

dr inż. Robert Głębocki
Politechnika Warszawska
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

UKŁAD STEROWANIA KIERUNKIEM RUCHU W BEZZAŁOGOWYM POJEŹDZIE ELEKTRYCZNYM

W referacie przedstawiono niektóre wyniki prac badawczych nad układem nawigacji i sterowania w zastosowaniu do bezzałogowych autonomicznych pojazdów naziemnych. Wyniki prac badawczo rozwojowych zostały zastosowane i przetestowane na pojeździe elektrycznym typu melex.

DIRECTION CONTROL SYSTEM FOR UNMANNED ELECTRIC VECHICLE

In refer ware presented some results of researches about navigation and control system in application to unmanned ground vehicle. Research and development results ware applied and tested on electric car melex.

1. PRZEDSTAWIENIE ZAGADNIENIA

Przedmiotem niniejszego opracowania jest system automatycznego sterowania w kanale kierunku zastosowany do kierowania pojazdem bezzałogowym. Układ ten zastosowano na nie-dużym pojeździe elektrycznym typu Melex (rys. 1) będącym w posiadaniu Zakładu Automatyki i Osprzętu Lotniczego Politechniki Warszawskiej. Pojazd sterowany automatycznie przeznaczony jest do testowania różnych układów nawigacji i sterowania w ramach prowadzonych przez zespół badań.

Rozwój bezzałogowych pojazdów naziemnych (Unmanned Ground Vehicles (UGV)) podyktowany był potrzebą realizacji zadań, które do tej pory musiały być wykonywane przez ludzi, a były dla nich rutynowe lub też w jakiś sposób trudne i niebezpieczne. Pojazdy te są zdolne do pracy w różnych środowiskach, niezależnie od warunków pogodowych, zarówno w dzień jak i w nocy.

Pojazdy autonomiczne posiadają zdolność do pracy przez dłuższy czas bez konieczności interwencji człowieka. Zdobywają informacje o otaczającym je środowisku i na tej podstawie opracowują strategię poruszania się. Nie ma potrzeby prowadzenia nawigacji przez człowieka. Ponadto pojazdy autonomiczne potrafią unikać sytuacji, które mogą prowadzić do zranienia ludzi, szkody dla środowiska lub dla samego pojazdu.

Obiekty te mogą, w zależności od ich przeznaczenia, pracować w różnym terenie i warunkach środowiskowych. Obok znanych już zastosowań badanych układów do automatyzacji transportu w elastycznych liniach produkcyjnych, na torach badawczych, w obecnym czasie bardzo szybko rozwijają się zastosowania militarne pojazdów bezzałogowych. Możliwe jest ich wykorzystanie w bardziej nietypowych sytuacjach. Do takich należy użycie automatycznie sterowanego obiektu do badań eksperymentalnych działających modeli systemów nawigacji inercyjnej.

Potrzeba automatyzacji sterowania prędkością i kierunkiem ruchu pojazdów podyktowana jest wieloma względami. Do nich należy zaliczyć:

- względy bezpieczeństwa a więc środowisko ze względu np. na jego skażenie czy warunki pracy maszyny np. zbyt duże przeciążenia;
- warunki zewnętrzne uniemożliwiające sterowanie ręczne np. brak widoczności;
- szczególne wymagania co do dokładności i powtarzalności ruchu obiektu nieosiągalne podczas sterowania przez człowieka;
- ochrona wojsk i konwojów np. transport na polu walki lub wykrywanie ładunków wybuchowych i innych zagrożeń dla konwojów;
- powody ekonomiczne;
- zastosowanie dla celów badawczych, np. do badań eksperymentalnych nowych metod nawigacji i sterowania.

