

Robotics in mining exemplified by Mobile Inspection Platform

The paper presents the Mobile Inspection Platform (MPI) – the innovative solution in the area of safety in underground coal mining. The robot is equipped with devices and sensors that allow the safe exploration and monitoring of these mine regions, that have environmental conditions which are potentially dangerous for a worker. The paper describes in details also the process and results of tests conducted in the Central Mines Rescue Station (CSRG).

Keywords: *mobile platform, safety, monitoring*

1. INTRODUCTION

The robotics of modern mines is a strategic issue due to the fact that deeper and deeper beds are exploited which are vulnerable to different hazards, particularly climatic hazards (higher temperature and humidity), eruptions and emissions of dangerous gases (methane, hydrogen sulphide), endogenous fires with accompanying emissions of carbon monoxide and dioxide, or eruptions of water and rocks [12]. For these reasons, people should work as far as possible from dangerous zones (extraction areas) and the most beneficial solution would be to apply remote control of the extraction and transport processes. Similarly, in the case of rescue operations, people should be replaced by robots equipped with sensors for measuring concentrations of dangerous gases and for determining climatic conditions. These robots should work as reconnaissance for rescue teams, giving them, in advance, information about the conditions in the excavation and providing better security for people. This necessity is recognized all over the world which is proved by many solutions of mining robots coming from different countries [1, 4, 5, 10]. Please note such robots as Groundhog, Wolvarine V-2 and Gemini-Scout from the USA, Numbat or robots made by Water Corporation from Australia. GMRI and MPI performed in Poland by institutes EMAG and PIAP and Terescoer performed by

international consortium. The Chinese company Tangshan Kaicheng Electronic makes robots for the hard coal mining industry. In addition, mines rescue stations want to have mining inspection robots as they are often forced to suspend a rescue operation due to extremely hard conditions in the rescue area [11,14] and the risk which is not acceptable for rescue teams.

This article features the achievements related to the project “Research and feasibility study of a model of an M1-category mobile inspection platform with electric drives designed for explosion-hazard zones”. The project consortium is formed by the Institute of Innovative Technologies EMAG and Industrial Research Institute for Automation and Measurements PIAP. The project was financed by the National Centre for Research and Development. The project result is a technology demonstrator called Mobile Inspection Platform (MPI).

The most important functionality of MPI is its ability to measure concentrations and parameters of the mine atmosphere permanently or at the operator’s demand. Then the measurement results are sent to a measurement-control panel where they are archived together with video recording from cameras that work in visible and infrared bands. MPI is exploited in explosive zones and zones with group-I explosion hazards. Therefore, from the very beginning, the robot was designed to comply with the requirements of the 94/9/EC (ATEX) directive, 2006/42/EC (MD)

machinery directive and 2004/108/EC (EMC) directive. The robot was also designed to overcome different obstacles, such as debris, water, mud, or tracks of floor mining railways.

2. MOBILE INSPECTION PLATFORM MPI

Mobile Inspection Platform (MPI) is a technology demonstrator developed by the EMAG-PIAP consortium. The division of work between the two institutes was based on their competence ranges. The PIAP Institute worked out mechanical assemblies of the platform (flame-proof enclosures working as platform enclosures, pressurized enclosure of the TV tower, unwinder of the optical fibre, pipe rack, enclosure for intrinsically safe electronic elements) and

selected suitable wheels (rims and tyres), drive blocks made of brushless DC motors, angle helical gear units, and brakes (Fig. 1). The EMAG Institute developed electronic and programmable electronic subassemblies (measurement systems, visual systems, transmission systems, communication controllers, motor controllers, electrical batteries, and casings for particular subassemblies and, where necessary, software for measurement, control, communication, and archiving). Detailed technical solutions are included in unpublished documentation from particular project stages prepared by the institutes. Functional assumptions and concepts of the MPI technical solutions were described in [13]. Further in the article, the authors presented the project results and pointed at standards whose requirements the presented platform complies with.

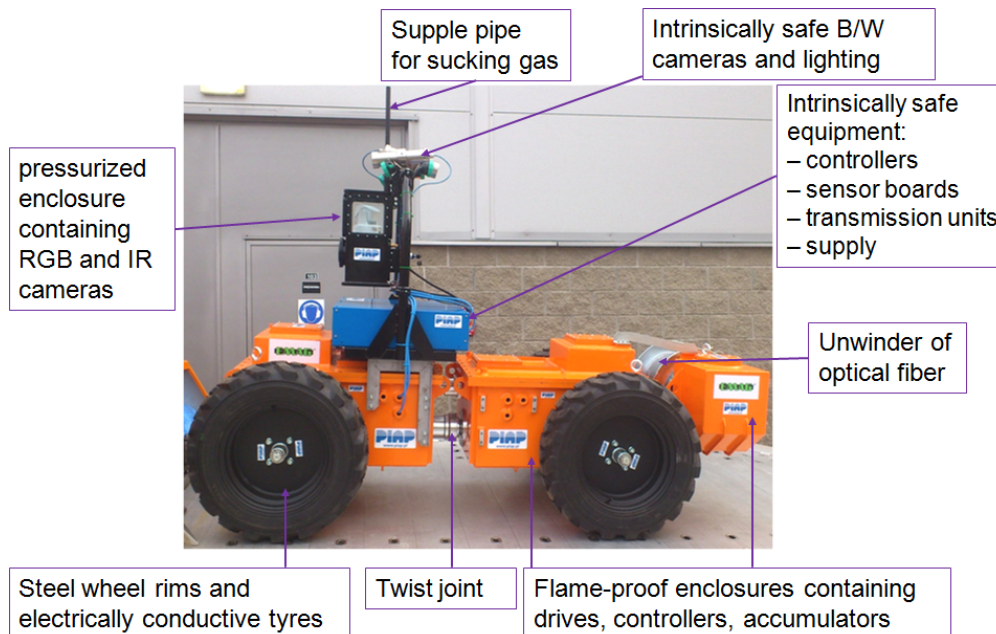


Fig. 1. Mobile Inspection Platform MPI

MPI is characterised by the following parameters: weight about 1100 kg, maximal velocity 0.7 m/s, distance range 1000 m in the depth of excavation, dimensions: length 240 cm, width 115 cm, height 180 cm, supply 42 VDC. It is not possible to move the robot through 80 cm diameter hole in dams.

