

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

## KONCEPCJA INTEGRACJI ROZPROSZONEGO SYSTEMU STEROWANIA PRODUKCJĄ AIM Z PODSYSTEMEM TRANSPORTU MIĘDZYOPERACYJNEGO ZBUDOWANYM Z AUTONOMICZNYCH ROBOTÓW MOBILNYCH

*W pracy przedstawiono koncepcję budowy i funkcjonowania podsystemu transportu międzyoperacyjnego złożonego z autonomicznych robotów mobilnych, a także zaprezentowano ideę jego integracji z rozproszonym systemem sterowania produkcją AIM. Przedstawiono zarys działań wymaganych do osiągnięcia wyżej wymienionego celu oraz dokonano krótkiej charakterystyki proponowanych algorytmów i technologii.*

### A CONCEPT OF INTEGRATION OF AIM DISTRIBUTED MANUFACTURING CONTROL SYSTEM WITH AUTOMATED GUIDED VEHICLE SUBSYSTEM

*The paper presents a proposal of an automated guided vehicle transportation subsystem used for work-in-process movement in a production system. It also introduces a concept of its integration with the AIM multiagent manufacturing control system. Required steps to reach this purpose as well as short descriptions of proposed algorithms and technologies are presented.*

## 1. WPROWADZENIE

Konsekwencją zmiany paradygmatu produkcji z produkcji masowej (ang. *mass production*) na produkcję zindywidualizowaną (ang. *mass customization*) jest konieczność wprowadzenia w przemyśle nowych innowacyjnych technologii wytwórczych oraz wzrost informatyzacji, robotyzacji i automatyzacji realizowanych procesów produkcyjnych. Wymaga to jednak zwiększenia udziału nauki w budowie nowych i modernizacji istniejących przedsiębiorstw produkcyjnych, które będą tworzyć elementy nowoczesnej gospodarki opartej na wiedzy. Wprowadzanie w przedsiębiorstwach podsystemów transportu międzyoperacyjnego wykorzystujących autonomiczne roboty (wózki) mobilne oraz integracja informacyjna i funkcjonalna tych podsystemów z podsystemami wytwarzania jest bowiem warunkiem koniecznym sukcesu ekonomicznego przedsiębiorstw. Naturalnym integratorem informacyjnym tych podsystemów jest podsystem sterowania produkcją. Współczesne trendy określają nowoczesny podsystem sterowania produkcją jako system o strukturze zdecentralizowanej, zdolny do samokonfiguracji i rekonfiguracji. Taki podsystem sterowania zapewnić musi odpowiednią solidność systemu produkcyjnego, czyli zdolność do racjonalnego działania w przypadku wystąpienia zakłóceń.

Podsystemy transportowe wykorzystujące autonomiczne wózki mobilne stanowi przedmiot zainteresowania licznej grupy badaczy, a co za tym idzie, istnieje bogata bibliografia dotycząca tej problematyki. Ważną wspólną cechą dostępnych materiałów źródłowych jest jednak to, że przedstawiają one rozważaną problematykę w sposób ogólny, co zazwyczaj wynika z dużego znaczenia komercyjnego omawianych zagadnień. Wśród najważniejszych za-

gadnień prezentowanych w literaturze wymienić można: rozmieszczanie dróg transportowych w przedsiębiorstwie, harmonogramowanie zadań transportowych [4, 10], wyznaczanie tras jazdy wózków [2, 3], rozwiązywanie konfliktów [14] w trakcie realizacji procesów współbieżnych (kolizje, blokady), pozycjonowanie wózków oczekujących na przydzielenie zadania transportowego, koordynację i współdziałanie [7] w trakcie realizacji zadań, wyznaczanie niezbędnej liczby wózków czy też zarządzanie problematyką ładowania akumulatorów. Biorąc pod uwagę strukturę podsystemu transportowego wyróżnić można problem klasyczny, w którym układ drogowy ma strukturę liniową-rozgałęzioną, złożoną z wielu dróg połączonych skrzyżowaniami. Rozpatruje się tutaj przypadki z drogami jednokierunkowymi i dwukierunkowymi. Pozostałe struktury mają charakter obiegowy: prosty (z jedną pętlą) i złożony (kilka pętli połączonych łącznikami). Struktura liniowa jest rozwinięciem najbardziej elastycznym, ale wykorzystujący ją podsystem transportowy jest najtrudniejszym do sterowania. Struktury obiegowe nie oferują takiego poziomu elastyczności, ale ułatwiają sterowanie dzięki ograniczeniu możliwości powstania kolizji i blokad (struktura obiegowa prosta) lub całkowitemu ich wyeliminowaniu (struktura obiegowa złożona).

