

dr hab. inż. Jerzy Zając, Prof. PK  
Politechnika Krakowska

## **INTEGRACJA JEDNOLITYCH, KONFIGUROWALNYCH MODUŁÓW JAKO NARZĘDZIE DO BUDOWY ROZPROSZONEGO SYSTEMU STEROWANIA WYTWARZANIEM**

*Jednym z najistotniejszych aspektów warunkujących rozwój systemów wytwarzania jest zastępowanie ich zamkniętych, dedykowanych podsystemów sterowania charakterystycznych dla elastycznego wytwarzania przez otwarte, rozproszone podsystemy stosowane w systemach wytwarzania nowej generacji. W pracy dokonano porównania cech systemów tradycyjnych i systemów nowej generacji. Omówiono etapy budowy modelu dyskretnego, zautomatyzowanego systemu wytwarzania. Przedstawiono dwa sposoby podejścia do budowy jego podsystemu sterowania oraz zaprezentowano przykłady rozwiązań wykorzystujących integrację jednolitych, konfigurowalnych modułów do budowy podsystemu sterowania wytwarzaniem.*

### **AN INTEGRATION OF UNIFIED, CONFIGURABLE MODULES AS A TOOL FOR BUILDING DISTRIBUTED MANUFACTURING CONTROL SYSTEM**

*Replacement of dedicated control subsystems characteristic of flexible manufacturing by open, distributed subsystems applied in next generation manufacturing is an essential aspect of manufacturing systems development. The paper presents a comparison of the features of classical control systems and next generation control systems. Moreover, a three-stage procedure of discrete, automated manufacturing systems modeling is shown. The paper presents also two approaches to design of manufacturing control subsystems and shows examples of solutions which take advantage of an integration of unified, configurable modules for building manufacturing control subsystem.*

#### **1. WPROWADZENIE**

Rozwój zautomatyzowanych systemów wytwarzania realizowany jest obecnie w środowisku otwartym na globalną konkurencję, charakteryzującym się rosnącą złożonością oraz różnorodnością wytwarzanych produktów, które - aby były konkurencyjne - należy szybko wprowadzać na rynek. Wymagania te wymuszają konieczność wprowadzania zmian zarówno w samych systemach wytwarzania jak i w dotychczasowych sposobach przygotowania i realizacji produkcji. Podstawowe zmiany w systemach wytwarzania dotyczą odejścia od rozwiązań dedykowanych (zamkniętych) na rzecz systemów otwartych charakteryzujących się wielowariantowością realizowanych procesów oraz zdolnością do rekonfiguracji w przypadku wystąpienia zakłóceń. Zakłócenia te wynikają z przyjmowania nieplanowanych zleceń na nowe produkty, z konieczności wprowadzenia zmian w realizowanej technologii wytwarzania a także awarii elementów systemu wytwarzania czy też modyfikacji jego struktury. Zasadnicze kierunki działań, jakie należy podjąć aby osiągnąć możliwość realizacji takich zmian, to decentralizacja decyzji oraz wprowadzenie współbieżności realizacji zadań, które do tej pory realizowane były sekwencyjnie.

Spełnienie wymagań stawianych współczesnym zautomatyzowanym systemom wytwarzania, takich jak: otwartość, elastyczność czy inteligencja jest możliwe do osiągnięcia jedynie po-

przez zastosowanie nowoczesnych rozwiązań modelowych [2, 8, 15] pozwalających na wykorzystanie zalet najnowszych technologii informatycznych. Środowisko informatyczne współczesnych systemów wytwarzania staje się w coraz większym stopniu środowiskiem rozproszonym. Wynika to zarówno z fizycznego rozproszenia elementów systemu wytwarzania, jak i wykorzystywania sprzętowych i programowych technologii informatycznych, takich jak lokalne i przemysłowe sieci komputerowe w zakresie rozwiązań sprzętowych czy też technologie rozproszonych obiektów oraz agentów w zakresie rozwiązań programowych. Chcąc w pełni wykorzystać możliwości tych technologii należy opracowywać nowe koncepcje opisu procesu wytwarzania i przygotowywać dla nich odpowiednie rozwiązania modelowe. Niezbędny jest więc swoisty reengineering na poziomie procesu sterowania systemem wytwarzania. Proces wytwarzania nie jest bowiem jedynie procesem, w którym następuje przekształcanie materiału, ale jest także procesem, w którym odbywa się przekazywanie i przetwarzanie informacji. Kluczowymi aspektami umożliwiającymi poprawną realizację procesu sterowania takim systemem jest dostępność do informacji na każdym jego etapie oraz zapewnienie współbieżności procesów przepływu informacji i przepływu materiałów.

