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

Jerzy CYKLIS, Jerzy ZAJĄC
Politechnika Krakowska

ZŁOŻONE SYSTEMY WYTWARZANIA

Streszczenie. Zastosowanie idei złożoności jest bardzo obiecujące w nowoczesnej nauce. Choć jest to bardzo szeroko pojęta idea, to w referacie została ograniczona do efektu współpracy niezależnych obiektów. Złożony system wytwarzania (ang. CMS) jest systemem sterowanym przez wymieniony wyżej efekt. W pracy opisano przykłady CMS wraz z propozycją klasyfikacji takich systemów.

COMPLEX MANUFACTURING SYSTEMS

Summary. Applying the idea of complexity is very promising in modern science. However the idea is a very broad one, in the paper it is limited to the effect of collaboration of independent objects. Complex Manufacturing System (CMS) is one, which is controlled by the effect mentioned above. Some examples of CMS are described in the paper. The classification of CMS is also proposed.

1. Wprowadzenie

W ostatnim dziesięcioleciu nastąpił burzliwy rozwój idei dotyczących modelowania, organizacji i sterowania systemów wytwarzania. Korzystają one z różnych zasad działania i analogii do systemów występujących w przyrodzie. Często mówi się o inteligentnych systemach wytwarzania. Celem referatu jest wykazanie, że idee te mogą być bezpośrednio wyprowadzone z pojęcia *złożoności*. Przykłady, z konieczności ograniczenia objętości tekstu wybrane i nieliczne, mają służyć uzasadnieniu przyjętej tezy. Przy opisie wybranych systemów pominięto szczegóły, które nie są istotne z punktu widzenia tak postawionego problemu. W pracy podjęto również próbę zgrubnej klasyfikacji złożonych systemów wytwarzania, ze wskazaniem ewentualnego kierunku ich dalszego rozwoju.

Chaos i złożoność to pojęcia ściśle ze sobą związane i równocześnie jedne z najbardziej interesujących we współczesnej nauce. Ich badanie doprowadziło do

fundamentalnych odkryć w dziedzinie biologii, geologii, meteorologii, astronomii, a jest także wykorzystywane w interpretacji zachowań socjologicznych i zjawisk ekonomicznych. Niektóre procesy technologiczne mogą również wykazywać cechy chaotyczne. W analizie możliwości rozwoju sterowania systemami wytwarzania korzystano raczej z analogii z organizmami żywymi, w niewielkim stopniu sięgając wprost do pojęcia złożoności [7, 10]. Zachowanie organizmów żywych, z uwzględnieniem ich współdziałania, jest wynikiem ewolucji i może być interpretowane jako pewien szczególny przykład ogólnej zasady złożoności, słusznej również tam, gdzie życie nie może powstać. Warto by więc spojrzeć na problem sterowania systemami wytwarzania z tego ogólnego punktu widzenia, jakim jest pojęcie złożoności. Działania w tym kierunku podejmowane były już wcześniej np. w [4, 6].

Złożoność może być wynikiem specyficznego nieliniowego algorytmu działania jednego obiektu (np. fraktale, zbiór Mandelbrota) albo współpracy wielu autonomicznie działających obiektów w systemie. Ten sam obiekt (system) może, w zależności od przyjętych parametrów, zmierzać do określonej granicy, oscylować wokół pewnych wartości (z jedną lub wieloma częstotliwościami) albo zachowywać się chaotycznie (np. rozwój populacji danego gatunku w zależności od parametru charakteryzującego jej przyrost). Zachowanie chaotyczne oznacza, że minimalna zmiana wartości początkowej procesu powoduje bardzo duże jego zmiany. Niektórzy badacze widzą zbieżność pomiędzy pojęciem fraktali a strukturą systemów wytwarzania. Prowadzi to do pojęcia fraktalnych systemów wytwarzania [11]. Nie negując ciekawych idei stąd wypływających, a dotyczących organizacji pracy systemu, zdaniem autorów analogia ta opiera się na zbyt uproszczonych założeniach wzajemnego podobieństwa podsystemów na różnych poziomach. Należy także zwrócić uwagę, że podział fraktalny jest nieskończony, co oczywiście, nie może występować w systemach wytwarzania. W dalszych rozważaniach podanych niżej pominięto problemy dotyczące chaosu, chociaż w niektórych przypadkach można doszukać się jego występowania, jak np. chaos wynikający z wysokiej czułości rzeczywistego harmonogramu zadań na minimalne zmiany czasu wykonania operacji w elastycznym systemie wytwarzania. **Pojęcie złożoności będzie tu ograniczone do efektu wywołanego współdziałaniem wielu obiektów o określonych algorytmach działania.**

