

ROBOT DO DIAGNOSTYKI STANU TECHNICZNEGO PRZEWODÓW LINII NAPOWIETRZNYCH

Mariusz DĄBKOWSKI¹, Marek OLESZ², Krzysztof GIEŁDZIŃSKI³, Robert PRYZYSTALSKI⁴

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 58 347-24-73 e-mail: mariusz.dabkowski@pg.gda.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 58 347-18-20 e-mail: marek.olesz@pg.gda.pl
3. Enamor Sp. z o.o. w Gdyni
tel.: +48 691 231 373 e-mail: robert@eramatic.pl
4. Omron Electronics Sp. z o.o. w Warszawie
tel.: +48 602 102 969 e-mail: krzysztofgielczynski@gmail.com

Streszczenie: W artykule przedstawiono strukturę sprzętu i programu komputerowego do sterowania i wizualizacji prototypu robota mobilnego poruszającego się wzdłuż linii napowietrznych średniego i wysokiego napięcia. Komunikacja z robotem poprzez protokół TCP / IP umożliwia sterowanie ruchem robota oraz oględziny przewodów linii na podstawie obrazu z kamery zamontowanej na robocie.

Wykonane próby na poligonie doświadczalnym na odcinku linii 110 kV potwierdziły poprawną pracę robota w warunkach silnego pola elektrycznego. Konstrukcja robota ma charakter otwarty. Robot może być wyposażony w dodatkowe czujniki umożliwiające pomiar interesujących użytkownika parametrów np. zakłóceń radioelektrycznych lub temperatury przewodu.

Słowa kluczowe: linie napowietrzne, robot mobilny, sterowanie robotem

1. WSTĘP

W obszarze działania Energa SA dystrybucja energii elektrycznej odbywa się na poziomie linii wysokiego, średniego i niskiego napięcia. W obszarze linii 110 kV, na których wykonuje się prace w technologii z wyłączeniem napięcia lub pod napięciem, użytkuje się w poszczególnych województwach, zgodnie z tablicą 1, 75 głównych punktów zasilających (GPZ) przy długości linii 2514 km (dane 2012 – 2015).

Tablica 1. Zestawienie liczby GPZ i długości linii napowietrznych 110 kV w poszczególnych województwach obsługiwanych przez Energa - Operator SA

Lp.	województwo	liczba GPZ [-]	długość linii 110 kV [km]
1.	zachodniopomorskie	20	436
2.	pomorskie	13	700
3.	warmińsko - mazurskie	13	211
4.	kujawsko - pomorskie	10	453
5.	mazowieckie	6	347
6.	wielkopolskie	10	316
7.	łódzkie	3	51
	RAZEM	75	2514

Główne punkty zasilające stanowią elementy sieci elektroenergetycznej, które służą do przetwarzania wartości napięcia. Natomiast linie elektroenergetyczne wykorzystuje się do przesyłania energii elektrycznej do odbiorcy lub innych lokalizacji, w których następuje dalsze przetwarzanie na wymagane wartości napięcia.

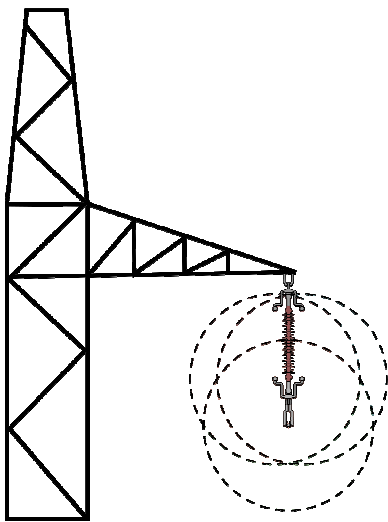
Ze względu na niezawodność dostawy energii elektrycznej istotne jest utrzymywanie dobrego stanu technicznego infrastruktury sieci dystrybucyjnej na każdym poziomie napięcia, a w przypadku operatora Energa Operator SA szczególnie w przypadku 110 kV. W związku z powyższym niektóre prace konserwacyjne i remontowe wykonuje się w technologii pracy pod napięciem, aby zredukować do minimum liczbę i czas wyłączeń poszczególnych odcinków linii, a tym samym zagwarantować lepszą jakość energii elektrycznej przez ograniczenie czasu trwania krótkich i długotrwałych przerw w dostawie energii oraz zapadów napięcia i innych stanów nieustalonych podczas występowania zwarć w obszarach o ograniczonej mocy zwarciowej na skutek jednostronnego zasilania.