3. DRIVE AND FLAME-PROOF ENCLOSURES OF MPI

MPI has four wheels with tyres, each driven by an independent drive block. The PIAP Institute selected

steel rims and tyres which conduct electricity in order to prevent the effects of electrostatic discharges. The drive block is composed of a brushless DC motor, angle helical gear unit, brake, and motor controller. Each drive has its own lithium-polymer battery. The motor is made with the use of the increased explosion-proof safety technology “e” in compliance with EN 60079-7, while the gear unit and the brake are protected by liquid immersion in compliance with EN 60079-6. Electronic printed circuit boards of motor controllers and batteries are encapsulated according to EN 60079-18, while the connections of the motor controllers and the batteries cells comply with the requirements of the increased safety “e”. The drives

were placed in flame-proof enclosures “d” in compliance with EN 60079-1. Such solutions are ensured by double explosion-proof safety which, in the light of the EN 50303 standard, enables to achieve the M1 category, meaning that the platform can work permanently in the presence of group-I explosive gases and/or coal dust.

An emergency stop of the machine is performed by two emergency switches, one placed on the front and the other on the rear cart of MPI. The switches, together with relays and contractors, are responsible for the emergency stop safety function with the Performance Level PLc [2] according to EN ISO 13849. Theoretical calculations of electromechanic drives are presented in [3].

4. METROLOGICAL SYSTEM OF MPI

Mobile Inspection Platform is equipped with two identical modules of gas meters. Infrared sensors were used to measure concentrations of carbon dioxide and methane in a low and high range, while electrochemical sensors for measuring concentrations of oxygene and carbon monoxide. Methane is measured in the range of 0...100%, carbon dioxide 0...5%, carbon monoxide 0...1%, oxygene 0...25%, temperature -40...+120°C, and relative humidity 0...100%. Due to the fact that the humidity in an isolated zone is usually very high (close to 100%), a drier system was developed which dries the gas mixture before it is introduced to the sensors. Then the mixture goes to the measurement chamber which has gas concentration sensors and diagnostic sensors monitoring proper work of the system. The internal temperature sensor enables to compensate the impact of temperature and informs whether the temperature threshold of gas measurement sensors was exceeded. The humidity sensor, in turn, gives information about the quality of the drying process in the drier. The flow sensor informs whether the pump sucks the air efficiently. The external temperature and humidity sensors, placed outside the measurement chamber, provide data about climatic conditions in the excavation surrounding MPI.

In order to increase the safety of rescue teams, a redundant solution of gas meters was applied in MPI. It is difficult to rely on the readings of a single meter, only. Here it is important to note the measurements of the poisonous carbon monoxide and explosive methane. In the MPI measurement system the two-out-of-two voting (according to EN 61508) was used. The measurement results in both channels have to comply with each other in the range of the

adopted tolerance, so that the measurement could be recognized as plausible. Therefore, before the decision is made to send the rescue team to a dangerous zone, the measurement results in both channels have to show permissible values of dangerous gases concentrations. If one channel shows a safe value and the other an unsafe one, MPI has to be withdrawn and both modules of the sensors have to be calibrated.

5. VISUAL SYSTEM OF MPI

The visual system of MPI is composed of four cameras and lighting. Two monochrome cameras (black and white), produced by EMAG, are intrinsically safe and comply with the “ia” category from EN 60079-11. These cameras do not have drives. One of them is directed towards the front, the other towards the rear part of the robot. A colour high-resolution camera is placed in a pressurized “px” enclosure according to EN 60079-2. Thanks to its drive, this camera can be moved in the vertical and horizontal planes. Below the colour camera, there is a thermal camera with no drive. The TV tower is equipped with windows made of soda-lime glass (for the colour camera) and germanium glass (for the thermal camera).

Inside the TV tower, the pressure is higher in order to prevent the external gas mixture from getting inside. There is an intrinsically safe device in the enclosure. The device monitors the difference between the inside and outside pressure. If the enclosure gets unsealed, the power provided to the cameras will be cut off. The safety device has the SIL2 Safety Integrity Level in compliance with EN 50495 and a “px” explosion-proof structure, which both enable to achieve the M1 category for this assembly of the robot.

There are four lamps on the pipe frame – two are directed towards the front and two towards the rear part of the vehicle. The lamps are switched off remotely by the operator. Casings from typical mining lamps were used but they were equipped with stronger LEDs and supplied from intrinsic safe batteries.

6. TRANSMISSION SYSTEM OF MPI

The operator sends control commands from the measurement and control panel (computer with higher immunity to environmental factors – IP54, resistant to shocks and vibrations) equipped with an advanced joystick. There are two options of remote

communication with MPI: Wi-Fi and optical fibre [9]. When MPI is moving towards the rescue operation place, Wi-Fi communication is used. When the robot is in the examined excavation, a non-inflammable optical fibre is employed. The optical fibre is unwound from the unwinder.

