

## System bezprzewodowego zdalnego sterowania dla pojazdu autonomicznego

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono problem dotyczący technologii sterowania pojazdami autonomicznymi i jego rozwiązanie na przykładzie prototypu pojazdu do prac sadowniczych. Sterowanie lokalne pojazdu realizuje kontroler przemysłowy klasy PLC wraz z osprzętem, a sterowanie zdalne realizowane jest przez opracowaną aplikację komputerową za pośrednictwem sieci bezprzewodowej pracującej w standardzie WiFi. Zainstalowany na pojeździe system wizyjny umożliwia obserwację otoczenia pojazdu.

**Abstract.** The paper presents a problem concerning control technology of autonomous vehicles and its solution on the example of a vehicle prototype for orchard work. Local vehicle control is performed by an industrial PLC class controller with accessories, and the remote control is realized by a computer application which communicates via a wireless WiFi network. The vision system installed on the vehicle allows observation of the vehicle surroundings (**Remote wireless control system for autonomous vehicle**).

**Słowa kluczowe:** pojazd autonomiczny, zdalne sterowanie, PLC, system wizyjny.

**Keywords:** autonomous vehicle, remote control, PLC, vision system.

### Wprowadzenie

Od wielu już lat trwają prace na udoskonaleniu techniki sterowania pojazdami autonomicznymi, mimo iż na obecnym poziomie techniki uzyskanie pełnej autonomii pojazdu jest dopiero na etapie testów laboratoryjnych. W krajach wysoko rozwiniętych UE i USA testowane są możliwości włączenia pojazdów autonomicznych w ruch uliczny. Uruchamiane zostają pierwsze linie autobusowe, gdzie autobusy poruszają się po wydzielonych pasach bez kierowcy. Również w nowoczesnych fabrykach przemysłowych transport wewnętrzny odbywa się przy udziale wózków bezzałogowych lub robotów mobilnych. W obszarze rolnictwa człowiek producenci ciągników wdrażają techniki sterowania zdalnego ciągnikiem rolniczym np. w sadach i winnicach. Powstają całkowicie autonomiczne pojazdy do pielęgnacji upraw. W sprzedaży powszechnie dostępne są zdalnie sterowane kosiarki do trawy. W przemyśle wojskowym testowane są czołgi bezzałogowe [1, 2, 3].

Autonomia pojazdów określa ich zdolność do poruszania się w środowisku, w którym wykonują one ściśle określone zadania, często przez dłuższy czas, bez ingerencji człowieka. Aby złożony system mechaniczny, jakim jest pojazd, mógł bezpiecznie poruszać się w danym środowisku wymagane jest zbudowanie dedykowanego mu systemu sterowania. Stopień zawansowania takiego systemu zależy od złożoności mechanicznych układów sterowania pojazdem, wymagań dotyczących precyzji wykonywanych zadań, a także możliwości reagowania na różnorodne sytuacje. Projekt i budowa tak złożonego systemu jakim jest układ sterowania dla pojazdu autonomicznego wymaga wieloetapowości prac.

Każdy pojazd jest systemem złożonym z wielu układów mechanicznych, elektrycznych i elektronicznych. Obsługa odpowiednio zintegrowanych mechanizmów umożliwia prowadzenie takich pojazdów jak np. samochód osobowy lub ciągnik rolniczy. Dotychczas to kierowca lub przeszkolony operator odgrywał główną rolę, sterując manualnie pojazdem. Obecnie bardzo intensywnie pracuje się nad pojazdami autonomicznymi. Spotyka się dwa podejścia do budowy pojazdów autonomicznych: budowa pojazdu autonomicznego od podstaw lub adaptacja istniejącego pojazdu, dotychczas sterowanego manualnie. W pracy przedstawiono projekt pojazdu autonomicznego i systemu sterowania zbudowanego od podstaw.

Aby funkcje sterowania pojazdem mógł kontrolować układ automatyki należy odpowiednio dostosować mechanizmy sterowania jazdą. Wiąże się to z

zastosowaniem odpowiednich elementów wykonawczych jak np. silniki, siłowniki, które będą przekładać na ruch obrotowy lub prostoliniowy sygnały sterujące (np. elektryczne), pochodzące z układu automatyki. Zakres ich ruchu musi być ściśle określony, aby poprawnie załączać np. sprzęgło, włączać odpowiedni bieg lub uzyskać wymagany kąt skrętu kół. By kontrolować bieżący stan elementów wykonawczych najczęściej stosuje się sprzężenie zwrotne. Elementy wykonawcze, łączy się ze sterownikiem za pomocą czujników przemieszczenia takich jak np. enkodery, linały, czujniki krańcowe. Jako sterownik można wykorzystać typowy system PLC (ang. *programmable logic controller*), system wbudowany lub komputer przemysłowy [4].

