

---

# Wieloagentowe sterowanie zrobotyzowanymi systemami produkcyjnymi

Jerzy Zajac<sup>1</sup>

---

## Streszczenie

Efektywne wykorzystanie zjawiska rozproszenia jest jednym z zasadniczych kierunków rozwoju współczesnych zrobotyzowanych systemów produkcyjnych. W pracy przeanalizowano architektury systemów sterowania podkreślając dużą rolę zdecentralizowanych systemów wieloagentowych. Omówiono kwestie dyskretyzacji systemów produkcyjnych i zaprezentowano typy agentów wykorzystywanych do budowy ich systemów sterowania. Przedstawiono sposoby podejmowania decyzji w systemach sterowania produkcją.

## 1. WPROWADZENIE

Dynamiczny rozwój technologii agentowych związany jest z rosnącym zainteresowaniem systemami zdecentralizowanymi, w tym zwłaszcza z problematyką rozproszonej sztucznej inteligencji DAI (ang. *distributed artificial intelligence*). Pomimo ponad dwudziestoletniego okresu prac nie udało się dotychczas jednoznacznie zdefiniować pojęcia *agent*. Wooldridge i Jennings w pracy [19] dokonali specyfikacji charakterystycznych cech agenta. Są to:

- autonomia – oznaczająca, że agent może działać samodzielnie bez udziału człowieka oraz innych agentów, a także ma zdolność kontrolowania swoich działań i swojego stanu,
- zdolność do zachowań społecznych – oznaczająca możliwość współdziałania z innymi agentami, w tym także z ludźmi, zdolność do samoorganizacji, łączenia się w grupy itp.,
- reaktywność – oznaczająca postrzeganie zmian zachodzących w otaczającym agenta środowisku i reagowanie w odpowiednim czasie na te zmiany,
- proaktywność – oznaczająca nie tylko reagowanie na zmiany zachodzące w otaczającym środowisku, ale i podejmowanie inicjatywy w celu ich dokonania.

---

<sup>1</sup>Politechnika Krakowska, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, e-mail: zajac@mech.pk.edu.pl

W tym miejscu należy zwrócić uwagę na ważną kwestię terminologiczną. Biorąc pod uwagę technologie informacyjne, z których wywodzi się pojęcie *agent*, można przyjąć, że jest on bytem programowym. W wielu zastosowaniach praktycznych (w tym w zrobotyzowanych systemach produkcyjnych) pojęcie to jest jednak interpretowane szerzej. Agent składa się z dwóch części: informacyjnej (logicznej) i sprzętowej (fizycznej) reprezentowanej przez robota, maszynę, stację montażową, magazyn itp.

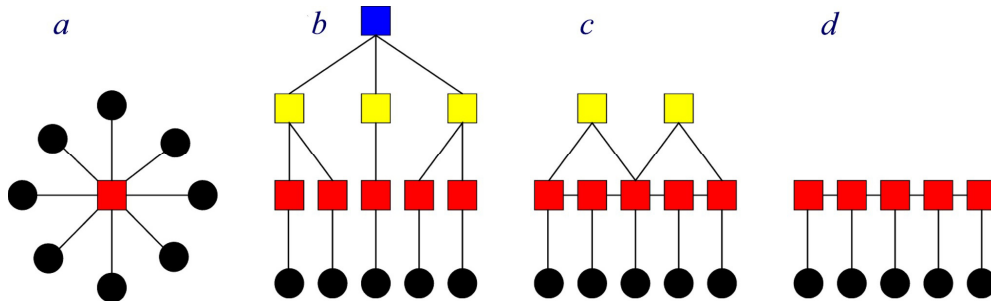
Bibliografia rozważająca różne teoretyczne kwestie dotyczące technologii agentowych jest bardzo obszerna i w dalszym ciągu wzbogacana o nowe pozycje. Biorąc pod uwagę zastosowania technologii agentowych, najistotniejsze znaczenie mają tzw. systemy wieloagentowe MAS (ang. *Multi-Agent Systems*). Jest to technologia tworzenia oprogramowania, które umożliwia modelowanie oraz implementację indywidualnego i społecznego zachowania w rozproszonych systemach. Z jednej strony używa się bowiem takich pojęć jak autonomia, reaktywność czy rozumowanie ukierunkowane na działanie, które są związane z modelowaniem i implementacją indywidualnego zachowania agentów, a z drugiej zaś stosuje się pojęcia takie jak: współdziałanie, koordynacja, negocjacja, formowanie koalicji, samoorganizacja, które są związane z zachowaniami społecznymi zbioru agentów. Duże znaczenie praktyczne rozważanej problematyki spowodowało zainteresowanie standaryzacją architektury systemów wieloagentowych. Pomimo, że prace prowadzone są od wielu lat przez znane organizacje, m.in. Foundation for Intelligent Physical Agents FIPA [22] i Object Management Group OMG [23], nie udało się dotychczas opracować jednolitego, powszechnie akceptowanego standardu w zakresie systemów wieloagentowych.