The control commands are received by the robot in the TCP computer and then distributed to particular microprocessor controllers. The commands responsible for the movements of the robot are sent from the TCP computer, through the Main Processor to the Superordinate Motor Controller, and then to particular controllers of brushless DC motors. The commands to trigger the measurements are sent from TCP, through the Main Processor to two sensors modules. The Main Processor is also responsible for switching on lamps and serves as a communication node for data streams from monochrome cameras. Data streams from the colour camera and the thermal one are sent directly through TCP and the optical

fibre to the operator's panel. The listed transmission systems had been developed according to the intrinsically safe "ia" technique and were placed in a blue IP54 enclosure fixed to the front flame-proof enclosure of the robot. Apart from that, in the enclosure there are four intrinsically safe batteries to supply power to separated electrical circuits.

7. FUNCTIONAL AND TRACTION TESTS OF MPI BY CSRG S.A.

Functional tests of the platform were conducted by the Central Mines Rescue Station (CSRG). The tests were performed in training excavations on the CSRG premises. Figure 2 shows the robot entering a training excavation. Figure 3 features the view of the control and measurement software of the operator's panel.



Fig. 2. MPI before entering a training excavation of CSRG [7]

Please find below the English version of the CSRG's report, section 5: Final assessment of the test results [7]:

The functional tests of the Mobile Inspection Platform (MPI) model allow to state the following:

1. the assumed properties and qualities of MPI make it possible that, in the identified situations, the rescuers can be replaced by MPI during the inspection of underground excavations and during measurements of environmental parameters, particularly in explosive or unbreathable atmospheres.
2. the mobile part of the model meets the assumed properties and characteristics (...). The video captured by the cameras in the conditions of no stable lighting in the excavation was of good quality. This

allows efficient control of MPI in the necessity to observe the itinerary by the remote operator.

3. the work of the operator's station (panel and power supply) was correct. Wireless communication (along a section of about 25 m) in the software application of the device worked unfailingly. The platform control in the device prototype, administered by the operator by means of a joystick, allowed to control the directions of the platform and the colour camera in an efficient way. According to the assumed assessment level of functional tests, the same can be said about the work of the measuring application (the tests did not cover metrological assessment).



Fig. 3. View of control and measurement software of MPI [7]

Traction tests were conducted by CSRG's rescuers in the underground of the Królwa Luiza Mine. It was estimated that the robot covered a distance of about 250 m there, passing through a ramp with the inclination of about 30°, a relatively loose ground of corridors (loose stones where the wheels of the vehicle surged sometimes), railway tracks, rail points, and obstacles that are typical of the mine infrastructure (necessity to go round the mine equipment and devices, stored materials, carriages on tracks, powered roof supports, etc. – Fig. 4). During the tests the team tested also the work of sensor sets and cameras. The functionality of the mentioned assemblies was satisfactory. The traction tests were completed successfully.



Fig. 4. MPI copes with obstacles in the mine infrastructure [14]

8. CONCLUSIONS

The number of mining robots solutions has been increasing year after year. This situation proves that there is quite a big market niche for such products. A Chinese company Tangshan Kaicheng Electronic estimates its production capabilities at 1,800 mining robots annually [10]. The market for mining robots is sure to be an absorptive one due to the fact that the rescue operations headquarters do not want to risk the lives of rescuers during operations in explosion-hazard and explosive zones. Police and military sappers have been equipped with adequate robots for explosives deactivation for years. Therefore, it is not

an exaggeration to say, that similar solutions will be at disposal of mining rescuers in the next few years.

However, contrary to the sappers' robots, the mining robots, apart from functional requirements, have to comply with the requirements imposed by legal regulations, such as European directives, including the most important ATEX, EMC and MD directives. Each solution has to prove its compliance with the above directives. Recognized techniques to make explosion-proof solutions, such as flame-proof enclosures, pressurized enclosures and encapsulation, make the devices heavier and bigger. This, in turn, leads to worse functionality of the vehicle. Therefore it is important to use an optimal design method in order to fulfil necessary explosion-proof require-

ments on one hand and to keep the functionality of the robot on the other hand.

From the very beginning, Mobile Inspection Platform was developed based on the requirements of standards harmonized with proper directives. This procedure enabled to optimize the development of assemblies. However, as particular assemblies were manufactured by two institutes (EMAG and PIAP) which complemented each other in the project, some solutions were made a priori, i.e. those concerning the weight and shape of the robot assemblies. So there is a space to optimize the robot size, weight, parameters, and assemblies location.

