POLITECHNIKA KRAKOWSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY

Praca doktorska

Rozproszone sterowanie systemami wytwarzania z wykorzystaniem technologii internetowych

Promotor:

Dr hab. inż. Jerzy Zając, Prof. PK

Opracował:

Mgr inż. Grzegorz Chwajoł

Kraków 2009

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Składam podziękowania mojemu promotorowi
Panu dr hab. inż. Jerzemu Zającowi, prof. PK
za nieocenioną pomoc i wskazówki
otrzymane podczas realizacji tej pracy

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Spis treści

1 Wprowadzenie ... 4
2 Aktualny stan wiedzy z zakresu sterowania systemami wytwarzania ... 7
2.1 Architektury systemów sterowania, modele i koncepcje implementacyjne ... 7
2.2 Podejmowanie decyzji ... 12
2.3 Metody przeciwdziałania blokadom ... 14
2.4 Obsługa zakłóceń w procesach produkcyjnych ... 17
2.5 Technologie komunikacyjne ... 19
2.5.1 Technologia Web services ... 20
2.6 Podsumowanie aktualnego stanu wiedzy. Określenie celu pracy ... 24
3 Wieloagentowy system oprogramowania AIM ... 27
3.1 Koncepcja budowy i działania ... 29
3.2 Agenty systemowe ... 32
3.2.1 Rola agentów systemowych w przyznawaniu uprawnień do podejmowania decyzji ... 35
3.3 Agenty zleceń ... 38
3.4 Agenty wykonawcze ... 41
3.5 Agenty przedmiotowe ... 45
3.6 Mechanizm symulacyjny i jego zastosowania ... 49
3.7 Obsługa zakłóceń ... 52
3.7.1 Awarie zasobów wytwórczych ... 53
3.7.2 Nowe zlecenia ... 56
4 Implementacja i weryfikacja oprogramowania AIM ... 61
4.1 Platforma implementacyjna ... 63
4.2 Przykład zastosowania system AIM ... 68
4.2.1 Wykorzystanie mechanizmu symulacyjnego w trybie wspomagającym podejmowanie decyzji ... 73
4.2.2 Funkcjonowanie systemu AIM w sytuacji awaryjnej ... 77
4.2.3 Weryfikacja możliwości przyjęcia nowego zlecenia ... 79
5 Podsumowanie i wnioski ... 84
6 Literatura ... 87

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1 Wprowadzenie

Współczesne wymagania rynkowe względem systemów produkcyjnych charakteryzujące się przede wszystkim zmiennym asortymentem produkcji, występowaniem zmian dotyczących zamówień czy losowością zleceń wymuszają konieczność wprowadzania zmian w systemach sterowania wytwarzaniem. Systemy te powinny m.in. być odporne na różnego rodzaju zakłócenia w realizacji procesów wytwórczych oraz charakteryzować się samoorganizacją i rekonfigurowalnością pozwalającą na szybkie dostosowywanie się do zmiennych warunków produkcyjnych. Dodatkowo powinny zapewnić realizację różnorodnej asortymentowo produkcji, najczęściej małoseryjnej lub jednostkowej. Wymagania te sprawiają, że stopniowo odchodzi się od klasycznych, scentralizowanych i hierarchicznych systemów sterowania wytwarzaniem na rzecz rozwiązań o charakterze hybrydowym bądź rozproszonym. Podejście takie charakteryzuje się przeniesieniem procesów decyzyjnych z grupy centralnych decydentów spotykanych w tradycyjnych systemach wytwórczych na rozproszone, inteligentne jednostki wytwórcze dysponujące możliwością współdziałania i samodzielnego podejmowania decyzji. Pozwala to osiągnąć większą zdolność systemu sterowania wytwarzaniem do rekonfiguracji i dostosowania się do zmiennych oczekiwań ze strony rynku, a także do sprostania sytuacjom awaryjnym, które pomimo postępu technicznego wciąż pojawiają się w systemach wytwarzania. Z uwagi na zdecentralizowany charakter podejmowania decyzji, szczególnego znaczenia nabierają kwestie przesyłania informacji pomiędzy autonomicznymi decydentami tworzącymi system sterowania. Problemem jest tutaj różnorodność wykorzystywanych technologii informatycznych, tak sprzętowych jak i programowych. Należy podkreślić, że brak jednolitych i powszechnie akceptowanych rozwiązań w skuteczny sposób hamuje rozwój nowoczesnych systemów sterowania wytwarzaniem. Istnienie akceptowanych standardów pozwoliłoby bowiem w znaczącym stopniu zwiększyć jego dynamikę, a opracowane na ich podstawie rozwiązania systemów sterowania wytwarzaniem zyskałyby większe szanse na osiągnięcie sukcesu rynkowego [19].

W świetle powyższych uwarunkowań uzasadnione stają się poszukiwania standardów w różnych aspektach rozważanej problematyki, w szczególności dotyczących budowy i funkcjonowania nowoczesnych systemów sterowania wytwarzaniem. Nie mniej ważne są poszukiwania technologii informatycznych mogących pełnić rolę standardu implementacyjnego umożliwiającego poprawną

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

współpracę różnorodnych elementów takiego systemu. Inspiracją dla tych ostatnich są między innymi technologie internetowe, które ze względu na swe możliwości zdobyły w ciągu ostatnich kilkunastu lat ogromną popularność i znalazły zastosowanie w wielu dziedzinach. U ich podstaw leżą powszechnie akceptowane standardy z rodziną protokołów TCP/IP na czele, na bazie której funkcjonują m.in. tak popularne usługi jak poczta elektroniczna czy strony WWW. Podstawową i niezaprzeczalną zaletą technologii internetowych jest zdolność integracji rozwiązań działających na różnych platformach sprzętowych i systemowych. Ponadto, te same technologie wykorzystywane są zarówno w skali świata (dzisiejszy Internet), jak też w obrębie sieci miejskich (MAN), lokalnych (LAN) czy nawet pomiędzy aplikacjami pracującymi na jednej stacji roboczej.

Wobec wymienionych faktów nasuwa się pytanie o możliwości wykorzystania zalet, jakie niosą technologie internetowe, także w systemach sterowania wytwarzaniem. Niniejsza praca doktorska prezentuje zdecentralizowany system sterowania wytwarzaniem przeznaczony do pracy w heterogenicznym środowisku informatycznym, oparty na strukturze złożonej z wielu autonomicznych i rekonfigurowalnych jednostek zwanych agentami, które podejmują decyzje w oparciu o reguły stosowane w mechanizmach rynkowych. Do budowy oprogramowania systemu wykorzystano technologie internetowe.

W rozdziale 2 zamieszczono przegląd aktualnego stanu wiedzy z zakresu sterowania dyskretnymi systemami wytwarzania obejmujący takie jego aspekty jak architektury systemów sterowania, modele i koncepcje implementacyjne, następnie problematykę podejmowania decyzji i przeciwdziałania blokadom, zagadnienia związane z obsługą zakłóceń w procesach produkcyjnych, a także stosowane w systemach sterowania wytwarzaniem technologie komunikacyjne. Rozdział kończy podsumowanie aktualnego stanu wiedzy oraz określenie celu pracy.

W rozdziale 3 omówiono koncepcję oraz elementy składowe i sposób działania wieloagentowego systemu oprogramowania AIM. Szczególną uwagę zwrócono na zagadnienia dotyczące sterowania na poziomie operatywnym, które stanowią zasadniczą treść niniejszej pracy doktorskiej. Przedstawiono główne cechy biorących udział w sterowaniu agentów oraz omówiono opracowane algorytmy ich działania z uwzględnieniem wzajemnych relacji i powiązań. W rozdziale tym opisano również koncepcję i zastosowania mechanizmu symulacyjnego wykorzystującego wirtualne

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

procesy, a także przedstawiono opracowane algorytmy postępowania w przypadku wystąpienia wybranych zakłóceń w procesach produkcyjnych.

W rozdziale 4 omówiono szczegóły implementacyjne systemu oprogramowania AIM, w tym wyspecyfikowano wykorzystane rozwiązania i technologie informatyczne. W dalszej części tego rozdziału na zaproponowanym przykładzie systemu wytwarzania pokazano funkcjonalność systemu AIM przedstawiając rezultaty wybranych testów weryfikujących jego funkcjonowanie.

Rozdział 5 zawiera podsumowanie i wnioski z przeprowadzonych prac.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

2 Aktualny stan wiedzy z zakresu sterowania systemami wytwarzania

W związku ze współczesnymi trendami biznesowymi i wymaganiami rynkowymi wobec systemów wytwarzania, przy szerokim wachlarzu technik komputerowych stosowanych w obszarach związanych z inżynierią produkcji [14], obserwowany jest stały rozwój koncepcji i rozwiązań dotyczących systemów sterowania wytwarzaniem. Działania te mają charakter ewolucyjny i prowadzą do wypierania z rynku rozwiązań nie spełniających aktualnych wymogów i zastępowania ich rozwiązaniami nowoczesnymi pozwalającymi na zwiększenie efektywności i wydajności systemów wytwórczych.

W toku ewolucji systemów sterowania wytwarzaniem pojawia się wiele różnorodnych rozwiązań i koncepcji, na których oparta jest struktura i działanie tych systemów. Zróżnicowanie to wiąże się z takimi kwestiami jak: architektura systemu sterowania i jej implementacja, zagadnienie podejmowania decyzji, metody unikania blokad czy problemy komunikacji w systemach sterowania wytwarzaniem [18]. W kolejnych podrozdziałach zostaną scharakteryzowane aktualnie spotykane rozwiązania dotyczące wymienionych aspektów.

2.1 Architektury systemów sterowania, modele i koncepcje implementacyjne

Analizując budowę istniejących czy też rozwijanych obecnie systemów sterowania wytwarzaniem można wyróżnić cztery główne typy ich architektur. Są to architektury: scentralizowana, hierarchiczna, hybrydowa i heterarchiczna (rozproszona). Pierwsza z wymienionych struktur charakteryzuje się występowaniem centralnego decydenta odpowiedzialnego za podejmowanie wszystkich decyzji związanych z planowaniem, optymalizacją oraz przebiegiem procesów wytwórczych. Wymiana informacji jest ograniczona do minimum i przebiega tylko pomiędzy jednostką centralną a sterownikami poszczególnych urządzeń wytwórczych na zasadzie relacji master-slave. Architekturę tę cechuje duża złożoność, niewielka odporność na awarie i słaba rekonfigurowalność. W przypadku hierarchicznej struktury systemu sterowania wytwarzaniem, pomiędzy elementami składowymi takiego systemu zostały

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

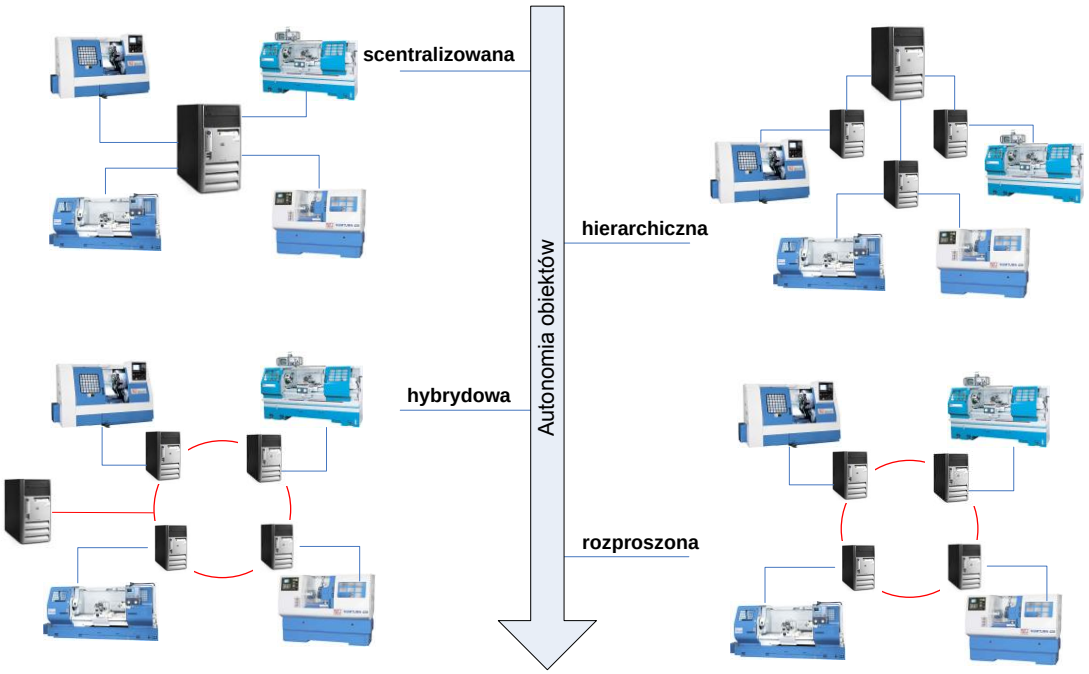
wprowadzone relacje podległości na wzór hierarchii spotykanych w przyrodzie i ludzkich społecznościach. Architektura ta, mimo posiadania określonych zalet w stosunku do architektury scentralizowanej, takich jak intuicyjne, wielopoziomowe podejście do rozwiązywania złożonych problemów czy łatwiejsze opracowywanie oprogramowania ze względu na możliwą do wprowadzenia modularność, również charakteryzuje się małą odpornością na awarie oraz trudnościami w szybkiej rekonfiguracji systemu sterowania. Wspierana przez technologię CIM (ang. Computer Integrated Manufacturing) zdobyła ona jednak sporą popularność w środowiskach produkcyjnych.

Współczesne uwarunkowania rynkowe sprawiają, iż nowoczesne systemy sterowania wytwarzaniem powinny cechować się dużo większym stopniem rekonfigurowalności, samoorganizacji i otwartości na pojawiające się zmiany. Z tego powodu od kilkunastu lat trwają intensywne prace nad rozwojem zdecentralizowanych systemów sterowania wytwarzaniem, opartych o architektury hybrydową i rozproszoną [54]. Systemy budowane w oparciu o wspomniane architektury składają się z autonomicznych, samoorganizujących się, rekonfigurowalnych, zdolnych do podejmowania decyzji i wzajemnego współdziałania jednostek wytwórczych. W systemach rozproszonych decyzje dotyczące przebiegu procesu wytwórczego podejmowane są na podstawie lokalnych przesłanek. Rodzi to problemy związane z określeniem i uwzględnieniem w procesie podejmowania decyzji globalnych celów systemowych. Dlatego też w architekturach hybrydowych, które pełnią niejako rolę rozwiązania pośredniego pomiędzy strukturami hierarchicznymi a heterarchicznymi, wprowadzeni zostali tak zwani decydenci systemowi, pełniący rolę jednostek doradczych [11] [36]. Ich funkcja z reguły sprowadza się do takich zagadnień, jak planowanie, harmonogramowanie czy przeciwdziałanie blokadom. Stopień wpływu decydentów systemowych na podejmowane w systemie decyzje może być dynamicznie zmieniany.

Rys. 1 przedstawia schematycznie różnice pomiędzy wymienionymi architekturami systemów sterowania wytwarzaniem. W przypadku architektury scentralizowanej pojedyncza miniatura komputera odpowiada centralnemu decydentowi. Komputery i zasoby wytwórcze zgrupowane w sposób tworzący hierarchię w prawej części rysunku symbolizują zależności w architekturach hierarchicznych. W przypadku systemów rozproszonych odpowiadające poszczególnych decydentom komputery znajdują się w jednym wspólnym środowisku

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

sieciowym i nie ma wśród nich jednostki wyróżnionej czy też uprzywilejowanej. Wreszcie w przypadku architektury hybrydowej niepowiązany z żadnym z zasobów komputer symbolizuje jednostkę pełniącą w systemach o takiej strukturze role doradcze. Grot strzałki wskazuje kierunek wzrostu autonomii decyzyjnej wchodzących w skład systemu obiektów.



Rys. 1. Architektury systemów sterowania wytwarzaniem

Złożoność współczesnych systemów produkcyjnych sprawia, iż na etapie ich projektowania niezbędne staje się opracowanie modeli przedstawiających różne aspekty ich budowy i funkcjonowania [22] [68]. Modele takie, będące uproszczoną – umyślnie i celowo – reprezentacją rzeczywistości [26], pozwalają m.in. na usystematyzowanie wiedzy na temat projektowanego systemu, ułatwiają definiowanie i analizę wzajemnych powiązań pomiędzy poszczególnymi jego elementami oraz stanowią ważne źródło poznania tego systemu.

Najczęściej wykorzystywanym sposobem modelowania procesów dyskretnych są Sieci Petriego [7] [23]. W zdecentralizowanych systemach ich zastosowanie napotyka jednak na trudności spowodowane brakiem oddzielnej reprezentacji poszczególnych obiektów tworzących skład systemu. W klasycznej sieci Petriego jedno miejsce może bowiem reprezentować równocześnie stan kilku obiektów, co utrudnia bieżące śledzenie stanów pojedynczych obiektów systemu. W celu ominięcia tych problemów

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

na Politechnice Krakowskiej opracowano zmodyfikowaną wersję sieci, zwaną obiektowo-obserwowalną siecią Petriego [21] [49].

Inny sposób modelowania, nazwany Modelem Macierzowym, przedstawiono w pracy [20]. Model ten umożliwia prosty i przejrzysty zapis dowolnej struktury systemu oraz reguł jego działania. Model Macierzowy może być wykorzystany zarówno do symulacji jak i sterowania o charakterze scentralizowanym.

Realizowane współcześnie badania koncentrują się także na poszukiwaniu metod budowy modeli analitycznych, które pozwalają na efektywniejszą i mniej kosztochłonną ocenę jakości funkcjonowania systemów wytwórczych. Jedną z propozycji jest wykorzystanie w tym zakresie formalizmu (max,+) algebry [8].

W ostatnim czasie dużą popularność w zakresie modelowania różnego rodzaju procesów i systemów zyskał język UML (*Unified Modeling Language*) [12]. Jest to graficzny język służący do obrazowania, specyfikowania, tworzenia i dokumentowania artefaktów powstałych podczas budowania systemu. Język ten udostępnia kilkanaście różnego rodzaju diagramów (klas, sekwencji, czynności, przypadków użycia i innych) umożliwiających analizę wielu dopełniających się, powiązanych ze sobą perspektyw (punktów widzenia) modelowanego systemu. Każda z tych perspektyw może opisywać jego strukturę bądź zachowanie. UML wykorzystywany jest najczęściej do modelowania systemów informatycznych, ale w ostatnich latach można zauważyć rosnące zainteresowanie jego wykorzystaniem także w procesach modelowania systemów sterowania wytwarzaniem [28] [42] [72].

W wyniku prowadzonych prac nad nowoczesnymi systemami sterowania wytwarzaniem powstało wiele koncepcji implementacyjnych. Jedna z nich znalazła odzwierciedlenie w systemach MAS (ang. Multi-Agent Systems) [9] [33] [41] [44] bazujących na informatycznych technologiach agentowych. Podstawową jednostką systemu MAS jest agent cechujący się określonymi właściwościami, takimi jak autonomia, zdolność do zachowań społecznych, reaktywność, czyli zdolność reagowania na zmiany w otaczającym środowisku i proaktywność przejawiająca się w możliwościach inicjowania takich zmian [25]. Wykorzystując technologie agentowe, został opracowany i wdrożony w jednej z fabryk koncernu DaimlerChrysler AG pilotażowy system wytwarzania WEST [13]. W systemie tym wprowadzone zostały trzy typy agentów, z których dwa związane są z urządzeniami wytwórczymi (agent maszyny i agent podajnika), trzeci zaś reprezentuje wytwarzany przedmiot. Koordynacja działań agentów realizowana jest przez agenta reprezentującego

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

przedmiot. Odbywa się to w procesie negocjacji, których celem jest wybór maszyny mającej wykonać kolejną elementarną czynność dla danego przedmiotu. Innym przykładem systemu MAS jest system sterowania AARIA [43]. Wyróżnia on kilka podstawowych typów agentów reprezentujących: proces jednostkowy, zasób, jednostkę zarządzającą, przedmiot, klienta i dostawcę. Technologie agentowe stanowią również przedmiot zainteresowań w pracach dotyczących podsystemów transportowych [56].

W opracowanym w Politechnice Krakowskiej wieloagentowym systemie sterowania wytwarzaniem [63] rolę podstawowych jednostek systemu pełnią agenty reprezentujące urządzenia wytwórcze. Są to jednolite, konfigurowalne, autonomiczne jednostki o prostej strukturze i prostych regułach działania, charakteryzujące się zdolnością do negocjacji i podejmowania decyzji dotyczących wykonywanych czynności elementarnych procesu wytwórczego. Dodatkowo wprowadzone zostały tak zwane agenty systemowe odpowiedzialne za przekazywanie preferencji uwzględniających cele globalne. Agenty te pełnią jednak wyłącznie rolę doradczą i system sterowania może poprawnie pracować także bez ich udziału. W celu zapewnienia współpracy agentów wytwórczych ze sterownikami urządzeń wprowadzone zostały agenty dostosowujące.

Wiele spośród rozwijanych koncepcji nowoczesnych systemów sterowania wytwarzaniem odzwierciedla określone idee lub naśladuje zachowania spotykane w przyrodzie. W pierwszej grupie znajdują się systemy holoniczne opierające się na koncepcji holonów [32]. Przykładową architekturą realizującą założenia tej koncepcji jest architektura PROSA [11]. W jej budowie wyróżnić można trzy podstawowe typy holonów: holony zasobów – reprezentują maszyny i urządzenia wchodzące w skład systemu wytwarzania, holony wyrobów – reprezentują wytwarzane w systemie przedmioty oraz holony zamówień – są reprezentantami realizowanych w systemie zleceń. Architektura ta dopuszcza także istnienie holonu doradczego, który wspomaga działanie holonów podstawowych. Podobnym w swej budowie do architektury PROSA jest holoniczny system ADACOR [36] dysponujący czterema klasami holonów. Wśród nich występują: holony operacyjne, produktów oraz zadań. Czwartym typem holonu jest tzw. supervisor holon, który poza działaniami doradczymi posiada także m.in. zdolność koordynowania pracy holonów, w szczególności w zmieniających się warunkach otaczającego środowiska. W grupie systemów powstałych na podstawie inspiracji przyrodniczych znajdują się także biologiczne [55] i feromonowe [58] systemy wytwórcze.

BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Przeprowadzona analiza literatury w zakresie architektur i implementacji systemów sterowania wytwarzaniem wskazuje, iż główny kierunek dalszego rozwoju tych systemów wyznaczają wieloagentowe systemy rozproszone i hybrydowe.

2.2 Podejmowanie decyzji

Dyskretne systemy wytwarzania charakteryzują się współbieżnością realizowanych procesów. Podejmowanie decyzji w systemach procesów współbieżnych jest trudnym zagadnieniem mającym zasadnicze znaczenia dla oceny ich funkcjonowania. Proces podejmowania decyzji musi uwzględniać typowe dla systemów wytwórczych ograniczenia dotyczące ustalonego następstwa wykonywanych w procesie wytwórczym czynności (ograniczenia kolejnościowe) oraz związane z faktem, iż dany zasób może wykonywać jednocześnie najczęściej tylko jedną czynność (ograniczenia zasobowe). Należy również uwzględnić ograniczenie by podejmowane decyzje nie doprowadziły do powstania blokady. Problem podejmowania decyzji w systemach wytwarzania dotyczy wyboru kolejności i momentu rozpoczęcia realizacji poszczególnych czynności na przyporządkowanych im zasobach. Ponadto do problemu tego zakwalifikować można takie kwestie jak wybór wariantu procesu w przypadku procesów wielowariantowych lub też wybór zasobu w przypadku systemów charakteryzujących się redundancją zasobów.

Wśród różnych sposobów podejścia do rozwiązania problemu podejmowania decyzji w systemach wytwarzania [5], jedną z często spotykanych metod jest wykorzystanie reguł priorytetu. Metoda ta polega na tym, iż wprowadza się określone reguły, na podstawie których, spośród możliwych do wykonania czynności wybierana jest jedna, bądź też dla określonej czynności wybierany jest zbiór zasobów niezbędnych do jej realizacji. Wśród parametrów, na podstawie których tworzone są reguły priorytetu można wyróżnić m. in. czasy trwania operacji, wymagane terminy rozpoczęcia i zakończenia procesów czy też stopień wykorzystania zasobów. Podstawową zaletą reguł priorytetu jest ich łatwość implementacji.

Jedno z ciekawszych podejść zostało zaprezentowane w pracy [45]. W metodzie tej planowanie zadań produkcyjnych odbywa się na podstawie symulowanego tzw. wirtualnego procesu wytwarzania. W czasie symulacji wykorzystywane są różne reguły

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

priorytetu. Spośród uzyskanych rezultatów wybierany jest plan, który spełnił tzw. kryterium satysfakcji.

Innym sposobem podejścia do problemu podejmowania decyzji związanych z przydzielaniem zasobów wytwórczych jest harmonogramowanie. Polega ono na takim uszeregowaniu oraz przydzieleniu terminów rozpoczęcia i zakończenia operacji wchodzących w skład procesu wytwórczego, aby zgodnie z przyjętymi kryteriami oceny otrzymać możliwie najlepsze rezultaty. Metody harmonogramowania w porównaniu ze strategią reguł priorytetu dają lepsze efekty, niemniej ich złożoność obliczeniowa sprawia, że zagadnienie to zaliczane jest do klasy NP-trudny. Oznacza to, że standardowe metody harmonogramowania mogą być wykorzystywane jedynie do rozwiązywania trywialnych zadań. Wspomniany problem złożoności spowodował rozwój metod heurystycznych. W tym przypadku możemy uzyskać rozwiązania przybliżone, przy czym stopień przybliżenia do rozwiązań optymalnych jest trudny do oszacowania. W grupie metod heurystycznych znajdują się metody wykorzystujące różne techniki znane z tzw. sztucznej inteligencji [3] [29] [62], tj.: algorytmy genetyczne i ewolucyjne, systemy ekspertowe, algorytmy rozmyte, sieci neuronowe i inne.

Współcześnie rozwijane systemy wytwórcze charakteryzują się często rozproszoną strukturą systemu sterowania. Niesie to dodatkowe trudności związane z zagadnieniem podejmowania decyzji. Dotyczą one między innymi koordynacji działań rozproszonych elementów systemu oraz zapewnienia dostępu do wymaganej informacji. Proces podejmowania decyzji ma w tym przypadku zazwyczaj charakter negocjacyjny [57]. Istnieje wiele koncepcji przedstawiających określone rozwiązania wymienionych problemów. Różnią się one między innymi wykorzystywanymi w procesie komunikacji międzyagentowej protokołami komunikacyjnymi czy też obecnością lub nieobecnością elementów systemu reprezentujących cele systemowe. Częstymi kryteriami oceny działania zdecentralizowanych systemów wytwórczych są kryteria ekonomiczne, takie jak cena, efektywność czy wydajność.

Przykładowym protokołem stosowanym w komunikacji o charakterze negocjacyjnym jest protokół CNP (ang. Contract Net Protocol). Opiera się on na bezpośredniej komunikacji między agentami. Innym sposobem rozproszonego podejmowania decyzji jest wykorzystanie komunikacji poprzez środowisko za pomocą tzw. tablic ogłoszeń. Negocjacje w systemach wytwórczych mogą być inicjowane zarówno przez agenty reprezentujące zasoby wytwórcze jak i wytwarzane wyroby.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Pierwszy przypadek charakteryzuje negocjacje zorientowane na zasoby (ang. machine-centered negotiation), drugi - na wyroby (ang. part-centered negotiation). Wiele z algorytmów prowadzenia negocjacji w systemach wieloagentowych opartych jest na bazie mechanizmów rynkowych. Dużym źródłem inspiracji są też zagadnienia znane z teorii gier, takie jak aukcje, przetargi i inne. Ważną kwestią mającą potencjalnie duży wpływ na jakość podejmowanych decyzji jest proces uczenia się agentów. Źródłem wiedzy dla agentów może być w takim przypadku historia ich wcześniejszych działań lub też symulacje określające przyszłe stany agentów. Do uczenia agentów możliwe jest także wykorzystanie sieci neuronowych [46].

Poza wymienionymi sposobami podejścia do podejmowania decyzji, w literaturze można znaleźć rozwiązania dedykowane specyficznym systemom produkcyjnym. W pracach [53] [61] poruszono wspomnianą problematykę w kontekście systemów realizujących procesy cykliczne.

2.3 Metody przeciwdziałania blokadom

Cechą charakterystyczną systemów wytwarzania realizujących procesy współbieżne jest występowanie konfliktów zasobowych. Blokada jest konfliktem zasobowym, w którym nie jest możliwe kontynuowanie procesu wytwórczego ze względu na brak możliwości zgromadzenia zasobów potrzebnych do realizacji procesu. Konflikt ten nie ulega samoczynnemu rozwiązaniu wraz z upływem czasu. Konieczne jest zatem przedsięwzięcie niezbędnych kroków w celu przeciwdziałania blokadom.

Blokady pojawiają się w systemach dyskretnych, w których zasoby spełniają cztery warunki konieczne. Pierwszym z nich jest wzajemne wyłączanie polegające na tym, iż dany zasób biorący udział w realizowaniu określonego procesu jest niedostępny dla innych procesów. Drugim warunkiem jest przetrzymywanie i oczekiwanie polegające na rezerwacji części wymaganych zasobów i równoczesnym oczekiwaniu na pozostałe, które z kolei w tym samym czasie są wykorzystywane na potrzeby innego procesu. Trzeci warunek to brak wywłaszczeń polegający na tym, że określone zasoby mogą zostać zwolnione jedynie przez procesy, które dokonały ich wcześniejszej rezerwacji. Ostatnim warunkiem jest czekanie cykliczne, a więc sytuacja, w której pojawia się wzajemny cykl oczekiwań zasobowych procesów. Ze względu na specyfikę systemów wytwórczych pierwsze trzy warunki pozostają zawsze spełnione. Aby nie

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

dopuścić do powstawania blokad należy więc uniemożliwić powstanie sytuacji wzajemnego oczekiwania procesów na niezbędne zasoby.

Istnieją trzy główne metody postępowania z blokadami [4]. Są to:

- wykrywanie i likwidacja,
- zapobieganie,
- unikanie.

Strategia pierwsza dopuszcza pojawienie się blokady. W tym przypadku wykorzystywane są algorytmy pozwalające na wykrycie istnienia blokady oraz przedsięwzięcie określonych działań w celu jej usunięcia. Zastosowanie tej metody w systemach wytwórczych jest szczególnie niekorzystne ze względu na możliwość generowania odpadów. Metoda ta nie przeciwdziała także ponownemu pojawieniu się blokady.

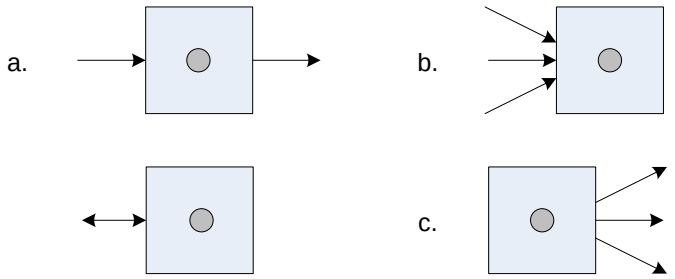
Najprostszym sposobem zapobiegania blokadom jest realizowanie tylko jednego procesu w systemie wytwórczym lub też rezerwacja wszystkich zasobów wymaganych do przeprowadzenia procesu jeszcze przed jego rozpoczęciem. Metody te charakteryzują się prostotą, niemniej jednak ich podstawową wadą jest mały stopień wykorzystania zasobów wytwórczych, co w praktyce zazwyczaj je dyskwalifikuje.

