

dr hab. inż. Jerzy Zając, prof. PK
mgr inż. Adam Kmieciak
Politechnika Krakowska

AGENCY DOSTOSOWUJĄCE W WIELOAGENTOWYM SYSTEMIE STEROWANIA NA PRZYKŁADZIE CENTRUM PRODUKCYJNEGO TOR

W pracy przedstawiono koncepcję agenta dostosowującego integrującego informacyjnie warstwę logiczną wieloagentowego systemu sterowania z systemem rzeczywistym na przykładzie Centrum Produkcyjnego TOR, które znajduje się w laboratorium Zakładu Zautomatyzowanych Systemów Produkcyjnych Politechniki Krakowskiej. Przedstawiono sposób działania agenta dostosowującego oraz zaprezentowano przyjęty dla tego systemu podział czynności elementarnych na akcje złożone z zadań.

INTERFACE AGENTS FOR MULTIAGENT CONTROL SYSTEM ON AN EXAMPLE OF TOR PRODUCTION CENTER

The paper presents a concept of interface agent which integrates logical and physical parts of multiagent manufacturing control system on an example of TOR Production Center situated in The Laboratory of Automated Production Systems Division at Cracow University of Technology. The way how the agent acts was shown. It takes advantage of division elementary activities into actions consisting of tasks.

1. WPROWADZENIE

Rozwój technologii informatycznych zarówno w zakresie sprzętowym jak i programowym, a także pojawienie się tanich sterowników posiadających duże możliwości konfiguracyjne oraz nowoczesne interfejsy komunikacyjne, umożliwiają budowę rozproszonych, rekonfigurowalnych, wieloagentowych systemów sterowania. Zbudowane są one z uniwersalnych konfigurowalnych modułów programowych zwanych agentami [8]. W bogatej bibliografii dotyczącej systemów produkcyjnych znaleźć można liczne pozycje poświęcone różnorodnym koncepcjom wykorzystania technologii agentowych do budowy systemów sterowania. Przedstawione tam rozwiązania wprowadzają często odmienne sposoby dyskretyzacji systemu, czego rezultatem są różne typy agentów. AARIA [5] jest wieloagentowym systemem sterowania produkcją, który wykorzystuje model dostawca-odbiorca, aby realizować proces produkcyjny zarówno wewnątrz pojedynczych jednostek, jak i pomiędzy partnerami tworzącymi łańcuch dostaw. W systemie AARIA wprowadzono następujące podstawowe typy agentów: proces jednostkowy, zasób, zarządzający, przedmiot, klient oraz dostawca. Dla koncepcji holonicznej (system PROSA) [7] wprowadzono trzy podstawowe typy agentów (zwanych w tej koncepcji holonami), tzn. agent wyrobu, zasobu i zamówienia. Występują również dodatkowo tzw. agenty doradcze pełniące role agentów systemowych. Dla systemu metamorficznego MetaMorph [3] wprowadzono natomiast agenty zasobowe, przedmiotowe oraz mediacyjne. W wieloagentowym systemie sterowania opracowanym w Politechnice Krakowskiej [9] wprowadzono agenty zasobowe, dostosowujące i systemowe. A w jego nowej wersji – systemie AIM[10][11] agenty zasobowe, przedmiotowe, zleceń, systemowe oraz agenta technologa. Z kolei dla systemu WEST [1] wyróżniono jedynie agenty: przedmiot, maszyna i podajnik. Jak widać z wymienionych przykładów, w systemach sterowania produkcją występują

zawsze agenty zasobowe – pełniąc rolę agenta obróbkowego, transportowego, manipulacyjnego, inspekcyjnego czy też magazynowego.

Biorąc pod uwagę zautomatyzowane systemy produkcyjne, najlepszym sposobem ich dyskretyzacji jest przyjęcie, że agentami zasobowymi są poszczególne urządzenia, tzn. obrabiarki, roboty, wózki, magazyny itp. Podejście takie stosowane jest w zdecydowanej większości prac poświęconych problematyce sterowania systemami produkcyjnymi. Podstawową jego zaletą 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 fakt, że prowadzi ono do traktowania czynności elementarnych realizowanych przez agenty zasobowe jako czynności wykorzystywanych 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. Zarówno w przypadku zastosowania do budowy systemu sterowania produkcją podejścia odgórnego (ang. *top-down approach*), jak i podejścia oddolnego (ang. *bottom-up approach*) niezbędne jest precyzyjne określenie zbioru agentów tworzących system oraz zbioru czynności elementarnych realizowanych przez te agenty. Biorąc pod uwagę obydwa te zbiory 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 stanowią jedynie 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 w procesie konfigurowania komputerów PC.