References

1. Green J.: *Mine rescue robots requirements*. Outcomes from an industry workshop, Robotics and Mechatronics Conference, 2013, pp. 111–116.
2. Kasprzyczak L.: *Algorithm of Safety Level determination exemplified by the function of emergency stopping of the mobile inspection robot*, Napędy i Sterowanie 3, 2016, pp.82-87.
3. Kasprzyczak L., Dzikowski A., Nowak D.: *Determining electro-mechanic parameters of the main driver of Mobile Inspection Platform*, Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa 7(509), 2013, pp.30-36.
4. Kasprzyczak L., Nowak D., Gołębek A.: *Survey of mining inspection robots*, Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa 9(511), 2013, pp.31-36.
5. Kasprzyczak L., Trenczek S., Cader M.: *Robot for monitoring hazardous environments as a mechatronic product*, Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems 6(4), 2012, pp. 57-64.
6. Moczulski W., Cyran K., Novak P., Rodriguez A.: *Telerescuer – an innovative system for inspecting coal mine roadways affected by catastrophes*, Inżynieria górnicza 4, 2015, pp.50-53.
7. Report from functional tests of Mobile Inspection Platform, Central Mines Rescue Station, Equipment Testing and Expertise Laboratory, Bytom, December 2014, p. 8 (not published)
8. Report from traction tests of Mobile Inspection Platform, Central Mines Rescue Station, Equipment Testing and Expertise Laboratory, Bytom, June 2015, p. 8 (not published)
9. Szpak T., Szwejkowski P., Nowak D., Kasprzyczak L.: *Transmission systems of Mobile Inspection Platform*. EMTECH Conference 2014, pp.192-202
10. Tangshan Kaicheng Electronic to produce coal mine rescue robots, 2010-11-03, <http://www.whatsonxiamen.com/tech475.html> (accessed on 18.04.2016)
11. Timofiejczuk A., Adamczyk M., Bagiński M., Golicz P.: *Requirements for robots participating in rescue operations in underground coal mines*, 2nd International Conference “Mechanizacja Automatykacja i Robotyzacja w Górnictwie”, 2015, p.43
12. Trenczek S.: *Levels of possible self-heating of coal against current research*, Archives of Mining Sciences 53(2), 2008, pp. 293-317.
13. Trenczek S., Kasprzyczak L., Nowak D., Szwejkowski P.: *Functional assumptions and concepts of technical solutions of Mobile Inspection Platform*, EMTECH Conference, 2013, pp.193-202.
14. WA robot called in to help NZ mine rescue, 23.11.2010 <http://www.watoday.com.au/wa-news/wa-robot-called-in-to-help-nz-mine-rescue-20101123-184vo.html> (accessed on 18.04.2016)

LESZEK KASPRZYCZAK, PAWEŁ SZWEJKOWSKI
 Institute of Innovative Technologies EMAG
 l.kasprzyczak@ibemag.pl; p.szwejkowski@ibemag.pl

MACIEJ CADER
 Industrial Research Institute for Automation
 and Measurements
 mcader@piap.pl

Acknowledgements

The project financed by the National Centre for Research and Development within the Applied Research Programme, carried out by the scientific consortium: Institute of Innovative Technologies EMAG and Industrial Research Institute for Automation and Measurements PIAP. Grant No: PBS1/A2/12/2012; Duration: 1 Sep 2012 – 31 Aug 2015

Robotyzacja kopalń na przykładzie Mobilnej Platformy Inspekcyjnej

Artykuł przedstawia Mobilną Platformę Inspekcyjną – innowacyjne rozwiązanie w zakresie poprawy bezpieczeństwa w górnictwie węgla kamiennego. Robot w swoim wyposażeniu posiada oprzyrządowanie, pozwalające na bezpieczną eksplorację i monitorowanie tych rejonów kopalni, w których panują potencjalnie niebezpieczne dla człowieka warunki środowiskowe. Artykuł opisuje szczegółowo nie tylko wyposażenie urządzenia, ale także przebieg i wyniki testów w Centralnej Stacji Ratownictwa Górniczego.

Słowa kluczowe: urządzenia mobilne, bezpieczeństwo, monitorowanie

1. WSTĘP

Robotyzacja współczesnych kopalń jest zagadnieniem strategicznym ze względu na eksploatację coraz głębszych pokładów i występujące tam zagrożenia, zwłaszcza klimatyczne (wyższa temperatura i wilgotność), wyrzuty i emisja niebezpiecznych gazów (metan, siarkowodór), pożary endogeniczne i związana z tym emisja tlenku i dwutlenku węgla czy wyrzuty wody i skał [12]. Z tych powodów człowiek powinien być odsunięty najdalej jak to możliwe od strefy niebezpiecznej (obszaru urabiania), a najkorzystniejszym rozwiązaniem byłaby możliwość zdalnego sterowania procesem urabiania i transportu. Również w prowadzeniu akcji ratowniczych uczestniczyć powinny roboty wyposażone w czujniki do pomiaru stężeń niebezpiecznych gazów i warunków klimatycznych, stanowiąc zwiad dla zastępów ratowniczych i dając im wyprzedzające informacje na temat panujących w wyrobisku warunków, co zapewnić powinno większe bezpieczeństwo ludzi. Konieczność taka dostrzegana jest na całym świecie, o czym świadczą mnogość rozwiązań konstrukcyjnych robotów górniczych z różnych krajów [1,4,5,10]. Przykładem mogą tu być roboty Groundhog, Wolvarine V-2, Gemini-Scout opracowane w USA, a także Numbat czy roboty z Water Corporation skonstruowane w Australii. GMRI i MPI zostały opracowane w Polsce przez

instytuty EMAG i PIAP, z kolei Telerescuer zrealizowany został przez międzynarodowe konsorcjum. Również chińska firma Tangshan Kaicheng Electronic oferuje roboty przeznaczone dla przemysłu górnictwa węgla kamiennego. Ponadto stacje ratownictwa górniczego zgłaszają chęć posiadania inspekcyjnych robotów górniczych, ponieważ nierzadko zmuszone są do wstrzymania akcji ratowniczej z powodu zbyt ciężkich warunków panujących w rejonie prowadzonej akcji [11,14] i nieakceptowalnego ryzyka dla zastępów ratowniczych.

W niniejszym artykule przedstawiono osiągnięcia związane z realizacją przez konsorcjum złożone z Instytutu Technik Innowacyjnych EMAG oraz z Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów PIAP projektu pt. „Badanie i studium wykonalności modelu mobilnej platformy inspekcyjnej kategorii M1 z napędami elektrycznymi do stref zagrożonych wybuchem”, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Efektem tego projektu jest demonstrator technologii o nazwie Mobilna Platforma Inspekcyjna MPI.