Istnieją rozwiązania w których pojazdy autonomiczne, wykorzystując sieć bezprzewodową, komunikują się z zewnętrznymi modułami sterującymi. Wymagana jest do tego odpowiednia infrastruktura sieciowa obejmująca zasięgiem dany obszar pracy. By móc zorientować pojazd w otaczającej go przestrzeni często wykorzystuje się system wizyjny, składający się z odpowiedniej liczby kamer. W celu rozszerzenia autonomii pojazdu lub pozyskania dodatkowych danych pozycjonujących można zainstalować układy lokalizacyjne, np. działający w przestrzeni otwartej GPS (ang. *global positioning system*) lub działające w przestrzeniach zamkniętych systemy specjalistyczne, w tym wykorzystujące infrastrukturę sieci bezprzewodowej [5].

Przy projektowaniu pojazdów autonomicznych, ale także podczas testów i wdrażaniu rozwiązań należy zwrócić szczególną uwagę na bezpieczeństwo ludzi oraz stosować się do wymagań określonych normami i przepisami prawnymi [6, 7].

### Pojazd autonomiczny z systemem zdalnego sterowania

W Zakładzie Układów Elektronicznych i Przetwarzania Sygnałów Instytutu Automatyki i Robotyki na Wydziale Informatyki Politechniki Poznańskiej zbudowany został prototyp pojazdu autonomicznego do prac w sadownictwie wraz z systemem zdalnego sterowania i systemem wizyjnym [8]. Prototyp ten jest częścią platformy testowej badań nad algorytmami sterowania pojazdem podczas automatycznego oprysku drzew sadowniczych. Większość informacji zwrotnych ma pochodzić z sygnału wizyjnego przedstawiającego otoczenie pojazdu autonomicznego. Tego typu pojazdy są już oferowane na rynku, jednak głównym problemem w ich wdrażaniu jest bardzo wysoka cena [2]. W opracowywanym rozwiązaniu autorom

przyświecają trzy główne cele: istotnie obniżyć lub nawet wyeliminować szkodliwość prac dla operatora maszyny, ograniczyć zużycie środków ochrony roślin przez ich precyzyjne dozowanie w nowych lub istniejących maszynach rolniczych przy ograniczonym koszcie adaptacji.

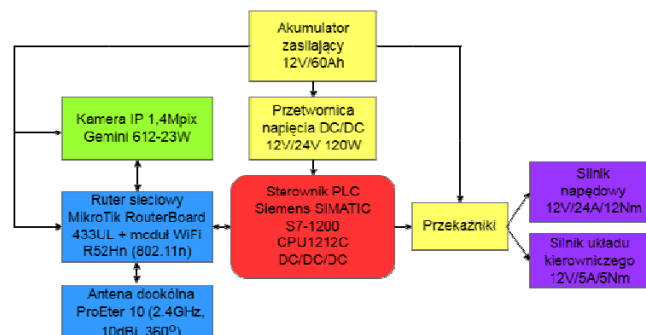
Wstępne testy sterowania przeprowadzono automatyzując istniejący pojazd spalinowy (rys. 1). Do badań zasadniczych samodzielnie zaprojektowano i zbudowano prototyp pojazdu z napędem elektrycznym (rys. 2). Schemat blokowy systemu sterowania w elektrycznym pojeździe testowym przedstawiono na rys. 3.



