

BUCZAJ Marcin<sup>1</sup>  
 PANEK Łukasz<sup>1</sup>

## Model autonomicznej mobilnej platformy transportowej do przewozu ładunków w obiektach infrastruktury logistycznej

*autonomiczne platformy mobilne, transport ładunków  
 technologia RFID, sterowanie i robotyka  
 topografia siatek kontrolnych*

### Streszczenie

*Transport towarów w pomieszczeniach infrastruktury logistycznej odbywa się najczęściej za pomocą urządzeń transportowych o charakterze stacjonarnym (taśmociągów, wind) lub mobilnym (wózki, pojazdy transportowe). Pierwszy sposób wymaga rozmieszczenia na stałe w obiekcie elementów konstrukcyjnych urządzeń transportowych. Może to komplikować przebieg innych istniejących ciągów komunikacyjnych i transportowych w obiekcie. Drugi sposób opiera się na wykorzystaniu czynnika ludzkiego w procesie sterowania i kontroli. W pewnych okolicznościach może nie być możliwości zastosowania żadnego z wymienionych sposobów transportu ładunków. W takim przypadku konieczne jest zastosowanie innego rozwiązania. W artykule przedstawiono koncepcję oraz model autonomicznej mobilnej platformy transportowej wykorzystującej w procesie sterowania siatkę tagów RFID o znanej topografii. Wykorzystany system orientacji w terenie umożliwia realizację zadań transportowych oraz kontrolę nad procesem sterowania i przemieszczania się platformy.*

### THE MODEL OF AUTONOMIC AND MOBIL TRANSPORT PLATFORM USING TO LOAD TRANSPORT IN LOGISTIC'S INFRASTRUCTURE OBJECT

### Abstract

*Transport of the commodity in logistics infrastructure's space is made more often by transport devices which are stationary elements (belt transporters, lifts) or mobile (carts, transport vehicle). The first way requires to locate construction elements of transport devices in object. It can complicate other existing communications way and artery of traffic. The second way base on using a human elements in control process. Sometimes it can't use any of this load transport's way. In this case it's necessary to use a different way. This article presents the concept and model of autonomic and mobile transport platform using RFID tags with known topography system in control process. Using RFID positioning system in area enables to realize of transport missions and control of process to give dispositions and management moving process.*

### 1. WSTĘP

Optymalizacja pod względem efektywności technicznej i ekonomicznej procesu produkcyjnego wymaga zastosowania szybkich, wydajnych, skutecznych i niezawodnych środków transportu ładunku na terenie infrastruktury logistycznej przedsiębiorstwa. Ładunki pomiędzy miejscami załadunku i miejscami docelowymi mogą być transportowane za pomocą odpowiednich środków transportu wykorzystując specjalne urządzenia lub pojazdy transportowe. Przenoszenie ładunku za pomocą urządzeń transportowych wymaga rozstawienia na stałe niezbędnych elementów konstrukcyjnych oraz wprowadzenia niezbędnych zmian architektonicznych w obiekcie. Ogranicza to swobodę kształtowania przestrzeni roboczych i jest systemem mało elastycznym pod względem ewentualnej konfiguracji. Tych wad nie posiadają środki transportowe w postaci specjalnie przystosowanych pojazdów transportowych. Nie wymagają one zastosowania architektonicznych elementów konstrukcyjnych i umożliwiają swobodne kształtowanie przebiegu tras transportowych. Dodatkowo umożliwiają przewóz różnego rodzaju ładunków dostosowanych do aktualnych potrzeb. Poważną wadą tego sposobu transportu ładunków jest konieczność sterowania mini przez personel.

Można wytypować i opisać wiele sytuacji, w których bezpośredni udział człowieka w kierowaniu pojazdami transportowymi jest bardzo utrudniony lub też de facto nawet niemożliwy. Takie sytuacje mogą występować w obiektach o szczególnych warunkach klimatycznych lub środowiskowych, charakteryzujących się ekstremalnymi temperaturami, zawartością w atmosferze niebezpiecznych związków, podwyższonym poziomem promieniowania elektromagnetycznego lub jonizującego, zagrożeniem terrorystycznym lub spowodowanymi działaniami wojennymi. W takich sytuacjach może jednocześnie wystąpić brak technicznych możliwości wstawienia dodatkowego stacjonarnego układu przenoszenia ładunku (np. taśmociągu). Realizacja potrzeb transportowych dla tak wyróżnionych przypadków, ale także sytuacji, w których dąży się do eliminacji czynnika ludzkiego (np. ograniczenie kosztów osobowych) można wykorzystać autonomiczne mobilne platformy transportowe. Są to układy wykorzystujące wbudowane systemy sterowania umożliwiające realizację procesu zmiany położenia ładunku.

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, Katedra Inżynierii Komputerowej i Elektrycznej, 20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38A  
 Tel.: +48 81 53-84-301; Fax.: +48 81 53-84-301; E-mail: m.buczaj@pollub.pl

Aby możliwe było zastosowanie takiego układu obiekt lub pojazd musi zostać wyposażony w środki techniczne umożliwiające orientację w terenie. W przypadku rozległych obszarowo i otwartych terenów często wykorzystywany jest system pozycjonowania obiektów GPS. W przypadku układów transportowych w niewielkich obiektach oraz wewnątrz obiektów wykorzystuje się systemy pozycjonowania radiowego, laserowego lub ultradźwiękowego. Drugi sposób to wyposażenie pojazdu w elementy detekcyjne i czujniki umożliwiające orientację w terenie i realizację zadań transportowych. Takie układy jezdne wyposażane są w ultradźwiękowe lub laserowe czujniki zbliżeniowe, czujniki optyczne, rozbudowane systemy widzenia maszynowego z algorytmem rozpoznawania wzorców.