Pierwsze próby wykorzystania technologii wieloagentowych w systemach produkcyjnych realizowane były przez Parunaka [12] już w drugiej połowie lat osiemdziesiątych minionego stulecia. Dopiero jednak na przełomie wieków zaczęły pojawiać się znaczące implementacje technologii MAS do budowy zdecentralizowanych systemów sterowania produkcją [4, 5].

## 2. ARCHITEKTURY SYSTEMÓW STEROWANIA

Rozpatrując różne kryteria oceny systemów sterowania zrobotyzowanymi systemami produkcyjnymi takie jak: odporność na zakłócenia i awarie, niezawodność, rekonfigurowalność, skalowalność czy przystosowalność do zmian zachodzących w otoczeniu, poszukiwano takiej jego architektury, która w maksymalnym stopniu spełniałaby stawiane i możliwe do spełnienia na aktualnym etapie rozwoju wymagania.

Biorąc pod uwagę podział przestrzeni decyzyjnej w systemie produkcyjnym wyróżnić można cztery zasadnicze architektury systemów sterowania: scentralizowaną (rys. 1a), hierarchiczną (rys. 1b), hybrydową (rys. 1c) i rozproszoną (rys. 1d) nazywaną też heterarchiczną. W przypadku architektury scentralizowanej zasadniczą rolę odgrywa agent, którego można nazwać centralnym



Rys. 1. Schematy przedstawiające architektury systemów sterowania produkcją

decydem. Posiada on pełne możliwości decyzyjne, łatwość realizacji procesów predykcyjnych i optymalizacyjnych, zdolność do bezpośredniego przekazywania poleceń do elementów wykonawczych przy wykorzystaniu relacji master-slave, a także dysponuje możliwością gromadzenia informacji o stanie systemu. Jednocześnie trzeba zauważyć również słabości tego rozwiązania, takie jak: duża złożoność, ograniczona możliwość rekonfiguracji, uzależnienie prędkości reakcji systemu od jego wielkości i stopnia skomplikowania oraz mała odporność na awarie. Architektura ta nie spełnia większości wymagań stawianych współczesnym systemom sterowania zrobotyzowanymi systemami produkcyjnymi.

W przypadku architektury hierarchicznej złożony proces podzielony zostaje na procesy prostsze, powiązane ze sobą przyjętymi relacjami podległości. Strukturę systemu tworzą agenty znajdujące się na poszczególnych poziomach hierarchii. Jej podstawowymi zaletami są: łatwość zrozumienia ze względu na zastosowanie klasycznego wielopoziomowego podejścia do rozwiązywania złożonych problemów, możliwość stopniowego wdrażania, łatwiejsze opracowanie oprogramowania dzięki zastosowaniu modularności oraz wykorzystanie nadmiarowości w celu zwiększenia niezawodności działania systemu. Zasadniczymi słabościami tej architektury są: mała elastyczność utrudniająca wprowadzanie nieplanowanych wcześniej zmian oraz ograniczona odporność na awarie. Jako słabość tej architektury wymienić można także ograniczoną możliwość dostępu do szczegółowych danych na wyższych poziomach hierarchii.