*Tabela 1. Porównanie cech tradycyjnych systemów wytwarzania z systemami nowej generacji*

<b>Cechy systemów</b>	<b>Tradycyjne SW</b>	<b>SW nowej generacji</b>
Podsystem sterowania	Zamknięty, architektura scentralizowana lub hierarchiczna	Otwarty. Posiada architekturę rozproszoną lub hybrydową
Urządzenia transportowo-manipulacyjne	Pełnią rolę urządzeń pomocniczych	Pełnią rolę równoważnych partnerów maszyn w procesie wytwórczym, występują najczęściej w postaci wózków AGV i robotów
Udział człowieka.	Duży	Niski ale istotny
Sposób przygotowania procesów produkcyjnych	Najczęściej wykonuje człowiek - technolog przy wsparciu systemu CAPP	Komputerowe generowanie procesów produkcyjnych (pod nadzorem człowieka) zintegrowane z systemem sterowania
Nadmiarowość zasobów	Ograniczona	Znacząca nadmiarowość zasobów
Zdolność do rekonfiguracji	Ograniczona zamkniętym układem sterowania	Duża z uwagi na uniwersalność i nadmiarowość zasobów oraz otwarty układ sterowania
Odporność na zakłócenia i awarie	Ograniczona	Duża wynikająca z nadmiarowości zasobów i wielowariantowości realizowanych procesów
Zdolność do produkcji jednostkowej „zorientowanej na klienta”	Ograniczona małą zdolnością do rekonfiguracji	Duża. Możliwa obsługa losowo napływających zleceń o różnym terminie realizacji, koszcie i jakości
Zdolność do samoorganizacji	Brak z uwagi na zamknięty układ sterowania	Duża z uwagi na możliwość modyfikacji struktury systemu

Biorąc pod uwagę heterogeniczność środowiska informatycznego współczesnych systemów produkcyjnych, szczególnego znaczenia nabierają również kwestie integracji informacji [26]. Problem ten wynika głównie z różnorodności wykorzystywanych technologii informatycznych. Można go jednak rozwiązać poprzez zastosowanie powszechnie akceptowalnych standardów komunikacyjnych, jakimi są technologie internetowe.

Przełom XX i XXI wieku jest okresem intensywnych poszukiwań nowych koncepcji zautomatyzowanych systemów wytwarzania [13, 19, 21, 22, 23, 24, 25] wykorzystujących zdecentralizowane systemy sterowania. W latach dziewięćdziesiątych minionego stulecia przejawiało się to między innymi w przekazywaniu znacznych środków finansowych na programy badawcze o zasięgu światowym. Najbardziej znanym przykładem jest tu dziesięcioletni, międzynarodowy program dotyczący opracowania i wdrożenia koncepcji Inteligentnych Systemów Wytwórczych IMS (ang. *Intelligent Manufacturing Systems*) [11]. Jest to najprawdopodobniej największy i najbardziej kosztowny (budżet 1 mld USD) program w historii dotyczący systemów wytwarzania. Podobna problematyka rozważana była równocześnie w ramach projektów narodowych, takich jak np. realizowany w USA projekt Wytwarzania Następnej Generacji (ang. *Next Generation Manufacturing*). Należy tu jednak podkreślić, że okres ostatniego dziesięciolecia XX wieku przeznaczony został głównie na poszukiwanie i rozwijanie nowych koncepcji. Przejście od koncepcji do pilotażowych implementacji wymagało bowiem wielu lat badań [1, 3, 5, 6, 17]. Wszystkie te nowe koncepcje bazują na wykorzystaniu współczesnych technologii informatycznych. Postęp w elektronice i informatyce wyprzedza bowiem znacznie rozwój „klasycznych” technologii wytwarzania. Należy się więc liczyć z faktem, że przyszłość systemów wytwarzania zależeć będzie w znacznym stopniu od implementacji najnowocześniejszych technologii automatyki przemysłowej oraz informatyki.

## 2. PODSYSTEM STEROWANIA WYTWARZANIEM

### 2.1. Zadania podsystemu sterowania wytwarzaniem oraz etapy budowy modelu zautomatyzowanego systemu wytwarzania

Podsystem sterowania wytwarzaniem jest odpowiedzialny za zapewnienie realizacji zadań produkcyjnych przedsiębiorstwa. Jest on ściśle powiązany zarówno z układami sterowania urządzeń wytwórczych, pełniących rolę wykonawców wypracowywanych w systemie sterowania decyzji, jak i z systemem nadrzędnym, który zarządza procesami produkcyjnymi realizowanymi w danym przedsiębiorstwie.

Podstawowe zadania podsystemu sterowania wytwarzaniem obejmują:

- krótkoterminowe planowanie zleceń, zgodnie z przyjętymi kryteriami oceny,
- przydzielanie zasobów (maszyny, środki transportowe, obsługa, narzędzia, materiały, palety, programy sterujące itp.) do wykonania czynności,
- inicjowanie czynności,
- koordynację współdziałania urządzeń wytwórczych w trakcie realizacji czynności,
- gromadzenie danych i monitorowanie realizowanych procesów,
- zwalnianie zasobów po zakończonej czynności,
- reagowanie na zakłócenia,
- współdziałanie z systemem nadrzędnym.