Można też zauważyć, że w systemie wytwarzania istnieje wiele zasad odnoszących się do działania poszczególnych obiektów, a porządkujących całość systemu. Część z nich podlega nawet formalnej procedurze, jak np. normom ISO serii 9000 dotyczącym jakości wyrobu. Istnieje też pewna analogia do zachowania społecznego, między innymi do

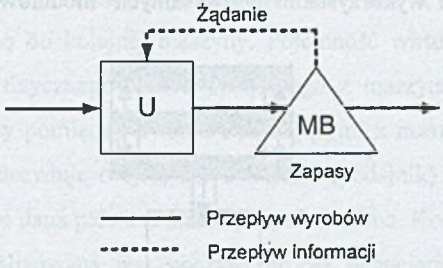
stosowania starej zasady moralnej: „czyń każdy (dobrze) w swoim kole, a całość sama się złoży".

Poniżej podano przykłady wybranych systemów wytwarzania, które mogą być uznane za systemy złożone (system złożony jest tu rozumiany jako system, w którym istota jego działania jest oparta na wyżej przyjętym pojęciu złożoności). Projektując takie systemy autorzy stosowali często nieświadomie zasadę złożoności. Systemy złożone, wykorzystujące sterowanie rozproszone, znane są pod różnymi nazwami: holoniczne [1], biologiczne [7, 10] czy też wieloagentowe [2, 9, 12].

2. Przykłady złożonych systemów wytwarzania

2.1. System Just-in-Time (JIT)

Metoda JIT (obecnie określana potocznie jako filozofia) opiera się przede wszystkim na minimalizacji zapasów, co bezpośrednio wpływa na konieczność polepszenia jakości i produkcję bez braków. Zwraca się uwagę na pracę zespołową, zmniejszenie czasów przezbrajania maszyn, poprawę efektywności systemu wytwórczego. Podstawą działania systemu wytwarzania jest w tym przypadku przyjęcie zasady ssania (ang. pull) produkcji zamiast stosowanej w systemach klasy MRP zasady jej pchania (ang. push). Implementacja JIT może być zrealizowana np. poprzez wykorzystanie zaproponowanego w firmie Toyota techniki Kanban. Na rys. 1. przedstawiono elementarny moduł systemu wytwórczego złożony z urządzenia wytwórczego (U) i magazynu buforowego (MB) [5].

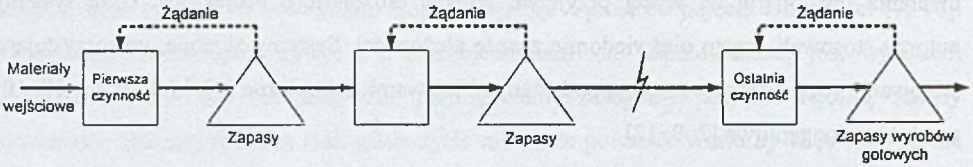


Rys. 1. Obiekt elementarny systemu wytwarzania wykorzystującego technikę Kanban

Fig. 1. Elementary object of manufacturing system which uses Kanban concept

Algorytm metody JIT jest bardzo prosty, odnosi się do poszczególnych obiektów realizujących operacje technologiczne, a równocześnie prowadzi do właściwego działania całego systemu wytwarzania z minimalizacją zapasów międzyoperacyjnych. Zasada działania sprowadza się do przekazania poprzednikowi w systemie wytwarzania żądania dostarczenia

określonej liczby przedmiotów. Liczebność ta może być wyrażona stanem magazynu pośredniego lub inną dostępną poprzednikowi informacją. Każdy wykonawca wykonuje tylko to zadanie, które wynika ze stanu zapasu w magazynie pośrednim (w skrajnym przypadku o pojemności równej jeden) i ta zasada wystarcza dla prawidłowego działania całego systemu.