Rys. 1. Zautomatyzowany prototyp z napędem spalinowym



Rys. 2. Prototyp elektrycznego pojazdu autonomicznego wraz z systemami: wizyjnym, sterowania i komunikacji bezprzewodowej



Rys. 3. Schemat blokowy systemu sterowania w pojeździe autonomicznym z napędem elektrycznym

Konstrukcja platformy wykonana jest z profili stalowych, piasty kół oraz mechanizm kierowniczy pochodzą z pojazdów osobowych. Napęd pojazdu został zrealizowany

za pomocą silnika 12 V połączonego z kołami za pomocą dwóch przekładni: zębatej i łańcuchowej. Skręcanie kół zostało rozwiązane podobnie: silnik 12 V dokonuje skrętu kół za pomocą przekładni zębatej i listwowej. Pracę elementów wykonawczych, a także odczyt informacji zwrotnych z czujników realizuje sterownik przemysłowy klasy PLC S7-1200 firmy Siemens [9]. Na pojeździe została zamontowana wieża z odciągami, na której znajduje się antena systemu zdalnego sterowania i kamera, która jest elementem systemu wizyjnego (rys. 2). Jest to kolorowa kamera Gemini 612-23W o rozdzielczości 1,4 Mpix, która przesyła sygnał za pomocą sieci Ethernet, należy więc do klasy kamer IP.

Sterownik oraz kamera, komunikują się z nadrzędnym systemem sterowania za pomocą sieci bezprzewodowej w standardzie IEEE 802.11n (WiFi). Komunikację obsługuje zamontowany w pojeździe router sieciowy MikroTik 433UL, wykonany w postaci płytki elektronicznej z kartą rozszerzeń zawierającą układy do komunikacji bezprzewodowej (moduł R52Hn).

Wszystkie układy elektryczne i elektroniczne pojazdu autonomicznego są zasilane z akumulatora 12 V/60 Ah (układy zasilane napięciem 12 V wprost z akumulatora, natomiast sterownik PLC, wymagający napięcia 24 V – przez przetwornicę DC/DC o mocy szczytowej 130 W).

Zewnętrzny system sterowania zrealizowano na platformie PC, a program sterujący napisany został w języku C# w środowisku Visual Studio. Aktualnie umożliwia on zdalne sterowanie wszystkimi mechanizmami pojazdu oraz odbieranie i wyświetlanie obrazu z kamery.

### Realizacja sieci bezprzewodowej

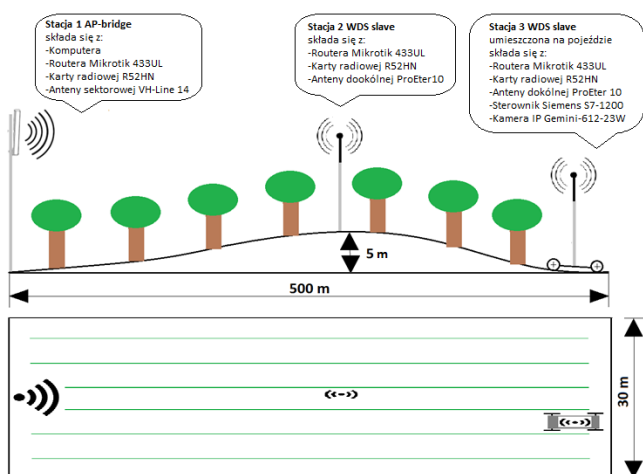
Jak wspomniano we wstępie, planowanym, choć nie jedynym możliwym, obszarem zastosowań prezentowanej platformy jest automatyzacja prac sadowniczych. Oznacza to, że system komunikacyjny do zdalnego sterowania powinien zapewnić łączność przy odległościach minimum kilkuset metrów, nawet gdy pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem występują naturalne przeszkody (np. krzewy, drzewa).

Zrealizowana infrastruktura sieciowa składa się z trzech przekątnych stacji transmisyjnych, zapewniających komunikację dwukierunkową. Stacje zostały ustawione w specjalny tryb pracy WDS (ang. wireless distribution system), który umożliwia rozszerzenie działania sieci WiFi bez konieczności dodawania dodatkowego okablowania szkieletowego między stacjami [8].

W projekcie przyjęto, że sieć swoim zasięgiem pokryje obszar działki sadowniczej o wymiarach 500 m × 30 m, z rzędami drzew owocowych, wzniesieniem terenu na środku (przeszkoda) i różnicą wzniesień terenu około 5 m (rys. 4).

W celu zapewnienia wysokiej jakości transmisji szerokopasmowej, umożliwiającej przesyłanie obrazu z kamery w czasie rzeczywistym oraz sprawnej komunikacji ze sterownikiem bez istotnych opóźnień użyto sieci w standardzie IEEE 802.11n (teoretyczny transfer do 150 Mb/s) a anteny umieszczone zostały powyżej konarów drzew.

