

*Autonomiczna platforma mobilna,  
Konstrukcja mechaniczna,  
Napęd i sterowanie*

Jerzy ZAJĄC<sup>1</sup>  
Krzysztof KRUPA  
Adam SŁOTA  
Tomasz WIEK

### **AUTONOMICZNA PLATFORMA MOBILNA DO REALIZACJI TRANSPORTU MIĘDZYOPERACYJNEGO – PROJEKT WSTĘPNY**

*Podsystem transportowy pełni ważną rolę w systemie produkcyjnym. W pracy zaprezentowano projekt wstępny trzykołowej, zasilanej akumulatorowo, autonomicznej platformy mobilnej służącej do realizacji zadań transportowych. Platforma jest napędzana silnikiem elektrycznym prądu stałego. Ponadto została wyposażona w laserowe systemy bezpieczeństwa i nawigacji. Platforma może samodzielnie realizować zadania transportowe bądź pełnić rolę ciągnika. System sterowania umożliwia pracę ręczną i automatyczną.*

### **AN AUTONOMOUS MOBILE PLATFORM FOR INTEROPERATIONAL TRANSPORT – INITIAL DESIGN**

*Material transport subsystem plays a significant role in a production system. The paper presents the initial design of an autonomous, battery powered, three-wheel mobile platform that runs on the plant floor. The platform is driven by a DC motor. It is equipped with laser obstacle detection system and laser navigation system. It can carry loads or tow objects behind it in trailers. Control system executes the manual and automatic control modes.*

## **1. WSTĘP**

System transportu wewnątrzzakładowego stanowi bardzo ważny element procesu produkcyjnego. W warunkach polskiego przemysłu, zasadnicze czynności transportowe realizowane są zazwyczaj przy udziale człowieka wykorzystującego platformy (wózki) transportowe napędzane siłą mięśni, bądź też wyposażone w odpowiedni napęd. Dla przedsiębiorstw, w których czynności transportowe w systemie produkcyjnym stanowią wąskie gardło i dla których efektywność działania podsystemu transportowego ma istotne znaczenie takie rozwiązanie nie jest akceptowalne. Niezbędna jest więc racjonalna modernizacja podsystemu transportu ograniczająca udział człowieka poprzez zastosowanie

---

<sup>1</sup>Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Zakład Zautomatyzowanych Systemów Produkcyjnych  
31-864 Kraków, Al. Jana Pawła II 37. Tel: + 48 12 374-32-50, Fax: + 48 12 374-32-02,  
e-mail: {zajac, krupa, slota, wiek}@mech.pk.edu.pl

automatycznych środków transportowych (AGV) zbudowanych przy wykorzystaniu nowoczesnych rozwiązań automatyki przemysłowej i informatyki.

Autonomiczne platformy mobilne zwane też robocarami są stosowane na świecie w wielu przedsiębiorstwach charakteryzujących się wysokim poziomem automatyzacji oraz wykorzystania technologii informatycznych. Na przełomie XX i XXI wieku w zastosowaniach przemysłowych wykorzystywano ok. 20000 robocarów. Należy tu jednak podkreślić, że w polskim przemyśle zastosowania autonomicznych platform mobilnych są stosunkowo rzadkie. Wynika to przede wszystkim z wysokich kosztów tego rozwiązania. Biorąc jednak pod uwagę tendencję spadkową cen urządzeń automatyki przemysłowej, urządzeń nawigacyjnych oraz komputerów należy się spodziewać zwiększenia zainteresowania polskiego przemysłu tą technologią.

Wprowadzanie w przedsiębiorstwach podsystemów transportu międzyoperacyjnego wykorzystujących autonomiczne wózki mobilne oraz integracja informacyjna i funkcjonalna tych podsystemów z podsystemami wytwarzania realizowana jest poprzez podsystem sterowania produkcją. Jest to bardzo złożone zadanie i wymaga rozwiązania wielu istotnych problemów. Do najważniejszych z nich zaliczyć można [2][3]: rozmieszczanie dróg transportowych w przedsiębiorstwie, harmonogramowanie zadań transportowych, wyznaczanie tras jazdy wózków, rozwiązywanie konfliktów w trakcie realizacji procesów współbieżnych (kolizje, zakleszczenia), pozycjonowanie wózków oczekujących na przydzielenie zadania transportowego, wyznaczanie niezbędnej liczby wózków czy też zarządzanie problematyką ładowania akumulatorów. Inną zasadniczą kwestią jest zapewnienie bezpieczeństwa w trakcie realizacji zadań transportowych.