Największe korzyści daje zastosowanie trzeciej z wymienionych metod, mianowicie strategii unikania blokad. W tym przypadku, dla każdego procesu żądającego przydzielenia określonych zasobów jeszcze przed ich rezerwacją zostaje zweryfikowany stan systemu pod kątem możliwości wystąpienia blokady. Zasoby nie zostaną przydzielone, jeśli w konsekwencji ich przydzielenia pojawi się blokada lub wystąpi stan nieuchronnie do niej prowadzący. Wykonanie testu bezpieczeństwa systemu wymaga jednak czasu na przeprowadzenie niezbędnych obliczeń, które muszą być wykonywane przed rozpoczęciem każdej czynności realizowanej w systemie wytwórczym. Zastosowanie omawianej strategii pozwala jednak znacząco poprawić stopień wykorzystania zasobów. Jednym z najbardziej znanych ogólnych algorytmów unikania blokad jest algorytm bankiera [48]. Istnieją także inne koncepcje unikania blokad dedykowane dla systemów wytwórczych, jak np. przedstawiona w pracy [15] metoda polegająca na badaniu cykli w grafie żądań zasobowych, metoda opierająca się na tzw. strefach synchronizacji [6] lub też sposób wykorzystujący programowanie z ograniczeniami [61]. Oryginalnym podejściem do problemu unikania blokad jest także opracowana w Politechnice Krakowskiej metoda rezerwacji procesowej [63] [64].

BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Na potrzeby wyżej wymienionej metody wprowadzono podział zasobów wytwórczych biorących udział w realizacji procesów produkcyjnych na dwa zasadnicze typy obiektów:

- obiekty bezblokadowe (bezwarunkowo lub warunkowo),
- obiekty zagrożone blokadą.



Rys. 2. Przykłady obiektów bezblokadowych

Rys. 2 przedstawia obiekty bezwarunkowo bezblokadowe z minimalną liczbą miejsc na palety niezbędną do bezblokadowego działania równą jedności. Miejsca te zaznaczono na rysunku za pomocą okręgów umieszczonych wewnątrz każdego z obiektów. Wśród przedstawionych obiektów wyróżnić można zasoby posiadające:

(a) jeden obiekt poprzedzający i jeden obiekt następujący,
(b) dowolną liczbę obiektów poprzedzających i nie posiadające obiektów następujących,
(c) dowolną liczbę obiektów będących następnikami i nie posiadające obiektów poprzedzających.

Pełny wykaz typów obiektów bezblokadowych można znaleźć w pracy [64].

Poszczególne obiekty tworzą na trasach marszrut wykonania poszczególnych przedmiotów wytwarzanych w systemie tzw. strefy: bezblokadowe (składające się wyłącznie z obiektów bezblokadowych) oraz zagrożone blokadą (zbudowane odpowiednio wyłącznie z obiektów zagrożonych blokadą).

Aby nie dopuścić do powstania blokady, w myśl reguł zawartych w omawianej metodzie, przed rozpoczęciem realizacji każdej czynności wymagane jest istnienie rezerwacji procesowej jednego miejsca w każdej z pozostających na trasie marszruty stref bezblokadowych. Dodatkowo, jeśli obiekt wyjściowy rozważanej czynności należy do strefy zagrożonej blokadą, wymagane jest dokonanie rezerwacji procesowej miejsc

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

w obrębie każdego obiektu aż do końca tej strefy. Powyższe zasady obowiązują także przy wprowadzaniu nowych przedmiotów do systemu wytwórczego, za wyjątkiem sytuacji, gdy przedmiot wprowadzany jest na obiekt bezblokadowy nie mający obiektów poprzedzających lub będący jednocześnie pierwszym i ostatnim obiektem marszrut dla wszystkich przedmiotów pozostających w relacji z tym obiektem.

Należy zauważyć, że opracowywanie metod przeciwdziałania blokadom oraz poszukiwanie wydajnych algorytmów przydzielania zasobów do zadań są najczęściej traktowane jako dwa odrębne i niezależne zagadnienia. Taka sytuacja ma miejsce także w przypadku opisanej powyżej metody rezerwacji procesowej. Interesująca w tym aspekcie może być więc próba integracji procesów decyzyjnych z problematyką przeciwdziałania blokadom.

2.4 Obsługa zakłóceń w procesach produkcyjnych

Zakłócenia są nieodłączną cechą charakteryzującą procesy produkcyjne. Szybkie i efektywne reagowanie na nie nabiera w wolnorynkowej i wysoce konkurencyjnej gospodarce szczególnego znaczenia. Istotne staje się zatem wyposażanie nowoczesnych systemów sterowania produkcją w mechanizmy obsługi tego typu zdarzeń.

Zakłócenia występujące w systemach wytwórczych można, w zależności od przyjętego kryterium, sklasyfikować w różny sposób. Poniżej przedstawiono klasyfikację zakłóceń z uwagi na ich źródła [27] [39]:

- zakłócenia typu *upstream*: problemy z dostawą materiałów i półfabrykatów, ich jakością, opóźnieniami itp.,
- zakłócenia wewnętrzne: problemy w przepływie informacji i funkcjonowaniu systemu sterowania, błędy związane z podejmowaniem decyzji, błędy operatora, awarie maszyn i urządzeń, blokady itp.,
- zakłócenia typu *downstream*: nagłe zlecenia, zmiany w zamówieniach, sezonowość zleceń itp.

Inny z kolei podział związany jest z charakterem zakłóceń [38]. Rozróżnić tu można:

- zakłócenia nagłe (ang. *abrupt*) i stopniowe (ang. *gradual*),
- zakłócenia losowe (ang. *random*) i regularne (ang. *systematic*),
- zakłócenia czasowe, jakościowe oraz kosztowe.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

W pracy [30] zakłócenia sklasyfikowano na podstawie skutków ich wystąpienia. Otrzymano w ten sposób trzy grupy zakłóceń:

- zakłócenia operacji – uniemożliwiające wykonanie danej operacji, ale nie wykluczające możliwości realizacji innych operacji przydzielonych do danego stanowiska,
- zakłócenia maszyny – eliminujące z pracy całe stanowisko produkcyjne (np. na skutek awarii maszyny),
- zakłócenia procesu – powodujące natychmiastowe lub stopniowe wycofywanie całego procesu (np. w sytuacji wykrycia błędu procesu technologicznego).

Każdego rodzaju zakłócenie może skutkować potrzebą zmian w konfiguracji systemu sterowania, najczęściej także wymaga modyfikacji realizowanych harmonogramów produkcyjnych [59]. Aby sprostać związanym z tym wymaganiom, nowoczesne systemy sterowania powinny cechować m.in. rekonfigurowalność, samoorganizacja oraz zdolność do uczenia się [47]. Z tego też względu obsługa zakłóceń w systemach klasycznych napotyka na szereg trudności. Znacznie lepiej z omawianym problemem radzą sobie systemy oparte o architektury hybrydową i rozproszoną.

Odporne na zakłócenia systemy sterowania produkcją powinny nie tylko umożliwiać reagowanie na zaistniałe zakłócenia (*fail and recover*), ale także umieć je przewidywać i przeciwdziałać (*predict and prevent*). Leitão i Barbosa w pracy [34] wskazują na możliwość wykorzystania w tym celu metod statystycznych bądź sieci neuronowych, które w oparciu o historię zdarzeń zakłócających realizowane procesy (awaria urządzenia, opóźnienie bądź odwołanie zlecenia, pilne zamówienia) pozwoliłyby na predykcję oraz uwzględnianie takich zakłóceń w przyszłości. Zaproponowany mechanizm obsługi zakłóceń oparty na predefiniowanych regułach, a także posiadający zdolność uczenia się [35] został rozwinięty i zaimplementowany w holonicznym systemie sterowania ADACOR [36], zaś przeprowadzone testy systemu w zakresie reagowania na zdarzenia zakłócające realizowane procesy produkcyjne przyniosły obiecujące rezultaty.

Wzrost odporności na zakłócenia w stosunku do systemów klasycznych został także zauważony w wyniku prototypowego wdrożenia wieloagentowego systemu sterowania wytwarzaniem zrealizowanego w firmie DaimlerChrysler [13].

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Mimo stale rosnącego stopnia niezawodności maszyn i urządzeń wytwórczych, rzeczywiste systemy produkcyjne w dalszym ciągu narażone są na występowanie zakłóceń. Z tego powodu istotne znaczenie mają działania, których celem jest uwzględnianie w systemach sterowania mechanizmów obsługi zakłóceń pojawiających się najczęściej.

2.5 Technologie komunikacyjne

Poczynając od rozwiązań w zakresie komunikacji między urządzeniami automatyki przemysłowej [31] spotkać można wiele istniejących protokołów komunikacyjnych, jak na przykład MAP (ang. *Manufacturing Automation Protocol*), MMS (ang. *Manufacturing Message Specification*) czy CIP (ang. *Common Industrial Protocol*) oraz technologii sieci miejscowych, takich jak Profibus, DeviceNet, InterBus czy LONWorks, z których żadna nie pełni roli rozwiązania dominującego i akceptowanego przez wszystkich. Także w zakresie samych układów sterowania urządzeń wytwórczych spotyka się różne rozwiązania [50], takie jak układy NC (ang. Numerical Control), RC (ang. *Robot Control*), PLC (ang. *Programmable Logic Control*) czy CC (ang. *Cell Control*). Podobną sytuację można również zaobserwować w zakresie technologii obiektów rozproszonych, szeroko rozpowszechnionych w zdecentralizowanych systemach sterowania. Aktualnie spotykane rozwiązania bazują najczęściej na jednej z trzech technologii [51]: DCOM, CORBA lub Java RMI. Wymienione technologie dostarczają narzędzi i bibliotek wymaganych do budowy systemu sterowania wytwarzaniem, niemniej użycie każdego z rozwiązań niesie za sobą określone ograniczenia. Jest to np. zawężenie możliwych do wykorzystania systemów operacyjnych do produktów pochodzących od jednego tylko dostawcy, jak w przypadku technologii DCOM (produkty firmy Microsoft) czy też zredukowanie wachlarza języków programowania tylko do jednego z nich, jak w przypadku technologii Java RMI (język Java), wreszcie znane są też przypadki niepoprawnego współdziałania rozwiązań tworzonych w oparciu o jedną technologię, z czym można spotkać się w technologii CORBA. Z nieuniknionymi barierami należy liczyć się także przy próbach integracji rozwiązań bazujących na wymienionych technologiach.

W wyniku prowadzonych od kilku lat prac w zakresie standaryzacji układów sterowania numerycznego urządzeń wytwórczych, opracowane zostały układy

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

sterowania wykorzystujące komputery przemysłowe, co w znacznym stopniu ułatwia ich integrację z pozostałymi elementami tworzącymi system sterowania. Dzięki rosnącej przepustowości sieci Ethernet, a także upowszechnieniu się tak zwanego przełączalnego Ethernet-u [16], coraz częściej można spotkać sterowniki urządzeń wytwórczych umożliwiające wykorzystanie tej technologii w celu komunikacji z innymi urządzeniami i systemami sterowania. Coraz większą popularność zdobywają również systemy umożliwiające zdalną diagnostykę i konfigurację urządzeń wytwórczych w oparciu o technologię WWW [60] wykorzystującą standardowy protokół HTTP, bazujący na protokole TCP/IP i powszechnie wykorzystywany w Internecie. W rozwiązaniach takich wykorzystywane są najczęściej wbudowane w urządzenia wytwórcze serwery WWW, a dostęp do określonych danych osiąga się poprzez zwykłą przeglądarkę stron WWW [40].

2.5.1 Technologia Web services

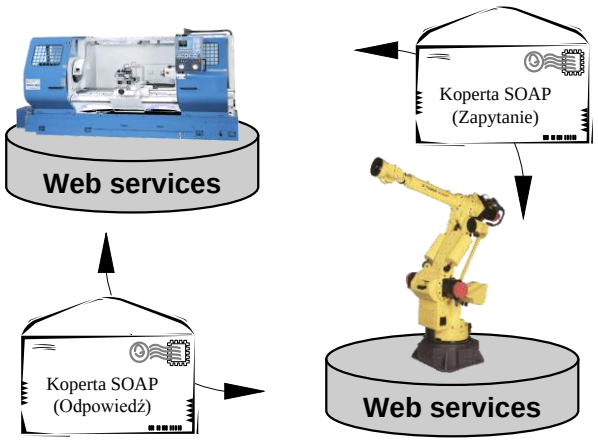
Na szczególną uwagę w zastosowaniach integracji informacji w systemach sterowania wytwarzaniem zasługuje dynamicznie rozwijana w ostatnich latach technologia Web services [66]. Jej podstawowymi cechami są tekstowy format wymiany danych oraz otwartość standardu. Technologia ta wykorzystuje kilka innych standardów, takich jak XML, SOAP czy WSDL, a ponadto, co bardzo istotne, jest wspierana przez wszystkich głównych graczy na rynku IT.

XML (ang. *Extensible Markup Language*) [2] jest metajęzykiem opartym na znacznikach. Ich rolą jest między innymi definiowanie podstawowych składników zwanych elementami dokumentu XML-owego. Każdy element składa się ze znacznika otwierającego i zamykającego, pomiędzy nimi znajdować się mogą przekazywane dane, a także dowolna liczba elementów składowych. Element może posiadać również określoną liczbę atrybutów, w których także można umieszczać dane. Reguły języka XML określają jedynie strukturę XML-owego dokumentu, nie narzucają natomiast nazewnictwa ani elementów, ani ich atrybutów. Stąd język ten zyskuje dużą popularność w zakresie przechowywania i wymiany danych w wielu różnych dziedzinach zastosowań.

Kolejnym standardem leżącym u podstaw technologii Web services jest SOAP. Pierwotnie skrót ten pochodził od nazwy Simple Object Access Protocol, jednak ze

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

względu na rozszerzenie potencjalnych zastosowań, aktualna wersja specyfikacji nie rozwija tego skrótu. SOAP definiuje strukturę XML-owego pakietu informacji, który następnie może być przekazywany między węzłami w zdecentralizowanym środowisku. Główny element tej struktury zwany jest „kopertą" SOAP (ang. *SOAP Envelope*). W jego skład wchodzą między innymi takie elementy jak SOAP header (opcjonalnie) i SOAP body. W tym ostatnim zawarte są informacje dla docelowego odbiorcy. Typowym protokołem wykorzystywanym do przesyłania komunikatów SOAP (ang. *SOAP messages*) jest internetowy protokół HTTP.



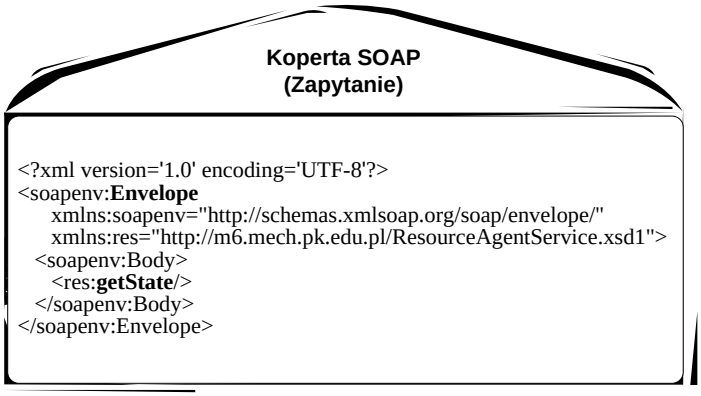
Rys. 3. Schemat procesu wymiany informacji w technologii Web services

Trzecim z wymienionych standardów, na których opiera się technologia Web services jest WSDL (ang. *Web Services Description Language*) [1]. Definiuje on reguły opisu usług oferowanych przez Web services, dotyczące w szczególności rodzaju danej usługi, jej lokalizacji i sposobu wywoływania. WSDL również wykorzystuje standard XML. W tym formacie bowiem przekazywane są informacje dotyczące opisywanych usług.

Rys. 3 przedstawia schemat procesu wymiany informacji w technologii Web services pomiędzy dwoma węzłami pracującymi w środowisku rozproszonym. Każdy z węzłów może być zarówno nadawcą jak i odbiorcą komunikatów SOAP.

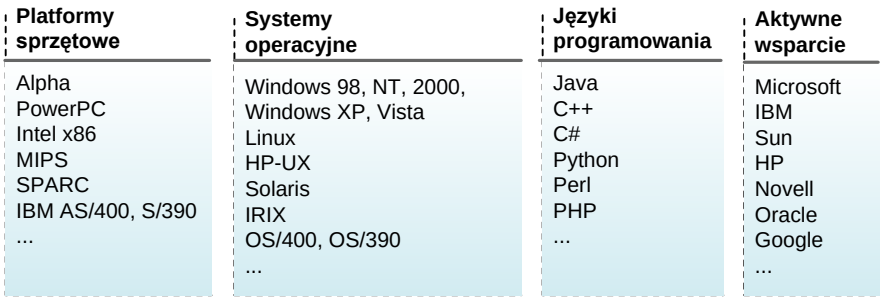
Przykładowa zawartość „koperty" SOAP, będącej wysłanym przez obrabiarkę do robota zapytaniem o jego aktualny stan (getState) przedstawiono na rys. 4.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 4. Komunikat SOAP

Tekstowy format, w którym przesyłane są dane w technologii Web services, stwarza duże możliwości analizy i przetwarzania informacji na wielu platformach sprzętowych i systemowych oraz za pomocą różnorodnych języków i narzędzi programistycznych [65]. Niebagatelny wpływ na perspektywy związane z omawianą technologią ma również fakt wsparcia technicznego i aktywnego udziału w jej rozwoju liderów rynku informatycznego (rys. 5).



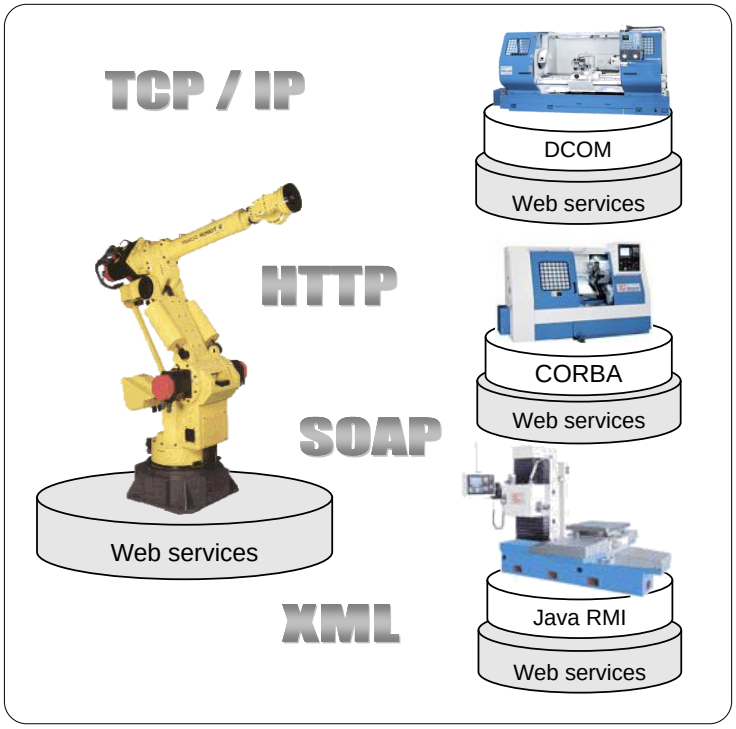
Rys. 5. Web services: platformy, systemy, języki i aktywne wsparcie

Dodatkowym atutem technologii Web services jest możliwość integracji już istniejących rozwiązań informatycznych wykorzystujących wzajemnie niekompatybilne technologie obiektów rozproszonych tj. CORBA, DCOM czy też Java RMI. Web services mogą tu pełnić rolę swoistego opakowania czy też pośrednika pomiędzy wymienionymi technologiami, co zaprezentowano na rys. 6.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Warto również wspomnieć, że zastosowanie do przesyłania komunikatów SOAP protokołu HTTP zazwyczaj wiąże się z wykorzystaniem domyślnego dla usługi WWW portu TCP 80 (tzw. *well-known port*), co w konsekwencji daje odporność technologii Web services na blokady typu zapory ogniowej (ang. *firewall*).

Obok niezaprzeczalnych zalet, jakie posiada technologia Web services, należy także zauważyć istnienie pewnych niedogodności związanych z wykorzystanymi w niej rozwiązaniami. Jedną z nich jest znacząco większy rozmiar pakietów SOAP, których przetwarzanie może trwać wielokrotnie dłużej niż w technologiach wykorzystujących binarny format danych, takich jak CORBA, DCOM czy Java RMI. Różnice te dodatkowo powiększają się w miarę wzrostu ilości i złożoności przesyłanych danych [37].



Rys. 6. Integracja technologii rozproszonych

Technologia Web services została zauważona w środowisku zajmującym się integracją informacji w systemach wytwarzania, a w szczególności problematyką sterowania systemami wytwarzania [10] [17] [71] [72], niemniej liczba publikacji raportujących jej zastosowanie jest w dalszym ciągu niewielka. Zdaniem autora rozwiązanie to daje jednak uzasadnioną sukcesem Internetu nadzieję na przełamanie

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

barier związanych z heterogenicznością środowisk wytwórczych, w szczególności ich systemów sterowania oraz na określenie standardów wymiany informacji w ww. systemach.

2.6 Podsumowanie aktualnego stanu wiedzy. Określenie celu pracy

Wyzwaniem dla projektantów nowoczesnych systemów sterowania wytwarzaniem jest sprostanie wymaganiom i oczekiwaniom stawianym przez współczesne uwarunkowania rynkowe. Systemy sterowania powinny być w stanie szybko reagować na częste zmiany warunków produkcyjnych, a także na nieuniknione sytuacje awaryjne.

Do chwili obecnej nie został jeszcze jednoznacznie określony standard architektury nowoczesnych systemów sterowania wytwarzaniem. Obserwując trendy i kierunki realizowanych prac należy jednak zauważyć fakt dynamicznego rozwoju koncepcji opartych o hybrydowe i rozproszone architektury systemów sterowania wytwarzaniem, które mają szansę stać się w przyszłości rozwiązaniami dominującymi. Najlepszą technologią do budowy takich architektur są systemy wieloagentowe i to na nich zapewne budowane będą standardy implementacyjne nowoczesnych systemów sterowania wytwarzaniem.

Trudno aktualnie przewidzieć, który z przedstawionych sposobów podejmowania decyzji będzie w najbliższej przyszłości odgrywał dominującą rolę. Biorąc jednak pod uwagę rozwój zdecentralizowanych systemów sterowania wytwarzaniem, należy spodziewać się, że rosnące znaczenie będzie miał negocjacyjny charakter podejmowania decyzji realizowany przez inteligentne agenty reprezentujące przedmioty i obiekty wytwórcze. Nieuniknione przy rozproszonym podejściu do podejmowania decyzji są problemy z optymalizacją funkcjonowania systemu z uwagi na globalne kryteria oceny jego efektywności. Niezbędne staje się więc opracowanie mechanizmów i narzędzi umożliwiających uwzględnienie globalnych celów systemowych. Zasygnalizowana w przeglądzie literatury idea współbieżnej z rzeczywistym sterowaniem realizacji symulacji wykorzystującej wirtualne procesy produkcyjne nie jest jak do tej pory szeroko stosowana we współczesnych rozwiązaniach, a zdaniem autora realizacja tej koncepcji może przynieść wymierne korzyści.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Strategie postępowania z blokadami są w chwili obecnej przedmiotem wielu działań zmierzających do opracowania możliwie najlepszej koncepcji pozwalającej na skuteczne zastosowanie we współczesnych dyskretnych systemach wytwórczych. Analizując przebieg i wyniki prac można określić podstawowy kierunek rozwoju tychże koncepcji, który zmierza do rozwijania trzeciej z wymienionych metod, czyli metody unikania blokad. Jak już jednak zauważono, najczęściej spotykanym podejściem jest odseparowanie mechanizmu przeciwblokadowego od procesów decyzyjnych. Idea integracji działań w tych dwóch zakresach jest, zdaniem autora, kwestią wartą poświęcenia szczególnej uwagi.

Zdolność efektywnego reagowania na różnego rodzaju zakłócenia w procesach produkcyjnych jest jednym z podstawowych wymagań względem nowoczesnych systemów produkcyjnych. Systemy takie powinny cechować: rekonfigurowalność, samoorganizacja oraz zdolność uczenia się. Najlepsze w tym zakresie rezultaty osiągają systemy zbudowane w oparciu o rozproszone i hybrydowe architektury, co potwierdzają wyniki realizowanych prac. Niezbędne staje się także wprowadzanie mechanizmów obsługi zakłóceń poprzedzone wcześniejszą identyfikacją ich źródeł i rodzajów.

Dominująca w lokalnych sieciach komputerowych technologia Ethernet ma realne szanse stać się standardem komunikacyjnym także w miejscowych sieciach przemysłowych. Potwierdza to choćby fakt wspierania tejże technologii przez coraz liczniejsze grupy dostawców urządzeń automatyki przemysłowej. Podobnie technologie internetowe, w tym Web services, wydają się spełniać większość przesłanek do tego, by skutecznie przezwyciężyć bariery związane z heterogenicznością informatycznych środowisk wytwórczych. Dają one również szansę, by w zakresie rozwiązań informatycznych stać się w przyszłości standardem akceptowanym w środowiskach zajmujących się budową i rozwojem współczesnych systemów sterowania wytwarzaniem.

Na podstawie analizy dotychczasowego stanu wiedzy oraz dających się zaobserwować trendów rozwojowych systemów wytwarzania można sformułować cel niniejszej pracy, którym jest opracowanie oprogramowania zdecentralizowanego, wieloagentowego systemu sterowania wytwarzaniem AIM. Najważniejszymi w opinii autora elementami w realizacji tego celu są:

- **opracowanie i implementacja algorytmu integrującego procesy decyzyjne z mechanizmem przeciwblokadowym,**

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

- **opracowanie i wdrożenie rozproszonego mechanizmu symulacyjnego wykorzystującego wirtualne agenty i wirtualne procesy wytwórcze, którego głównym przeznaczeniem jest wspomaganie podejmowania decyzji oraz weryfikacja możliwości przyjęcia nowego zlecenia,**
- **opracowanie mechanizmów obsługi wybranych zakłóceń w procesach produkcyjnych,**
- **wykorzystanie technologii internetowych oraz standardowych narzędzi informatycznych umożliwiających efektywne działanie systemu sterowania w heterogenicznym środowisku sprzętowym i programowym.**

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

3 Wieloagentowy system oprogramowania AIM

Opracowywany w Politechnice Krakowskiej wieloagentowy system oprogramowania AIM (Agents Integrated Manufacturing) [69] [73] stanowi próbę odpowiedzi na współczesne oczekiwania rynkowe. Cechami charakterystycznymi wspomnianego systemu są między innymi: integracja problematyki technologicznego przygotowania produkcji z problematyką sterowania produkcją oraz wykorzystanie w implementacji mechanizmów komunikacyjnych otwartych i szeroko akceptowanych standardów internetowych. Pierwsza z wymienionych cech wiąże się z połączeniem dwóch realizowanych do tej pory oddzielnie etapów rozwoju wyrobu, tj. komputerowego przygotowania procesów obróbki i komputerowego sterowania produkcją. Druga cecha ma szczególne znaczenie w aspekcie pokonywania barier komunikacyjnych związanych z heterogenicznością środowisk produkcyjnych.

Niniejsza praca doktorska obejmuje zagadnienia dotyczące sterowania na poziomie operatywnym w systemie AIM. Przedstawione w niej koncepcje stanowią rozwinięcie idei wieloagentowego systemu sterowania wytwarzaniem przedstawionej w pracy [63]. W wyniku zrealizowanych w ramach rozprawy doktorskiej prac zmodyfikowano istniejące lub opracowano nowe mechanizmy i algorytmy działania poszczególnych elementów systemu sterowania wytwarzaniem zapewniające następującą funkcjonalność:

- efektywne sterowanie dyskretnymi systemami poprzez integrację podejmowania decyzji z problematyką blokad,
- możliwość współbieżnego sterowania rzeczywistymi systemami produkcyjnymi i symulacji wykorzystującej wirtualne procesy produkcyjne,
- zdolność do rekonfiguracji systemu sterowania w zakresie wchodzących w skład systemu produkcyjnego zasobów, a także realizowanych procesów wytwórczych,
- obsługa wybranych zakłóceń w procesach produkcyjnych obejmujących:
    - awarie urządzeń wytwórczych,
    - akceptowanie bądź odrzucanie nowych zleceń.

W pracy wykorzystano zaproponowany w monografii [63] relacyjny model dyskretnego systemu wytwarzania z niezbędnymi zmianami wynikającymi z wprowadzonych modyfikacji oraz innowacji w strukturze i funkcjonowaniu systemu

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

sterowania wytwarzaniem AIM. Istotę opracowanych rozwiązań przedstawiono za pomocą UML-owych diagramów.

Zasadniczym osiągnięciem pracy jest opracowanie wieloagentowego oprogramowania systemu sterowania wykorzystującego w mechanizmach wymiany informacji technologie internetowe. Oprogramowanie to realizuje wymienione powyżej zadania i jednocześnie pozostaje otwarte na możliwość poszerzania oferowanej przez nie funkcjonalności.