Problem harmonogramowania zadań transportowych [10] traktowany jest w literaturze zazwyczaj jako zadanie samodzielne, choć biorąc pod uwagę rolę podsystemu transportowego w systemie produkcyjnym harmonogramowanie zadań transportowych należy ściśle zintegrować z harmonogramowaniem zadań realizowanych przez podsystem wytwarzania. Stąd też, uwzględniając stochastyczny charakter realizowanych w praktyce zadań, zamiast stosowania harmonogramowania coraz częściej stosuje się podejście dyspozytorskie, wykorzystujące różnego rodzaju heurystyki do rozwiązywania tego problemu decyzyjnego. Wyznaczanie tras jazdy robotów mobilnych łączących punkty startowe z punktami docelowymi jest zasadniczym zadaniem w podsystemie transportowym. Problem ten traktowany jest jako zadanie optymalizacji z ograniczeniami. Jego rozwiązaniem jest optymalna trasa, na której nie dojdzie w trakcie ruchu robota do kolizji z innymi wózkami oraz nie powstanie stan blokady (zakleszczenia) uniemożliwiający jego dotarcie do celu. Jako kryterium stosuje się zazwyczaj długość drogi, jej koszt lub czas przejazdu. Ze względu na dużą złożoność obliczeniową takiego podejścia często wykorzystuje się inne sposoby rozwiązania tego problemu.

Dominującym w literaturze spojrzeniem na podsystem transportowy, z punktu widzenia problemu sterowania nim, jest widzenie go jako systemu scentralizowanego i działającego w warunkach deterministycznych. Stąd liczne pozycje bibliograficzne proponują rozwiązania oparte na metodach analitycznych, takich jak programowanie sieciowe czy programowanie liniowe całkowitoliczbowe. W ostatnich latach zaczęły pojawiać się jednak publikacje dotyczące wykorzystania technologii agentowych do sterowania podsystemem transportowym wykorzystującym autonomiczne roboty mobilne [4, 12]. Prace te otwierają nowy obszar badań w zakresie budowy rozproszonych, rekonfigurowalnych systemów sterowania produkcją, mających zdolność do racjonalnego działania w przypadku wystąpienia zakłóceń.

W wyniku prowadzonych dotychczas prac powstało wiele koncepcji nowoczesnych, rozproszonych systemów sterowania produkcją. Większość z nich wykorzystuje informatyczne technologie agentowe MAS (ang. *Multi-Agent Systems*) [11]. Podstawową jednostką systemu MAS jest agent (reprezentowany zazwyczaj przez program komputerowy) 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. Na bazie technologii agentowych został opracowany i wdrożony w jednej z fabryk koncernu DaimlerChrysler AG pilota-

żowy system produkcyjny W EST [1][5]. 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 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 [9]. Wyróżnia on kilka podstawowych typów agentów reprezentujących: proces jednostkowy, zasób, jednostkę zarządzającą, przedmiot, klienta i dostawcę. Dla systemu metamorficznego (architektura MetaMorph) [8] wprowadzono natomiast agenty zasobowe, przedmiotowe oraz mediacyjne. Idea podejścia wieloagentowego zastosowana została również w systemach holonicznych. W systemie PROSA [13] wprowadzono trzy podstawowe typy holonów, tzn. holony wyrobu, zasobu i zamówienia, a ponadto dodatkowo tzw. holony doradcze.

## 2. OPIS KONCEPCJI ROZBUDOWY WIELOAGENTOWEGO SYSTEMU AIM

W Instytucie Technologii Maszyn i Automatyki Produkcji Politechniki Krakowskiej opracowany został wieloagentowy system sterowania produkcją AIM (ang. *Agents Integrated Manufacturing*) [16, 18]. Zasadniczą rolę w systemie AIM pełnią uniwersalne, rekonfigurowalne moduły programowe zwane agentami i wykonawczymi. Ich zadaniem jest reprezentowanie wchodzących w skład systemu wytwarzania zasobów wytwórczych takich jak: maszyny, manipulatory, roboty przemysłowe, magazyny, urządzenia kontrolno-pomiarowe itp. Agenty te charakteryzują się następującymi właściwościami:

- mają autonomię decyzyjną związaną ze zbiorem czynności elementarnych realizowanych przez ich zasoby wytwórcze
- dysponują wiedzą o powiązaniach z innymi agentami i wykonawczymi współuczestniczącymi w realizacji poszczególnych czynności
- kontrolują przepływ wytwarzanych przedmiotów przez reprezentowane zasoby wytwórcze
- mają wiedzę na temat dostępności i stanu zasobów 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 i przedmiotowymi podejmuje decyzje dotyczące wyboru czynności do rozpoczęcia.

Z poszczególnymi zasobami wytwórczymi oraz reprezentującymi je agentami i 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 rolę agentów dostosowujących jest pośredniczenie pomiędzy warstwą logiczną oprogramowania (agentami wykonawczymi) a sprzętowymi sterownikami konkretnych urządzeń.

