

ZAJĄC Jerzy<sup>1</sup>  
 MAŁOPOLSKI Waldemar<sup>1</sup>

# Weryfikacja efektywności sterowania podsystemem transportowym zbudowanym z automatycznie sterowanych pojazdów w programie symulacyjnym Arena

podsystem transportowy,  
 sterowanie,  
 symulacja

## Streszczenie

W pracy omówiono problematykę sterowania podsystemem transportowym zbudowanym z automatycznie sterowanych pojazdów. Zaproponowano metodę sterowania uwzględniającą problematykę przeciwdziałania kolizjom i blokadom. W celu unikania blokad zastosowano metodę rezerwacji procesowej. Aby zweryfikować efektywności opracowanej metody sterowania zbudowano model symulacyjny w programie Arena i przeprowadzono badania, które potwierdziły jej skuteczność.

## VERIFICATION OF THE EFFECTIVENESS OF TRANSPORTATION CONTROL SYSTEM OF AGV USING ARENA SIMULATION PROGRAM

### Abstract

The paper discusses the problems of transportation control subsystem of automatically controlled vehicles. The collision-free and deadlock-free control method was proposed. Process reservation method is applied for deadlock avoidance. Simulation model was built using Arena simulation program to verify the effectiveness of the control method. Computer experiments confirmed the effectiveness of the method.

### 1. WSTĘP

Proces globalizacji światowej gospodarki wpływa bezpośrednio na wzrost konkurencji wśród producentów różnego rodzaju dóbr konsumpcyjnych. Efektem tego procesu jest konieczność obniżania kosztów produkcji. Jednym ze sposobów radzenia sobie z tym problemem jest przenoszenie produkcji do krajów o niskich kosztach pracy ludzkiej. Często jednak wiąże się to z trudnością uzyskania odpowiedniej jakości wyrobów oraz wyższym kosztem transportu wyrobów wytworzonych w odległych krajach. Innym sposobem na obniżenie kosztów produkcji jest wprowadzanie zautomatyzowanych systemów produkcyjnych. Jest to rozwiązanie szczególnie istotne w krajach o wysokich kosztach pracy ludzkiej. Ze względu na wysoki koszt budowy tego typu systemów powinny one charakteryzować się elastycznością i wysoką wydajnością. Bez względu na sposób realizacji procesów produkcyjnych ważne jest minimalizowanie wpływu tych czynności, które nie generują wartości dodanej. Do tego typu czynności należą wszelkiego rodzaju czynności transportowe. Jednym z rozwiązań mogących w znaczny sposób poprawić efektywność zautomatyzowanych systemów produkcyjnych jest wprowadzenie zautomatyzowanego transportu międzyoperacyjnego opartego na automatycznie sterowanych pojazdach (wózkach). Tego typu rozwiązania muszą być efektywne, niezawodne, elastyczne i bezpieczne. Zbudowanie podsystemów transportowych posiadających powyższe cechy wymaga rozwiązania szeregu problemów. Z tego względu bardzo ważne jest opracowanie efektywnej metody sterowania pojazdami. Ponadto w podsystemie transportowym nie może dojść do powstania blokad i kolizji. Jednym z czynników mających decydujący wpływ na sposób sterowania podsystemem transportowym ma jego struktura i typ zastosowanych dróg transportowych. W artykule przedstawiono metodę efektywnego i bezpiecznego sterowania podsystemem transportowym.

### 2. PODSYSTEMY TRANSPORTOWE W ZAUTOMATYZOWANYCH SYSTEMACH PRODUKCYJNYCH

Ze względu na strukturę dróg, po których poruszają się automatycznie sterowane pojazdy (ang. *Automated Guided Vehicle - AGV*) w podsystemie transportowym, możemy wyróżnić kilka rozwiązań [2]. Pierwsze rozwiązanie, nazywane klasycznym, posiada strukturę dróg liniowo – rozgałęzioną, składającą się z dużej liczby dróg połączonych skrzyżowaniami. Drogi mogą być jednokierunkowe i dwukierunkowe. Pozostałe rozwiązania zawierają struktury o charakterze obiegowym. W przypadku występowania tylko jednej pętli mówimy o rozwiązaniu obiegowym prostym. Gdy występuje kilka pętli, które są połączone łącznikami, mówimy o rozwiązaniu obiegowym złożonym.

Najbardziej elastycznym rozwiązaniem jest podsystem transportowy o strukturze liniowej. Niestety jest on najtrudniejszy do sterowania ze względu na możliwość wystąpienia blokad i kolizji. Tego typu problemy nie występują w podsystemach transportowych o strukturze obiegowej złożonej lub są bardzo ograniczone w strukturach

<sup>1</sup>Politechnika Krakowska, Zakład Zautomatyzowanych Systemów Produkcyjnych, Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, e-mail: zajac@m6.mech.pk.edu.pl, malopolski@m6.mech.pk.edu.pl

obiegowych prostych. Ułatwienia w sterowaniu są związane z ograniczoną elastycznością takiego podsystemu transportowego.

