

Waldemar MAŁOPOLSKI¹

METODA ZAPOBIEGANIA BLOKADOM SYSTEMU TRANSPORTOWEGO W MODELU SYMULACYJNYM

W artykule przedstawiono łatwą do zaimplementowania w modelu symulacyjnym metodę zapobiegania blokadom systemu autonomicznych robotów mobilnych – wózków. W metodzie tej wykorzystano podejście oparte na kolejkach. W pierwszej części artykułu przedstawiono sposób budowania modelu symulacyjnego systemu transportowego w programie Arena. Druga część opisuje metodę zapobiegania blokadom. Poprawność tej metody została potwierdzona przez eksperyment symulacyjny.

DEADLOCK PREVENTION OF AN AGV SYSTEM IN SIMULATION MODEL

In this paper easy to implementation into simulation model deadlock prevention method for an automated guided vehicle (AGV) system is presented. This method uses a queue approach. The first part of this paper presents a way of building simulation model of AGV system in Arena software. In the second part deadlock prevention method is presented. The validity of this method was confirmed by simulation experiment.

1. WSTĘP

W nowoczesnych systemach produkcyjnych coraz częściej stosowane są podsystemy transportowe wykorzystujące autonomiczne roboty mobile – wózki. Ponieważ czynności transportowe nie generują wartości dodanej do produktu, dlatego systemy transportowe realizujące te czynności są przedmiotem optymalizacji. Kryterium optymalizacji może być np. minimalizacja: czasu, przebytej drogi lub kosztu związanego z realizacją czynności transportowych. W poszukiwaniu optymalnych rozwiązań systemów transportowych bardzo często są wykorzystywane metody symulacyjne. Zbudowanie modelu systemu transportowego i przeprowadzenie eksperymentu symulacyjnego jest znacznie tańsze i bezpieczniejsze od testów na obiektach rzeczywistych. Prawidłowe przygotowanie modelu wymaga rozwiązania szeregu problemów, które występują również w rzeczywistych systemach transportowych. Do ważniejszych możemy zaliczyć problem wyznaczania tras przejazdu wózków oraz efektywne sterowanie ruchem wózków tak, aby nie doprowadzić do blokady systemu transportowego. Przez blokadę rozumiany jest taki stan systemu, w którym żaden wózek nie może dalej realizować czynności transportowej.

¹ Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Politechnika Krakowska, Al. Jana Pawła II 37
31-864 Kraków, tel. +48 12 374 32 13, e-mail: malopolski@m6.mech.pk.edu.pl

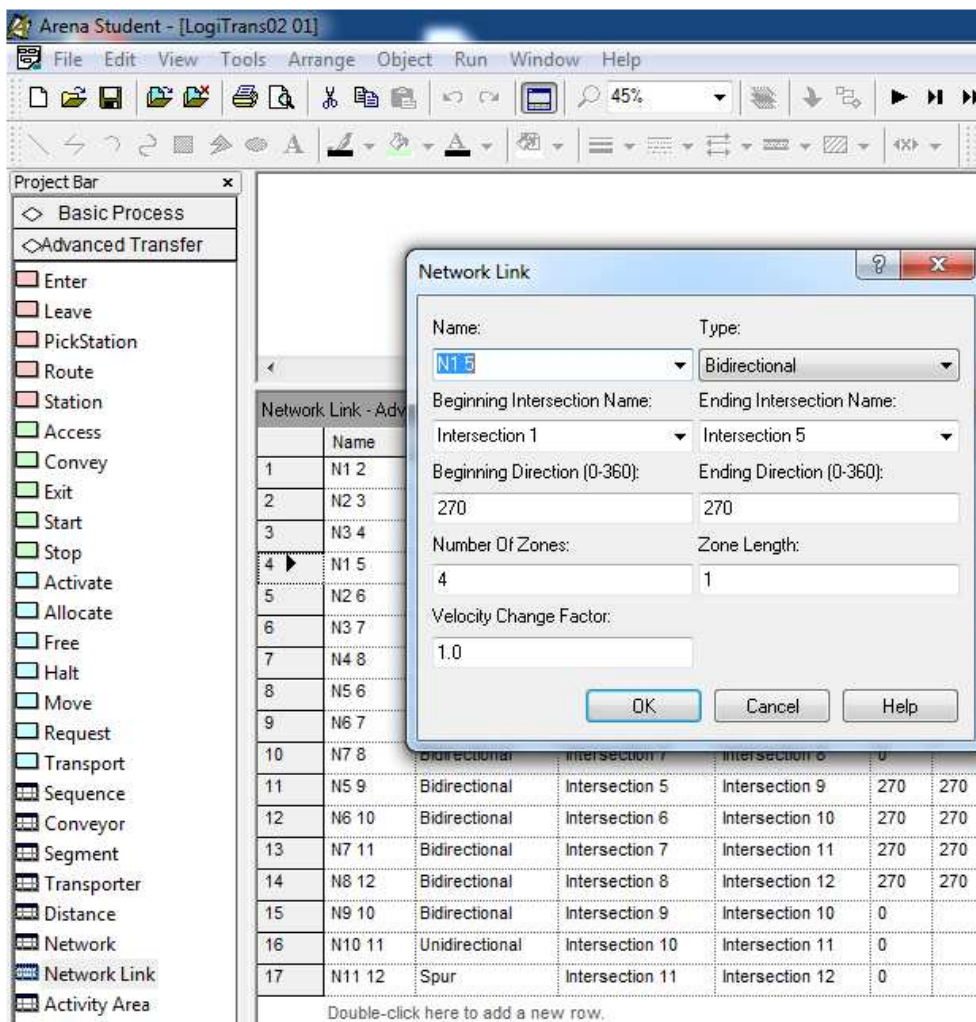
Znanych jest szereg różnych metod zapobiegania blokadom systemów transportowych. Liczna grupa rozwiązań jest oparta na sieciach Petriego [1, 4, 5]. Innym rozwiązaniem jest wykorzystanie algorytmu „bankiera” [2], czy metody opartej na teorii grafów [3]. Znane są też inne algorytmiczne rozwiązania zapobiegające blokadom systemu transportowego [6, 7].