W procesy decyzyjne zachodzące w systemie sterowania poza agentami i wykonawczymi zaangażowane są także agenty reprezentujące wytwarzane w systemie przedmioty, tzw. agenty przedmiotowe. Biorą one czynny udział w procesie podejmowania decyzji, dokonują weryfikacji warunków uniemożliwiających wystąpienie blokad, ich rolą jest tak że m.in. rejestro-

wanie zmian i stanów po średnich, 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 spacyfikowanym i systemami produkcyjnym i, 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 ma 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 decydem 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 prowadzący 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.

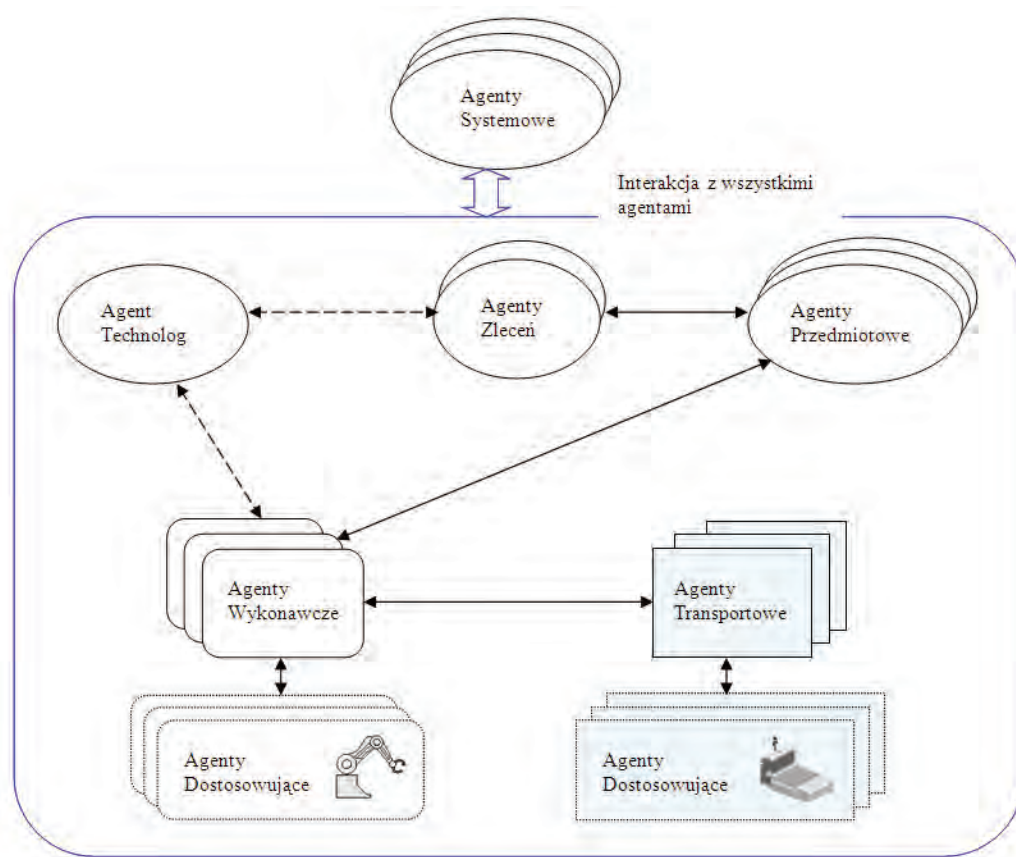
Ostatnią grupę agentów tworzą tzw. agenty systemowe uruchamiane na poszczególnych komputerach wchodzących w skład infrastruktury sprzętowej systemu sterowania. Ich działania dotyczą administracji i monitorowania aktualnego stanu systemu, rejestracji agentów itp. Spośród agentów systemowych powołuje się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

System AIM jest konsekwentnie rozwijany. Przedstawione w niniejszej pracy podejście jest kontynuacją działań autorów polegającą na integrowaniu istotnych elementów systemu produkcyjnego poprzez wieloagentowy system sterowania produkcją. Należy podkreślić, że jak do tej pory, problematyka integracji zbudowanych w oparciu o technologię agentową podsystemów transportowych wykorzystujących automatycznie sterowane pojazdy AGV (ang. *Automated Guided Vehicles*) z wieloagentowym systemem sterowania produkcją nie stanowi głównego nurtu badań, co przejawia się stosunkowo niewielką liczbą prac z tego zakresu.

