

prof. dr hab. inż. Jerzy Cyklis
dr inż. Jerzy Zajac
mgr inż. Witold Czmich
mgr inż. Adam Słota
mgr inż. Jarosław Zych
Katedra Systemów Wytwarzania
Politechnika Krakowska

Jak zbudować rozproszony system sterowania wytwarzaniem - od koncepcji do implementacji

Streszczenie: W referacie przedstawiono ciąg działań podejmowanych w celu budowy rozproszonego systemu sterowania dyskretnymi systemami wytwarzania. Omówiono: przyjętą koncepcję rozwiązania tego problemu, problematykę jego modelowania, kwestie dotyczące opracowywania niezbędnych modułów programowych a także zagadnienia weryfikacji poprawności działania zaproponowanego systemu sterowania, wykorzystując w tym celu model symulacyjny oraz zbudowany z miniobrabiarek edukacyjny system wytwórczy.

How to Build a Distributed Manufacturing Control System – From a Concept to an Implementation

Summary: The paper presents a sequence of actions undertaken to build a distributed discrete event manufacturing control system. It describes the applied control concept, modeling aspects, preparation of software modules and verification of the control system by using simulation model and build on small machine tools educational manufacturing system.

1. WSTĘP

Rozwój technologii informatycznych zarówno w zakresie rozwiązań sprzętowych jak i rozwiązań programowych otwiera nowe możliwości w obszarach wykorzystujących te technologie. Jednym z takich obszarów są komputerowe systemy sterowania dyskretnymi systemami wytwarzania. Konieczność szybkiego dostosowywania się do nowych wymagań stawianych wytwórcom, dążenie do polepszania jakości wyrobów oraz obniżania ich kosztów produkcji nie są możliwe do zrealizowania za pomocą klasycznych systemów sterowania. Niezbędne jest opracowanie nowych koncepcji konfigurowalnych systemów sterowania wytwarzaniem opartych na wykorzystaniu modułów wielokrotnego użytku. W problem poszukiwania idei przyszłościowych systemów wytwarzania zaangażowane są znaczne środki finansowe oraz liczna grupa pracowników czołowych ośrodków naukowo-badawczych zarówno akademickich jak i przemysłowych. Prace te realizowane są w ramach różnych narodowych i międzynarodowych projektów badawczych, z których najbardziej znanym jest projekt Intelligent Manufacturing Systems [8].

Jedną z podstawowych cech współczesnego środowiska wytwarzania jest jego rozproszenie. Naturalnym, narzucającym się, rozwiązaniem problemu jego sterowania jest więc zastosowanie systemu rozproszonego. Zbudowanie takiego systemu wymaga opracowania nowych koncepcji i algorytmów ze szczególnym zwróceniem uwagi na problematykę przekazywania informacji. Problemy pojawiające się w systemach sterowania wytwarzaniem

w dużym stopniu pokrywają się z zagadnieniami istniejącymi w rozproszonych systemach komputerowych. Ich specyfika polega jednak m.in. na nieodwracalności podjętych akcji (obróbka), braku możliwości przerwania często czasochłonnych operacji (przerwanie operacji powoduje bowiem powstanie odpadów) a także statystycznie częściej niż w systemach komputerowych występujących awariach.

Niniejsza praca stanowi opis wybranych zadań zrealizowanych w ramach finansowanego przez KBN projektu badawczego nr 7 T07D 045 14 pt. „Samooorganizujący się system wytwarzania”. Pewne zagadnienia dotyczące tego projektu były prezentowane również na poprzednich konferencjach Automation'98 i Automation'99.

2. SYSTEM STEROWANIA WYTWARZANIEM JAKO ZINTEGROWANY ZBIÓR INTELIGENTNYCH I KOOPERATYWNYCH OBIEKTÓW (AGENTÓW)

2.1. Koncepcja

Rozważmy dyskretny proces wytwarzania, w którym daje się wyróżnić skończoną liczbę czynności elementarnych. Oznacza to, że z punktu widzenia rozpatrywanego procesu są one czynnościami niepodzielnymi, a proces jest realizowany jako kombinacja czynności elementarnych wykonywanych sekwencyjnie lub współbieżnie. Jednocześnie przyjmijmy, że system wytwarzania składa się ze skończonego zbioru obiektów. Podobnie jak w przypadku czynności elementarnych, obiekty potraktujemy jako niepodzielne. Poszczególne czynności elementarne są realizowane przez pojedyncze obiekty lub grupy obiektów. Każdy obiekt dysponuje więc własnym zbiorem czynności elementarnych.