Komercyjne programy symulacyjne, posiadające narzędzia do modelowania systemów transportowych z wykorzystaniem autonomicznych robotów mobilnych, posiadają bardzo małą funkcjonalność w zakresie zapobiegania blokadom. Konieczne jest opracowanie prostej metody zapobiegania blokadom, którą bez większych przeszkód można zaimplementować w modelu symulacyjnym. Z tego względu w artykule przedstawiono możliwości budowania modeli symulacyjnych systemów transportowych w programie Arena oraz zaproponowano metodę zapobiegania blokadom.

2. DEFINIOWANIE SIECI TRANSPORTOWEJ

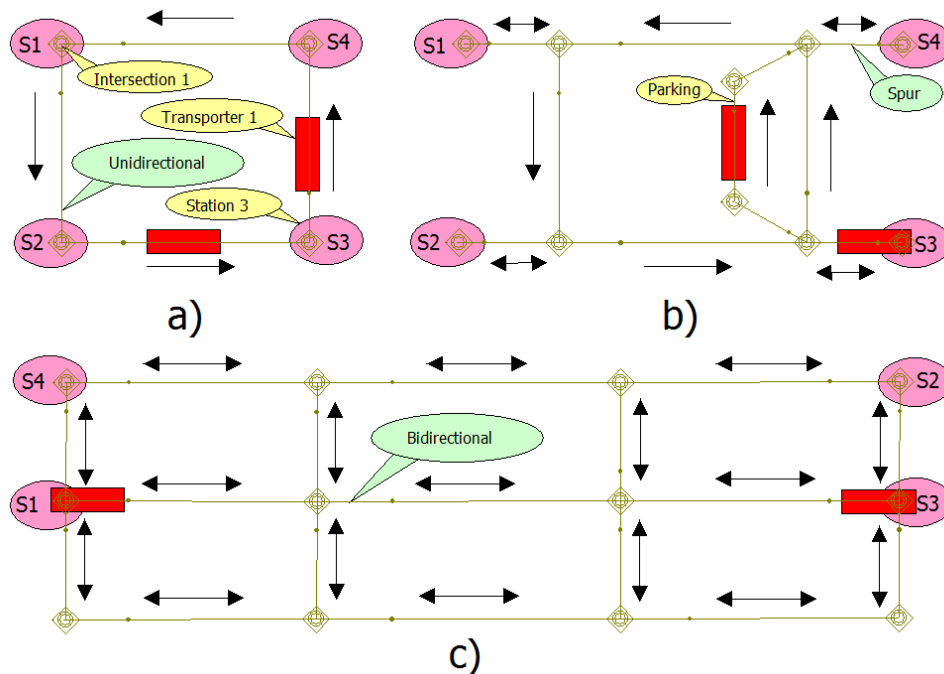
Program symulacyjny Arena posiada specjalnie dedykowane narzędzia do modelowania systemów transportowych wykorzystujących autonomiczne roboty mobilne. Modelowanie systemu transportowego rozpoczyna się od zdefiniowania sieci dróg, po których będą się poruszać roboty mobilne. Poszczególne drogi (odcinki) wchodzące w skład sieci posiadają swoją nazwę i są charakteryzowane przez następujące parametry: nazwę punktu początkowego, nazwę punktu końcowego, kierunek wyjścia z punktu początkowego, kierunek wejścia do punktu końcowego, liczby segmentów składających się na dany odcinek, długości każdego segmentu, współczynnika zmiany prędkości przy pokonywaniu zakrętów oraz typ odcinka, który określa dopuszczalny kierunek ruchu, rysunek nr 1. Są dostępne trzy typy: „Unidirectional” – odcinek jednokierunkowy, „Bidirectional” – odcinek dwukierunkowy i „Spur” – odcinek z blokadą („ślepa ulica”). Wjechanie robota mobilnego na odcinek typu „Spur” powoduje jego zamknięcie dla innych robotów mobilnych. Robot, który zajął taki odcinek musi z niego wyjechać (z powrotem), aby odcinek został odblokowany. Punkty początkowe i końcowe odcinków są jednocześnie węzłami sieci. Na podstawie informacji o długości odcinków sieci program Arena wyznacza najkrótsze trasy łączące poszczególne węzły sieci. Każde zadanie transportowe jest wykonywane podczas symulacji po najkrótszej trasie łączącej dwa węzły.