Integracja wieloagentowego systemu sterowania, zbudowanego z uniwersalnych, konfigurowalnych modułów programowych, z systemem rzeczywistym, charakteryzującym się różnorodnością zastosowanych rozwiązań sprzętowych i programowych, wymaga opracowania dla poszczególnych zasobów odpowiednich agentów dostosowujących. Agent taki pełni rolę elementu pośredniczącego (interfejsu) pomiędzy agentem zasobowym a „podlegającym mu” sterownikiem fizycznego zasobu. Ze względu na tę rolę agent dostosowujący nie może mieć uniwersalnego charakteru, lecz musi być dedykowany do wykorzystywanych w poszczególnych urządzeniach sterowników. W dalszej części pracy zaprezentowano procedurę opracowywania agentów dostosowujących dla systemu TOR znajdującego się w Laboratorium Zakładu Zautomatyzowanych Systemów Produkcyjnych Politechniki Krakowskiej.

2. AGENTY DOSTOSOWUJĄCE W SYSTEMIE TOR

W skład Centrum Produkcyjnego TOR (fot. 1) wchodzi: *magazyn regalowy MR*, w którym znajdują się palety zawierające produkowane przedmioty; *wózek szynowy WS* przemieszczający palety pomiędzy poszczególnymi stacjami centrum; *stacja załadowczo-rozładowcza SZR* służąca do załadunku półfabrykatów na palety i rozładunku gotowych przedmiotów z palet oraz dwie *stacje obróbkowe*. Każda ze stacji obróbkowych zawiera: *obrabiarkę O* (tokarka TKX50NS), *zmienniczkę palet ZP* oraz wyposażony w dwa chwytaki umożliwiający ładowanie i rozładowanie obrabiarki *podajnik przedmiotów PP*. Dla każdej stacji obróbkowej i stacji załadowczo-rozładowczej występuje dwumiejscowy *bufor wejściowo-wyjściowy IN-OUT*,

z którym z jednej strony współpracuje wózek szynowy, a z drugiej zmieniacz palet. W skład wieloagentowego systemu sterowania AIM CP TOR wchodzi następujące agenty zasobowe:

- dwa agenty stacji obróbkowych,
- agent stacji załadowczo-rozładowczej,
- trzy agenty buforów wejściowo-wyściowych,
- agent wózka szynowego,
- agent magazynu regałowego.



Fot. 1. Centrum Produkcyjne TOR

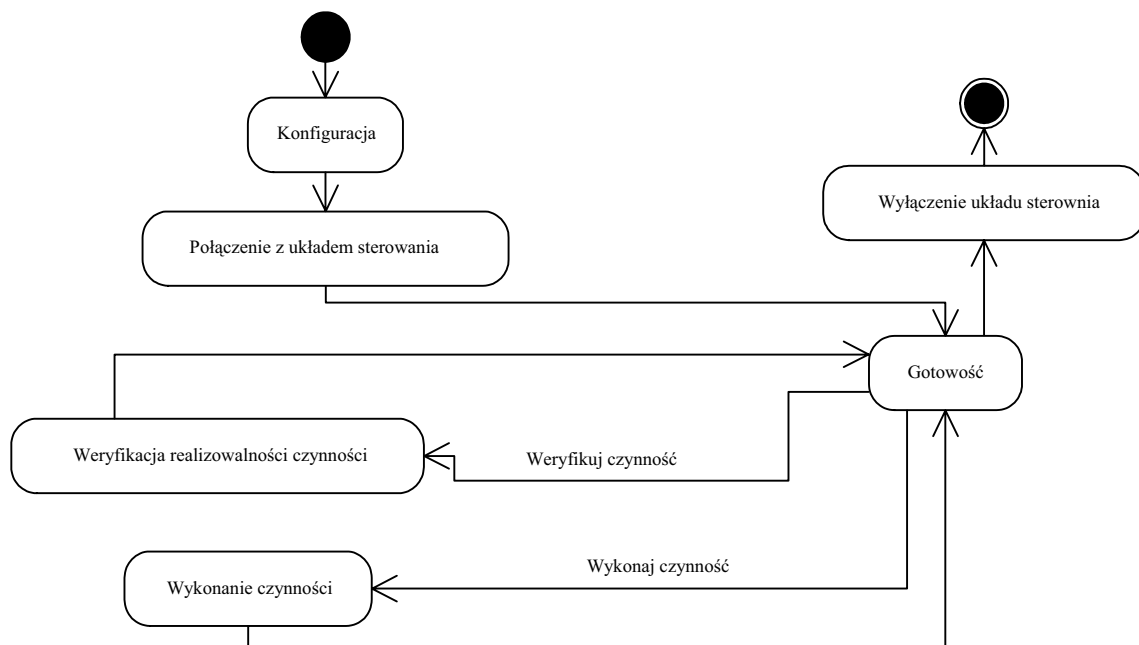
Agenty zasobowe okazują swoją aktywność poprzez realizację przynależnych im czynności elementarnych. Każdy z agentów zasobowych, biorących udział w realizacji danej czynności, współdziała z odpowiadającym mu agentem dostosowującym.