W podrozdziale 3.1 przedstawiono ogólną koncepcję wieloagentowego systemu oprogramowania AIM. W dalszych podrozdziałach omówiono szczegółowo opracowane w ramach niniejszej pracy doktorskiej aspekty sterowania na poziomie operatywnym, w tym:

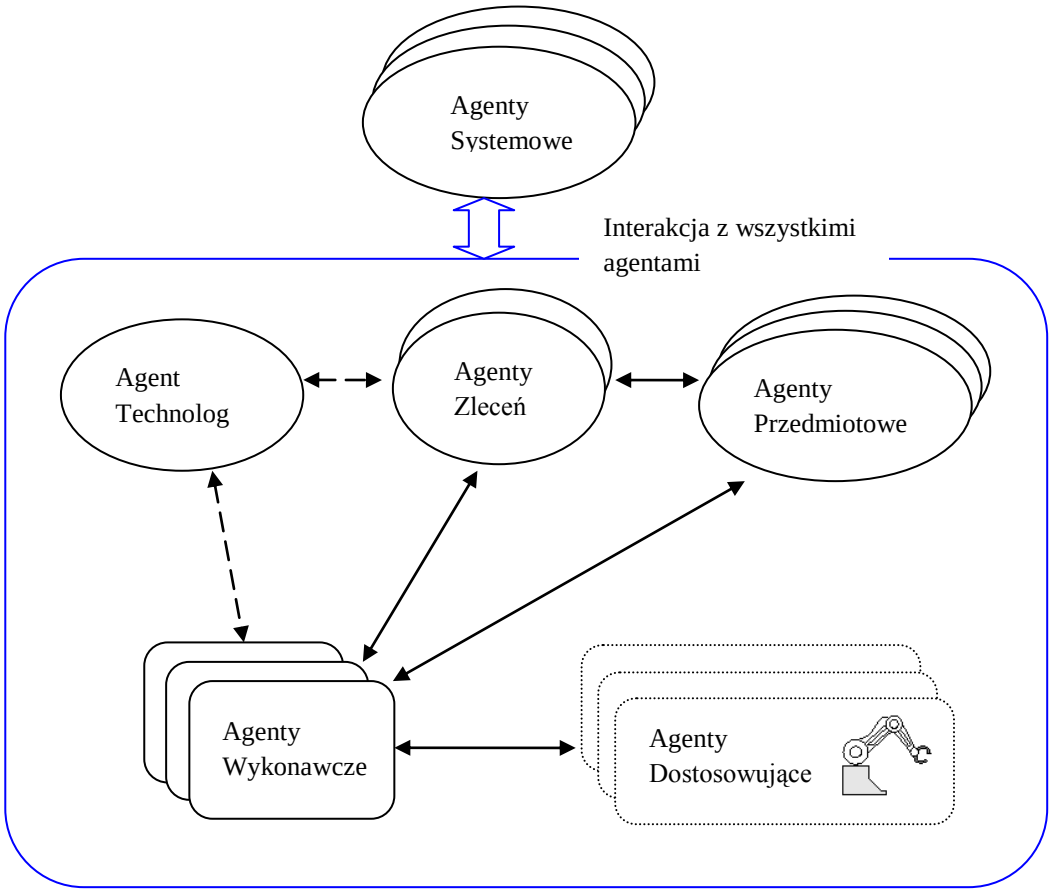
- zmodyfikowane w stosunku do koncepcji zawartej w pracy [63] algorytmy działania agentów reprezentujących zasoby wytwórcze (podrozdział 3.4) oraz pełniących funkcje pomocnicze agentów systemowych (podrozdział 3.2),
- koncepcję i algorytmy działania nowo opracowanych agentów reprezentujących otrzymywane zamówienia (podrozdział 3.3) oraz agentów reprezentujących wytwarzane w systemie produkcyjnym przedmioty (podrozdział 3.5),
- istotę integracji zastosowanej metody przeciwdziałania blokadom z procesami decyzyjnymi (podrozdział 3.5),
- ideę i zasadę funkcjonowania mechanizmu symulacyjnego przeznaczonego do pracy w trybie wspomagania decyzji lub w celu weryfikacji możliwości przyjęcia nowego zlecenia (podrozdział 3.6),
- zastosowane mechanizmy obsługi zakłóceń wynikających z awarii urządzeń wytwórczych lub nowo otrzymywanych zleceń (podrozdział 3.7).

Kwestiom implementacyjnym, w szczególności korzyściom płynącym z wykorzystania technologii Web services, a także przykładom obrazującym wybrane aspekty sterowania produkcją z użyciem opracowanego oprogramowania poświęcono rozdział 4.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

3.1 Koncepcja budowy i działania

Koncepcję budowy oprogramowania systemu AIM oparto na technologii agentowej [69]. W skład systemu wchodzi sześć typów agentów. Są to: agenty wykonawcze, agenty dostosowujące, agenty zleceń, agenty przedmiotowe, agent technolog oraz agenty systemowe (rys. 7). W zależności od typu agenta, komunikacja z innymi agentami następuje w fazie konfiguracji i rekonfiguracji systemu (przerywane linie) lub na etapie sterowania produkcją (linie ciągłe), albo też, jak w przypadku agenta systemowego, w każdym z wymienionych etapów.



Rys. 7. Ogólna struktura wieloagentowego systemu AIM

Zasadniczą rolę w systemie AIM pełnią uniwersalne, rekonfigurowalne moduły programowe zwane agentami wykonawczymi. Ich zadaniem jest reprezentowanie wchodzących w skład systemu wytwarzania zasobów (w dalszej części pracy zamiennie określanych także mianem obiektów) wytwórczych takich jak: maszyny, środki

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

transportu i manipulacji, magazyny, urządzenia kontrolno-pomiarowe itp. Agenty te charakteryzują się następującymi właściwościami:

- posiadają autonomię decyzyjną związaną ze zbiorem czynności elementarnych realizowanych przez ich zasoby wytwórcze,
- dysponują wiedzą o powiązaniach z innymi agentami wytwórczymi współuczestniczącymi w realizacji poszczególnych czynności,
- kontrolują przepływ wytwarzanych przedmiotów przez reprezentowane zasoby wytwórcze,
- posiadają wiedzę na temat dostępności i stanu obiektów wytwórczych.

Rolą każdego z agentów wykonawczych jest logiczna reprezentacja w systemie sterowania przypisanego mu zasobu wytwórczego. W jej ramach agent wykonawczy dokonuje m.in. analizy warunków koniecznych realizacji poszczególnych czynności elementarnych oraz współdziałając z agentami przedmiotowymi podejmuje decyzje dotyczące wyboru czynności do rozpoczęcia.

Z poszczególnymi zasobami wytwórczymi oraz reprezentującymi je agentami wykonawczymi ściśle powiązane są tzw. agenty dostosowujące. Agenty te jako jedyne w rozważanym systemie sterowania nie posiadają w zakresie swojego typu cechy uniwersalności w takim znaczeniu, że już na etapach projektowania i późniejszej implementacji (nie zaś dopiero w chwili konfiguracji) dedykowane są konkretnym zasobom wytwórczym i ich agentom wykonawczym. Zasadniczą rolą agentów dostosowujących jest pośredniczenie pomiędzy warstwą logiczną oprogramowania (agentami wykonawczymi) a sprzętowymi sterownikami konkretnych urządzeń. Do podstawowych zadań agentów dostosowujących należą [74]:

- weryfikacja technicznej możliwości realizacji czynności,
- dostarczanie informacji o dostępnych możliwościach wariantowej realizacji czynności,
- realizacja czynności jako uporządkowanego zbioru akcji wykonywanych przez sterownik zasobu,
- nadzorowanie wykonywania czynności,
- gromadzenie informacji o wykorzystywanych narzędziach i dostępnych okresach ich trwałości (dla zasobów obróbkowych).

W procesy decyzyjne zachodzące w systemie sterowania poza agentami wykonawczymi zaangażowane są także agenty reprezentujące wytwarzane w systemie przedmioty, tzw. agenty przedmiotowe. Biorą one czynny udział w procesie

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

podejmowania decyzji, dokonują weryfikacji warunków uniemożliwiających wystąpienie blokad, ich rolą jest także m.in. rejestrowanie zmian i stanów pośrednich, jakie przyjmują reprezentowane przez nie przedmioty w trakcie procesu wytwórczego. Założono istnienie dedykowanego agenta przedmiotowego dla każdego z wytwarzanych przedmiotów, jednak z uwagi na przeznaczenie systemu AIM do sterowania spaletyzowanymi systemami produkcyjnymi, część działań wspólnych dla wszystkich znajdujących się w obrębie palety przedmiotów (np. podejmowanie decyzji, weryfikacja warunków przeciwblokadowych) realizowana jest jedynie przez wybrane agenty pełniące role ich reprezentantów.

Z agentami przedmiotowymi blisko związane są agenty zleceń, które reprezentują poszczególne zamówienia. Każdy z nich posiada komplet informacji dotyczących parametrów technicznych oczekiwanych produktów, procesów wytwórczych wymaganych do ich zrealizowania, żądanego terminu realizacji, kosztów itp.

Szczególną rolę w systemie AIM odgrywa agent technolog. Jest on decydentem wyposażonym w ekspercką wiedzę z dziedziny technologii wytwarzania, jego zadaniem jest planowanie i modyfikacja procesów technologicznych dla przyjmowanych zamówień. W ramach swych działań przygotowuje on dla systemu sterowania wielowariantowy proces produkcyjny zapisując w formacie XML sekwencje czynności elementarnych prowadzących do otrzymania przedmiotu obrabianego z wejściowego półfabrykatu. Wielowariantowość oznacza tu, że to samo zlecenie można zrealizować różnymi sposobami, wykorzystując do tego celu dostępne środki produkcji. Zakłada się, że w systemie istnieje co najmniej jeden agent technolog, który jest uruchamiany przez operatora. Swoją aktywność agent technolog rozpoczyna w chwili otrzymania od agenta zlecenia polecenia przygotowania wielowariantowego procesu wytwarzania, kończy ją zaś przekazaniem temuż agentowi przygotowanego procesu bądź informacji o braku możliwości jego wygenerowania [24] [25].

Ostatnią grupę agentów tworzą tzw. agenty systemowe uruchamiane na poszczególnych komputerach wchodzących w skład infrastruktury sprzętowej systemu sterowania. Ich działania dotyczą administracji i monitorowania aktualnego stanu systemu, rejestracji agentów itp. Spośród agentów systemowych powołuje się jednego uprzywilejowanego tzw. superagenta pełniącego funkcje koordynacyjne.

Jedną z ciekawszych cech systemu AIM jest wprowadzenie mechanizmu symulacyjnego wykorzystującego tzw. wirtualne procesy wytwórcze [70]. Trzon omawianego mechanizmu stanowią wirtualne kopie (klony) agentów biorących udział

BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

w procesie sterowania operatywnego tj. wirtualne agenty wykonawcze oraz przedmiotowe, a także wirtualne agenty zleceń. Wymienione agenty współdziałają z ich rzeczywistymi odpowiednikami, a także w ograniczonym zakresie z pozostałymi elementami tworzącymi system sterowania. Za koordynację wirtualnych procesów odpowiedzialny jest superagent. Zasadniczym przeznaczeniem mechanizmu symulacyjnego jest wspomaganie procesu podejmowania decyzji oraz weryfikacja możliwości przyjęcia nowego zlecenia. Istotę jego działania przedstawiono w rozdziale 3.6.

W kolejnych podrozdziałach omówiono cztery z powyższych typów agentów niezbędnych do funkcjonowania systemu na poziomie sterowania operatywnego wraz z ich wzajemnymi powiązaniami. Są to agenty:

- systemowe,
- zleceń,
- wykonawcze,
- przedmiotowe.

Przygotowywanie wielowariantowych procesów produkcyjnych przez agenta technologa oraz sterowanie na poziomie sprzętowym realizowane przez agenty dostosowujące wykraczają poza zakres niniejszej rozprawy doktorskiej. Kwestie te będą bowiem poruszane w odrębnych pracach doktorskich. Na potrzeby realizacji niniejszej rozprawy założono, iż tam gdzie to konieczne istnieją opracowane procesy produkcyjne dla wytwarzanych przedmiotów, zaś rzeczywistą pracę agentów dostosowujących zastąpiono programową symulacją ich działania.

3.2 Agenty systemowe

Agenty systemowe w systemie AIM są odpowiedzialne za działania o charakterze administracyjno-monitorującym. Przyjęto, że ich liczba równa jest liczbie komputerów uczestniczących w realizacji procesu sterowania, przy czym założono, że na jednym komputerze znajduje się jeden agent systemowy. W zakresie działań omawianych agentów wyróżnić można cztery zasadnicze grupy zadań.

Zadania z pierwszej grupy wiążą się z działaniami administracyjno-informacyjnymi dotyczącymi pracy agentów wszystkich pozostałych typów uruchomionych na tym samym komputerze co agent systemowy. W zakres działań agentów systemowych

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

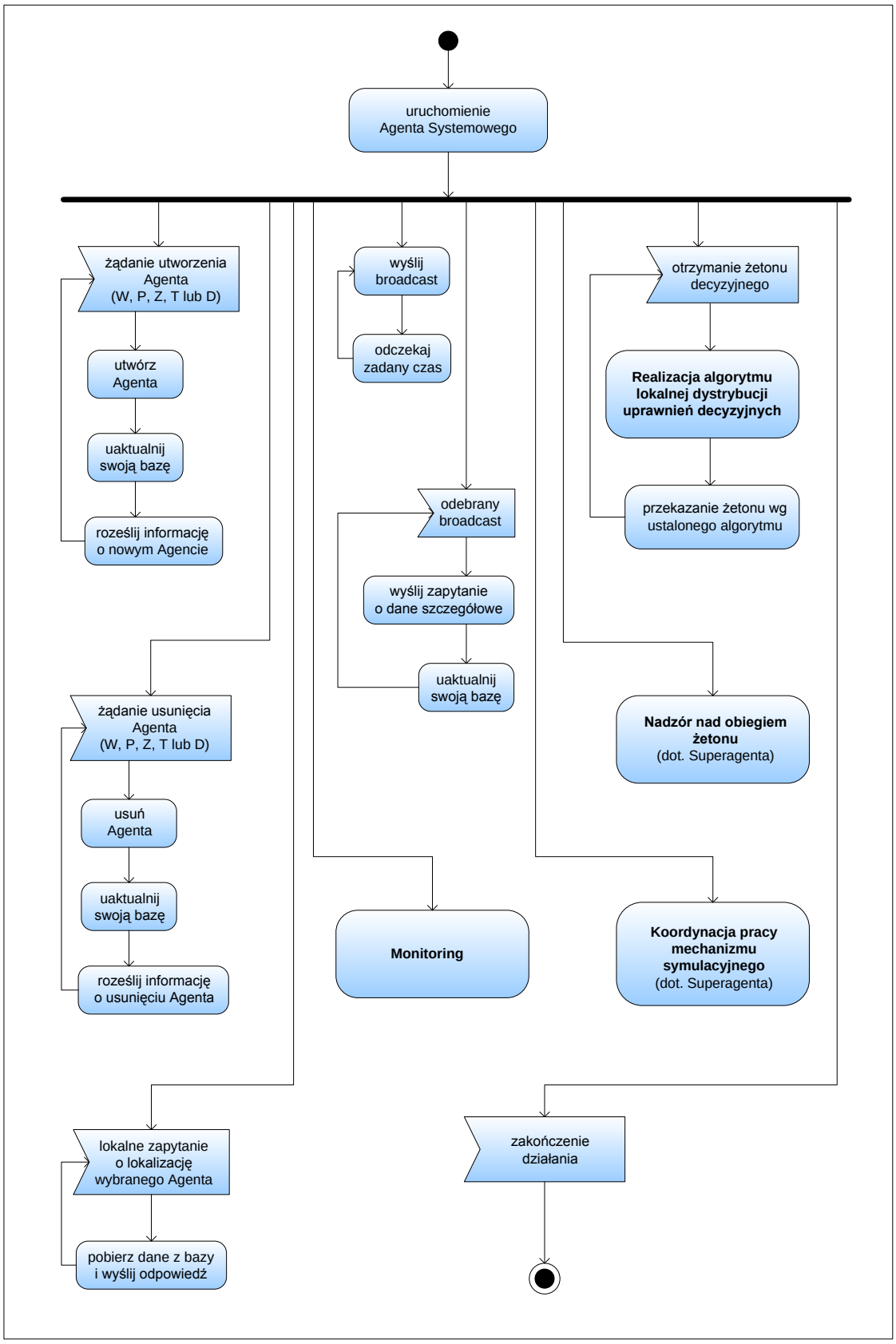
wchodzą tu takie zadania jak: inicjalizacja poszczególnych agentów (wykonawczego /W/, przedmiotowego /P/, zlecenia /Z/, dostosowującego /D/ oraz technologa /T/) i odpowiednio usuwanie z systemu tych, które na danym etapie procesu kończą realizację swych zadań. Działania z tej grupy obejmują także rejestrację poszczególnych agentów w lokalnej bazie adresowej, dystrybucję informacji lokalizacyjnych pomiędzy agentami systemowymi oraz udzielanie informacji w odpowiedzi na stosowne zapytania ze strony lokalnych agentów.

Druga grupa zadań związana jest z udziałem agentów systemowych w procesie dystrybuowania uprawnień decyzyjnych. W systemie AIM przyjęto sekwencyjny sposób ich przyznawania i wykorzystano w tym celu algorytm pierścienia z żetonem [52]. Zagadnienie to ma istotne znaczenie dla poprawności realizowanych w systemie AIM procesów decyzyjnych i będzie szerzej omówione w podrozdziale 3.2.1.

Trzecią grupę zadań stanowią mechanizmy odpowiedzialne za badanie otoczenia sieciowego pod kątem poszukiwań innych agentów systemowych, a tym samym innych komputerów, na których mogą być zlokalizowane agenty wymagane w czasie realizacji procesu sterowania. Badanie to polega na cyklicznym rozgłaszaniu (broadcasting) w sieci informacji o swojej lokalizacji i równocześnie na podejmowaniu stosownych działań po otrzymaniu takiego informacyjnego pakietu danych. Mechanizmy te mogą być jedynym źródłem informacji o agentach systemowych znajdujących się w otoczeniu sieciowym, mogą także uzupełniać przekazaną agentom systemowym (w momencie ich inicjalizacji) wstępną statyczną listę potencjalnych lokalizacji agentów, wreszcie mogą zostać zupełnie wyłączone przy założeniu, że przekazana statyczna lista zawiera pełną informację o lokalizacji agentów systemowych. Należy jednak dodać, że ze względu na zastosowaną implementację polegającą na wysyłaniu pakietów danych na adres rozgłoszeniowy (broadcast) sieci lokalnej, mechanizm ten może być z powodzeniem wykorzystany jedynie w obrębie takiej właśnie sieci.

Ostatnia grupa zadań obejmuje monitorowanie stanu systemu, zarówno w aspekcie lokalnym (stan poszczególnych agentów zlokalizowanych na danym komputerze), jak również w aspekcie globalnym (wzajemne monitorowanie stanu poszczególnych agentów systemowych). W zakres tej grupy zadań wchodzą także działania związane z zapewnieniem integralności systemu sterowania przy uwzględnieniu możliwości wystąpienia sytuacji awaryjnych.

BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 8. Zadania agenta systemowego

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Uprzywilejowanym agentem systemowym posiadającym szczególne znaczenie jest tzw. superagent. Wyłonienie superagenta spośród agentów systemowych zostaje dokonane w chwili inicjalizacji systemu i jest efektem realizacji algorytmu elekcji zapewniającego istnienie tylko i wyłącznie jednej jego instancji. Poza zestawem zadań przynależnych każdemu z agentów systemowych, superagent pełni w systemie AIM określone dodatkowe funkcje. Jedną z nich jest nadzór nad prawidłowym obiegiem żetonu decyzyjnego. Inną ważną funkcją spełnianą przez superagenta jest koordynacja pracy mechanizmu symulacyjnego omówionego szerzej w rozdziale 3.6.

Poszczególne zadania, a także wybrane sekwencje wykonywanych działań dla każdego z zadań, przedstawione zostały za pomocą UML-owego diagramu czynności na rys. 8.

3.2.1 Rola agentów systemowych w przyznawaniu uprawnień do podejmowania decyzji

Podejmowanie decyzji dotyczących przydzielania zasobów do realizacji określonych czynności ma w systemach zdecentralizowanych szczególne znaczenie, bowiem z racji rozproszonej struktury wiedza decydenta o stanie systemu w momencie podejmowania decyzji jest zazwyczaj ograniczona. Sytuację komplikuje dodatkowo, skądinąd pożądany, fakt potencjalnej wielowariantowości realizowanych procesów. Dlatego niezmiernie istotne staje się opracowanie wydajnych i solidnych mechanizmów pozwalających na podejmowanie decyzji najkorzystniejszych z punktu widzenia założonych celów.

Istnieją dwie strategie podejmowania decyzji w środowiskach rozproszonych. Pierwsza z nich zakłada, iż decyzje podejmowane są przez określone agenty równolegle. Podejście takie oznacza, że agenty, które aktualnie nie są zaangażowane w realizację żadnych czynności, starają się równocześnie podejmować decyzje dotyczące swych dalszych działań. Z kolei realizacja określonych czynności wiąże się zazwyczaj z potrzebą rezerwacji wymaganych do jej realizacji zasobów. Równoległość procesów podejmowania decyzji w prosty sposób prowadzi do powstania konfliktów zasobowych. Dlatego też korzystniejsza w omawianym zagadnieniu wydaje się być druga strategia podejmowania decyzji polegająca na sekwencyjnym przekazywaniu uprawnień decyzyjnych agentom biorącym udział w procesach decyzyjnych [67]. Podejście takie oznacza, że tylko jeden spośród agentów niezaangażowanych w danej chwili w

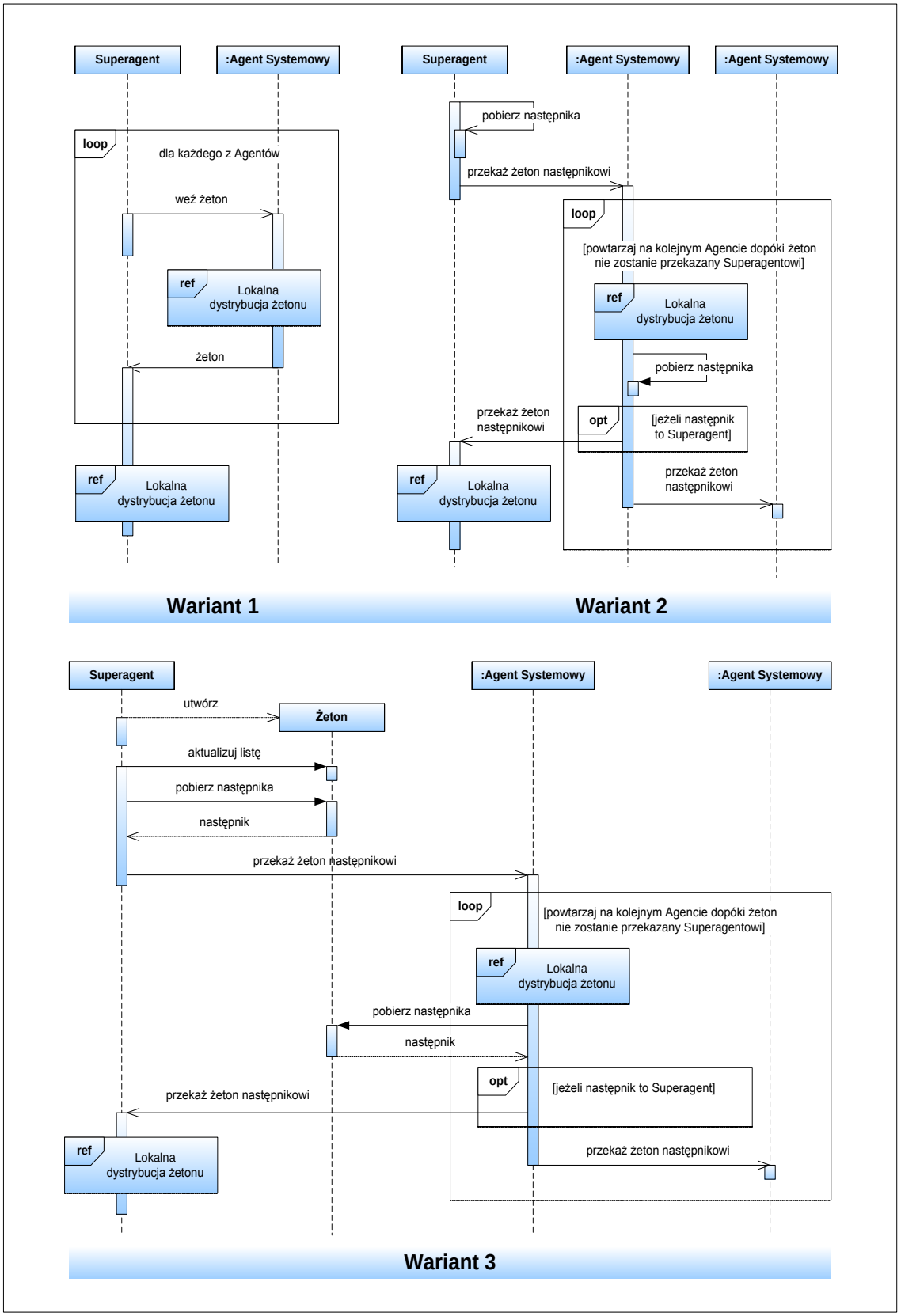
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

realizację żadnych czynności będzie dokonywał wyboru czynności do realizacji, co w konsekwencji zabezpiecza system przed łatwym sposobem wprowadzenia systemu w stan blokady, choć możliwości ich powstania całkowicie nie eliminuje.

W systemie sterowania AIM zastosowano sekwencyjną strategię przyznawania uprawnień decyzyjnych poprzez wykorzystanie algorytmu pierścienia z żetonem. Proces przydzielania uprawnień jest koordynowany przez agenty systemowe i przebiega tu dwustopniowo. W pierwszej fazie uprawnienia decyzyjne w postaci tzw. żetonu decyzyjnego otrzymuje agent systemowy (od agenta poprzedzającego go w logicznym pierścieniu) i w kolejnym etapie dystrybuuje je w obrębie „swojego" komputera pomiędzy lokalnymi decydentami. Funkcje tych ostatnich w systemie AIM sprawują agenty wykonawcze wspomagane przez agenty przedmiotowe. Po zakończeniu realizacji procesów decyzyjnych agent systemowy zwraca żeton lub przekazuje go dalej zgodnie z przyjętym sposobem jego dystrybucji. Ważną kwestią warunkującą poprawne działanie mechanizmu przyznawania uprawnień decyzyjnych jest zapewnienie istnienia w konkretnej chwili jednego i tylko jednego żetonu decyzyjnego w systemie. Funkcję nadzorującą poprawny obieg żetonu w systemie AIM sprawuje superagent.

Istotny aspekt rozważanego zagadnienia stanowi sposób dystrybucji żetonu decyzyjnego pomiędzy agentami systemowymi. Jedno z możliwych rozwiązań (wariant 1) zakłada, iż każdorazowo po otrzymaniu żetonu i zakończeniu realizacji lokalnych procesów decyzyjnych agent systemowy zwraca żeton superagentowi. W podejściu tym porządek, w jakim poszczególne agenty otrzymują żeton, znany jest tylko superagentowi, który w razie potrzeby (nowy agent w systemie, awaria istniejącego agenta) może w łatwy sposób dokonać jego modyfikacji. Drugim sposobem realizacji obiegu żetonu decyzyjnego (wariant 2) jest przekazywanie go bezpośrednio pomiędzy kolejnymi agentami systemowymi tworzącymi swego rodzaju logiczny pierścień. W tej sytuacji superagent w ciągu pełnego cyklu obiegu żetonu decyzyjnego otrzymuje ów żeton tylko raz. W porównaniu z wariantem pierwszym, czas pełnego obiegu żetonu pomiędzy agentami systemowymi jest skrócony, jednakże jakakolwiek zmiana porządku agentów w pierścieniu jest w tym przypadku trudniejsza w realizacji, wymaga bowiem bezpośredniej modyfikacji stosownych informacji zawartych w obrębie określonych agentów systemowych. Wreszcie trzecia możliwość (wariant 3) zakłada, że lista agentów definiująca porządek, w jakim kolejne agenty systemowe otrzymają żeton decyzyjny, stanowi integralną część żetonu i jest dystrybuowana wraz z nim. Każdy z agentów systemowych po zakończeniu realizacji lokalnych procesów decyzyjnych

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 9. Warianty realizacji obiegu żetonu decyzyjnego

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

odnajduje na wspomnianej liście swojego następnika, któremu przekazuje żeton. Rozwiązanie to wydaje się być najkorzystniejszym z wymienionych. Poprzez odpowiedni porządek agentów na liście zawartej w żetonie decyzyjnym można w łatwy sposób zrealizować każdy z pierwszych dwóch wariantów obiegu żetonu. Jednocześnie jakiekolwiek zmiany w liczbie aktywnych agentów systemowych mogą równie łatwo zostać skorygowane przez superagenta poprzez modyfikację wspomnianej listy.

Rys. 9 przedstawia UML-owe diagramy sekwencji obrazujące wszystkie trzy omówione warianty realizacji obiegu żetonu decyzyjnego. Udział żetonu w procesie przyznawania uprawnień decyzyjnych w trzecim przypadku ma charakter aktywny, w związku z czym na obrazującym ten wariant diagramie żeton został jawnie wyspecyfikowany.

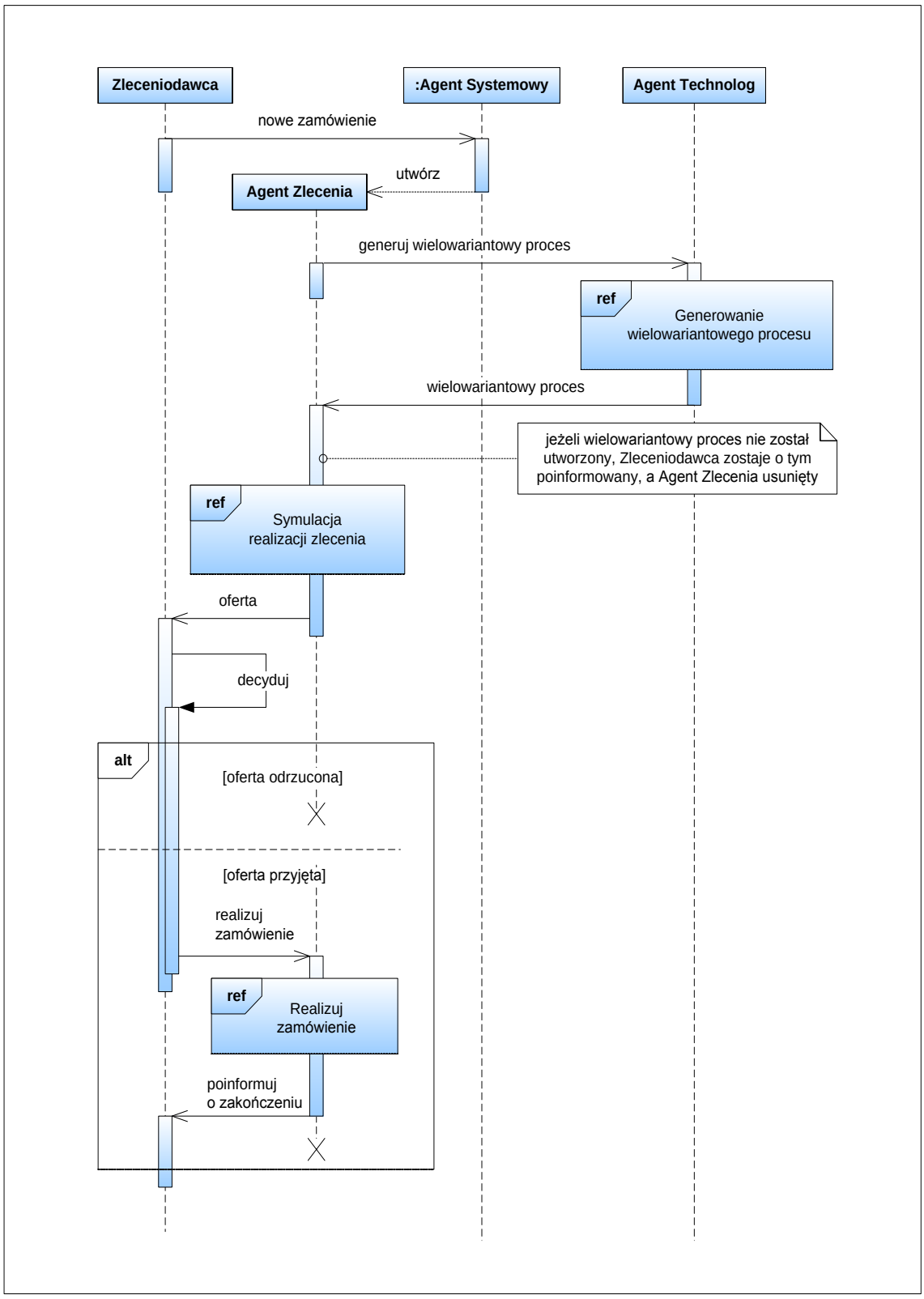
Warto zauważyć, że analogiczne rozumowanie można także przeprowadzić rozważając lokalną dystrybucję żetonu decyzyjnego pomiędzy docelowymi decydentami znajdującymi się w bezpośrednim otoczeniu agenta systemowego (na tym samym komputerze).