Współczesne zautomatyzowane systemy i procesy wytwarzania mają charakter dyskretny. Oznacza to, że rozważa się tylko zdarzenia początku i końca danej czynności, pomijając zmienność stanu zasobów w trakcie ich trwania. Decyzje odnośnie uruchamiania danej czyn-

ności powstają w takich systemach wyłącznie przed ich rozpoczęciem. Sterowanie dyskretnym systemem wytwarzania wymaga wcześniejszego opracowania modelu systemu wytwarzania. Proces sterowania wytwarzaniem realizowany jest bowiem poprzez przetwarzanie w czasie rzeczywistym jakiejś formy modelu systemu wytwarzania zapisanej w kodzie komputerowym. Do budowy takiego modelu zastosować można trzyetapową procedurę [7]. Etap pierwszy obejmuje dyskretyzację systemu wytwarzania, która jest arbitralnym (stosownym do potrzeb) postępowaniem, a jego wynikiem są dwa skończone zbiory: *zbiór zasobów (obiektów)* systemu realizujących proces produkcyjny oraz *zbiór czynności elementarnych*, wykonywanych (zazwyczaj wielokrotnie) sekwencyjnie lub współbieżnie, które ten proces tworzą. Wyodrębnianie zasobów przebiega zazwyczaj w sposób naturalny, według urządzeń, maszyn i modułów konstrukcyjnych. Stąd zbiór obiektów zwykle tworzą: obrabiarki, wózki, roboty, magazyny buforowe itd. Przyporządkowuje się im dowolne nazwy umowne lub używa się symboli katalogowych. Wyodrębniając czynności elementarne należy mieć na względzie nie tylko szczegółowość reprezentacji funkcji urządzeń systemu w jego modelu, ale także to, w jaki sposób i za pomocą jakich sterowników urządzenia są (lub będą) sterowane. Jest to ważne, gdyż do tych sterowników będą kierowane polecenia wykonywania czynności elementarnych i muszą one „umieć” je zrealizować. Można poprzestać na werbalnym opisie wyodrębnionych czynności, ale celowe jest, ze względu na późniejszą wygodę korzystania, przyporządkowanie im nazw symbolicznych lub mnemonicznych. Mnemoniczne nazwy czynności elementarnych w postaci łańcuchów znaków alfanumerycznych pisanych zgodnie z ustaloną konwencją, są chyba najbardziej godne polecenia, gdyż umożliwiają kodowanie w nich rozmaitych użytecznych informacji.

W ramach etapu drugiego tworzona jest struktura modelu. Najogólniej biorąc chodzi tutaj o powiązanie zasobów z czynnościami elementarnymi, w których one uczestniczą. Określa się sposób działania poszczególnych obiektów przez podanie dopuszczalnej kolejności wykonywanych przez nie czynności. Specyfikuje się także zbiór zasobów niezbędnych do wykonania danej czynności. Inaczej rzecz ujmując, są tutaj formułowane zasady (reguły) możliwej współpracy zasobów przy wspólnej realizacji poszczególnych czynności elementarnych. Aby zasady te mogły być zapisane, musi istnieć sposób tłumaczenia różnych opisów działania zasobów na jakiś „wspólny język”. Najprostszym rozwiązaniem jest oczywiście przyjęcie identycznego opisu dla wszystkich zasobów, co eliminuje konieczność interpretacji i „dopasowywania” różnych modeli.

W ramach etapu trzeciego budowy modelu dokonywany jest wybór czynności do realizacji. Aby tego dokonać należy opracować algorytmy eliminujące możliwość powstawania blokad (zastojów) oraz zapewniające optymalne sterowanie z punktu widzenia przyjętych kryteriów oceny pracy systemu.

## 2.2. Dwa sposoby podejścia do budowy podsystemu sterowania wytwarzaniem

Realizowane dotychczas prace o charakterze aplikacyjnym koncentrują się na modelowaniu zagadnienia, opracowywaniu algorytmów unikania blokad i harmonogramowania oraz formułowaniu określonych koncepcji sterowania, takich jak sterowanie centralne, rozproszone czy też holoniczne. Należy tu jednak podkreślić, że zdecydowana większość tych prac reprezentuje jednolity pogląd na proces tworzenia podsystemu sterowania wytwarzaniem. Sposób ten można nazwać dekompozycyjnym. Zakłada on bowiem posiadanie a priori pełnej informacji na temat systemu wytwarzania. Do realizacji procesu sterowania tym systemem wymagana więc jest jego dekompozycja czyli określenie zbioru zasobów, zbioru realizowanych czynności itp. Można jednak na system wytwarzania spojrzeć również z innej strony. To spojrzenie