W zautomatyzowanym dyskretnym systemie wytwarzania istnieje określony, skończony zbiór decyzji, które mogą zostać podjęte. Sterowanie takim systemem polega na wyborze właściwych decyzji poprzez określenie czynności elementarnej, którą w danym momencie należy uruchomić. Jeżeli decyzje w systemie podejmowane są przez jego obiekty składowe, to mamy do czynienia ze sterowaniem rozproszonym. Zbudowanie rozproszonego systemu sterowania wymaga opracowania koncepcji modułów programowych, które reprezentując działanie poszczególnych obiektów, posiadają również możliwości decyzyjne oraz zdolność komunikowania się z innymi obiektami. W Katedrze Systemów Wytwarzania Politechniki Krakowskiej zaproponowano budowę rozproszonego systemu sterowania dyskretnymi systemami wytwarzania [2, 3, 15, 16] w oparciu o integrację sieciową jednolitych, konfigurowalnych, inteligentnych i kooperatywnych obiektów (agentów). Pojęcie agenta pochodzi z informatyki i określa proces (uruchamiany w systemie operacyjnym) charakteryzujący się aktywnością, możliwościami komunikacyjnymi oraz zdolnością do współpracy z innymi agentami. W dalszej części referatu, dla określenia elementów składowych rozproszonego systemu sterowania, używane będą zarówno pojęcia agent jak i obiekt. Określenie obiekt stosowane będzie w sytuacji gdy mówimy o fizycznym lub logicznym elemencie systemu wytwarzania, natomiast określenie agent - gdy mówimy o module programowym będącym informatycznym odpowiednikiem obiektu.

Do budowy rozproszonego systemu sterowania wprowadzono trzy typy agentów:

- Agent systemowy,
- Agent wytwórczy,
- Agent dostosowujący.

Agenci systemowi wykorzystywani są dla celów konfiguracyjnych, koordynacyjnych, diagnostycznych oraz wizualizacyjnych. Ogólnie można powiedzieć, że agenci systemowi odpowiedzialni są za zadania, które wymagają wiedzy o całości systemu lub jego wybranej części. Agenci wytwórczy stanowią najważniejszy element koncepcji. Reprezentują oni działanie rzeczywistego elementu systemu wytwarzania (obiekt wytwórczy), jak np. obrabiarka, robot, wózek czy magazyn. Inteligencja agentów wytwórczych związana jest bezpośrednio ze zbiorem realizowanych przez nich czynności elementarnych oraz z ich

zdolnością do realizacji wspólnych celów przy udziale innych agentów. Natomiast agent dostosowujący jest odpowiedzialny za wymianę danych z układami rzeczywistymi (sterowniki, sensory). Zbudowanie rozproszonego systemu sterowania polega na konfiguracji bądź samokonfiguracji agentów w środowisku sieciowym.

2.2. Modelowanie

Istnieje kilka znanych sposobów pozwalających na modelowanie systemów sterowania dyskretnymi systemami wytwarzania. Najczęściej wykorzystywane są znane z informatyki sieci Petri [9,12,13] oraz opracowywane specjalnie do celu sterowania dyskretnymi systemami wytwarzania Model Macierzowy [1]. Interesującą propozycją twórczego rozwinięcia koncepcji Modelu Macierzowego przedstawiono w pracy [11]. Powyższe koncepcje w swoich standardowych podejściach zorientowane są jednak na modelowanie procesu sterowania o charakterze scentralizowanym i nie uwzględniają specyfiki sterowania rozproszonego. Dla zbudowania modelu rozproszonego systemu sterowania dyskretnymi systemami wytwarzania opracowano w ramach projektu badawczego „Samoorganizujący się system wytwarzania” dwa rozwiązania pozwalające na opisanie w kategoriach formalnych zależności zachodzących w procesie rozproszonego sterowania wytwarzaniem.

