

# Opracowanie demonstratora robota mobilnego do prac inspekcyjno-inżynierskich w przewodach kanalizacyjnych

## Development of a mobile robot demonstrator for inspection and engineering works in sewage pipes

JAROSŁAW PANASIUK  
WOJCIECH KACZMAREK  
MICHAŁ SIWEK  
PIOTR PRUSACZYK  
SZYMON BORYS\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.8-9.65>

Realizacja prac inspekcyjno-inżynierskich w przewodach kanalizacyjnych stanowi poważne wyzwanie logistyczne i techniczne. Rozwój konstrukcji robotów mobilnych stwarza możliwość ich wykorzystania w tego typu zadaniach. W artykule przedstawiono wyniki prowadzonych prac, mających na celu opracowanie konstrukcji robota inspekcyjno-inżynierskiego, przeznaczonego do kontroli, naprawy oraz instalowania przewodów teletechnicznych (światłowodowych) w przewodach kanalizacyjnych o zakresie średnic 200÷800 mm. Opisano konstrukcję robota oraz modułów, z których składa się demonstrator (modułu jezdnego, modułu nosiciela, modułu technologicznego), a także wyniki testów służących weryfikacji parametrów pracy demonstratora.

**SŁOWA KLUCZOWE:** robotyka, automatyka, robot mobilny, przewody kanalizacyjne, sterowanie, światłowody

*Implementation of inspection and engineering works in sewage pipes is a serious logistic and technological challenge. The development of mobile robot construction technology makes it possible to use them in this type of tasks. The paper presents the results of work aimed at developing the construction of an inspection and engineering robot, intended for inspection, repair and installation of tele-technical wires (fiber optic) in sewer pipes with a diameter range of 200÷800 mm. The design of the robot as well as the modules of the demonstrator are described (driving module, carrier module, technological module) and the results of tests aimed at verifying the work parameters of the developed demonstrator.*

**KEYWORDS:** robotics, automation, mobile robot, sewage pipes, control, fiber optics

### Wprowadzenie

Opracowanie projektu koncepcyjnego, a następnie zbudowanie demonstratora robota mobilnego do prac inspekcyjno-inżynierskich, w tym do prac związanych z instalacją przewodów teletechnicznych, jest bardzo złożonym zagadnieniem, zwłaszcza gdy zostaną nałożone specyficzne wymagania co do zakresu, warunków oraz technologii realizacji tych prac [1, 3]. Konstruktorzy muszą poznać zarówno środowisko, w którym ma pracować robot, jak i konkurencyjne rozwiązania dostępnych na rynku robotów mobilnych.

Ze względu na specyfikę wymiarową przewodów kanalizacyjnych, do których miał być przystosowany robot wraz ze wszystkimi modułami, konieczne było wykorzystanie bardzo zaawansowanych rozwiązań oraz elementów konstrukcyjnych.

Demonstrator wymagał opracowania złożonego oprogramowania, działającego na trzech poziomach, tj. na poziomie konsoli sterującej, modułu jezdnego oraz modułu technologicznego.

### Konstrukcja robota inspekcyjno-inżynierskiego

Konstrukcja demonstratora robota inspekcyjno-inżynierskiego, umożliwiającego operowanie w przewodach kanalizacyjnych o średnicach 200÷800 mm, narzucała zastosowanie modułowej budowy – zarówno całego robota, jak i poszczególnych modułów [1]. Ze względu na wielozadaniowość opracowanej konstrukcji (do inspekcji i naprawy oraz montażu przewodów światłowodowych) zdecydowano się na podział konstrukcji na następujące moduły funkcjonalne:

- moduł jezdny;
- moduł nosiciela;
- moduł technologiczny;
- moduł zasilania i komunikacji;
- moduł oprogramowania.

### Moduł jezdny

Na podstawie analizy konstrukcyjnej, przeprowadzonej na etapie budowy ramy nośnej modułu jezdnego w wariantcie wstępnym opracowywanego modelu, oraz na podstawie doświadczeń zdobytych podczas montażu ramy stwierdzono konieczność wprowadzenia zmian w projekcie wykonawczym i złożeniowym tego modułu [2, 4].

Podstawową i najważniejszą zmianą była modernizacja ramy nośnej. Zrezygnowano ze stalowych, spawanych profili nośnych oraz z wieloczęściowego przegubu środkowego. Stwierdzono, że aby zapewnić maksymalną sztywność konstrukcji oraz powtarzalność wymiarów, w przypadku produkcji większej liczby robotów konieczne jest wyeliminowanie połączeń skręcanych i wprowadzenie jednoczęściowych elementów nośnych.