reprezentuje punkt widzenia inteligentnych zasobów (urządzeń wytwórczych). Urządzenia te, dysponując określonymi możliwościami wytwórczymi oraz inteligencją przejawiającą się m.in. poprzez zdolność do podejmowania właściwych decyzji, a ponadto wyposażone w umiejętność komunikowania się z innymi urządzeniami, otwierają pole do realizacji podejścia agregacyjnego. W tej koncepcji system wytwarzania powstaje poprzez agregację inteligentnych urządzeń wytwórczych. Specyfika tego podejścia polega przede wszystkim na tym, że proces agregacji może odbywać się na podstawie samodzielnych decyzji układów sterowania tych urządzeń. Mamy więc dwie różne filozofie tworzenia systemu sterowania wytwarzaniem: podejście agregacyjne, które możemy nazwać „oddolnym” (ang. *bottom-up approach*) i podejście dekompozycyjne, które reprezentuje klasyczne „odgórne” (ang. *top-down approach*) spojrzenie na ten problem. Zarówno w przypadku zastosowania do budowy podsystemu sterowania wytwarzaniem podejścia odgórnego jak i podejścia oddolnego niezbędne jest precyzyjne określenie zbioru zasobów tworzących system oraz zbioru czynności elementarnych realizowanych przez te zasoby. Istotną rolę w procesie budowy podsystemu sterowania odgrywa poziom szczegółowości dyskretyzacji zwany ziarnistością (ang. *granularity*). Im drobniejsze ziarno (większa liczba zasobów), tym z jednej strony trudniejsza analiza zachowań systemu oraz bardziej złożony sposób jego sterowania, a z drugiej strony tym większa szansa współbieżnej realizacji wielu działań, a co za tym idzie – możliwość uzyskania bardziej efektywnej pracy systemu. Najczęściej dyskretyzacji dokonuje się „na poziomie” wykorzystywanych w tych systemach urządzeń. Podstawową zaletą takiego podejścia jest fakt, że system sterowania tworzą elementy, które można nazwać autonomicznymi, mają one bowiem najczęściej własne sterowniki i mogą wykonywać określony zbiór działań samodzielnie lub we współdziałaniu z innymi elementami. Inną zaletą takiego podejścia jest także to, że prowadzi ono do traktowania czynności elementarnych realizowanych przez zasoby jako czynności wykorzystywane przez projektujących procesy produkcyjne technologów. Umożliwia to prosty i przejrzysty sposób analizy zachowań systemu oraz pozwala na szybką ocenę stopnia zaawansowania realizowanych w nim procesów. Biorąc pod uwagę zarówno zbiór zasobów tworzących system jak i zbiór czynności elementarnych realizowanych przez te zasoby można powiedzieć, że różnica pomiędzy podejściem *top-down* a *bottom-up* polega na tym, że dla pierwszego z nich zbiory te są tworzone poprzez arbitralne decyzje projektanta na etapie budowy systemu, podczas gdy dla drugiego przyjmuje się, że zostały one wcześniej określone (narzucone) i stanowią pewnego rodzaju ograniczenie w procesie samokreowania się systemu. Można sobie bowiem wyobrazić zbiór inteligentnych agentów reprezentujących urządzenia produkcyjne, takie jak: obrabiarki, roboty, wózki czy magazyny, wyposażonych w uniwersalne, konfigurowalne układy sterowania, które – wykorzystując wspólną magistralę komunikacyjną – tworzą system produkcyjny o charakterze samoorganizującym według technologii *włącz i działaj* (ang. *plug and play*). Tego typu rozwiązania wykorzystywane są z powodzeniem od wielu lat w procesie konfigurowania komputerów osobistych. Konwergencja komputera i układu sterowania urządzeń wytwórczych otwiera nowe możliwości we wprowadzaniu inteligencji do tych urządzeń. Dzięki zastosowaniu układów wizyjnych oraz techniki rozpoznawania obrazów będzie można zapewne w nieodległej przyszłości np. rozpoznawać przedmioty obrabiane, dobierać dla nich odpowiedni osprzęt mocujący, programy numeryczne itp. Takie rozwiązanie może się dzisiaj wydawać nazbyt futurystyczne, i to nie tylko z punktu widzenia jego złożoności informatycznej, ale także ze względu na to, że większość urządzeń wytwórczych charakteryzuje się całkowitym brakiem mobilności lub jedynie ograniczoną mobilnością. Trudno sobie wyobrazić samokreowanie systemu wytwarzania np. poprzez przemieszczanie się obrabiarek. Wymagania technologiczne, takie jak zapewnienie do-

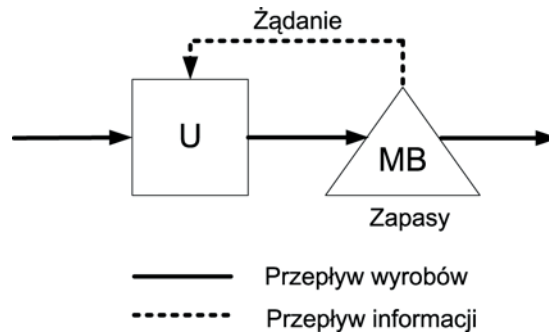
kładności wymiarowej oraz jakości wyrobów narzucają bowiem konieczność wysokiej precyzji ich bazowania. Stąd jedynym rozsądnym sposobem na wprowadzenie tej koncepcji jest zastosowanie inteligentnych i mobilnych środków transportowych, takich jak AGV i manipulacyjnych, takich jak roboty. Zastosowanie odpowiedniej liczby takich urządzeń umożliwi samokreowanie się systemu wytwarzania w zależności od potrzeb wyrażanych np. poprzez zamówienia klientów. W przedsiębiorstwie zajmującym się wytwarzaniem wyrobów można więc będzie tworzyć różne systemy wytwórcze w zależności od wymagań rynku. Zapewnienie fizycznej możliwości współpracy urządzeń wytwórczych jest warunkiem koniecznym ale niewystarczającym samokreowania się systemu sterowania wytwarzaniem. Aby proces ten mógł być zrealizowany, należy zdefiniować „wspólny język”, dzięki któremu urządzenia wytwórcze będą mogły w sposób jednoznaczny zaprezentować swoje możliwości wytwórcze, zdolność do współpracy itp.