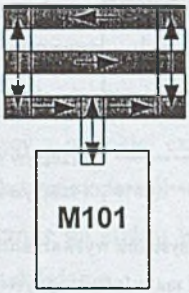


Rys. 2. Przykład złożonego systemu wytwarzania wykorzystującego technikę Kanban

Fig. 2. An example of manufacturing system which uses Kanban concept

2.2. System WEST

Z inicjatywy koncernu DaimlerChrysler AG powołano konsorcjum mające na celu zastosowanie nowych koncepcji systemów wytwarzania w przemyśle samochodowym. W ramach prac tego konsorcjum opracowano pilotażowe rozwiązanie wieloagentowego systemu wytwarzania [2]. Podstawowym założeniem przyjętej koncepcji jest zastosowanie zwielokrotnionych urządzeń wytwórczych. Oznacza to, że dla każdej czynności realizowanej w systemie wytwarzania istnieje zawsze więcej niż jedna maszyna, która może daną czynność wykonać. Umożliwia to np. w przypadku awarii maszyny skierowanie palety na inną maszynę o identycznej lub podobnej funkcjonalności. Zaproponowana koncepcja budowy systemu wytwarzania polega na wykorzystaniu uniwersalnych modułów wytwórczych. Każdy z

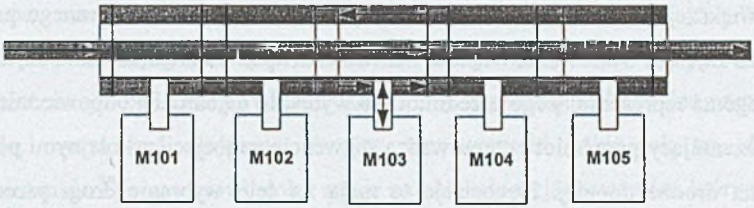


Rys. 3. Standardowy moduł wytwórczy

Fig. 3. Standard manufacturing module

modułów (rys. 3). składa się z siedmiu podstawowych elementów, tj. maszyny, trzech jednokierunkowych przenośników, dwóch podajników i stołu przesuwnego. Każdy podajnik

może przemieścić pojedynczą paletę, z każdego przenośnika wejściowego na każdy przenośnik wyjściowy. W systemie wytwarzania przedstawionym na rys. 4 każdy z wewnętrznych podajników ma dwa wejścia i jedno wyjście od lewej strony oraz dwa wyjścia i jedno wejście od strony prawej.



Rys. 4. Przykład złożonego systemu wytwarzania zbudowanego z elementarnych modułów wytwórczych
Fig. 4. Example of complex manufacturing system composed of standard manufacturing modules

Do sterowania systemami wytwarzania zbudowanymi z omówionych wcześniej elementarnych modułów wytwórczych opracowano rozproszony wieloagentowy system sterowania nazwany przez jego twórców WEST. W systemie tym dla każdego przedmiotu, każdej maszyny oraz każdego podajnika został utworzony odpowiedni agent. Agent reprezentujący przedmiot zajmuje się stanem określonego przedmiotu związanego z paletą. Agent reprezentujący maszynę steruje przepływem przedmiotów przez maszynę, a ponadto zarządza jej „wirtualnym buforem". Bufor ten składa się z dwóch rozłącznych części: bufora wejściowego oraz bufora wyjściowego. Bufor wejściowy zawiera przedmioty, które zostały poprzez swoich agentów przypisane do realizacji czynności na danej maszynie. Bufor wyjściowy maszyny zawiera natomiast te przedmioty, które nie są z nią już związane, a nie zostały jeszcze przypisane do kolejnej maszyny. Pojemność wirtualnego bufora nie może przekroczyć pojemności fizycznego bufora związanego z maszyną, tj. tej części systemu transportowego, która leży pomiędzy dwoma sąsiadującymi z maszyną podajnikami. Agent reprezentujący podajnik decyduje o tym, które wejście (podajnik) zostanie obsłużone jako pierwsze oraz o tym, gdzie dana paleta zostanie przemieszczona. Koordynacja współdziałania agentów w systemie realizowana jest poprzez proces negocjacji. Agent reprezentujący przedmiot inicjuje negocjacje z agentami reprezentującymi maszyny. Robi to zawsze po wprowadzeniu nowego przedmiotu do systemu oraz bezpośrednio po wyjściu przedmiotu z maszyny. Przedmiotem negocjacji jest wybór maszyny, która wykona następną czynność elementarną dla danego przedmiotu. Każda maszyna dysponująca niezbędnymi możliwościami wytwórczymi informuje negocjującego agenta o aktualnym stanie swojego wirtualnego bufora oraz liczbie możliwych czynności elementarnych, które dla niego może