Dominującym historycznie w literaturze spojrzeniem na podsystem transportowy, z punktu widzenia problemu sterowania nim, jest widzenie go jako systemu scentralizowanego i działającego w warunkach deterministycznych. Postęp w technologiach informatycznych spowodował, że w ostatnich latach zaczęły pojawiać się publikacje dotyczące wykorzystania technologii agentowych (rozproszonych) [1][4] do sterowania podsystemem transportowym wykorzystującym autonomiczne platformy mobilne. Prace te otwierają nowy obszar badań w zakresie budowy rozproszonych, rekonfigurowalnych systemów sterowania produkcją, mających zdolność do racjonalnego działania także w przypadku wystąpienia zakłóceń.

W niniejszej pracy autorzy opisują pierwszy etap realizacji ambitnego zadania zbudowania podsystemu transportu międzyoperacyjnego składającego się z autonomicznych platform mobilnych. Pierwszym etapem do realizacji tego celu jest wykonanie prototypu autonomicznego wózka mobilnego, który pełnić będzie dwie funkcje: samodzielnie przewozić określone grupy towarowe lub służyć jako napęd do istniejących wózków transportowych – czyli pełnić rolę ciągnika.

W kolejnym rozdziale przedstawione zostaną założenia przyjęte przy konstruowaniu platformy, omówiony projekt części mechanicznej oraz zaprezentowany i omówiony ideowy schemat układu sterowania autonomiczną platformą mobilną.

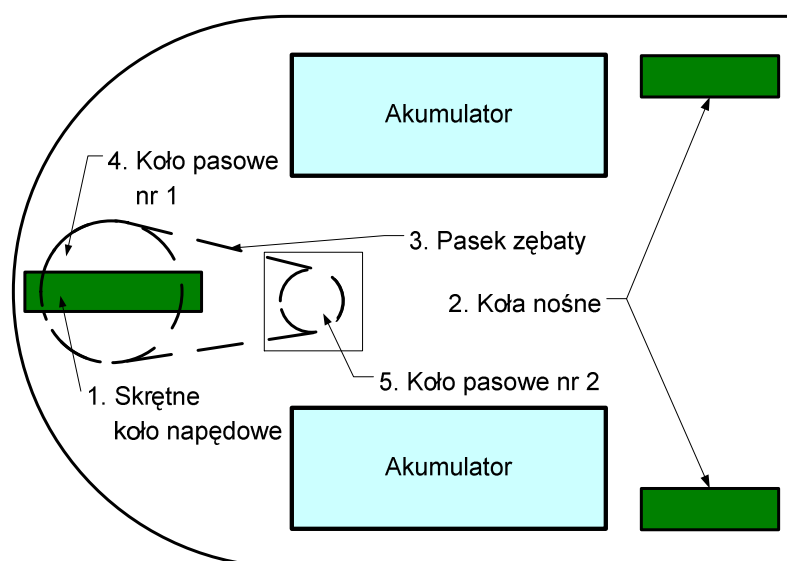
## **2. PLATFORMA MOBILNA**

### **2.1 Założenia konstrukcyjne i projekt części mechanicznej**

Podstawowy cel projektu to budowa prototypu autonomicznej platformy mobilnej dla celów transportu międzyoperacyjnego z ukierunkowaniem na zastosowanie w małych i

średniej wielkości przedsiębiorstwach. Dlatego podstawowe założenia (postulaty), przyjęte przy opracowaniu projektu platformy, to możliwie prosta konstrukcja i niskie koszty wykonania.