Przyjęto, że rozpatrywany podsystem transportowy składa się z autonomicznych robotów (wózków) mobilnych realizujących indywidualne zadania transportowe. Polegają one na przemieszczaniu się z aktualnego miejsca do miejsca, w którym następuje załadunek, po załadunku następuje przejazd do miejsca, gdzie wózek jest rozładowywany, a następnie w zależności od zastosowanej strategii postępowania wózek pozostaje w miejscu (o ile nie blokuje to działania systemu) lub też przemieszcza się do docelowego miejsca parkowania.

Wymagana modyfikacja systemu sterowania produkcją AIM polega na rozbudowaniu go o agenta transportowego reprezentującego autonomiczny robot mobilny oraz odpowiadające mu agenta dostosowującego. Zmiany te zostały zaznaczone na rys. 1. W celu umożliwienia współdziałania podsystemu transportowego z podsystemem wytwarzania niezbędne modyfikacje dotyczą także funkcjonalności agenta systemowego i agenta wykonawczego.





Rys. 1. Ogólna struktura wieloagentowego systemu sterowania AIM uwzględniająca agenta transportowego

Przyjęto hybrydową architekturę podsystemu sterowania odpowiedzialnego za realizację zadań transportowych. Oznacza to podział przestrzeni decyzyjnej pomiędzy znajdujące się na niższym poziomie hierarchii agenty transportowe reprezentujące pracujące w systemie rozproszonym roboty mobilne, a leżące na wyższym poziomie hierarchii – superagenta, czyli wybranego agenta systemowego reprezentującego cele systemowe.

### 3. STEROWANIE PODSYSTEMEM TRANSPORTOWYM W SYSTEMIE AIM

Podsystem transportowy realizujący swoje zadania za pomocą autonomicznych robotów (wózków, platform) mobilnych jest podsystemem usługowym w stosunku do podsystemu wytwarzania. Podsystem wytwarzania tworzy bowiem wartość dodaną wpływającą na zysk przedsiębiorstwa, podczas gdy podsystem transportowy dzięki skutecznemu działaniu może jedynie umożliwić maksymalnie efektywne wykorzystanie zasobów podsystemu wytwarzania. Konsekwencją „podległości” podsystemu transportowego jest to, że rozwiązanie problemu harmonogramowania zadań transportowych wymaga zsynchronizowania go z procedurą podejmowania decyzji o uruchamianiu czynności wytwórczych zaimplementowaną w systemie AIM.

Rozważany problem transportowy można zdefiniować następująco: istnieje zbiór robotów mobilnych  $M$  oraz zbiór zadań transportowych  $T$ . Zadanie transportowe  $t_{(A,B)i}$  należy rozumieć jako zlecenie dostarczenia obiektu będącego przedmiotem procesu produkcyjnego (przedmiot obrabiany, paleta z półfabrykatami itp.) z punktu (obrabiarki, magazynu itp.)  $A$  do punktu  $B$ . Dodatkowo istnieje zbiór ścieżek (tras) jedno- lub dwukierunkowych  $S_{(A,B)}$  łączą-

ych ka ́zde dwa punkty  $A - B$  stanowi ące punkt startowy i docelowy robota. Poszczególne zadania  $t_{(A,B)i} \in T$  mog ą by ́ realizowane za pom oc ą dost ępnego robota  $m$  obilnego  $m_k \in M$  wykorzystuj ąc jedn ą ze ́cie ́zek  $s_{(A,B)k} \in S_{(A,B)}$ . Zadania w podsystem ie transportowym mog ą by ́ realizowane wsp ółbie ́nie. Uwzgl ędniaj ąc fakt losowo ́ci zlece ́ transportowych generowanych przez system sterowania produkcj ą a wynikaj ących z potrzeb podsystem u wytwarzania oraz z us ́ugowo ́ci podsystem u transportowego nie jest uzasadnione formu ́owanie modelu optymalizacyjnego wyizolowanego problem u transportowego. W celu zapewnienia efektywno ́ci jego dzia ́ania nale ́y jednak optymalizowa ́ realizacj ę poszczeg ́lnych zada ́n transportowych. Problem optymalizacyjny polega tu na takim wyborze w ́zka  $m$  obilnego, jego ́cie ́zki oraz term inu rozpocz ́cia jazdy, aby przy przyj ętych za ́lo ́zeniach uzyska ́ najbardziej korzystne rozwi ązanie z uwagi na zastosowane kryteria oceny. W literaturze spotykane s ą r ́żne kryteria oceny, z których najwa ́niejsze to:

- czas, w jakim zadanie zostanie zrealizowane
- d ́ugo ́c drogi, kt ́rej przebycie jest wymagane w celu zrealizowania zadania
- koszt realizacji zadania transportowego.