zrealizować. W przypadku gdy maszyna nie może zrealizować żadnej czynności elementarnej z udziałem zainteresowanego przedmiotu, proces negocjacji zostaje przerwany. Jeżeli tak nie jest, to agent reprezentujący przedmiot dokonuje wyboru najwłaściwszej maszyny kierując się dwoma kryteriami: (1) zajętością wirtualnego bufora maszyny oraz (2) jej zdolnością do realizacji większej liczby czynności elementarnych z udziałem rozpatrywanego przedmiotu. Im mniejsza zajętość bufora oraz większa liczba możliwych do zrealizowania czynności, tym lepiej dla agenta reprezentującego przedmiot. Po wybraniu najbardziej odpowiedniej maszyny agent reprezentujący przedmiot przeprowadza sekwencję negocjacji z kolejnymi podajnikami leżącymi na drodze do niej. Negocjacje te mają na celu wybranie drogi przedmiotu do wybranej maszyny. Podstawowym celem podajnika jest skierowanie przedmiotu na żądaną maszynę. Jeżeli jednak taka operacja nie jest aktualnie możliwa, to wskaźnik priorytetu przedmiotu zostaje zwiększony o 1. Wartość wskaźnika priorytetu ma decydujące znaczenie dla wyboru przez podajnik przedmiotu, który będzie aktualnie przemieszczany. Przedmiot o najwyższym wskaźniku priorytetu jest zawsze obsługiwany jako pierwszy.

2.3. Samoorganizujący się system wytwarzania w Katedrze Systemów Wytwarzania Politechniki Krakowskiej

Jako samoorganizujący się system wytwarzania przyjęto w niniejszej pracy taki system, który może modyfikować swoją strukturę i sposób działania w odpowiedzi na własne doświadczenia oraz wpływ otaczającego środowiska. Zasadniczym elementem koncepcji budowy samoorganizującego się systemu wytwarzania [3,12] w Katedrze Systemów Wytwarzania Politechniki Krakowskiej jest wprowadzenie uniwersalnego modułu programowego zwanego agentem wytwórczym. Ma on reprezentować, na poziomie logicznym systemu sterowania, działanie realnego elementu składowego systemu wytwarzania, takiego jak np. obrabiarka, robot, magazyn czy wózek. Agent wytwórczy uzyskuje funkcjonalność wybranego elementu poprzez przejęcie kontroli nad jego działaniem zarówno jako jednostki, jak i części składowej całego systemu.

Budowanie systemu sterowania wytwarzaniem realizowane jest na zasadzie samokonfiguracji. Agenty wytwórcze nawiązują połączenia informacyjne ze wszystkimi agentami wytwórczymi niezbędnymi do realizacji ich czynności elementarnych. Inteligencja agentów wytwórczych związana jest bezpośrednio ze zbiorem wykonywanych w systemie czynności elementarnych oraz zdolnością do realizacji wspólnych celów przy udziale innych agentów wytwórczych. Działanie systemu sterowania wytwarzaniem opiera się na założeniu,