Zasadnicze zadania agenta dostosowującego to:

- zarządzanie informacjami dotyczącymi problematyki realizacji czynności elementarnych w tym ewentualnych wariantów ich realizacji,
- weryfikacja możliwości realizacji czynności w oparciu o dostępność niezbędnych elementów takich jak programy NC, narzędzia czy też uchwyty, a także sprawdzenie gotowości urządzeń do jej realizacji,
- zapewnienie wymiany informacji ze sprzętowymi urządzeniami sterującymi,
- realizacja czynności jako uporządkowanego zbioru akcji wykonywanych przez sprzętowy sterownik zasobu,
- nadzorowanie wykonywania czynności,
- zwracanie agentowi zasobowemu informacji o czasie i koszcie zrealizowanej czynności,

- gromadzenie informacji o wykorzystywanych narzędziach i dostępnych okresach ich trwałości (dla zasobów obróbkowych).

Diagram stanów pokazany na rys. 1 przedstawia działanie agenta dostosowującego. Agent dostosowujący znajduje się w jednym z następujących stanów: *konfiguracja* to stan inicjujący jednorazowe działanie polegające na wczytaniu niezbędnych informacji z pliku konfiguracyjnego; *połączenie z układem sterowania* to stan inicjujący proces połączenia agenta dostosowującego z częścią sprzętową systemu sterownia; *gotowość* to stan bazowy umożliwiający przejście do stanów *weryfikacja realizowalności czynności* oraz *wykonanie czynności*, które inicjują zasadnicze działania agenta dostosowującego. Ich realizacja rozpoczyna się w momencie, gdy agent dostosowujący otrzyma odpowiednie polecenie od swojego agenta zasobowego. Dodatkowo występuje również stan *wyłączenie układu sterownia* pozwalający na wyłączenie agenta dostosowującego w sposób kontrolowany.



Rys. 1. Działanie agenta dostosowującego

Na rys. 2 przedstawiono widok fragmentu pliku konfiguracyjnego agenta dostosowującego stacji obróbkowej. Pliki konfiguracyjne zapisywane są w formacie xml. Dane zawierają między innymi nazwę identyfikującą agenta dostosowującego oraz listę czynności, akcji i zadań, w których realizacji ten uczestniczy.

W przyjętej koncepcji opracowania agentów dostosowujących, dla poszczególnych zasobów systemu TOR założono, że ze względu na ogólny charakter czynności rozpatrywanych na poziomie logicznym systemu sterowania, czyli takich jak np. pobranie palety, transport palety, obróbka przedmiotów z palety itp. niezbędnym jest wprowadzenie podziału czynności elementarnych na zadania elementarne odpowiadające zaprogramowanym wcześniej działaniom sterowników PLC lub CNC, czyli takich jak np. otwarcie szczęk chwytaka czy też uniesienie palety przez zmieniacz palet. Przyjęto, że zadania te mogą być realizowane asynchronicznie. Aby uprościć opracowywanie agenta dostosowującego założono również, że istnieje możliwość grupowania zadań elementarnych w akcje takie jak np. pobranie palety z magazynu, które to akcje mogły być realizowane sekwencyjnie lub współbieżnie. Oznacza to, że czynności elementarne dzielone są na akcje złożone z zadań [12].