Ze względu na zwartość konstrukcji i prostotę budowy platformy wybrano trójkołowy układ jezdny (rys. 1). Koło napędowe (1) jest zintegrowane z silnikiem prądu stałego i umieszczone z przodu platformy. Z tyłu, umieszczono dwa koła nośne (2). Zmianę kierunku jazdy uzyskuje się przez obrót koła napędowego wokół osi pionowej. Napęd ruchu skręcania koła napędowego realizowany jest za pośrednictwem przekładni z paskiem zębatym (3). Tak przyjęte rozwiązanie pozwala na zwartą budowę platformy, co z kolei daje duże możliwości manewrowe nawet w ciasnych pomieszczeniach.



Rys.1. Schemat układu jezdny platformy mobilnej

Zestawienie wartości podstawowych parametrów eksploatacyjnych przyjętych przy opracowaniu konstrukcji mechanicznej przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Parametry eksploatacyjne platformy mobilnej

Nazwa parametru	Wartość	Jednostka
Długość platformy	1	m
Szerokość platformy	0,7	m
Maksymalna prędkość ruchu po prostej	1	m/s
Przyspieszenie liniowe	0,3	m/s <sup>2</sup>
Minimalny promień skrętu	0,7	m
Maksymalna prędkość liniowa ruchu po łuku	0,4	m/s
Masa własna platformy	150	kg
Dopuszczalna masa ładunku	100	kg

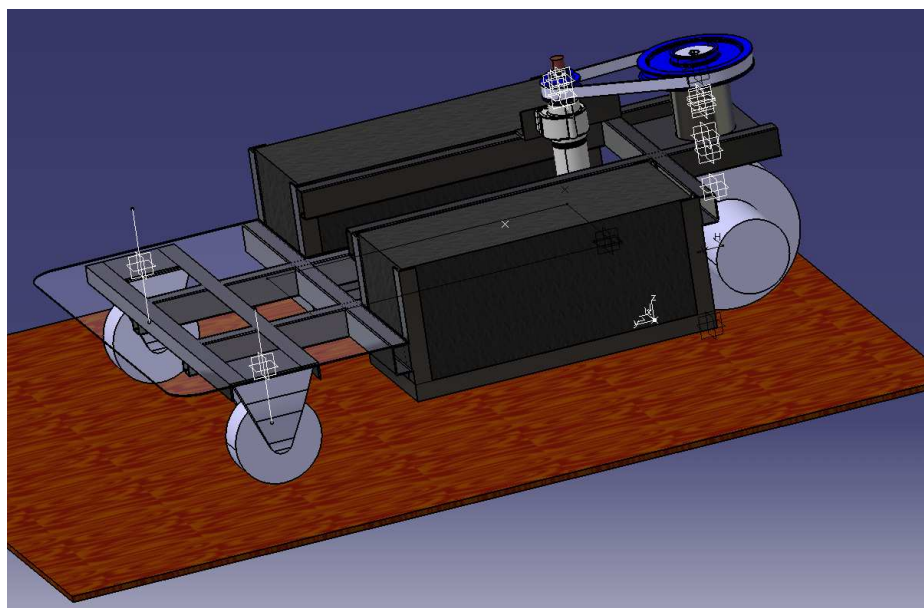
Na podstawie parametrów z tablicy 1 oraz przeprowadzonych pomiarów oporów ruchu oszacowano wymagane parametry układów napędowych:

- prędkość obrotowa koła napędowego (przy średnicy 0,25 m) – 76 obr/min,
- moment obrotowy koła napędowego, (przy średnicy 0,25 m) – 34 Nm,
- prędkość skrętu koła napędowego – 8,3 obr/min,
- moment obrotowy skrętu koła napędowego – 15 Nm.

Dla określonych powyżej wymagań dobrano elementy układów napędowych o parametrach:

- silnik napędu głównego: moc 1200 W, prędkość obrotowa 90 obr/min, moment obrotowy 4,9 Nm,
- silnik z reduktorem realizujący skręt koła napędowego: moc 55 W, prędkość obrotowa 57 obr/min, moment obrotowy 134 Nm,
- przekładnia pasowa z paskiem zębatym o przełożeniu 1:3.