że każdy agent wytwórczy jest aktywny i dąży do wykonania przyporządkowanych mu czynności elementarnych. Rozpoczęcie realizacji większości z czynności wymaga zazwyczaj współpracy kilku agentów wytwórczych. Tak więc, każdy agent, analizując możliwość realizacji swojej czynności elementarnej, uzyskać musi akceptację współdziałania przy jej realizacji od wszystkich agentów wytwórczych niezbędnych do jej wykonania. Skompletowanie zbioru agentów jest warunkiem koniecznym, ale niewystarczającym, aby dana czynność mogła być zrealizowana. Ponadto, aby zapewnić bezkolizyjną pracę systemu wytwarzania, muszą być spełnione również inne warunki, takie jak np. dostępność przedmiotu obrabianego w odpowiednim stanie na obiekcie wejściowym (na którym znajduje się przedmiot przed rozpoczęciem czynności) oraz wolne miejsca na pozostałych obiektach biorących udział w realizacji czynności. Spełnienie wszystkich wyżej wymienionych warunków nie wystarcza do stwierdzenia, że można już rozpocząć jej wykonanie. Aby to zrobić, należy bowiem jeszcze sprawdzić, czy w wyniku wykonania tej czynności nie powstanie w systemie wytwarzania stan blokady. Oryginalną, opracowaną w tym celu metodę przedstawiono w pracy [13]. Jeżeli stan blokady nie wystąpi, oznacza to, że czynność spełnia warunki realizowalności i może być wykonana. Istotnym aspektem działania zautomatyzowanych systemów wytwarzania jest fakt równoczesnego spełniania warunków realizowalności przez więcej niż jedną czynność. W takiej sytuacji powstaje konieczność określenia czynności, która będzie realizowana przez danego agenta. Jedna z możliwych do zastosowania koncepcji wyboru czynności do wykonania bazuje na priorytetach. Wartości wskaźników priorytetów decyzyjnych poszczególnych czynności zależeć mogą od wielu różnych czynników, takich jak stan zaawansowania realizowanych procesów, stopień wykorzystania poszczególnych urządzeń wytwórczych itp. Przyporządkowanie czynnościom priorytetów umożliwia zastosowanie prostej (heurystycznej) reguły wyboru czynności do uruchomienia. Do wykonania przechodzi ta czynność, która spełnia warunki realizowalności i ma najwyższy wskaźnik priorytetu decyzyjnego.

3. Perspektywa rozwoju złożonych systemów wytwarzania

Powstaje pytanie, jaka część możliwości stosowania pojęcia złożoności jest już wykorzystana i czy istnieje perspektywa rozwoju tych zastosowań? Założono ograniczenie rozważań do procesów dyskretnych, składających się z pojedynczych operacji technologicznych, transportowych i magazynowania. Rozważa się tylko zdarzenia początku i

końca danej operacji (czynności), pomijając zmienność stanu obiektów w trakcie ich trwania. Decyzje odnośnie do uruchamiania danej operacji powstają w takich systemach wyłącznie przed ich rozpoczęciem, bez względu na to, czy mamy do czynienia ze sterowaniem centralnym czy rozproszonym. Zakończenie operacji musi być zapewnione przez lokalne układy sterowania i odpowiednie oprogramowanie, których nie dotyczą niniejsze rozważania. Zakończenie operacji jest sygnalizowane przez wykonujące je obiekty i wykorzystywane do podejmowania decyzji o rozpoczęciu dalszych czynności.

Przy wyżej przyjętych ograniczeniach systemy wytwarzania można podzielić z punktu widzenia struktury na następujące typy:

- o stałej strukturze powiązań pomiędzy poszczególnymi obiektami, co oznacza, że każdy obiekt współpracuje zawsze z tymi samymi partnerami (obiektami),
- o zmiennej strukturze, a więc obiekty mogą współpracować z różnymi obiektami, w zależności od zaistniałej w danym momencie sytuacji.

Drugim kryterium podziału systemów są algorytmy (w szczególności ich parametry) działania. Wyróżniono systemy:

- o stałych algorytmach (parametrach) działania obiektów, określających możliwość współpracy i preferencje,
- o zmiennych algorytmach (parametrach) działania obiektów.

W przypadkach zmiennej struktury lub algorytmu można mówić o dwóch sposobach kształtowania zmian:

- zmiany generowanej w sposób centralny, w zależności od aktualnych kryteriów i zadań całego systemu,
- zmiany kształtowanej w sposób rozproszony jako efekt ewolucyjnych zmian poszczególnych obiektów. Oczywiście, w tym przypadku algorytm zmian musiałby być wbudowany w algorytmy poszczególnych autonomicznych obiektów jako zbiór dopuszczalnych zachowań. W efekcie przetrwałyby te struktury (algorytmy), które - podobnie jak w ewolucji organizmów żywych - osiągnęłyby najlepsze wyniki wg przyjętych kryteriów.

Tablica 1 podaje propozycję klasyfikacji zautomatyzowanych systemów wytwarzania. Można stwierdzić, że w chwili obecnej nie wykorzystuje się wszystkich możliwości sterowania wynikających z analizy pojęcia złożoności. Dotyczy to struktury i algorytmów (parametrów) zmiennych ewolucyjnie. Na pewno formalizacja opisu działania takich systemów przy spełnieniu warunku ich wysokiej efektywności może natrafić w chwili

obecnej na trudności. Tym niemniej warto zwrócić uwagę na ciekawą możliwość ich dalszego rozwoju.