Ze względów ekonomicznych podsystemy transportowe muszą być efektywne i elastyczne. Dlatego ważne jest opracowanie takich metod (algorytmów) sterowania pojazdami, które zapewnią minimalizację kosztów transportu, bezkolizyjną pracę i dużą elastyczność. Aby uzyskać wysoką efektywność całego zautomatyzowanego systemu produkcyjnego założono, że podsystem transportowy powinien pełnić funkcję usługową [7]. Efektem przyjęcia takiego założenia jest fakt, iż harmonogram zadań transportowych wynika z harmonogramu realizowanych zadań przez podsystem wytwarzania. Z tego względu nie należy optymalizować efektywności samego podsystemu transportowego. Celowym jest maksymalizowanie efektywności realizacji poszczególnych zadań transportowych. Przy takim założeniu maksymalizacja efektywności podsystemu transportowego sprowadza się do takiego wyboru pojazdu, jego trasy przejazdu i chwili rozpoczęcia realizacji zadania, aby uwzględniając przyjęte ograniczenia uzyskać najlepsze rozwiązanie ze względu na zastosowane kryteria oceny. Do najważniejszych kryteriów oceny efektywności realizacji zadań transportowych zalicza się:

- czas realizacji zadania transportowego,
- długość drogi przebytej przez pojazd podczas realizacji zadania transportowego,
- koszt realizacji zadania transportowego.

Najważniejszymi ograniczeniami mającymi wpływ na optymalizację efektywności realizacji pojedynczego zadania transportowego są:

- nie dopuszczenie do powstania kolizji automatycznie sterowanych pojazdów,
- nie doprowadzenie podsystemu transportowego do stanu blokady.

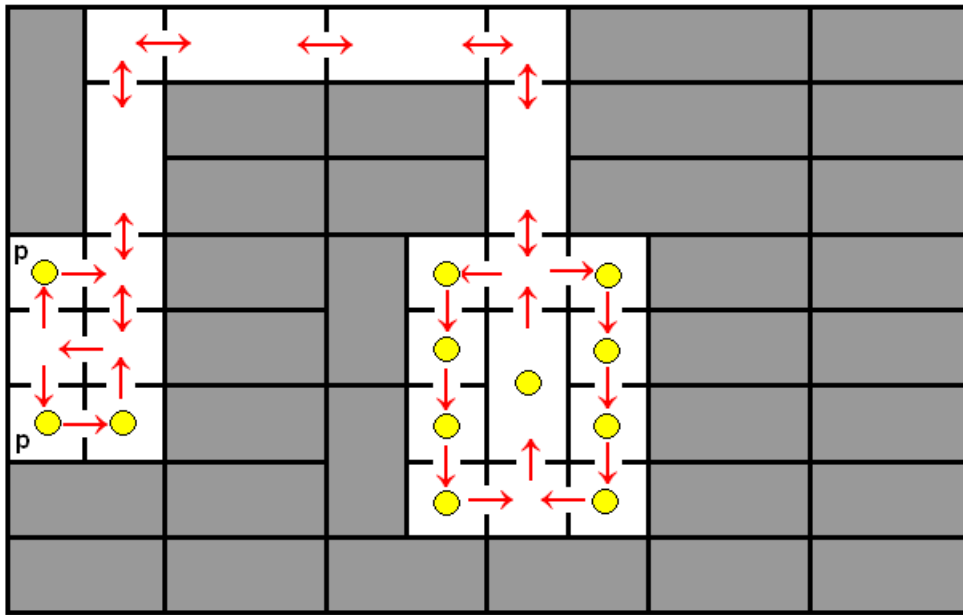
### 3. METODA EFEKTYWNEGO STEROWANIA PODSYSTEMEM TRANSPORTOWYM

Przy opracowywaniu efektywnej metody sterowania podsystemem transportowym przyjęto kilka założeń. Pierwsze, to dyskretyzacja powierzchni hali produkcyjnej przeznaczonej na drogi, po których poruszają się pojazdy. Polega ona na pokryciu tego obszaru siatką prostokątów o różnych wymiarach. Minimalne wymiary tych prostokątów (komórek) nie mogą być mniejsze od wymiarów wózka [6] i powinny uwzględniać zmianę kierunku ruchu pojazdu w ramach pojedynczego prostokąta. Ruch pojazdu przez poszczególne prostokąty może odbywać się w jednym lub w kilku kierunkach. Sąsiadujące przejezdne prostokąty mogą tworzyć jednokierunkowe lub dwukierunkowe odcinki dróg. Kierunkowość poszczególnych odcinków dróg jest ustalana na etapie projektowania podsystemu transportowego i zależy m.in. od warunków technicznych. Rysunek 1 przedstawia przykład zdyskretyzowanej powierzchni hali produkcyjnej. Prostokąty wypełnione białym tłem odpowiadają przejezdnym drogom. Pozostałe prostokąty reprezentują obszary zajmowane przez urządzenia wytwórcze lub obiekty innego typu (ściany, mury itp.), które uniemożliwiają przejazd automatycznie sterowanych pojazdów. Komórki oznaczone literą „p” odpowiadają miejscom postoju (parkowania) automatycznie sterowanych pojazdów. Założono realizację przez wózki trzech typów czynności transportowych: przejazd z miejsca postoju do miejsca załadunku, przejazd z miejsca załadunku do miejsca rozładunku i przejazd z miejsca rozładunku do miejsca postoju. Zatem, każda czynność transportowa jest realizowana pomiędzy punktami, początkowym i końcowym, osiągalnymi w zdefiniowanej sieci dróg transportowych.