3.3 Agenty zleceń

Agenty zleceń reprezentują w systemie AIM otrzymywane zamówienia i odgrywają zasadniczą rolę w procesie ich przyjmowania, weryfikacji oraz realizacji. Agenty te dysponują szczegółowymi danymi dotyczącymi parametrów oczekiwanego produktu, dokumentacją techniczną, informacjami na temat wielkości serii, możliwego terminu rozpoczęcia, żądanego terminu zakończenia itp. W toku swoich działań agenty zleceń komunikują się z lokalnym agentem systemowym oraz superagentem, a także z agentem technologiem (w celu wygenerowania procesu produkcyjnego dla wyrobów stanowiących przedmiot zamówienia) oraz z agentami wykonawczymi i przedmiotowymi (na etapie symulacji bądź sterowania rzeczywistym systemem produkcyjnym). Ważnym parametrem posiadanym przez agenty zleceń i wprowadzanym przez operatora, jest wskaźnik priorytetu zamówienia reprezentowanego przez każdego z agentów. Wskaźnik ten wykorzystywany jest przez agenty wykonawcze w realizowanym przez nie procesie decyzyjnym.

Na rys. 10 przedstawiony został UML-owy diagram sekwencji obrazujący cykl życia agenta zlecenia. Agent ten zostaje utworzony za pośrednictwem agenta

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 10. Cykl życia agenta zlecenia

systemowego z chwilą wprowadzenia do systemu danych określonych przez zleceniodawcę a dotyczących wymagań w stosunku do zamawianego produktu.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Fizyczna lokalizacja agenta zlecenia określana jest w zależności od przyjętego algorytmu, który obok inicjalizacji agenta na dedykowanym odgórnie komputerze dopuszcza także możliwość wykorzystania w tym celu komputera charakteryzującego się w danej chwili najmniejszym współczynnikiem obciążenia procesora. Pierwszym zadaniem nowoutworzonego agenta zlecenia jest przekazanie posiadanych danych konstrukcyjnych zamawianego produktu agentowi technologowi, który następnie – bazując na wiedzy dotyczącej dostępnych zasobów wytwórczych i ich możliwości technologicznych – przeprowadza działania mające na celu przygotowanie wielowariantowego procesu produkcyjnego. W efekcie, w typowej sytuacji agent zlecenia otrzymuje niezbędny w celu realizacji swych dalszych działań opis wielowariantowego procesu. Na tym etapie uwzględniono także drugą sytuację, jaką jest brak możliwości wygenerowania procesu produkcyjnego, wynikającą np. z awarii urządzeń wytwórczych czy też niedostępności niezbędnych narzędzi. W takiej sytuacji zleceniodawca jest informowany o zaistniałym fakcie, natomiast agent zlecenia zostaje usunięty z systemu. Założywszy realizowalność procesu produkcyjnego, w kolejnym etapie działań inicjowany jest proces symulacji realizacji zamówienia wykorzystujący w tym celu mechanizm symulacyjny (patrz rozdział 3.7.2). Przeprowadzana symulacja uwzględnia aktualnie realizowane w systemie procesy wytwórcze. W efekcie, etap ten ma na celu uzyskanie danych wymaganych do sformułowania oferty dla zleceniodawcy. Najistotniejszymi parametrami w tym przypadku są: szacowany termin oraz koszt realizacji zlecenia, przy czym, uwzględniając wielowariantowość realizacji procesu wytwórczego, w wyniku symulacji uzyskiwać można więcej niż jedną parę wartości: termin i odpowiadający mu koszt. Przygotowana oferta jest następnie przedstawiana zlecającemu wykonanie produktu klientowi. Dalszy przebieg działań zależy od decyzji zleceniodawcy. W przypadku braku akceptacji warunków przedstawionych w ofercie, proces obsługi zamówienia zostaje zakończony, jednocześnie związany z nim agent zlecenia jest usuwany z systemu. Jeżeli jednak klient aprobuje określony w ofercie wariant wykonania zlecenia, zamówienie zostaje przekazane do realizacji. W tej fazie rola agenta reprezentującego zlecenie sprowadza się głównie do monitorowania stanu realizacji zamówienia oraz przekazywania stosownych informacji na żądanie operatora. Po zakończeniu realizacji procesu produkcyjnego zleceniodawca zostaje o tym fakcie poinformowany, zaś sam proces obsługi zlecenia zostaje zakończony, a reprezentujący zlecenie agent jest usuwany z systemu.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

3.4 Agenty wykonawcze

Agenty wykonawcze odgrywają główną rolę w systemie AIM. Ich zasadniczym przeznaczeniem jest reprezentowanie na poziomie logiki sterowania wchodzących w skład systemu wytwarzania zasobów (obiektów) wytwórczych takich jak: maszyny, środki transportu i manipulacji, magazyny, urządzenia kontrolno-pomiarowe itp. Agenty te dysponują informacjami na temat reprezentowanego zasobu oraz jego chwilowego stanu (posiadane w danej chwili palety z przedmiotami, ogólna liczba miejsc na przetrzymywanie palet, dostępność dla innych agentów lub jej brak spowodowany aktualnym udziałem w realizacji czynności bądź też awarią), a także szczegółową wiedzą na temat czynności, w których te zasoby biorą udział. Posiadane informacje z tego zakresu określają:

- charakter czynności (zmieniająca stan fizyczny przedmiotu, np. obróbka, mycie itp. bądź też nie zmieniająca tego stanu, np. transport),
- formę udziału w czynności, precyzując czy reprezentowany zasób jest dla danej czynności obiektem wejściowym (tj. przed jej rozpoczęciem posiada paletę z przedmiotami) czy wyjściowym (paleta z przedmiotami znajdzie się w obrębie zasobu po zakończeniu realizacji czynności), ewentualnie zarówno wejściowym jak i wyjściowym (dla czynności zmieniających stan fizyczny przedmiotu), czy też jego udział w czynności ma charakter pomocniczy,
- wymagania względem palet, ich typu oraz typu i stanu przedmiotów warunkujące rozpoczęcie realizacji poszczególnych czynności.

Podstawowym zadaniem agentów wykonawczych w systemie AIM jest udział w procesie podejmowania decyzji dotyczących przydzielania zasobów do zadań. Cel ten realizowany jest przy współudziale agentów przedmiotowych. Szczegółowy algorytm postępowania omówiono w dalszej części rozdziału. Wśród innych zadań agentów wykonawczych znajduje się np. gromadzenie informacji dotyczących historii wykonywanych czynności. W toku swoich działań omawiane agenty komunikują się z lokalnym agentem systemowym oraz superagentem, a także z agentem technologiem (na etapie konfiguracji i rekonfiguracji systemu) oraz z agentami zleceń, przedmiotowymi oraz dostosowującymi w fazie symulacji bądź rzeczywistego sterowania produkcją. Specyficznym rodzajem agenta wykonawczego jest *Operator*, którego zadaniem jest pośredniczenie pomiędzy systemem wytwórczym a człowiekiem nadzorującym i wspomagającym pracę systemu. Agent wykonawczy – *Operator*

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

gromadzi informacje pochodzące z systemu, które są następnie udostępniane nadzorcy systemu za pomocą dedykowanego panelu HMI operatora.

Realizacja procesu podejmowania decyzji przez agenta wykonawczego jest inicjalizowana w momencie otrzymania żetonu decyzyjnego od lokalnego agenta systemowego. Po otrzymaniu uprawnień decyzyjnych, reakcja agenta wykonawczego jest zależna od tego czy w danej chwili agent ten jest zaangażowany w realizację jakiejkolwiek czynności. Jeśli tak, uprawnienia decyzyjne są natychmiastowo zwracane bądź przekazywane dalej. W przeciwnym razie rozpoczęta zostaje sekwencja działań mających na celu wybór i rozpoczęcie realizacji jednej z czynności elementarnych.

Pierwszą akcją podejmowaną przez agenta wykonawczego jest analiza stanu posiadania wytwarzanych przedmiotów. W zależności od tego czy i jakie palety znajdują się w danej chwili w zakresie możliwości działania rozważanego agenta wykonawczego oraz ewentualnie jakie przedmioty i w jakim stanie te palety zawierają można wyspecyfikować możliwe do realizacji czynności elementarne. W następnej kolejności, na podstawie przygotowanego zbioru potencjalnych czynności tworzona jest lista agentów wykonawczych niezbędnych do realizacji wszystkich wymienionych czynności. Kolejnym krokiem jest rezerwacja tychże agentów realizowana w ramach wymiany komunikatów z każdym z nich. W odpowiedzi na wysłane żądanie każdy z agentów zwraca informację czy rezerwacja przebiegła poprawnie czy też zakończyła się niepowodzeniem wynikającym np. z udziału danego agenta w realizacji innej czynności elementarnej. Na podstawie poszczególnych odpowiedzi, ze zbioru wytypowanych uprzednio czynności usuwane są te, których wykonanie jest niemożliwe z uwagi na niedostępność wymaganych zasobów w momencie podejmowania decyzji.

W zależności od aktualnego stanu systemu może okazać się, że po tak przeprowadzonej weryfikacji zbiór możliwych do wykonania w danym momencie czynności jest zbiorem pustym. W takiej sytuacji agent wykonawczy niezwłocznie zwalnia zarezerwowane agenty i zwraca żeton decyzyjny, a następnie przechodzi w stan oczekiwania.

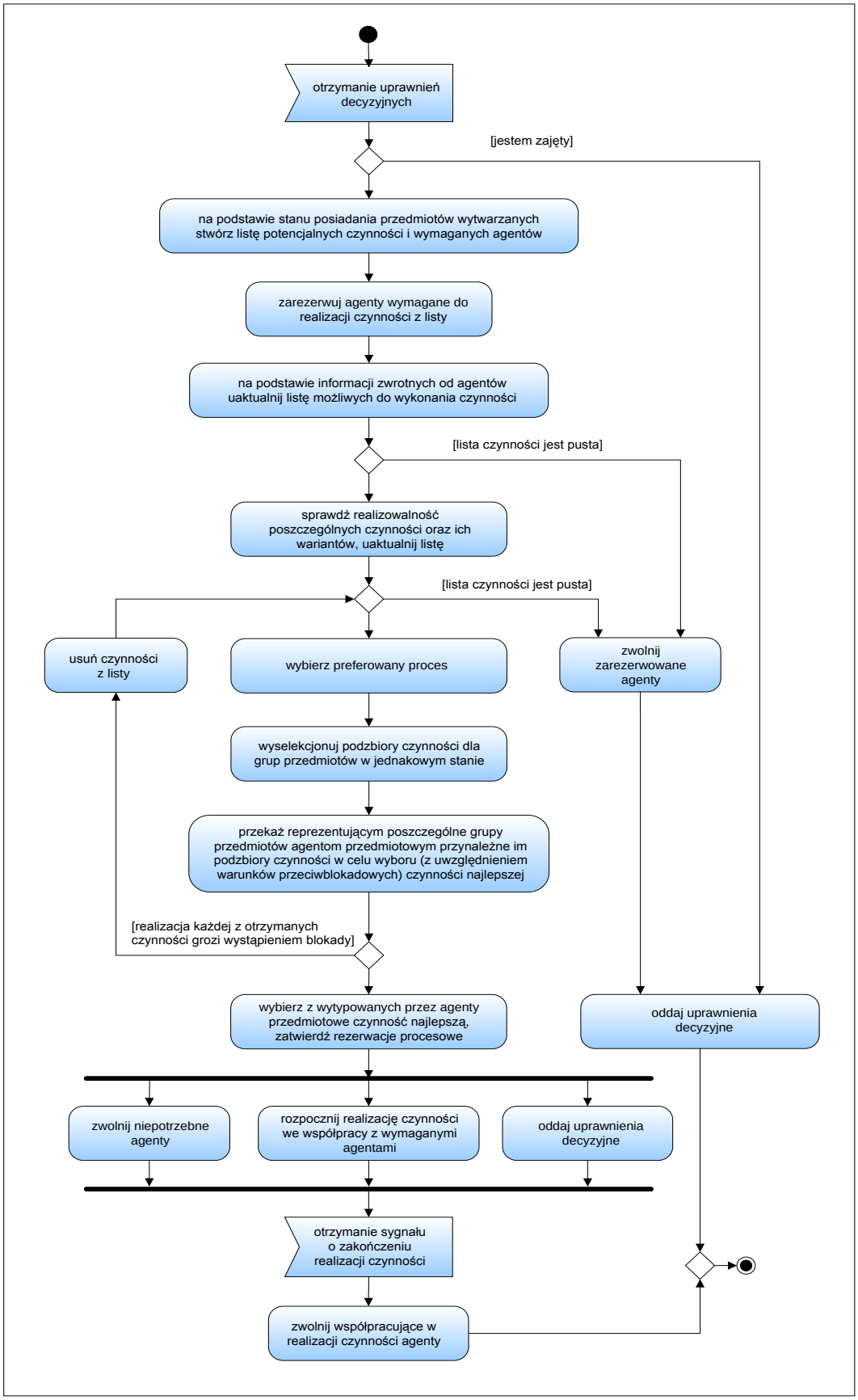
Jeżeli wynikowy zbiór czynności elementarnych nie jest pusty, następuje drugi etap specyfikowania listy potencjalnych czynności do wykonania. Tym razem, dla każdej z zebranych uprzednio czynności sprawdzane są szczegółowe warunki, które muszą zostać spełnione przez wszystkie współpracujące z inicjatorem czynności agenty. W zależności od charakteru czynności i formy udziału poszczególnych agentów w danej czynności dotyczą one posiadania palet określonego typu zawierających wymagane

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

przedmioty w odpowiednim stanie bądź też miejsc na przyjęcie takowych palet przez wszystkie współpracujące agenty wykonawcze. Na tym etapie weryfikacji podlega także realizowalność poszczególnych wariantów czynności (przy założeniu, że dana czynność może być zrealizowana na wiele sposobów różniących się technologią wykonania, a w konsekwencji także czasem trwania i kosztem). Dla każdej z czynności, dla której weryfikacja powyższych warunków daje pozytywny wynik, wytypowana zostaje paleta z przedmiotami, która w razie wyboru tejże czynności będzie brała udział w jej realizacji. Ostatecznie, na podstawie zwróconych rezultatów uaktualniona zostaje lista możliwych do wykonania czynności.

Jeśli w dalszym ciągu nie jest ona pusta, następuje przejście do kolejnego etapu postępowania. W pierwszym jego kroku określony zostaje preferowany w danym momencie proces wytwórczy spośród procesów, do których przynależą czynności wchodzące w skład przygotowanej uprzednio listy. Jego wybór dokonywany jest w oparciu o wskaźniki priorytetu poszczególnych procesów oraz historię wyborów realizowanych uprzednio i ma na celu zrównoważenie w ujęciu globalnym (bądź też dostosowanie do wymagań) stopnia realizacji różnych procesów, a także wyeliminowanie niekorzystnych sytuacji takich jak np. głodzenie procesu. Domyślnie priorytety poszczególnych procesów są jednakowe i w takim przypadku, jeśli tylko istnieje możliwość, procesy wybierane są naprzemiennie. W dalszych krokach, spośród przynależnych wytypowanemu procesowi czynności wyselekcjonowane zostają ich podzbiory, przy czym każdy podzbiór dotyczy powiązanych z preferowanym procesem przedmiotów obrabianych znajdujących się w jednakowym stanie. Przykładem może być magazyn zawierający jednocześnie palety z przedmiotami w stanie wejściowym (półfabrykaty) oraz palety z innymi przedmiotami w określonym stanie pośrednim. W takiej sytuacji wyspecyfikowane zostaną dwa podzbiory czynności, pierwszy zawierający czynności rozpoczynające proces produkcyjny rozważanych przedmiotów i drugi, w którym znajdą się czynności elementarne możliwe do realizacji na danym pośrednim etapie procesu. Podzbiory te są następnie przekazywane przedstawicielom wspomnianych grup przedmiotów, którymi są agenty przedmiotowe reprezentujące przedmioty z wyselekcjonowanych wcześniej palet. Celem działań każdego z tych agentów jest wybór najkorzystniejszej z uwagi na przyjęte kryteria oceny czynności oraz jej wariantu, a także realizacja algorytmu przeciwblokadowego. Szczegółowy przebieg działań agenta przedmiotowego opisany został w rozdziale 3.5. W efekcie agent wykonawczy może otrzymać od każdego z wymienionych agentów

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 11. Algorytm działania agenta wykonawczego

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

przedmiotowych wytypowaną czynność oraz jej wariant lub też, w sytuacji gdy nie spełnione są warunki do realizacji algorytmu przeciwblokadowego, informację o niepowodzeniu. Jeśli żaden z agentów przedmiotowych nie zdołał wyłonić czynności do realizacji, z listy wejściowych czynności zostają usunięte podzbiory analizowane przez agenty przedmiotowe i jeśli lista ta jest w dalszym ciągu niepusta, algorytm po wyeliminowaniu aktualnego procesu powraca do etapu wyboru procesu preferowanego. W przypadku gdy działania jednego lub więcej agentów przedmiotowych zakończyły się sukcesem, spośród zwróconych czynności agent wykonawczy, posługując się identycznymi jak agenty przedmiotowe kryteriami oceny, dokonuje ostatecznego wyboru czynności (oraz jej wariantu) do realizacji, zatwierdza wstępnie dokonane przez agenta przedmiotowego dla wybranej czynności rezerwacje procesowe, po czym dana czynność zostaje rozpoczęta.

Równocześnie z rozpoczęciem wykonywania czynności, inicjujący ją agent wykonawczy zwalnia ewentualne zarezerwowane wcześniej a niewykorzystane agenty oraz oddaje bądź przekazuje dalej uprawnienia decyzyjne.

Ostatnim etapem działań agenta wykonawczego jest zwolnienie współpracujących z nim w realizacji czynności agentów, zainicjowane otrzymaniem sygnału informującego o zakończeniu wykonywania tejże czynności. Następnie agent wykonawczy przechodzi w stan oczekiwania. Algorytm działania agenta wykonawczego został zobrazowany na rys. 11.

3.5 Agenty przedmiotowe

Agenty przedmiotowe reprezentują wytwarzane w systemie AIM produkty. Cykl życia agenta przedmiotowego rozpoczyna się w momencie wprowadzenia do systemu półfabrykatu i trwa aż do uzyskania gotowego wyrobu. Agent przedmiotowy posiada komplet danych dotyczących reprezentowanego przedmiotu zawierający:

- informację o typie przedmiotu,
- uaktualniany na bieżąco stan przedmiotu,
- identyfikator zlecenia, do którego wytwarzany przedmiot przynależy,
- szczegóły procesu produkcyjnego wymagane na potrzeby sterowania na poziomie operatywnym,
- pełną historię realizowanych w trakcie procesu czynności.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

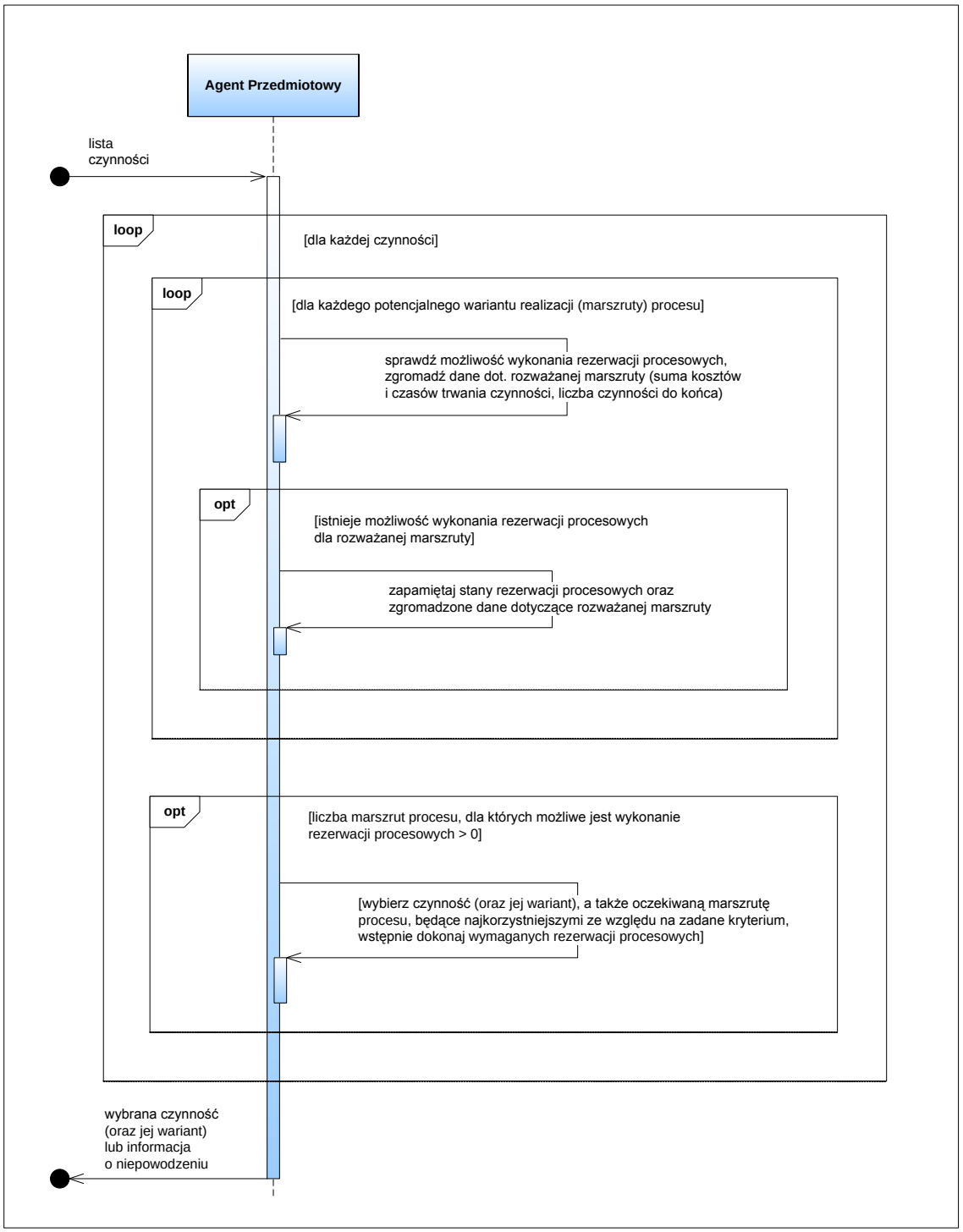
W toku swoich działań agent przedmiotowy komunikuje się z lokalnym agentem systemowym, a także z przynależnym agentem zlecenia oraz z agentami wykonawczymi wchodzącymi w skład każdej z potencjalnych marszrut wykonania przedmiotu. Pod pojęciem marszruta rozumiany jest tu ciąg obiektów wytwórczych znajdujących się na trasie przedmiotu w toku realizacji jego procesu produkcyjnego. W dalszej części pracy pojęcie to, w zależności od kontekstu, może także oznaczać ciąg czynności elementarnych niezbędnych do wykonania określonego przedmiotu.

Najważniejsze zadania agenta przedmiotowego to udział w procesie podejmowania decyzji oraz realizacja algorytmu przeciwdziałania blokadom. W systemie AIM oba te zadania zostały zintegrowane.

Przebieg działań agenta przedmiotowego związanych z podejmowaniem decyzji jest następujący: po otrzymaniu od agenta wykonawczego listy czynności możliwych do wykonania, dla każdej z tych czynności sprawdzane jest istnienie lub możliwość dokonania wymaganych rezerwacji miejsc dla palety z przedmiotami w myśl zasad zdefiniowanych w zastosowanej metodzie przeciwdziałania blokadom – metodzie rezerwacji procesowej [64]. Reguły wyżej wymienionej metody zezwalają na wykonanie czynności tylko wtedy, gdy stosowne rezerwacje procesowe istnieją lub będą mogły zostać zrealizowane, przy czym wystarczająca jest możliwość dokonania rezerwacji na jednej z wielu potencjalnych marszrut prowadzących do wykonania przedmiotu. Działanie agenta przedmiotowego w systemie AIM jest rozszerzone i obejmuje pełną analizę wszystkich potencjalnych wariantów kontynuacji procesu wytwórczego pod kątem rezerwacji procesowych, począwszy od rozważanej czynności. Podejście takie stanowi pierwszy krok w realizacji idei integracji metody przeciwdziałania blokadom z procesami decyzyjnymi. W trakcie przeprowadzanej analizy gromadzone są parametry charakteryzujące poszczególne marszruty. Parametrami tymi są: suma przewidywanych czasów oraz kosztów wykonania wszystkich czynności powiązanych z daną marszrutą, a także zależna od wyboru marszruty liczba czynności jaka pozostaje do końca procesu produkcyjnego. Gromadzenie wymienionych informacji w trakcie badania zagrożeń wystąpienia blokady to kolejny element składający się na istotę integracji procesów decyzyjnych z zastosowaną metodą przeciwdziałania blokadom. Zebrane dane są uwzględniane na dalszym etapie realizowanego procesu decyzyjnego. Wymienione działania zostają powtórzone dla każdej czynności z listy i w rezultacie powstaje zestawienie zawierające możliwe do wykonania czynności oraz, dla każdej z nich, zbiór wymaganych rezerwacji

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

zależnych od potencjalnych marszrut wykonania przedmiotu, a także zgromadzonych parametrów charakteryzujących poszczególne marszruty. W celu dokonania wyboru czynności elementarnej do uruchomienia (oraz wariantu jej wykonania jeśli liczba wariantów jest większa od jedności), agent przedmiotowy dysponuje predefiniowanym



Rys. 12. Algorytm działania agenta przedmiotowego

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

zbiorem reguł postępowania, opracowanym w oparciu o dostępne dane zgromadzone uprzednio w trakcie analizy marszrut. Reguły te definiują różne zasady postępowania, np. wybór czynności najtańszej (lub najkrótszej) w realizacji, wybór czynności zapoczątkowującej najtańszą (lub trwającą najkrócej) w realizacji marszrutę itp. System jest otwarty na możliwość wprowadzania nowych reguł. Zadanie optymalizacji sprowadza się do wyboru reguły dającej z punktu widzenia globalnych kryteriów oceny funkcjonowania systemu najkorzystniejszy efekt. Z pomocą w rozwiązywaniu tego problemu przychodzi zaimplementowany mechanizm symulacyjny. Jego działanie w rozważanym aspekcie polega na wielokrotnej realizacji wirtualnych procesów wytwórczych z wykorzystaniem różnych reguł w kolejnych powtórzeniach. Szczegółowy algorytm funkcjonowania mechanizmu symulacyjnego przedstawiono w podrozdziale 3.6.

Działanie agenta przedmiotowego w aspekcie podejmowania decyzji kończy się:

- poinformowaniem inicjującego proces agenta wykonawczego o niewyłonieniu czynności do realizacji w sytuacji gdy nie ma możliwości dokonania wymaganych rezerwacji procesowych, albo
- wstępnym dokonaniem rezerwacji procesowych właściwych dla wybranej czynności i oczekiwanej marszruty oraz zwróceniem stosownej informacji inicjującemu proces decyzyjny agentowi wykonawczemu.

W drugim z powyższych przypadków przejawia się zasadnicza korzyść wynikająca z integracji procesów decyzyjnych z zastosowaną metodą przeciwdziałania blokadom polegająca na tym, iż rezerwacje procesowe dokonywane są w obrębie obiektów wytwórczych należących do oczekiwanej (a nie dowolnej, jak to ma miejsce w klasycznym podejściu) marszruty wykonania przedmiotu.

Należy jednakże zauważyć, że dokonane przed rozpoczęciem czynności rezerwacje procesowe nie eliminują całkowicie możliwości zmiany założonej marszruty w dalszych fazach procesu wytwórczego, co wynika z faktu, że przedstawiony algorytm podejmowania decyzji jest realizowany wielokrotnie na każdym z kolejnych etapów procesu.

Przedstawiony algorytm działania agenta przedmiotowego został zobrazowany na rys. 12.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

3.6 Mechanizm symulacyjny i jego zastosowania

Jednym z najważniejszych komponentów systemu AIM jest mechanizm symulacyjny umożliwiający symulowanie procesów produkcyjnych – realizowanych aktualnie w systemie jak i procesów związanych z nowymi, będącymi na etapie przyjmowania i weryfikacji zleceniami. W odróżnieniu od typowego dostępnego na rynku oprogramowania wykorzystywanego w celu symulacji procesów dyskretnych, zaprojektowany mechanizm symulacyjny systemu AIM pozwala na współbieżne sterowanie realnymi procesami produkcyjnymi oraz ich symulację z możliwością bezpośredniego wykorzystania rezultatów symulacji w sterowaniu.

Podstawowymi elementami omawianego mechanizmu są wirtualne kopie (klony) agentów biorących udział w procesie sterowania operatywnego, tj. wirtualne agenty wykonawcze oraz przedmiotowe, a także wirtualne agenty zleceń. Wymienione agenty współdziałają ze swymi rzeczywistymi odpowiednikami, a także w ograniczonym zakresie z pozostałymi elementami tworzącymi system sterowania. Ich zadaniem jest realizacja tzw. wirtualnych procesów wytwórczych. Agenty wirtualne wykorzystują w tym celu te same algorytmy postępowania co ich rzeczywiste odpowiedniki.

Wykorzystanie w systemie AIM mechanizmu symulacyjnego umożliwia:

- oszacowanie parametrów wykonania (efektywność, wydajność) aktualnie realizowanych w systemie procesów wytwórczych,
- określenie warunków przyjęcia oraz wykonania nowego zlecenia z uwzględnieniem procesów aktualnie realizowanych w systemie,
- wspomaganie procesu podejmowania decyzji.

Działanie mechanizmu inicjalizowane jest przez superagenta (na żądanie operatora w pierwszych dwóch wymienionych zastosowaniach lub automatycznie w ostatnim z nich) i rozpoczyna się od synchronizacji danych dotyczących aktualnego stanu wirtualnych agentów wykonawczych oraz agentów zleceń z ich rzeczywistymi odpowiednikami. Synchronizacja ta dotyczy tylko danych zmieniających się w trakcie pracy systemu, podstawowa konfiguracja (procesy, szczegóły dotyczące czynności itp.) przekazywana jest agentom wirtualnym w momencie konfigurowania agentów rzeczywistych. Synchronizowane dane w przypadku agenta wykonawczego zawierają:

- status określający czy zasób wytwórczy reprezentowany przez rzeczywistego agenta wykonawczego nie znajduje się w stanie awarii,

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

- informację o stanie dostępności uzależnionym od ewentualnego udziału w realizacji czynności,
- szczegóły dotyczące ewentualnej czynności, w realizacji której zasób bierze udział,
- liczbę i typ palet oraz przedmiotów znajdujących się w zakresie możliwości działania zasobu wytwórczego,
- dane dotyczące rezerwacji procesowych związanych z zastosowaną metodą przeciwdziałania blokadom.