W przypadku linii 110 kV prace pod napięciem (PPN), ze względu na odstępy izolacyjne między częściami czynnymi oraz częściami czynnymi a elementami uziemionymi, prowadzi się metodą pracy z odległości. W tej technologii jest konieczne odizolowanie montera posiadającego potencjał ziemi od urządzenia pod napięciem. Wykonujący pracę realizuje poszczególne czynności za pomocą odpowiednich narzędzi umieszczonych na drążku izolacyjnym i musi przebywać poza strefą minimalnego zbliżenia.

W czasie wykonywania prac w wymienionej technologii występuje strefa zagrożenia $d = 65$ cm będącą minimalną odległością w powietrzu pomiędzy elementami o potencjale fazy i elementami uziemionymi oraz odległość robocza (odległość minimalnego zbliżenia) $D_A = 115$ cm będącą minimalną odległością między monterem, a częściami na potencjale fazy [8]. W takim ujęciu pracy z odległości przy napięciu 110 kV przestrzeń dostępna dla montera jest dość ograniczona, a pozycja jego pracy oraz wymiar drążka izolacyjnego, którym wykonuje manipulacje

powoduje duży dyskomfort i wymaga dobrej kondycji fizycznej (rys. 1).

W związku z powyższym, ze względu na brak innych możliwości wykonywania PPN na liniach 110 kV, dobrym rozwiązaniem może być ograniczenie czynności wykonywanych przez człowieka do niezbędnego minimum i wprowadzanie w jego miejsce robota. Robot odpowiednio przemieszczany po przewodzie wysokiego napięcia może z powodzeniem wykonywać zaprogramowane czynności pomiarowe oraz umożliwiać obserwację, według wymagań [7], stanu technicznego przewodu i osprzętu z każdej strony. W pewnych rozwiązaniach spotyka się także bardziej zaawansowane technicznie rozwiązania zautomatyzowanej likwidacji sadzi lub wymiany odstępników w przewodach wiązkowych na liniach 220 kV i 400 kV [5, 6].



Rys. 1. Słup linii 110 kV z naniesioną strefą zbliżenia wokół przewodu fazowego

W tego rodzaju pracach ingerencja człowieka sprowadza się do umieszczenia robota w trybie pracy z odległości na przęśle linii 110 kV, a dalsze czynności są wykonywane w sposób zautomatyzowany z poziomu ziemi. Dodatkową korzyścią jest ograniczenie wartości pola elektrycznego i pola magnetycznego oddziałujących na organizm wykonującego tę pracę, co w niektórych sytuacjach – szczególnie znacznych wartości prądów roboczych – może ograniczać czas wykonywania czynności przez pracownika.

Prace nad robotami mobilnymi używanymi w celach inspekcyjnych na liniach wysokich napięć nawet do 750 kV są wciąż aktualnym tematem konstrukcyjnym i badawczym [5, 6]. Propozycja robota opisanego poniżej wpisuje się w trendy prac badawczych energetyki zawodowej, a jego wdrożenie może wspomóc czynności inspekcyjne wykonywane na liniach 110 kV, a po wykonaniu koniecznych testów również na liniach o wyższych napięciach znamionowych.