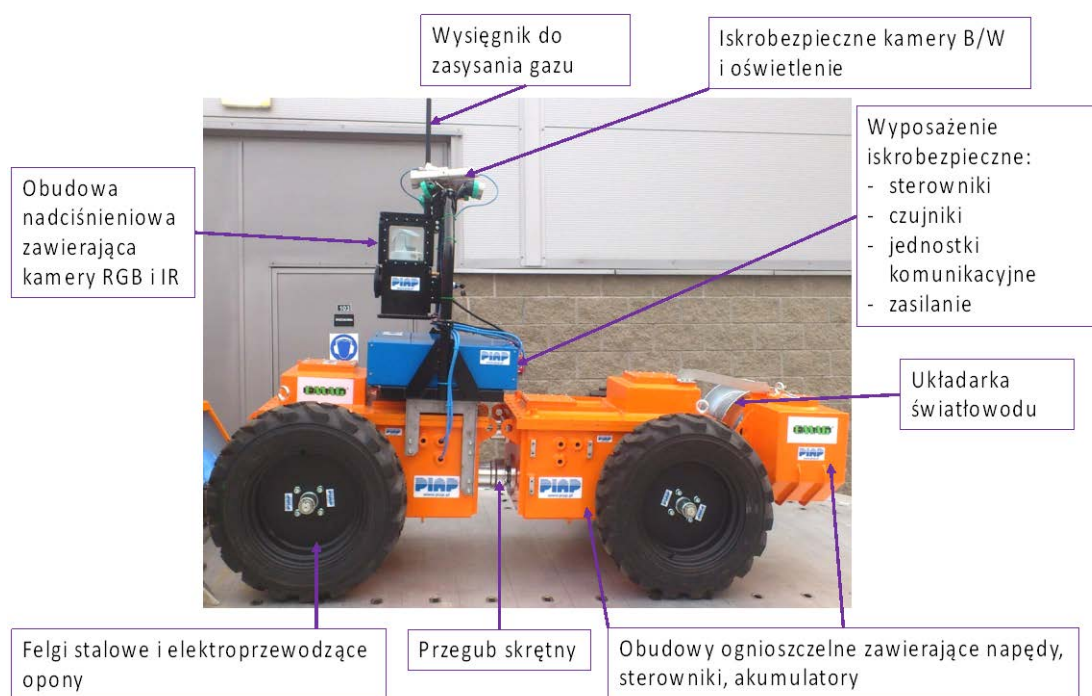
Najważniejszą funkcjonalnością MPI jest dokonywanie pomiarów stężeń i parametrów klimatycznych atmosfery kopalnianej w sposób ciągły lub na żądanie operatora, a następnie przesyłanie wyników pomiarowych do konsoli pomiarowo-sterującej, gdzie są one archiwizowane wraz z obrazami z kamer działających w paśmie widzialnym i podczerwonym.

Miejszem eksploatacji MPI są strefy wybuchowe i zagrożone wybuchem grupy I, toteż od samego początku robota projektowano jako maszynę spełniającą wymagania dyrektywy 94/9/WE (ATEX), a także dyrektywy maszynowej 2006/42/WE (MD) i dyrektywy 2004/108/WE (EMC). Robot został zaprojektowany do pokonywania różnorodnych przeszkód, takich jak gruz, woda, błoto czy tory spagowych kolejek górniczych.

2. MOBILNA PLATFORMA INSPEKCYJNA MPI

Mobilna Platforma Inspekcyjna (MPI) jest demonstratorem technologii opracowanym przez konsorcjum EMAG-PIAP. Podział prac między oba instytuty wynikał z uzupełniania wzajemnych kompetencji. Instytut PIAP opracował m.in. mechaniczne podzespoły platformy (osłony ognioszczelne stanowiące korpusy, osłonę nadciśnieniową wieży telewizyjnej, układarkę światłowodu, stelaż rurowy, obudowę

elektronikę iskrobezpieczną) oraz dobrał odpowiednie koła (felgi i opony), a także bloki napędowe złożone z bezszczotkowych silników prądu stałego BLDC, kątowych przekładni walcowych oraz luzowników. Do zakresu prac Instytutu EMAG należało opracowanie elektronicznych i programowalnych elektronicznych podzespołów robota (m.in. układów pomiarowych, systemów wizyjnych, układów transmisyjnych, sterowników komunikacyjnych i sterowników silnikowych, akumulatorów elektrycznych i obudów dla poszczególnych podzespołów oraz, gdzie to konieczne, oprogramowania do realizacji pomiarów, sterowania, komunikacji i archiwizacji). Szczegółowe rozwiązania techniczne zawarto w opracowanej przez każdy instytut dokumentacji z realizacji poszczególnych etapów projektu, która nie została opublikowana. Założenia funkcjonalne i koncepcje rozwiązań technicznych MPI (rys. 1) opisano w artykule [13]. W dalszej części niniejszej publikacji przedstawiono wyniki projektu oraz wyszczególniono normy, z wymaganiami których omawiana konstrukcja jest zgodna.



Rys. 1. Mobilna Platforma Inspekcyjna MPI

MPI charakteryzuje się następującymi cechami: masa ok. 1100 kg, prędkość maksymalna 0,7 m/s, zasięg 1000 m w głąb wyrobiska, gabaryty: długość 240 cm, szerokość 115 cm, wysokość 180 cm, zasilanie 42 VDC. Nie jest możliwy transport robota przez przepust w tamie o średnicy 80 cm.