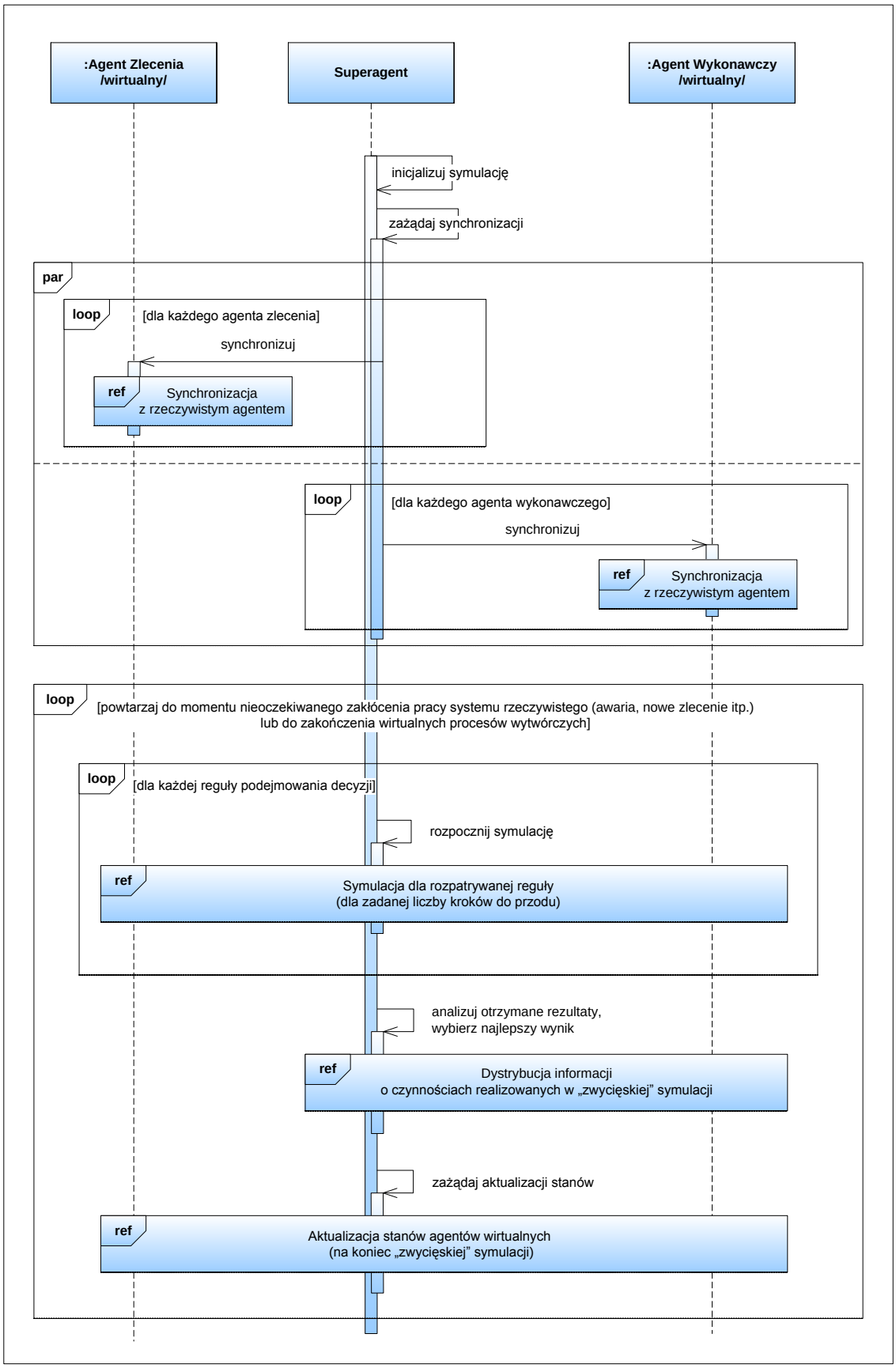
W przypadku agenta zlecenia synchronizowane dane ograniczają się do liczby przedmiotów pozostających do zrealizowania.

Podczas etapu synchronizacji agentów wykonawczych, w momencie uaktualniania danych dotyczących znajdujących się w obrębie zasobów palet z przedmiotami wytwarzanymi, inicjalizacji podlegają także reprezentujące je wirtualne agenty przedmiotowe.

Przebieg symulacji w zakresie realizowanych procesów decyzyjnych i przeciwblokadowych nie odbiega w swej istocie od algorytmów wykorzystywanych przez agenty rzeczywiste. Realizowana symulacja ma charakter zdarzeniowy determinowany zmianami stanu systemu wynikającymi z zakończenia realizacji poszczególnych czynności. Inne zmiany w stanie systemu (np. awarie) wymagają reinicjalizacji mechanizmu symulacyjnego. Terminy zdarzeń określane są na podstawie szacowanych czasów trwania czynności, informacje o nich dystrybuowane są wraz z żetonem decyzyjnym.

Istotną cechą omawianego mechanizmu jest wykorzystanie w procesie symulacji algorytmu optymalizującego działanie systemu produkcyjnego z uwagi na przyjęte globalne kryteria oceny jego funkcjonowania, ograniczone w aktualnej wersji oprogramowania do wskaźników obciążenia zasobów wytwórczych realizujących czynności zmieniające fizyczny stan przedmiotów. Polega to na wykonaniu serii powtórzeń symulacji z wykorzystaniem wirtualnych procesów wytwórczych, przy czym w każdym powtórzeniu stosowana jest inna spośród omówionych w rozdziale 3.5 reguł podejmowania decyzji. Symulacje te przeprowadzane są dla zadanej liczby kroków do przodu i kończą się zapamiętaniem stanów poszczególnych agentów biorących w nich udział. Po wyczerpaniu badanego zbioru reguł decyzyjnych, dokonywana zostaje (przez superagenta) ocena efektywności realizacji procesów wytwórczych dla każdej z reguł. Podstawą oceny są wspomniane współczynniki obciążenia wybranych zasobów.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 13. Symulacja w trybie wspomagania decyzji

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Ostatecznie, sekwencje czynności zrealizowanych przez poszczególne wirtualne agenty wykonawcze z użyciem „zwycięskiej" reguły decyzyjnej są, w zależności od trybu pracy mechanizmu zapamiętywane bądź dystrybuowane (w trybie wspomagania decyzji) do ich rzeczywistych odpowiedników wytyczając im ciąg kilku kolejnych działań. Mechanizm symulacyjny powraca natomiast do realizacji kolejnej pętli powtórzeń symulacji poczynając od zapamiętanego (dla zwycięskiej reguły) uprzednio stanu systemu. W ten sposób kontynuuje poszukiwanie dalszych rozwiązań.

Wykorzystanie mechanizmu symulacyjnego w trybie wspomagającym podejmowanie decyzji implikuje zmianę domyślnego zachowania agentów rzeczywistych, które zamiast samodzielnie realizować procesy decyzyjne postępują zgodnie z harmonogramami przygotowywanymi w rezultacie działania omawianego mechanizmu. Należy także zauważyć, że mechanizm symulacyjny pracujący w trybie wspomagania decyzji wykorzystuje oddzielne, dedykowane klony agentów rzeczywistych, w związku z czym jego działanie w tym trybie nie eliminuje możliwości wykorzystania mechanizmu symulacyjnego w pozostałych zastosowaniach (w tym na potrzeby weryfikacji nowego zlecenia).

Rys. 13 przedstawia UML-owy diagram sekwencji obrazujący algorytm działania mechanizmu symulacyjnego w trybie wspomagającym podejmowanie decyzji dotyczących wyboru czynności elementarnych do realizacji. Przebieg symulacji wykorzystującej mechanizm symulacyjny w trybie nowego zlecenia zostanie omówiony w rozdziale 3.7.2.

3.7 Obsługa zakłóceń

Wymagania związane z koniecznością zapewnienia solidności (ang. *robustness*) nowoczesnych systemów wytwarzania nakazują uwzględnienie, już na etapie budowy ich systemów sterowania, możliwości wystąpienia zakłóceń w procesach produkcyjnych. Typowym źródłem wspomnianych zakłóceń są wszelkiego rodzaju sytuacje awaryjne, w tym awarie urządzeń wytwórczych, transportowych, narzędzi i osprzętu uniemożliwiające kontynuację procesów wytwórczych. Swoistym rodzajem zakłóceń są także nowe zlecenia, których wprowadzanie może wymagać zmian w przygotowanych uprzednio przez agenty harmonogramach produkcyjnych, często też niezbędna jest rekonfiguracja urządzeń oraz systemu sterowania. W celu zapewnienia

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

efektywnego funkcjonowania systemu wytwarzania istotną staje się więc identyfikacja potencjalnych zakłóceń oraz wprowadzenie stosownych algorytmów postępowania w takich przypadkach.

W systemie AIM wprowadzono mechanizmy obsługi wybranych zakłóceń. Pierwszy z nich dotyczy reakcji systemu na awarię urządzenia wytwórczego, drugi z kolei pozwala na weryfikację możliwości wprowadzania do systemu nowych zleceń. Dodatkowo, wykorzystanie mechanizmu symulacyjnego pozwala w ostatnim przypadku na oszacowanie czasu i kosztu otrzymanego zlecenia oraz przedstawienie zleceniodawcy wielowariantowej oferty jego realizacji.

3.7.1 Awarie zasobów wytwórczych

Podczas opracowywania algorytmu postępowania w przypadku uszkodzenia urządzenia wytwórczego w systemie AIM zdefiniowano kilka wymagań względem odpowiedzialnego za obsługę awarii mechanizmu. W momencie wystąpienia awarii system sterowania powinien:

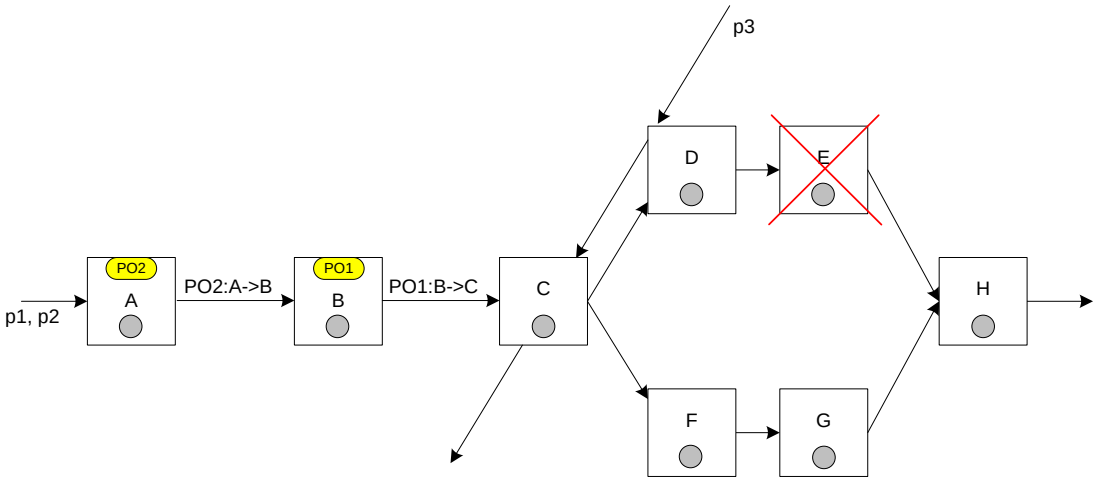
- poinformować operatora o zaistniałej sytuacji,
- nie wprowadzać do systemu (do czasu podjęcia decyzji przez operatora o sposobie reakcji na powstałą awarię) palet z nowymi półfabrykatami,
- zezwolić na kontynuację realizowanych procesów wytwórczych, jeśli uszkodzony zasób nie jest wymagany do ich realizacji lub jeśli istnieją alternatywne marszruty technologiczne.

Poniżej przedstawiono przebieg działań realizowanych przez system AIM począwszy od momentu identyfikacji awarii, za którą odpowiedzialny jest agent dostosowujący. Po stwierdzeniu przez agenta dostosowującego braku możliwości kontynuacji pracy (wynikającej np. z uszkodzenia narzędzia lub samego urządzenia) agent ten przesyła stosowną informację agentowi wykonawczemu, którego zadaniem jest poinformowanie o zaistniałej sytuacji operatora, a także przekazanie odpowiedniego komunikatu superagentowi. Ten ostatni uruchamia tryb awaryjny pracy systemu sterowania.

Zasadniczym skutkiem uruchomienia trybu awaryjnego jest modyfikacja sposobu podejmowania decyzji. Jedną ze zmian jest uniemożliwienie bez zgody operatora dokonania wyboru czynności do realizacji będącej pierwszą dla danego procesu, czyli w

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

konsekwencji zaniechanie inicjalizacji wykonania przedmiotów, których procesy wytwórcze jeszcze nie zostały rozpoczęte. Inne pożądane działanie systemu sterowania w trybie awaryjnym wiąże się z pomijaniem w procesach decyzyjnych czynności, których wybór implikowałby przebieg marszruty obejmującej czynność wykorzystującą uszkodzony zasób. Jest to możliwe dzięki dodaniu (do opisanego w rozdziale 3.5 algorytmu działania biorącego udział w procesach decyzyjnych agenta przedmiotowego) kroku, w którym poza analizą możliwości przeprowadzenia wymaganych rezerwacji procesowych dokonywana jest także weryfikacja stanu poszczególnych obiektów wytwórczych leżących na każdej z potencjalnych marszrut wykonania przedmiotu. W efekcie dana czynność nie zostaje wybrana jeśli nie będzie możliwa kontynuacja procesu produkcyjnego ze względu na awarię urządzenia.



Rys. 14. Przykład obrazujący sytuację w systemie po wystąpieniu awarii

Powyższe warunki nie gwarantują niestety skutecznego funkcjonowania systemu w każdym przypadku. Mogą zaistnieć sytuacje, w których zastany w momencie awarii bądź osiągnięty już w czasie pracy w trybie awaryjnym stan systemu nie pozwala na kontynuowanie procesów wytwórczych mimo teoretycznej realizowalności niektórych z nich. Przykład takiej sytuacji został zobrazowany na rys. 14. Przedstawiony fragment systemu wytwarzania bierze udział w kilku realizowanych współbieżnie procesach wytwórczych, w tym dotyczących przedmiotów typu PO1 oraz PO2 procesach p1 oraz p2. Marszruta wykonania przedmiotu PO1 prowadzi przez obiekty wytwórcze A-B-C-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

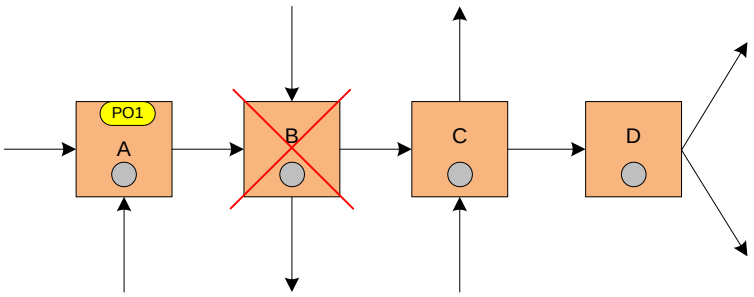
D-E-H, zaś przedmiotu PO2 przez obiekty A-B-C-F-G-H. Dodatkowo obiekty C oraz D zaangażowane są w realizację procesu p3. Obiekt E jest zasobem uszkodzonym. Paleta z przedmiotami typu PO1 związana jest aktualnie z zasobem wytwórczym B, zaś z przedmiotami typu PO2 – z zasobem A. Zgodnie z przedstawionymi regułami, ze względu na brak marszrut wykonania przedmiotów typu PO1 nie przebiegających przez uszkodzony zasób wybór czynności PO1:B->C (co w przedstawionym zapisie oznacza transport przedmiotu PO1 z obiektu wytwórczego B na obiekt C), mimo założonego spełnienia wszystkich innych wymaganych warunków, nie zostanie dokonany. Równocześnie zatrzymaniu ulegnie realizacja procesu wytwórczego dla przedmiotów PO2. Tymczasem zezwolenie na wykonanie czynności PO1:B->C, a w dalszej kolejności PO1:C->D spowodowałoby przemieszczenie palety z przedmiotami PO1 na obiekt wytwórczy D co jednocześnie udrożniłoby trasę realizacji procesu dla przedmiotów PO2. Warto jednak zwrócić uwagę, że zbyt wczesne pojawienie się palety z przedmiotami PO1 w obrębie obiektu D może z kolei stanąć na przeszkodzie realizowanemu procesowi p3.

Aby przeciwdziałać podobnym sytuacjom, zastosowany w systemie AIM mechanizm obsługi sytuacji awaryjnych wzbogacono o dodatkową, wykorzystywaną w zależności od decyzji operatora funkcjonalność, która pozwala na detekcję jednoczesnego braku aktywności wszystkich wchodzących w skład systemu agentów wykonawczych reprezentujących obiekty wytwórcze. Jeśli taka sytuacja zostanie zidentyfikowana, w dalszym kroku sprawdzane jest czy w systemie znajdują się agenty przedmiotowe. Ich istnienie jest równoznaczne z obecnością w systemie wytwórczym palet z będącymi w trakcie procesu produkcyjnego przedmiotami. Powyższe warunki implikują możliwość wystąpienia sytuacji omówionej w powyższym przykładzie. Reakcją systemu sterowania jest w takim przypadku zezwolenie na wybór czynności do realizacji mimo uszkodzonego zasobu wytwórczego znajdującego się na marszrucie wynikającej z dokonanego wyboru.

Kolejną potencjalną przyczyną braku możliwości realizacji tegoż procesu produkcyjnego w sytuacji awarii zasobu wytwórczego, pomimo istnienia teoretycznie wykonywalnych wariantów procesu, są dokonywane w celu przeciwdziałania blokadom rezerwacje procesowe. Rys. 15 przedstawia przykład, w którym obiekty wytwórcze A, B, C oraz D są obiektami zagrożonymi blokadą, zaangażowanymi w realizację wielu procesów. Założono, że liczba miejsc na palety jest identyczna dla każdego obiektu i jest równa jedności. W obrębie obiektu A znajduje się paleta z przedmiotami, obiekt B

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

uległ uszkodzeniu. Pojawienie się palety z przedmiotami w strefie zagrożonej blokadą, zgodnie z regułami metody rezerwacji procesowej wymaga uprzedniego dokonania rezerwacji procesowej miejsc na każdym z obiektów wytwórczych należących do wspomnianej strefy. W przedstawionej sytuacji, pomimo braku możliwości kontynuacji procesu wytwórczego przedmiotów typu PO1, miejsca na obiektach C oraz D są więc nadal procesowo zarezerwowane, co z kolei uniemożliwia im udział w innych fizycznie realizowalnych procesach. Pożądane w przedstawionej sytuacji staje się zatem zwolnienie dokonanych rezerwacji. To kolejna funkcjonalność oferowana przez zastosowany w systemie AIM mechanizm obsługi awarii. Zwolnienie rezerwacji procesowych dokonywane jest za pozwoleniem operatora po wyczerpaniu wcześniej opisanych środków reagowania na awarie i jest poprzedzone, podobnie jak w poprzednim przypadku, identyfikacją braku aktywności zasobów wytwórczych przy jednoczesnym istnieniu w systemie agentów przedmiotowych.



Rys. 15 Przykład obrazujący sytuację w systemie po wystąpieniu awarii

Jeśli żaden z wymienionych sposobów postępowania wywołanego wystąpieniem awarii nie przynosi rezultatu w postaci dokończenia realizowanych w rozważanej sytuacji procesów produkcyjnych, o fakcie tym zostaje powiadomiony operator, system sterowania jednocześnie zatrzymuje proces automatycznej obsługi sytuacji awaryjnych.

3.7.2 Nowe zlecenia

Kolejnym źródłem zakłóceń w funkcjonowaniu systemu produkcyjnego są nowe, najczęściej pilne zlecenia (ang. *rush orders*). Obsługa nowych zamówień, zgodnie z zaprezentowanym w rozdziale 3.3 algorytmem, wymaga w systemie AIM szeregu działań, w tym wygenerowania procesu produkcyjnego, przeprowadzenia symulacji

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

oraz ewentualnego wdrożenia do produkcji, co biorąc pod uwagę istnienie już realizowanych w systemie procesów przysparza szczególnych trudności.

Skutkami zakłóceń w postaci nowych zleceń są m.in.:

- wymagane zmiany w realizowanych harmonogramach produkcyjnych,
- potencjalne opóźnienia w realizacji aktualnych zleceń i związane z nimi kary,
- wymagana rekonfiguracja systemu (nowy agent zlecenia, kolejne agenty przedmiotowe), w tym agentów wykonawczych (nowe czynności elementarne),
- ewentualna zmiana statusu wybranych agentów wykonawczych z bezblokadowego na zagrożony blokadą skutkująca reorganizacją układu stref bezblokadowych i zagrożonych blokadą na istniejących dotychczas trasach marszrut.

W dalszej części rozdziału przedstawiono opracowany na potrzeby systemu AIM algorytm działań związanych z obsługą zakłócenia w postaci nowego zlecenia w warunkach występowania aktualnie realizowanych w systemie procesów produkcyjnych (w opisie założono istnienie możliwości technologicznych wykonania zlecenia oraz zakończony sukcesem etap generowania procesu produkcyjnego).

Istotnym, w aspekcie identyfikacji wymagań oraz skutków związanych z wprowadzaniem nowego zlecenia do realizacji, jest etap symulacji przeprowadzany z wykorzystaniem mechanizmu symulacyjnego. Biorą w nim udział wirtualne agenty wykonawcze, przedmiotowe oraz zleceń. Krokiem poprzedzającym uruchomienie symulacji jest dokonanie konfiguracji wirtualnych agentów wykonawczych poprzez przesłanie im zbiorów nowych czynności elementarnych, w których będą brać udział. Dodanie obsługi nowych procesów może nieść z sobą jednak niekorzystny skutek związany z potencjalną zmianą statusu określonych obiektów wytwórczych z bezblokadowego na zagrożony blokadą i w efekcie rekonfiguracją stref bezblokadowych i zagrożonych blokadą na istniejących dotychczas trasach marszrut. To z kolei może stać się przyczyną wystąpienia blokady. W celu skutecznej realizacji symulacji, a w późniejszej fazie również sterowania rzeczywistym systemem, bardzo ważne znaczenie odgrywa więc poprawne zidentyfikowanie zmian w statusie agentów wykonawczych będącej następstwem ich rekonfiguracji. Dalszy przebieg działań jest zależny od zaistnienia (bądź nie) tychże zmian.

W sytuacji, gdy układ stref bezblokadowych i zagrożonych blokadą na trasach istniejących marszrut pozostaje taki sam, można rozpocząć wprowadzanie

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

półfabrykatów związanych z nowym zleceniem (równolegle z tymi, które dotyczą zamówień realizowanych dotychczas) bez dodatkowych ograniczeń już na początku symulacji lub w dowolnym innym, założonym wcześniej terminie. W przeciwnym wypadku należy najpierw zakończyć procesy wykonania wszystkich aktualnie znajdujących się w systemie przedmiotów, a następnie zatwierdzić zmiany w układzie stref. Od tej chwili dopiero można bezpiecznie (z uwagi na zagrożenie blokadami) zezwolić na wprowadzanie w ramach realizowanej symulacji półfabrykatów związanych z nowym zleceniem.

Mechanizm symulacyjny wykorzystany w celu przeprowadzenia omówionej powyżej symulacji działa w niemal identyczny sposób jak trybie wspomagania decyzji, w szczególności realizuje także algorytm optymalizujący działanie systemu z uwagi na globalne kryteria oceny jakości jego funkcjonowania. Różnice dotyczą następujących kwestii:

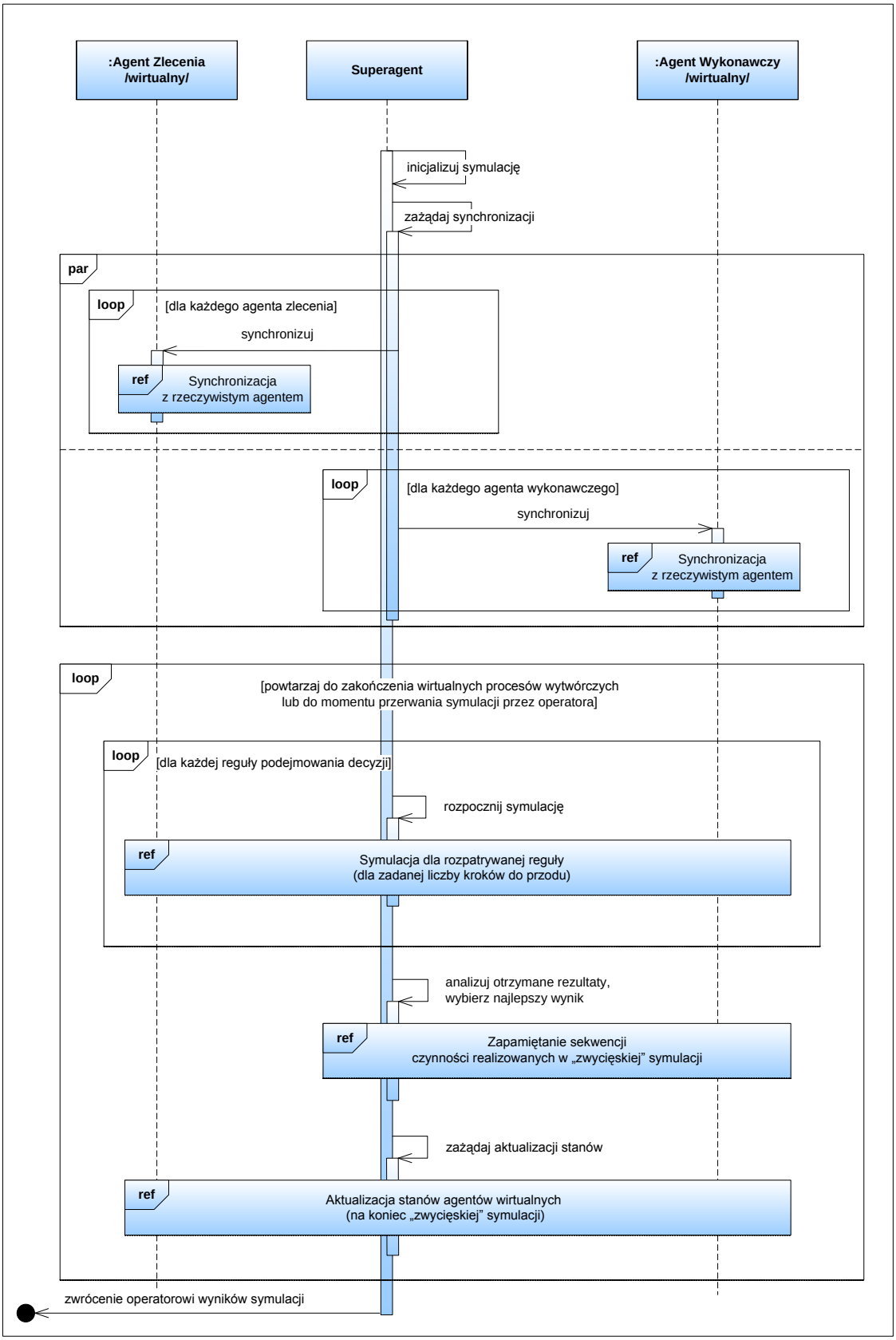
- główna pętla symulacyjna działa do zakończenia realizacji wszystkich procesów wytwórczych bądź do momentu przerwania symulacji przez operatora,
- informacja o czynnościach realizowanych w zwycięskiej symulacji nie jest dystrybuowana do rzeczywistych agentów wykonawczych, jest natomiast każdorazowo zapamiętywana przez agenty wirtualne,
- wynik symulacji zwracany jest operatorowi.

Rys. 16 przedstawia działanie mechanizmu symulacyjnego w trybie nowego zlecenia.

Symulacja zrealizowana w przedstawiony powyżej sposób pozwala ocenić szacowane terminy zakończenia realizacji poszczególnych zleceń, a także stopień opóźnienia zamówień realizowanych w systemie do tej pory i m.in. na tej podstawie przygotować ofertę cenową dla klienta. W celu przedstawienia zleceniodawcy oferty wielowariantowej (różne czasy i koszty realizacji zamówienia) należy powtórzyć kilkukrotnie przedstawioną na rys. 16 symulację dla różnych wskaźników priorytetu poszczególnych zleceń (w tym rozpatrywanego zamówienia) oraz ewentualnie różnych terminów wprowadzania nowego zlecenia do systemu.

Po akceptacji określonego wariantu realizacji zamówienia przez zleceniodawcę, na podstawie wyników symulacji należy w pierwszej kolejności, w przypadku gdy układ stref bezblokadowych i zagrożonych blokadą dla istniejących dotychczas

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 16. Symulacja w trybie nowego zlecenia

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

marszrut po rekonfiguracji agentów wykonawczych uległ zmianie, określić przybliżone terminy:

- zaprzestania wprowadzania do produkcji kolejnych półfabrykatów dla zleceń realizowanych aktualnie,
- potwierdzenia zmian w konfiguracji stref bezblokadowych i zagrożonych blokadą oraz
- wznowienia wprowadzania tychże półfabrykatów (łącznie z powiązanymi z nowym zleceniem),

zaś w sytuacji gdy wspomniany układ stref pozostał bez zmian - jedynie termin rozpoczęcia wprowadzania półfabrykatów powiązanych z nowym zleceniem. Następnie w obu przypadkach należy zidentyfikować wskaźniki priorytetu poszczególnych zleceń, dla których uzyskano zaakceptowany wariant i w dalszej kolejności, z uwzględnieniem zgromadzonych danych, można przystąpić do realizacji nowego zlecenia w rzeczywistym systemie wytwórczym.

BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

4 Implementacja i weryfikacja oprogramowania AIM

Opisana w poprzednim rozdziale struktura systemu sterowania wytwarzaniem, a także wprowadzone mechanizmy i algorytmy działania poszczególnych jego elementów stanowią odpowiedź na postawione (str. 27) wymagania względem funkcjonalności opracowywanego systemu. Przedstawione działania znajdują swoją kontynuację w zrealizowanym w ramach niniejszej pracy doktorskiej oprogramowaniu zapewniającym uzyskanie żądanej funkcjonalności. Implementacja oprogramowania została wykonana od podstaw dając tym samym wysoką elastyczność i szerokie możliwości dostosowywania do sprecyzowanych uprzednio potrzeb. Opracowane oprogramowanie ma charakter otwarty zachowuje również możliwość dalszego poszerzania zakresu oferowanej funkcjonalności.