Przedstawione w artykule rozwiązanie wykorzystuje w procesie sterowania, nawigacji oraz orientacji w przestrzeni system znaczników punktowych w postaci tagów RFID. Taki układ może być zaimplementowany w różnego typu pomieszczeniach i umożliwia autonomiczną nawigację w pomieszczeniu bez udziału w procesie sterowania czynnika ludzkiego. Realizacja zadań możliwa jest dzięki informacjom zapisanym w pamięci mikroprocesorowego układu sterowania dotyczącym pozycji i umiejscowienia poszczególnych tagów RFID. Dzięki jednej z właściwości tagów RFID – unikalnym numerze identyfikacyjnym, możliwe jest zbudowanie pewnego rodzaju mapy, opisującej rozmieszczenie tagów RFID w przestrzeni: dwu lub trójwymiarowej. Pojazd wyposażony w tą mapę oraz możliwość odczytu tagów RFID jest w stanie określić swoją pozycję i efektywnie poruszać się w przestrzeni. Zagadnienie orientacji układów mobilnych jest przedmiotem wielu badań na szczególną uwagę zasługują prace [2, 3, 4, 5, 6, 7, 9] dotyczące zastosowania elementów technologii RFID w nawigacji robotów oraz zastosowania tagów RFID do budowy przestrzennych układów odniesienia o znanych parametrach przestrzennych.

Przedstawiona w pracy koncepcja autonomicznej mobilnej platformy transportowej ma stwarzać możliwości przeprowadzenia badań dotyczących aspektów technicznych i funkcyjnych takich pojazdów. Szczególny nacisk został położony na możliwości adaptacyjne systemu sterowania modelu na zaistniałe w obiekcie warunki i dopasowania aktualnego procesu sterowania pojazdem w nawigowaniu polegającym na osiągnięciu założonego celu.

## 2. MODEL AUTONOMICZNEJ MOBILNEJ PLATFORMY TRANSPORTOWEJ

Koncepcja budowy autonomicznej mobilnej platformy transportowej wiąże się z realizacją celu głównego polegającego na możliwości bezobsługowego nawigowania i ustalania tras przejazdu w obiektach o ustalonej i znanej konstrukcji. Dodatkowym założeniem jest określanie sytuacji o danym położeniu i orientacji w przestrzeni modelu na podstawie informacji uzyskiwanych od umieszczonych w obiekcie znaczników w sposób bezprzewodowy. Zaproponowane rozwiązanie, mimo swojego autonomicznego i samowystarczalnego układu sterowania i zarządzania, może być uzupełnione o inne układy umożliwiające orientację w przestrzeni lub być uzupełnieniem dla takiego systemu.

Prawidłowe działanie autonomicznej mobilnej platformy transportowej działającej według założonych wytycznych wymaga współistnienia trzech niezależnych, ale współdziałających ze sobą układów:

- a) dwóch umieszczonych i stanowiących elementy wyposażenia technicznego platformy:
  - układu sterowania, umożliwiającego zarządzanie i nawigowanie pracą platformy transportowej;
  - układu komunikacyjnego, umożliwiającego odbieranie i interpretację sygnałów generowanych przez tagi RFID;
- b) jednego umieszczonego w elementach konstrukcji podłoża obiektu:
  - układu odniesienia o znanej topografii wykorzystującego indywidualne znaczniki informacji (tagi RFID) w ściśle określonym miejscu.

Idea sterowania autonomicznej mobilnej platformy transportowej polega na wykorzystaniu tagów RFID, jako identyfikatorów pozycji. Każdy z tagów traktowany jest jako punkt, który posiada unikalny numer zapisany w swojej pamięci. Zbiór takich punktów (oraz ich wzajemne relacje odległościowe) tworzą mapę topograficzną i stanowią siatkę pozycji kontrolnych, w których znaleźć się może platforma. Mapa, możliwych poprawnych pozycji, zapisana jest w pamięci pojazdu a każdy punkt tej mapy odzwierciedla położenie w rzeczywistej przestrzeni pracy robota. Dzięki temu pojazd, który odczyta tag RFID znajdujący się w jego najbliższym sąsiedztwie, może (z pewną dokładnością) zidentyfikować swoją pozycję w przestrzeni. W tym momencie znane są sąsiednie poprawne pozycje i możliwe jest przemieszczenie się w ich kierunku.

