i = \langle v_1^i, v_2^i, \ldots, v_{n_i}^i \rangle,$$

co oznacza, że operacja $O_{i,k}$ ma być wykonywana na stanowisku v_k^i przy użyciu jednej z maszyn k-tego typu. Ciąg v_i nazywamy **marszrutą technologiczną przez stanowiska**.

W omawianym zagadnieniu zadanie optymalizacyjne polega na wyborze zestawu maszyn i dokonaniu takiego przydziału maszyn do wykonania poszczególnych operacji oraz ustaleniu kolejności na tych maszynach, aby zminimalizować łączny koszt użytych maszyn. Przy czym termin zakończenia realizacji wszystkich operacji nie może przekroczyć z góry określonego terminu.

Wprowadzamy oznaczenia:

h_w - koszt użycia (eksploatacji, dzierżawy lub zakupu) maszyny $M_w \in M$,

p_{jw} - czas wykonywania operacji O_j przy użyciu maszyny $M_w \in M$,

C^* - żądany termin wykonania wszystkich zadań (operacji),

x_{jw} - zmienna decyzyjna określana następująco:

$$x_{jw} = \begin{cases} 1, & \text{Jeżeli do wykonania operacji } O_j \text{ jest przydzielona maszyna } M_w, \\ 0, & \text{w przeciwnym przypadku.} \end{cases}$$

$\bar{x}$ - wektor zmiennych decyzyjnych x_{jw}.

Stosując powyższe oznaczenia, możemy zadanie optymalizacji rozpatrywanego zagadnienia kolejnościowego przedstawić w następującej postaci:

znaleźć zmienne decyzyjne x_{jw} (dopuszczalne), minimalizujące funkcję celu:

$$f(\bar{x}) = \sum_{M_w \in M} h_w \cdot \min\left(1, \sum_{j \in N} x_{jw}\right),$$

przy czym czas wykonywania zadań nie przekracza C^*.

Powyższe zagadnienie jest **zadaniem programowania całkowitoliczbowego mieszanego** i należy do klasy problemów *silnie NP – zupełnych* ([5] i [8]).

Dla dowolnego dopuszczalnego rozwiązania $\bar{x}$ (przydziału operacji do maszyn, na których będą one wykonywane) rozpatrywane zagadnienie sprowadza się do problemu kolejnościowego z równoległymi maszynami, tj. zagadnienia kolejnościowego gniazdowego z maszynami równoległymi o różnej wydajności (zobacz [2], [3] i [4]), należącego do klasy problemów *silnie NP- zupełnych*.

3. Opis algorytmu

Z rozważań przedstawionych w poprzednim rozdziale wynika, że ogólna strategia algorytmu rozwiązania rozpatrywanego zagadnienia będzie polegała na:

a) generowaniu ciągu podzbiorów zbioru maszyn oraz

b) dla każdego podzbioru będziemy wyznaczać optymalną kolejność wykonywania operacji na maszynach.

Ze względu na złożoność obliczeniową generowanie podzbiorów oraz określanie kolejności wykonywania operacji na wybranych maszynach będą realizowane przy użyciu algorytmów heurystycznych.

Algorytmy optymalne dla zagadnienia kolejnościowego z równoległymi maszynami, które należy rozwiązać w punkcie b) powyższego opisu, są przedstawione w pracach [3], [4]. Zamieszczone tam wyniki obliczeniowe wskazują, że w rozsądnym czasie można rozwiązywać jedynie zagadnienia o niewielkich rozmiarach. Stąd też zachodzi potrzeba konstrukcji szybkich algorytmów heurystycznych, dających dobre rozwiązanie przybliżone. W pracy [5] przedstawiono sześć takich algorytmów. Stosowane w nich strategie są oparte na wspólnej zasadzie konstrukcji dopuszczalnego rozwiązania częściowego, tj. przydziału operacji do maszyn oraz ich uszeregowaniu. Ponieważ algorytmy te muszą jednocześnie wyznaczyć dwa elementy:

- **przydział operacji do maszyn oraz**
- **uszeregowanie operacji,**

dlatego zrealizowano dwie alternatywne metody konstrukcji rozwiązania:

(i) Ze zbioru maszyn wybierana jest według pewnej reguły priorytetu jedna maszyna, a następnie spośród operacji kandydujących do wykonywania (i szeregowania) na tej maszynie jest wybierana operacja wg innej reguły priorytetu; wybrana operacja zostaje przyporządkowana do wybranej wcześniej maszyny oraz na niej uszeregowana;

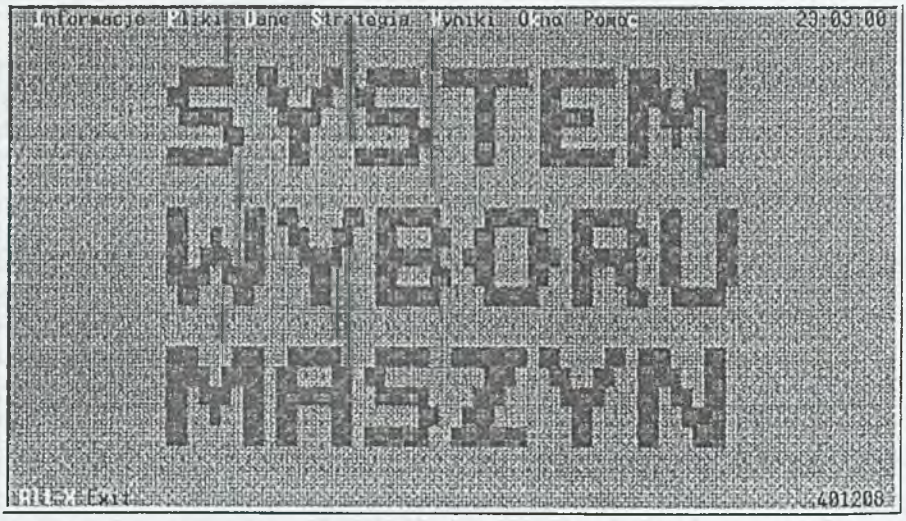
(ii) Ze zbioru operacji kandydujących do wykonywania (tj. określenia przydziału i szeregowania) wybrana jest według pewnej reguły priorytetu jedna operacja, a następnie spośród maszyn, na których ta operacja może być wykonywana, jest wybierana wg innej reguły priorytetu pewna maszyna; wybrana wcześniej operacja zostaje przyporządkowana do wybranej maszyny oraz na niej uszeregowana.

Algorytmy przybliżone, oparte na wyżej przedstawionej idei, są algorytmami typu konstrukcyjnego. Oznacza to, że na bazie pewnych reguł budują harmonogram (tzn. przydział $\bar{x}$ operacji do maszyn oraz kolejność wykonywania operacji) i po jego otrzymaniu kończą swoje działanie. Złożoność obliczeniowa każdego z tych algorytmów wynosi $O(n^2)$.

4. System ekspertowy dla problemu optymalnego wyboru maszyn

W rozdziale tym przedstawiamy krótki opis systemu ekspertowego dla problemu optymalnego doboru zestawu maszyn do wykonania zadania produkcyjnego, w określonym z góry terminie, aby koszt ich użycia był minimalny. Dokładny jego opis jest zamieszczony w pracy [6]. System ten można zaliczyć do grupy planistycznych systemów doradczych, wspomagających proces podejmowania decyzji. Wynikiem jego działania jest właściwy dobór zestawu maszyn oraz suboptymalny, dla tego zestawu, harmonogram produkcji (tj. kolejności wykonywania operacji na wybranych maszynach). Obejmuje on wszystkie etapy procesu optymalnego planowania produkcji. Począwszy od wprowadzania i edycji danych (zbiorów zadań oraz maszyn), poprzez możliwość stosowania różnych strategii przydziału zadań do maszyn, na których będą one wykonywane, aż do graficznej prezentacji otrzymanych wyników. Prezentację systemu ilustrujemy schematami poszczególnych opcji oraz przykładami ekranów, aby ułatwić zapoznanie się z systemem. Działanie wielu klawiszy funkcyjnych oraz ich kombinacji jest podobne jak w zintegrowanym środowisku języka Borland Pascal. Może on być uruchomiony na dowolnym mikrokomputerze zgodnym z IBM PC pod systemem operacyjnego MS-DOS® (3.0 lub wyższym).