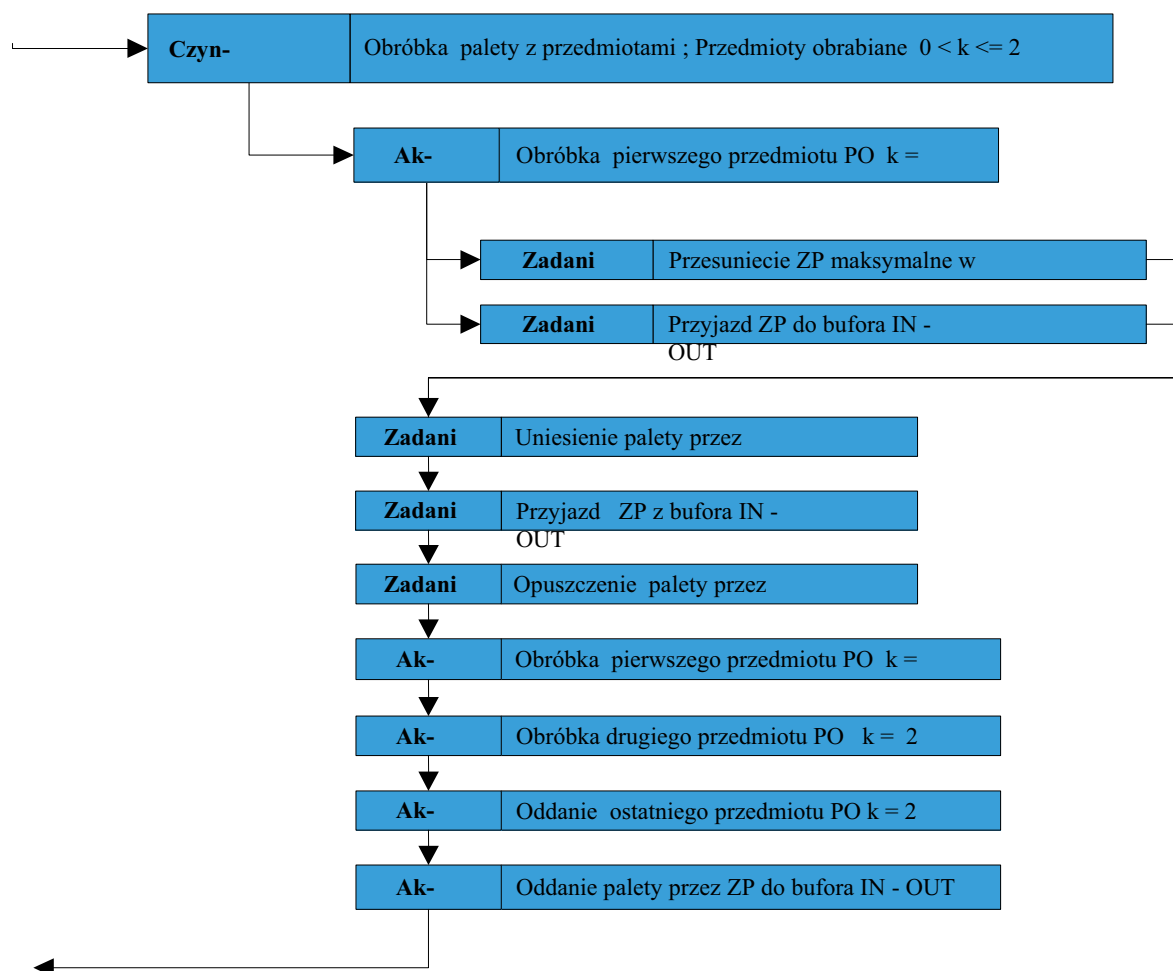
[-] [e] driver	
[a] name	stacja obróbkowa
[a] id	1
[-] [e] ListActivity	
+ [e] activity	
[-] [e] ListAction	
[-] [e] Action	
[a] id	1
[a] name	P-P-M
[e] description	Pobranie Palety z Magazynu
+ [e] ListTaks	
[-] [e] ListTasks	
[-] [e] task	
[a] id	1
[a] name	CHO1
[e] description	Otwarcie szczek chywyta 1
[-] [e] taskSet	
[a] plc	1
[a] area	J3
[a] address	#003458
[a] length	1
+ [e] taskGet	
+ [e] task	
+ [e] task	
+ [e] task	

Rys. 2. Widok fragmentu pliku konfiguracyjnego agenta dostosowującego stacji obróbkowej

Na rys. 3 przedstawiono przykład podziału czynności obróbka palety na odpowiednie akcje i zadania. Dla uproszczenia rysunku przyjęto, że na palecie znajdują się dwa przedmioty. Czynność ta jest uporządkowaną sekwencją akcji: pobranie palety z bufora IN-OUT przez ZP, obróbka pierwszego przedmiotu, obróbka drugiego przedmiotu z palety, oddanie ostatniego przedmiotu, oddanie palety przez zmieniacz palet ZP do bufora IN-OUT. Rozwinięta została też jedna z akcji tj. pobranie palety z bufora IN-OUT przez ZP, której zadania wykonywane są zarówno sekwencyjnie jak i równolegle.