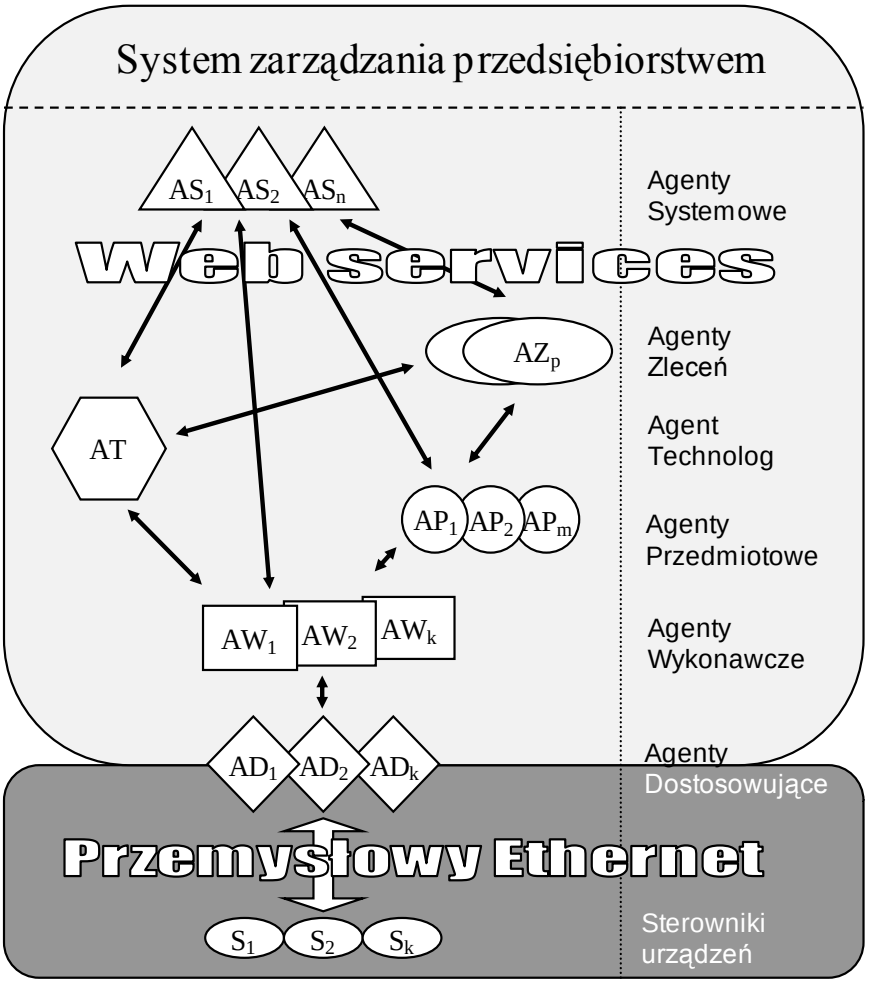
Realizacja systemu oprogramowania AIM objęła m.in. implementację:

- poszczególnych typów agentów niezbędnych do sterowania systemami wytwórczymi na poziomie operatywnym, tj. agentów: systemowego, wykonawczego, przedmiotowego oraz zlecenia,
- kluczowych dla założonego działania systemu algorytmów, w tym procedury przyznawania uprawnień decyzyjnych oraz zintegrowanego z metodą przeciwdziałania blokadom algorytmu podejmowania decyzji,
- wykorzystującego wirtualne agenty i wirtualne procesy wytwórcze mechanizmu symulacyjnego, którego głównym przeznaczeniem jest wspomaganie procesów podejmowania decyzji oraz weryfikacji możliwości przyjmowania nadchodzących zleceń,
- algorytmów i mechanizmów obsługi wybranych zakłóceń w procesach produkcyjnych,
- aplikacji klienckiej umożliwiającej konfigurowanie, monitorowanie i zarządzanie opracowanym systemem oprogramowani AIM.

Jako jeden z głównych celów utylitarnych niniejszej rozprawy doktorskiej postawiono zminimalizowanie barier związanych z heterogenicznością rozwiązań informatycznych stosowanych w środowiskach wytwórczych poprzez zastosowanie mechanizmów komunikacyjnych wykorzystujących technologie internetowe (TCP/IP, XML). Przedstawiona w rozdziale 2.5.1 technologia Web services charakteryzuje się szeregiem właściwości, które dają uzasadnione podstawy do jej wykorzystania dla realizacji zamierzonego celu. Zastosowanie szeroko rozpowszechnionych technologii

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

internetowych, ich niska wrażliwość na zróżnicowanie platform sprzętowych i systemowych, a także otwartość niosą przesłanki do tego, by w technologii Web services upatrywać pożądanego w środowiskach produkcyjnych standardu komunikacyjnego. Z tych też powodów wspomniana technologia została wybrana do opracowania i budowy mechanizmów komunikacyjnych w wieloagentowym systemie oprogramowania AIM.



Rys. 17. Technologie komunikacyjne w systemie AIM

Rys. 17 przedstawia koncepcję wykorzystania technologii Web services w systemie AIM. Kluczową rolę technologia ta pełni w wymianie komunikatów pomiędzy poszczególnymi agentami tworzącymi strukturę systemu. Jej potencjał pozwala docelowo wykorzystać ją także do wymiany informacji z nadrzędnym systemem zarządzania przedsiębiorstwem oraz sterownikami urządzeń wytwórczych. W tym drugim celu szczególną rolę może odegrać wykorzystanie przemysłowego Ethernetu.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

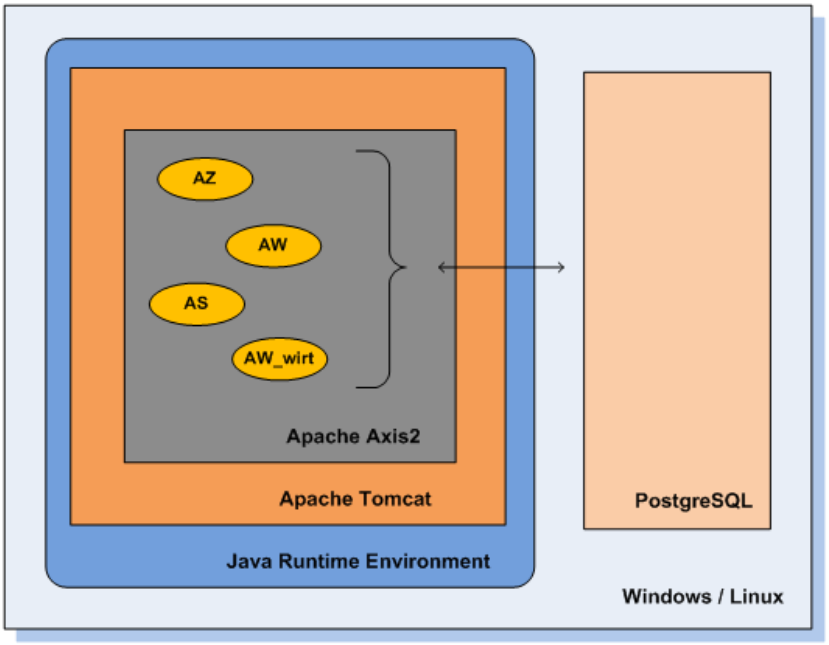
Należy jednak zauważyć, że przepływ informacji pomiędzy poziomami sterowania operatywnego i sprzętowego oraz poziomem zarządzania przedsiębiorstwem i sterowaniem operatywnym wykracza poza zakres niniejszej pracy.

Opracowane oprogramowane charakteryzuje się wysokim stopniem rekonfigurowalności, co pozwala na wykorzystanie go w symulacji i sterowaniu systemami z szerokiej grupy dyskretnych systemów produkcyjnych.

W kolejnych podrozdziałach przedstawiono szczegóły implementacyjne, a także omówiono kilka z szeregu zrealizowanych testów weryfikujących działanie systemu sterowania AIM na poziomie operatywnym.

4.1 Platforma implementacyjna

Implementacja warstwy logiki systemu sterowania AIM została dokonana przy użyciu języka Java. Mechanizmy komunikacyjne wykorzystujące technologię Web services opracowano w oparciu o silnik Web services - Apache Axis2/Java. Aby

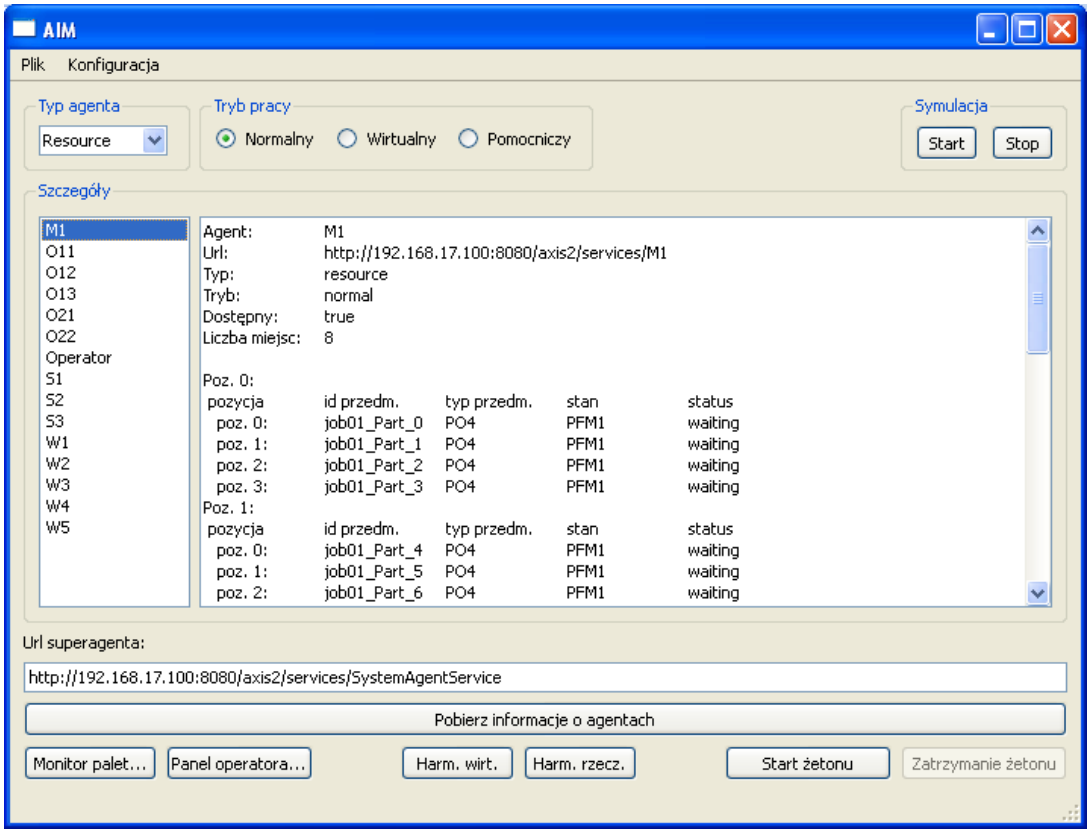


Rys. 18 Środowisko uruchomieniowe systemu AIM

poszczególne agenty wchodzące w skład systemu sterowania mogły być dostępne dla siebie oraz dla zewnętrznych aplikacji klienckich w postaci usług Web services, oprogramowanie agentów wraz z silnikiem Axis2 umieszczono w kontenerze aplikacji

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

WWW, którego rolę pełni w omawianym środowisku serwer Apache Tomcat. Zarówno Axis2 jak i Tomcat należą do grupy aplikacji typu open source. Wykorzystywanym serwerem bazodanowym jest PostgreSQL, który w zależności od konfiguracji systemu może być uruchamiany centralnie lub też na każdej stacji roboczej. System sterowania AIM może być uruchamiany w środowisku MS Windows lub Linux, a także na innych systemach operacyjnych, dla których istnieje implementacja maszyny wirtualnej Java. Struktura środowiska uruchomieniowego została przedstawiona na rys. 18.



Rys. 19. Zrzut głównego okna aplikacji zarządzającej systemem sterowania AIM

Kliencka aplikacja do zarządzania systemem sterowania AIM została również zaimplementowana przy użyciu języka Java oraz silnika Apache Axis2/Java. Do stworzenia graficznego interfejsu użytkownika aplikacji wykorzystano bibliotekę Qt Jambi. Na rys. 19 przedstawiono zrzut głównego okna aplikacji. W oknie tym można uzyskać informacje o stanie i właściwościach poszczególnych agentów, m.in. o liczbie miejsc na palety oraz ich zawartości (w przypadku agentów wykonawczych), stanie zaawansowania realizacji określonego zamówienia (dla agentów zleceń) lub też historii zrealizowanych czynności (w przypadku agentów przedmiotowych). Wspólne dla

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

wszystkich agentów informacje to identyfikator agenta, jego lokalizacja, typ, tryb pracy itp. Z poziomu przedstawionego okna można również otwierać pomocnicze okna dialogowe (np. okno konfiguracji, panel operatora, monitor palet), a także uruchamiać symulację bądź rzeczywisty proces sterowania systemem produkcyjnym.

Omawiane oprogramowanie klienckie ma charakter aplikacji typu stand-alone. Wykorzystując jednakże jeden z zasadniczych atutów technologii Web services, jakim jest relatywnie duży stopień niezależności od stosowanych języków programowania i platform systemowych, można z poszczególnymi elementami systemu AIM komunikować się na różne sposoby. W związku z tym, w przypadku zaistnienia potrzeby, implementacja aplikacji uruchamianej np. z poziomu przeglądarki internetowej nie stwarza trudności. Pierwsze próby opracowania takiej aplikacji z wykorzystaniem języka Javascript zostały przeprowadzone.

Listing 1 zawiera fragment kodu przedstawiający logikę działania systemu w chwili inicjalizacji mechanizmu symulacyjnego stanowiącego jeden z ciekawszych elementów systemu AIM. Koordynatorem działania mechanizmu symulacyjnego jest superagent. Wywoływana na superagencie funkcja uruchamiająca mechanizm symulacyjny posiada jeden parametr określający tryb pracy mechanizmu symulacyjnego (tryb wspomagania decyzji lub tryb nowego zlecenia). Pierwszym podejmowanym działaniem jest zatrzymanie obiegu żetonu decyzyjnego. Dokonane to może zostać dopiero w chwili, gdy żeton dotrze do superagenta, w związku z czym dalszy fragment kodu odpowiada za cykliczne sprawdzanie flagi informującej o pojawieniu się żetonu w obrębie superagenta. Kolejnym krokiem jest wysłanie do wszystkich agentów wykonawczych i agentów zleceń żądania przeprowadzenia synchronizacji stanu między agentami rzeczywistymi a ich wirtualnymi odpowiednikami. W dalszych etapach przygotowana zostaje zawartość żetonu w zakresie posiadanej listy terminów zdarzeń, w tym wprowadzony zostaje termin rozpoczęcia symulacji, a następnie inicjalizowany jest zaimplementowany w ramach superagenta menedżer symulacji odpowiedzialny m.in. za prawidłowy przebieg symulacji realizowanej zgodnie z zasadami przedstawionymi w rozdziałach 3.6 i 3.7.2. Ostatecznie wznowiony zostaje obieg żetonu decyzyjnego, a także uruchomiony zostaje wątek programu monitorujący poprawność tegoż obiegu.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

```
/**
  * Funkcja uruchamiająca mechanizm symulacyjny
  */
 public void startSimulation(WorkMode mode) {

        // zatrzymaj żeton decyzyjny
        stopTokenCycle(mode);

        // poczekaj na potwierdzenie zatrzymania żetonu
        // (sprawdzaj cyklicznie flagi)
        try {
               switch (mode) {
               case AUXILIARY:
                      while (!m_auxiliaryTokenCaught) {
                             TimeUnit.MILLISECONDS.sleep(10);
                      }
                      break;
               case VIRTUAL:
                      while (!m_virtualTokenCaught) {
                             TimeUnit.MILLISECONDS.sleep(10);
                      }
                      break;
               }
        } catch (InterruptedException e) {
               logger.warn(getId() + ": start simulation interrupted" );
               return;
        }
        // zażądaj synchronizacji stanu agentów wykonawczych i zleceń
        demandAgentsSync(mode);

        // ustaw aktualny czas jako czas początkowy symulacji
        long simStartTime = new Date().getTime();

        // wyczyść ewentualne terminy zdarzeń zawarte w żetonie z
        // poprzedniej symulacji
        getToken(mode).getDatesList().clear();

        // wstaw termin zerowy (oznacza żądanie aktualizacji terminów
        // zdarzeń w żetonie przez agenty wykonawcze)
        getToken(mode).insertDate(0);
        // i jako kolejny wstaw aktualny czas
        getToken(mode).insertDate(simStartTime);

        // przekaż sterowanie do menedżera symulacji
        m_auxSimManager.startSimulation(getToken(mode), simStartTime);

        // wznów obieg żetonu decyzyjnego
        releaseNewToken(mode);
        // uruchom wątek monitorujący poprawność obiegu żetonu
        startTokenCycleChecker(mode);
 }
```

Listing 1. Kod przedstawiający implementację funkcji uruchamiającej proces symulacji

BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Listing 2 z kolei obrazuje przykładowy kod implementujący żądanie rozpoczęcia symulacji. Kluczowe znaczenie w poniższym kodzie ma linia, w której określony zostaje tryb, w jakim uruchomiony ma być mechanizm symulacyjny (tu: tryb nowego zlecenia określony parametrem *VIRTUAL*). W końcowym fragmencie listingu wywołana zostaje funkcja *startSimulation* uruchamiająca mechanizm symulacyjny.

```
public void pushButtonStartSimulation() {
 try {
   // stwórz obiekt odpowiadający elementowi startSimulation zdefiniowanemu w WSDL
   StartSimulation req = StartSimulation.Factory.newInstance();
   // uruchom mechanizm symulacyjny w trybie nowego zlecenia
   req.setWorkMode(WorkMode.VIRTUAL.toString());

   // stwórz obiekt reprezentujący wysyłany komunikat
   StartSimulationDocument reqDoc = StartSimulationDocument.Factory.newInstance();
   reqDoc.setStartSimulation(req);

   // wywołaj metodę uruchamiającą symulację, przekaż jej obiekt z komunikatem
   SystemAgentServiceStub stub = new SystemAgentServiceStub(m_superAgentUrl);
   stub.startSimulation(reqDoc);

 } catch(RemoteException e) {
   Utils.showError("Error while starting simulation: " + e.getMessage());
 }
}
```

Listing 2. Kod implementujący żądanie rozpoczęcia symulacji (Java)

Całość komunikacji pomiędzy aplikacją a systemem AIM (jak również pomiędzy poszczególnymi agentami współdziałającymi w procesie sterowania) realizowana jest w oparciu o technologię Web services. Na listingu 3 przedstawiono XML-owy komunikat przesyłany pomiędzy aplikacją kliencką a superagentem w celu realizacji uprzednio wspomnianego żądania.

Zapytanie:

```
<soapenv:Envelope xmlns:soapenv="http://schemas.xmlsoap.org/soap/envelope/"
  xmlns:sys="http://m6.mech.pk.edu.pl/SystemAgentService.xsd1">
   <soapenv:Header/>
   <soapenv:Body>
     <sys:startSimulation>
      <sys:workMode>virtual</sys:workMode>
     </sys:startSimulation>
   </soapenv:Body>
</soapenv:Envelope>
```


BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Odpowiedź:

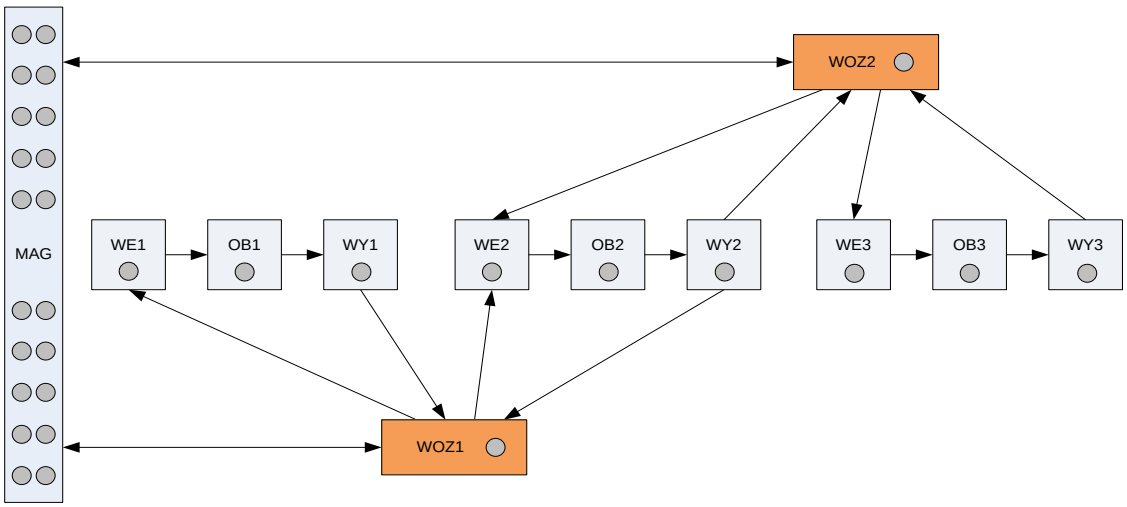
```
<soapenv:Envelope xmlns:soapenv="http://schemas.xmlsoap.org/soap/envelope/">
 <soapenv:Body>
  <startSimulationResponse xmlns="http://m6.mech.pk.edu.pl/SystemAgentService.xsd1"/>
 </soapenv:Body>
</soapenv:Envelope>
```

Listing 3. XML-owa postać danych przesyłanych w czasie uruchamiania symulacji

Przedstawione powyżej listingi zostały zamieszczone jedynie jako przykład. Nie oddają one jednak nawet w małym stopniu nakładu pracy niezbędnego do opracowania oprogramowania systemu AIM. Aby pokazać złożoność zrealizowanego zadania należy stwierdzić, że implementacja systemu oprogramowania AIM liczy ok. 250 plików i ponad 20 tysięcy linii kodu (z pominięciem zawartych w kodzie komentarzy).

4.2 Przykład zastosowania system AIM

Jednym ze środowisk wytwórczych wykorzystywanych w celu weryfikacji funkcjonowania oprogramowania AIM jest system produkcyjny, którego schemat przedstawiono na rys. 20.

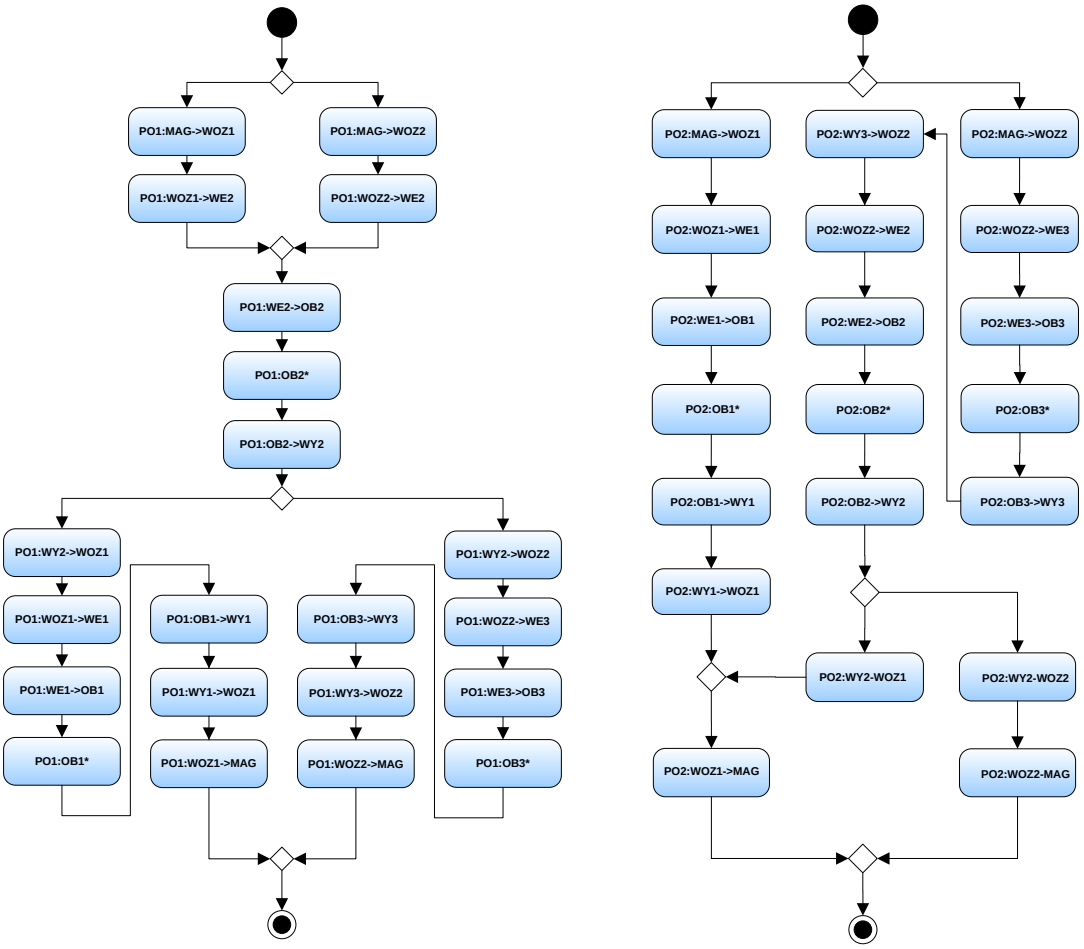


Rys. 20. Schemat testowego systemu produkcyjnego

System jest systemem spaletyzowanym. W jego skład wchodzą trzy obrabiarki: OB1, OB2 i OB3, z których każda wyposażona jest w dwa jednomiejscowe magazyny

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

buforowe wejściowy WE? i wyjściowy WY?, gdzie w miejsce znaku ? należy wstawić cyfrę 1 dla obrabiarki OB1, cyfrę 2 dla obrabiarki OB2 oraz cyfrę 3 dla obrabiarki OB3. Półfabrykaty pobierane są z posiadającego 20 miejsc magazynu głównego MAG, tam też dostarczane są gotowe wyroby. Funkcje transportowe w systemie pełnią dwa wózki: WOZ1 oraz WOZ2. Okręgami wewnątrz obiektów zaznaczono miejsca na palety. Za pomocą strzałek przedstawiono możliwe kierunki przepływu palet. Ciemniejszy kolor wózków na schemacie oznacza posiadanie przez nie statusu obiektów zagrożonych blokadą, pozostałe obiekty są bezblokadowe. Przyjęto, że w systemie produkowane są aktualnie dwa typy przedmiotów PO1 i PO2. Na rys. 21 przedstawiono UML-owe diagramy czynności obrazujące przebieg ich procesów produkcyjnych.



Rys. 21. UML-owe diagramy czynności przedstawiające przebieg procesów produkcyjnych dla przedmiotów typu PO1 oraz PO2

W zastosowanej konwencji nazw założono iż na początku nazwy znajduje się typ przedmiotu PO. Czynności oznaczone identyfikatorem agenta wykonawczego reprezentującego pojedynczy zasób wytwórczy i zakończone znakiem * (np. OB1*)

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

oznaczają czynności obróbkowe. Pozostałe czynności mają charakter transportowy, gdzie po lewej stronie znaku „–>” wyspecyfikowane jest zasób (urządzenie), na którym znajduje się paleta przed rozpoczęciem czynności, a po prawej stronie znaku „–>” urządzenie, na którym znajduje się paleta po zakończeniu czynności. Tabela 1 przedstawia założone czasy i koszty realizacji czynności obróbkowych dla każdego z przedmiotów. Występowanie w tabeli większej niż jedna par danych czas–koszt dla wybranych czynności oznacza możliwość ich realizacji w więcej niż jednym z wariantów wykonania. Czynności transportowe podzielono na dwie kategorie w zależności od tego czy bierze w nich udział wózek. Dla czynności, w których paleta z przedmiotami przekazywana jest na wózek bądź jest z niego pobierana założono jednakowy czas trwania każdej z nich wynoszący 0.2 minuty i koszt równy 10 jednostek umownych (ju). Czasy trwania pozostałych czynności ustalono na 0.1 minuty każda, koszt pozostawiono na poziomie 10 ju. W zaprezentowanych poniżej

Tabela 1

Założone czasy i koszty realizacji czynności obróbkowych

	Czas trwania (min)	Koszt (jednostki umowne)		Czas trwania (min)	Koszt (jednostki umowne)
PO1:OB1*	3,221	180	PO2:OB1*	3,521 2,423	250 350
PO1:OB2*	1,118 2,839	230 110	PO2:OB2*	2,118 4,839	200 100
PO1:OB3*	3,421	210	PO2:OB3*	2,835	150

przykładach założono, że poszczególne zlecenia dotyczą wykonania 40 przedmiotów typu PO1 i 40 przedmiotów typu PO2, wykorzystywane palety zaś mogą pomieścić do 4 przedmiotów każda.

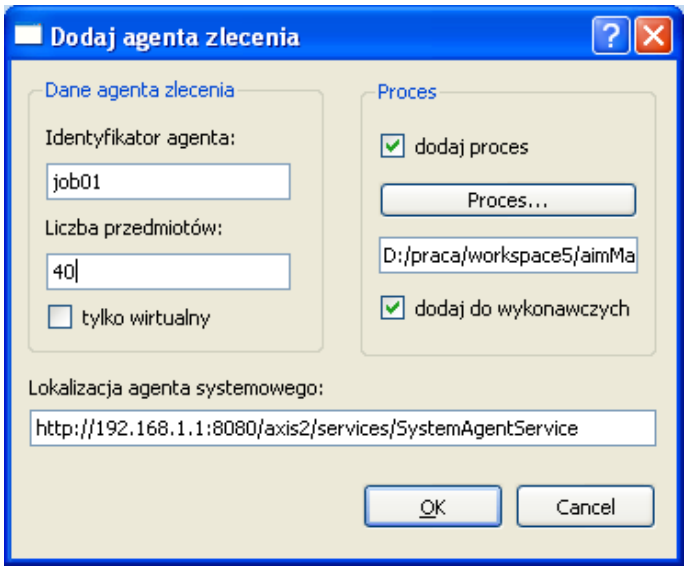
Zasadniczą cechą systemu sterowania AIM jest wysoki stopień uniwersalności i rekonfigurowalności poszczególnych jego elementów. Dotyczy to m.in. agentów wykonawczych. Informacje o tym, ile takich agentów zostanie utworzonych oraz które zasoby wytwórcze będą reprezentowane przez poszczególne agenty, wprowadzane są w momencie uruchamiania systemu. Listing 4 zawiera fragment pliku konfiguracyjnego (w formacie XML) przedstawiający dane dotyczące agentów wykonawczych, na bazie których to danych następuje inicjalizacja agentów wykonawczych o identyfikatorach MAG oraz WOZ1 w obrębie komputera znajdującego się pod adresem IP 192.168.1.1.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

```
<agent name="MAG" type="resource" mode="all"
        deployer="http://192.168.1.1:8080/axis2/services/SystemAgentService" >
    <resourceDetails capacity="20" />
</agent>
<agent name="WOZ1" type="resource" mode="all"
        deployer="http://192.168.1.1:8080/axis2/services/SystemAgentService" >
   <resourceDetails capacity="1" />
</agent>
```

Listing 4. Fragment pliku konfiguracyjnego

Informacje dotyczące realizowanych zleceń można wprowadzać do systemu także za pomocą wspomnianego pliku konfiguracyjnego w momencie uruchamiania systemu lub w późniejszym terminie za pomocą dedykowanego okna dialogowego (rys. 22).



Rys. 22. Okno dialogowe dodawania agenta zlecenia

Z chwilą wprowadzenia danych dotyczących realizowanych procesów produkcyjnych, każdy z agentów wykonawczych otrzymuje informacje o zbiorze i szczegółach czynności elementarnych, w których realizacji bierze udział reprezentowany przez niego zasób wytwórczy. Listing 5 przedstawia opis czynności obróbkowej OB2* realizowanej w ramach procesu wytwórczego przedmiotu typu PO1 przez agenta wykonawczego OB2. Jest to fragment pełnego XML-owego pliku konfiguracyjnego procesu wytwórczego dla przedmiotu PO1 wygenerowanego w rezultacie działań agenta technologa. Dodatkowo, w listingu pozostawiono tylko

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

fragmenty istotne ze względu na proces sterowania, pominięto natomiast technologiczne aspekty wykonania przedmiotu. Zawarte w powyższym przykładzie informacje dotyczą czynności poprzedzających (*previousActivities*) i kolejnych (*nextActivities*) względem definiowanej czynności PO1:OB2*, a także warunków wejściowych (*inputConditions*) określających m.in. wymagany stan przedmiotu obrabianego przed rozpoczęciem czynności oraz stan na wyjściu (*outputConditions*), gdzie z kolei zdefiniowany jest stan przedmiotu po zakończeniu czynności. Istotne znaczenie posiada element *variants*, w którym określony jest zbiór wariantów realizacji czynności PO1:OB2* wraz z takimi parametrami jak czas trwania danego wariantu czynności oraz jego umowny koszt.