\* Dr inż. Jarosław Panasiuk, [jaroslaw.panasiuk@wat.edu.pl](mailto:jaroslaw.panasiuk@wat.edu.pl), <https://orcid.org/0000-0001-8480-1654> – Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, Polska

Dr inż. Wojciech Kaczmarek, [wojciech.kaczmarek@wat.edu.pl](mailto:wojciech.kaczmarek@wat.edu.pl), <https://orcid.org/0000-0003-3805-9510> – Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, Polska

Mgr inż. Michał Siwek, [michal.siwek@wat.edu.pl](mailto:michal.siwek@wat.edu.pl), <https://orcid.org/0000-0003-2818-9725> – Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, Polska

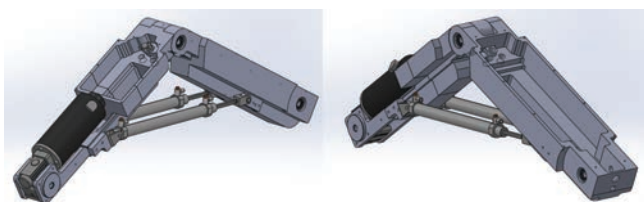
Mgr inż. Piotr Prusaczyk, [piotr.prusaczyk@wat.edu.pl](mailto:piotr.prusaczyk@wat.edu.pl), <https://orcid.org/0000-0002-1347-1202> – Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, Polska

Mgr inż. Szymon Borys, [szymon.borys@wat.edu.pl](mailto:szymon.borys@wat.edu.pl), <https://orcid.org/0000-0003-1620-6145> – Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, Polska

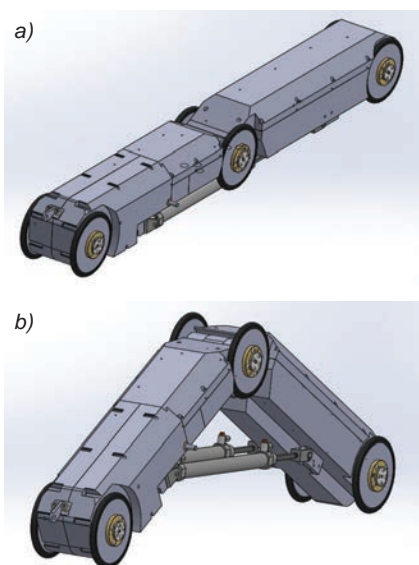
Na podstawie tych założeń opracowano jeden kompleksowy element tylnej obudowy, który jest jednocześnie elementem nośnym ze zintegrowanym przegubem, oraz jeden kompleksowy element przedniej obudowy ze zintegrowanym przegubem i z pasowanymi gniazdami na łoża silnika. W elementach zaprojektowano docelowe otwory montażowe na pokrywy obudów, złącza pneumatyczne i elektryczne, pasowane otwory na łożyska oraz pasowane gniazda na mocowania siłowników pneumatycznych.

Ze względu na zastosowanie dwóch głównych części obudowy jako elementów ramy nośnej modułu jezdnego opracowano dodatkowe cztery elementy pełniące funkcję pokryw. Dwa elementy symetryczne montowane od boku stanowią pokrywy silnika, a dwa pozostałe elementy są montowane od góry i osłaniają tylną oraz przednią część modułu jezdnego.

Model CAD ramy modułu jezdnego przedstawiono na rys. 1, a na rys. 2 – widok obudowy robota. Pomiędzy poszczególnymi elementami obudowy zastosowano silikonowe uszczelki zapewniające klasę szczelności IP 67.



Rys. 1. Model CAD ramy modułu jezdnego w konfiguracji złamanej

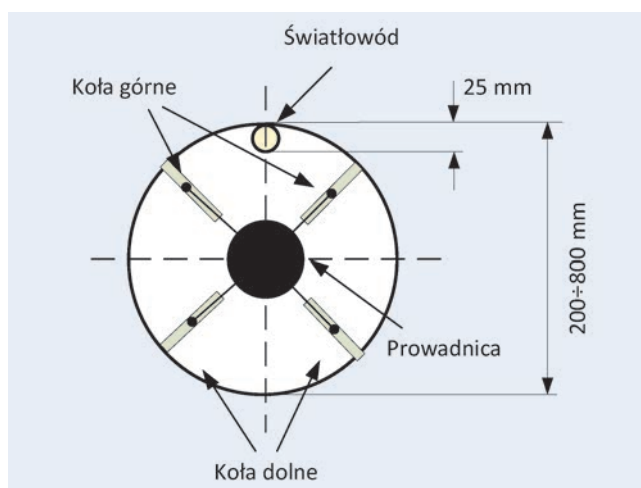


Rys. 2. Widok modułu jezdnego z obudową w konfiguracji podstawowej (a) oraz złamanej (b)