Zjawisko rozproszenia w systemach wytwarzania jest aktualnie traktowane jako jeden z najistotniejszych czynników umożliwiających nadanie nowego impulsu rozwojowego tym systemom. Rozproszenie inteligencji pomiędzy urządzenia wytwórcze oznacza, że bardzo istotną rolę w procesie sterowania wytwarzaniem odgrywała będzie wymiana informacji. Podstawowym problemem ograniczającym zastosowanie sterowania rozproszonego była przez wiele lat kwestia możliwości efektywnego i niezawodnego przekazywania informacji w środowisku rozproszonym. Obecnie zagadnienie to nie stanowi już żadnego problemu. Można wręcz powiedzieć, że dzisiaj mamy do czynienia z nadmiarem odpowiednich narzędzi. Technologią informatyczną, której zastosowanie w systemie sterowania rokuje obecnie największe nadzieje, jest technologia agentowa [1, 5, 6, 12, 14, 17, 18, 20, 25]. Podstawowe cechy agenta to inteligencja (wynikająca z jego autonomii decyzyjnej i zastosowanych algorytmów podejmowania decyzji), zdolność do współpracy z innymi agentami oraz możliwości komunikacyjne. Podejście agentowe odpowiada więc bezpośrednio potrzebom stawianym przez rozproszone systemy sterowania wytwarzaniem, w tym omawianą wyżej filozofię samokreowania się systemu wytwarzania poprzez agregację urządzeń wytwórczych. Poszczególne urządzenia wytwórcze wraz z ich układami sterowania mogą więc być reprezentowane poprzez uniwersalne, konfigurowalne agenty zasobowe. Dzięki temu możemy zdefiniować rozproszone sterowanie zautomatyzowanym systemem wytwarzania jako wykorzystanie autonomicznych i inteligentnych jednostek wytwórczych tworzących ten system do uruchamiania, nadzorowania i zapewnienia realizacji zadań procesu wytwórczego przy uwzględnieniu przyjętych kryteriów jego oceny.

### **3. PRZYKŁADY BUDOWY PODSYSTEMU STEROWANIA WYTWARZANIEM W OPARCIU O INTEGRACJĘ JEDNOLITYCH, KONFIGUROWALNYCH MODUŁÓW**

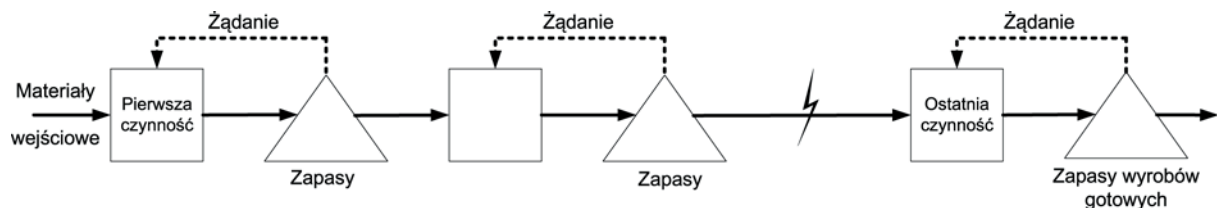
Przyjęcie założenia o uniwersalności agentów zasobowych umożliwia budowę podsystemu sterowania nie w oparciu o skomplikowane reguły działania i złożoną strukturę powiązań, lecz na zasadzie oddolnej integracji w środowisku sieciowym jednolitych, konfigurowalnych modułów o prostej strukturze i prostych regułach działania. Takie systemy można nazwać systemami złożonymi [9, 10, 16] gdyż ich działanie polega na współdziałaniu wielu obiektów o identycznych algorytmach działania. Jednym z dobrze znanych systemów zarządzania jest system JIT. Spośród wielu celów filozofii JIT [4] za najważniejszy uznaje się minimalizację zapasów w toku, co bezpośrednio wpływa na konieczność polepszenia jakości i produkcję bez braków. Zwraca się też 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 zaproponowanej w firmie Toyota techniki Kanban.



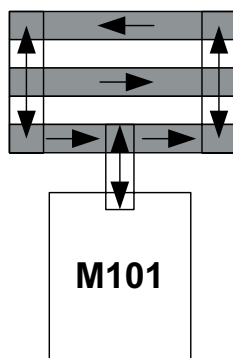
Rys. 1. Obiekt elementarny systemu wytwarzającego wykorzystującego technikę Kanban

Na rys. 1 przedstawiono elementarny moduł systemu wytwórczego złożony z urządzenia wytwórczego (U) i magazynu buforowego (MB). Algorytm systemu 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.