Zdefiniowanie odpowiednich typów odcinków w sieci transportowej ma zasadnicze znaczenie dla poprawności działania całego systemu transportowego. Jak wspomniano we wstępie, jednym z najważniejszych problemów przy projektowaniu i sterowaniu systemami transportowymi jest zapobieganie blokadom a w skrajnych przypadkach kolizjom obiektów systemu transportowego. Najprostszym rozwiązaniem jest takie zaprojektowanie sieci dróg, aby nie mogło dojść do blokady. Przykład takiej sieci transportowej przedstawiono na rysunku nr 2 a). Jest to sieć, w której wszystkie odcinki są jednokierunkowe (Unidirectional). Roboty mobilne (Transporter 1 i 2) poruszają się jeden za drugim (w koło). Stacje (S1, S2, S3 i S4), czyli punkty docelowe zadań transportowych są ulokowane w węzłach sieci (Intersection 1, 2, 3, i 4). Węzły sieci są punktami początkowymi i końcowymi każdego odcinka. Jedną z wad takiego rozwiązania jest wydłużenie drogi transportowej oraz konieczność przemieszczania wszystkich robotów. Lepsze rozwiązanie jest przedstawione na rysunku nr 2 b).



Rys. nr 1. Definiowanie sieci transportowej w programie Arena

W tym przypadku sieć została rozbudowana o odcinki typu „Spur” oraz o odcinek postojowy dla jednego robota mobilnego. W tym przypadku roboty mobilne wykonujące czynność załadunku lub rozładunku w stacjach nie blokują trasy przejazdu innym robotom. Ponadto wprowadzenie miejsca parkingowego pozwala na omijanie się robotów mobilnych. Na rysunku nr 2 c) przedstawiono bardziej rozbudowaną sieć transportową z wszystkimi odcinkami dwukierunkowymi. W przypadku takiej sieci możliwe jest wybranie dowolnej trasy przejazdu spełniającej kryterium minimalnej długości drogi. Powstaje jednak zagrożenie dojścia do blokady.