Na rys. 4 pokazany został ogólny model UML [11] czynności *obróbka palety* dla n przedmiotów obrabianych przedstawiony w postaci diagramu aktywności. Jeżeli liczba przedmiotów n przeznaczonych do obróbki na palecie równa jest jeden realizowana jest akcja *obróbka pojedynczego przedmiotu*. W przypadku gdy liczba ta jest większa od jednego następuje sekwencja akcji: *obróbka pierwszego przedmiotu*, $n-1$ krotne wykonanie akcji *obróbka przedmiotu*, zgodnie z podanym algorytmem opartym na inkrementacji $k = k+1$, jednokrotnie wykonanie akcji *oddanie ostatniego przedmiotu*. Czynność w obu przypadkach kończy się wykonaniem akcji *oddanie palety*. Akcja *obróbka pierwszego przedmiotu* nie musi dotyczyć przedmiotu, który jest pierwszym przedmiotem na palecie. Wynika to np. z możliwości nie obsadzenia palety pełną liczbą przedmiotów, które może ona pomieścić. Przebieg akcji zakłada załadowanie obrabiarki pierwszym przedmiotem $k = 1$, powrót podajnika wałków do pozycji pobrania następnego przedmiotu oraz pobranie przedmiotu drugiego przeznaczonego do obróbki. Na akcje obróbki przedmiotu k składa się odebranie przez podajnik wałków z tokarki

obrobionego $k-1$ przedmiotu, oddanie go na paletę w miejsce skąd został pobrany oraz załadowanie obrabiarki k -tym przedmiotem obrabianym i jego obróbka.

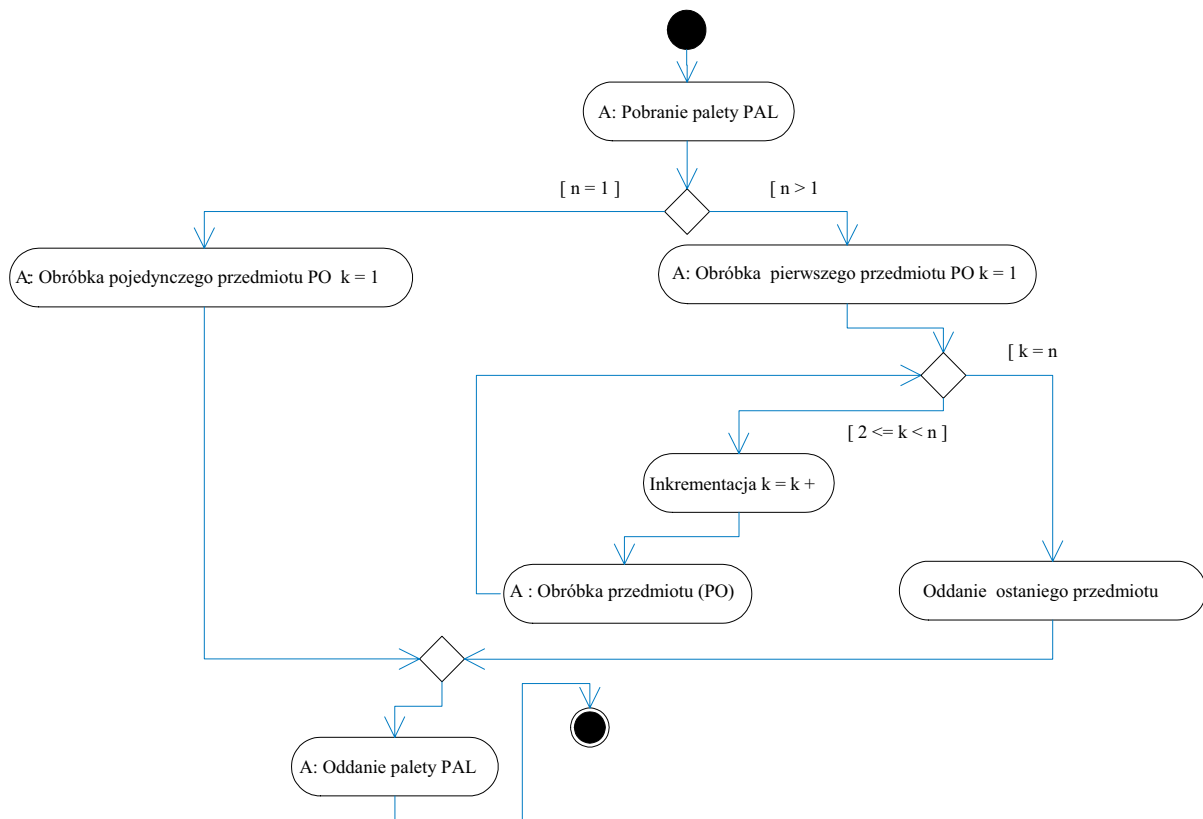


Rys. 3. Struktura czynności *obróbka palety*

Akcja oddanie ostatniego przedmiotu to jego odebranie z maszyny i oddanie na pozycję skąd został pobrany. Istotną cechą realizowanych czynności jest ich zdolność do rekonfiguracji wynikająca z:

- istnienia wariantów realizacyjnych posiadających różne czasy i koszty czyli występowania alternatywnych sekwencji akcji powstałych na skutek zastosowania różnego oprzyrządowania wymiennego (narzędzia, uchwyty) oraz programów NC,
- zmian w warunkach wejściowych lokalnych (kilka typów palet),
- zmian w warunkach wyjściowych (pusta paleta na w buforze wyjściowym),
- działań kontrolno-pomiarowych (pojawienia się braków),
- awarii narzędzi.