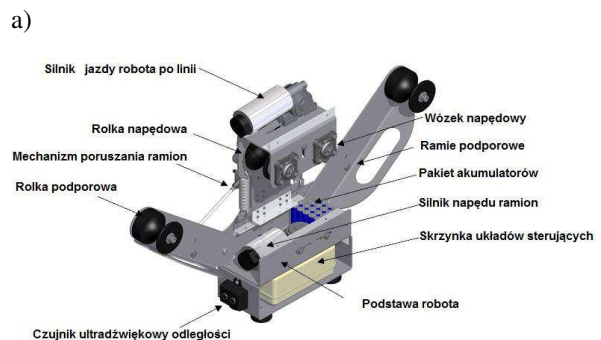
2. BUDOWA ROBOTA MOBILNEGO

2.1. Część konstrukcyjna i napędowa robota

Przed przystąpieniem do prac związanych z wykonaniem części mechanicznej i napędowej robota mobilnego poruszającego się po liniach napowietrznych

średniego i wysokiego napięcia zaprojektowano go w środowisku Autodesk Inventor Professional 2012, co pozwoliło sprawdzić poprawność przyjętych założeń konstrukcyjnych i wyeliminować ewentualne błędy i kolizje między elementami ruchomymi bez konieczności ponoszenia dodatkowych nakładów finansowych. Na rysunku 2a przedstawiono wygląd modelu fizycznego maszyny, natomiast na rysunku 2b sposób umieszczenia robota na linii [1].

Konstrukcja nośna jest podzielona na trzy części (rys. 2): podstawę z obudowami części elektrycznych, wózek napędowy oraz ramiona robota. Wszystkie ich główne elementy wykonano z blachy aluminiowej o grubości 4 mm, dzięki czemu masa robota nie przekracza 20 kg. W strukturze robota można wyróżnić ponad 300 części, na które składają się poza elementami nośnymi, elementy łączeniowe: śruby, podkładki i nakrętki. Nad układem napędowym do jazdy po linii przewidziano miejsce do montażu osprzętu takiego jak: czujnik wizyjny, czy skaner laserowy. Skrzynka o stopniu ochrony IP65 zawierająca układy elektroniczne znajduje się w dolnej części robota. Dzięki znacznemu oddaleniu od linii napowietrznej, zminimalizowano wpływ zakłóceń elektromagnetycznych na pracę wrażliwych elementów elektronicznych. Dodatkowo zaproponowana konstrukcja pozwala istotnie obniżyć środek ciężkości maszyny, co polepsza stabilność utrzymywania zbliżonej do pionowej pozycji na linii napowietrznej oraz zwiększa odporność na podmuchy wiatru [1].



b)



Rys. 2. Robot mobilny: a) model fizyczny robota – widok z przodu; b) rzeczywista maszyna zawieszona na przewodzie linii podczas prób weryfikacyjnych [1]

Maksymalna szerokość maszyny (w stanie całkowitego rozłożenia ramion) wynosi 975 mm, natomiast minimalna (w stanie całkowitego złożenia ramion) – 715 mm. Wysokość jest stała i równa się 626 mm. Niewielki ciężar, kompaktowe

gabaryty oraz zamontowanie wygodnego uchwytu w górnej części robota pozwalają jednej osobie swobodnie nim manipulować, w łatwy sposób umieszczać i zdejmować go z linii (rys. 2). Na dolnej części podstawy zamontowano cztery stopki służące do ochrony przed zabrudzeniami dolnej części obudowy pochodzącymi od podłoża (rys. 2b) [1].

Na uwagę zasługuje płyta umieszczona pod kątem 45° nad skrzynką z układami elektronicznymi. Służy ona do osłony dolnej części robota przed zabrudzeniami opadającymi z linii napowietrznej podczas ruchu maszyny, które są grawitacyjnie odprowadzane na ziemię i nie zalegają na urządzeniu, tym samym nie powiększając jego masy i obciążenia przewodu [1].

W robocie można wyróżnić dwa układy napędowe: do przemieszczania robota po przewodzie oraz do poruszania ramion w celu zamocowania na nim maszyny. W pierwszym wykorzystano układ czterech rolek wykonanych z poliamidu, z których dwie środkowe są napędzane za pomocą silnika prądu stałego firmy Dunkermotoren GR 63x55, a dwie skrajne są swobodne i dociskają ramiona do linii napowietrznej. Napęd na rolki przenoszony jest poprzez zębatą przekładnię pasową. Maksymalna prędkość liniowa poruszania się robota po przewodzie wynosi 32,5 m/min. Silnik napędowy umieszczono powyżej mocowania na przewodzie, co pozwala uniknąć wnikania zabrudzeń. W drugim układzie wykorzystano przekładnię śrubową sprzężoną z silnikiem prądu stałego GR 63x25 tej samej firmy. Maksymalna prędkość liniowa ruchu ramion wynosi 0,7 m/min, co przy posuwie ramion wynoszącym 133 mm daje minimalny czas składania i rozkładania ramion wynoszący około 12 s [1].