Opracowana metoda przygotowania i realizacji poszczególnych zadań transportowych przebiega w następujący sposób. Pojawienie się potrzeby wykonania zadania transportowego powoduje przekazanie żądania wykonania usługi transportowej do podsystemu transportowego. Po otrzymaniu żądania następuje weryfikacja możliwości jego realizacji przez pojazdy znajdujące się w miejscach parkingowych, czyli takie, które nie realizują aktualnie żadnych zadań transportowych. Polega to na wyznaczeniu tras przejazdu koniecznych do realizacji zadania transportowego przez poszczególne wózki. Wyznaczana trasa obejmuje dojazd z miejsca postoju i powrót do niego po zakończeniu czynności transportowej. Dyskretyzacja hali produkcyjnej pozwala na wykorzystanie do wyznaczania tras przejazdu znanego algorytmu  $A^*$  [1]. W celu zwiększenia efektywności algorytmu, a tym samym skrócenia czasu obliczeń, wprowadzono dodatkową informację o dopuszczalnych kierunkach przemieszczania się pomiędzy sąsiadującymi prostokątami. Na rysunku 1 informacja ta jest przedstawiona w postaci strzałek. W ten sposób umożliwiono definiowanie dróg transportowych jedno i dwukierunkowych, a dyskretyzację hali ograniczono tylko do obszaru przeznaczonego do wykorzystania przez podsystem transportowy. Decydujący wpływ na wybór trasy przejazdu ma umowny koszt przemieszczania się wózka pomiędzy sąsiadującymi komórkami. Koszt ten jest funkcją długości odcinka drogi wymaganej do przebycia przy przejściu z jednej komórki (środką prostokąta) do komórki sąsiedniej (środką prostokąta). Suma tak zdefiniowanych kosztów jednostkowych stanowi składniki umownego kosztu całkowitego. Dla każdego wózka wyszukiwana jest trasa możliwa do przejechania o najniższym koszcie. Ze względu na dążenie do maksymalizacji efektywności podsystemu transportowego wybierany jest pojazd o najmniejszym umownym koszcie całkowitym związanym z realizacją zadania transportowego.

Zadania w podsystemie transportowym mogą być realizowane współbieżnie, dlatego konieczne jest uwzględnienie dodatkowych ograniczeń wynikających z możliwości wystąpienia kolizji. Nie można bowiem dopuścić do tego, aby w jednym prostokącie znalazły się w tym samym czasie dwa pojazdy. Aby przeciwdziałać takim zagrożeniom przyjęto kilka zasad postępowania. Na poziomie sprzętowym, każdy wózek jest wyposażony w odpowiednie systemy zabezpieczające przed kolizjami [3, 8]. Na poziomie sterowania, z każdym prostokątem jest związany dodatkowy parametr informujący, czy jest on przejezdny dla automatycznie sterowanego pojazdu. W celu przeciwdziałania kolizjom, przed znalezieniem się pojazdu w obrębie danego prostokąta, leżącego na wyznaczonej uprzednio trasie, prostokąt ten zostaje

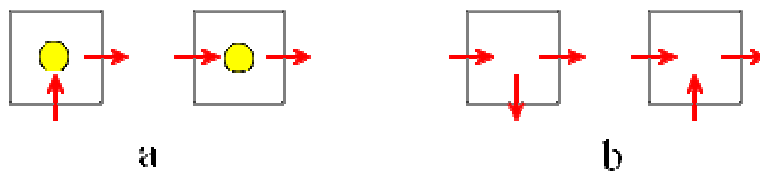
oznakowany jako nieprzejezdny dla innych pojazdów. Usunięcie wprowadzonego oznakowania następuje z chwilą opuszczenia przez pojazd danego prostokąta.



Rys. 1. Przykład dyskretyzacji powierzchni hali produkcyjnej

Drugim istotnym niebezpieczeństwem jest wprowadzenie systemu w stan blokady. Aby nie dopuścić do blokady wykorzystano zaadoptowaną na potrzeby podsystemu transportowego metodę rezerwacji procesowej [4, 5]. W tym celu wprowadzono podział prostokątów (komórek) przejezdnych dla pojazdów na dwie grupy:

- komórki bezblokadowe (oznaczone na rysunku 1 oraz 2 żółtymi kropkami), posiadające tylko jedną komórkę poprzedzającą oraz tylko jedną komórkę następną, do której może przejechać pojazd (rys. 2a),
- komórki zagrożone blokadą, do których pojazd może wjechać z więcej niż jednej komórki i wyjechać do więcej niż jednej komórki (rys. 2b).



Rys. 2. Przykład komórek bezblokadowych (a) oraz zagrożonych blokadą (b)

Kilka sąsiadujących z sobą komórek bezblokadowych tworzy tzw. strefę bezblokadową i analogicznie, leżące w sąsiedztwie komórki zagrożone blokadą tworzą strefę zagrożoną blokadą. Zgodnie z zasadą 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 na wyznaczonej trasie oraz
- posiadanie rezerwacji procesowej wszystkich komórek w strefie zagrożonej blokadą w chwili, gdy pojazd pojawia się w rozważanej strefie.