Pierwszy model został nazwany obiektowo – obserwowalną siecią Petriego [4,7] i polega na uogólnieniu klasycznej sieci Petri. Jedną z niedogodności klasycznego rozwiązania jest fakt, że jedno miejsce może reprezentować równocześnie stan kilku obiektów. Powoduje to znikanie i pojawianie się znaczników w trakcie przekształcania modelu. Wzbogacenie klasycznej definicji sieci Petri o funkcję numeracji obiektów oraz nałożenie dodatkowych ograniczeń na relację przepływu i funkcję wagi umożliwia uzyskanie efektu, że wszystkie miejsca w sieci mogą zostać podzielone na rozłączne zbiory związane z wyodrębnionymi obiektami systemu wytwarzania. Umożliwia to wykorzystanie obiektowo obserwowalnej sieci Petri do modelowania rozproszonych systemów poprzez syntezę sieci poszczególnych obiektów systemu wytwarzania [5].

Drugi [18] przygotowany w trakcie realizacji projektu badawczego sposób modelowania wykorzystuje ogólny zapis relacyjny i przedstawia system wytwarzania jako zbiór obiektów (agentów) oraz opisuje ich wzajemne współdziałanie w procesie sterowania. Zaprezentowana koncepcja ma charakter ogólny, ale jest szczególnie przydatna do budowania samokreującego się wieloagentowego systemu sterowania wytwarzaniem. Taki system sterowania oparty jest na integracji sieciowej jednolitych, konfigurowalnych, inteligentnych i kooperatywnych agentów. Proces modelowania przedstawiono w postaci trzech następujących po sobie kolejno etapów: (1) dyskretyzacja systemu wytwarzania, (2) określenie reguł działania systemu oraz (3) podejmowanie decyzji, tak jak to zaproponowano w pracy [6].

2.3. Programowanie

Przedstawiona powyżej koncepcja systemu sterowania dyskretnym systemem wytwarzania oraz zbudowany na jej podstawie model jego działania stanowią podstawę do przygotowania odpowiednich modułów programowych. Przed pojęciem prac nad tworzeniem oprogramowania przeanalizowano różne problemy [17], jakie mogły pojawić się w czasie prac nad oprogramowaniem oraz podczas jego wdrażania. Najistotniejsze problemy dotyczyły wyboru bazy platformy systemowej a także wyboru platformy integrującej. Jako platformę systemową wybrano Windows NT, a jako platformę integrującą - technologię DCOM [14]. Wybór systemu operacyjnego Windows NT wynikał z faktu, że według ocen wyspecjalizowanych firm analitycznych system ten, a dokładnie jego następca tzn. Windows 2000 stanie się na początku XXI wieku wiodącym systemem operacyjnym na rynku korporacyjnych Intranetów. Należy się więc spodziewać, że technologie rozwijane wraz z tym systemem wykorzystywane będą szeroko w przedsiębiorstwach, w tym również do zarządzania i sterowania produkcją. Wybór technologii DCOM był spowodowany: faktem, że stanowi ona integralną część systemu operacyjnego Windows NT, a co za tym idzie, jest

łatwo dostępna (dla kilku innych systemów operacyjnych istnieje możliwość skopiowania odpowiednich plików z Internetu); wsparciem technicznym oferowanym przez firmę Microsoft (w tym szeroki dostęp do dokumentacji, list dyskusyjnych itp.); stabilnością standardu tworzonego przez jedną firmę, oraz łatwym dostępem do nowych wersji oprogramowania. Na szczególną uwagę zasługuje zagadnienie jednorodności platformy zarówno na poziomie systemów zarządzania przedsiębiorstwem, poziomie sterowania operatywnego, jak i na poziomie sterowania lokalnego (technologia OPC). Przedstawione powyżej rozważania wyboru platform mają charakter ogólny, choć bezpośrednio dotyczą środowiska edukacyjno-badawczego (uczelni). Wydaje się jednak, że ten tok rozumowania jest właściwy dla większości średnich i małych przedsiębiorstw nie posiadających dużego fachowego zaplecza kadrowego pozwalającego na posiadanie i rozwijanie środowiska informatycznego o charakterze heterogenicznym.