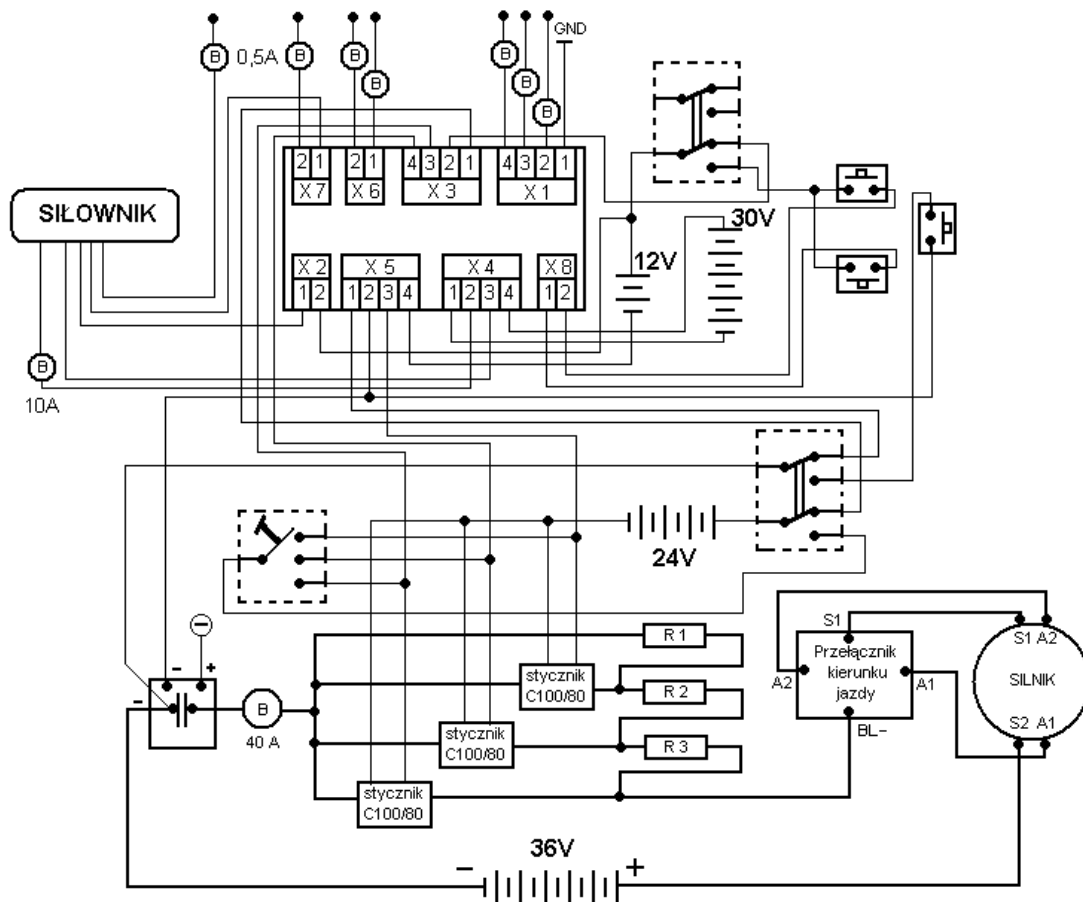


Rys 1. Pojazd elektryczny Melex wykorzystywany do badań przez Zakład Automatyki i Osprzętu Lotniczego Politechniki Warszawskiej.

Melex jest pojazdem samochodowym o wymiarach 1180x2420mm i masie własnej 320 kg. Jest on wykorzystywany jako wózek golfowy lub pojazd do transportu ludzi. Zastępuje on również pojazdy z silnikami spalinowymi w pomieszczeniach zamkniętych. Zasilany jest silnikiem elektrycznym o napięciu 36 V czerpanym ze źródeł własnych, tj. sześciu akumulatorów o napięciu 6 V połączonych szeregowo. W zmodyfikowanym na potrzeby badań pojeździe całkowicie wyeliminowano z układu sterowania efekторы mechaniczne (kierownica i pedały). W przypadku konieczności sterowania ręcznego odbywa się ono poprzez joystick i przyciski.

Instalacja sterująca wózka MELEX składa się z akumulatorów, siłownika elektrycznego, płytki z przekaźnikami, joysticka, przełączników, bezpieczników, okablowania. Zainstalowany jest zasilacz 5 V i 12 V i prądzie dopuszczalnym 1A.

Załączanie obwodów sterujących wykonywane jest przez przekaźniki umieszczone na płycie przekaźników. Schemat połączeń instalacji sterującej przedstawia rys.2.