Odwołanie rezerwacji komórki leżącej w strefie bezblokadowej następuje w chwili, gdy wózek opuszcza rozważaną strefę. Rezerwacja komórki zagrożonej blokadą anulowana jest po opuszczeniu danej komórki przez automatycznie sterowany pojazd. Opracowane algorytmy efektywnego sterowania podsystemem transportowym zostały poddane testom sprawdzającym ich poprawność. W tym celu zbudowano model symulacyjny systemu wytwarzania i podsystemu transportowego w środowisku symulacyjnym Arena.

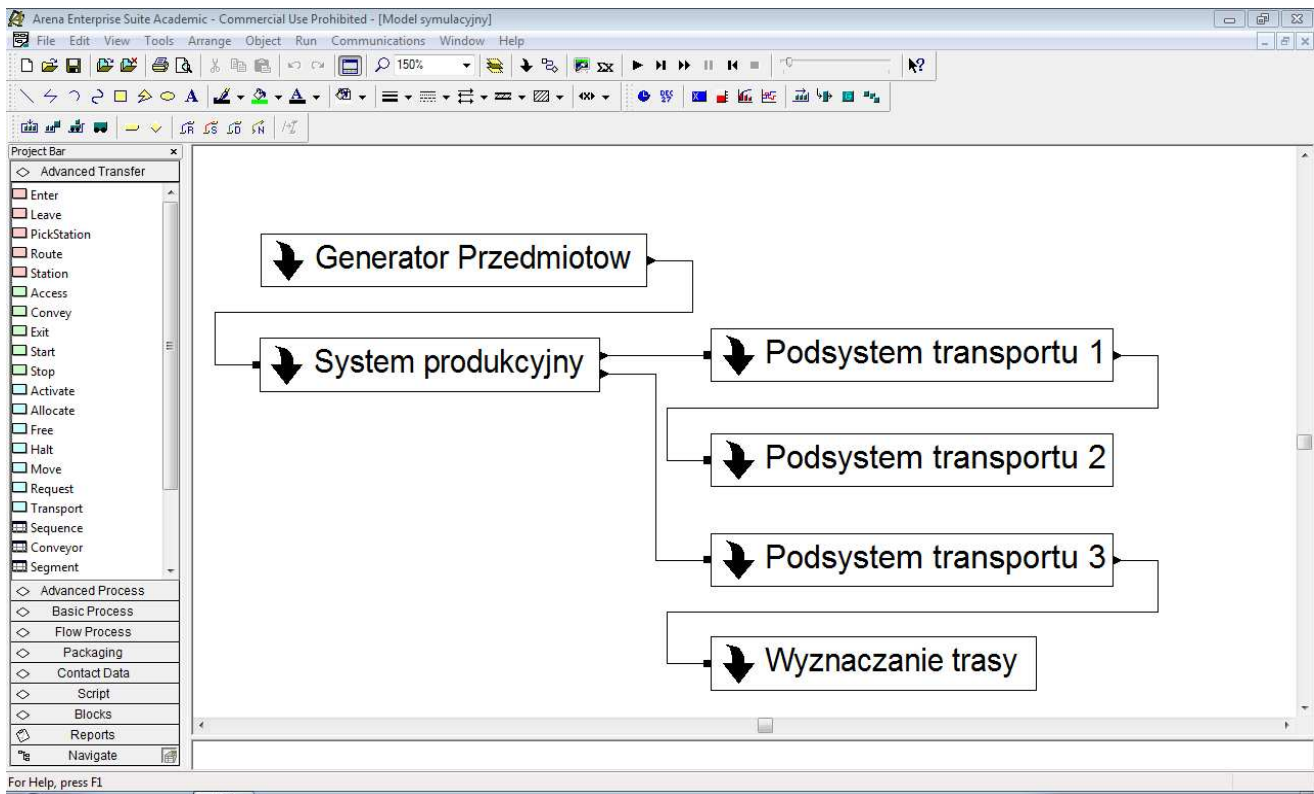
#### 4. WERYFIKACJA METODY W PROGRAMIE SYMULACYJNYM ARENA

##### 4.1. Model symulacyjny

Celem zbudowania modelu symulacyjnego w programie Arena było zweryfikowanie poprawności i efektywności algorytmów wyznaczających trasy przejazdu pojazdów i zapobiegających powstawaniu kolizji oraz blokad w podsystemie transportowym. Podczas tworzenia modelu symulacyjnego założono występowanie sześciu stanowisk wytwórczych (obrabiarek). Dzięki temu możliwe było uwzględnienie w procesie symulacji rzeczywistych obiektów znajdujących się w laboratorium Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji (ITMiAP) Politechniki Krakowskiej oraz obiektów wirtualnych. Takie rozwiązanie umożliwia przeprowadzenie symulacji złożonych systemów wytwórczych, a tym samym

złożonych podsystemów transportowych. Przyjęto, że liczba automatycznie sterowanych pojazdów (wózków) może być zmieniana w zakresie od 1 do 4. Założono występowanie w modelu podsystemu transportowego dróg jedno i dwukierunkowych oraz możliwość ich zróżnicowanego konfigurowania. Trasy przejazdu są wyznaczone w oparciu o zmodyfikowany algorytm A\*. Każdy automatycznie sterowany pojazd po wykonaniu zadania transportowego przejeżdża do bezpiecznego miejsca parkingowego. Do sterowania ruchem pojazdów zaimplementowano algorytmy opisane w poprzednim rozdziale. Opracowany model w zakresie swoich możliwości konfiguracyjnych pozwala na testowanie różnych systemów wytwórczych i testowanie poprawności algorytmów sterujących pojazdami.