### Moduł nosiciela

Ze względu na sterowanie moduł nosiciela jest elementem pasywnym konstrukcji. Jego główną funkcją jest utrzymywanie modułu technologicznego bądź inspekcyjnego w osi rury kanalizacyjnej [5]. W zależności od średnicy rury, w której realizowana jest praca robota, moduł nosiciela może się znajdować za modułem technologicznym lub w jego wnętrzu (w przypadku rur o średnicy 600 i 800 mm).

Zastosowanie czterech zestawów kołowych, ustawionych po przekątnych (rys. 3), nie koliduje ze światłowodem o średnicy 25 mm, umieszczonym na szczycie rurociągu w wersji inżynierskiej.



Rys. 3. Widok frontowy schematu nosiciela modułów technologicznych

### Moduł technologiczny

W trybie instalacji rurek HDPE konfiguracja robota i modułu technologicznego jest odmienna niż w trybie inspekcji wizyjnej. Podczas instalacji robot porusza się tyłem, ciągnąc za sobą moduł nosiciela modułów technologicznych z zainstalowanym modułem instalacyjnym. Moduł instalacyjny jest montowany pomiędzy modułem robota mobilnego a modułem nosiciela modułów. Magazyn taśmy mocującej jest przeznaczony do transportu 350 mm taśmy dostarczanej przez podajnik i ciętej za pomocą noża termicznego zintegrowanego z dyszą podającą klej.

### Moduł zasilania i komunikacji

Opracowany moduł zasilania i komunikacji zapewnia:

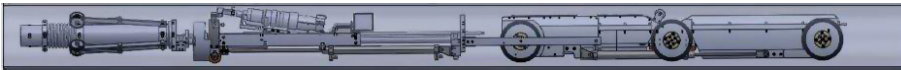
- niezawodną i wiarygodną transmisję binarnych i wielobitowych danych sterowania z robota inspekcyjno-inżynierskiego (RII) do konsoli sterowania robotem (KSR) oraz z konsoli do robota;
- automatyczną sygnalizację nawiązania połączenia (w rozumieniu protokołu TCP) i ewentualnej utraty komunikacji, niezależnie dla wymiany danych KSR → RII oraz KSR → SWR;
- transmisję sygnału wideo, transmitowanego z RII w rozdzielczości nie mniejszej niż 1024 × 768, z dwóch przełączanych kamer;
- zasilanie układów napędowych oraz sterowania RII i modułu technologicznego;
- komunikację z wewnętrznym systemem sterowania RII,
- komunikację pomiędzy elementami modułu technologicznego i sterowanie ich pracą.

Urządzenia pracujące na pokładzie modułu technologicznego wymagają zasilania o następujących parametrach: 230 V AC 50 Hz, 24 V DC, 5 V DC.

Transmisja danych odbywa się za pomocą protokołu USB (*universal serial bus*), który pozwolił na redukcję liczby żył w przewodzie transmisyjnym pomiędzy poszczególnymi modułami robota.

### Moduł oprogramowania

Pokładowy system operacyjny robota inspekcyjno-inżynierskiego wyposażono w autorską aplikację do zarządzania danymi stanu – pobieranymi z modułów wykonawczych Arduino w module jezdnym (znajdującym się w robocie inspekcyjno-inżynierskim) i module technologicznym – oraz danymi sterującymi, wysyłanymi z KSR.



Rys. 4. Konfiguracja robota dla średnicy rury 200 mm (szare tło przedstawia przekrój rury) – widok z boku



Rys. 5. Konfiguracja rzeczywistego demonstratora dla średnicy rury 200 mm wraz z nosicielem modułu technologicznego i modułem technologicznym

Aplikacja kojarzy dane wymieniane z KSR z danymi przekazywanymi między modułami wykonawczymi Arduino. Oprogramowanie sterujące w wersji konsolowej pełni funkcję interfejsu, na którym operator realizuje cały proces sterowania robotem. Operator może zarówno wysyłać komendy do robota, jak i obserwować obraz z kamery zamontowanej na module jeżdżym lub technologicznym.