### 2.1 Opis budowy modelu autonomicznej mobilnej platformy transportowej

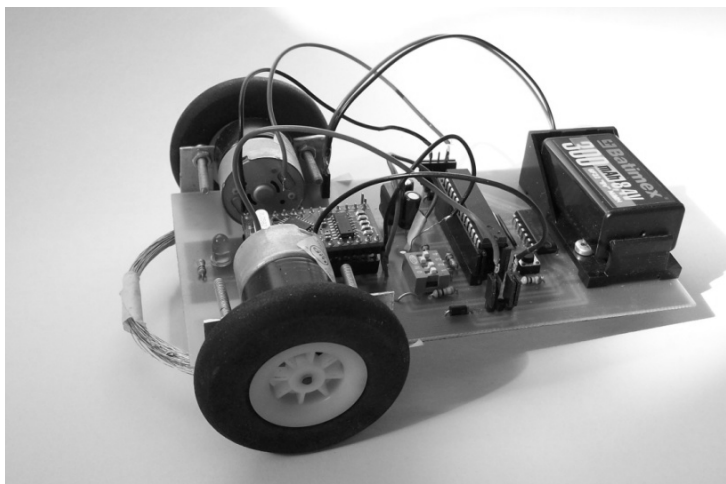
Podstawowymi elementami modelu autonomicznej mobilnej platformy transportowej są:

- mikroprocesorowy układ sterowania wraz układem wykonawczym;
- elementy napędowe i jezdne modelu;
- układ zasilania;
- elementy konstrukcyjne i nośne modelu.

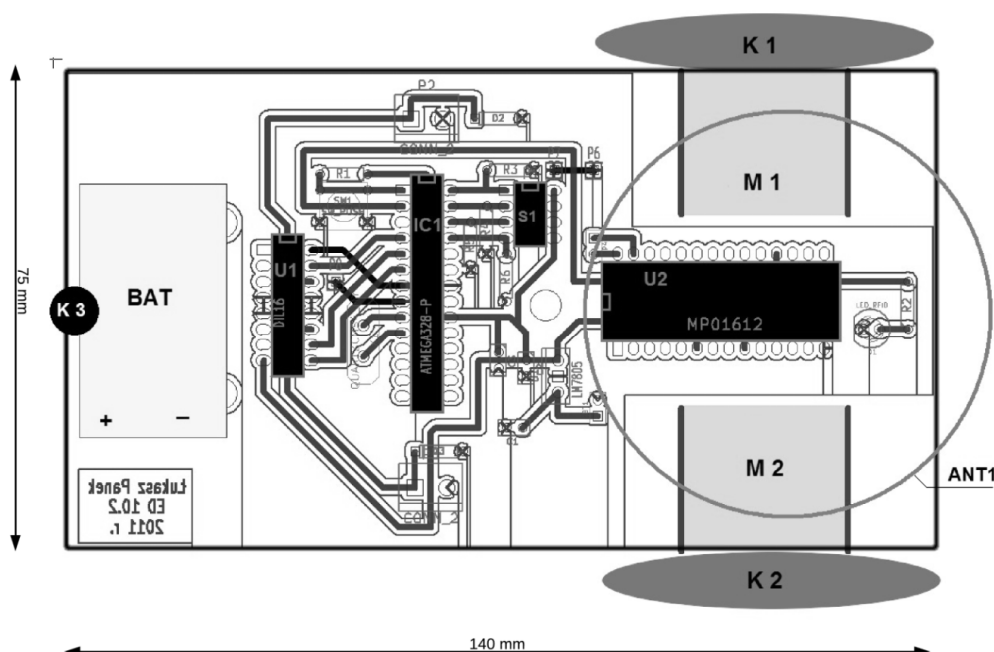
Głównymi podzespołami elektrycznymi, na które składa się układ zarządzania i sterowania pracą modelu platformy mobilnej są:

- mikrokontroler AVR Atmega 328P;
- moduł RFID MP01612 wraz anteną;
- sterownik silników L293 NE;
- dwa silniki prądu stałego wraz z przekładniami zmniejszającymi prędkość obrotową;
- graficzny interfejs komunikacyjny z panel sterowania;
- bateryjny układ zasilania modelu.

Podstawowe elementy konstrukcyjne i główne elementy układu sterowania i kontroli modelu AMPT zostały przedstawione na rys. 1. Schemat i rozmieszczenie głównych elementów platformy został przedstawiony na rys. 2.



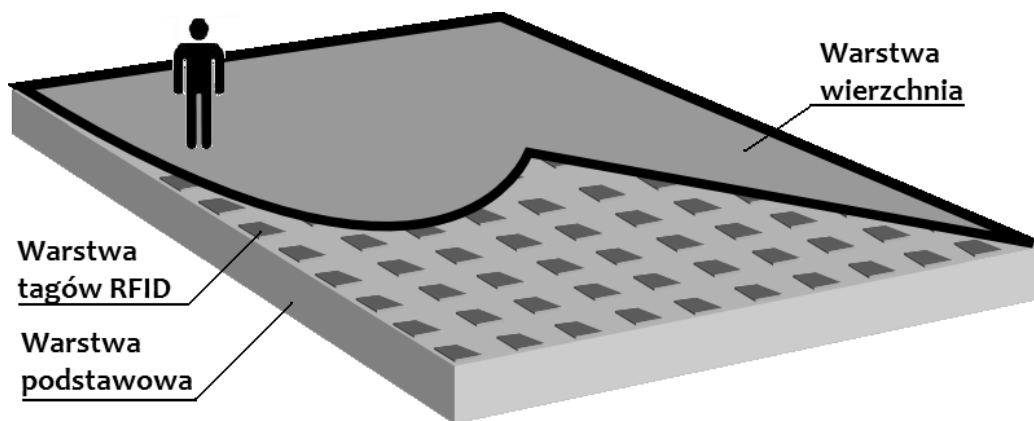
Rys. 1. Model autonomicznej mobilnej platformy transportowej – główne elementy modelu