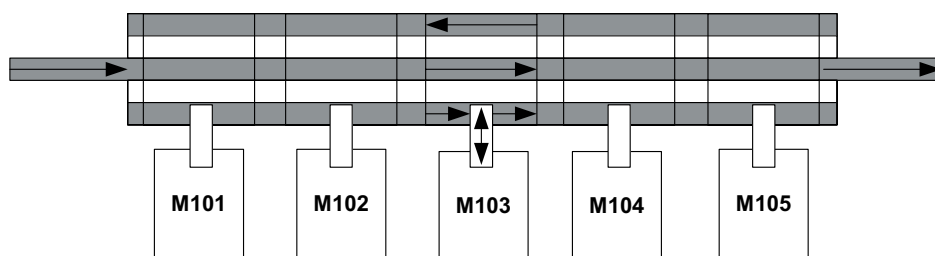
Rys. 2. Przykład systemu wytwarzającego wykorzystującego technikę Kanban

Drugi przykład pokazujący zasadę budowy podsystemu sterowania w oparciu o integrację jednolitych, konfigurowalnych modułów to rozwiązanie wdrożone w fabryce produkującej głowice silników w Stuttgart-Untertürkheim i należącej do koncernu DaimlerChrysler AG. Z inicjatywy koncernu powołano konsorcjum mające na celu zastosowanie nowych koncepcji systemów wytwarzania w przemyśle samochodowym. W ramach prac tego konsorcjum opracowano pilotażowe rozwiązanie WEST [5, 6]. 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 modułów (rys. 3) składa się z siedmiu podstawowych elementów, tj. maszyny, trzech jednokierunkowych przenośników, dwóch podajników i stołu przesuwanego. Każdy podajnik może przemieścić pojedynczą paletę, z każdego przenośnika wejściowego na każdy przenośnik wyjściowy.



Rys. 3. Standardowy moduł wytwórczy

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.

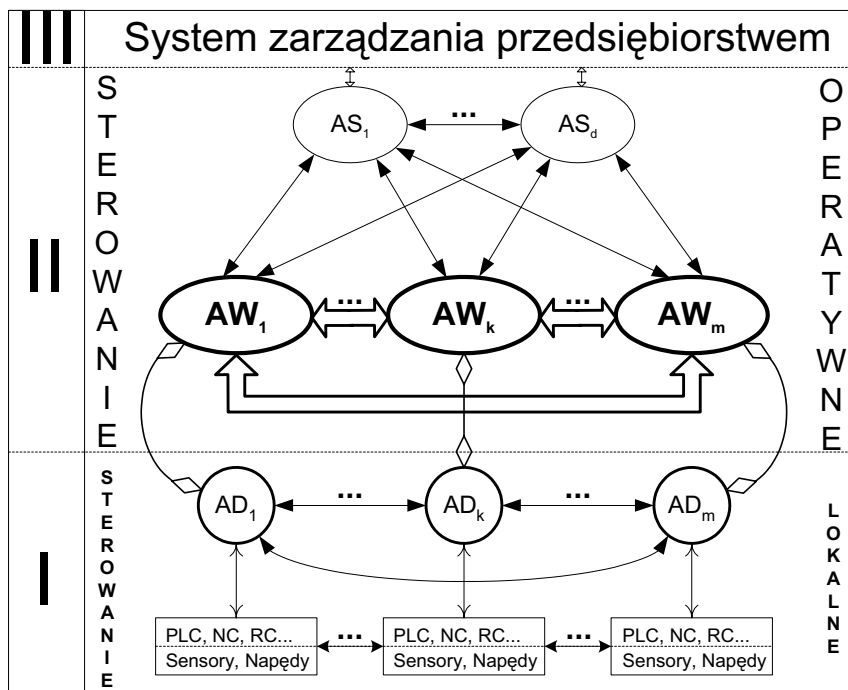


Rys. 4. Przykład systemu wytwarzania zbudowanego z elementarnych modułów wytwórczych

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 żadaną 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 jest zawsze obsługiwany jako pierwszy.

Trzecim przykładem prezentującym możliwość wykorzystania jednolitych, konfigurowalnych modułów do budowy podsystemu sterowania wytwarzaniem jest opracowany w Politechnice Krakowskiej samoorganizujący się system sterowania wytwarzaniem [25]. Zasadniczym elementem koncepcji budowy takiego systemu 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.