Rys. 2. Schemat instalacji sterującej

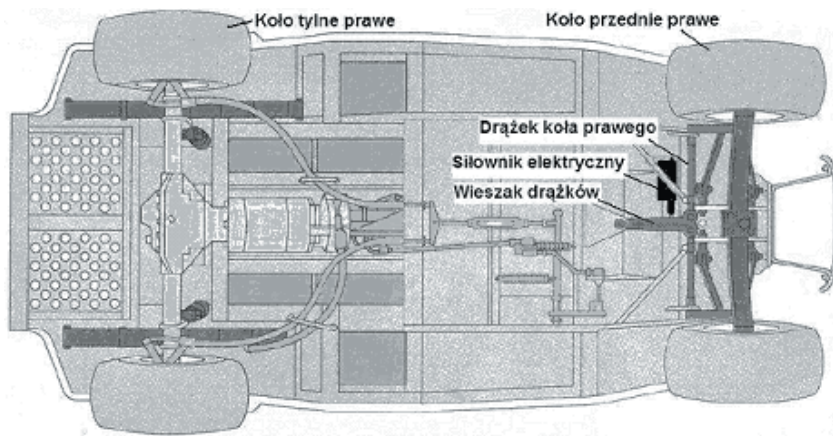
2. STEROWANIE KIERUNKIEM RUCHU

Melex jest typowym pojazdem samochodowym, gdy bierzemy pod uwagę sposób zmiany kierunku jego ruchu. W trakcie prac został wyposażony w zmodyfikowany układ kierowniczy, manewry skrętu są wykonywane nie z udziałem kierowcy ale za pomocą siłownika (rys. 3).

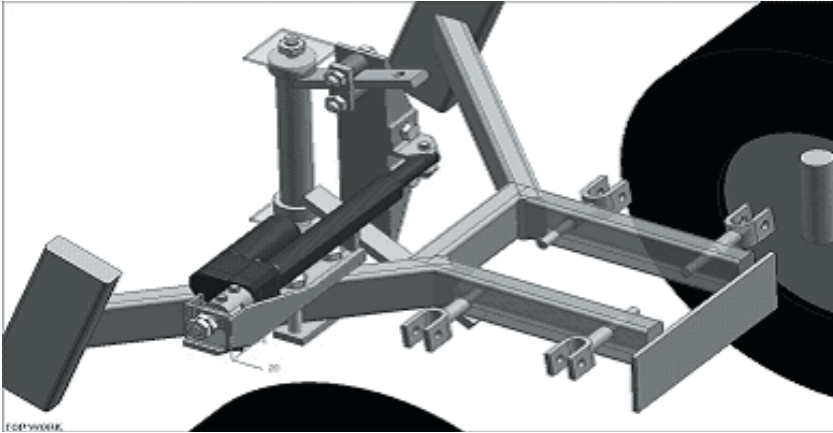
Układ kierowniczy nie jest wyposażony w układ wspomagania, ale ma przekładnię kierownicy i drążki, które połączone są ze sobą za pośrednictwem odpowiednich par ruchowych. Modyfikacja układu polegała na zastąpieniu siły pochodzącej od momentu drążka kierowniczego, który wcześniej był połączony z wieszakiem drążków, siłą pochodzącą od siłownika elektrycznego. Siłownik został zamontowany tak, aby pracował jak drążek popychający ramię wieszaka podczas obrotu kierownicy. Podczas manewru skrętu, siłownik popycha górne ramię wieszaka wywołując jego obrót o pewien kąt. Obrót wieszaka powoduje wypchnięcie bądź przyciągnięcie drążków kół przymocowanych do jego dolnego ramienia.

Zależność między siłownikiem a skrętem kół jest następująca: koła do jazdy „na wprost” odpowiadają pewnemu wychyleniu siłownika, takiemu gdy ramię wieszaka pokrywa się z osią kierunku jazdy. Siłownik znajduje się w swoim środkowym położeniu. Gdy siłownik jest wysuwany, ramię wieszaka popychane siłą siłownika odchyła się w lewo a drążki kół powodują skręt kół w prawo. Gdy siłownik będzie skracany, ramię wieszaka zostanie odchyłone w pra-