Oprogramowanie zostało zakodowane w języku C++ i skompilowane kompilatorem VisualC++. Każdy z opracowanych modułów programowych (agentów) pełni rolę zarówno klienta jak i serwera DCOM. Przyjęto koncepcję integracji obiektów poprzez wymianę komunikatów, stąd poszczególne moduły programowe zostały wyposażone w interfejsy umożliwiające wysyłanie i odbieranie komunikatów. Dzięki zastosowaniu technologii DCOM możliwe jest m.in. zdalne uruchamianie agentów wytwórczych, statyczne i dynamiczne ich konfigurowanie a także ich odłączanie i dołączanie bez konieczności wyłączenia systemu.

Zastosowanie koncepcji jednolitych, konfigurowalnych obiektów powoduje poprawienie niezawodności całości systemu sterowania. Agent wytwórczy jest bowiem wielokrotnie wykorzystywany, często w całkowicie odmiennych sytuacjach, co pozwala na szybkie wykrycie i usunięcie ewentualnych błędów już na etapie testowania. Takie podejście, ze względu na swą uniwersalność, zdecydowanie obniża również koszty przygotowania systemu sterowania. Jedynym modułem, który dla konkretnego systemu wytwarzania wymaga ingerencji programowej jest agent dostosowujący, czyli moduł odpowiedzialny za komunikację z układami rzeczywistymi. W wersji bazowej jest on wyposażony jedynie w narzędzia komunikacyjne z agentem wytwórczym. Dodatkowo musi on więc być „wypełniony indywidualną treścią” dla każdego obiektu rzeczywistego w systemie wytwarzania. Nie są jednak stawiane żadne ograniczenia co do protokołu komunikacyjnego łączącego agenta dostosowującego z układami rzeczywistymi, jak np. sterowniki PLC, NC czy RC.

2.4. Testowanie i implementacja

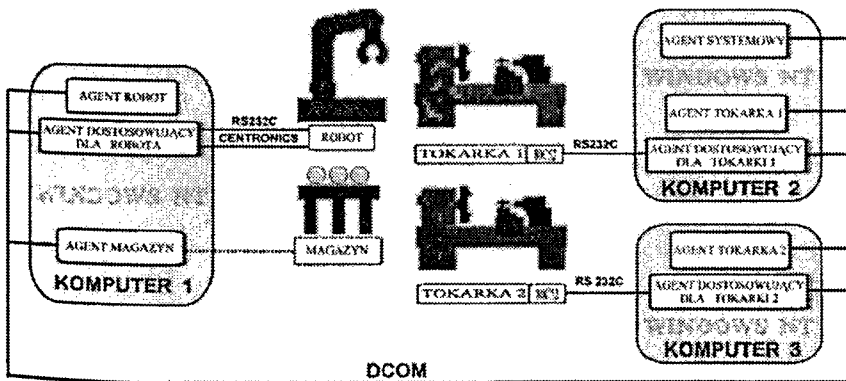
Opracowany i oprogramowany system sterowania został przetestowany na modelu symulacyjnym oraz edukacyjnym systemie wytwórczym. Przygotowano specjalny symulator istniejącego systemu wytwórczego. Symulator ten został opracowany z wykorzystaniem oprogramowania InControl i InTouch firmy Wonderware. Wykorzystanie tego oprogramowania umożliwiło takie przygotowanie symulatora, by pozwalał on z jednej strony na wizualizację sterowanego systemu, a z drugiej strony zapewniał zgodność „sprzęgów komunikacyjnych” pomiędzy systemem sterowania a systemem rzeczywistym. Zamiana symulatora na system rzeczywisty nie wymaga więc wprowadzania żadnych modyfikacji w oprogramowaniu agentów dostosowujących tworzących układ sterowania.