Pomysł opracowania architektury hybrydowej wyniknął z istniejących ograniczeń wprowadzonych przez architektury scentralizowane i hierarchiczne, które hamują rozwój systemów sterowania współczesnych systemów produkcyjnych, a także z małej dojrzałości w sensie implementacyjnym architektur w pełni rozproszonych. System sterowania oparty na tej architekturze jest systemem wieloagentowym, w którym istnieje grupa tzw. agentów systemowych. Ich zakres decyzyjny jest jednak znacznie ograniczony w stosunku do zakresu decyzyjnego centralnego decydenta wykorzystywanego w architekturze scentralizowanej. Rola agentów systemowych sprowadza się najczęściej do optymalizacji decyzji z punktu widzenia zasadniczych celów systemowych. Wprowadzenie agentów systemowych i przekazanie im określonych uprawnień ogranicza autonomię decyzyjną pozostałych agentów. Oznacza to również, że w systemie pojawiają się lokalne

zależności o charakterze hierarchicznym. Jedną z istotnych cech architektury hybrydowej jest brak precyzyjnego określenia zakresu autonomii tworzących ją agentów. Oznacza to, że dzięki jej zastosowaniu uzyskać można (przynajmniej teoretycznie) zarówno system scentralizowany, jak i rozproszony, a także wszystkie stadia pośrednie istniejące pomiędzy tymi skrajnościami. Dzięki właściwemu połączeniu cech architektur hierarchicznej i rozproszonej architektura hybrydowa dysponuje większością posiadanych przez nie zalet. Posiada ona jednocześnie część z wad charakterystycznych dla tych architektur, tzn. ograniczoną rekonfigurowalność, ograniczoną odporność na awarie, a także brak szeroko akceptowanych standardów oraz komercyjnego oprogramowania.

W przypadku architektury rozproszonej agenty tworzące system sterowania mają przynależną im pełną autonomię decyzyjną oraz mogą podejmować decyzje i realizować je opierając się na mechanizmach wzajemnych negocjacji i koordynacji działań. Podstawową zaletą tej architektury jest duża odporność na awarie. Awaria pojedynczego agenta dotyczy bowiem tylko jego samego oraz ewentualnie agentów z nim współpracujących. Nie mniej ważną zaletą tej architektury jest prosty sposób opracowywania oprogramowania. Wynika to z jego modułowej struktury oraz wykorzystywania modułów programowych wielokrotnego użytku, opartych na przyjętych ogólnych regułach, a nie szczegółowych rozwiązaniach każdej sytuacji, możliwej do zaistnienia w złożonym systemie. Architektura rozproszona jest także najbardziej elastyczną z zaprezentowanych architektur, umożliwia bowiem prostsze dostosowywanie systemu do zachodzących w jego otoczeniu zmian, a także charakteryzuje się dobrą skalowalnością i rekonfigurowalnością. Ponadto jest ona najbardziej przystosowana do wprowadzania samoorganizacji w systemach produkcyjnych. Zasadniczą słabością architektury rozproszonej są trudności w realizacji celów systemowych. Wynikają one z rozproszenia źródeł informacji w systemie. Agenty tworzące system sterowania dysponują zazwyczaj jedynie informacjami o charakterze lokalnym. Jednym z najistotniejszych problemów, niezbędnych do rozwiązania dla systemów sterowania o strukturze rozproszonej, jest więc powiązanie celów globalnych (systemowych) z celami lokalnymi. Słabościami architektury rozproszonej są ponadto: ograniczona przewidywalność zachowania systemu, wysokie wymagania co do przepływności sieci komputerowej oraz brak standardów i komercyjnego oprogramowania.

Architektura rozproszona i architektura hybrydowa są uznawane obecnie za perspektywiczne biorąc pod uwagę budowę wieloagentowych systemów sterowania zrobotyzowanymi systemami produkcyjnymi. Obie wykorzystują (w różnym zakresie) zjawiska autonomii i negocjacji w środowisku wieloagentowym.