Mocowanie robota na linii odbywa się poprzez zaczepienie go na przewodzie na rolkach napędowych w stanie maksymalnego rozłożenia ramion. Następnie ramiona podnoszone są do góry i dociskają rolki podporowe do przewodu niezawodnie kotwicząc na nim urządzenie. Dzięki ważnej zalecie przekładni śrubowej, jaką jest samohamowność, niemożliwe jest samoistne rozwarcie ramion i wypięcie się maszyny z przewodu.

2.2. Część elektryczna i elektroniczna robota

Strukturę połączeń, zwłaszcza pomiędzy układami elektronicznymi robota, przedstawiono na rysunku 3 [1].

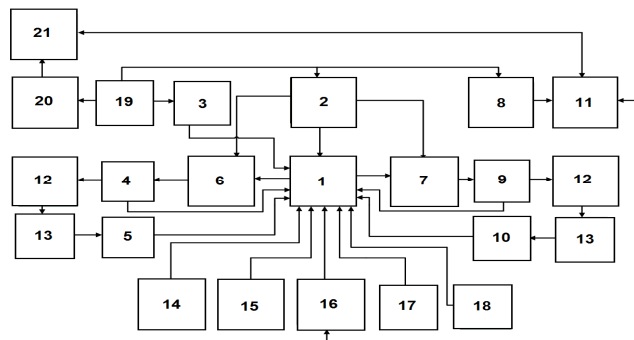
W układzie sterowania jako główną jednostkę logiczną wykorzystano mikrokontroler STM32F4 [2, 3]. W skład elementów zamontowanych na płycie sterującej poza mikrokontrolerem wchodzi: mostki H, układy pomiarowe napięcia i prądu, przetwornice i układ zasilania routera, układy obsługi enkoderów (rys. 3) [1].

Do zewnętrznych elementów (rys. 3) należą elementy wykonawcze (silniki), sterujące (przyciski), pomiarowe (czujniki ultradźwiękowe, wyłączniki krańcowe, enkodery, kamera), komunikacyjne (moduł Ethernet) i zasilania (akumulator wraz z modułem zasilania urządzeń zewnętrznych) [1].

Robot jest zasilany dwoma akumulatorami litowo-jonowymi o napięciu 18,5 V i pojemności 3 Ah każdy. Zaprojektowano dodatkowo układ umożliwiający ich ładowanie [1].

Sterowanie prędkością silników odbywa się za pomocą mostków H (sygnał PWM) z tranzystorami MOSFET z kanałem typu N – IRF1010NS. Elementami sterującymi są tzw. „drivery” HIP4082 [1, 4].

Robot wyposażony jest w układ dwóch sensorów ultradźwiękowych HC-SR04 służących zabezpieczeniu całego urządzenia przed uderzeniem w przeszkodę podczas ruchu. Czujniki krańcowe NO-NC zabezpieczają silnik ruchu ramion przed przeciążeniem i wyłączają go w skrajnych położeniach. Dodatkowo, robota wyposażono w kamerę bezprzewodową Foscam FI8918W, która może służyć do jednoczesnej inspekcji linii oraz bieżącej obserwacji pracy urządzenia [1].