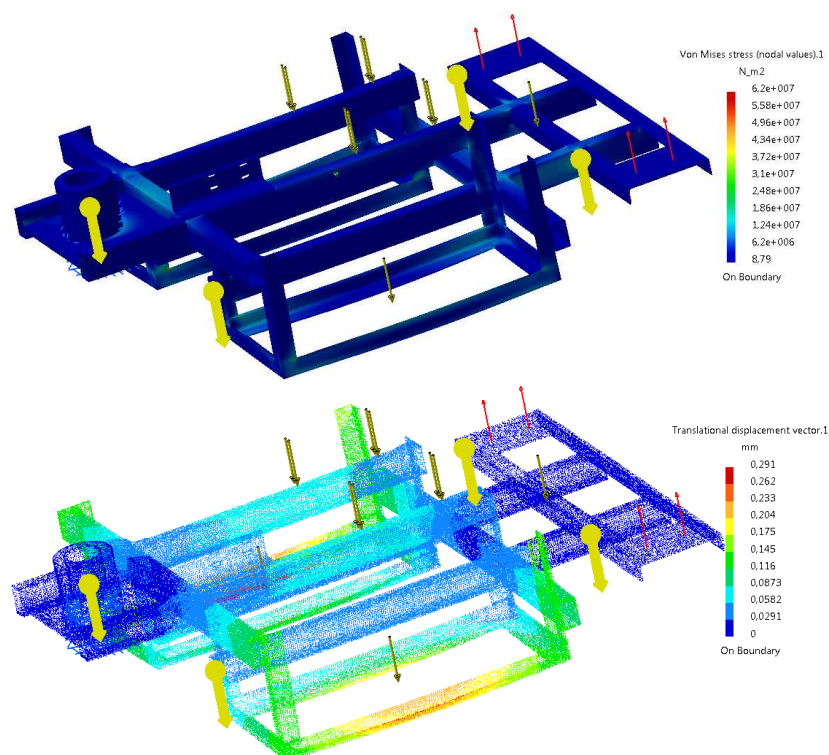
Na rysunku 2 przedstawiono widok wirtualnego modelu 3D platformy mobilnej. Układ nośny platformy to konstrukcja spawana z kształtowników (profilu o przekroju prostokątnym i kątowników). Przestrzeń ładunkowa składa się z dwóch części: nad kołami nośnymi oraz nad akumulatorami.



Rys.2. Konstrukcja mechaniczna platformy – projekt wstępny

Dla opracowanej konstrukcji ramy nośnej przeprowadzono uproszczoną analizę wytrzymałościową. Sprawdzone wartości naprężeń zredukowanych oraz wielkość ugięcia dla przyjętego obciążenia 100 kg (rozłożonego po 50 kg nad kołami nośnymi oraz nad

akumulatorami) z uwzględnieniem masy akumulatorów (45 kg każdy) oraz masy własnej ramy. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 3.



Rys.3. Wyniki analizy wytrzymałościowej ramy nośnej platformy

Maksymalne wartości naprężeń występują w okolicy mocowania kół tylnych i wynoszą 62 MPa. Maksymalne ugięcie o wartości 0,3 mm występuje w miejscu umieszczenia akumulatorów. Oszacowana maksymalna niedokładność obliczeń wynosi 14%.