### 3. WIELOAGENTOWE SYSTEMY STEROWANIA

Współczesne zrobotyzowane systemy produkcyjne mają charakter dyskretny. Zasadniczą rolę w procesie budowy ich wieloagentowych systemów sterowania

odgrywa poziom szczegółowości dyskretyzacji zwany ziarnistością (ang. *granularity*). Im drobniejsze ziarno (większa liczba agentów), 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, choć występują również bardziej szczegółowe podejścia do rozwiązania tego problemu. Dla przykładu, robot przemysłowy może być utożsamiany z pojedynczym agentem bądź też ze zbiorem agentów reprezentujących jego poszczególne pary kinematyczne. W przypadku robotów mobilnych świadczących usługi transportowe we wspólnej przestrzeni roboczej [3, 8] wieloagentowy system sterowania tworzą agenty reprezentujące poszczególne jednostki mobilne.

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 [2, 13] 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) [17] 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 w wykorzystywanej architekturze hybrydowej. Dla systemu metamorficznego MetaMorph [11] wprowadzono natomiast agenty zasobowe, przedmiotowe oraz mediacyjne. Te ostatnie są również agentami systemowymi biorąc pod uwagę zastosowaną architekturę hybrydową systemu sterowania. W wieloagentowym systemie sterowania opracowanym w Politechnice Krakowskiej [20, 21] wprowadzono agenty wytwórcze, dostosowujące i systemowe. Zastosowano także architekturę hybrydową. Z kolei dla systemu WEST [5] wyróżniono jedynie agenty: przedmiot, maszyna i podajnik. W tym systemie mamy do czynienia z architekturą w pełni rozproszoną. Jak widać z wymienionych przykładów, w systemach produkcyjnych dominują agenty zasobowe oraz agenty przedmiotowe. Agenty zasobowe podlegają zazwyczaj dalszemu podziałowi. Dla systemu MetaMorph są to agenty: obróbkowy, montażowy, magazynowy, manipulacyjny. Dla systemu z Politechniki Krakowskiej uniwersalny agent wytwórczy (zasobowy) może pełnić rolę agenta obróbkowego, transportowego, manipulacyjnego i magazynowego. Natomiast dla systemu WEST agent zasobowy reprezentuje maszynę i podajnik. Odmienne wygląda sytuacja dla systemu PROSA, gdzie pojęcie *agent zasobu* interpretowane jest znacznie szerzej, gdyż obejmuje wiele różnorodnych elementów, takich jak: wydziały, gniazda

produkcyjne, maszyny, roboty, systemy transportowe, palety, materiały, narzędzia, uchwyty, czy magazyny.

Liczba przyjętych typów agentów wchodzących w skład systemu produkcyjnego ma zasadniczy wpływ na złożoność jego systemu sterowania. Aby ułatwić samoorganizację systemów produkcyjnych należy dążyć do zmniejszenia tej liczby. Niezbędnym elementem każdego zdecentralizowanego systemu sterowania produkcją jest agent zasobowy. 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 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.

#### 4. PODEJMOWANIE DECYZJI

Istnieją dwie zasadnicze grupy czynników wpływających na rozwój współczesnych systemów produkcyjnych: techniczne i organizacyjne. Jednym z najistotniejszych czynników o charakterze organizacyjnym jest problem decentralizacji decyzji w systemach produkcyjnych. Problem podejmowania decyzji w dyskretnym systemie produkcyjnym przedstawić można jako zadanie optymalizacji z ograniczeniami.

Bardzo istotną kwestią pozostaje jednak sam sposób sformułowania problemu optymalizacji. Podejście klasyczne zakłada, że przed przystąpieniem do rozwiązywania problemu określone są wszystkie dane niezbędne do jego pełnego sformułowania. Wymagania stawiane współczesnym systemom produkcyjnym ograniczają jednak zdecydowanie możliwości wykorzystania takiego podejścia. W tych systemach przyjmuje się bowiem, że jednym z podstawowych kryteriów ich oceny jest zdolność do zaspokajania terminowych, kosztowych i jakościowych wymagań klienta, przy założeniu pojawiających się na bieżąco zamówień. Przyjęcie tego założenia zdecydowanie zawęży horyzont planowania, a zatem ogranicza zastosowanie klasycznego podejścia do rozwiązania tego problemu. Jako przykład [7] realnego problemu decyzyjnego rozważyć można sytuację w przedsiębiorstwie wytwarzającym silniki elektryczne w liczbie 800 różnych typów, przy czym dziennie wytwarzanych jest średnio 200 różnych typów. Liczebność partii produkcyjnej zmienia się od 1 do 100 sztuk, ale typowe zamówienie dotyczy zazwyczaj 5 sztuk. Optymalizacja decyzji w tego typu systemie ma charakter probabilistyczny.

