ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2002
Seria: AUTOMATYKA z. 135 Nr kol. 1555

Małgorzata STERNA*
Politechnika Poznańska, Instytut Informatyki

MODELOWANIE RZECZYWISTEGO ELASTYCZNEGO SYSTEMU PRODUKCYJNEGO W ŚRODOWISKU MASZYN DEDYKOWANYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono model formalny rzeczywistego elastycznego systemu produkcyjnego (ESP) pracującego na Politechnice Poznańskiej zawierającego trzy sterowane numerycznie maszyny, magazyny ogólnego przeznaczenia i robota o liniowej marszrucie. ESP zamodelowano jako rozszerzony mieszany system obsługi z uwzględnieniem wszystkich istotnych cech środowiska wytwarzania.

MODELLING THE REAL FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEM IN THE SHOP ENVIRONMENT

Summary. The paper presents a formal model of a real flexible manufacturing system (FMS) located at Poznań University of Technology containing three CNC machines, general purpose storages and a robot with a linear routing. The system described has been modelled in an extended mixed-shop environment, taking into account all important features of the production environment.

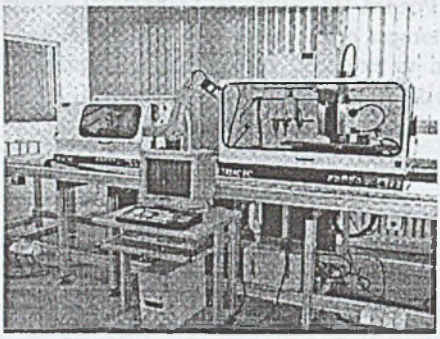
1. Wprowadzenie

Elastyczne systemy produkcyjne stanowią odpowiedź przemysłu na konieczność dynamicznego dostosowania prowadzonej produkcji do szybko zmieniających się wymagań współczesnego rynku. Idea takich systemów pozwala bowiem na maksymalne skracanie cyklu przygotowania produkcji nowego asortymentu oraz przystosowanie do wytwarzania krótkich serii wyrobów. Przedstawione podejście umożliwia szybkie reagowanie na zmienność popytu i gwarantuje wysoką elastyczność produkcji. Problemy projektowania i eksploatacji elastycznych systemów produkcyjnych stanowią źródło licznych zagadnień badawczych z zakresu badań operacyjnych [np. 2, 11, 12, 16]. Jednym z ważnych elementów

* Autorka jest laureatką konkursu Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej na stypendium dla młodych naukowców.

zarządzania ESP jest problematyka sterowania systemem [9] dotycząca ustalenia kolejności realizacji produkcji poszczególnych detali przez maszyny. Problemy pojawiające się w tym zakresie rozwiązywane są głównie na gruncie teorii szeregowania zadań [np. 2, 6, 11].

Przedmiotem badań jest elastyczny system produkcyjny (rys. 1) znajdujący się w Zakładzie Informatyzacji Systemów Produkcyjnych Politechniki Poznańskiej, składający się z dwóch obrabiarek sterowanych numerycznie, tokarki i centrum frezarsko-wiertniczego oraz maszyny pomiarowej. Ponadto system zawiera trzy zewnętrzne magazyny umożliwiające przechowywanie materiału, półfabrykatów i produktów końcowych, które transportowane są przez robota o liniowej marszrucie. Produkcja realizowana jest w systemie jednozmianowym w trybie półautomatycznym, wymaga bowiem interwencji operatora w celu wymiany mocowań detali na maszynach. Obecnie wspomniany ESP wykorzystuje się głównie do celów dydaktycznych i badawczych, nie wyklucza się jednakże uruchomienia produkcji komercyjnej, polegającej na wytwarzaniu krótkich serii produktów, takich jak przykładowo medale okolicznościowe czy części maszyn. Przedstawiony system stanowi atrakcyjny przedmiot badań, ponieważ umożliwia praktyczną weryfikację zaproponowanych rozwiązań, które mogą być przydatne w małych i średnich przedsiębiorstwach. Z powodów ekonomicznych weryfikacja taka nie jest możliwa w systemach komercyjnych.