Istotnym wyzwaniem dla zespołu realizatorów projektu badawczego było zastosowanie opracowanego oprogramowania do sterowania systemem rzeczywistym. Jako przykładowy system wykorzystano posiadany w laboratorium minisystem obróbkowy złożony z dwóch minitokarek EMCO, robota Mitsubishi Movemaster oraz prostego minimagazynu. Dodatkową trudność stanowił fakt, że w analizowanym systemie jedynie robot dysponował firmowym układem sterowania. Posiadane wersje minitokarek EMCO udostępniały tylko złącza umożliwiające sterowanie ich silnikami krokowymi (posuwy, głowica narzędziowa, konik) oraz włączanie i wyłączanie napędu głównego (wrzeciono). W pierwszym etapie

implementacji oprogramowania niezbędnym więc było opracowanie i wdrożenie sprzętowo-programowego rozwiązania (CNC) umożliwiającego sterowanie minitokarkami. Dla każdej z nich opracowano i wykonano (w oparciu o mikrokontroler INTEL 80C52) specjalny interfejs zapewniający poprawną realizację współpracy komputera sterującego z ich silnikami krokowymi. Najistotniejszym problemem, jaki pojawił się przy opracowywaniu i oprogramowaniu układu interfejsowego, było takie dobranie jego parametrów, by z jednej strony zapewnić ciągłość pracy silników, a z drugiej strony umożliwić szybką reakcję na niespodziewane sytuacje, jakie mogą pojawić się w czasie sterowania systemem rzeczywistym. Układ interfejsowy połączony jest z komputerem sterującym za pomocą złącza szeregowego RS232C. Część programowa układu sterowania tokarką została opracowana w ten sposób, by umożliwić sterowanie osiami X i Z tokarki w układach absolutnym i przyrostowym, a także, by zapewnić sterowanie konikiem, wrzecionem i głowicą narzędziową. Dla uproszczenia programowania tokarek i zachowaniem zgodności z klasycznymi układami sterowania numerycznego zaimplementowano podzbiór standardowych rozkazów stosowanych przez układy NC.

Wykorzystując opracowane układy sterowania minitokarek oraz firmowy układ sterowania robota przygotowano dla tych elementów testowego systemu wytwarzania zbiór odpowiednich agentów dostosowujących. Podstawowymi zadaniami wykonywanymi przez agenta dostosowującego są weryfikacja realizowalności oraz realizacja czynności elementarnych przekazywanych agentom dostosowującym przez agentów wytwórczych. Czynności te mają zazwyczaj (z punktu widzenia układów sterowania) charakter ogólny. Np. w realizacji czynności „załaduj przedmiot PO1 z magazynu ST1 na tokarkę OB1” biorą udział trzy obiekty magazyn, robot i obrabiarka. Wykonanie tej czynności wymaga więc realizacji zsynchronizowanej sekwencji operacji przez układy sterowania poszczególnych obiektów wytwórczych. Dla realizacji procesu synchronizacji wykorzystuje się komunikaty przesyłane pomiędzy agentami dostosowującymi.

Rys. 1. przedstawia schemat testowego systemu wytwórczego oraz strukturę jego powiązań komunikacyjnych. Magazyn ST1 nie posiada układu sterowania, stąd agent ST1 stanowi jedynie element zajmujący się przechowywaniem informacji o przedmiotach obrabianych. Należy tu również podkreślić interesującą cechę technologii DCOM. Na działanie systemu sterowania nie ma wpływu miejsce zainstalowania poszczególnych agentów wytwórczych i systemowych. Zmiana miejsca ich instalacji nie pociąga za sobą bowiem żadnych zmian w kodzie opracowanego oprogramowania. Instalowanie agentów wytwórczych na tych samych komputerach co ich agenci dostosowujący ma jednak dwie zalety. Umieszcza element decyzyjny blisko miejsca, którego dotyczą jego decyzje oraz wykorzystuje prostszą i szybszą technologię COM do wymiany komunikatów pomiędzy agentami.



Rys. 1. Schemat testowego systemu wytwórczego.