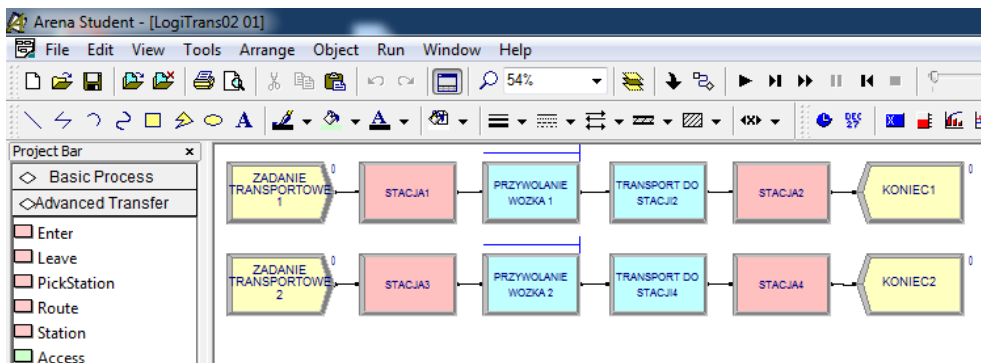


Rys. nr 2. Przykłady prostych sieci transportowych

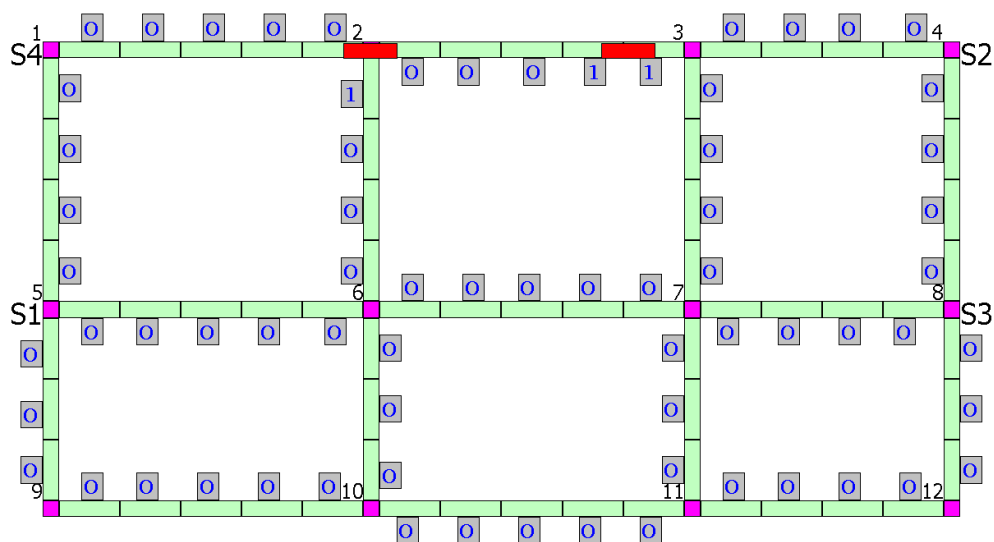
3. MODEL SYSTEMU TRANSPORTOWEGO

Dla przykładu sieci transportowej z rysunku nr. 2c zbudowano model symulacyjny w programie Arena, rysunek nr 3. W systemie transportowym zdefiniowano dwa autonomiczne roboty mobilne. Zadanie pierwszego robota polega na przewiezieniu przedmiotu ze stacji S1 do stacji S2, rysunek nr 4. Drugi robot na przewieźć przedmiot ze stacji S3 do stacji S4. Do budowy modelu wykorzystano typowe elementy. Wybór trasy i sterowanie ruchem autonomicznych robotów mobilnych realizował program Arena. W celu lepszej analizy przebiegu symulacji każdy odcinek sieci jest reprezentowany przez jasno zielony prostokąt. Przy każdym segmencie umieszczono pole wyświetlające informację o jego stanie. Jeżeli segment jest zajęty przez robota, to wyświetlana jest wartość 1 a gdy jest wolny, wartość 0. Węzły sieci są ponumerowane i zaznaczone różowymi kwadratami. Autonomiczne roboty są reprezentowane przez prostokąty. Kolor zielony oznacza robota nie realizującego czynności a czerwony robota w trakcie czynności transportowej.

Po uruchomieniu symulacji okazało się, że trasa przejazdu robota nr 1 przebiegała przez węzły: 5, 6, 2, 3 i 4. Trasa robota nr 2 przebiegała przez węzły: 8, 7, 3, 2 i 1. Niestety czynności transportowe nie zostały zakończone, ponieważ doszło do blokady na odcinku pomiędzy węzłami 2 i 3.