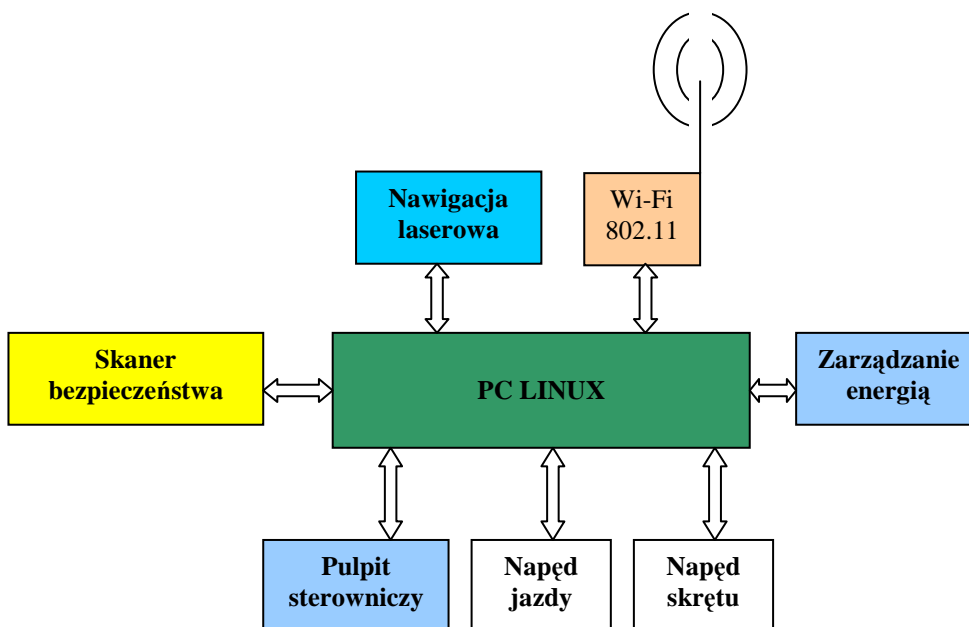
## 2.2 Napęd i sterowanie

Układ sterowania jest zasadniczym elementem autonomicznej platformy mobilnej. Musi zapewnić integrację wszystkich jej podzespołów oraz poprawnie realizować założone funkcje. Poza najważniejszą i oczywistą, jaką jest sterowanie zapewniające przemieszczanie się platformy mobilnej w trybie ręcznym lub automatycznym, układ sterowania, zapewnić musi również:

- detekcję pojawiających się w trakcie ruchu przeszkód,
- nawigację,
- komunikację bezprzewodową z innymi elementami tworzącymi podsystem transportu międzyoperacyjnego,

- diagnostykę i monitoring napędów,
- interakcje z użytkownikiem (operatorem) poprzez pulpit sterowniczy,
- zarządzanie energią.

Praktycznie każda z tych funkcji wiąże się z wyposażeniem platformy w dodatkowe i często specjalizowane urządzenia. Bardzo ważne jest więc przeprowadzenie gruntownej analizy na etapie projektowania w celu wyspecyfikowania właściwego wyposażenia, które będzie spełniać swoją funkcję oraz integrować się z całością systemu sterującego. Jedną z podstawowych czynności jest ustalenie interfejsu wymiany danych między podsystemami realizującymi wymienione wyżej funkcje. Mnogość i różnorodność standardów wymiany informacji sprawia, że w złożonych systemach, a system sterowania platformą mobilną niewątpliwie taki jest, praktycznie niemożliwe jest ograniczenie się do jednego typu interfejsu wymiany danych. Na rysunku 4 przedstawiono schemat blokowy systemu sterowania platformą, a następnie opisano każdy z jej elementów.



Rys.4. Schemat blokowy układu sterowania

#### Elementy tworzące system sterowania.

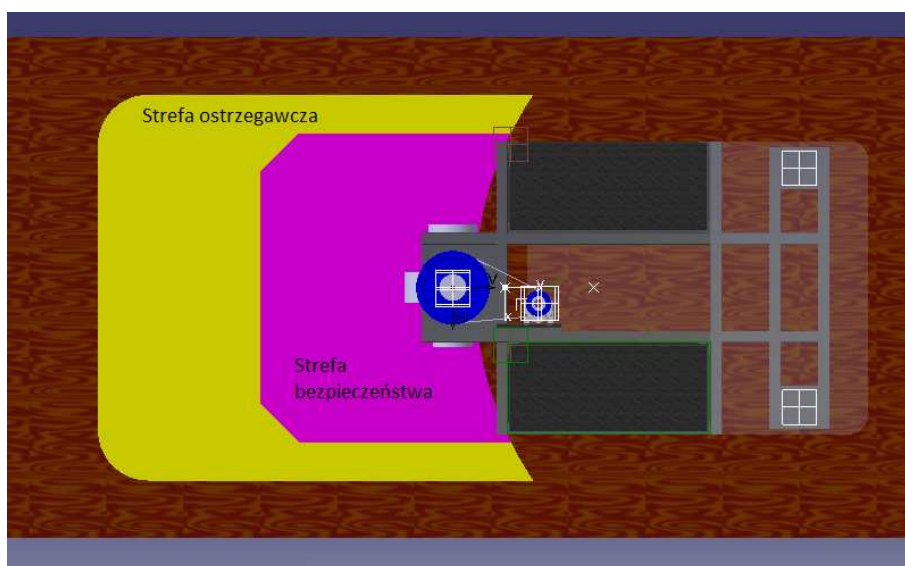
##### Jednostka centralna.