Rys. 1. Elastyczny system produkcyjny zlokalizowany na Politechnice Poznańskiej
Fig. 1. The flexible manufacturing system located at Poznań University of Technology

Celem długoterminowych badań jest optymalizacja sposobu realizacji planów produkcji w przedstawionym elastycznym systemie produkcyjnym, który stanowi interesujące środowisko wytwarzania z punktu widzenia teorii szeregowania zadań. Wnikliwa analiza ESP umożliwiła sformułowanie modelu formalnego systemu, który jest niezbędny w procesie projektowania wydajnych algorytmów optymalizacji wykonania planów produkcyjnych.

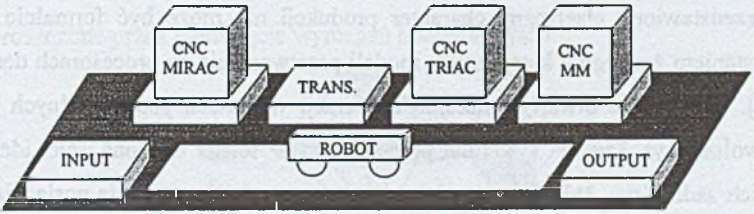
Ze względu na złożony charakter tego problemu, efektywne uzyskanie rozwiązań dopuszczalnych gwarantują jedynie metody heurystyczne.

W rozdziale 2 przedstawiono krótką charakterystykę analizowanego systemu. Natomiast w rozdziale 3 omówiono podstawowe modele przetwarzania na procesorach dedykowanych wykorzystane w konstrukcji modelu formalnego ESP, omówionego w rozdziale 4. Rozdział 5 prezentuje koncepcję metody optymalizacji procesu realizacji planu produkcji przy wykorzystaniu zaproponowanego modelu. Artykuł zamyka podsumowanie w rozdziale 6.

2. Opis środowiska produkcyjnego

Elastyczny system produkcyjny będący przedmiotem analizy (rys. 2) składa się z trzech maszyn sterowanych numerycznie: dwóch obrabiarek firmy Denford, tokarki (CNC Mirac) i frezarsko-wiertarskiego centrum obróbkowego (CNC Triac) oraz maszyny pomiarowej (CNC MM) sprawdzającej jakość produktu na zakończenie procesu technologicznego. Obie obrabiarki działające w ESP wyposażone są w wewnętrzne magazyny narzędzi, umożliwiające ich automatyczną wymianę, nie posiadają natomiast wewnętrznego bufora. W przypadku maszyny pomiarowej możliwe jest zmagazynowanie maksymalnie pięciu części w wewnętrznym buforze.

Materiał poddawany obróbce, półfabrykaty i produkty końcowe przechowywane są na 3 paletach, których pojemność ograniczona jest do 9 elementów. Magazyny znajdujące się na początku i końcu linii produkcyjnej obsługiwane są przez operatora systemu, natomiast magazyn pośredni, umiejscowiony między obrabiarkami, wyłącznie przez robota przemysłowego Mitsubishi RV-M1. Robot ten, pozbawiony wewnętrznego bufora, przenosi wyroby pomiędzy poszczególnymi stanowiskami poruszając się po torze liniowym.



Rys. 2. Schemat elastycznego systemu produkcyjnego

Fig. 2. The scheme of the flexible manufacturing system

Przedstawiony system realizuje zamówienia na krótkie serie identycznych produktów. Poszczególne serie różnią się terminem złożenia zamówienia i wymaganym terminem jego realizacji, priorytetem, jaki posiadają dla właściciela ESP oraz procesem technologicznym, według którego produkcja powinna zostać wykonana. Proces ten przedstawiony jest jako sekwencja operacji, które muszą być zrealizowane przez poszczególne maszyny z uwzględnieniem czasu obróbki i narzędzi do niej koniecznych. Niezwykle istotną cechą niektórych procesów technologicznych jest konieczność realizacji wybranych operacji przez zewnętrznego kooperanta. Wymaga to przerwania wykonania zadania przez ESP i jego wznowienie po ponownym dostarczeniu części do systemu.

W celu wypełnienia założonego planu produkcyjnego, konieczne jest ustalenie sekwencji wszystkich operacji składających się na zgłoszone zamówienia, na poszczególnych maszynach. Zaproponowane uszeregowanie musi dodatkowo uwzględniać podział czasu pracy na zmiany.