Rys. 2. Budowa pojazdu autonomicznego: K1, K2 – koła napędowe, K3 – koło samonastawne, M1, M2 – silniki napędowe, ANT1 – antena modułu RFID, U2 – moduł RFID MP01612, S1 – panel sterowania, IC1 – mikrokontroler Atmega 328p, U1 – sterownik silników L293 NE, BAT – bateryjne zasilanie modelu

## 2.2 Charakterystyka podłoża dla modelu autonomicznej mobilnej platformy transportowej

Dla prezentowanej konstrukcji modelu zdecydowano się na ułożenie podłoża zbudowanego z elementów zawierających tagi RFID i umieszczenie ich na płaszczyźnie, po której porusza się pojazd. Jest to rozwiązanie racjonalne pod względem wykonania i przy tym najbardziej naturalne. Umożliwia zamontowanie tagów RFID pod powierzchnią podłoża (rys. 3), co czyni taki system niewidocznym dla człowieka i niesprawiającym problemów podczas normalnego użytkowania obiektu. Do budowy siatki wykorzystano pasywne tagi RFID. Są one najlepszym rozwiązaniem w przypadku budowy orientacyjnej siatki tagów RFID o znanej topografii układu odniesienia dla mobilnych jednostek transportowych. Raz umieszczone w podłożu umożliwiają pracę bez konieczności ingerencji w ich działanie nie wymagają dodatkowego zasilania oraz są układami bardzo niezawodnymi. Zamontowanie w pomieszczeniu układu zasilania rozproszony w podłożu lub prace konieczne do wykonania przy ewentualnej wymianie układów zasilających tag RFID w przypadku zasilania bateryjnego umieszczony pod podłogą jest kłopotliwe i mija się w tym przypadku z celem stosowania technik RFID. Również budowa instalacji elektrycznych zasilających tagi niepotrzebnie zwiększa koszty i zmniejsza niezawodność konstrukcji [3, 4, 5, 7].



Rys. 3. Rozmieszczenie znaczników RFID w podłożu pomieszczenia

Do budowy konstrukcji podłoża dla modelu zastosowano kwadratowe płytki, wycięte z tworzywa sztucznego z umieszczonym wewnątrz tagiem RFID (rys. 4). Panelowa forma podłoża pozwoliła na wykorzystaniem tych samych tagów RFID do budowy siatek orientacyjnych o różnej topografii. Umożliwia to analizę różnych strategii sterowania.

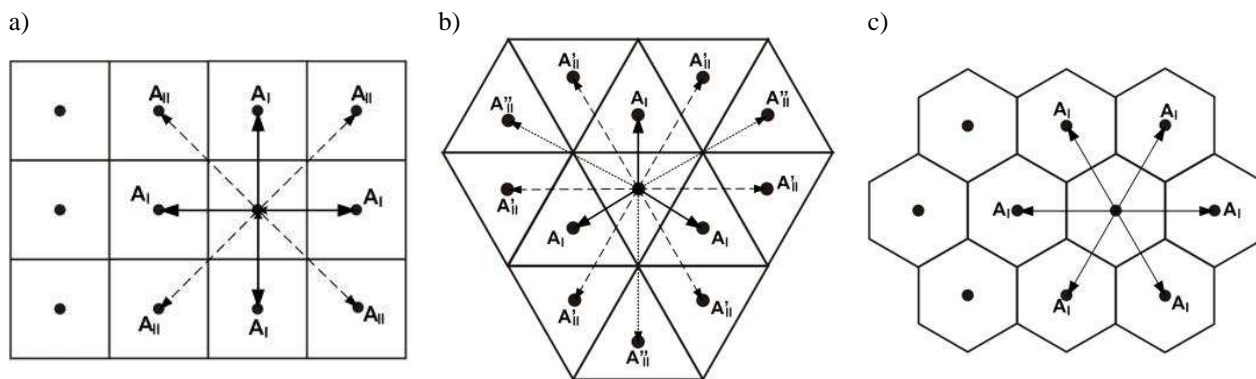


Rys. 4. Podłoże testowe - konstrukcja pojedynczego pola kontrolnego

### 2.3 Analiza topografii siatek orientacyjnych z tagami RFID podłoża dla mobilnej platformy transportowej

Topografia rozmieszczenia tagów RFID w podłożu i tworzenie charakterystycznego układu siatki orientacyjnej podłoża jest kluczowym elementem przy wyborze strategii procesu nawigacji. Na podstawie charakterystycznego układu elementów informacyjnych (tagów RFID) możliwe jest nie tylko określenie aktualnego położenia obiektu, ale także wybór dalszej strategii dotyczącej kontynuacji procesu przemieszczania się oraz określenia toru ruchu. W artykule została przeprowadzona analiza dotycząca trzech charakterystycznych topografii rozmieszczenia tagów RFID tworzących:

- siatkę kwadratową (rys. 5.a);
- siatkę trójkątną (rys. 5.b);
- siatkę sześciokątną (rys. 5.c).