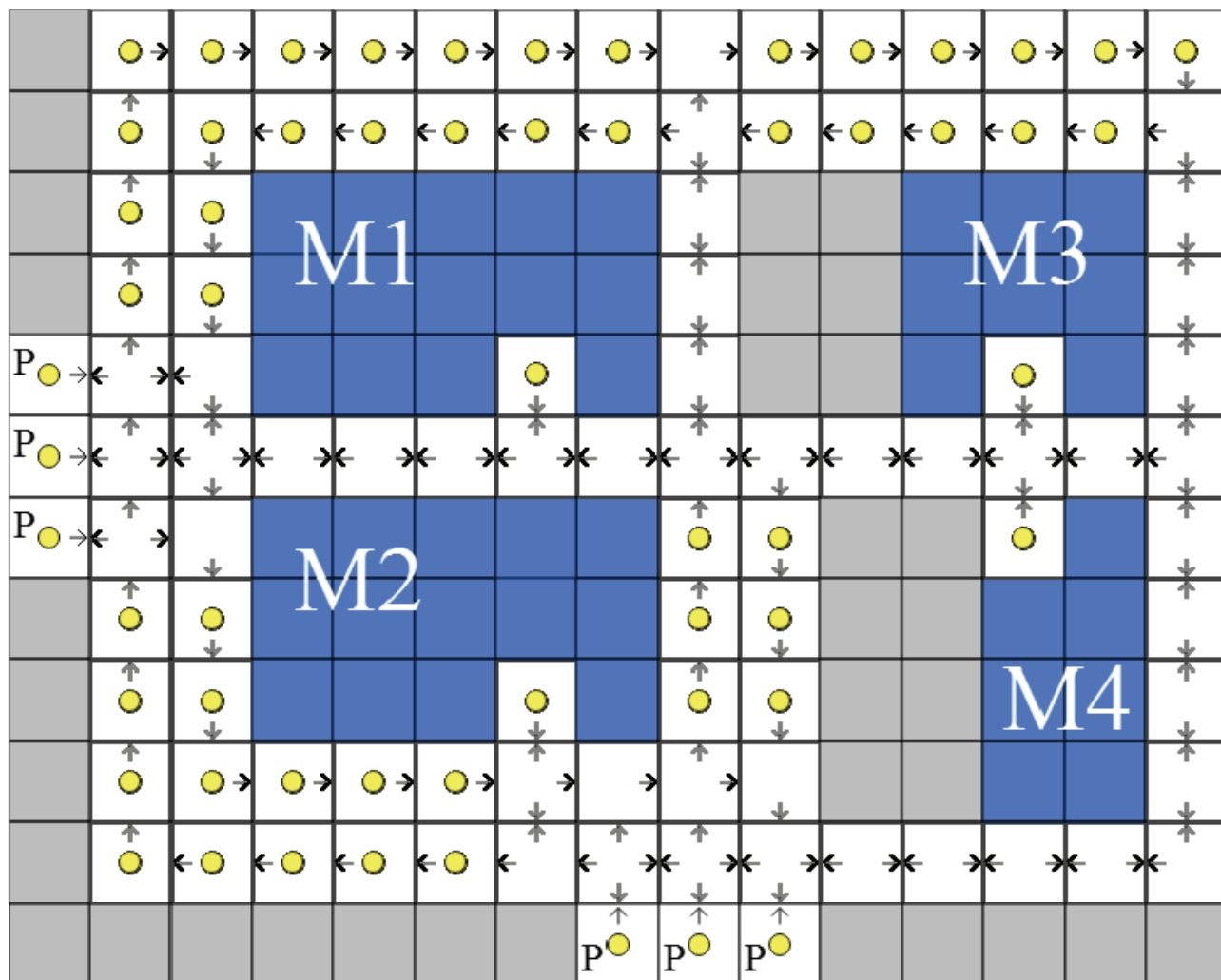
Ograniczeniami, kt ́re nale ́y uwzgl ędnic, podejmuj ąc si ę rozwi ązania postawionego problem u, s ą: niedopuszczenie do powstania kolizji robot ́w  $m$  obilnych oraz unikni ęcie mo ́liwo ́ci wprowadzenia system u transportowego w stan blokady. Nale ́y tak ́e zauwa ́y ́, ́e realizacja zadania transportu z punktu  $A$  do punktu  $B$  m o ́e wi ąza ́ si ę z wymaganym uprzednim dojazdem wybranego w ́zka do punktu  $A$  oraz ewentualnym przejazdem w ́zka (po wykonaniu zadania) z punktu  $B$  do parkingu.