3. NAPĘD I KORPUSY OGNIOSZCZELNE MPI

MPI posiada cztery koła oponowe, każde napędzane niezależnym blokiem napędowym. Instytut PIAP dobrał stalowe felgi i opony przewodzące elektrycz-

nie w celu zapobiegania skutkom wyłączeń elektrostatycznych. Blok napędowy złożony jest z bezszczotkowego silnika prądu stałego BLDC, łożyskowej przekładni walcowej, luzownika i sterownika silnikowego. Każdy napęd posiada swój własny akumulator litowo-polimerowy. Silnik wykonany jest w technice przeciwwybuchowej wzmocnionej „e” zgodnie z PN-EN 60079-7, zaś przekładnia i luzownik są zabezpieczone osłoną olejową „o” wg PN-EN 60079-6. Elektroniczne obwody drukowane sterowników silnikowych oraz akumulatorów są zahermetyzowane w myśl PN-EN 60079-18, natomiast przyłącza sterowników silnikowych i ogniwa akumulatorów spełniają wymogi budowy wzmocnionej „e”. Napędy umieszczono w obudowach ognioszczelnych „d” zgodnie z PN-EN 60079-1. Takie rozwiązania zapewniają podwójne zabezpieczenia przeciwwybuchowe, co w świetle wymagań normy PN-EN 50303 umożliwia osiągnięcie kategorii M1, a zatem ciągłą pracę w obecności gazów wybuchowych grupy I i/lub pyłu węglowego.

Do awaryjnego zatrzymania maszyny służą dwa wyłączniki awaryjne, umieszczone po jednym na przednim i tylnym wózku MPI. Wraz z przekaźnikami i stycznikami realizują one funkcję bezpieczeństwa zatrzymania awaryjnego o poziomie zapewnienia bezpieczeństwa PLc [2] wg PN-EN ISO 13849. Teoretyczne obliczenia parametrów elektromechanicznych napędów przedstawiono w pracy [3].

4. SYSTEM METROLOGICZNY MPI

Mobilna Platforma Inspekcyjna wyposażona jest w dwa identyczne moduły mierników gazów. Zastosowano w nich czujniki na podczerwień do pomiaru stężenia dwutlenku węgla i metanu w niskim i wysokim zakresie oraz elektrochemiczne do pomiaru stężenia tlenu i tlenku węgla. Metan jest mierzony w zakresie 0...100%, dwutlenek węgla – 0...5%, tlenek węgla – 0...1%, tlen – 0...25%, temperatura – -40...+120°C i wilgotność – 0...100%. Z uwagi na to, że w otaczającym rejonie panuje z reguły wysoka wilgotność (zwykle bliska 100%), opracowano układ osuszania mieszaniny gazowej przed podaniem jej na czujniki stężeń gazów. Badany gaz pobierany jest poprzez wysięgnik i osuszany przez osuszacz, po czym trafia do komory pomiarowej zawierającej czujniki stężenia gazów oraz czujniki diagnostyczne kontrolujące prawidłową pracę układu. Wewnętrzny czujnik temperatury umożliwia kompensowanie wpływu temperatury oraz informuje, czy nie został przekroczony temperaturowy próg działania czujni-

ków gazometrycznych. Natomiast czujnik wilgotności informuje o jakości osuszania w osuszaczu. Czujnik przepływu dostarcza informacji, czy pompka skutecznie zasysa powietrze. Zewnętrzne czujniki temperatury i wilgotności, umieszczone poza komorą pomiarową, dostarczają dane o warunkach klimatycznych panujących w wyrobisku wokół MPI.

Aby zwiększyć bezpieczeństwo ratowników, w MPI zastosowano rozwiązanie redundantne (zdwojenie) mierników gazów. Trudno jest bowiem opierać się na wskazaniach z pojedynczego czujnika z uwagi na jego skończoną niezawodność. Istotne w tym względzie są pomiary zwłaszcza trującego tlenku węgla oraz wybuchowego metanu. W normie PN-EN 61508 – w kontekście opisanego tam zagadnienia bezpieczeństwa funkcjonalnego – określone zostały architektury głosowania. W układzie pomiarowym MPI zastosowano głosowanie 2oo2 (czyt. *two out of two*). Wyniki pomiarowe w obu kanałach muszą być zgodne w zakresie przyjętej tolerancji, aby pomiar uznać za wiarygodny. Zatem, aby sztab akcji podjął decyzję o wpuszczeniu ratowników do niebezpiecznej strefy, wyniki pomiarowe w obu kanałach muszą wskazywać dopuszczalne stężenia niebezpiecznych gazów. Jeśli jeden kanał wskazuje wartość bezpieczną, a drugi niebezpieczną, to należy wycofać MPI i przeprowadzić procedurę kalibracji obu modułów czujników.

5. SYSTEM WIZYJNY MPI

System wizyjny składa się z czterech kamer i oświetlenia. Dwie kamery monochromatyczne (czarno-białe) produkcji EMAG są budowy iskrobezpiecznej kategorii „ia” wg PN-EN 60079-11. Kamery te nie posiadają napędów i jedna z nich skierowana jest na przód, a druga na tył robota. Kolorowa kamera wysokiej rozdzielczości umieszczona jest w osłonie naciśnieniowej rodzaju „px” zgodnie z PN-EN 60079-2. Posiada ona napęd umożliwiający jej sterowanie w płaszczyźnie pionowej i poziomej. Poniżej kamery kolorowej umieszczona jest kamera termowizyjna nieposiadająca napędu. Wieża telewizyjna wyposażona jest w szyby ze szkła sodowego (dla kamery kolorowej) i szkła germanowego (dla kamery termowizyjnej).

Wewnątrz wieży telewizyjnej panuje wyższe ciśnienie, aby uniemożliwić wnikanie zewnętrznej mieszaniny gazowej do jej środka. W obudowie umieszczono iskrobezpieczne urządzenie zabezpieczające, które monitoruje różnicę ciśnień zewnętrznego i wewnętrznego. Jeśli nastąpi rozszczelnienie

obudowy, spowoduje ono odłączenie zasilania od kamer. Urządzenie zabezpieczające posiada poziom nienaruszalności bezpieczeństwa SIL2 wg PN-EN 50495, co łącznie z budową przeciwwybuchową „px” umożliwia osiągnięcie kategorii M1 dla tego zespołu robota.