Program Arena jest graficznym środowiskiem przeznaczonym do budowania modeli symulacyjnych systemów dyskretnych. Modele są budowane z gotowych bloków funkcjonalnych. Ze względu na dużą złożoność opracowany model został podzielony na moduły przedstawione na rysunku 3.



Rys. 3. Model symulacyjny systemu produkcyjnego z podziałem na moduły

Pierwszy moduł „Generator Przedmiotów” jest odpowiedzialny za wprowadzanie przedmiotów do systemu wytwórczego. Istnieje możliwość bardzo łatwego dostosowania generatora do wprowadzania różnej liczby i różnych typów przedmiotów. Wprowadzone przedmioty są umieszczane na paletach po cztery sztuki. Każdy typ przedmiotu może mieć przypisaną inną marszrutę, która decyduje o jego procesie produkcyjnym.

Moduł systemu produkcyjnego pozwala na definiowanie sześciu stanowisk wytwórczych i dwóch magazynów (wejściowego i wyjściowego). Każde stanowisko jest wyposażone w dwa bufory (wejściowy i wyjściowy). Przemieszczanie palet z przedmiotami z wózka do bufora wejściowego oraz z bufora wyjściowego na wózek nadzoruje operator danego stanowiska. Jego zadaniem jest również nadzorowanie pracy obrabiarki.

W opracowanym modelu generowane przedmioty pojawiają się w magazynie wejściowym i zgodnie z przypisaną im marszrutą żądają przewiezienia przez podsystem transportowy do odpowiedniego stanowiska wytwórczego. Podsystem transportowy sprawdza, który z wolnych wózków jest najbliższy stanowiska przywołującego wózek. Sprawdzenie polega na wyznaczeniu przez każdy wózek najkrótszej trasy przejazdu z miejsca, w którym się aktualnie znajduje do miejsca docelowego w oparciu o zmodyfikowany algorytm A\*. Zadanie to jest realizowane w module „Wyznaczanie trasy. Po dokonaniu sprawdzenia, z wszystkich wózków wybierany jest ten, który znajduje się najbliższy. Kontrola nad przejazdem wózka z miejsca postojowego do docelowego jest realizowana przez moduł „Podsystem transportu 1”. W module tym jest dokonywana rezerwacja miejsc bezblokadowych i zagrożonych blokadami na trasie przejazdu wózka a następnie sterowanie ruchem wózka. Po załadunku przedmiotu na wózek kontrola nad przejazdem wózka jest realizowana przez moduł „Podsystem transportu 2. Po rozładunku wózek przejeżdża do bezpiecznego miejsca parkingowego. Przejazd ten jest nadzorowany przez moduł „Podsystem transportu 3”. Moduł systemu transportowego umożliwia symulację zadań transportowych realizowanych jednocześnie przez kilka wózków. W modelu symulacyjnym czynności transportowe są realizowane ze stałą prędkością. Wszystkie wózki są tego samego typu i posiadają takie same prędkości. Czas przejazdu wózka podczas symulacji jest wyliczany na podstawie prędkości i długości trasy przejazdu. Czas realizacji czynności przez operatorów jest zdefiniowany według rozkładu trójkątnego w zakresie od 5 do 15 sekund (rys. 4). Są to czynności związane z obsługą magazynów, buforów i załadunkiem obrabiarek.

Rys. 4. Parametry definiujące czas pracy operatorów

Czasy trwania czynności obróbkowych są definiowane indywidualnie dla każdego typu przedmiotu i każdej obrabiarki. Podczas definiowania marszrut dla każdego typu przedmiotu w wierszach odpowiadających poszczególnym obrabiarkom są określone wartości atrybutu CzasObrobki (rys. 5).

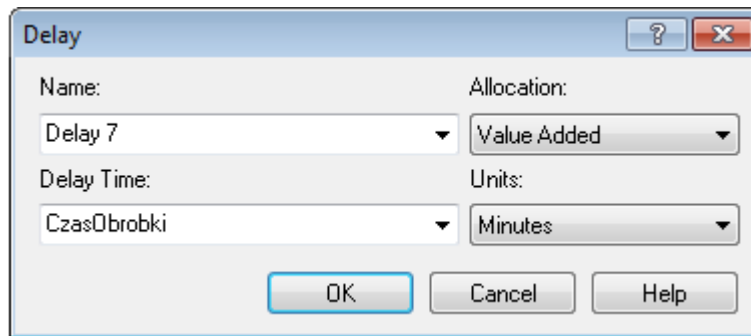
	Station Name	Step Name	Next Step	Assignments
1	sMwy			0 rows
2	sTwe			0 rows
3	sTor			1 rows
4	sTwe			0 rows
5	sMwy			0 rows
6	sMwy			0 rows
7	sMwy			0 rows
8	sMwy			0 rows
9	sMwy			0 rows
10	sMwy			0 rows
11	sMwe			0 rows