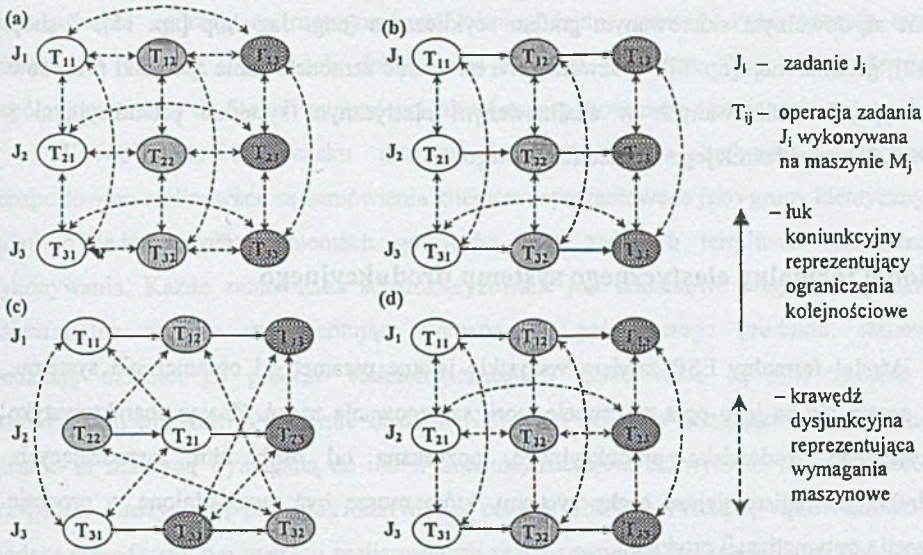
Wysoka specjalizacja maszyn pracujących w opisanym elastycznym systemie produkcyjnym powoduje, iż z punktu widzenia teorii szeregowania zadań [2, 6, 11] jest on modelowany jako środowisko maszyn dedykowanych. Natomiast specyfika procesów technologicznych realizowanych w ESP pozwala dodatkowo na jego opis jako rozszerzonego mieszanego systemu obsługi [17, 18], czyli systemu ogólnego z sekcjami otwartymi.

3. Rozszerzony mieszany system obsługi

Procesy technologiczne realizowane przez analizowany ESP charakteryzują się wysoką elastycznością. Kolejność wykonywanych operacji nie jest bowiem zawsze ściśle określona. Przykładowo, produkując medal okolicznościowy można w dowolnej kolejności wykonać jego awers i rewers ściśle przestrzegając sekwencji obróbki każdej ze stron.

Przedstawiony elastyczny charakter produkcji nie może być formalnie opisany z wykorzystaniem żadnego z klasycznych modeli przetwarzania na procesorach dedykowanych [2, 6, 11]. W systemie otwartym kolejność operacji w ramach poszczególnych zadań może być dowolna (rys. 3a), w systemie przepływowym ściśle ustalona, ale identyczna dla wszystkich zadań (rys. 3b). W systemie ogólnym poszczególne zadania posiadają wprawdzie różną sekwencję wykonania operacji na maszynach, ale jest ona ściśle określona (rys. 3c) i nie gwarantuje wspomnianej elastyczności produkcji. Bliższym specyfice analizowanego

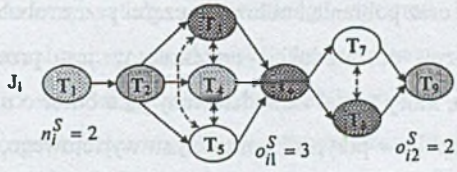
systemu wydaje się system mieszany [por. 10, 14], w którym część zadań realizowana jest jak w systemie otwartym, a część jak w systemie ogólnym lub przepływowym (rys. 3d).



Rys. 3. System otwarty (a), przepływowy (b), ogólny (c) i mieszany (d) na przykładzie 3 zadań i 3 maszyn

Fig. 3. Open- (a), flow- (b), job- (c) and mixed-shop (d) system (an example for 3 jobs and 3 machines)

W celu wiernego zamodelowania badanego systemu zaproponowano rozszerzenie modeli klasycznych [17, 18] polegające na dodaniu elastyczności na poziomie zadania, a nie całego zbioru zdań, jak występuje w modelu mieszanym. Zgodnie z tą koncepcją proces technologiczny opisany jest przez zbiór operacji realizowanych na maszynach dedykowanych, powiązanych ograniczeniami kolejnościowymi w postaci specyficznego acyklicznego grafu skierowanego. Do sekwencji operacji występującej w modelu ogólnym dodano sekcje otwarte, w ramach których kolejność operacji może być dowolna. W rozszerzonym modelu mieszanym zadanie J_i może więc zawierać pewną liczbę sekcji otwartych n_i^S, z których k-ta sekcja obejmuje o_{ik}^S operacji (por. rys. 4, oznaczenia operacji zostały uproszczone przez pominięcie wymagań maszynowych).