W literaturze poświęconej problematyce podejmowania decyzji w systemach sterowania produkcją napotkać można cztery podstawowe sposoby realizacji tego celu, a mianowicie [1, 20]:

- wykorzystanie reguł priorytetu,
- zastosowanie algorytmów harmonogramowania,
- negocjowanie decyzji poprzez agenty tworzące system sterowania,
- wykorzystanie algorytmów ssania produkcji.

Do podejmowania decyzji w systemach zdecentralizowanych wykorzystać można reguły priorytetu pozwalające na wybór decyzji spośród zbioru decyzji dopuszczalnych. Przedstawione tam reguły priorytetu pozwalają na wykorzystanie lokalnej (czyli limitowanej) wiedzy agenta o systemie i realizowanych w nim procesach. Narzucającym się sposobem poprawienia racjonalności procesu podejmowania decyzji jest umożliwienie uczenia się agentów oraz udostępnienie im dodatkowych informacji. W pracach [10, 15], autorzy wyspecyfikowali dwa podstawowe źródła wiedzy w procesie uczenia agentów. Tymi źródłami mogą być: historia działań agentów i w tym przypadku mówimy o uczeniu się z historii (ang. *learning from the history*) bądź też symulacyjne badanie przyszłych stanów agentów, określane przez autorów jako uczenie się z przyszłości (ang. *learning from the future*). Również dodatkowe informacje mogą mieć znaczący wpływ na skuteczność procesu decyzyjnego. Zdobywanie ich w celu podejmowania decyzji przez agenty w systemie zdecentralizowanym odbywa się w praktyce na dwa sposoby. W tym celu wykorzystuje się elementy wspólnego środowiska bądź też stosuje bezpośrednią komunikację międzyagentową. Elementami wspólnego środowiska w systemie wieloagentowym są zazwyczaj scentralizowane lub

rozproszone tablice ogłoszeń. Na takich tablicach agenty umieszczają informacje o realizowanych procesach, zgłaszają swoje zapotrzebowania na zasoby itp. Są to więc miejsca, przez które odbywa się kontakt agentów-klientów poszukujących określonych usług i agentów-usługodawców, usługi te oferujących. Najbardziej znanym przykładem narzędzia umożliwiającego bezpośrednią komunikację międzyagentową jest negocjacyjny protokół kontraktu sieciowego CNP (ang. *Contract Net Protocol*) [16]. Można tu zastosować zarówno negocjacje ukierunkowane na zasoby (ang. *machine-centered negotiation*), jak i na wyroby (ang. *part-centered negotiation*). W pierwszym przypadku agenty przedmiotowe inicjują negocjacje występując z zapytaniem ofertowym i konkurują między sobą o dostęp do zasobów. W przypadku drugim to agenty zasobowe inicjują negocjacje występując z zapytaniem ofertowym i konkurują między sobą, aby otrzymać zamówienie na wykonanie wyrobu.

W pracy [6] do sterowania produkcją w rozproszonym wieloagentowym systemie wykorzystano metodę nazwaną sterowaniem mrówkowym (ang. *ant colony control*). Za podejmowanie decyzji odpowiedzialne są agenty wyrobu. Zaproponowany system sterowania jest całkowicie zdecentralizowany, tzn. brakuje jakiegokolwiek scentralizowanego elementu decyzyjnego. Bardzo istotny element zaproponowanej koncepcji stanowi sposób wymiany informacji pomiędzy agentami. Całość informacji przekazywana jest poprzez środowisko. W praktyce oznacza to zastosowanie rozproszonej tablicy ogłoszeń.