	Assignment Type	Attribute Name	Value
1	Attribute	CzasObrobki	2.4

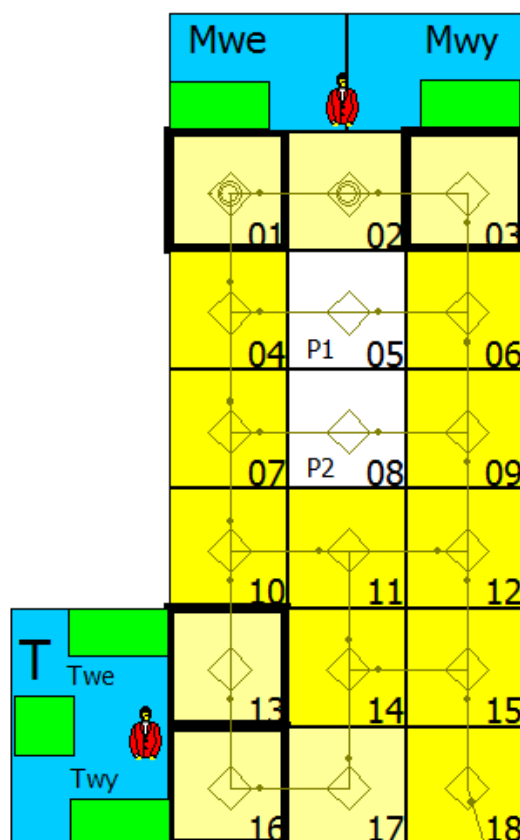
Rys. 5. Parametry definiujące czas obróbki

Atrybut określający czas obróbki jest odczytywany bloku funkcjonalnym „Delay” (rys. 6). Każdy typ przedmiotu posiada właściwą wartość tego atrybutu. Dzięki temu możliwa jest symulacja obróbki przedmiotów z różnymi czasami. Model symulacyjny został wyposażony w elementy wizualizacji i animacji procesu symulacyjnego (rys. 7). Odcinki dróg transportowych zostały przedstawione na tle ponumerowanych kwadratów lub prostokątów. Bufory oraz obrabiarki zostały przedstawione w postaci prostokątów, które podczas symulacji zmieniają kolor w zależności od stanu. Kolor zielony odpowiada stanowi bez wykonywania czynności. Kolor czerwony oznacza realizację czynności przez dany zasób.



Rys. 6. Moduł Delay symulujący proces obróbki

Każdy wózek posiada przypisany symbol graficzny, rysunek 8. Przejazd wózków podczas symulacji jest animowany przez przemieszczanie ich symboli.

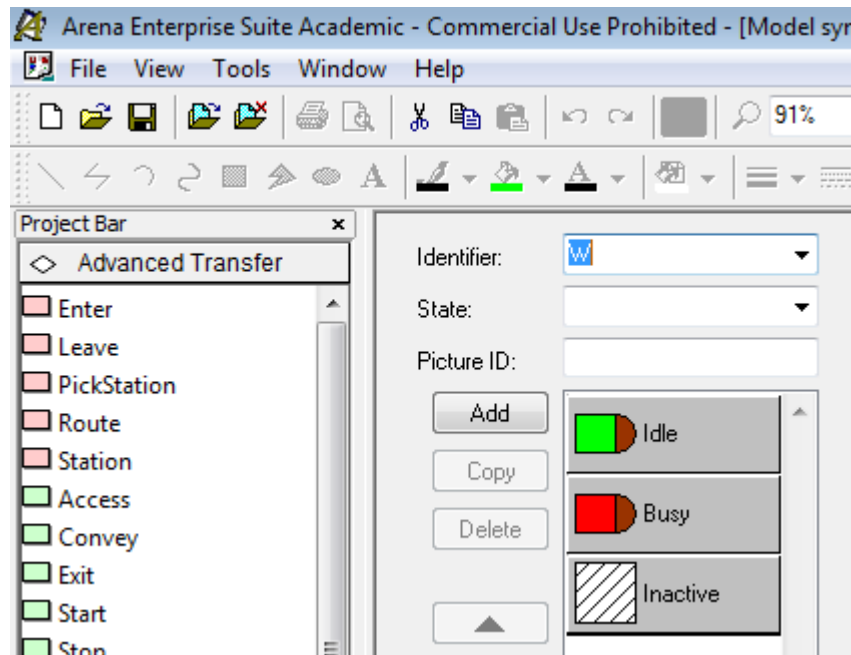


Rys. 7. Wizualizacja obrabiarek i dróg transportowych.