W celu rozwi ązania problem u transportowego, w system ie AIM przyj ęto kilka za ́o ́e ́. Jednym z nich jest dyskretyzacja powierzchni hali produkcyjnej. Polega ona na pokryciu obszaru, w obr ębie kt ́rego znajduj ą si ę urz ądzania wytw ́rcze oraz wolna, dost ępna dla robot ́w  $m$  obilnych przestrze ́ ́, siatk ą prostok ątnych kom ́erek. Dopuszcza si ę, by wym iary poszczeg ́lnych kom ́erek by ́y r ́żne, minimalne d ́ugo ́ci ich bok ́w powinny by ́ jednak nie mniejsze ni ́ wym iary w ́zka. Przyj ęte rozmiary kom ́erek powinny tak ́e uwzgl ędnia ́ mo ́liw ą zmian ę kierunku ruchu w ́zka w obr ębie pojedynczej kom ́erki. Ka ́d ą z kom ́erek charakteryzuje dodatkowy param etr, kt ́ry okre ́la czy dana kom ́erka jest dla w ́zka przejezdna, czyli nie zaj ęta przez ́adne urz ądzanie wytw ́rcze i inne potencjalne przeszkody. Ruch robota mobilnego przez kom ́erki przejezdne m o ́e odbywa ́ si ę w jednym lub wielu kierunkach. W szczeg ́lno ́ci, sekwencje s ąsiaduj ących z sob ą kom ́erek mog ą tworzy ́ jedno- lub dwukierunkowe odcinki dr ́g. Decyzja dotycz ąca mo ́liwych kierunk ́w ruchu w ́zka poprzez poszczególne kom ́erki podejmowana jest arbitralnie przez projektanta systemu.

Na rys. 2 przedstawiono przyk ́ad zdyskretyzowanej powierzchni hali produkcyjnej. Kom ́erki wype ́nione białym t ́em odpowiadaj ą obszarom przejezdnym dla w ́zka ́w  $m$  obilnych. Pozosta ́e kom ́erki obejmuj ą obszary zajm owane przez urz ądzania wytw ́rcze oraz ich ́cis ́e otoczenie ( $M1 - M4$ ), a tak ́e innego typu obiekty ( ́ciany, mury itp.) uniem o ́liwiaj ące ruch robot ́w w ich obr ębie. Strza ́ki wewn ątrz ka ́dej z kom ́erek przejezdnych definiuj ą kierunek, w jakim w ́zek m o ́e dan ą kom ́erk ę opu ́ci ́. Kom ́erki oznaczone liter ą „P” odpowiadaj ą miejscom parkowania robot ́w mobilnych.

Przyj ęty algorytm realizacji ka ́dego z zada ́n transportowych w system ie AIM przebiega wed ́ug nast ępuj ących etap ́w. W chwili wyst ąpienia zapotrzebowania na us ́ug ę transportow ą, agent wykonawczy przekazuje zwi ązane z tym ́ądanie do superagenta. Nast ępnie superagent, na podstawie posiadanych inform acji o pozycji i zaj ęto ́ci robot ́w mobilnych w systemie, dokonuje wyboru robota odpowiedzialnego za wykonanie zadania. Inform acja o doko-

nanym wyborze przekazywana jest reprezentuj ącymu wózek mobilny agentowi transportowemu, który inicjuje proces wyznaczania trasy robota. Podstaw ę do jej określenia stanowią parametry definiuj ące umowny koszt przemieszczania się wózka pomiędzy sąsiadującymi komórkami. Koszt ten jest funkcją długości odcinka drogi wymaganej do przebycia przy przejściu z jednej komórki do komórki sąsiedniej. Suma tak zdefiniowanych kosztów jednostkowych stanowi jeden ze składników umownego kosztu całkowitego. Drugi jego składnik ma na celu preferowanie jazdy wózka w aktualnie przyjętym kierunku. Uzasadnione jest to tym, iż zmiana kierunku jazdy wózka wymaga zmniejszenia jego prędkości. W konsekwencji często identyczny (a nawet krótszy) odcinek drogi może zostać pokonany w dłuższym czasie niż odbywałoby się to bez zmiany kierunku jazdy. W efekcie, w określonych sytuacjach korzystniejszy może okazać się wybór dłuższej drogi obejmującej jednak mniejszą liczbę punktów zmiany kierunku jazdy. Rozważany drugi składnik kosztu całkowitego jest więc ściśle związany z liczbą takich punktów. Zadanie optymalizacyjne polega na wyznaczeniu trasy o najmniejszym umownym koszcie całkowitym związanym z jej pokonaniem. W celu realizacji tego zadania wykorzystano algorytm A\* wraz z heurystyką nakładającą dodatkowe kary w przypadku zmiany kierunku jazdy robota mobilnego.