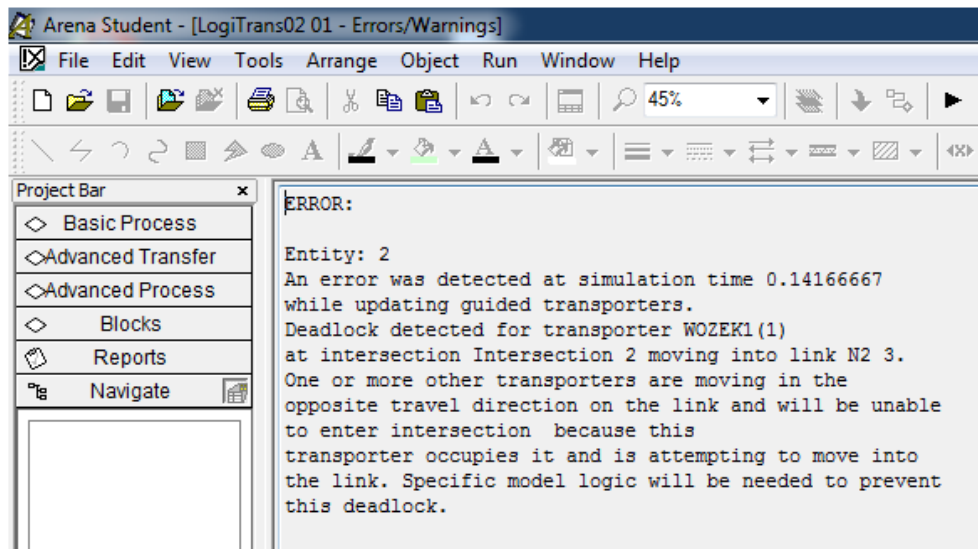


Rys. nr 3. Model symulacyjny systemu transportowego z rysunku nr 2c



Rys. nr 4. Wizualizacja stanu sieci transportowej podczas symulacji

Obydwa roboty wjechały na ten sam odcinek z przeciwnych kierunków. Program symulacyjny wykrył blokadę i wyświetlił odpowiedni komunikat, rysunek nr 5. W celu uniknięcia blokady należy odpowiednio zmodyfikować logikę działania modelu. W praktyce oznacza to konieczność zaimplementowania w modelu odpowiedniej metody sterowania ruchem robotów. Najprostszym wyjściem byłoby zaprojektowanie takiej sieci, w której nie może dojść do blokady. Takie rozwiązanie ma jednak wiele wad a czasem w praktyce może być nie możliwe do zrealizowania.



Rys. nr 5. Komunikat o blokadzie w systemie transportowym

W związku z tym podjęto decyzję o opracowaniu metody zapobiegania powstawaniu blokad i zaimplementowaniu jej do modelu w programie symulacyjnym Arena.

4. METODA ZAPOBIEGANIA BLOKADOM W SYSTEMIE TRANSPORTOWYM

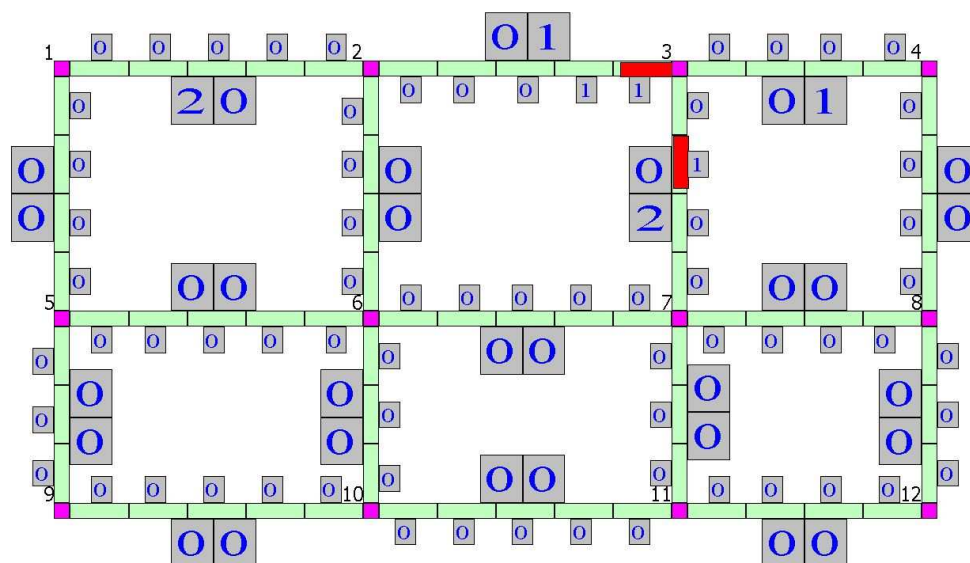
Przyczyną opisanej powyżej blokady była próba jednoczesnego pokonania przez roboty, jadące w przeciwnym kierunku, tego samego odcinka, w tym samym czasie. Do blokady nie doszłoby, gdyby jeden z robotów poczekał i przepuścił drugiego. Zaproponowano zatem rozwiązanie polegające na rezerwowaniu przez roboty wszystkich odcinków trasy, którą mają zamiar pojechać. W tym celu wprowadzono tablicę rezerwacji **TR** odcinków sieci dla przejazdów w dwóch kierunkach. Każdy odcinek sieci może zostać zarezerwowany dla przejazdu od punktu początkowego do końcowego i osobno dla przejazdu w kierunku przeciwnym. Autonomiczny robot mobilny dokonując rezerwacji wpisuje w odpowiednich polach tablicy **TR**, reprezentujących dane odcinki, swój numer. Informacje o rezerwacji odcinków są wyświetlane przez dwa dodatkowe pola umieszczone na wizualizacji przy każdym odcinku sieci transportowej, rysunek nr 6. Rezerwacja jest dokonywana kolejno przez wszystkie roboty i obejmuje wszystkie odcinki tras przejazdowych. Bardzo często o rezerwację tego samego odcinka może rywalizować kilka robotów. Z tego względu każda rezerwacja przez robota została podzielona na tyle zadań, ile odcinków dany robot chce zarezerwować. Zadania te są w modelu reprezentowane przez odpowiednie jednostki. Do rezerwacji każdego odcinka utworzono kolejkę. Innymi słowy, jednostki reprezentujące zadania rezerwowania ustawiają się w kolejce do odpowiednich odcinków. Jeżeli odcinek jest zarezerwowany, obojętnie w którym kierunku, to nowe zadanie rezerwacji czeka w kolejce. Po przejechaniu robota przez dany odcinek, który był dla niego zarezerwowany, następuje odwołanie rezerwacji. Wolny odcinek sieci