Jednostką centralną układu sterowania stanowi specjalizowany komputer jedno płytowy kompatybilny z PC, wyposażony między innymi w moduł akwizycji danych oraz przetwornicę napięcia DC/DC pozwalającą zasilać komputer bezpośrednio ze źródła o napięciu od 5V do 28V. Dodatkowo komputer ten jest odporny na niekorzystne warunki środowiskowe, takie jak duża wilgotność, szeroki zakres temperatur pracy ( $-40^{\circ}\text{C} \div +85^{\circ}\text{C}$ )

oraz ponadprzeciętne drgania. Wszystkie te cechy są bardzo pożądane, a wręcz niezbędne w przypadku rozwiązań mobilnych. Komputer pracuje pod kontrolą systemu Linux z nakładką czasu rzeczywistego i integruje wszystkie pozostałe elementy tworzące układ sterowania.

### Podsystem detekcji przeszkód.

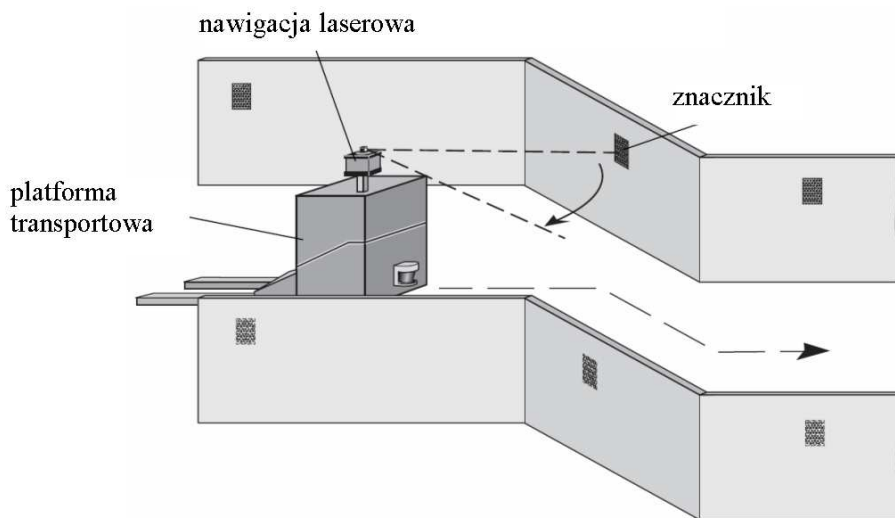
Podsystem wykrywania przeszkód został zbudowany na bazie laserowego skanera bezpieczeństwa [5]. Urządzenie to, przy pomocy wiązki światła laserowego skanuje zaprogramowane uprzednio obszary w poszukiwaniu przeszkód. Skaner, podczas programowania obszarów, umożliwia wytyczenie dwóch stref: ostrzegawczej i bezpieczeństwa. Pojawienie się przeszkody w każdej ze stref powoduje wystereowanie odpowiednich stanów na liniach I/O skanera, co z kolei przynosi się na pracę platformy. W przypadku naruszenia strefy ostrzegawczej następuje zmniejszenie prędkości jazdy oraz włączenie dźwiękowych i świetlnych sygnałów ostrzegawczych. Zachowanie takie ma za celu danie czasu na usunięcie się z toru jazdy przeszkody ruchomej (np. przechodzącego człowieka) oraz zredukowanie drogi hamowania w przypadku, kiedy przeszkoda nie zostanie usunięta i nastąpi naruszenie strefy bezpieczeństwa, co skutkuje bezwarunkowym zatrzymaniem. Podczas programowania stref należy pamiętać, aby strefa ostrzegawcza była większa niż strefa bezpieczeństwa, a ta z kolei większa niż droga hamowania platformy z pełnej prędkości oraz z pełnym obciążeniem. Dodatkową bardzo pożądaną funkcją laserowego skanera bezpieczeństwa jest powiązanie wielkości obu stref z aktualną prędkością platformy, co znacząco poprawia bezpieczeństwo oraz pozwala optymalizować prędkość jazdy. Poniższy rysunek przedstawia umiejscowienie strefy ostrzegawczej i strefy bezpieczeństwa.