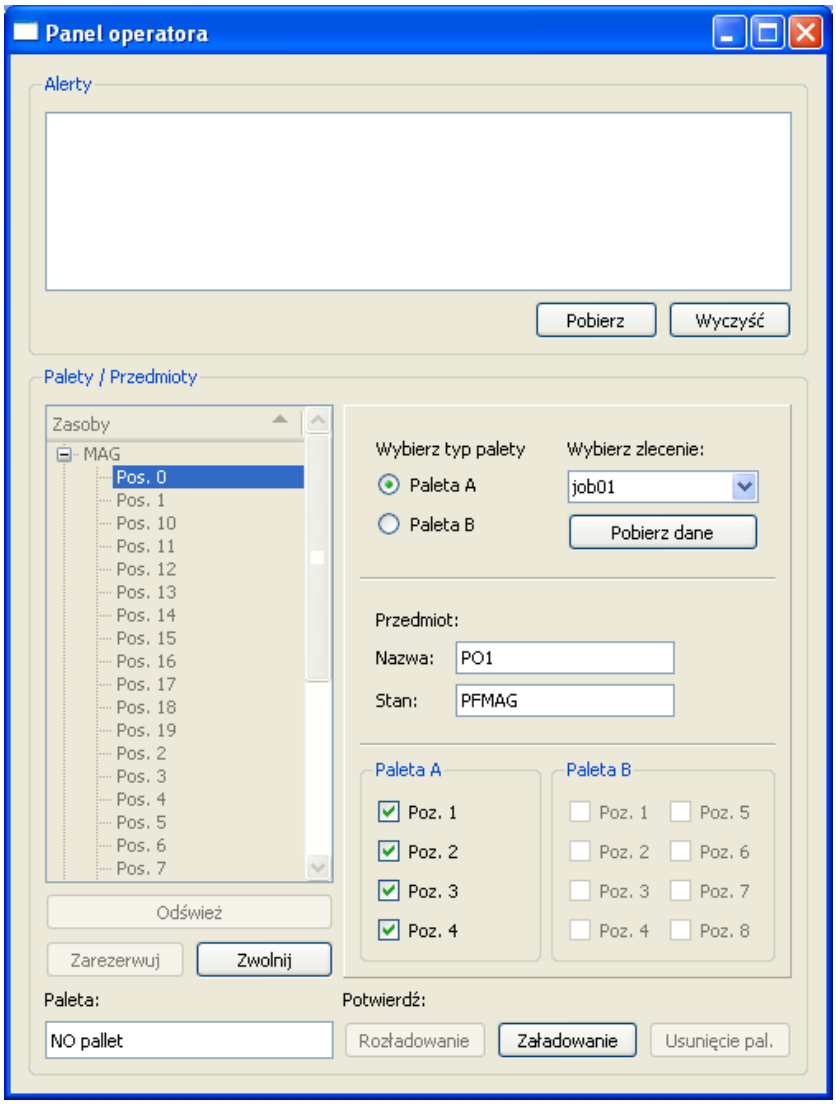
```
<activity name="PO1:OB2*">
  <previousActivities>
         <activity name="PO1:WE2-OB2"/>
   </previousActivities>
   <nextActivities>
        <activity name="PO1:OB2-WY2"/>
 </nextActivities>
  <inputConditions>
        <condition>
              <relatedActivities>
                    <activity name="PO1:WE2-OB2"/>
              </relatedActivities>
              <agent name="OB2" type="resource"/>
              <jobEntity>
                    <agent name="PO1" type="part" state="PFOB2*"/>
                    <pallet type="pa01"/>
              </jobEntity>
        </condition>
 </inputConditions>
 <outputConditions>
        <condition>
              <relatedActivities>
                    <activity name="PO1:OB2-WY2"/>
              </relatedActivities>
              <agent name="OB2" type="resource"/>
              <jobEntity>
                    <agent name="PO1" type="part" state="PFOB2"/>
                    <pallet type="pa01"/>
              </jobEntity>
        </condition>
 </outputConditions>
 <variants>
        <variant name="v01" cost="230.0" time="1.118"/>
        <variant name="v02" cost="110.0" time="2.839"/>
 </variants>
</activity>
```

Listing 5. XML-owy opis czynności wykorzystywany przez agenta wykonawczego

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

4.2.1 Wykorzystanie mechanizmu symulacyjnego w trybie wspomagającym podejmowanie decyzji

Rozpoczęcie procesu sterowania, zarówno w trybie rzeczywistym jak również symulacyjnym poprzedzone jest umieszczeniem półfabrykatów w obrębie zasobów zdefiniowanych jako punkty początkowe poszczególnych procesów produkcyjnych. W przypadku prezentowanego systemu testowego takim obiektem jest magazyn główny reprezentowany przez agenta wykonawczego MAG. Informacje o tym jakie półfabrykaty są wprowadzane do systemu, a także potwierdzenia usunięcia z systemu gotowych produktów i załadowania kolejnych półfabrykatów dokonywane są za pomocą przedstawionego na rys. 23 panelu operatora.



Rys. 23. Panel operatora

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Proces sterowania systemem produkcyjnym może być realizowany bez lub z wykorzystaniem mechanizmu wspomagającego podejmowanie decyzji. W pierwszym przypadku przed rozpoczęciem procesu sterowania należy wyznaczyć jedną z heurystyk, która następnie wykorzystywana będzie przez każdego uprawnionego agenta wykonawczego i przedmiotowego w celu wyłonienia czynności do wykonania. Użyty termin heurystyka rozumiany jest tu jako metoda poszukiwania rozwiązań, w której wykorzystywana jest jedna z wprowadzonych w rozdziale 3.5 reguł decyzyjnych i w dalszej części tekstu będzie używany zamiennie z terminem reguła. Zbiór dostępnych heurystyk definiuje zasady wyboru czynności typu: „wybierz czynność, która oferuje najkrótszy wariant realizacji", „wybierz czynność oferującą najtańszy wariant realizacji" lub też np. „wybierz czynność losowo" i jest otwarty na możliwość wprowadzania nowych reguł zalecających np. wybór czynności dla procesu, którego założony termin realizacji jest najwcześniejszy itp. Obowiązująca heurystyka może być zmieniana w trakcie pracy systemu sterowania.

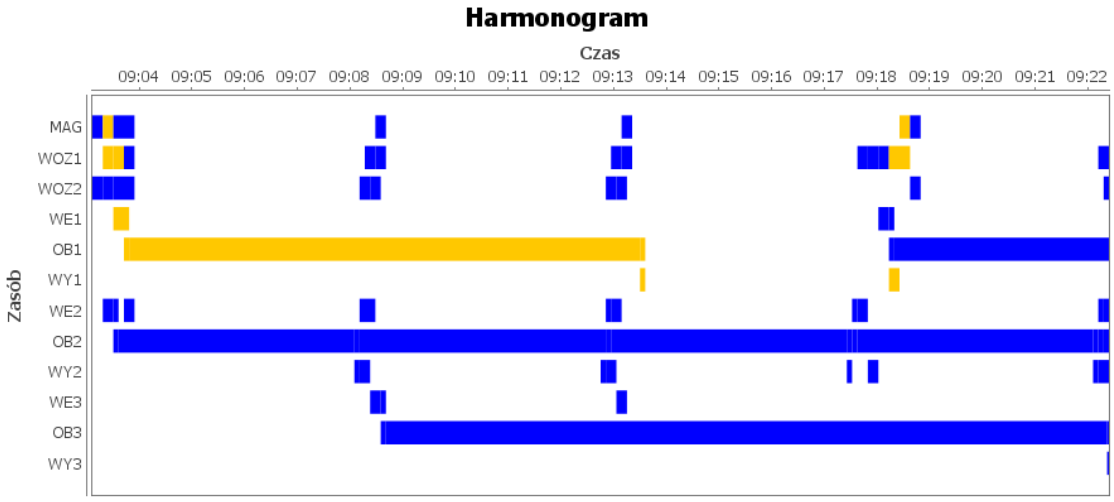
W drugim z omawianych przypadków wykorzystywany jest mechanizm symulacyjny w trybie wspomagającym podejmowanie decyzji, którego istota działania została przedstawiona w rozdziale 3.6. W trybie tym realizowana jest symulacja wykorzystująca wirtualne agenty wykonawcze, przedmiotowe oraz zleceń. Symulacja ta przeprowadzana jest dla określonej liczby kroków do przodu i powtarzana dla każdej heurystyki. Po wyczerpaniu zbioru reguł decyzyjnych dokonywana jest ocena efektywności realizacji procesów dla każdej z reguł. Następnie sekwencje czynności zrealizowanych przez poszczególne agenty podczas powtórzenia symulacji, w której użyto „zwycięskiej" reguły są przekazywane rzeczywistym agentom wykonawczym i stanowią dla nich plan czynności do wykonania. Mechanizm symulacyjny powraca natomiast do serii kolejnych powtórzeń, które rozpoczyna od zapamiętanego uprzednio stanu, w ten sposób przygotowując rzeczywistym agentom wykonawczym następne fragmenty harmonogramu.

W przedstawianym przykładzie wykorzystano mechanizm symulacyjny wspomagający podejmowanie decyzji. Zastosowano trzy heurystyki, dla których mechanizm ten generował sekwencje czynności w określonych przedziałach czasu, a następnie „zwycięskie" sekwencje przekazywał agentom rzeczywistym.

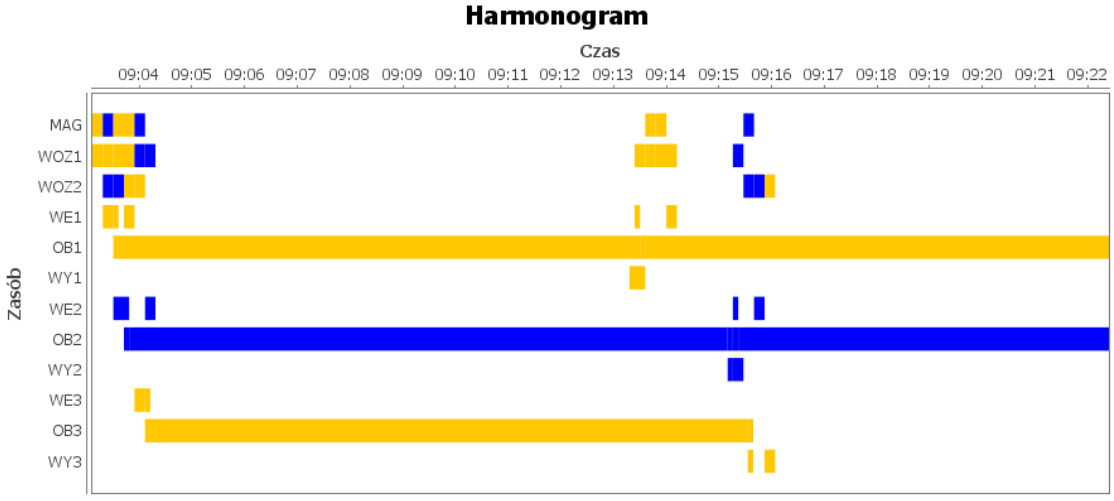
Rys. 24 przedstawia fragmenty harmonogramu wygenerowane dla początkowego okresu działania systemu (ok. 20 minut) przy wykorzystaniu każdej ze wspomnianych

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

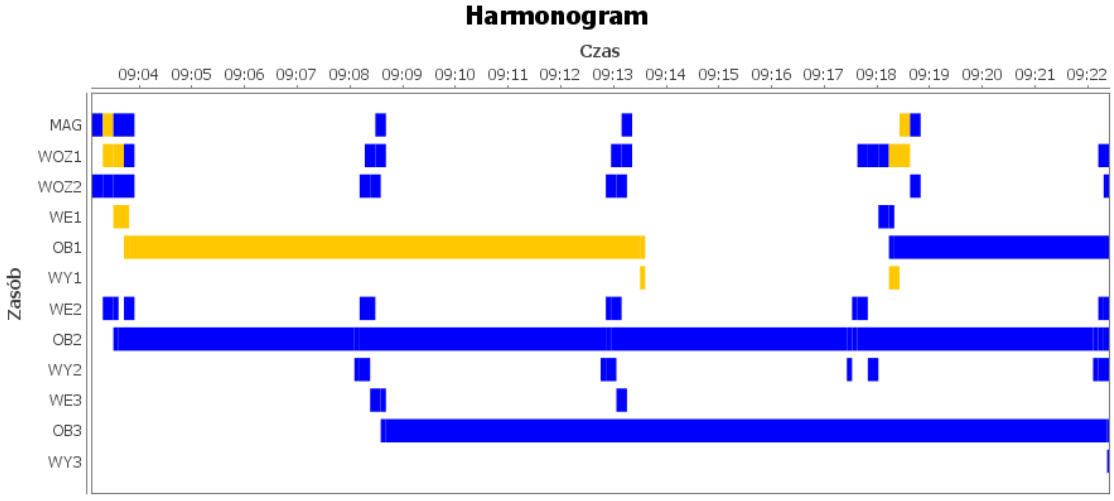
a).



b).



c).



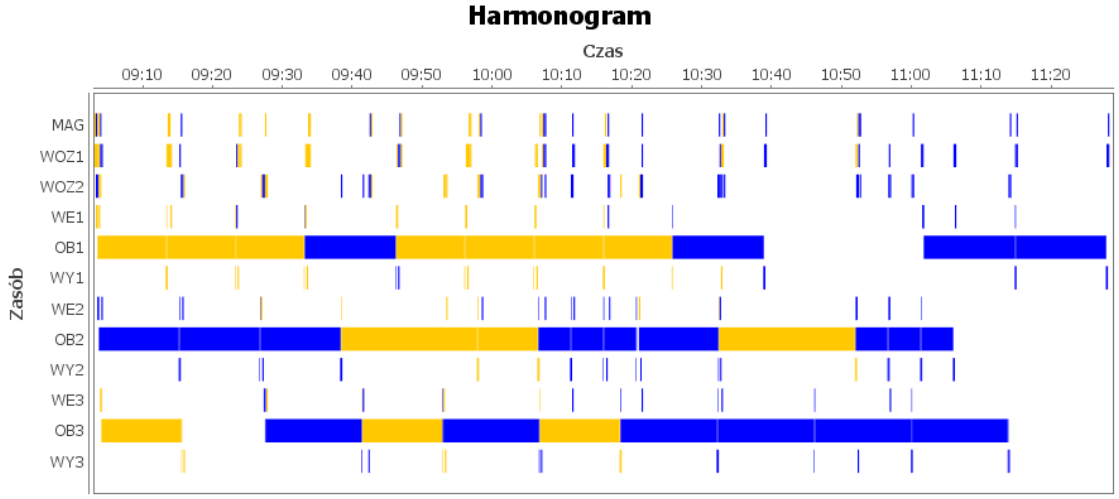
Rys. 24. Fragmenty harmonogramu wygenerowane przy pomocy mechanizmu symulacyjnego

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

heurystyk. Kolor niebieski odpowiada realizacji czynności związanych z przedmiotami typu PO1, zaś żółty – PO2.

Na pierwszym wykresie (a) zobrazowano sekwencje czynności dla reguły brzmiącej: „spośród możliwych do rozpoczęcia na danym etapie czynności wybierz tę, która zapoczątkowuje trwającą najkrócej w realizacji marszrutę, pod warunkiem że możliwe jest dokonanie rezerwacji procesowych obiektów wchodzących w skład tej marszruty; spośród potencjalnych wariantów realizacji wyselekcjonowanej czynności wybierz wariant najkrótszy". Drugi wykres (b) przedstawia fragment harmonogramu wygenerowany dla reguły, która zaleca wybór czynności zapoczątkowującej najtańszą marszrutę (przy założeniu możliwości dokonania stosownych rezerwacji procesowych) oraz najtańszego wariantu realizacji wybranej czynności. Na ostatnim wykresie (c) zamieszczono sekwencje czynności wynikające z trzeciej zastosowanej reguły. Zgodnie z tą regułą, podobnie jak w poprzednich dwóch przypadkach przy założeniu możliwości dokonania wymaganych rezerwacji procesowych, wybierana jest czynność, dla której pozostająca po niej liczba czynności do końca procesu wykonania określonego przedmiotu jest najmniejsza.

Ocena efektywności realizacji procesów dla każdej z reguł dokonywana jest na podstawie współczynników wykorzystania zasobów wytwórczych. Jej wyznacznikiem jest maksymalna wartość globalnego wskaźnika obciążenia zasobów realizujących czynności zmieniające fizyczny stan przedmiotów czyli obrabiarek (tu: OB1, OB2 oraz OB3). Wskaźnik ten zdefiniowano jako średnią arytmetyczną współczynników

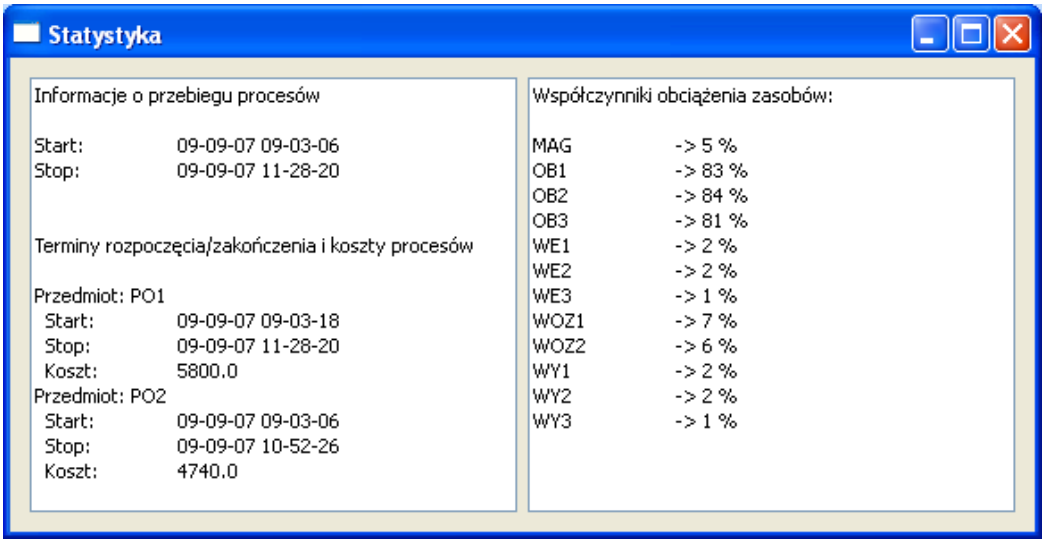


Rys. 25. Harmonogram wygenerowany przez mechanizm symulacyjny w trybie wspomagania podejmowania decyzji

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

wykorzystania zasobów wymienionego typu, określonych jako stosunek długości czasu wykorzystanego na realizację czynności zmieniających stan fizyczny obiektu do całkowitej długości czasu w badanym przedziale. Otrzymane wskaźniki dla obrabiarek w przedstawianym przykładzie wynoszą: 78 % dla reguł uwzględnionych w przypadkach (a) i (c) – w obu z nich wygenerowane zostały identyczne harmonogramy – oraz 83 % dla reguły w przypadku (b). Do realizacji rzeczywistym agentom wykonawczym zostaną zatem przekazane sekwencje czynności przedstawione na drugim z wykresów.

Rys. 25 obrazuje pełny harmonogram przygotowany przez mechanizm symulacyjny i przekazany rzeczywistym agentom. Zrzut ekranu zawarty na rys. 26 przedstawia natomiast otrzymane statystyki procesów. Wśród nich dostępne są terminy rozpoczęcia i zakończenia poszczególnych procesów, koszty wykonania zleceń (wyrażone w jednostkach umownych) oraz współczynniki obciążenia zasobów wytwórczych.



Rys. 26. Statystyki procesów

4.2.2 Funkcjonowanie systemu AIM w sytuacji awaryjnej

W rozdziale 3.7.1 przedstawiono algorytm postępowania w przypadku uszkodzenia urządzenia wytwórczego w systemie AIM. Zgodnie ze zdefiniowanymi w algorytmie regułami, wykrycie wystąpienia awarii powoduje przejście systemu w awaryjny tryb pracy.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

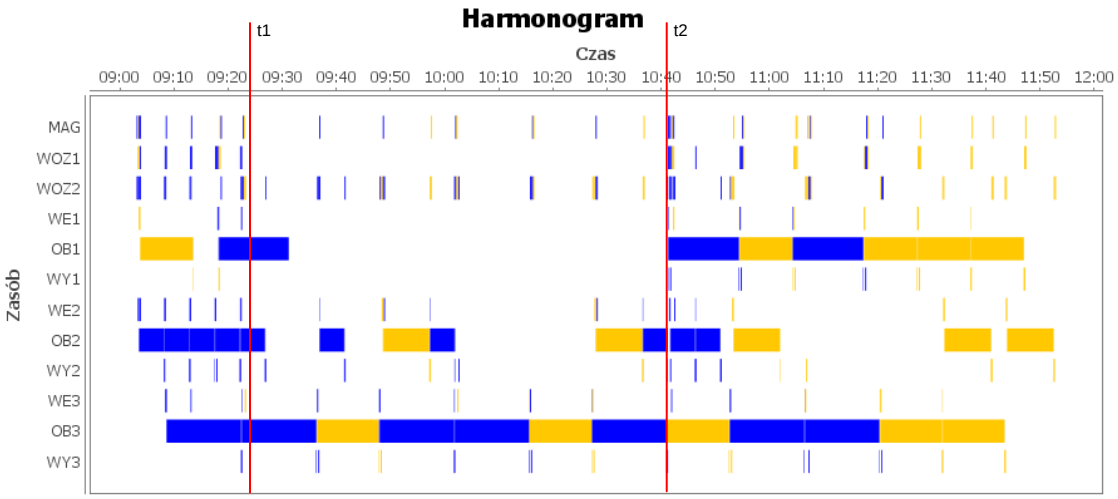
W zależności od tego, czy system sterowania pracuje samodzielnie czy też z wykorzystaniem mechanizmu symulacyjnego wspomagającego podejmowanie decyzji, uruchomienie trybu awaryjnego może odbywać się w jednym lub kilku krokach. W pierwszym przypadku informacja o awarii zostaje przekazana wszystkim zaangażowanym w podejmowanie decyzji agentom, po czym proces sterowania kontynuowany jest dalej zgodnie z założonym algorytmem. W drugim przypadku uruchomienie trybu awaryjnego wiąże się z zatrzymaniem mechanizmu symulacyjnego i usunięciem dotychczas wygenerowanych harmonogramów (uwzględniających uszkodzony zasób), po czym następuje ponowne uruchomienie wspomnianego mechanizmu poprzedzone synchronizacją stanów agentów wirtualnych z rzeczywistymi. W czasie synchronizacji przekazywana jest m.in. informacja o zaistniałym uszkodzeniu zasobu reprezentowanego przez rzeczywistego agenta wykonawczego. W czasie trwania awarii, procesy decyzyjne realizowane przez mechanizm symulacyjny podlegają regułom określonym przez algorytm postępowania w trybie awaryjnym. W rezultacie działania mechanizmu rzeczywiste agenty otrzymują fragmenty harmonogramu nie uwzględniające uszkodzonego zasobu, o ile to możliwe z uwagi na wpływ uszkodzonego obiektu na realizowalność procesów.

Niezależnie od sposobu uruchamiania trybu awaryjnego, kluczowa w obu powyższych przypadkach jest zdolność realizacji procesów decyzyjnych w taki sposób, aby podejmowanie decyzji uwzględniało w sposób automatyczny (w szczególności bez potrzeby modyfikacji procesów produkcyjnych) czasową niedostępność określonego zasobu. Pozwala na to zaimplementowany w systemie AIM mechanizm obsługi awarii.

W przeprowadzonej poniżej weryfikacji poprawności przebiegu procesów decyzyjnych w trybie awaryjnym wykorzystano takie same dane wejściowe jak w poprzednim przykładzie, tj. procesy produkcyjne oraz czasy trwania poszczególnych czynności dla przedmiotów PO1 i PO2, a także liczbę przedmiotów (40) do wykonania dla każdego ze zleceń. Celem testu było wykazanie, że dzięki temu, iż badany system jest pod względem transportu redundantny, uszkodzenie jednego z wózków nie zatrzyma całkowicie realizowanych procesów. Symulacja działania systemu sterowania została przeprowadzona bez użycia mechanizmu wspomagającego podejmowanie decyzji, wybór poszczególnych czynności elementarnych dokonywany był w oparciu o wyznaczoną uprzednio heurystykę wskazującą każdorazowo na czynność, dla której (przy założeniu możliwości dokonania wymaganych rezerwacji procesowych) pozostająca po niej liczba czynności do końca procesu wykonania określonego

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

przedmiotu jest najmniejsza. Podobnie jak w algorytmie działania mechanizmu symulacyjnego, terminy zdarzeń (rozpoczęcie i zakończenie realizowanych czynności) były wyznaczane w oparciu o zdefiniowane uprzednio czasy trwania czynności i dystrybuowane w żetonie decyzyjnym.



Rys. 27. Sekwencje działań agentów wykonawczych w sytuacji awarii

W czasie trwania symulacji, w chwili t1 przekazano agentowi informację o uszkodzeniu reprezentowanego zasobu (tu: WOZ1). Jednocześnie zasymulowano działanie operatora, polegające na zezwoleniu (mimo istnienia awarii) na wprowadzanie do produkcji kolejnych palet z półfabrykatami. W chwili t2 zasób przywrócono do stanu sprawności. Na sporządzonym wykresie (rys. 27) można zauważyć brak aktywności agenta WOZ1 pomiędzy terminami t1 i t2 (wskazanymi poprzez pionowe kreski), przy jednoczesnej realizacji innych możliwych do wykonania przez pozostające w stanie sprawności zasoby w rozważanym okresie czasu czynności.

4.2.3 Weryfikacja możliwości przyjęcia nowego zlecenia

Jednym z ważnych zastosowań systemu oprogramowania AIM jest realizacja symulacji weryfikujących możliwość i warunki przyjmowania nowych zamówień. Symulacja ta stanowi jeden z etapów przedstawionego w rozdziale 3.3 algorytmu obsługi zleceń. Wykonanie określonej liczby powtórzeń symulacji różniących się takimi parametrami jak priorytety poszczególnych zleceń, wykorzystywane reguły

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

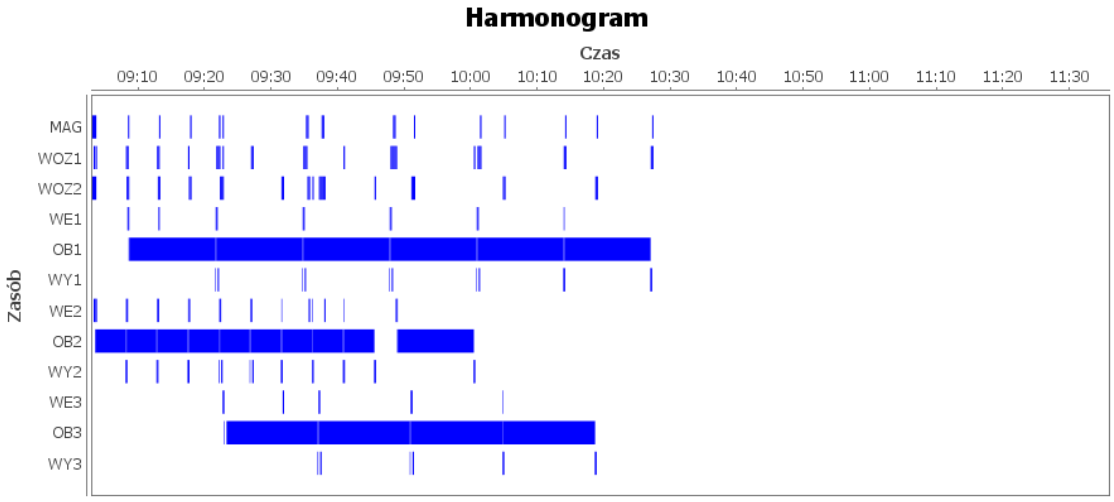
podejmowania decyzji czy też terminy wprowadzania półfabrykatów pozwala na przygotowanie wielowariantowej oferty dla klienta. Poszczególne warianty takiej oferty różnią się między sobą terminem i kosztem wykonania zamówienia. Nowe zlecenia, w szczególności te pojawiające się w chwili, gdy w systemie produkcyjnym realizowane są inne zamówienia, traktowane są w systemie AIM jako zakłócenia. Algorytm postępowania w takich sytuacjach opisano w rozdziale 3.7.2.

Realizacja symulacji weryfikującej możliwość przyjęcia nowego zlecenia wymaga wcześniejszego przygotowania XML-owego opisu procesu wytwórczego dla rozważanego zamówienia. W poniższym przykładzie testowym założono, że taki opis został wygenerowany. Dodatkowo dokonano następujących założeń: zlecenie na przedmiot PO1 zostało uprzednio pozytywnie zweryfikowane i zaakceptowane przez klienta; nowe zlecenie dotyczące przedmiotu PO2 nadeszło już po przyjęciu zamówienia dotyczącego przedmiotu PO1, ale jeszcze przed rozpoczęciem jego realizacji. W przeprowadzonej symulacji przyjęto, że termin rozpoczęcia realizacji obu zleceń będzie taki sam. Poczynione założenie pozwala w omawianym przykładzie lepiej uwidocznić wpływ nowego zlecenia na przebieg realizacji zlecenia uprzednio zaakceptowanego. Znaczenie wprowadzonego założenia zostanie wyjaśnione w dalszej części rozdziału. W omawianym przykładzie ponownie wykorzystano przedstawione na rys. 20 procesy produkcyjne poszczególnych przedmiotów. Przed rozpoczęciem symulacji utworzono wirtualne agenty wykonawcze oraz zleceń, a następnie przekazano im dane dotyczące realizowanych w obu procesach czynności.

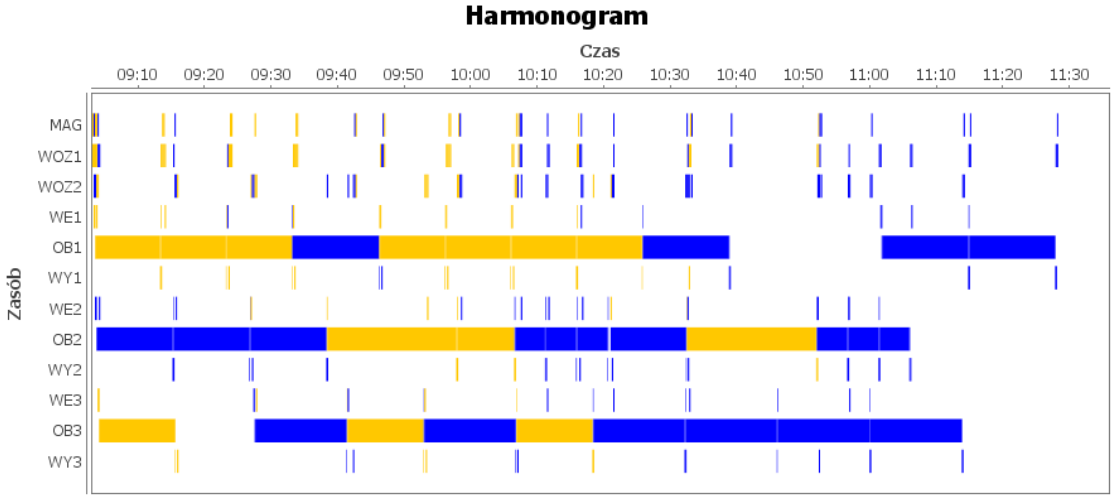
W celu przeprowadzania żądanej symulacji wykorzystano mechanizm symulacyjny pracujący w trybie nowego zlecenia. Mechanizm ten funkcjonował w oparciu o takie same heurystyki jak w omówionym poprzednio przypadku pracy w trybie wspomagania decyzji. Zrealizowano dwa powtórzenia symulacji różniące się wskaźnikiem priorytetu poszczególnych zleceń. Na rys. 28 przedstawiono wyniki symulacji. Wykres (a) obrazuje zaakceptowany przez klienta harmonogram wykonania przedmiotu PO1. Na wykresie (b) przedstawiono natomiast sekwencje czynności otrzymane przy założeniu, że zlecenia związane z każdym z przedmiotów posiadają jednakowy wskaźnik priorytetu równy jedności. Wykres (c) z kolei przedstawia harmonogram uzyskany przy uwzględnieniu różnych wskaźników priorytetu dla poszczególnych zleceń (w stosunku PO1:PO2 równym 1:5, co oznacza, że jeśli to możliwe, paleta z przedmiotami typu PO2 będzie pięciokrotnie częściej pobierana niż paleta z przedmiotami typu PO1).