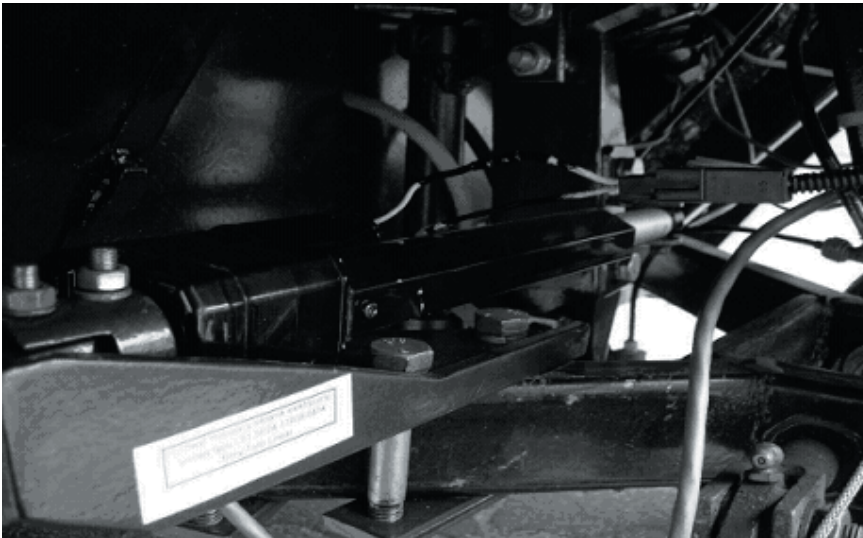
wo, koła zostaną skrecone w lewo. Sposób połączenia siłownika z mechanizmem skrętu kół przedstawiono na rys. 4a i rys. 4b.



Rys. 3. Zmodyfikowany układ wykonawczy sterowania skrętem kół



Rys 4.a) Sposób połączenie układu wykonawczego z mechanizmem skrętu kół

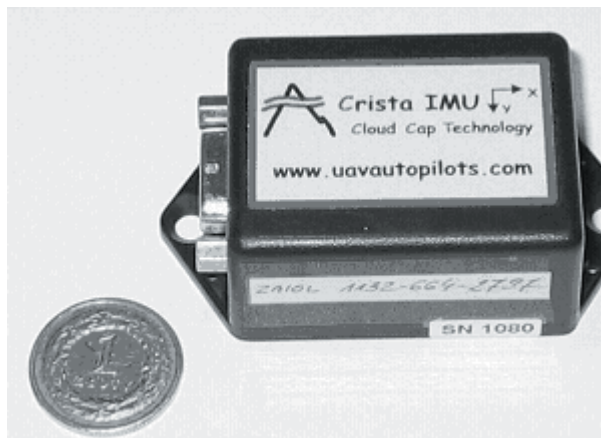


Rys 4.b) Sposób połączenie układu wykonawczego z mechanizmem skrętu kół

3. UKŁAD NAWIGACJI I STEROWANIA

W prezentowanym badaniach opracowany układ nawigacji i sterowania wykorzystuje urządzenia do nawigacji inercyjnej. W przedstawianym rozwiązaniu system sterowania pierwotnie jest kalibrowany przez określenie pozycji sterowanego pojazdu przy użyciu urządzeń systemu GPS. Następnie określone jest położenie celu misji i ewentualnych punktów pośrednich oraz trajektorii jaką ma sterowany obiekt przebyć. Dalsze sterowanie przebiega już jedynie na podstawie wskazań z układu inercyjnego. Pojazd zawsze przemieszcza się z punktu do punktu po linii prostej lub zadanym łuku. Bardziej skomplikowane trajektorie są budowane jako suma tych elementów podstawowych.

Wykorzystano tu urządzenie GPS firmy Garmin oraz bezwładnościową jednostkę pomiarową (IMU) Crista firmy Clud Cap Technology. Jednostka typu Crista służy do pomiaru przyspieszeń liniowych i prędkości kątowych w ruchu przestrzennym. Jednostka ta wykorzystuje przyspieszeniomierze typu ADXL210 o zakresie pomiarowym $\pm 10g$ oraz giroskopy ADXRS300, które zapewniają pomiar prędkości kątowych w zakresie $\pm 300\text{deg/s}$. Próbkowanie sygnału oraz jego skalowanie dokonywane jest bezpośrednio w czujniku Crista. Próbkowanie wykonywane jest w 16-bitowej, 8 kanałowej karcie analogowo-cyfrowej, zapewniającej maksymalną częstotliwość 285 Hz. Skalowanie sygnałów umożliwia zainstalowany mikroprocesor oraz pamięć typu eeprom. W procesie skalowania wykorzystywany jest również pomiar temperatury wewnątrz urządzenia. Komunikacja urządzenia z komputerem nawigacyjnym zapewniana jest za pośrednictwem złącza RS-232. Bardzo ważnymi zaletami tego urządzenia są jego niewielkie rozmiary, masa nie przekraczająca 37 g oraz możliwość integracji z urządzeniami typu GPS przy wykorzystaniu sygnału PPS.