Zasadniczą trudnością w wieloagentowym systemie sterowania jest przełożenie kryteriów oceny działania całości systemu wytwarzania na indywidualne decyzje rozproszonych agentów. Nie jest to zadanie proste, dlatego powstało (i wciąż powstaje) wiele różnych koncepcji [14] rozwiązania tego problemu. Podstawowe różnice pomiędzy tymi koncepcjami dotyczą: istnienia bądź nieistnienia w systemie elementów reprezentujących cele systemowe, sposobu wymiany informacji pomiędzy agentami tworzącymi skład systemu wytwarzania oraz zaimplementowanych protokołów negocjacji.

Jednym z najczęściej wykorzystywanych w praktyce sposobów prowadzenia negocjacji oraz koordynacji działań w wieloagentowym systemie sterowania produkcją jest zastosowanie mechanizmów rynkowych [9, 18]. Przykładem takiego podejścia jest rozwiązanie zaproponowane przez pracowników Węgierskiej Akademii Nauk [9]. W przyjętym rozwiązaniu negocjacje prowadzone przez agenty dotyczą czynności, terminów i kosztów. Zastosowanie sprawiedliwego mechanizmu, w którym każdy agent ma jednakowe prawa powoduje, że powstaje ciąg adaptacyjnych zachowań, w których ceny są proporcjonalne do kosztów. Mechanizm rynkowy umożliwi również zastosowanie techniki bodźców, dzięki którym system, w dłuższym przedziale czasu, będzie zmierzał do rozwiązania spełniającego nałożone ograniczenia, optymalizując zarazem przyjęte kryterium



oceny. Jako to kryterium przyjęto średni zysk z wytwarzania wyrobów, wyznaczony w ciągu dłuższego przedziału czasu.

## 5. PODSUMOWANIE

Intensywne i prowadzone na szeroką skalę prace dotyczące systemów produkcyjnych nowej generacji zwiększyły zainteresowanie problematyką rozproszonego sterowania i zastosowaniem technologii agentowych. Stało się to przyczyną wzrostu znaczenia naukowego i utylitarnego tej tematyki, przyciągając uwagę szerokiego kręgu pracowników nauki i przemysłowych ośrodków naukowo-badawczych. Zjawisko rozproszenia w systemach produkcyjnych jest aktualnie traktowane jako jeden z najistotniejszych czynników umożliwiających nadanie nowego impulsu rozwojowego tym systemom. Sukces pilotowych rozwiązań systemów zdecentralizowanych w firmie DaimlerChrysler AG [5] pozwala mieć nadzieję, że rozwiązania takie odgrywać będą istotną rolę już w pierwszych dekadach XXI wieku, a postęp techniczny umożliwi ich ewolucję w kierunku samoorganizujących się, inteligentnych systemów produkcyjnych.

## LITERATURA

- [1] A.D. Baker. Which Factory Control Algorithms Can Be Implemented in an Agent Architecture: Dispatching, Scheduling or Pull. *J. Manufacturing Systems*, Vol. 17, No. 4, 1998, s. 297-320.
- [2] A.D. Baker, H.V.D. Parunak, K. Erol. Agents and the Internet: Infrastructure for Mass Customization. *IEEE Internet Computing*, Vol. 3, No. 5, 1999, s. 62-69.
- [3] A. Borkowski, D. Daniecka, M. Gnatowski. Modelling Co-Operation of Mobile Robots by Means of Object-Oriented Language. In: *Materiały z Konferencji AUTOMATON'99*. Warszawa 1999, s. 177-184.
- [4] S. Bruckner, J. Wyns, P. Peeters, M. Kollingbaum. Designing Agents for the Manufacturing Control. In: *Artificial Intelligence and Manufacturing Research Planning Workshop - State of the Art & State of the Practice*, Red. G.F. Luger, AAAI Press, Albuquerque 1998, s. 40-46.
- [5] S. Bussmann, K. Schild. Self-Organizing Manufacturing Control: An Industrial Application of Agent Technology. In: *Proc. of the 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Multi-Agent Systems*. Boston 2000, s. 87-94.
- [6] V. Ciciello, S. Smith. Ant Colony Control for Autonomous Decentralized Shop Floor Routing. In: *Proc. of the 5<sup>th</sup> Int. Symposium on Autonomous Decentralized Systems*. IEEE Computer Society, 2001, s. 383-390.
- [7] P. Kanchanaseeve, G. Biswas, K. Kawamura, S. Tamura. Contract-Net Based Scheduling for Holonic Manufacturing Systems. In: *Proc. of SPIE: Architectures, Networks and Intelligent Systems for Manufacturing Integration*. Pittsburgh 1997, s. 108-115.
- [8] A. Kasiński. Wieloagentowy system robotów mobilnych. Opis projektu. *Prace Naukowe Instytutu Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej*, z. 98, 1998, s. 241-247.