transportowej jest rezerwowany przez pierwsze w kolejce zadanie rezerwacji zgodnie z metodą FIFO.

Na obecnym etapie rozwoju implementowanej metody przyjęto pewne uproszczenie. Robot może rozpocząć rezerwację tylko wtedy, gdy miejsce docelowe (ostatni odcinek trasy) nie jest zajęte lub zarezerwowane przez innego robota.

Po dokonaniu rezerwacji robot może rozpocząć wykonywanie zadania transportowego po kolejnych odcinkach sieci transportowej, które sobie zarezerwował. Gdy autonomiczny robot dojedzie do odcinka, który jest zarezerwowany przez innego robota, zatrzymuje się i czeka. W tym przypadku miejsce postoju robota musi być dokładnie określone. Robot musi zatrzymać się przed węzłem sieci (skrzyżowaniem) w takiej odległości, aby inny robot miał możliwość przejechania przez węzeł sieci transportowej. W implementowanej metodzie przyjęto zasadę zatrzymywania się robota w odległości jednego segmentu przed węzłem. Dzięki temu autonomiczne roboty oczekujące na zwolnienie określonego odcinka sieci nie blokują przejazdu innym robotom.

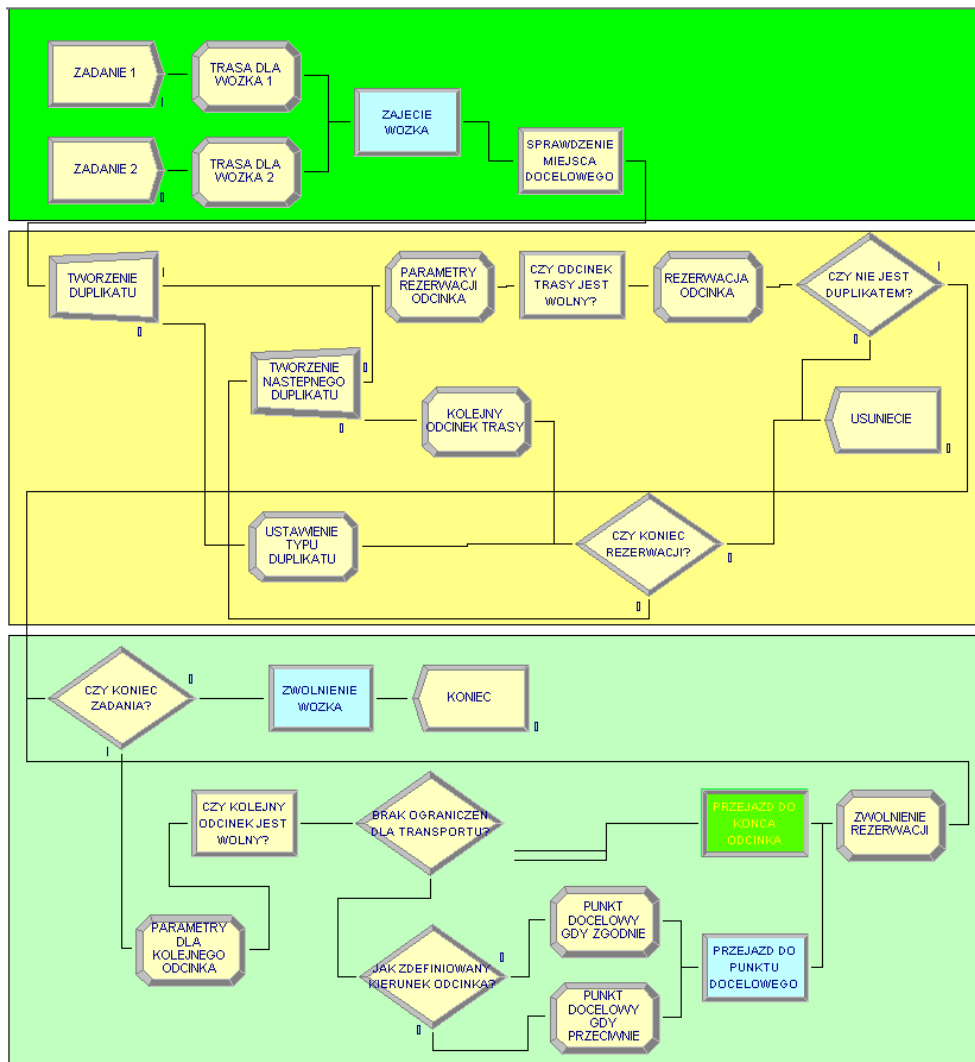
Oczekujący robot będzie mógł wjechać na dany odcinek dopiero wtedy, gdy w polu rezerwacji tablicy TR pojawi się jego numer. Ponieważ odcinek zawierający miejsce docelowe dla zadania transportowego jest zawsze zarezerwowany przez robota, to każdy robot bez przeszkód dotrze do celu. Na rysunku nr 6 przedstawiono wizualizację procesu symulacji dwóch zadań transportowych, realizowanych przez dwa roboty.



Rys. nr 6. Wizualizacja sieci transportowej podczas symulacji wraz z rezerwacją odcinków

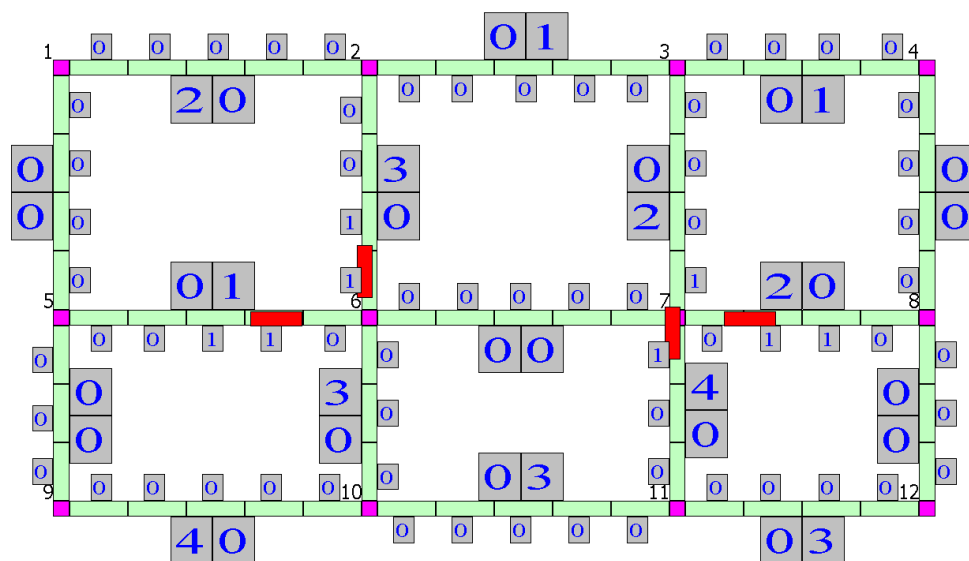
Robot znajdujący się na odcinku pomiędzy węzłem 7 i 3 zatrzymał się jeden segment przed węzłem 3 i przepuścił drugiego robota. Następnie po dokonaniu rezerwacji dotarł do miejsca docelowego. Implementacja powyższej metody wymagała rozbudowania modelu systemu transportowego. Na rysunku nr 7 przedstawiono model podzielony na

odpowiednie obszary funkcjonalne, odpowiedzialne za przygotowanie zadań transportowych, rezerwację odcinków i sterowanie ruchem autonomicznych robotów mobilnych.