Do pokrycia obszaru działki zasięgiem sieci zbudowane zostały trzy stacje. Pierwsza z nich jest połączona przewodowo z komputerem z zainstalowaną aplikacją sterującą (Stacja 1 na rys. 4, po lewej stronie). Druga została umieszczona na wzniesieniu działki i stanowi przedłużenie sieci bezprzewodowej, aby pokryć zasięgiem obszar działki za wzniesieniem (Stacja 2 na środku rys. 4). Trzecia stacja, umieszczona na pojeździe, komunikuje się dwukierunkowo z pozostałymi stacjami, a w pojeździe została dołączona przewodowo do sterownika i kamery (Stacja 3 na rys. 4, po prawej stronie).



Rys. 4. Infrastruktura sieci bezprzewodowej oraz szkic poglądowy działki do testowania systemu sterowania

Połączenie metodą WDS sprawia, że stacje pełnią funkcję wirtualnego przekaźnika (*ang. repeater*). Pojazd (klient) łączy się ze stacją, w zasięgu której aktualnie się znajduje i może dowolnie poruszać się po obszarze pokrytym zasięgiem sieci bez utraty połączenia.

Do budowy sieci bezprzewodowej został użyty sprzęt firmy Mikrotik, a konfiguracja ustawień sieciowych routerów przeprowadzona została w programie Winbox. Program ten umożliwia zarządzanie urządzeniami za pomocą interfejsu graficznego.

#### Badania komunikacji i testy sterowania

Aby zrealizować a następnie przetestować dwukierunkową komunikację z pojazdem, umożliwiającą jego sterowanie oraz odbiór sygnału z kamery, napisana została specjalna aplikacja sterująca pojazdem. Do tego celu zostało użyte środowisko programistyczne Visual Studio i język C#. W celu uzyskania zdalnego dostępu do sterownika PLC (dwukierunkowej wymiany danych) wykorzystana została dedykowana biblioteka S7.netplus, służąca do komunikacji ze sterownikami Siemens S7-1200. Ustanowienie połączenia między aplikacją sterującą a platformą TIA Portal, która służy do programowania sterownika S7-1200, wymaga przygotowania programu dla sterownika PLC i odpowiedniego skonfigurowania jego ustawień tak, aby zezwolić na dostęp do sterownika z aplikacji zewnętrznej [11].

Działanie programu rozpoczyna się od nawiązania połączenia z pojazdem, co zostaje potwierdzone stosownym komunikatem. Następnie uruchamiany jest moduł wyświetlający obraz z kamery. Zgodnie z przyjętymi wstępnymi założeniami pojazd powinien poruszać się w kierunku przód/tył wraz z możliwością skręcania. W aplikacji sterującej wstępnie można kontrolować ruch pojazdu za pomocą strzałek. Przytrzymanie danego klawisza powoduje poruszanie się pojazdu i manewrowanie nim. Trajektorię poruszania się pojazdu można obserwować na monitorze komputera.

Po uruchomieniu pojazdu i modułów komunikacyjnych przeprowadzono pomiary, które miały na celu potwierdzenie poprawności przyjętych rozwiązań i weryfikację działania systemu jako całości. Pomiary funkcjonalne uzupełniono pomiarami zasięgu sieci i jakości sygnału (rys. 5). Pomiary sieci zostały wykonane w punktach oddalonych od stacji bazowej o 150 m, 300 m i 450 m, do których przemieszczony został pojazd. Aby sprawdzić maksymalne zasięgi do testów podczas pomiarów nie została włączona

stacja pośrednicząca (Stacja 2). Wyniki pomiarów potwierdziły jednak, że stacja pośrednicząca jest niezbędna. Występujące na środku działki testowej wzniesienie ograniczało zasięg za wzniesieniem. W punkcie oddalonym o stacji bazowej o 450 m znajdującym się za wzniesieniem, bez użycia stacji pośredniczącej sygnał był zbyt słaby (obraz z kamery był istotnie zniekształcony). Dołączenie stacji pośredniczącej rozwiązuje ten problem i skutecznie pokrywa zasięgiem cały obszar testowy.



Rys. 4 Widok z kamery, widok terenu i pomiar parametrów sygnału podczas transmisji

#### Podsumowanie

Zaprojektowany, wykonany i przetestowany system umożliwia zdalne sterowanie pojazdem z aplikacji komputerowej za pośrednictwem sieci bezprzewodowej. Zaproponowana struktura anten skutecznie obejmuje zasięgiem teren działki doświadczalnej, na której realizowano testy.