Rys.5. System detekcji przeszkód z uwidocznionymi strefami

### Podsystem nawigacji.

Podsystem nawigacji jest jednym z najważniejszych podsystemów autonomicznej platformy mobilnej. Odpowiada za wyznaczenie rzeczywistego położenia i orientacji platformy w trakcie jazdy i w spoczynku. Spośród wielu systemów i sposobów nawigacji, najlepszym wydaje się system nawigacji laserowej bazujący na metodzie triangulacji [6]. Zasada działania polega na pomiarze kątów między odbiciami od specjalnych znaczników wirującej poziomo wiązki lasera (rys.6.). Rozmieszczenie znaczników jest zapisane w pamięci urządzenia nawigacyjnego i dzięki temu możliwe jest wyznaczenie aktualnej pozycji platformy mobilnej. Informacja o pozycji przesyłana jest do układu sterowania przez łącze szeregowo RS232. Prezentowany system nawigacji posiada pewne ograniczenia. Jednym z nich jest brak możliwości pracy tego systemu w nieznanym środowisku lub na otwartej przestrzeni z uwagi na konieczność występowania znaczników. Jednak w rozpatrywanym przypadku, kiedy platforma mobilna będzie realizowała zadania transportowe wewnątrz zakładu przemysłowego czy hali produkcyjnej, takie ograniczenia są nieistotne. Na etapie projektowania należy rozmieścić znaczniki tak, aby zawsze były widoczne co najmniej trzy. Inny problem, który należy rozwiązać, dotyczy nierówności podłoża, po którym przemieszcza się platforma. Nierówności te wpływają zasadniczo na wysokość znaczników. Zalety ze stosowania takiego systemu są nieocenione i znacznie wpływają na elastyczność całego systemu transportowego. Dzieje się tak, ponieważ szlaki transportowe są wirtualne, dzięki czemu mogą być szybko i łatwo dostosowywane do aktualnych potrzeb, inaczej niż w przypadku sztywnych szlaków transportowych umieszczonych na podłożu lub pod nim (namalowana linia, pętle indukcyjne, znaczniki magnetyczne, itp.) W przypadku zastosowania wirtualnych szlaków oraz systemu detekcji przeszkód platforma mobilna może autonomicznie podjąć próbę ominięcia przeszkody.



Rys.6. System nawigacji laserowej [6]



### **Komunikacja bezprzewodowa**

W systemach rozproszonych bardzo ważna jest możliwość komunikacji między ich elementami składowymi. Prezentowana platforma mobilna została wyposażona w moduł komunikacji bezprzewodowej w standardzie IEEE 802.11. Zastosowanie tego standardu uzasadnione jest jego zadowalającymi parametrami transmisji, niskim kosztem oraz dostępnością sprzętu w wykonaniu przemysłowym, który musi spełniać specyficzne kryteria ze względu na trudne, środowiskowe warunki pracy. Ponadto standard ten jest nieustannie rozwijany, co na etapie projektowania jest szczególnie ważne, aby wybierać rozwiązania przyszłościowe.