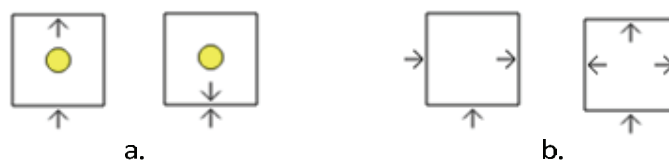


Rys. 2. Przykład dyskretyzacji powierzchni hali produkcyjnej

Skuteczna realizacja zadania transportowego wymaga uwzględnienia dodatkowych ograniczeń wynikających z niebezpieczeństwa wystąpienia kolizji. Sytuacja ta wiąże się z oczywistym faktem, iż dwa lub więcej robotów mobilnych nie może jednocześnie znaleźć się w tym samym miejscu, a biorąc pod uwagę zastosowaną dyskretyzację powierzchni, w tej samej komórce. Aby przeciwdziałać takiemu zagrożeniu przyjęto, iż przed znalezieniem się robota mobilnego w obrębie danej komórki, leżącej na wyznaczonej uprzednio trasie, komórka ta zostaje oznakowana przez reprezentującego wózek agenta transportowego jako nieprzejezdna dla innych robotów mobilnych. Działanie to dokonywane jest z określonym wyprzedzeniem uwzględniającym aktualne parametry kinematyczne i dynamiczne robota mobilnego. Usunięcie wprowadzonego oznakowania następuje z chwilą opuszczenia przez wózek rozważanej komórki.

Drugie z ważnych ograniczeń związane jest z możliwością wprowadzenia systemu w stan blokady. Aby nie dopuścić do powstania takiej sytuacji wykorzystano zaadoptowaną na potrzeby podsystemu transportowego metodę rezerwacji procesowej [16, 17]. W tym celu wprowadzono podział komórek przejezdnych dla wózka na dwie grupy:

- komórki bezblokadowe (oznaczone na rys. 2 i 3 umieszczonymi centralnie żółtymi kropkami), z których każda ma jedną i tylko jedną komórkę poprzedzającą oraz jedną i tylko jedną komórkę osiągalną dla wózka opuszczającego rozważaną komórkę (rys. 3a)
- komórki zagrożone blokadą, w obrębie których robot mobilny może dostać się z więcej niż jednej komórki poprzedzającej lub też może ją opuścić w więcej niż jednym kierunku (rys. 3b).



Rys. 3. Przykład komórek bezblokadowych (a) oraz zagrożonych blokadą (b)

Sekwencje kilku sąsiadujących z sobą komórek bezblokadowych tworzą tzw. strefy bezblokadowe oraz analogicznie, leżące w sąsiedztwie komórki zagrożonej blokadą ustanawiają strefy zagrożone blokadą. W myśl przytoczonej metody rezerwacji procesowej warunkiem wystarczającym, aby nie doszło do blokady jest:

- dokonanie, jeszcze przed rozpoczęciem ruchu wózka, rezerwacji procesowej jednej komórki bezblokadowej w każdej ze stref bezblokadowych leżących wzdłuż wyznaczonej trasy oraz
- posiadanie rezerwacji procesowej wszystkich komórek w strefie zagrożonej blokadą w chwili, gdy wózek pojawia się w rozważanej strefie.

Odwołanie rezerwacji komórki leżącej w strefie bezblokadowej następuje w momencie, w którym wózek opuszcza rozważaną strefę, z kolei rezerwacja komórki zagrożonej blokadą anulowana jest po opuszczeniu danej komórki przez robota mobilnego. Stan rezerwacji poszczególnych komórek jest na bieżąco uaktualniany przez agenty transportowe i zapisywany w udostępnianej w tym celu przez agenta systemowego tablicy ogłoszeń.

Oprogramowanie implementujące przedstawiony algorytm będzie poddawane testom przy współdziałaniu ze środowiskiem symulacyjnym Arena [6], a następnie zostanie wykorzystane do sterowania zespołem autonomicznych platform mobilnych budowanym w Instytucie



Technologii Maszyn i Automatyki Produkcji Politechniki Krakowskiej. Każda platforma mobilna [19] wyposażona jest w laserowy skaner umożliwiający detekcję pojawiających się w trakcie ruchu przeszkód oraz w laserowy system lokalizacyjny [15].

#### 4. PODSUMOWANIE

W świetle oczekiwań wobec współczesnych systemów produkcyjnych związanych ze wzrostem nacisku na produkcję zindywidualizowaną, dostosowaną do zróżnicowanych potrzeb konsumentów, tradycyjne podejście do problematyki sterowania produkcją przestaje być wystarczająco konkurencyjne. Aby sprostać wymaganiom niezbędne stają się działania mające na celu wdrażanie zwiędkszających efektywność, innowacyjnych rozwiązań. Jeden z ważnych obszarów dla takich działań stanowi realizacja transportu międzyoperacyjnego z wykorzystaniem autonomicznych robotów mobilnych. By sprostać wspomnianym oczekiwaniom, dotychczasowe, najczęściej scentralizowane podejście do sterowania podsystemem transportowym powinno ulec zmianie poprzez otwarcie się na nowoczesne rozwiązania zdecentralizowane.