Rys. 5. Topografia siatek orientacyjnych: a) kwadratowa, b) trójkątna, c) sześciokątna

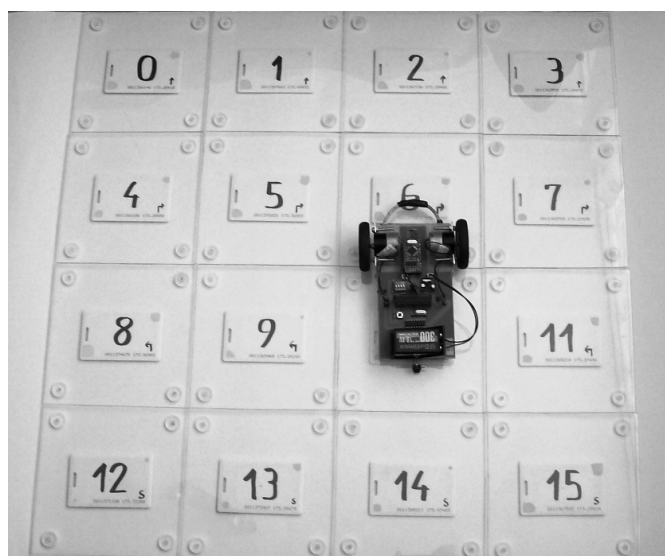
Tak skonstruowane siatki orientacyjne umożliwiają określenie reguł nawigacyjnych dla sterowanego pojazdu oraz wyznaczenie toru jazdy między aktualnym położeniem pojazdu a punktem końcowym będącym celem procesu nawigacyjnego. W celu określenia podstawowych wytycznych dla procesu sterowania istotne jest określenie wzajemnych powiązań między punktami orientacyjnymi siatek. W tym celu zostaną określone dwa rodzaje sąsiedztwa między poszczególnymi elementami każdej z siatek: sąsiedztwo I i II stopnia. Sąsiedztwo I stopnia między elementami siatki to takie, w których podstawowe elementy tworzące charakterystyczny układ siatki przylegają do siebie bokami. Natomiast sąsiedztwo II stopnia występuje w przypadku posiadania tylko wspólnego punktu styczności między podstawowymi elementami tworzącymi układ siatki. Wyniki dotyczące analizy rozkładu elementów siatki na proces dotyczący zagadnień nawigacyjnych zostały przedstawione w tab. 1.

Tab. 1. Rozkład punktów i kątów charakterystycznych dla różnych układów siatek orientacyjnych

Rodzaj siatki	Kwadratowa	Trójkątna	Sześciokątna
Występowanie sąsiedztwa I stopnia	tak	tak	tak
Występowanie sąsiedztwa II stopnia	tak	tak	nie
Ilość pól z sąsiedztwem I stopnia	4	3	6
Ilość pól z sąsiedztwem II stopnia	4	9	0
Kąt pomiędzy elementami tworzącymi sąsiedztwo I stopnia	90°	120°	60°
Minimalny kąt między sąsiadującymi komórkami	45°	30°	60°

Na podstawie zamieszczonych w tab. 1 danych można wywnioskować, że najlepszą siatką orientacyjną jest siatka zbudowana z elementu sześciokątnego. Występują w niej tylko sąsiedztwa I stopnia, a w algorytmie sterowania nie trzeba wyróżniać żadnych z 6 kierunków. Najgorszym rozwiązaniem pod względem skomplikowania algorytmu sterowania jest układ o siatce trójkątnej. Występują w niej zarówno sąsiedztwa I i II stopnia, dodatkowym mankamentem są również trzy różne odległości pomiędzy sąsiadującymi znacznikami (tagami RFID) dla poszczególnych wyróżnionych kierunków. W siatce kwadratowa występują również sąsiedztwa I i II stopnia, ale odległości między punktami orientacyjnymi sąsiedztwa typu II są stałe i wynoszą 1,41 odległości między znacznikami sąsiedztwa typu I.

Za wyróżnieniem siatki kwadratowej (mimo występowania w niej obu rodzajów sąsiedztwa) przemawia fakt, że obecne ukształtowanie obiektów architektonicznych ma kształt prostopadłościanów, a rzuty poziome powierzchni mają charakter prostokątny, również rozkład elementów wyposażenia wnętrza i przebieg tras i ciągów komunikacyjnych ma charakter prostokątny. Dlatego w tworzonym algorytmie sterowania pojazdu przewidziane zostały cztery możliwe kierunki ruchu na siatce tego typu. Są to kierunki związane z sąsiedztwem liniowym poszczególnych pól i oznaczone zostały N, S, W, E. Z każdego punktu na siatce prostokątnej możliwe jest poruszanie się w tych kierunkach, wykluczając punkty leżące na brzegu siatki. Podczas ruchu pojazd musi nawigować tak, aby nie opuścić siatki (obszaru podłoża). Kierunki stanowiące połączenie między aktualnym położeniem obiektu a wskaźnikami w polach sąsiedztwa II, będą miały charakter uzupełniający, umożliwiający doprecyzowanie orientacji pojazdu i korygujący tor jazdy pojazdu. Na rys. 6 widoczne jest podłoże testowe dla pojazdu w kształcie siatki prostokątnej.