3. WNIOSKI

Zrealizowane w ramach projektu badawczego „Samoorganizujący się system wytwarzania” prace koncepcyjne, modelowe, programowe oraz implementacyjne, potwierdziły słuszność przyjętych założeń oraz skuteczność zastosowanych rozwiązań. Wskazały także nowe kierunki umożliwiające wprowadzenie na szerszą skalę idei samoorganizacji systemów wytwarzania. Wyposażenie standardowych urządzeń wytwórczych w komputerowe układy sterowania umożliwi bowiem zaimplementowanie uniwersalnego kodu identyfikacyjnego pozwalającego obiektom wytwórczym pracować według zasady „włącz i działaj” (*plug and play*) bez konieczności dodatkowej konfiguracji.

LITERATURA

- [1] Cyklis J., Pierzchała W.: Modelowanie procesów dyskretnych w elastycznych systemach produkcyjnych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, Mechanika z. 77, Kraków 1995.*
- [2] Cyklis J., Zajac J.: Koncepcja rozproszonego systemu sterowania dyskretnymi systemami wytwarzania. *Materiały z konferencji AUTOMATION'98. PIAP, Warszawa 1998, s. 47-52.*
- [3] Cyklis J., Zajac J.: Od centralizmu do autonomii w sterowaniu dyskretnymi systemami wytwarzania. *Zeszyty Nauk. Pol. Śl., Seria: Automatyka z.124, Gliwice 1998, s. 43-52.*
- [4] Cyklis J., Słota A.: Obiektowo Obserwowalna Sieć Petriego w zastosowaniu do modelowania elastycznych systemów wytwarzania. *Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Seria: Automatyka z.124, Gliwice 1998, s. 31-42.*
- [5] Cyklis J., Zajac J.: Towards Self-organizing Manufacturing Systems. *Proc. of the International Conference CIM'99, Zakopane 1999, s. 114-119.*
- [6] Cyklis J., Pierzchała W., Zajac J.: Próba klasyfikacji systemów sterowania zautomatyzowanym wytwarzaniem. *Prace ITM i AP, Posiedzenie Sekcji Podstaw Technologii Komitetu Budowy Maszyn PAN 24-25 marca 1999 w Krakowie, s.37-46.*
- [7] Cyklis J., Słota A.: Coloured Object Observable Petri Nets in Modelling of Flexible Manufacturing Systems. *Postępy w Technologii Maszyn i Urządzeń Vol.23 Nr 4 1999, s. 7-19.*
- [8] *Intelligent Manufacturing Systems. A Program for International Cooperation in Advanced Manufacturing. <http://www.ims.org>, 1994*
- [9] Mengchu Z.: *Petri Nets in Flexible and Agile Automation. Kluwer Academic Publisher, Boston/Dordrecht/London 1995.*
- [11] Pierzchała W.: Coloured Object Oriented Model of Manufacturing System. *Postępy w Technologii Maszyn i Urządzeń Vol.23 Nr 4 1999, s. 71-90.*
- [12] Reisig W.: *Elements of Distributed Algorithms – Modeling and Analysis with Petri Nets. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1998.*
- [13] Starke P.H.: *Sieci Petri. PWN, Warszawa 1987.*
- [14] Zajac J., Cznych W.: DCOM jako narzędzie komunikacji w sterowaniu dyskretnymi systemami wytwarzania. *Materiały z Konferencji AUTOMATION'98, PIAP, Warszawa, s. 365-371.*
- [15] Zajac J.: Rozproszony system sterowania zautomatyzowanym wytwarzaniem. *Prace ITM i AP, Posiedzenie Sekcji Podstaw Technologii Komitetu Budowy Maszyn PAN 24-25 marca 1999 w Krakowie, s.231-238.*
- [16] Zajac J.: An Approach to Distributed Control of Manufacturing Systems. *Proc. of the International Regional DAAAM-CEEPUS Workshop, Miskolc 1999.*
- [17] Zajac J.: Wybrane problemy komunikacji i wizualizacji w sterowaniu rozproszonymi systemami wytwarzania. *Pomiary Automatyka Robotyka Nr 6, Warszawa 1999, s.46-50.*
- [18] Zajac J.: Modelling Manufacturing Control System: Multi-Agent Approach. *Postępy w Technologii Maszyn i Urządzeń Vol.23 Nr 4 1999, s. 137-153.*