Tablica 1

Propozycja klasyfikacji zautomatyzowanych systemów wytwarzania

		Struktura stała	Struktura zmienna	
			sterowana	ewolucyjna
Algorytmy stałe		linia produkcyjna jednego wyrobu	ESP ze stałym priorytetem	brak
Algorytmy zmienne	sterowane	elastyczna linia produkcyjna ze zmiennym priorytetem	ESP ze zmiennym priorytetem	brak
	ewolucyjne	ograniczone [8]	brak	brak

4. Podsumowanie

Pojęcie **złożonego systemu wytwarzania** jest bardzo ogólne. Oznacza to, że istnieją duże możliwości budowania struktury i algorytmów działania takich systemów. W pojęciu **złożony system wytwarzania** mogą mieścić się m.in. wykorzystujące sterowanie rozproszone systemy: holoniczne, biologiczne czy też wieloagentowe, zaliczane do tzw. inteligentnych systemów wytwarzania.

LITERATURA

1. Bongaerts L., Van Brussel H., Valckenaers P.: Generic Concept for Holonic Manufacturing System. Proc. of the 9th International FAIM Conference, Tilburg 1999.
2. Bussmann S., Schild K.: Self-Organizing Manufacturing Control: An Industrial Application of Agent Technology. Proc. of the Fourth Int. Conf. on Multi-Agent Systems, Boston 2000, s. 87-94.
3. Cyklis J., Zając J.: Towards Self-organizing Manufacturing Systems. Proc. of the International Conference CIM'99, Zakopane 1999, s. 114-119.
4. Deshmukh A., Talavage J., Barash M.: Complexity in Manufacturing Systems: Part 1: Analysis of Static Complexity, IIE Transactions, vol. 30, no. 7, 1998.
5. Gaury E.G., Pierrval H., Kleijnen P.C.: An Evolutionary Approach to Select a Pull System Among Kanban, Conwip and Hybrid. Journal of Intelligent Manufacturing, No. 11. Special Issue: Production Systems Design and Control, 2000, s. 157-167.

6. Parunak H.V.D.: Complexity Theory in Manufacturing Engineering: Conceptual Roles and Research Opportunities, Industrial Technology Institute Tech memo 93-01, Ann Arbor 1995.
7. Okino N.: Bionic Manufacturing System. In Flexible Manufacturing Systems, Past-Present-Future, Ed. J. Peklenik, Ljubljana 1993, s. 73-95.
8. Riedmiller S., Riedmiller M.: A Neural Reinforcement Learning Approach to Learn Local Dispatching Policies in Scheduling Problems. Proc. of the Conference on Artificial Intelligence IJCAI'99, Stockholm 1999, s. 764-769.
9. Shen W., Norrie D.H.: Agent-Based Systems for Intelligent Manufacturing: a State-of-the-Art Survey. Knowledge and Information Systems, 1998, s. 129-156.
10. Ueda K.: Biological Manufacturing Systems and IMS Program. Proc. of 7th International DAAAM Symposium, Vienna 1996, s. 449-452.
11. Warnecke H.J.: The Fractal Company – A Revolution in Corporate Culture, Springer-Verlag, New York 1993.
12. Zając J., Wybrane problemy współdziałania w wieloagentowym systemie sterowania wytwarzaniem. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., ser. Automatyka, z. 130, Gliwice 2000, s. 200-210.
13. Zając J., Nowa metoda rozwiązywania problemu blokad w rozproszonym systemie sterowania wytwarzaniem. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., ser. Automatyka, z. 135, Gliwice 2002.

Recenzent: Dr hab. inż. Bożena Skołud

Abstract

Applying the idea of complexity is very promising in modern science. However the idea is a very broad one in the paper it is limited to the effect of collaboration of independent objects. Complex Manufacturing System (CMS) is one, which is controlled by the effect mentioned above. It is interesting that well known Just in Time method can be interpreted as CMS. In the paper other examples of CMS are described. These are named by author's indifferent way, but in the paper interpreted as CMS. One of them is System West introduced by DaimlerChrysler AG. Another one was created in Cracow University of Technology as a multiagent manufacturing system. In the paper it is shown that this system can be also understood as CMS. The idea of CMS is a very broad one and covers the so-called biological, multiagent and holonic manufacturing systems. The classification of CMS is proposed in the paper. Analysis of different CMS variants can help to find new ways of manufacturing systems development.