Rys. 5. Struktura powiązań komunikacyjnych w systemie sterowania wytwarzaniem o charakterze samoorganizującym

Przyjęcie koncepcji uniwersalnego agenta wytwórczego uniemożliwia jednak zrealizowanie niezbędnego dla procesu sterowania, bezpośredniego połączenia pomiędzy agentem wytwórczym a sterownikiem realnego urządzenia. Wynika to z dużej różnorodności stosowanych urządzeń wytwórczych oraz ich sterowników, a także z braku jednolitego, akceptowanego przez wszystkich standardu komunikacyjnego, jakim np. w sieciach komputerowych jest obecnie TCP/IP. Aby zapewnić współpracę pomiędzy agentem wytwórczym a sterownikiem urządzenia, wprowadzono do systemu sterowania wytwarzaniem moduł dostosowujący nazwany *agentem dostosowującym* (AD). Nie jest on modułem uniwersalnym i wymaga indywidualnego opracowania dla każdej pary urządzenie – sterownik. Całkowite rozproszenie przestrzeni decyzyjnej systemu wytwarzania pomiędzy agenty wytwórcze prowadzi do architektury w pełni zdecentralizowanej czyli heterarchicznej, w której brak jest możliwości wprowadzenia nadrzędnego sposobu oddziaływania na zachowanie agentów wytwórczych. Należy jednak zauważyć, że choć w praktyce każdy system wytwarzania budowany jest głównie z myślą o zapewnieniu jego efektywności ekonomicznej, to nawet w przypadku systemu wytwarzania o charakterze samoorganizującym powinna istnieć możliwość wpływu osoby zarządzającej systemem na jego funkcjonowanie. W proponowanej koncepcji systemu sterowania wytwarzaniem rolę elementów nadrzędnych przydzielono modułom programowym zwanym agentami systemowymi (AS). Ich zadanie, w odróżnieniu od modułów decyzyjnych w systemach sterowania scentralizowanego, nie polega jednak na przekazywaniu bezpośrednich poleceń do sterowników urządzeń wytwórczych. Wpływ agentów systemowych na decyzje w systemie wytwarzania o charakterze samoorganizującym realizowany jest w sposób pośredni poprzez przekazywanie agentom wytwórczym aktualnych preferencji osoby zarządzającej systemem. Ostateczne decyzje w systemie wytwarzania podejmuje zawsze agenty wytwórcze, uwzględniając jednak preferencje otrzymane od agentów systemowych. Można więc powiedzieć, że agenty systemowe pełnią w systemie sterowania wytwarzaniem rolę doradczą. Agenty te mogą być jednak wykorzystane również do realizacji innych zadań wymagających wiedzy o wybranej części bądź całości systemu wytwarzania. W praktyce pełnić mogą więc one w systemie sterowania role konfiguracyjne, koordynacyjne, wizualizacyjne lub też diagnostyczne. Ważną cechą proponowanej koncepcji jest jednak przyjęcie założenia, że system wytwarzania może działać także bez udziału agentów systemowych. Na rys. 5 przedstawiono strukturę powiązań komunikacyjnych elementów składowych systemu sterowania wytwarzaniem o charakterze samoorganizującym na tle poziomów decyzyjnych w planowaniu i sterowaniu produkcją. 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 dowolnej ze swoich czynności elementarnych, 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 odpo-

wiednim 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 (zastoju). Jeżeli stan blokady nie wystąpi, oznacza to, że czynność 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. Jedną z możliwych do zastosowania koncepcji wyboru czynności do wykonania bazuje na priorytetach. Wartości wskaźników priorytetów decyzyjnych poszczególnych czynności zależą od wielu różnych czynników, takich jak stan zaawansowania realizowanych procesów, stopień wykorzystania poszczególnych zasobów itp. Przyporządkowanie czynnościom priorytetów umożliwia zastosowanie heurystycznej reguły wyboru czynności do uruchomienia. Do wykonania przechodzi ta czynność, która spełnia warunki realizowalności i ma najwyższy wskaźnik priorytetu.

#### 4. PODSUMOWANIE

Zdolność systemu wytwarzania do spełniania wymagań współczesnego rynku konsumenta jest zależna od przyjętej architektury jego systemu sterowania. Jako przyszłościowe przyjmuje się architektury: hybrydową i rozproszoną. W odróżnieniu od systemów scentralizowanych i hierarchicznych wykorzystujących podejście, które można nazwać odgórnym, charakteryzujące się posiadaniem a priori pełnej informacji na temat systemu wytwarzania, systemy wykorzystujące architekturę hybrydową lub architekturę rozproszoną umożliwiają realizację odmiennej koncepcji tzw. podejścia oddolnego. Zastosowanie takiego podejścia otwiera możliwość wprowadzenia systemów rekonfigurowanych, odpornych na zakłócenia wynikające z awarii elementów systemu czy też przyjmowania losowo napływających zleceń [27]. Jednym ze sposobów budowy systemów sterowania zapewniających ich samokreowanie i rekonfigurację jest wykorzystanie integracji jednolitych, konfigurowalnych modułów.