Przedstawiona w pracy koncepcja zakłada wykorzystanie w implementacji systemu sterowania podsystemem transportowym technologii agentowych zapewniających wymaganą odporność na potencjalne zakłócenia w procesach produkcyjnych, w tym dotyczących transportu międzyoperacyjnego. Integracja zbudowanego z wózków mobilnych podsystemu transportowego z wieloagentowym systemem sterowania wytwarzaniem AIM stanowi zasadniczy cel działań będących jednocześnie odpowiedzią na wspomniane wymagania rynku.

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego własnego Nr N N503 214237 pt. "Integracja rozproszonego systemu sterowania produkcją z podsystemem transportu międzyoperacyjnego zbudowanym z autonomicznych wózków mobilnych", finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2009–2011.

#### BIBLIOGRAFIA

1. S. Bussmann, K. Schild: An Agent-based Approach to the Control of Flexible Production Systems. Proc. of 8th Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2001), Antibes Juan-les-pins 2001, s. 169–174.
2. B. Cherkassky, A.V. Goldberg, T. Radzik: Shortest Paths Algorithms: Theory and Experimental Evaluation. Proc. of 5th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, Arlington 1994, s. 516–525.
3. R. Fox, A. Garcia, M. Nelson: A Generic Path Planning Strategy for Autonomous Vehicles. The University of Texas – Pan American, Department of Computer Science Technical Report CS-00-25, August, 2000.
4. A. Helleboogh, T. Holvoet, Y. Berbers: Testing AGVs in Dynamic Warehouse Environments. In D. Weyns, V. Parunak, and F. Michel, editors, Environments for Multiagent Systems II, volume 3830 of Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, 2006, s. 270–290.
5. N.R. Jennings, S. Bussmann: Agent-based Control Systems: Why are they suited to engineering complex systems? IEEE Control Systems Magazine, Vol. 23, No. 3, June 2003 s. 61–73.

6. W. Małopolski: Metoda wyznaczania dowolnych tras przejazdu obiektów system u transportowego w środowisku symulacyjnym Arena. *Pomiary Automatyka Robotyka*, Nr 2, 2011.
7. A. Masłowski, W. Ulatowski: Modeling of Supervisor's Action Measurements in Control of Multi-Agents Mobile Robotic Subsystem. XVIII IMEKO World Congress, Metrology for Sustainable Development, September 17-22, 2006, Rio de Janeiro, Brazil.
8. F. Maturana, D. Norrie: Multi-Agent Mediator Architecture for Distributed Manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 7, 1996, s. 257–270.
9. H.V.D. Parunak, A. Baker, S. Clark: The AARIA agent architecture: from manufacturing requirements to agent-based system design. In *Workshop on Agent-based Manufacturing*, Minneapolis 1998.
10. L. Qiu, W-J Hsu, S-Y Huang, H. Wang: Scheduling and routing algorithms for AGVs: a survey. *International Journal of Production Research*. 2002, vol. 40, no. 3, s. 745–760.
11. W. Shen W., D.H. Norrie: Agent-Based Systems for Intelligent Manufacturing: A State-of-the-Art Survey. *Knowledge and Information Systems*, 1998, s. 129–156.
12. S.Ch. Srivastava, A.K. Choudhary, S. Kumar, M.K. Tiwari: Development of an intelligent agent-based AGV controller for a flexible manufacturing system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, No.7–8, 2008, s. 780–797.
13. H. Van Brussel, J. Wyns, P. Valckenaers, L. Bongaerts, P. Peeters: Reference Architecture for Holonic Manufacturing Systems: PROSA. *Computers In Industry, Special Issue on Intelligent Manuf. Systems*, Vol. 37 No. 3, 1998, s. 255–276.
14. M. Watanabe, M. Furukawa, Y. Kakazu: Intelligent AGV Driving Toward an Autonomous Decentralized Manufacturing System. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 17, Issues 1-2, February 2001, s. 57–64.
15. T. Więk: Laserowy system nawigacji autonomicznej platformy mobilnej na przykładzie urządzenia NAV300. *Pomiary Automatyka Robotyka*, Nr 2, 2011.
16. J. Zając: Rozproszone sterowanie zautomatyzowanymi systemami wytwarzania. *Monografia 288, Seria Mechanika*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2003.
17. J. Zając: A Deadlock Handling Method for Automated Manufacturing Systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 2004, Vol. 53, No. 1, s. 367–370.
18. J. Zając, G. Chwajol: Towards Agent-Based Manufacturing Systems. *Annals of DAAAM for 2008 & Proceedings of the 19th International DAAAM Symposium*, Austria, 2008, s. 1541–1542.
19. J. Zając, K. Krupa, A. Słota, T. Więk: Konstrukcja i układ sterowania autonomicznej platformy mobilnej. *Pomiary Automatyka Robotyka*, Nr 2, 2011.