Dla przedstawianej przykładowej czynności dane wejściowe: typ palety, liczba przedmiotów obrabianych na paletce, lokalizacja pobrania i oddalania palety w buforze wejściowo-wyjściowym w sposób znaczący wpływają na przebieg realizacji wykonywanej czynności.



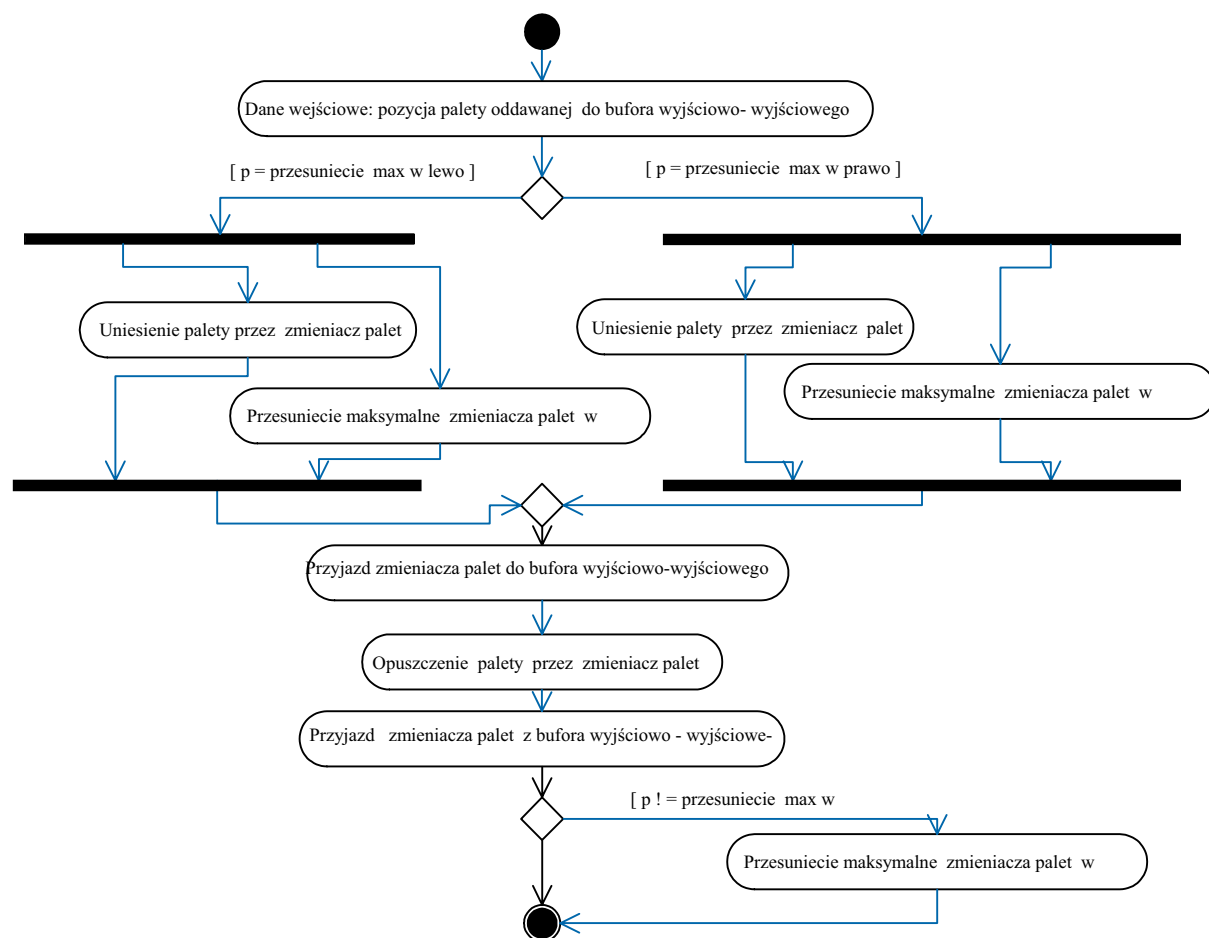
Rys. 4. Model czynności obróbka palety

Diagram aktywności z rys. 5 przedstawia możliwości konfiguracji akcji *oddanie palety do bufora wejściowo-wyjściowego* wynikające z możliwości zajęcia przez zmieniacz palet dwóch różnych pozycji. Na podstawie informacji gdzie zmieniacz ma oddać paletę podejmowana jest decyzja, jaka sekwencja zadań ma być wykonana. Możliwe są dwie realizacje, które przesuwają zmieniacz w pozycje skrajną lewą lub prawą przy równoczesnym uniesieniu palety. Następnie zmieniacz zawozi paletę do bufora wejściowo-wyjściowego gdzie ją umieszcza i wraca do pozycji bazowej – skrajne lewe przesunięcie.