Rys. 6. Podłoże z zamodelowaną siatką prostokątną wraz z częścią napędową autonomicznej mobilnej platformy transportowej w trakcie ruchu

3. ALGORYTM I KONCEPCJA STEROWANIA MODELEM MOBILNEJ PLATFORMY TRANSPORTOWEJ

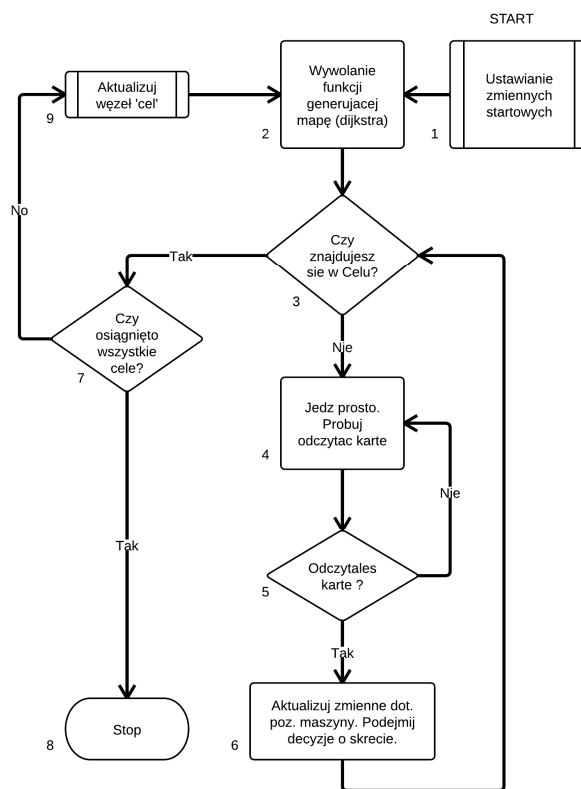
Strategia sterowania układem napędowym i nawigacyjnym autonomicznej mobilnej platformy zbliżona jest w działaniu do układu regulacji nadążnej. Rozwiązanie problemu dotarcia do celu nie jest znane w momencie rozpoczęcia procesu przemieszczania się, znany jest tylko sam cel nawigowania. Na początku procesu nawigowania nie są znane wartości, jakie powinny być zadane funkcji sterowania silnikami. Znaczący to, że układ nie posiada zdefiniowanych chwil w czasie, w których wykonany powinien być skręt lub jazda na wprost bądź inne działanie. Należy dodać, że pojazd nie posiada również informacji o własnym stanie, poza informacją o miejscu w siatce odniesienia, w którym ostatnio się znajdował. Jedynym jego układem zbierania informacji o położeniu jest antena i czytnik tagów RFID. Zastosowanie jednego typu sensora znacznie upraszcza konstrukcję, a specyficzne cechy technik RFID eliminują możliwość popełnienia błędu pomiaru (np. błędne oszacowanie odległości). Ponieważ sterowanie nie opiera się na odczycie jakichkolwiek wartości fizycznych. Zastosowanie jednego typu układu nawigacyjnego umożliwi również sprawdzenie możliwości działania takiego systemu jako systemu autonomicznego.

Praca robota rozpoczyna się od ustawienia przez użytkownika celu lub kilku celów, które osiągnąć powinien pojazd, ewentualnemu zdefiniowaniu przeszkód oraz wybraniu typu siatki tagów, w jakiej przeprowadzona będzie próba. Ustawienia początkowe zapisywane są w zmiennych globalnych programu sterowania. Następnie na podstawie zmiennych wprowadzonych przez użytkownika algorytm programu generuje graf oraz wyznacza tzw. tablicę poprzedników. Tablica poprzedników pełni główną rolę w wyborze kolejnych punktów, które powinny być osiągnięte, aby pojazd zbliżał się do celu. Proces sterowania trwa do momentu osiągnięcia przez platformę punktu celu.

Na proces nawigowania składają się polecenia dotyczące kierunku jazdy oraz komunikacji z czytnikiem RFID i próby odczytania informacji zawartej w tagu RFID. Jeśli pojazd (dokładnie jego antena) znajduje się nad tagiem to następuje odczytanie informacji zawartej w tagu RFID, przekazanie numeru taga RFID do jednostki głównej układu sterowania i powiązanie numeru odczytanego taga RFID z numerem wierzchołka w grafie. Jeśli nie udało się odczytać numeru taga RFID, czy to w przypadku błędu czy tego, że pojazd znajduje się w przerwie między tagami, kontynuowana jest jazda na wprost. W przypadku pozytywnie zakończonej operacji odczytania numeru taga RFID program aktualizuje główną zmienną – strukturę nazwaną w programie „POZ” („pozycja”), informującą o aktualnej, poprzedniej i oczekiwanej następnej pozycji robota. Są to informacje potrzebne do skonstruowania wektorów poruszania się.

Kiedy pojazd dotrze do wyznaczonej pozycji opisanej, jako „cel”, główna pętla algorytmu zostaje zakończona i następuje sprawdzanie czy lista zdefiniowanych celów jest pusta. Jeśli tak jest robot kończy działanie, silniki są zatrzymywane a ponowne uruchomienie może nastąpić poprzez wciśnięcie przycisku „RESET”. Jeśli na liście znajdują się jeszcze cele to pojazd rozpoczyna natychmiast pracę mającą na celu osiągnięcie brakujących a zdefiniowanych celów. Ponownie generowany jest graf, tym razem dla innego celu (kolejnego z listy) i cała procedura powtarza się, aż do osiągnięcia wszystkich celów.