Przygotowana technologia umożliwia skalowalność i rozszerzalność sieci bezprzewodowej poprzez zastosowanie kolejnych stacji pośredniczących bez konieczności układania okablowania między stacjami. Daje to możliwość dowolnej rozbudowy sieci i pokrycie zasięgiem znacznych obszarów.

Podobnie skalowalny i rozszerzalny jest zastosowany sterownik, który umożliwia obsługę wielu modułów wejść i wyjść, co jest istotne przy zastosowaniu zaproponowanej technologii do sterowania np. ciągnika sadowniczego.

Wykorzystane w stacjach komunikacyjnych sieci routery, oprócz podstawowych swoich zadań, zapewniają także transmisję danych z urządzeń lokalizacyjnych takich jak np. GPS. Tego typu dane mogą być wykorzystywane przez aplikację sterującą do prowadzenia pojazdu według przyjętej trajektorii jazdy, co rozszerza autonomiczność pojazdu.

Obraz przekazywany z kamery daje możliwość manewrowania pojazdem. Jednak w celu precyzyjnego sterowania ruchem należy zastosować dodatkowe kamery jak również zaimplementować algorytmy służące do detekcji i zbierania informacji o środowisku poruszania się pojazdu. Docelowo, oprogramowanie przetwarzając obraz z kamery i innych czujników, będzie realizowało

autonomiczne sterowanie pojazdem i zainstalowanym osprzętem.

Rozwijając przedstawiony system prowadzenia pojazdu, można go również wykorzystać do sterowania innymi pojazdami autonomicznymi np. ciągników rolniczych, maszyn leśnych i budowlanych.

**Autorzy:** mgr inż. Piotr Góral, dr inż. Paweł Pawłowski, prof. dr hab. inż. Adam Dąbrowski, Wydział Informatyki, Instytut Automatyki i Robotyki, Zakład Układów Elektronicznych, i Przetwarzania Sygnałów, Politechnika Poznańska, ul. Jana Pawła II 24, 60-965 Poznań, E-mail: [piotr.goral](mailto:piotr.goral@put.poznan.pl), [pawel.pawlowski](mailto:pawel.pawlowski@put.poznan.pl), [adam.dabrowski](mailto:adam.dabrowski@put.poznan.pl)

#### LITERATURA

- [1] Pretz K, Farming Goes High Tech, *The Institute*, IEEE Press, 42 (2018), Issue 3, 4-7
- [2] Weymann S., Autonomiczne pojazdy rolnicze – poszukiwanie nowych rozwiązań, *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna*, (2017), nr 6, 4-8
- [3] Chmielewski, R., Autonomiczny robot polowy do siewu i pielęgnacji upraw szeroko rzędowych nagrodzony na XII Międzynarodowej Warszawskiej Wystawie Wynalazków IWIS 2018, *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna*, (2018), nr 5, 2-3
- [4] Cetnarowicz D., Kardys P., Dąbrowski A., Pawłowski P., PLC – elektroniczny element automatyki przemysłowej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 94 (2018), nr 9, 121-124
- [5] Pogorzelski T., Zygmunt B., Integracja sensorów w autonomicznym samochodzie, *Mechanik*, 89 (2016), nr 7, 800-801
- [6] Skruch P., Długosz M., Cieśla A., Kluczowe elementy jazdy autonomicznej na przykładzie elektrycznego pojazdu demonstracyjnego EVE, *Napędy i Sterowanie*, 17 (2015), nr 11, 96-102
- [7] International Standard ISO/DIS 26262: Road Vehicles – Functional Safety, Part 1 to Part 10, (2009)
- [8] Góral P., System zdalnego sterowania dla pojazdu autonomicznego, *Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Poznańska*, 2018
- [9] Kwaśniewski J., Sterownik SIMATIC S7-1200 w praktyce inżynierskiej, BTC, Legionowo, (2013)
- [10] Mikrotik, Materiały szkoleniowe MTCNA, MTCWE, *Mikrotik Warsaw Training Center*, <https://mwtc.pl>, dostęp dnia 23.02.2019
- [11] Communication with Siemens S7 PIC with C# and S7.Net plc driver - <https://www.mesta-automation.com/siemens-s7-plc-c-s7-net-plc-driver/>, dostęp dnia 23.02.2019