Rys. 4. Struktura zadania w rozszerzonym mieszanym systemie obsługi

Fig. 4. Job structure in an extended mixed-shop system

Przedstawiona koncepcja rozszerzonego mieszanego systemu obsługi stanowi podklasę najogólniejszego modelu, w którym ograniczenia kolejnościowe w ramach zadań opisane są dowolnym skierowanym grafem acyklicznym (ang. dag-shop [np. 15], G-shop [np. 13], general-shop [np. 6]). Pozwoliła ona na wierne zamodelowanie specyfiki procesów produkcyjnych realizowanych w analizowanym elastycznym systemie produkcyjnym i stanowi główny składnik jego modelu formalnego.

4. Model formalny elastycznego systemu produkcyjnego

Model formalny ESP zawiera wszystkie istotne parametry i ograniczenia systemu, które pozwalają na jego opis na gruncie teorii szeregowania zadań. Znając charakterystykę rzeczywistego środowiska produkcyjnego, pozyskaną od osób nim zarządzających, wyodrębniono najistotniejsze cechy systemu, które muszą być uwzględnione w procesie realizacji i optymalizacji produkcji.

System zawiera 3 maszyny dedykowane M_1, M_2, M_3. Ponieważ każda z nich wyposażona jest w wewnętrzny magazyn narzędzi, których wymiana związana jest ze znikomym kosztem czasowym, czasy przezbrojenia mogą być pominięte. Jednakże, w przypadku maszyn M_1, M_2 (modelujących obrabiarki) może zaistnieć konieczność wymiany uchwytów, w których mocowane są wyroby. Czynność ta realizowana jest przez operatora i wymaga dodatkowo zatrzymania systemu transportowego. W związku z tym dla każdej operacji realizowanej na maszynach M_1, M_2 zdefiniowany został rodzaj uchwytu, natomiast opis maszyn uzupełniono o tabelę czasów ich wymiany. Charakterystyka maszyny pomiarowej M_3 obejmuje dodatkowo pojemność skończonego wewnętrznego bufora. Poszczególne maszyny realizują operacje po dostarczeniu części przez robota, bez przerwań, w sposób ciągły. Robot, stanowiący istotny element modelu, transportuje części między magazynami a stanowiskami, umożliwiając realizację operacji na maszynach. Zdefiniowane zostały czasy transportu oraz pobrania i odłożenia części przez robota.

Materiał konieczny do produkcji umieszczany jest przez operatora systemu w magazynie wejściowym, który został zamodelowany jako bufor o nieskończonej pojemności. Podobna sytuacja występuje w przypadku magazynu wyjściowego, do którego kierowane są gotowe wyroby. Magazyn pośredni obsługiwany jest wyłącznie przez robota, który odkłada w nim detale znajdujące się w trakcie obróbki pomiędzy operacjami wykonywanymi na

maszynach M_1, M_2. Z tego powodu, w modelu formalnym odpowiada mu bufor o skończonej pojemności. Jak wspomniano, produkcja realizowana jest w sposób ciągły z podziałem uszeregowania operacji na maszynach na ośmiogodzinne zmiany. Przekroczenie czasu zmiany jest możliwe (np. w celu dokończenia obróbki), ale wiąże się z wprowadzeniem współczynnika kary do funkcji estymującej jakość zaproponowanego rozwiązania.

W opisanym środowisku maszyn dedykowanych z buforem i systemem transportowym realizowane są zamówienia klientów reprezentowane jako grupy identycznych zadań o jednakowych momentach gotowości oraz żądanych terminach zakończenia wykonywania. Każde zamówienie scharakteryzowane jest dodatkowo wagą (priorytetem). Poszczególne zadania, reprezentujące wytworzenie pojedynczego produktu, stanowią realizację określonego procesu technologicznego i modelowane są jako zadania w rozszerzonym mieszanym systemie obsługi. Natomiast operacje składające się na zadanie opisane są maszyną wymaganą do ich wykonania, rodzajem uchwytu na tej maszynie (w przypadku maszyn M_1, M_2) oraz oczywiście, czasem obróbki. Ponadto, wprowadzono do modelu specyficzny typ operacji realizowanych przez zewnętrznego kooperanta. Wykonanie takiej operacji wymaga przewiezienia wyrobu do magazynu wyjściowego, zgrupowania wszystkich detali z danego zamówienia i skierowania ich do obróbki przez kooperanta. Następnie półfabrykaty wracają do systemu przez bufor wejściowy i możliwe staje się wykonanie kolejnych operacji należących do rozważanego procesu technologicznego.