Akcje ze względu na dynamiczne zmiany w środowisku produkcyjnym („pozycja palety oddawanej do bufora wyjściowo-wyjściowego”) ulegają rekonfiguracji opartej na prostych regułach zapisanych na sztywno w opracowanej aplikacji agenta dostosowującego. Jego zasadniczą rolą jest skuteczna realizacja czynność we współpracy z zastosowanym sterownikiem zasobu przy ściśle określonych danych wejściowych.

W aspekcie planowania i sterowania produkcją czynność elementarna (operacja) jest działaniem podstawowym, które na tej samej maszynie technologicznej może być realizowane w różny sposób. Zazwyczaj istnieje możliwość opracowania wielu wariantów tej samej czynności różniących się m. in. kosztem i czasem wykonania, co wynika np. z zastosowanego oprzyrządowania przedmiotowego i narzędziowego. Agent dostosowujący weryfikując możliwości realizacji czynności (w tym jej wariantów) określa zdolność do realizacji różnych konfiguracji stanowiska wytwarzania wynikającą z zastosowania różnego oprzyrządowania wymiennego. W elastycznych systemach wytwarzania wymienne oprzyrządowanie narzędziowe przechowywane jest w centralnym magazynie oraz lokalnych magazynach obrabiarek (głowica narzędziowa). Pojemności tych lokalnych magazynów są ograniczone. Wynika stąd, że nie wszystkie narzędzia wymagane w procesach wytwarzania mogą być dostępne przez

cały okres produkcji. Agent dostosowujący musi zatem stwierdzić, czy dla rozpatrywanego wariantu czynności wymagane narzędzia są aktualnie osiągalne.



Rys. 5. Model akcji *oddanie palety do bufora IN-OUT przez zmieniacz palet ZP*

Brak narzędzia, jego uszkodzenie lub kończący się okres trwałości powodują, że czynność nie może być realizowana. Istotnym zadaniem agenta dostosowującego jest zatem również gromadzenie informacji o wykorzystywanych narzędziach i dostępnych okresach ich trwałości, od których to danych w sposób istotny zależy właściwe funkcjonowanie całego systemu wytwarzania. Obsługa gospodarki narzędziowej musi zapewniać bieżące gromadzenie i aktualizowanie informacji o wszystkich narzędziach znajdujących się w systemie. Każde narzędzie powinno być łatwo zlokalizowane w systemie, jego zużycie na bieżąco śledzone, a odpowiednie dane gromadzone w bazie danych. Zbierane na bieżąco dane dla narzędziowej bazy danych obejmują: kody poszczególnych narzędzi, które umieszcza się w gniazdach narzędziowych każdego magazynu narzędzi. Dla śledzenia przepływu narzędzi wykorzystuje się zazwyczaj kody kreskowe. Nalepka z kodem kreskowym umieszczona jest na oprawce narzędzia lub w indywidualnym gnieździe narzędziowym w magazynie narzędzi. Alternatywnym rozwiązaniem dla systemu kodu kreskowego są programowalne układy scalone lub inne nośniki informacji umieszczone w oprawce narzędzia, z których odczyt odbywa się za pomocą stykowych lub bezstykowych czytników indukcyjnych. Informacje zbierane przez agenta dostosowującego dostępne są w relacyjnej bazie danych opartej na środowisku PostgreSQL [6] wykorzystanej zarówno do planowania, jak i monitorowania działalności związanej z uży-

ciem narzędzi. Podobnie wygląda sytuacja z dostępnością programów NC w pamięci sterownika.