Schemat ideowy algorytmu strategii sterowania został przedstawiony na rys. 7.



Rys. 7. Ogólny algorytm sterowania przemieszczaniem się platformy transportowej

### 3.1 Określanie toru jazdy dla mobilnej platformy transportowej

Określenie aktualnego toru jazdy pojazdu odbywa się na podstawie informacji odczytanych z tagów RFID zamontowanych w podłożu. Na podstawie ostatniego poprawnie odczytanego punktu informacyjnego i punktu, w którym aktualnie znajduje się pojazd, określona zostaje jego umowna orientacja na siatce, wyznaczony zostaje kontrolny wektor poruszania opisujący zrealizowany etap przemieszczania się pojazdu. Sterowanie procesem przemieszczania pojazdu odbywa się na zasadzie określania nowego kierunku jazdy między dwoma zakładanymi następującymi i sąsiadującymi ze sobą punktami siatki. Ustalanie nowego kierunku jazdy wykonywane jest poprzez zmianę kąta ustawienia układu napędowego pojazdu, a przez to wyznaczenie nowego kierunku jazdy. Po ustaleniu nowego kierunku jazdy przemieszczanie odbywa się tylko w kierunku na wprost, aż do osiągnięcia kolejnego zakładanego punktu nawigacyjnego (tagu RFID). Jeżeli pojazd zlokalizował założony punkt nawigacyjny kończy się bieżący etap nawigacji, a zostaje wznowiona procedura wyznaczania nowego wektora poruszania i tak, aż do osiągnięcia założonego celu. Momentem, w którym odbywa się podejmowanie decyzji dotyczącej kolejnego kroku nawigacyjnego jest moment znalezienia nowego punktu orientacyjnego i określenie wykonanego wektora przemieszczenia.

Do wyznaczania algorytmu trasy między aktualną pozycją pojazdu a miejscem przeznaczenia wykorzystany został algorytm Dijkstry [1]. Algorytm Dijkstry opiera swoje działanie na własności grafów i określa sposób wyznaczenia optymalnej (najkrótszej) drogi między dwoma punktami zorientowanymi w przestrzeni. Ogólny opis algorytmu zawiera się w stwierdzeniu, że „*najkrótsza ścieżka pomiędzy wybranymi wierzchołkami grafu zawiera inne najkrótsze ścieżki*” [1]. Ze względu na to, że algorytm Dijkstry wykonuje obliczenia na grafach, potrzebne było przedstawienie siatki tagów RFID jako grafu. Graf ten zapisano w postaci listy sąsiedztwa. Jest to lista, która dla każdego punktu siatki orientacyjnej (wierzchołków grafu) określa jego sąsiadów, z którymi ma on połączenie (jest to lista węzłów wychodzących). W zastosowanych siatkach tagów RFID, węzeł i jego sąsiedzi reprezentowani są przez *poprawną pozycję* i pozycje sąsiednie, na które może przemieścić się robot zgodnie z regułami ruchu.

### 3.2 Algorytm procedury odczytu tagu RFID

Proces odczytania tagu RFID podzielono na dwa etapy. W pierwszym, dokonuje się odczytania fizycznego numeru karty RFID, w drugim następuje dopasowanie tego numeru do danych zapisanych w pamięci mikroprocesorowego układu sterowania pojazdu i nadanie mu reprezentacji, z której można wywnioskować o położeniu tagu RFID w siatce – łączy się numer karty z numer węzła. Kiedy pod anteną czytnika znajdzie się tag RFID, następuje odczyt 64 bitowego (8 kB danych) numeru taga RFID i wysłanie tych danych do bufora portu szeregowego UART mikrokontrolera. W programie sprawdzany jest na bieżąco stan bufora UART. Jeśli nie jest on pusty, następuje odczyt pierwszych 16 bitów numeru taga RFID. Odczyt tylko ograniczonej do 16-bitów numerów identyfikacyjnych tagu RFID spowodowany był chęcią ograniczenia koniecznych do zastosowania zasobów pamięci i niewielką ilością użytych do budowy układu siatki znaczników. Numery tagów użytych do budowy siatki mają długość 64 bitów, jednak wszystkie konkretne sztuki różnią się między sobą już na poziomie pierwszych 16 bitów numeru ID. Wystarczające jest odczytanie 2kB danych z bufora UART aby rozróżnić wszystkie tagi z zestawu. Skraca się dzięki temu czas odczytu i identyfikacji karty. Oczywiście w przypadku użycia większej ilości kart nie można dokonać takiego uproszczenia.