Realizacja podanego zbioru zamówień przez ESP wymaga konstrukcji uszeregowania dopuszczalnego, czyli ustalenia sekwencji wszystkich operacji, składających się na zgłoszone zamówienia, na poszczególnych maszynach z uwzględnieniem transportu detali przez robota i innych ograniczeń systemu.

5. Optymalizacja realizacji planu produkcji

Ze względu na złożoną naturę analizowanego systemu i wynikający z niej skomplikowany model formalny tego środowiska produkcyjnego już samo znalezienie rozwiązania dopuszczalnego stanowi problem trudny obliczeniowo [por. 2, 6, 7, 11]. Tym bardziej trudne obliczeniowo będzie zagadnienie optymalizacji otrzymanych rozwiązań. W przypadku rzeczywistych systemów, których przykładem jest analizowany ESP, pojawiają się dodatkowo problemy z jednoznaczną oceną jakości uzyskanych uszeregowań. Właściciel

systemu ocenia bowiem otrzymane plany realizacji produkcji z różnych punktów widzenia i nie jest zainteresowany optymalizacją jednego wybranego kryterium, np. długości uszeregowania czy maksymalnego opóźnienia.

Dotychczasowe prace nad metodami wspomagającymi proces realizacji produkcji doprowadziły do konstrukcji algorytmu listowego [8], który buduje rozwiązanie dopuszczalne z uwzględnieniem wszystkich parametrów i ograniczeń modelu formalnego. Zaproponowano również trzy metody transformacji parametrów zamówień do poziomu pojedynczych zadań, co umożliwia efektywną konstrukcję uszeregowania. Transformacje te wyznaczają zmodyfikowane momenty przybycia i żądane terminy zakończenia wykonywania operacji na podstawie znajomości struktury procesu technologicznego z uwzględnieniem operacji realizowanych przez kooperanta. W efekcie wspomnianej transformacji zapobiega się zgrupowaniu przez algorytm szeregujący wszystkich operacji związanych z danym zamówieniem tuż przed żądanym terminem zakończenia wykonywania. Ponadto wyznaczone zależności umożliwiają oszacowanie czasu realizacji pojedynczego zamówienia.

Wyznaczenie rozwiązania dopuszczalnego przez heurystyczny algorytm listowy stanowi punkt wyjścia dla metod metaheurystycznych przeszukiwania tabu i symulowanego wyżarzania, które optymalizują wstępne uszeregowanie na drodze zamiany kolejności realizacji operacji na maszynach. Ocena jakości rozwiązań odbywać się będzie na podstawie zagregowanych wartości różnych kryteriów [2, 6, 11] ze szczególnym uwzględnieniem kryterium pracy spóźnionej [1, 4, 5, 17, 18] umożliwiającego minimalizację spóźnionych części zamówień. Przedstawione metody optymalizacji produkcji znajdują się obecnie w fazie implementacji (rozbudowa systemu o maszynę pomiarową spowodowała bowiem konieczność zmodyfikowania wcześniej rozwijanego podejścia [3, 17, 18] i powtórzenia etapu projektowania i implementacji).

6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono model formalny rzeczywistego elastycznego systemu produkcyjnego zlokalizowanego na Politechnice Poznańskiej, stanowiący podstawę wszelkich prac nad konstrukcją metod wspomagających zarządzanie i sterowanie tym systemem. Ukazano proces modelowania środowiska produkcyjnego obejmujący gromadzenie danych i ich formalizację na gruncie teorii szeregowania zadań. Przedstawiono

ideę rozszerzonego mieszanego systemu obsługi, który pozwala na wierne odwzorowanie specyfiki procesów technologicznych realizowanych w ESP. Zaproponowano koncepcję metod metaheurystycznych umożliwiających optymalizację sposobu realizacji zbioru zamówień w systemie, stanowiącą przedmiot dalszych intensywnych badań.