- [9] A. Markus, T. Kis, J. Vancza, L. Monostori. A Market Approach to Holonic Manufacturing. *CIRP Annals*, Vol. 45/1, s. 433-436.
- [10] F. Maturana, S. Balasubramanian, D.H. Norrie. Learning Coordination Patterns from Emergent Behavior in a Multi-Agent-Based Manufacturing System. In: *Intelligent Systems and Semiotics '97: A Learning Perspective*. Maryland 1997, s. 225-232.
- [11] F. Maturana, W. Shen, D.H. Norrie. MetaMorph: An Adaptive Agent-Based Architecture for Intelligent Manufacturing. *International J. Production Research*, Vol. 37, No.10, 1999, s. 2159-2174.
- [12] H.V.D. Parunak. Application of Distributed Artificial Intelligence in Industry. In: *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*. Red. G. M. P. O'Hare and N.R. Jennings, Wiley, New York 1996, s. 139-164.
- [13] H.V.D. Parunak, A. D. Baker, S. J. Clark. The AARIA Agent Architecture: From Manufacturing Requirements to Agent-Based System Design. *Integrated Computer-Aided Engineering*, Vol. 8, No. 1, 2001, s. 45-58.
- [14] P. Schiegg. *Multi-Agent Scheduling in Manufacturing Systems*. Web Site, <http://oink.ecs.umass.edu/~pschiegg/bib/lit.html>
- [15] W. Shen, F. Maturana, D.H. Norrie. Learning in Agent-Based Manufacturing Systems. In: *Proc. of the AAAI's Special Interest Group in Manufacturing Workshop on Artificial Intelligence and Manufacturing: State of the Art and State of Practice*. Albuquerque 1998, s. 177-183.
- [16] R.G. Smith. The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver. *IEEE Trans. on Computers*, Vol. C-29, No. 12, 1980, s. 1104-1113.
- [17] H. Van Brussel, J. Wyns, P. Valckenaers, L. Bongaerts, P. Peeters. Reference Architecture for Holonic Manufacturing Systems: PROSA. *Computers in Industry, Special Issue on Intelligent Manufacturing Systems*, Vol. 37, No. 3, 1998, s. 255-276.
- [18] W.E. Walsh, M.P. Wellman, P.R. Wurman, J.K. Mackie-Mason. Some Economics of Market-Based Distributed Scheduling. In: *Proc. of the 18<sup>th</sup> International Conference on Distributed Computing Systems*, 1998, s. 612-621.
- [19] M. Wooldridge, N.R. Jennings. Intelligent Agents: Theory and Practice. *The Knowledge Engineering Review*, Vol. 10, No.2, 1995, s. 115-152.
- [20] J. Zając. *Rozproszone sterowanie zautomatyzowanymi systemami wytwarzania*. Monografia 288, Seria Mechanika. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2003.
- [21] J. Zając. Przeciwdziałanie blokadom w zrobotyzowanych systemach wytwarzania – podejście strukturalne. In: *Postępy robotyki – Przemysłowe i medyczne systemy robotyczne*. Red. K. Tchoń. WKiŁ, Warszawa 2005, s. 105-113.
- [22] The Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA) <http://www.fipa.org>
- [23] Object Management Group (OMG). *Agent Platform Special Interest Group* <http://agent.omg.org>

## MULTIAGENT CONTROL OF ROBOTIZED PRODUCTION SYSTEMS

Production control system is considered as a collection of agents that represent the knowledge and data of the production system. The paper surveys existing research results in the field of control of robotized production systems. It concerns mainly architectures of control systems and decision making which in the multiagent control systems is accomplished by the negotiation process.