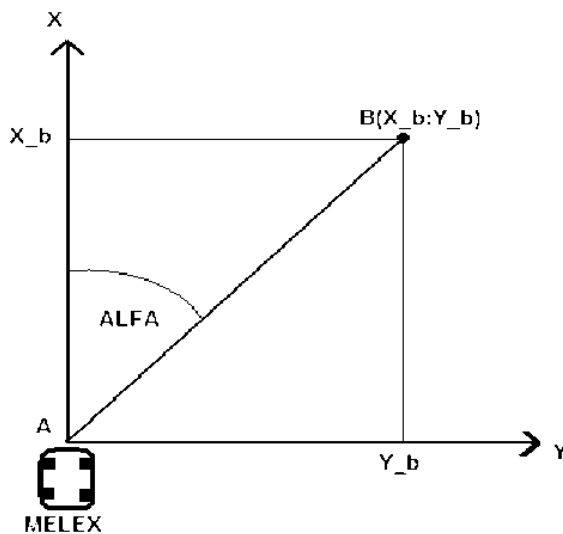


Rys. 5. Wykorzystywana do badań bezwładnościowa jednostka pomiarowa Crista firmy Clud Cap Technology.

Rozwój systemów nawigacji inercyjnej oraz spadek ich ceny stwarza możliwość zastosowania tanich uniwersalnych układów opartych o IMU nie tylko do drogiego obiektów takich jak samoloty czy śmigłowce ale również do sterowania układów znacznie tańszych. Określenie pozycji docelowej oraz początkowej w chwili rozpoczęcia sterowania będzie dokonywane przy użyciu GPS. Następnie pojazd będzie naprowadzał się do wskazanego celu przy pomocy układu opartego na nawigacji inercyjnej. Prowadzenie pojazdu przez cały czas przez układ GPS jest niezasadne ekonomicznie oraz grozi utratą kontroli nad pojazdem w przypadku przerw lub zakłóceń w odbiorze sygnału. Sytuacja taka jest wysoce prawdopodobna szczególnie w warunkach miejskich. Sposób naprowadzania oparty został na metodach dwupunktowych i ich optymalizacji.

Aby móc wykorzystać informacje z czujników musimy przeskalować sygnały by z wartości napięć odczytywać przyspieszenie liniowe oraz prędkość kątową (względnie kąty). Skalowanie przyspieszeniomierzy odbywa się w ten sposób, że sprawdzamy wartość napięcia dla przyspieszenia $1g$ ($1g$ - przyspieszenie grawitacyjne, oś czujnika musi być skierowana zgodnie z kierunkiem i zwrotem przyspieszenia ziemskiego), następnie wartość napięcia dla przyspieszenia $-1g$ - i na podstawie obu pomiarów możemy odczytać zależność między napięciem otrzymywanym w voltach a wartością przyspieszenia w $2s$.

W przypadku giroskopów, najpierw sygnał musimy scałkować względem czasu w wyniku czego otrzymamy nie prędkość kątową, ale wartość kąta. Odczytujemy wartość napięcia dla nieruchomego IMU, obracamy o znany kąt względem skalowanej osi i również odczytujemy wartość napięcia. W wyniku otrzymamy zależność sygnału napięciowego od wartości kąta w stopniach. IMU ma nam dostarczać informacje o położeniu pojazdu. Informacje tę możemy czerpać w dwojaki sposób. Korzystając z czujników przyspieszeń lub giroskopów. Najwygodniej określać położenie znając przejechaną drogę. Jeśli dwukrotnie scałkujemy względem czasu przeskalowany sygnał z przyspieszeniomierzy, otrzymamy drogę wzdłuż każdej z osi. A zatem w czasie poruszania się pojazdu, czujniki będą podawać nam wartości X i Y w naszym układzie współrzędnych co oznacza, że będziemy mogli określić jego położenie w każdej chwili czasu. Zakładamy że Melex porusza się na płaszczyźnie XY zatem oś Z pomijamy.