LITERATURA

1. Błażewicz J.: Scheduling preemptible tasks on parallel processors with information loss, Recherche Technique et Science Informatiques, vol. 3/6, 1984, pp. 415-420.
2. Błażewicz J., Ecker K., Pesch E., Schmidt G., Węglarz J.: Scheduling Computer and Manufacturing Processes, Springer, 2nd edition, Berlin, Heidelberg, New York 2001.
3. Błażewicz J., Pawlak G., Sterna M., Walter B., Zawirski M.: A heuristic algorithm for schedule optimization in FMS environment, Foundations of Computing and Decision Sciences, vol. 24/4, 1999, s. 189-207.
4. Błażewicz J., Pesch E., Sterna M., Werner F.: Total late work criteria for shop scheduling problems, in: Inderfurth K., Schwödiauer G., Domschke W., Juhnke F., Kleinschmidt P., Wäscher G. (eds): Operations Research Proceedings 1999, Springer, Heidelberg 2000, s. 354-359.
5. Błażewicz J., Pesch E., Sterna M., Werner F.: Shop scheduling problems with late work criteria, Preprint Nr. 35, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg 2000.
6. Brucker P., Scheduling Algorithms, Springer, 2nd edition, Berlin, Heidelberg, New York 1998.
7. Garey M.R., Johnson D.S.: Computers and Intractability, W.H. Freeman and Co., San Francisco 1979.
8. Haupt R.: A survey of priority rule-based scheduling, OR Spectrum, vol. 11, 1989, s. 3-16.
9. Józefowska J.: Elastyczne systemy produkcyjne, Logistyka, vol. 3, 1994, pp. 16-19.
10. Masuda T., Ishii H., Nishida T.: The mixed shop scheduling problem, Discrete Applied Mathematics, vol. 11, 1985, s. 175-186.
11. Pinedo M., Chao X.: Operation Scheduling with Applications in Manufacturing and Services, Irwin/McGraw-Hill 1999.
12. Sawik T.: Production Planning and Scheduling in Flexible Assembly Systems, Springer, Heidelberg 1999.
13. Sevastjanov S.V.: On geometric methods in scheduling theory: a survey, Discrete Applied Mathematics, vol. 55, 1994, s. 59-82.
14. Shaklevich N.V., Sotskov Y.N., Werner F.: Complexity of mixed-shop scheduling problems: a survey, European Journal of Operational Research, vol. 120, 2000, s. 343-351.

15. Shmoys D.B., Stein C., Wein J.: Improved approximation algorithms for shop scheduling problems, SIAM Journal of Computing, vol. 23, 1994, pp. 617-632.
16. Stecke K.E., Suri R. (eds): Flexible manufacturing systems: operations research models and applications, Annals of Operations Research, vol. 3, 1985.
17. Sterna M.: Problems and Algorithms in Non-Classical Shop Systems, Ph.D. Thesis, Scientific Publishers OWN, Poznań, 2000.
18. Sterna M.: Problemy szeregowania zadań w nieklasycznych systemach obsługi, Pro Dialog, vol. 13, 2001, pp. 57-73.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Banaszak

Abstract

The research concerns modelling a production process performed in a real flexible manufacturing system (FMS) located at the Division of Industrial Information Systems of Poznań University of Technology. FMS, used for educational as well as commercial purposes, consists of two CNC machines, i.e. a lathe and milling machine, without internal buffers but equipped with tool magazines. Moreover at the end of the production line, the CNC measurement machine is located containing a limited internal buffer. Moreover, FMS contains three general purpose storages of the limited capacity and a transportation system in the form of one robot with a linear routing. The system realises orders for batches of identical parts according to predefined technological routes. Particular batches ordered by customers differ in their delivery times, required due dates and priorities. The technological routes are defined as a partially ordered set of operations performed by dedicated machines.

The system described has been modelled in an extended mixed-shop environment, where particular jobs are chains of tasks (performed in the job-shop manner) with optional open-shop sections (containing a subset of tasks executed in an arbitrary order). The formal model of the real FMS, which has been proposed, takes into account all important features of the system such as, e.g., a limited store capacity, a participation of an external co-operator in technological processes or running a production in one-shift manner.

The FMS model presented makes it possible to construct, within the further research, scheduling tools for supporting the process of a production plan execution. The meta-heuristic approaches (i.e. tabu search and simulated annealing ones) will construct an assignment of tasks to machines in order to efficiently realise a set of orders submitted to FMS, taking into account all its important features and constraints included in the model.