Rys. nr 7. Implementacja metody zapobiegania blokadom systemu transportowego w programie Arena

Na rysunku nr 8 przedstawiono wizualizację procesu symulacji czterech zadań transportowych. W systemie zdefiniowano cztery roboty mobilne, rozmieszczone początkowo na odcinkach pomiędzy węzłami: 5-6, 8-4, 1-2 i 3-4. Przypisano im odpowiednio trasy przejazdu przez następujące węzły sieci: 5-6-2-3-4, 8-7-3-2-1, 1-2-6-10-11-12, 4-3-7-11-10-9.



Rys. nr 8. Wizualizacja procesu symulacji czterech zadań transportowych

Podczas symulacji wszystkie roboty mobilne wykonały swoje zadania transportowe. W systemie nie doszło do blokady.

5. WNIOSKI

Zaproponowana metoda zapobiegania blokadom w systemie transportowym wykorzystującym autonomiczne roboty mobilne okazała się skuteczna. Zaletą tej metody jest stosunkowo prosta implementacja w modelu symulacyjnym, w programie Arena. Dzięki temu możliwe jest budowanie modeli złożonych systemów transportowych i weryfikacja ich działania na drodze symulacji komputerowej.

Dalsze prace nad rozwojem tej metody powinny dotyczyć m.in. wprowadzenia możliwości usuwania z trasy przejazdu innych robotów mobilnych, które w danym momencie nie wykonują żadnych zadań transportowych. Kolejne usprawnienie może dotyczyć zezwolenia na zajęcie danego odcinka sieci przez większą liczbę robotów mobilnych, jeżeli poruszają się w tym samym kierunku. Szczególne znaczenie dla wprowadzenia tej funkcjonalności ma możliwość rezerwowania odcinków sieci transportowej w dwóch kierunkach. Ważną kwestią jest uwzględnienie możliwości występowania robotów mobilnych o różnych gabarytach, co ma wpływ na miejsce,

w którym musi się zatrzymać ustępujący drogi inny robot mobilny. Znaczący wpływ na efektywność systemu transportowego miałyby wprowadzenie dodatkowego parametru określającego czas przejazdu robota mobilnego przez poszczególne odcinki sieci. Dzięki odpowiedniej analizie można byłoby rozłożyć rezerwację odcinków w czasie. Ze względu na pozytywne wyniki przeprowadzonych symulacji z wykorzystaniem tej metody, zasadnym wydaje się podjęcie dalszych prac nad jej rozwojem.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Banaszak Z. A., Krogh B. H.: *Deadlock Avoidance in Flexible Manufacturing Systems with Concurrently Competing Process Flows*, IEEE Transactions on robotics and automation, Vol. 6, No. 6, December 1990.
- [2] Chang Wan Kim, Tanchoco J. M. A., Pyung-Hoi Koo: *Deadlock Prevention in Manufacturing Systems With AGV Systems: Banker's Algorithm Approach*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, November 1997, Vol. 119/849
- [3] Jung-woon Yoo, Eok-Su Sim, Chengxuan Cao, Jin-Woo Park: *An algorithm for deadlock avoidance in an AGV System*, Int J Adv Manuf Technol (2005) 26: 659-668
- [4] Naiqi Wu, MengChu Zhou: *Modeling and Deadlock Avoidance of Automated Manufacturing Systems With Multiple Automated Guided Vehicles*, IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-part B: Cybernetics, Vol. 35, no. 6, December 2005
- [5] Naiqi Wu, MengChu Zhou: *Deadlock Resolution in Automated Manufacturing Systems With Robots*, IEEE Transactions on automation science and engineering, Vol. 4, no. 3, July 2007
- [6] Rajeeva Lochana Moorthy, Wee Hock-Guan, Ng Wing-Cheong, Teo Chung-Piaw: *Cyclic deadlock prediction and avoidance for zone-controlled AGV system*, International Journal of Production Economics, Vol. 83, Issue 3, 11 March 2003, Pages 309-324
- [7] Zajac J.: *A Deadlock Handling Method for Automated Manufacturing Systems*, CIRP Annals - Manufacturing Technology 2004, Vol. 53, No. 1, s. 367-370.