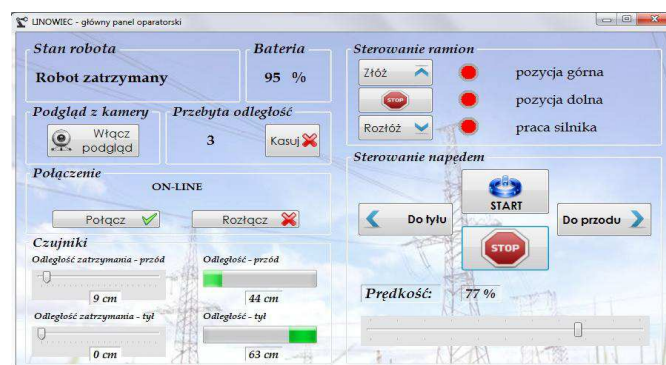


Rys. 3. Struktura połączeń pomiędzy układami elektronicznymi w robocie mobilnym: 1) mikrokontroler STM32F4; 2) przetwornice; 3) pomiar napięcia baterii; 4) pomiar prądu silnika jazdy; 5) układ obsługi enkodera silnika jazdy; 6) mostek H silnika jazdy; 7) mostek H silnika ramion; 8) układ zasilania routera; 9) pomiar prądu silnika ramion; 10) układ obsługi enkodera silnika ramion; 11) router; 12) silniki jazdy i ramion; 13) enkoder; 14) sonar przedni; 15) sonar tylny; 16) moduł Ethernet; 17) wyłączniki krańcowe; 18) przyciski STOP i ruchu ramion; 19) akumulator 20) moduł zasilania urządzeń zewnętrznych; 21) kamera [1]

Komunikacja z zewnętrznym komputerem nadrzędnym (aplikacją sterującą i wizualizacyjną) odbywa się z wykorzystaniem sieci Ethernet za pośrednictwem układu DP83848. Przyłączono do niego router bezprzewodowy Cerberus P6361. Wymiana danych odbywa się z wykorzystaniem protokołu TCP/IP w modelu klient-serwer, gdzie aplikacja sterująca jest klientem, a serwerem – platforma sprzętowa z mikrokontrolerem STM32F4 [1, 2, 3].

3. APLIKACJA DO STEROWANIA PRACĄ ROBOTA

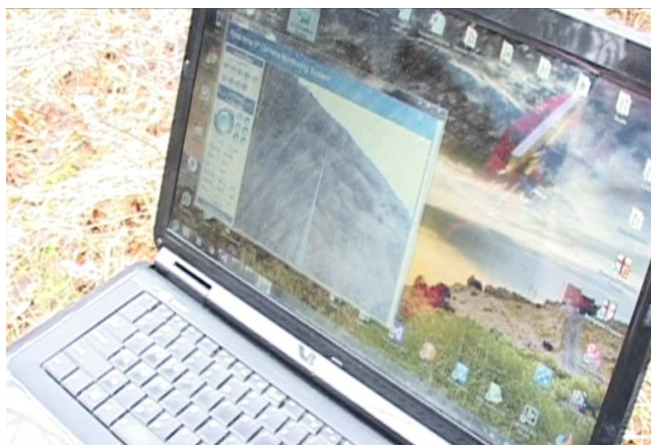
Na komputerze nadrzędnym zaimplementowana jest aplikacja sterująca, która stanowi jednocześnie panel operatorski. Została opracowana w środowisku Microsoft Visual Studio 2012. Główne okno programu pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Wygląd głównego okna aplikacji sterującej robotem mobilnym

Za pomocą aplikacji możliwa jest komunikacja z robotem dzięki wykorzystaniu protokołu TCP/IP i wykonywanie następujących czynności: sterowanie pracą (uruchomienie i zatrzymanie pracy, płynna zmiana prędkości ruchu, zmiana kierunku ruchu, podnoszenie i opuszczanie ramion), podgląd stanu pracy robota (stan baterii, przebyta odległość, stan czujników ultradźwiękowych) oraz uruchamianie podglądu z kamery. Aplikację wyposażono w wygodną instrukcję obsługi online. Na rysunku 5 przedstawiono okno podglądu z kamery [1] z widokiem na analizowany przewód linii 110 kV.