Po uruchomieniu systemu na ekranie pojawia się *główne okno*, które jest przedstawione na rysunku1.



Rys. 1. Opcje systemu
Fig. 1. System options

W górnym wierszu ekranu znajduje się *główne menu*, zawierające podstawowe opcje systemu:

- **Informacje**
- **Pliki**
- **Dane**
- **Strategia**
- **Wyniki**
- **Okna**
- **Pomoc,**

które pokrótce zostaną omówione.

4.1. Opcja *Informacje*

Zawiera ona ogólne informacje na temat omawianego systemu oraz podstawowe ograniczenia dotyczące jego działania (wymagania sprzętowe, ograniczenia programowe, itp.).

4.2. Opcja *Pliki*

Polecenia opcji *Pliki* umożliwiają wykonywanie różnych operacji na zbiorach z danymi, tj. zbiorach zawierających informacje o zadaniach oraz maszynach. Pozwalają na zakładanie nowego lub wczytanie już istniejącego pliku do aktywnego okienka, jego edycję oraz zapisanie. Otwierając kolejne okna można jednocześnie pracować z wieloma plikami.

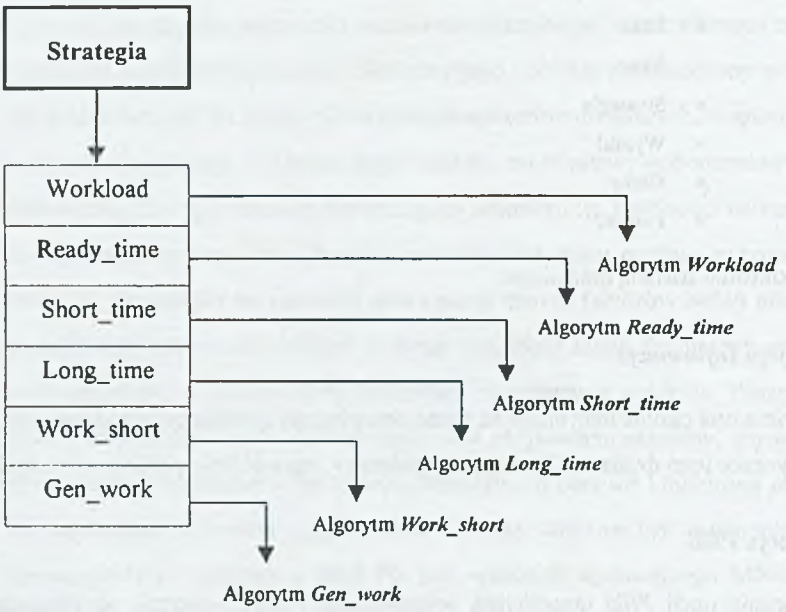
4.3. Opcja *Dane*

Opcja *Dane* służy do wygodnego przeglądania i edycji wcześniej wprowadzonych danych, dotyczących różnych przykładów konkretnych problemów oraz sprawdzania ich poprawności.

4.4. Opcja *Strategia*

Opcja ta służy do wyboru strategii stosowanej przy rozwiązywaniu zadania typu „open shop" (przydziału zadań do maszyn i kolejności ich wykonywania), będącego fragmentem problemu wyboru zestawu maszyn. Opis strategii (algorytmów heurystycznych) stosowanych do rozwiązywania zagadnienia open shop jest zamieszczony w pracy [5]. Na rysunku 2 przedstawiona jest struktura opcji *Strategia*. Zainicjowanie jednego z poleceń tej opcji powoduje rozpoczęcie procesu obliczeń, tj. wyznaczania suboptymalnego rozwiązania, czyli właściwego podzbioru maszyn oraz harmonogramu produkcji. Podczas wykonywania obliczeń wyświetlane

są komunikaty informujące o bieżącym rozwiązaniu. Istnieje także możliwość przerwania obliczeń.