Szczególnym przypadkiem zadań realizowanych przez agenta dostosowującego jest obsługa niezbędnych do realizacji czynności programów NC. Na przykład, gdy ma być wykonywana czynność, dla której program NC nie jest dostępny w sterowniku, agent dostosowujący musi zapewnić załadowanie programu z zewnętrznego źródła. Konieczne są wtedy operacje na zbiorach danych np. usunięcie części programów i wpisanie nowego. Nadzorowanie wykonywanych zadań wymaga zatem odczytu i zapisu danych z i do źródeł zewnętrznych. Źródłem takich danych może być np. sterownik PLC, baza danych, plik na dysku, karta wejść/wyjść w komputerze itd. Możliwości komunikacyjne ze sterownikami PLC są stosunkowo szerokie - można komunikować się przy pomocy różnych protokołów komunikacyjnych (PROFIBUS, Ethernet przemysłowy) poprzez różnego rodzaju interfejsy komunikacyjne (MPI, PPI). Wybór odpowiedniego połączenia komunikacyjnego jest kwestią zarówno techniczną (wymagana szybkość połączenia, topologia połączenia, itd.) jak i ekonomiczną. W ramach realizowanego projektu do kontroli i wymiany danych pomiędzy sterownikami a agentami dostosowującymi opracowane zostało rozszerzenie darmowej biblioteki libnodave [2]. Do komunikacji wykorzystano rodzinę protokołów TCP/IP. Obszar danych wymienianych podzielony został na kilka odrębnych części, odpowiedzialnych za przechowywanie danych specyficznych dla różnego rodzaju zastosowań. Przy określaniu obszarów danych podawany jest symbol obszaru (akronim, prefiks), a położenie danych wewnątrz każdego obszaru danych określone jest przez ich adresy. Adres określa bit lub słowo wewnątrz obszaru, gdzie żądana dana jest umieszczona. Dane zostały podzielone na dwa obszary:

- bitów wejściowych, które są używane do wprowadzania do sterownika sygnałów z otoczenia,
- bitów wyjściowych, które są używane do wyprowadzania rezultatów wykonywanego programu.

3. PODSUMOWANIE

Opracowanie wieloagentowego systemu sterowania systemem rzeczywistym wymaga opracowania modułów programowych pełniących rolę interfejsów pomiędzy logiczną częścią systemu - mającą charakter uniwersalny, a częścią sprzętową – specyficzną dla każdego systemu). Przyjęto, że interfejsem takim będzie agent dostosowujący. Agent dostosowujący posiada informacje o sposobie realizacji czynności elementarnych zdefiniowanych dla agentów wytwórczych. Na tej podstawie, po otrzymaniu polecenia wykonania czynności, steruje pracą urządzeń systemu poprzez sterowniki PLC i CNC. W artykule opisano koncepcję agenta dostosowującego dla stacji obróbkowej systemu TOR. Przedstawiono sposób podziału czynności na akcje i zadania elementarne oraz zaproponowano możliwość wariantowej realizacji czynności.

4. LITERATURA

- [1] Bussmann S., Schild K.: Self-Organizing Manufacturing Control: An Industrial Application of Agent Technology. In: Proc. of the 4th Int. Conf. on Multi-Agent Systems. Boston 2000, p. 87-94.
- [2] Libnodave - Exchange data with Siemens PLCs <http://libnodave.sourceforge.net/>

- [3] Maturana F., Shen W., Norrie D.H.: MetaMorph: An Adaptive Agent-Based Architecture for Intelligent Manufacturing. *International J. Production Research*, Vol. 37, No. 10, 1999, p. 2159-2174.
- [4] OMG UML Resources Page <http://www.uml.org>
- [5] Parunak H.V.D., Baker A. D., Clark S. J.: The AARIA Agent Architecture: From Manufacturing Requirements to Agent-Based System Design. *Integrated Computer-Aided Engineering*, Vol. 8, No. 1, 2001, p. 45-58.
- [6] PostgreSQL <http://www.postgresql.org/>
- [7] 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 Manufacturing Systems*, Vol. 37, No. 3, 1998, s. 255-276.
- [8] Wooldridge M. , Jennings N.R.: *Intelligent Agents: Theory and Practice*. The Knowledge Engineering Review, Vol. 10, No.2, 1995, s. 115-152.
- [9] Zając J.: Rozproszone sterowanie zautomatyzowanymi systemami wytwarzania. Monografia 288, Seria Mechanika. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2003.
- [10] Zając J., Chwajół G., Kmieciak A.: Integracja projektowania procesów i sterowania produkcją w zautomatyzowanych systemach wytwarzania. *Pomiary Automatyka Robotyka*, 2/2007, s. 1-9.
- [11] Zając J., Chwajół G., Więk T., Zych J.: Modernizacja systemu sterowania centrum produkcyjnego TOR. *Pomiary Automatyka Robotyka* Nr. 2, 2008, s. 304-310.
- [12] Zając J., Kmieciak A., Słota A., Zych J.: Integracja wieloagentowego systemu sterowania z systemem rzeczywistym na przykładzie CP TOR, Research Reports Project CII-SK-0030-03-0708 Systems – Equipment - Process SOP'2008, ISBN: 978-83-7242-481-5. Kraków 2008, s. 416-423.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006-2008 jako projekt badawczy 2394/T02/2006/31 pt. „Zintegrowany system projektowania procesów i sterowania produkcją”.