Na ramie rurowej umieszczono cztery lampy oświetleniowe – dwie skierowane na przód i dwie zwrócone do tyłu pojazdu. Są one zdalnie załączane przez operatora. Wykorzystano obudowy typowych lamp górniczych i wyposażono je w diody LED o większej mocy, zasilane z akumulatora iskrobezpiecznego.

6. SYSTEM TRANSMISYJNY MPI

Rozkazy sterujące operator wysyła z konsoli pomiarowo-sterującej (komputer o podwyższonej odporności na czynniki środowiskowe – IP54, odporny na wstrząsy i wibracje) wyposażonej w zaawansowany joystick. Istnieją dwie możliwości zdalnej komunikacji z MPI: drogą bezprzewodową Wi-Fi i poprzez światłowód [9]. W trakcie dojazdu MPI do miejsca prowadzenia akcji wykorzystuje się komunikację bezprzewodową, natomiast po wprowadzeniu robota do badanego wyrobiska – światłowód (nieprzenoszący płomieni). Światłowód rozwijany jest z ukłádarki.

Rozkazy sterujące odbierane są po stronie robota w komputerze TCP, a następnie dystrybuowane do odpowiednich sterowników mikroprocesorowych. Rozkazy odpowiedzialne za ruch robota przesyłane

są z komputera TCP poprzez procesor główny do nadrzędnego sterownika silnikowego, a stamtąd do poszczególnych sterowników silnikowych BLDC. Rozkazy wyzwalania pomiarów przesyłane są z komputera TCP poprzez procesor główny do dwóch modułów czujników. Procesor główny odpowiedzialny jest również za załączanie lampek oświetleniowych oraz stanowi węzeł komunikacyjny dla strumieni danych z kamer monochromatycznych. Strumienie danych z kamery kolorowej i termowizyjnej są przesyłane bezpośrednio poprzez komputer TCP i światłowód do konsoli operatora. Wymienione układy transmisyjne opracowano według iskrobezpiecznej techniki przeciwwybuchowej kategorii „ia” i umieszczono w niebieskiej obudowie charakteryzującej się IP54, przymocowanej do przedniego korpusu ognioszczelnego robota. W obudowie tej umieszczono ponadto cztery akumulatory iskrobezpieczne do zasilania separowanych obwodów elektrycznych.

7. BADANIA FUNKCJONALNE I TRAKCYJNE MPI PRZEPROWADZONE PRZEZ CSRG S.A.

Badania funkcjonalne zlecono specjalistom z Centralnej Stacji Ratownictwa Górniczego S.A. (CSRG). Prowadzono je w wyrobiskach ćwiczebnych na terenie CSRG. Na rys. 2. pokazano wjazd robota do wyrobisk ćwiczebnych CSRG. Widok oprogramowania pomiarowo-sterującego konsoli operatora przedstawiono na rys. 3.

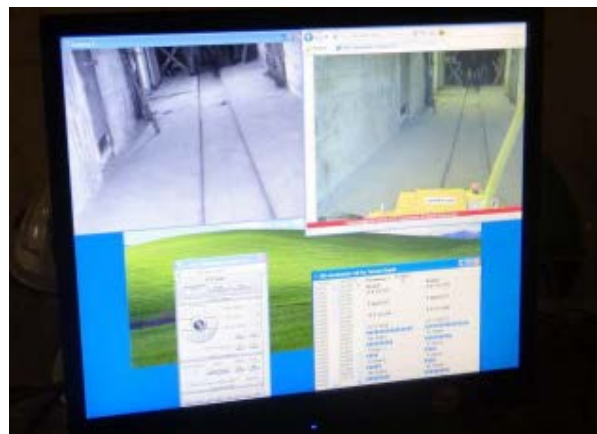


Rys. 2. MPI na placu CSRG przed wjazdem do wyrobiska ćwiczebnego [7]

Przeprowadzone badania doprowadziły do następujących konkluzji (za raportem [7] opracowanym przez CSRG):

„Przeprowadzone badania funkcjonalne modelu Mobilnej Platformy Inspekcyjnej MPI pozwalają stwierdzić, iż:

1. założone właściwości i cechy mogą w zidentyfikowanych sytuacjach pozwolić na zastąpienia człowieka – ratownika platformą MPI podczas wykonywania inspekcji podziemnych wyrobisk i pomiarów parametrów środowiska, szczególnie w warunkach zagrożenia wybuchem lub atmosferą niezdarną do oddychania.
2. wykonanie części mobilnej modelu spełnia w sposób wystarczający założone właściwości i cechy (...). Obraz przekazywany z kamer w warunkach braku oświetlenia stałego wyrobiska był dobrej jakości, co wobec konieczności obserwowania trasy przez zdalnego operatora pozwala na sprawne kierowanie platformą MPI.
3. funkcjonowanie stacji operatora (konsoli i zasilania) było poprawne. Komunikacja drogą bezprzewodową (na odcinku ok. 25 m) w aplikacji kierowania urządzeniem działała niezawodnie. Użyte w prototypowej wersji sterowanie platformą MPI przez operatora przy pomocy joysticka pozwalało na sprawne sterowanie kierunkiem ruchu platformy oraz zamontowaną na niej kamerą kolorową. Według założonego poziomu oceny badań funkcjonalnych to samo można powiedzieć o działaniu aplikacji pomiarowej (badania nie przewidywały oceny metrologicznej)”.