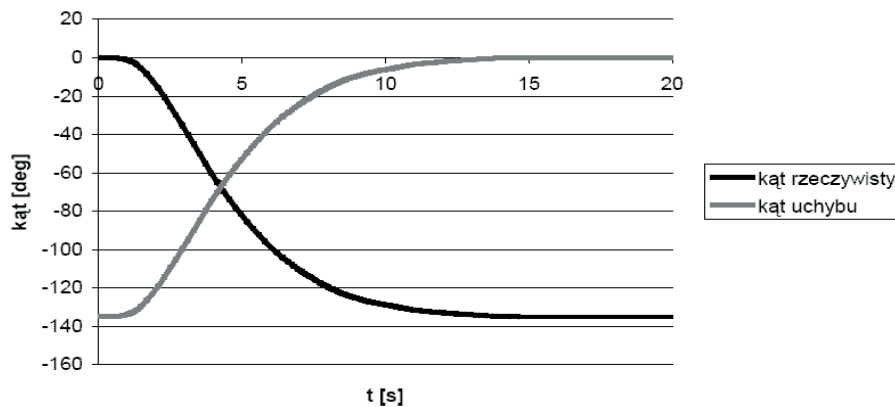
Rys. 6. Wyznaczenie pozycji z wykorzystaniem giroskopów

W przypadku korzystania z giroskopu (rys. 6) powyższy problem nawigacji rozwiązujemy w następujący sposób. Aby wyskalować czujnik prędkości kątowej należy scałkować jego sygnał względem czasu i otrzymamy wartość kąta. Zatem czujniki będą mierzyły nam kąty względem każdej z osi. W przyjętym układzie współrzędnych oś Z jest osią prostopadłą do płaszczyzny utworzonej przez koła pojazdu i leży w płaszczyźnie jego symetrii. W trakcie poruszania się pojazdu, będzie on nawigowany przez kąt alfa. Współczynnik kierunkowy prostej po której ma się poruszać Melex to tangens kąta alfa zawartego między osią X a prostą łączącą oba punkty. Używając trygonometrycznej funkcji arcustangens otrzymamy kąt alfa. W trakcie jazdy będziemy znali kąt jaki tworzy on z osią X i będziemy chcieli utrzymać ten kąt w trakcie jazdy. Na obecnym etapie badania opierały się na nawigowaniu obiektu za pomocą czujników prędkości kątowej. Dostarczą nam one informacje o kierunku poruszania się pojazdu. Algorytm sterowania został napisany w oparciu o czujniki prędkości kątowej.

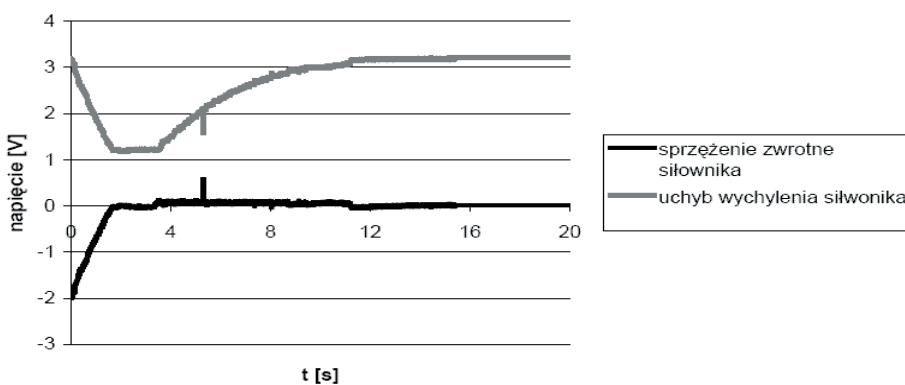
4. BADANIA

W trakcie badań terenowych sprawdzono współpracę urządzeń sterujących w czasie poruszania się obiektu oraz poprawność przygotowanych algorytmów i praw sterowania. W czasie badań została określona również dokładność tak działającego układu. W prezentowanych wynikach przedstawiono jedynie wyniki uzyskane przy nawigacji z użyciem giroskopów. Jest ona prostsza obliczeniowo i dlatego została sprawdzona jako pierwsza.