#### 4.2 Symulowane procesy wytwórcze

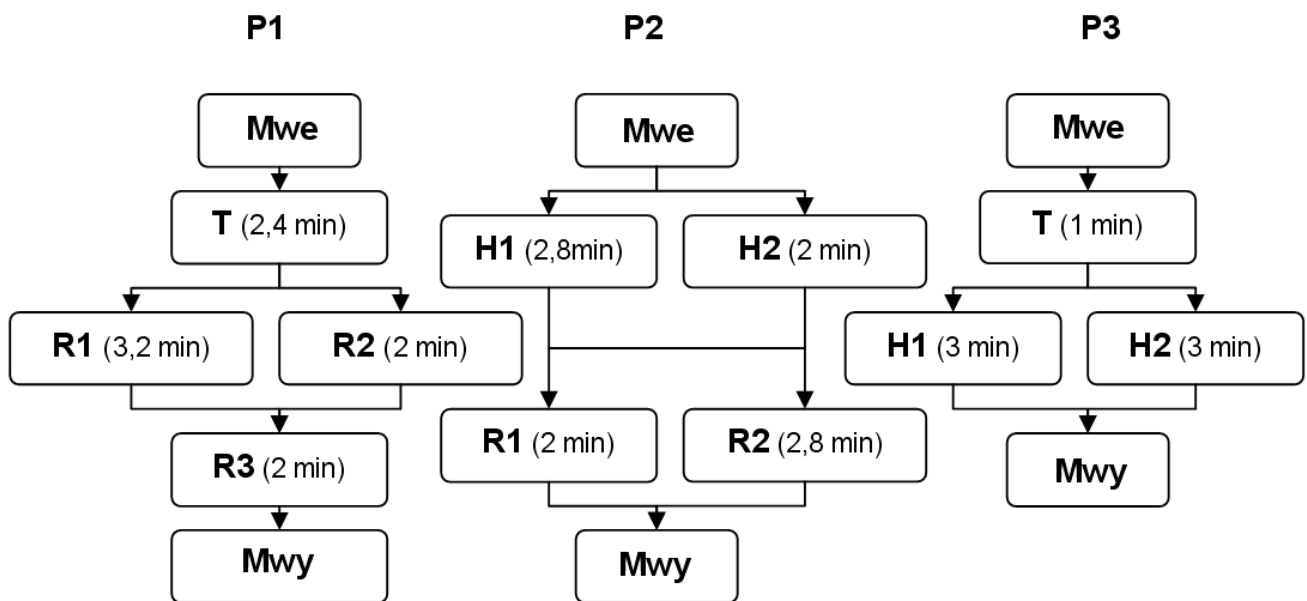
Weryfikację poprawnego działania metody efektywnego sterowania podsystemem transportowym przeprowadzono na wielu modelach. Poniżej przedstawiono wyniki dwóch testów na modelu, w którym zdefiniowano magazyn wejściowy (Mwe) i wyjściowy (Mwy), system CP TOR (T) i CET Haas (H1 i H2), które znajdują się w laboratorium ITMiAP oraz trzy stanowiska wirtualne R1, R2 i R3. Każde stanowisko jest obsługiwane przez operatora. W modelu przewidziano cztery miejsca parkingowe (P1, P2, P3 i P4) dla wózków (W1, W2, W3 i W4). Trasy przejazdu dla wózków zamodelowano z uwzględnieniem rzeczywistego rozmieszczenia pomieszczeń w laboratorium ITMiAP. Model wyposażono we wskaźniki obciążenia poszczególnych zasobów, w tym również wózków. Dzięki temu można analizować zmianę obciążenia w trakcie symulacji oraz po jej zakończeniu. Symulację przeprowadzono kolejno dla procesów obróbki dwóch i trzech typów przedmiotów. Marszrutę definiującą przebieg procesów dla poszczególnych typów przedmiotów przedstawiono na rysunku 9. Czynności transportowe są reprezentowane przez strzałki.

Pierwszy test przeprowadzono dla procesu wytwarzania 40 przedmiotów typu P1 i P2 oraz kolejno 1, 2, 3 i 4 wózków. Drugi test przeprowadzono dla procesu wytwarzania 200 przedmiotów typu P1, 100 przedmiotów typu P2 i P3 oraz kolejno 1, 2, 3 i 4 wózków. Poprzez zmianę liczby obrabianych przedmiotów, które posiadały różne marszrutę, uzyskano zmianę obciążenia poszczególnych obrabiarek w symulowanym systemie.



Rys. 8. Symbole reprezentujące wózki

Zmiana obciążenia obrabiarek bezpośrednio wpływała na liczbę i natężenie zadań transportowych zleczanych do wykonania automatycznie sterowanym pojazdom. W celu ułatwienia analizy wyników symulacji, wyposażono model symulacyjny we wskaźniki procentowego obciążenia obrabiarek i wózków. Pozwala to, na bieżąco, śledzić zmiany obciążenia poszczególnych zasobów w trakcie symulacji. Dzięki animacji przemieszczania się wózków można było nadzorować zachowanie się podsystemu transportowego. Obserwacje te były szczególnie interesujące podczas realizacji zadań transportowych jednocześnie przez wszystkie cztery wózki.



Rys. 9. Marszrutę przedmiotów typu P1, P2 i P3

### 4.3 Wyniki symulacji

Na rysunku 10 przedstawiono chwilowe wyniki symulacji wytwarzania dwóch typów przedmiotów według opisanych powyżej procesów wytwórczych z podsystemem transportu składającym się z czterech wózków. Na rysunku podano jakie typy przedmiotów były obrabiane (liczba sztuk i liczba palet) oraz ile wózków tworzyło podsystem transportowy.