Przedstawiony w artykule robot jest prototypem, który pomyślnie przeszedł testy na poligonie doświadczalnym firmy Energa w Straszynie koło Gdańska (rys. 2b). Umieszczone na linii napowietrznej urządzenie poruszało się pewnie. Komunikacja i sterowanie bezprzewodowe działały w pełni poprawnie. Wszystkie testy przebiegły pomyślnie.



Rys. 5. Testy weryfikacyjne robota na linii 110 kV - widok na przewód z kamery pokładowej robota

4. WNIOSKI

Przedstawiony prototyp robota umożliwia zdalną inspekcję przewodów linii napowietrznych.

Podczas prób nie stwierdzono zakłóceń w pracy urządzenia w warunkach pola elektrycznego od przewodów linii 110 kV.

Po zamontowaniu odpowiedniego zestawu czujników dodatkowych możliwe jest rozszerzenie wersji prototypowej o pomiary temperatury powierzchni przewodu oraz poziomu zakłóceń radioelektrycznych.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Giełdziński K., Przystalski R.: Projekt i budowa robota mobilnego poruszającego się po napowietrznych liniach energetycznych średniego i wysokiego napięcia, praca dyplomowa magisterska, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2013.
2. Peczański M.: Mikrokontrolery STM32 w sieci Ethernet w przykładach. Wydawnictwo BTC. Legionowo. 2011.
3. Keil Tool by ARM. <http://www.keil.com/uvision>. 15.09.2016 r.
4. Zawirski K., Deskur J., Kaczmarek T.: Automatyka napędu elektrycznego. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań. 2012.
5. Zheng Li, Yi Ruan, Autonomous Inspection Robot for Power Transmission Lines Maintenance While Operating on the Overhead Ground Wires, International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol.7, No. 4 (2010) 107 ISSN 1729-8806, pp. 111-116.
6. J.J. Zhang, X.Q. Liu, J. Niu & D.H. Zou, Design of control system based on D-H method for live-maintain robot on Energized Transmission 4th International Conference on Mechanical Materials and Manufacturing Engineering (MMME 2016).
7. PN-EN 50182:2002, Przewody do linii napowietrznych - Przewody z drutów okrągłych skręconych wspólnie.
8. PN – EN 61472:2013-12, Prace pod napięciem - Minimalne odległości zbliżenia w sieciach prądu przemiennego o napięciu od 72,5 kV do 800 kV - Metoda obliczania.

A ROBOT FOR DIAGNOSTICS OF OVERHEAD POWER LINES

The article presents the structure of hardware and computer application to control and visualization of the prototype of a mobile robot moving along overhead lines of medium and high voltage. Before building, the robot was designed in the Autodesk Inventor Professional 2012 environment to eliminate potential errors in structure. The mechanical construction is divided into three parts: the base contained electrical parts, trolley drive and robot arms. All the main components are made of aluminum sheet with a thickness of 4 mm, so that the weight of the robot does not exceed 20 kg. Small size and low weight of the robot allows for handling by a single person. Robot contains over 300 parts including construction elements, screws, washers and nuts. The motor driving the robot is positioned above the wire, so dirt doesn't pollute it. Belt transmit drive to the rollers. Robot arms are moved by helical gear. The electronic parts are placed in the base box (IP65). Microcontroller STM32F4 is a central control unit of the robot. Motors are powered by PWM signal. The robot has two sonar preventing collisions with any obstacle, and a camera that can be used for wire inspection or control of the robot work. The robot communicates with a host computer wirelessly via Ethernet. The control application allows connecting with the robot using TCP/IP protocol and: control device (starting and stopping robot, changing the speed of movement smoothly, changing direction of movement, raising and lowering arms of robot); viewing the status of the robot (battery status, travelled distance, the state of ultrasonic sensors). Operator can also view the video from the camera mounted on the robot. Robot presented in this article is a prototype that has been tested on the experimental field of Energa SA company in Straszyn near Gdansk. Unit placed on the air line moved properly. Communication and wireless control worked also fully properly. All tests were successful. In this regard it should be noted that the presented device can be a powerful tool for remote inspection of medium and high voltage power transmission lines (when will be equipped with a suitable set of sensors).

Keywords: overhead lines, mobile robots, control systems