#### Konfiguracje robota do przewodów o średnicy 200÷800 mm

W celu zapewnienia poprawności pracy robota w przewodach kanalizacyjnych o różnych średnicach konieczna jest zmiana konfiguracji elementów robota – zarówno modułu jeżdżego, jak i modułu nosiciela czy modułu technologicznego. Zmiana konfiguracji polega na zmianie ustawienia i orientacji poszczególnych modułów konstrukcyjnych oraz na wymianie kół na koła o średnicy pasującej do średnicy przewodu kanalizacyjnego.

Przewidziano cztery zasadnicze konfiguracje robota w zależności od średnicy rurociągu:

- dla średnic z zakresu 200÷300 mm z główną średnicą roboczą 200 mm (rys. 4 i 5);
- dla średnic z zakresu 300÷450 mm z główną średnicą roboczą 400 mm – dołożono element utrzymujący moduł technologiczny w zadanej pozycji względem powierzchni rury;
- dla średnic z zakresu 450÷650 mm z główną średnicą roboczą 600 mm – dołożono element utrzymujący moduł technologiczny w zadanej pozycji względem powierzchni rury oraz zmieniono orientację nosiciela, aby zmniejszyć długość konstrukcji;
- dla średnic z zakresu 650÷800 mm z główną średnicą roboczą 800 mm – dołożono element utrzymujący moduł technologiczny w zadanej pozycji względem powierzchni rury oraz zachowano orientację nosiciela z poprzedniego wariantu, aby nie wydłużać konstrukcji.

#### Wnioski

Opracowane rozwiązanie robota inspekcyjno-inżynierskiego, przeznaczonego do przygotowywania oraz układania instalacji teletechnicznej (przewodów światłowodowych), było skomplikowanym procesem zarówno

na etapie projektowania kompletnego urządzenia, jak i na etapie jego budowy oraz integracji i programowania systemu sterowania. Opracowanie procesu klejenia okazało się bardzo trudne zwłaszcza w przypadku rur o średnicy 200 mm, w których należało pomieścić wszystkie elementy robota, klej oraz materiał podtrzymujący – taśmę.

Uzyskane wyniki potwierdziły poprawność przyjętych rozwiązań, a jednocześnie dostarczyły istotnych wskazówek co do możliwych zmian konstrukcyjnych. Te zmiany w pierwszej kolejności powinny polegać na obniżeniu całkowitej masy robota wraz z poszczególnymi modułami oraz na uzupełnieniu konstrukcji o elementy sensoryczne, pozwalające na ciągły monitoring parametrów pracy modułu jeżdżego i modułu technologicznego.

**Artykuł zawiera wyniki pracy finansowanej ze środków NCBR w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020 POIR.01.01.01-00-0893/16 „Opracowanie i wykonanie mobilnego urządzenia inspekcyjno-inżynierskiego (robota) przeznaczonego w szczególności do instalacji kabli teletechnicznych (światłowodów) w rurach kanalizacyjnych”. Szczególne podziękowania składamy przedstawicielom firmy KARTEL S.C. z Warszawy – Jackowi Ejchelkrautowi i Sebastianowi Brańskiemu – zleceniodawcom i pomysłodawcom projektu.**

#### LITERATURA

- [1] Panasiuk J., Siwek M., Kaczmarek W., Borys S., Prusaczyk P. "The concept of using the mobile robot for telemechanical wires installation in pipelines". *AIP Conference Proceedings*, 29.10.2018 r.
- [2] Baranowski L., Panasiuk J., Siwek M. "Use of a Raspberry Pi to build a prototype wireless control system of a mobile robot". *Proceedings of the 23th International Conference – Engineering Mechanics (EM 2017)*.
- [3] Iszmir Nazmi Ismail, Adzly Anuar, Khairul Salleh Mohamed Sahari. "Development of in-pipe inspection robot: A review". *2012 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology*.
- [4] Baranowski L., Siwek M. "Use of 3D simulation to design theoretical and real pipe inspection mobile robot model". *Acta Mechanica et Automatica*. 12, 3 (2018).
- [5] Sharanabasappa C. Sajjan, Naveen Srivatsa H.S, Dinesh Kumar P. "Design and development of pipe inspection robot". *International Journal of Current Engineering and Scientific Research*. 2, 12 (2015). ■