Jak wspomniano powyżej obciążenie każdego zasobu jest wyświetlane przez oddzielny wskaźnik. Wyniki chwilowe pokazują m.in. rozmieszczenie wózków w trakcie realizacji zadań transportowych oraz liczbę palet oczekujących w magazynie i liczbę palet już obrobionych. Końcowe wyniki symulacji pokazano w tabelach 1 i 2. Opierając się na wynikach końcowych możemy ocenić m.in. efektywność podsystemu transportowego.

Tab. 1. Obciążenia zasobów dla symulacji wytwarzania dwóch typów przedmiotów P1 i P2 (80 sztuk)

Liczba wózków [szt]	Czas wytwarzania [min]	Obciążenie [%]									
		T	R1	R2	R3	H1	H2	W1	W2	W3	W4
1	197,99	55	36	77	47	19	33	98	-	-	-
2	175,08	62	40	88	54	21	37	52	65	-	-
3	175,32	62	40	88	53	21	37	35	38	44	-
4	176	62	40	87	53	21	37	20	32	41	23

Tab.2. Obciążenia zasobów dla symulacji wytwarzania trzech typów przedmiotów P1, P2 i P3 (400 sztuk)

Liczba wózków [szt]	Czas wytwarzania [min]	Obciążenie [%]									
		T	R1	R2	R3	H1	H2	W1	W2	W3	W4
1	990,05	69	36	50	47	32	28	93	-	-	-
2	745,35	91	50	63	63	45	35	61	72	-	-
3	739,42	92	51	63	63	46	35	34	46	54	-
4	739,74	92	51	63	63	46	35	22	37	46	27

## 5. WNIOSKI

Przeprowadzone symulacje potwierdziły poprawne działanie metody efektywnego sterowania podsystemem transportowym oraz zapobiegania powstawaniu kolizji i blokad. Program symulacyjny Arena posiada wbudowaną funkcję wykrywania kolizji. Podczas przeprowadzonych symulacji nie doszło do wykrycia kolizji w podsystemie transportowym, który działał poprawnie bez względu na liczbę wykorzystywanych wózków. Szczególnie podczas obserwacji symulacji z czterema pojazdami widoczne było poprawne zachowanie się wózków. Ponadto symulacje potwierdziły efektywność podsystemu transportowego.

Symulacja obróbki dwóch typów przedmiotów P1 i P2 (w sumie 80 sztuk) wykazała, że podsystem transportowy składający się z jednego pojazdu stanowi wąskie gardło i nie jest w stanie zrealizować w odpowiednim czasie czynności transportowych. Zwiększenie liczby wózków do dwóch jest wystarczające a dalsze zwiększanie ich liczby powoduje zmniejszenie ich obciążenia i nie powoduje wzrostu efektywności systemu produkcyjnego.

Symulacja obróbki trzech typów przedmiotów P1, P2 i P3 (w sumie 400 sztuk) potwierdziła prawidłowość z poprzednich symulacji. Podsystem transportowy składający się z dwóch pojazdów jest w stanie efektywnie realizować czynności transportowe.

Pozytywne wyniki przeprowadzonych symulacji gwarantują, że zastosowanie testowanej metody do sterowania rzeczywistymi automatycznie sterowanymi pojazdami nie doprowadzi do kolizji i blokad oraz pozwoli na efektywne realizowanie zadań transportowych.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Dechter R, Perl J.: *Generalized best-first search strategies and the optimality of A\**, Journal of the ACM 32 (3) (1985), pp. 505–536.
- [2] Le-Anh T., De Koster M.B.M.L: *A review of design and control of automated guided vehicle systems*, European Journal of Operational Research 171 (2006), pp.1–23.
- [3] Więk T.: *Laserowy system nawigacji autonomicznej platformy mobilnej na przykładzie urządzenia NAV300; POMIARY - AUTOMATYKA - ROBOTYKA. PAR, Nr 2, 2011, s.374-381.*
- [4] Zając J.: *Rozproszone sterowanie zautomatyzowanymi systemami wytwarzania*, Monografia 288, Seria Mechanika, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2003.
- [5] Zając J.: *A Deadlock Handling Method for Automated Manufacturing Systems*, CIRP Annals - Manufacturing Technology 2004, Vol. 53, No. 1, pp. 367–370.
- [6] Zając J., Krupa K., Słota A., Więk T.: *Autonomiczna platforma mobilna do realizacji transportu międzyoperacyjnego – projekt wstępny*, LOGISTYKA, Nr 6, 2010, s.3779-3788.
- [7] Zając J., Chwajot G.: *Koncepcja integracji rozproszonego systemu sterowania produkcją AIM z podsystemem transportu międzyoperacyjnego zbudowanym z autonomicznych robotów mobilnych*, POMIARY - AUTOMATYKA - ROBOTYKA. PAR, Nr 2, 2011, s.392-401.
- [8] Zając J., Więk T. Jurek A.: *Wykorzystanie skanera laserowego do zapewnienia bezpieczeństwa autonomicznego pojazdu mobilnego*, LOGISTYKA, Nr 3, 2011, s.3045-3053.