### 3.3 Ograniczenia dla procesu przemieszczania się i wyznaczonego algorytmu procesu sterowania

Przedstawiona w pracy koncepcja zarządzaniem procesem sterowania i przemieszczania się autonomicznej mobilnej platformy transportowej opierała się na wykorzystaniu w procesie nawigowania elementów systemu RFID. Badania przeprowadzone na modelu miały na celu określenie przydatności takiej technologii w warunkach rzeczywistych. Opracowany algorytm zakładał nawigowanie ruchu platformy w znanych ściśle określonych i opisanych warunkach. Możliwe jest określenie wielkości siatki, poprzez zwielokrotnienie liczby punktów nawigacyjnych (tagów RFID) oraz określenie priorytetów i znaczenia poszczególnych znaczników. Dzięki temu możliwe jest określenie przestrzennej mapy powierzchni roboczej oraz wyznaczenie stref zabronionych, stref sąsiadujących ze strefami zabronionymi, stref obwodowych terenu. Daje to możliwość wpływania na przebieg procesu sterowania. Aby to było możliwe należy wprowadzić dane do pamięci układu sterowania. Jednak informacje o występujących w obiekcie przeszkodach dotyczą tylko przeszkód statycznych, niezmiennych podczas realizowania procesu nawigacji i przemieszczania się pojazdu. Ograniczeniem zaproponowanego rozwiązania jest brak możliwości zmiany realizowanego procesu sterowania w przypadku wystąpienia nieznanymi i niezdefiniowanymi przeszkodami. To ograniczenie wynika, z faktu, że system sterowania opiera się na statycznej topografii obszaru roboczego.

Zastosowane rozwiązanie może komplikować lub uniemożliwiać skuteczną realizację procesu sterowania autonomicznej platformy transportowej. Może wpływać również na bezpieczeństwo pracy w obiekcie. Niezidentyfikowaną przeszkodą może być człowiek znajdujący się w dostępnej dla platformy przestrzeni poruszania się.

Rozwiązaniem tego problemu może być wyposażenie układu sterowania w inne systemy wykrywania przeszkód (np. wykorzystanie czujników zbliżeniowych) i odpowiednia modyfikacja procesu sterowania.

Drugim rozwiązaniem jest konieczność wyposażenia użytkowników i personel przebywający w obiekcie w elementy systemu RFID (tagów) i nadanie im w programie sterującym pracą autonomicznej mobilnej platformy transportowej priorytetów określających teren zabroniony.

Przedstawione rozwiązania niosą za sobą konieczność dynamicznych aktualizacji procesu sterowania, ale umożliwiają podniesienie poziomu bezpieczeństwa oraz skuteczności realizowania procesu sterowania i nawigacji.

#### 4. WNIOSKI

Przeprowadzone testy i obserwacje zachowania się modelu mobilnej platformy transportowej pozwalają stwierdzić, że systemy nawigacji zbudowane z elementów systemu RFID umożliwiają przeprowadzenie skutecznego procesu sterowania i nawigowania pojazdu.

Autonomiczne platformy mobilne same planują i określają trasę poruszania się w wyznaczonym obszarze. W pewnych sytuacjach mogą stanowić zagrożenie dla otoczenia, w tym również dla człowieka. Podniesienie poziomu bezpieczeństwa, związanego z ograniczeniem potencjalnych kolizji możliwe jest poprzez dynamiczną modyfikację topografii obszaru poruszania się. W pracy wykazano, że wykrywanie przeszkód mobilnych jest utrudnione, ponieważ pojazd reaguje tylko na obiekty wyposażone w tagi.

Przeprowadzone testy skuteczności procesu nawigacyjnego wykazały przydatność użytego w programie sterowania algorytmu Dijkstry. Na podstawie informacji zbieranych z punktów nawigacyjnych (tagów RFID) pojazd prawidłowo określał swoje położenie w obszarze i prawidłowo wyznaczał kolejny etap nawigacyjny. Zastosowany do realizacji procesu nawigowania algorytm umożliwiał, poprzez określanie na bieżąco kolejnych kroków nawigacyjnych, dynamiczne reagowanie na zaistniałe błędy w nawigowaniu. Do określenia kolejnego etapu nawigacyjnego umożliwiającego zbliżenie się do miejsca przeznaczenia potrzebna była informacja o kierunku aktualnie przemierzonego odcinka. Taka informacja była otrzymywana na podstawie sygnałów z dwóch ostatnich tagów RFID.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Cormen T.H., et al.: Wprowadzenie do algorytmów, Wydawnictwo WNT, Warszawa, 2001
- [2] Gueaieb W., et al.: *A modular cost-effective mobile robot navigation system using RFID technology*. Journal of Communications, nr 42/2009, s. 89-95.
- [3] Jankowski-Mihułowicz P.: et al., *Identyfikatory RFID jako sensor w systemie nawigacji autonomicznych obiektów*, Elektronika nr 6/2010, s. 150-153.
- [4] Jankowski-Mihułowicz P. et al.: *Wpływ struktury przestrzennego rozmieszczenia identyfikatorów-czujników RFID na jakość procesu sterowania autonomicznych obiektów*, Elektronika nr 6/2010, s. 154-157.
- [5] Jia S., Sheng J., *Development of localization method of mobile robot with RFID technology and stereo vision system*, 2008.
- [6] Johansson R., Saffiotti A.: *Navigating by stigmergy: a realization on an RFID floor for minimalistic robots*, Robotics and Automation, 2009 s. 245-252.
- [7] Kalita W., Skoczylas M.: *System nawigacji autonomicznych obiektów mobilnych z wykorzystaniem techniki RFID*, Elektronika, 7/2010, s. 81-85.
- [8] Lipski W.: *Kombinatoryka dla programistów*. Wydawnictwo WNT, Warszawa, 1989
- [9] Tralie C., Fellow R.E.U.: *Robotic navigation with RFID waypoints*, Computer Engineering, s. 1-25