### **Interfejs użytkownika**

Interakcja z użytkownikiem zapewniona będzie przez pulpit sterowniczy umieszczony na platformie mobilnej. Zasadniczą jego częścią jest panel, na którym wyświetlane są parametry dotyczące pracy pojazdu. Ponadto na pulpicie znajdują się: przełącznik wyboru trybu pracy (ręczny, automatyczny, serwisowy), przycisku awaryjnego zatrzymania oraz złącza pod ręczny skaner kodów kreskowych oraz joystick do ręcznego manewrowania platformą. Dodatkowo status i parametry pracy będą dostępne zdalnie z komputera monitorującego.

### **Sterowanie i monitoring napędów**

Na platformie zamontowano dwa silniki elektryczne prądu stałego. Pierwszy z nich służy do napędu platformy i jest zespolony z kołem napędowym, przekładnią oraz hamulcem (rys. 7). Drugi zaś służy do zmiany kierunku jazdy platformy wykorzystując przekładnię z paskiem zębatym. Każdy z silników ma własny dedykowany sterownik, który połączony jest z jednostką centralną poprzez interfejs analogowy. W przypadku silnika jazdy zadawana jest prędkość, a w przypadku silnika skrętu pozycja.



*Rys.7. Silnik i sterownik koła napędowego*

### Zarządzanie energią

Prawidłowe zarządzanie energią oraz jej monitoring są szczególnie ważne przy urządzeniach zasilanych bateryjnie. Dlatego platforma mobilna została wyposażona w moduł zarządzania energią. Do jego zadań należy pomiar stanu naładowania akumulatorów, co w przypadku zastosowanych akumulatorów trakcyjnych, kwasowo-ołowiowych jest szczególnie ważne, gdyż nie można dopuścić do spadku napięcia poniżej wartości granicznej. Eksploatowanie akumulatora przy zbyt niskim napięciu powoduje bowiem zasiarczenie płyt ołowiowych, a co za tym idzie jego nieodwracalne uszkodzenie. Moduł zarządzania jest odpowiedzialny również za kontrolę procesu ładowania akumulatora. Platforma mobilna wyposażona jest w dwa akumulatory o napięciu 12V i pojemności 160Ah dla pięciogodzinnego prądu rozładowania.

### 3. WNIOSKI

W pracy przedstawiono wstępny zarys działań związanych z budową prototypu autonomicznej platformy mobilnej, która aktualnie znajduje się na zaawansowanym etapie realizacyjnym. Zespół takich platform stanowił będzie zasadniczy element wewnątrzzakładowego systemu transportu międzyoperacyjnego. Opracowany projekt umożliwia zwartą budowę platformy, która będzie samodzielnie realizować zadania transportowe, jak również pełnić rolę ciągnika przemieszczającego istniejące już w firmie wózki nie posiadające własnego napędu. Silnik DC, zastosowany do napędu ruchu głównego, jest nowoczesnym rozwiązaniem efektywnie wykorzystującym energię dzięki wysokiej sprawności. Zastosowany laserowy system pozycjonowania daje duże możliwości precyzyjnego określania lokalizacji platformy mobilnej, co pozwala nie tylko na podążanie po założonej trasie, ale umożliwia również rozwiązywanie problemów powstałych w przypadku wystąpienia zakłóceń takich jak pojawienie się niespodziewanych przeszkód na trasie przejazdu.

### 4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Holvoet T., Decentralized control of autonomous guided vehicles for scalable warehouse systems. IEE Seminar on Autonomous Agents in Control, s.11-18, 2005.
- [2] Le-Anh T, De Koster M. B. M, A review of design and control of automated guided vehicle systems, European Journal of Operational Research 171, s. 1–23, 2006.
- [3] Vis, Iris F.A.. Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems. European Journal of Operational Research, v. 170, s. 677-709, 2006.
- [4] Weyns D., Holvoet T., Schelfhout K., Wielemans J., Decentralized control of automatic guided vehicles: applying multi-agent systems in practice, In *Development Track OOPSLA, ACM SIGPLAN International Conference on Object-Oriented Programming, Systems, Languages, and Applications*, Nashville, USA, 2008
- [5] <https://www.mysick.com/saqqara/get.aspx?id=im0017618>
- [6] <http://www.robotsinsearch.com/file/SICK/NAV300-2232/operatingInstructions.pdf>