#### 5. LITERATURA

- [1] BAUMGÄRTEL H., BUSSMANN S., KLOSTERBERG M., Multi-Agent Coordination of Material Flow in a Car Plant. Proc. of the 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Practical Applications of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology (PAAM'97), London 1997, s. 227-236.
- [2] BOOCH G., Rumbaugh J., Jacobson I., UML przewodnik użytkownika. WNT, 2001.
- [3] BRUCKNER S., WYNS J., PEETERS P., KOLLINGBAUM M., Designing Agents for the Manufacturing Control. Proc. of the Artificial Intelligence and Manufacturing Research Planning Workshop - State of the Art & State of the Practice, G.F. Luger (eds.), AAAI Press, Albuquerque 1998, s. 40-46.
- [4] BRZEZIŃSKI M., Organizacja i sterowanie produkcją. Projektowanie systemów produkcyjnych i procesów sterowania produkcją. Agencja Wydaw. PLACET, Warszawa 2002.
- [5] BUSSMANN S., SCHILD K., Self-Organization Manufacturing Control, An Industrial Application of Agent Technology. Proc. Of the 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Multi-Agent Systems, Boston 2000, s. 87-94.

- [6] BUSSMANN S., SCHILD K., An Agent-based Approach to the Control of Flexible Production Systems. Proc. of 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2001), Antibes Juan-les-pins 2001, s. 169-174.
- [7] CYKLIS J., PIERZCHAŁA W., ZAJĄC J., Centralne i rozproszone sterowanie zautomatyzowanym systemem wytwarzania. Inżynieria Maszyn, r. 5, z. 1-2, 2000, s. 193-205.
- [8] CYKLIS J., SŁOTA A., Coloured Object Observable Petri Nets in Modelling of Flexible Manufacturing Systems. Postępy w Technologii Maszyn i Urządzeń, vol. 23 1999, s. 7-19.
- [9] CYKLIS J., ZAJĄC J., Złożone systemy wytwarzania. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., Seria: Automatyka Z. 135, Gliwice 2002, s. 25-34.
- [10] DESHMUKH A., TALAVAGE J., BARASH M., Complexity in Manufacturing Systems: Part 1: Analysis of Static Complexity, IIE Transactions, vol. 30, no. 7, 1998.
- [11] IMS, Intelligent Manufacturing Systems Web Site, <http://www.ims.org>, 2007.
- [12] JENNINGS N., WOLDRIDGE M., Agent-Oriented Software Engineering. In Handbook of Agent Technology (ed. J. Bradshaw) AAAI/MIT Press., 2000.
- [13] KOREN Y., HEISEL U., JOVANE F., MORIWAKI T., PRITCHOW G., ULISOY G., VAN BRUSSEL H., Reconfigurable Manufacturing Systems. Annals of the CIRP 1999, Vol. 48, No. 2, s. 527-540.
- [14] MATURANA F., NORRIE D., Multi-Agent Mediator Architecture for Distributed Manufacturing. Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 7, 1996, s. 257-270.
- [15] MENGCHU Z., Peri Net in Flexible and Agile Automation. Kluwer Academic Publishers, Boston / Dordrecht / London, 1995.
- [16] PARUNAK H.V.D., Complexity Theory in Manufacturing Engineering: Conceptual Roles and Research Opportunities, Industrial Technology Institute Tech memo 93-01, Ann Arbor 1995.
- [17] PARUNAK H.V.D., A Practitioners' Review of Industrial Agent Applications. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems 3:4, 2000, s. 389-407.
- [18] PARUNAK H.V.D., BAKER A., CLARK S., The AARIA agent architecture: from manufacturing requirements to agent-based system design. In Workshop on Agent-based Manufacturing, Minneapolis 1998.
- [19] PRITSCHOW G., DANIEL C., Open Control System – a Future-Oriented Concept. Manufacturing Systems, Vol.25, No.1, 1996, s. 9-16.
- [20] 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.
- [21] UEDA K., Biological Manufacturing Systems and IMS Program. Proc. of 7<sup>th</sup> International DAAAM Symposium, Vienna 1996, s. 449-452.
- [22] VAN BRUSSEL H., Holonic Manufacturing Systems, the Vision Matching the Problem. Proc. of the 1<sup>st</sup> European Conf. on Holonic Manufacturing Systems, Hannover 1994.
- [23] VAN BRUSSEL H., WYNS J., VALCKENAERS P., BONGAERTS L., PEETERS P., Reference Architecture for Holonic Manufacturing Systems: PROSA. Computers In Industry, Special Issue on Intelligent Manuf. Systems, Vol. 37 No. 3, 1998, s. 255-276.
- [24] WARNECKE H.J., The Fractal Company – A Revolution in Corporate Culture, New York, Springer-Verlag 1993.
- [25] ZAJĄC J., Rozproszone sterowanie zautomatyzowanymi systemami wytwarzania Monografia 288, seria Mechanika. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2003.
- [26] ZAJĄC J., CHWAJOŁ G., Integracja informacji w systemach sterowania wytwarzaniem. Materiały z konferencji Automation'2005, PIAP, Warszawa 2005, s. 96-105.
- [27] ZAJĄC J., CHWAJOŁ G., KMIĘCIK A., Integracja projektowania procesów i sterowania produkcją w zautomatyzowanych systemach wytwarzania. Automation'2007, Pomiary Automatyka Robotyka Nr. 2, 2007.