W pracy przyjęto we wstępnych oszacowaniach, że w zakresie kąta uchybu -90° ; 90° wychylenie siłownika będzie zmieniać się liniowo. W przypadku kąta większego bądź mniejszego siłownik wychylał koła maksymalnie w jedną lub w drugą stronę. Ze sprzężenia zwrotnego zostały sczytane napięcia dla jazdy „na wprost” i dla maksymalnie skręconych kół. Na podstawie różnicy napięć współczynnik wzmacnienia wyniósł ok. 0,03.



Rys. 7. Zmiany kąta uchybu i kąta rzeczywistego w czasie zmiany kierunku jazdy



Rys. 8. Zależność zmian wartości napięcia na sprzężeniu zwrotnym siłownika oraz uchybu wychylenia siłownika w czasie jazdy

Badania wykazały, że gdy prędkość pojazdu w czasie rozpoczęcia pracy układu zmieniała się od 0 do wartości maksymalnej równej 20 km/h, współczynnik był dobrany prawidłowo. Dla współrzędnych punktu docelowego $(-9, -9)$ zadany kąt wynosił 135° . Rys. 7 pokazuje zmianę kąta uchybu i kąta rzeczywistego w czasie. W układzie nie było przeregulowań a czas stabilizacji pracy układu wyniósł ok. 10 s. Po ustabilizowaniu się układu obiekt nadal poruszał się po zadanym kursie.

Na rys. 8 widzimy, że siłownik w czasie rozpoczęcia jazdy został zasilony i wychylił koła maksymalnie w lewo, po czym przez ok. 3 sekundy pozostał w tej pozycji. Gdy wartość kąta uchybu zmalała do wartości poniżej 90° w okolicy 4. sekundy ruchu, wartość napięcia na sprzężeniu zwrotnym zaczęła narastać, co świadczyło o prostowaniu kół.

Dokładność działania układu zależna jest od dokładności wyznaczania pozycji przez system nawigacji inercyjnej. Przypomnijmy, że w trakcie poruszania się pojazdu, jest on nawigowany przez kąt alfa (patrz punkt 3). W rzeczywistości obiekt porusza się nie po odcinku AB ale po prostej równoległej do tego odcinka. W przypadku gdy zadany kąt nie jest duży, tzn. jest w granicach 60° , trajektoria pojazdu zbliżona jest do zadanej, odległość L pomiędzy torem zadany a torem rzeczywistym jest niewielka i wynosi poniżej 1 m. Gdy kąt zadany jest większy, różnica między zadaną trasą, a trasą przejechaną jest znacząca i w przypadku zadawania kolejnego punktu trasy różnicę tę należy uwzględnić. Poniższa tabela zawiera wartości długości odcinka L dla kilku wybranych kątów zadanych, zmierzonych w trakcie badań.

Kąt zadany	Długość L
45°	0.8 m
90°	1.75 m
135°	3.15 m
180°	4.1 m

Gdyby pozycja obiektu wyznaczana była z czujników przyspieszenia, dokładność układu byłaby dużo większą. Punkty B i B' pokrywałyby się, dodatkowo mielibyśmy informację o przejechanej drodze.

Badania prowadzono w ramach projektu badawczego MNiSW nr N514-O/0028/32

LITERATURA

1. Głębocki R., Vogt R.; (2007) *Układ Automatycznego sterowania bomb lotniczych oparty na systemie INS*, Konferencja Awioniki, Rzeszów
2. Jaroszewski R.; (2007) *Układ automatycznego sterowania kierunkiem ruchu w pojeździe elektrycznym typu MELEX*. Praca dyplomowa magisterska
3. Maciejewski S.; (2007) *Układ sterowania automatycznego kierunkiem obiektu ruchomego w oparciu o system nawigacji inercyjnej (INS)*. Praca dyplomowa inżynierska
4. Głębocki R., Vogt R.; (2007) *Modelowanie w ujęciu systemowym podstawą projektowania układów automatycznego sterowania ruchem pojazdów*, XVI konferencja Metody i środki projektowania wspomaganego komputerowo.