Rys. 2. Polecenia opcji *Strategia*
Fig. 2. *Strategia* menu item

4.5. Opcja *Wyniki*

Opcja *Wyniki* pozwala na wyświetlanie na ekranie raportów w postaci tabel oraz diagramów Gantta dla wyznaczonego zestawu maszyn oraz harmonogramu produkcji. Diagramy Gantta umożliwiają między innymi wizualizację terminów rozpoczęcia i zakończenia wykonywania poszczególnych zadań przez maszyny. Natomiast raporty zawierają pełne informacje, dotyczące wyznaczonych harmonogramów produkcji.

4.6. Opcja *Okno*

Opcja *Okno* zawiera polecenia dotyczące wyświetlanych w trakcie działania systemu okienek. Pozwala ona na ich przesuwanie, zmiany rozmiarów (powiększanie lub zmniejszanie).

4.7. Opcja *Pomoc*

Opcja *Pomoc* zawiera polecenia, za pomocą których wyświetla się na ekranie okienka z informacjami pomocniczymi. Jej uruchomienie pozwala na szybkie uzyskanie podstawowych

informacji związanych z działaniem systemu. W szczególności dotyczą one zakładania i obsługi plików z danymi.

LITERATURA

1. Bubnicki Z.: Wstęp do systemów ekspertowych. PWN, Warszawa 1990.
2. Grabowski J.: Uogólnione zagadnienia optymalizacji kolejności operacji w dyskretnych systemach produkcyjnych. Monografie ICT Politechniki Wrocławskiej, Wrocław (1979).
3. Grabowski J., Nowicki E.: Zagadnienia kolejnościowe gniazdowe z maszynami równoległymi. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej, "Problematyka Eksploatacji Maszyn i Urządzeń w Ujęciu Systemowym., Kraków (1986), s. 70-75.
4. Grabowski J., Nowicki E., Smutnicki C., Zdrzałka S.: Teoria i algorytmy rozwiązywania zadań optymalizacji dyskretnej dla zagadnień kolejnościowych. Raport z serii SPRAWOZDANIA ICT, Nr 8/85 1985.
5. Grabowski J., Smutnicki C, Wodecki M.: Zagadnienie Optymalnego Wyboru Zestawu Maszyn w Dyskretnym Procesie Produkcyjnym (Podstawy Teoretyczne). Raport z serii SPRAWOZDANIA ICT, Nr 38/97 (1997).
6. Grabowski J., Smutnicki C, Wodecki M.: Zagadnienie Optymalnego Wyboru Zestawu Maszyn w Dyskretnym Procesie Produkcyjnym (System Wspomagania Wyboru Zestawu Maszyn). Raport z serii SPRAWOZDANIA ICT, Nr 39/97 (1997).
7. Mulawka J.J.: Sytemy ekspertowe. WNT, Warszawa 1996.
8. Rinnooy Kan A.H.G.: Machine Scheduling Problems: Classification, Complexity and Computations. Niihoff, The Hague 1976.

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Tadeusz Sawik

Abstract

This paper deals with the job-shop problem with parallel machines. The problem can be formulated as follows. There is the set of jobs $J_1, J_2, \ldots, J_n$ which should be carried out by using the set of various type machines $M_1, M_2, \ldots, M_m$ and q is the number of these types. Each job consist of a sequence of operations $J_i = \langle O_{i1}, O_{i2}, \ldots, O_{in} \rangle$. We shall assume that processing times of operations are fixed on different machines. The problem arises to determine the allocation of machines to the individual operation and to determine a sequence of operations on machines, taking into account technological requirements, that the total costs of allocated machines are minimal, subject to the completion time of processing of all operations is not greater than a given due date C^*. The expert system for solving this problem is given.