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

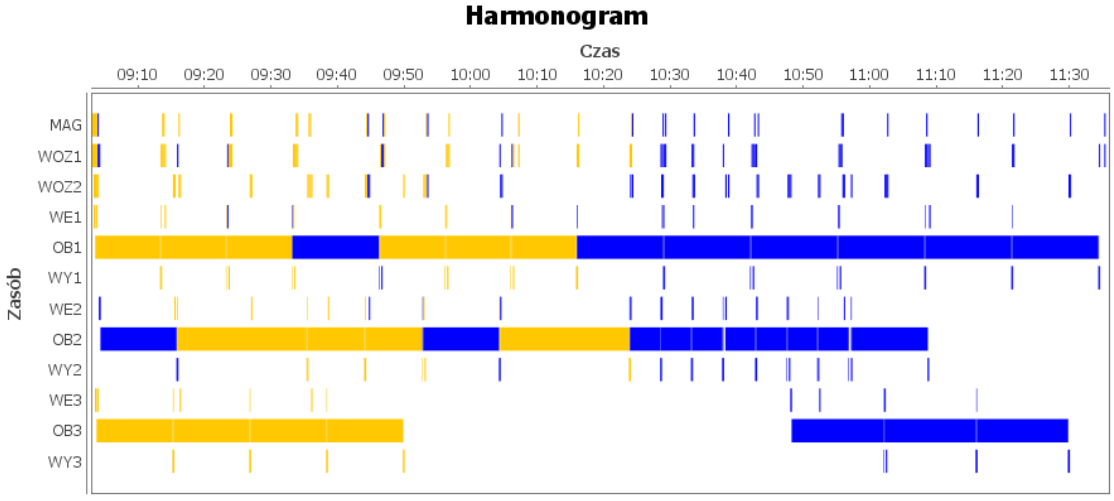
a).



b).



c).



Rys. 28. Wyniki działania mechanizmu symulacyjnego w trybie nowego zlecenia

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Tabela 2 zawiera szczegółowe wyniki powtórzeń symulacji służące do stworzenia wielowariantowej oferty dla klienta. Należy zauważyć, że przedstawione w tabeli koszty realizacji procesów produkcyjnych dla każdego z przedmiotów stanowią sumę zdefiniowanych uprzednio kosztów poszczególnych czynności elementarnych, w których udział brały wszystkie przynależne zleceniom przedmioty. Zaproponowana w ofercie dla zleceniodawcy cena realizacji zamówienia powinna poza tymi kosztami uwzględnić także umowne kary związane z ewentualnymi opóźnieniami równolegle realizowanych zleceń, a także oczekiwany zysk.

Tabela 2

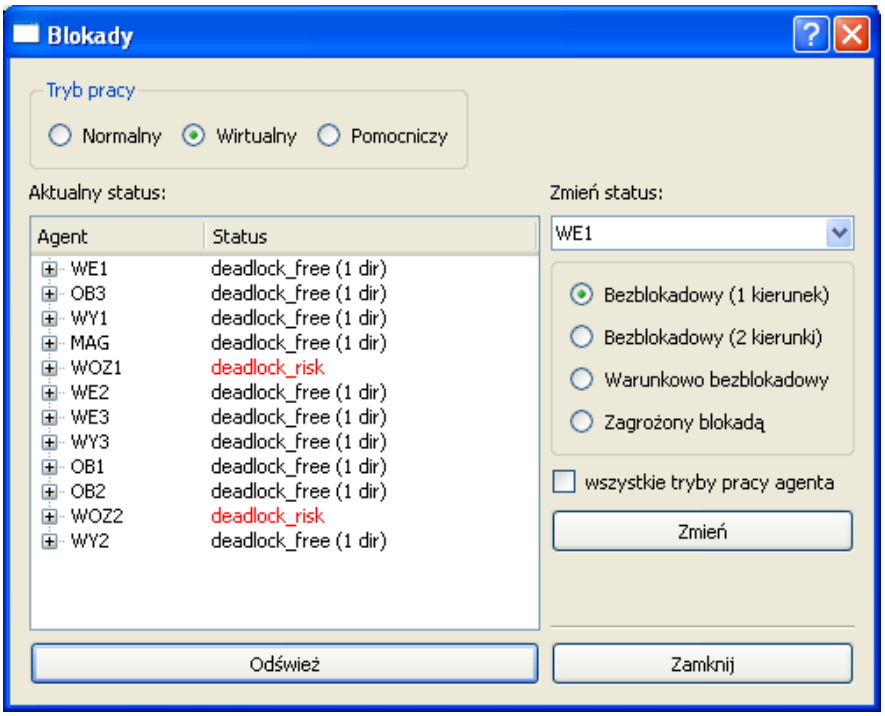
Rezultaty przeprowadzonych symulacji

	Termin rozpoczęcia procesów	Termin zakończenia (PO1)	Koszt realizacji (PO1)	Termin zakończenia (PO2)	Koszt realizacji (PO2)
PO1	09:03:06	10:27:29	6100	-	-
PO1 i PO2 (1:1)	09:03:06	11:28:20	5800	10:52:26	4740
PO1 i PO2 (1:5)	09:03:06	11:35:26	5830	10:24:16	4820

Poczynione na wstępie założenie dotyczące tego samego terminu rozpoczęcia już zaakceptowanego i nowo przyjmowanego zlecenia pozwoliło w znaczący sposób uprościć procedurę weryfikacji możliwości jego przyjęcia. Zgodnie z opisanym w rozdziale 3.7.2 algorytmem postępowania, w sytuacji gdy nowe zlecenie nadchodzi w momencie, w którym w systemie produkcyjnym realizowane są inne zamówienia i jego wykonanie będzie też w takich warunkach rozpoczynane, właściwą symulację musi poprzedzić synchronizacja stanu wirtualnych agentów z ich rzeczywistymi odpowiednikami, a następnie identyfikacja potencjalnych zmian w statusach wirtualnych agentów wykonawczych z bezblokadowego na zagrożony blokadą. Zmiany takie mogą bowiem zaistnieć na skutek przekazania agentom zbiorów nowych (powiązanych z weryfikowanym zleceniem) czynności elementarnych. Jeśli zmiany okażą się nieuchronne, a jednocześnie w toku produkcji znajdują się przedmioty związane z aktualnie realizowanymi zleceniami, bezzwłoczne zatwierdzenie modyfikacji omawianych statusów, a tym samym rekonfiguracja układu stref bezblokadowych i zagrożonych blokadą może w konsekwencji doprowadzić do wystąpienia blokady w symulowanych procesach.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

W opisanym przykładzie, wprowadzenie danych konfiguracyjnych dotyczących procesu produkcyjnego związanego z nowym zleceniem nie powoduje zmian w powiązaniach między agentami, a tym samym statusy agentów wykonawczych pozostają takie same (rys. 29). Zatem bez przyjętych uprzednio ograniczeń, tj. w sytuacji gdy nowe zlecenie dotyczące przedmiotów typu PO2 nadchodzi w trakcie realizacji procesu produkcyjnego przedmiotów PO1, na potrzeby symulacji można wprowadzać wirtualne półfabrykaty w dowolnym żądanym terminie, w szczególności już na jej starcie. W przeciwnym wypadku, tj. w razie zaistnienia konieczności dokonania zmian w układzie stref bezblokadowych i zagrożonych blokadą, należy najpierw wstrzymać wprowadzanie nowych półfabrykatów dla aktualnie realizowanych zleceń (natychmiastowo lub w żądanym terminie), a następnie przeprowadzić do końca procesy symulacyjne dla wszystkich znajdujących się w toku produkcji przedmiotów. Dopiero na tym etapie można bez zagrożenia blokadą dokonać zatwierdzenia wspomnianych modyfikacji statusów. Od tego momentu możliwe staje się wprowadzanie na potrzeby symulacji wirtualnych półfabrykatów dla wszystkich rozważanych zleceń, w tym także nowo przyjmowanego, weryfikowanego zamówienia.



Rys. 29. Statusy wirtualnych agentów wykonawczych przed i po wprowadzeniu danych konfiguracyjnych dla nowo przyjmowanego procesu

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

5 Podsumowanie i wnioski

Opracowanie koncepcji i implementacja systemu oprogramowania AIM stanowi próbę odpowiedzi na współczesne wyzwania stawiane systemom sterowania wytwarzaniem, uwzględniającą pojawiające się w tym zakresie trendy oraz dostępne aktualne narzędzia informatyczne. W wyniku analizy, zarówno wymagań jak i tendencji, określono kilka obszarów mających szczególne znaczenie dla rozwoju systemów sterowania wytwarzaniem. W zakresie objętych pracami zagadnień znalazły się architektury nowoczesnych systemów sterowania, problematyka podejmowania decyzji z uwzględnieniem ograniczeń wynikających z możliwości wystąpienia blokad, a także zakłócenia w procesach produkcyjnych i ich obsługa. Szczególną uwagę zwrócono również na technologie komunikacyjne wykorzystywane w mechanizmach integracji informacji. Jedną z podstawowych trudności ograniczających dynamikę rozwoju współczesnych systemów produkcyjnych jest bowiem znaczna różnorodność spotykanych w wymienionych obszarach rozwiązań. W toku prac duży nacisk położono na poszukiwanie i wykorzystanie takich rozwiązań, które mogłyby pełnić rolę standardu w poszczególnych obszarach poruszanych zagadnień.

W rezultacie prac zrealizowanych w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej zaproponowano koncepcję budowy i funkcjonowania wieloagentowego systemu AIM na poziomie sterowania operatywnego oraz opracowano oprogramowanie realizujące przedstawioną w koncepcji funkcjonalność. Oprogramowanie to charakteryzuje się wysokim poziomem rekonfigurowalności i może znaleźć praktyczne zastosowanie zarówno do symulacji działania dyskretnych systemów produkcyjnych, jak również do sterowania zautomatyzowanymi systemami produkcyjnymi. Ważne znaczenie utylitarne posiada fakt wykorzystania technologii Web services w implementacji mechanizmów komunikacyjnych opracowanego systemu. U podstaw tej technologii leżą będące wyznacznikiem sukcesu Internetu i zaakceptowane przez wszystkich znaczących graczy na rynku IT standardy. Fakt ten w powiązaniu z pozytywnymi rezultatami przeprowadzonych testów wykorzystania technologii Web services w opracowanym systemie sterowania daje uzasadnione nadzieje na upowszechnienie się jej w środowiskach produkcyjnych, a tym samym ograniczenie w przyszłości barier związanych z dzisiejszą heterogenicznością tychże środowisk. Opracowane oprogramowanie charakteryzuje się dużym stopniem złożoności. Na podkreślenie zasługuje również fakt wykorzystania w jego budowie rozwiązań typu open source.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Kolejnym elementem opracowanego systemu oprogramowania AIM mającym praktyczne znaczenie jest wprowadzenie mechanizmu obsługi wybranych zakłóceń w realizacji procesów produkcyjnych. Awarie zasobów wytwórczych, narzędzi czy też elementów układu sterowania, a także pilne zlecenia, zmiany w zamówieniach itp. są zjawiskiem powszechnym, celowe w związku z tym staje się uwzględnienie możliwości wystąpienia zakłóceń w realizacji procesów produkcyjnych już na etapie projektowania i budowy systemów sterowania. W wyniku prac przygotowano algorytmy postępowania w przypadku dwóch wybranych typów zakłóceń. Jeden z nich związany jest z możliwością wystąpieniem awarii urządzenia wytwórczego, drugi definiuje zachowanie systemu w sytuacji pojawienia się nowego zlecenia.

Podejmowanie decyzji dotyczących przydzielania zadań do zasobów ma w systemie AIM charakter rozproszony, przy czym uprawnienia decyzyjne przyznawane są poszczególnym agentom sekwencyjnie. Wykorzystano w tym celu algorytm pierścienia z żetonem. Uprawnione do realizacji procesów decyzyjnych agenty dokonują wyborów czynności elementarnych do realizacji, kierując się aktualnym stanem systemu oraz zdefiniowanymi uprzednio regułami. Utrudnieniem w tym przypadku staje się fakt, iż agenty podejmują decyzje w oparciu o lokalne przesłanki, bez pełnej wiedzy o realizowanych w systemie procesach. Aby temu przeciwdziałać, w systemie AIM zaimplementowano mechanizm symulacyjny, który pozwala m.in. uwzględniać w procesie szeregowania zadań także cele globalne. Wyniki przeprowadzonych testów potwierdziły zasadność wprowadzenia tego typu mechanizmu. Innym przeznaczeniem wspomnianego mechanizmu jest symulowanie procesów produkcyjnych w celu oszacowania określonych parametrów ich realizacji (m.in. czas i koszt wykonania zlecenia, obciążenie zasobów), w tym weryfikacji możliwości przyjęcia nowego zlecenia.

Istotnym zagadnieniem powiązanym z podejmowaniem decyzji dotyczących realizacji czynności elementarnych jest możliwość wprowadzenia systemu w stan blokady. W literaturze znaleźć można liczny zbiór pozycji dotyczących tematyki harmonogramowania procesów produkcyjnych. Większość z przedstawianych metod pomija jednak wymieniony problem. W celu przeciwdziałania blokadom w systemie AIM zastosowano metodę rezerwacji procesowej, którą jednocześnie zintegrowano z procesem podejmowania decyzji wykorzystującym zaproponowany w pracy algorytm. Stanowi to oryginalne podejście do omawianego problemu.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Zasygnalizowana w pracy konieczność uwzględniania możliwie pełnego zbioru potencjalnych zakłóceń w procesach produkcyjnych otwiera listę kierunków dalszych prac. Pierwszym z nich jest poszerzenie zakresu obsługiwanych przez system oprogramowania AIM zakłóceń o awarie mające podłoże informatyczne.

Wraz z rozwojem współczesnych systemów produkcyjnych, a w szczególności z rosnącym poziomem ich rekonfigurowalności, wzrasta także znaczenie transportu międzyoperacyjnego. Jednym z kierunków dalszych prac będzie także stworzenie koncepcji systemu sterowania podsystemem transportowym, pozwalającego na maksymalizację stopnia wykorzystania możliwości produkcyjnych parku maszynowego, a następnie zintegrowanie opracowanego systemu z oprogramowaniem AIM.

Istotnym czynnikiem wpływającym na realizowane w systemie procesy podejmowania decyzji jest procedura przyznawania uprawnień decyzyjnych. W zależności od zastosowanego algorytmu, żeton decyzyjny może być dystrybuowany w sposób uwzględniający równy dostęp do praw decyzyjnych każdego z agentów upoważnionych do ich otrzymywania, ale istnieje także możliwość wpływania na obieg żetonu tak, by celowo zmieniać kolejność i częstotliwość przyznawania rozważanych uprawnień. Opracowanie mechanizmu pozwalającego w sposób dynamiczny wpływać na proces przyznawania uprawnień decyzyjnych, co w konsekwencji umożliwi płynną zmianę sposobu sterowania – od w pełni rozproszonego do scentralizowanego stanowi kolejny z kierunków dalszych prac.

BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

6 Literatura

[1] *Web Services Description Language (WSDL) 1.1*. http://www.w3.org/TR/2001/NOTE-wsdl-20010315, 2001.

[2] *Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Fifth Edition)*. http://www.w3.org/TR/2008/REC-xml-20081126/, 2008.

[3] AKYOL, D.E., BAYHAN, G.M., "*A review on evolution of production scheduling with neural networks*". Computers and Industrial Engineering, Volume 53 , Issue 1, 2007, s. 95-122.

[4] BŁAŻEWICZ, J., CELARY, W., SŁOWIŃSKI, R., WĘGLARZ, J., *Badania operacyjne dla informatyków*. WNT, 1983.

[5] BAKER, A.D., "*Which Factory Control Algorithms Can Be Implemented in an Agent Architecture: Dispatching, Scheduling or Pull*". Journal of Manufacturing Systems, Vol. 17, No. 4, 1998, s. 297-320.

[6] BANASZAK, Z., KROGH, B., "*Deadlock avoidance in flexible manufacturing systems with concurrently competing process flows*". IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 6, No. 6, 1990, s. 724 - 734.

[7] BANASZAK, Z., KUŚ, J., ADAMSKI, M., *Sieci Petriego : modelowanie, sterowanie i synteza systemów dyskretnych*. Wydawnictwo Wyższej Szkoły Inżynierskiej, Zielona Góra, 1993.

[8] BANASZAK, Z., MAJDZIK, P., WÓJCIK, R., *Procesy współbieżne. Modele efektywności funkcjonowania*. Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2008.

[9] BARATA, J., CAMARINHA-MATOS, L., ONORI, M., "*A Multiagent Based Control Approach for Evolvable Assembly Systems*". Industrial Informatics, 2005. INDIN '05. 2005 3rd IEEE International Conference on., s. 478-483.

[10] BAUMANN, C., KITTL, B., "*Cell Control Software and Web Services*". Proc. of 13th International DAAAM Symposium: “Intelligent Manufacturing & Automation: Learning from Nature”, Vienna, 2002, s. 027-028.

[11] BONGAERTS, L., VAN BRUSSEL, H., VALCKENAERS, P., "*Generic Concept for Holonic Manufacturing System*". Proc. of the 9th International FAIM Conference, Tilburg, 1999.

[12] BOOCH, G., RUMBAUGH, J., JACOBSON, I., *UML przewodnik użytkownika*. WNT, 2001.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

[13] BUSSMANN, S., SCHILD, K., "*Self-organizing manufacturing control: an industrial application ofagent technology*". Proceedings of Fourth International Conference on MultiAgent Systems, 2000, s. 87-94.

[14] CHLEBUS, E., *Techniki komputerowe CAx w inżynierii produkcji*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2000.

[15] CHO, H., KUMARAN, T.K., WYSK, R.A., "*Graph-Theoretic Deadlock Detection and Resolution for Flexible Manufacturing Systems*". IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 11, No. 3, 1995, s. 413-421.

[16] CHWAJOŁ, G., "*Communication Technologies in Manufacturing Systems - The Current State and Directions of Development*". Proceedings of 8th International Conference ROBTEP 2006: Automation/Robotics in theory and practice, Jasná - Nízke Tatry, 2006, s. 173-178.

[17] CHWAJOŁ, G., "*Zdecentralizowane sterowanie wytwarzaniem z wykorzystaniem technologii Web services*". Proceedings of the 7th International Scientific Conference "Automation in Production Planning and Manufacturing", Žilina - Valča, 2006, s. 64-69.

[18] CHWAJOŁ, G., "*Selected Aspects of Modern Manufacturing Control Systems*". Proceedings of the 2nd year International conference for young researches and PhD. students ERIN 2008, Bratislava, 2008, s. I-30 (1-5).

[19] CHWAJOŁ, G., ZAJĄC, J., "*Rola standardów w rozwoju współczesnych systemów sterowania wytwarzaniem*". Materiały Konferencji Techniczno-Ekonomiczne uwarunkowania Rozwoju Przedsiębiorczości, Kraków, 2005, s. 33-44.

[20] CYKLIS, J., PIERZCHAŁA, W., *Modelowanie procesów dyskretnych w elastycznych systemach produkcyjnych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, z. 77, nr 3, Kraków 1995.

[21] CYKLIS, J., SŁOTA, A., "*Obiektowo-obserwowalna sieć Petriego w zastosowaniu do modelowania elastycznych systemów wytwarzania*". Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Automatyka, z.124, Gliwice, 1998, s. 31-41.

[22] CYKLIS, J., ZAJĄC, J., SŁOTA, A., "*Models of manufacturing system for simulation and control*". Journal of Manufacturing Engineering, 2004, s. 10-15.

[23] DICESARE, F., HARHALAKIS, G., PROTH, J.M., SILVA, M., VERNADAT, F.B., *Practice of Petri Nets in Manufacturing*. Chapman & Hall, London, 1993.

[24] DUDA, J., *Wspomagane komputerowo generowanie procesu obróbki w technologii mechanicznej*. Monografia, Politechnika Krakowska, Kraków, 2003.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

[25] DUDA, J., GOLA, Ł., HABEL, J., "*The idea of generation of multi-variant machining processes plans*". International Conference New Ways in Maufacturing Engineering NSVT'2008, Presov, 2008, s. 275-280.

[26] FINDEISEN W. (red), *Analiza systemowa – podstawy i metodologia*. PWN, 1985.

[27] FRIZELLE, G., McFARLANE, D., BONGAERTS, L., "*Disturbance Measurement in Manufacturing Production Systems*". Proceedings of the Advanced Summer Institute of the Esprit Network of Excellence in Intelligent Control and Integrated Manufacturing Systems, Bremen, Germany, 1998, s. 159-162.

[28] HEIKKILA, T., KOLLINGBAUM, M., VALCKENAERS, P., BLUEMINK, G-J., "*ManAge: an Agent Architecture for Manufacturing Control*". Proc. of the 2nd Int. Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Leuven, 1999, s. 127-136.

[29] HONCZARENKO, J., JARDZIOCH, A., SOSNOWSKI, M., "*Sztuczna inteligencja w sterowaniu zrobotyzowanymi systemami wytwarzania*". Control Engineering Polska, 9/2008.

[30] KALINOWSKI, K., KNOSALA, R., "*Harmonogramowanie produkcji w warunkach zakłóceń, wspomagane systemem eksperckim*". Zarządzanie przedsiębiorstwem, nr 1'2003, Polskie Towarzystwo Zarządzania Produkcją, s. 124-135.

[31] KOCH, J., SKURA, K., SMALEC, Z., REINER, J., "*Communication Systems in Manufacturing and their Role in Automation*". Proc. of the ESPRIT-COPERNICUS Symposium, Wrocław, 1998, s. 129-152.

[32] KOESTLER, A., *The Ghost in the Machine*. Hutchinson & Co, 1967.

[33] LEITÃO, P., "*Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey*". Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2008, p. doi:10.1016/j.engappai.2008.09.005.

[34] LEITÃO, P., BARBOSA, J., "*Disturbance Detection, Recover and Prediction in Holonic Manufacturing Control*". Proceedings of the IEEE Workshop on Distributed Intelligent Systems, 2006, s. 133-138.

[35] LEITÃO, P., RESTIVO, F., "*An Agile and Cooperative Architecture for Distributed Manufacturing Systems*". Proceedings of the IASTED International Conference Robotics and Manufacturing, Cancun, Mexico, 2001, s. 188-193.

[36] LEITÃO, P., RESTIVO, F., "*Implementation of a Holonic Control System in a Flexible Manufacturing System*". IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics – Part C: Applications and Reviews, vol. 38, issue 5, 2008, s. 699-709.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

[37] MANES, A.T., *Web Services: A Manager's Guide*. Addison Wesley Professional, 2003.

[38] MASCADA Consortium, *WP1 Dissemination Report: Analysis and Evaluation of Change and Disturbances in Industrial Plants*, 1997, http://www.mech.kuleuven.ac.be/pma/project/mascada/welcome.html.

[39] MATSON, J., McFARLANE, D., "*Tools for Assessing the Responsiveness of Manufacturing Systems*". Proceedings of IEE Workshop on Responsiveness in Manufacturing, London, 1998, s. 8/1-8/6.

[40] MEIER, H., FALLER, C., SMAJIC, H., "*Service and Control of Manufacturing Systems Using Internet Infrastructure*". Machine Engineering, Vol. 5, No. 1-2, 2005, s. 62-70.

[41] ODELL, J.J., "*Agent-Based Manufacturing: A Case Study*". Journal of Object Technology, vol. 1, no. 5, 2002, s. 51-61.

[42] ODELL, J., PARUNAK, H.V.D., BAUER, B., "*Representing Agent Interaction Protocols in UML*". Proc. of Agent-Oriented Software Engineering, 2000, s. 121-140.

[43] 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.

[44] PĚCHOUČEK, M., MAŘÍK, V., "*Industrial deployment of multi-agent technologies: review and selected case studies*". Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, Volume 17, Number 3, 2008, s. 397-431.

[45] PIERZCHAŁA, W., "*Planowanie zadań produkcyjnych w oparciu o wirtualny proces wytwarzania*". Materiały konferencyjne AUTOMATION'2000, PIAP, Warszawa, 2000, s. 144-151.

[46] RIEDMILLER, S., RIEDMILLER, M., "*A Neural Reinforcement Learning Approach to Learn Local Dispatching Policies in Scheduling Problems*". Proc. of the Conference on Artificial Intelligence IJCAI'99, Stockholm, 1999, s. 764-769.

[47] SAADAT, M., TAN, M.C.L., OWLIYA, M., "*Changes and disturbances in manufacturing systems: A comparison of emerging concepts*". Automation Congress, 2008. WAC 2008. World, s. 1-6.

[48] SILBERSCHATZ, A., PETERSON, J., GALVIN, P., *Podstawy systemów operacyjnych*. WNT, 1993.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

[49] SŁOTA, A., *Zastosowanie Obiektowo Obserwowalnych Sieci Petriego w modelowaniu zautomatyzowanych systemów produkcyjnych*. Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków, 2003.

[50] SZAFARCZYK, M., ŚNIEGULSKA-GRĄDZKA, D., WYPYSIŃSKI, R., *Podstawy układów sterowań cyfrowych i komputerowych*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2007.

[51] SZYPERSKI, C., *Oprogramowanie komponentowe*. WNT, 2001.

[52] TANENBAUM, A.S., *Rozproszone systemy operacyjne*. PWN, 1997.

[53] TOMCZUK, I., MUSZYŃSKI, W., BANASZAK, Z., "*Production flow planning based on CLP approach*". 10th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Vol. 2, 2005, s. 637-644.

[54] TRENTESAUX, D., "*Distributed control of production systems*". Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2009, p. doi:10.1016/j.engappai.2009.05.001.

[55] UEDA, K., OHKURA, K., "*A Biological Approach to Complexity in Manufacturing Systems*". Manufacturing Systems, Vol. 25, No. 1, 1996, s. 57-65.

[56] ULATOWSKI, W., MASŁOWSKI, A., "*Modelowanie działań operatora w sterowaniu wieloagentowym podsystemem transportowym w systemie wytwarzania*". Materiały z konferencji AUTOMATION'2005. PIAP, Warszawa, 2005, s. 76-85.

[57] USHER, J.M., WANG, Y., "*Negotiation Between Intelligent Agents for Manufacturing Control*". Proc. of the Conference EDA 2000, Orlando, 2000, s. 511-519.

[58] VALCKENAERS, P., KOLLINGBAUM, M., VAN BRUSSEL, H., BOCHMANN, O., ZAMFIRESCU, C., "*The Design of Multi-Agent Coordination and Control Sustem Using Stigmergy*". Proc. of the IWES'01 Conference, Bled, 2001.

[59] VIEIRA, G.E., HERRMANN, J.W., LIN, E., "*Rescheduling manufacturing systems: a framework of strategies, policies, and methods*". Journal of Scheduling, Volume 6, Number 1, 2003, s. 35-58.

[60] WARNIER, E., YLINIEMI, L., JOENSUU, P., "*Web based monitoring and control of industrial processes*". Report A No 22, University of Oulu, Control Engineering Laboratory, 2003.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

[61] WÓJCIK, R., BZDYRA, K., CRISÓSTOMO, M.M., BANASZAK, Z., "*Constraint Programming Approach to Design of Deadlock-Free Schedules in Concurrent Production Systems*". 10th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. ETFA 2005. vol. 1, 2005, s. 135-142.

[62] XIANG, W., LEE, H.P., "*Ant colony intelligence in multi-agent dynamic manufacturing scheduling*". Engineering Applications of Artificial Intelligence, Volume 21 , Issue 1, 2008, p. 73–85.

[63] ZAJĄC, J., *Rozproszone sterowanie zautomatyzowanymi systemami wytwarzania*. Monografia 288, Seria Mechanika. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2003.

[64] ZAJĄC, J., "*A Deadlock Handling Method for Automated Manufacturing Systems*". CIRP Annals, Vol. 53, No. 1, 2004, s. 367-370.

[65] ZAJĄC, J., CHWAJOŁ, G., ŚLUSARCZYK, Ł., "*Wybrane problemy samokreowania się rozproszonych systemów sterowania wytwarzaniem*". Materiały konferencyjne AUTOMATION'2003, PIAP, Warszawa, 2003, s. 139-146.

[66] ZAJĄC, J., CHWAJOŁ, G., "*Integracja informacji w systemach sterowania wytwarzaniem*". Materiały z konferencji AUTOMATION'2005. PIAP, Warszawa, 2005, s. 96-105.

[67] ZAJĄC, J., CHWAJOŁ, G., "*Entitlement Based Approach to Decision Making in Distributed Manufacturing Control Systems*". Proceedings of Technology Systems Operation, Ed. Hloch S. et al., ISBN 978-80-8073-900-3, Prešov, 2007, s. 167-170.

[68] ZAJĄC, J., CHWAJOŁ, G., "*Modelowanie wybranych zagadnień w rozproszonym systemie sterowania produkcją*". Pomiary Automatyka Robotyka, ISSN 1427-9126, Luty 2008, s. 311-319.

[69] ZAJĄC, J., CHWAJOŁ, G., "*Towards Agent-Based Manufacturing Systems*". Annals of DAAAM for 2008 & Proceedings of the 19th International DAAAM Symposium, ISBN 978-3-901509-68-1, ISSN 1726-9679, Editor B. Katalinic, Published by DAAAM International, Vienna, Austria, 2008, s. 1541-1542.

[70] ZAJĄC, J., CHWAJOŁ, G., "*Wykorzystanie wirtualnych procesów sterowania produkcją do wspomagania decyzji w zautomatyzowanych systemach wytwarzania*". W Problemy Robotyki Tom II, Red. K. Tchoń, C. Zieliński, vol. II, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2008, s. 625-634.

[71] ZAJĄC, J., CHWAJOŁ, G., "*Wykorzystanie technologii Web services do budowy rozproszonego systemu sterowania*". Pomiary Automatyka Robotyka, ISSN 1427-9126, Luty 2009, s. 105-114.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

[72] ZAJĄC, J., CHWAJOŁ, G., KMIECIK, A., "*New Information Technologies for Building Distributed Manufacturing Control System*". Proc. of 7th International Conference ROBTEP 2004 on Automation/Robotics in Theory and Practice, Vysne Ruzbachy, 2004, s. 580-587.

[73] ZAJĄC, J., CHWAJOŁ, G., KMIECIK, A., "*Integracja projektowania procesów i sterowania produkcją w zautomatyzowanych systemach wytwarzania*". Pomiary Automatyka Robotyka, ISSN 1427-9126, Luty 2007, s. 1-9.

[74] ZAJĄC, J., KMIECIK, 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.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