Rys. 3. Widok oprogramowania pomiarowo-sterującego MPI [7]

Badania trakcyjne prowadzone były przez ratowników z CSRG w wyrobiskach kopalni „Królów Łuiza”. Oszacowano, że robot przejechał w kopalni ok. 250 metrów, pokonując pochylnię o nachyleniu ok. 30°, relatywnie sypkie podłoże korytarzy (luźne kamienie, w których zdarzało się, że pojazd buksował kołami), tory kolejki górniczej, zwrotnice i typowe przeszkody stanowiące infrastrukturę kopalnianą (omijanie wyposażenia i urządzeń, składowanego materiału, wozów stojących na torach, stojaków obudów itp. – rys. 4). Podczas badań zespół wykonawców testował również funkcjonowanie zestawów czujników oraz kamer. Funkcjonalność wymienionych podzespołów była zadawalająca. Badania trakcyjne zakończyły się powodzeniem.



Rys. 4. Pokonywanie przez MPI przeszkód stanowiących infrastrukturę kopalni [8]

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Rosnąca z każdym rokiem liczba konstrukcji robotów górniczych świadczy o tym, że istnieje na rynku spore zapotrzebowanie na tego typu produkty. Chińska firma Tangshan Kaicheng Electronic szacuje swoje możliwości produkcyjne na 1800 sztuk robotów górniczych rocznie [10]. Rynek sprzedaży inspekcyjnych robotów górniczych powinien być chłonny z uwagi na to, że sztaby prowadzenia akcji ratowniczej nie chcą narażać ratowników na zbyt wysokie ryzyko związane z wkraczaniem do stref zagrożonych wybuchem i stref wybuchowych. Skoro saperzy policyjni i wojskowi dysponują od lat adekwatnym sprzętem do rozbrajania ładunków wybuchowych, można przewidywać, że analogiczne rozwiązania staną się na przestrzeni najbliższych lat także wyposażeniem kopalń.

Jednakże w porównaniu do robotów saperskich roboty górnicze oprócz wymagań funkcjonalnych muszą spełniać szereg wymagań narzuconych przez przepisy prawne, jakimi są dyrektywy europejskie, zwłaszcza ATEX (94/9/WE), EMC (2004/108/WE) i MD (2006/42/WE), z którymi należy wykazać zgodność opracowanych konstrukcji. Znane techniki budowy przeciwwybuchowej, takie jak osłony ognioszczelne, osłony z nadciśnieniem i hermetyzacja, powodują wzrost masy i gabarytów urządzeń, a co za tym idzie – pogorszenie funkcjonalności pojazdu. Istotne jest zatem zastosowanie ściśle optymalnego projektowania, aby spełnić konieczne wymagania przeciwwybuchowe z jednej strony, z zachowaniem funkcjonalności robota z drugiej.

Mobilna Platforma Inspekcyjna projektowana była od samego początku w oparciu o wymagania norm zharmonizowanych z właściwymi dyrektywami, co umożliwiało optymalizację konstrukcji opracowywanych podzespołów. Jednakże z uwagi na to, że poszczególne podzespoły wykonywane były w dwóch uzupełniających swe kompetencje instytucjach (EMAG i PIAP), dokonywano *a priori* pewnych założeń co do masy, kształtów i wyposażenia robota. Istnieje zatem obszar do optymalizacji gabarytów, masy, parametrów i rozmieszczenia poszczególnych jego podzespołów.

Projekt finansowany ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Badań Stosowanych, realizowany przez konsorcjum naukowe: Instytut Technik Innowacyjnych EMAG i Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP. Nr umowy: PBS1/A2/12/2012; czas realizacji: 1 XI 2012 – 31 VIII 2015.

Literatura

- Green J.: *Mine rescue robots requirements*. Outcomes from an industry workshop, Robotics and Mechatronics Conference, 2013, s. 111–116.
- Kasprzyczak L.: *Algorytm wyznaczania Poziomu Zapewnienia Bezpieczeństwa na przykładzie funkcji zatrzymania awaryjnego inspekcyjnego robota górniczego*, Napędy i Sterowanie 3, 2016, s.82-87.
- Kasprzyczak L., Dzikowski A., Nowak D.: *Wyznaczanie parametrów elektromechanicznych głównych napędów mobilnej platformy inspekcyjnej*, Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa 7(509), 2013, s.30-36.
- Kasprzyczak L., Nowak D., Gołąbek A.: *Przegląd inspekcyjnych robotów górniczych*, Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa 9(511), 2013, s.31-36.
- Kasprzyczak L., Trenczek S., Cader M.: *Robot for monitoring hazardous environments as a mechatronic product*, Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems 6(4), 2012, s. 57-64.
- Moczulski W., Cyran K., Novak P., Rodriguez A.: *Telerescuer – an innovative system for inspecting coal mine roadways affected by catastrophes*, Inżynieria górnicza 4, 2015, s.50-53.
- Raport z testów funkcjonalnych Mobilnej Platformy Inspekcyjnej, Centralna Stacja Ratownictwa Górniczego, Laboratorium Bdania i Opiniowania Sprzętu, Bytom, grudzień 2014, (materiały niepublikowane)
- Raport z testów funkcjonalnych Mobilnej Platformy Inspekcyjnej, Centralna Stacja Ratownictwa Górniczego, Laboratorium Bdania i Opiniowania Sprzętu, Bytom, czerwiec 2015, (materiały niepublikowane)
- Szapka T., Szwejkowski P., Nowak D., Kasprzyczak L.: *Układy transmisyjne Mobilnej Platformy Inspekcyjnej*. EMTECH Conference 2014, s.192-202
- Tangshan Kaicheng Electronic to produce coal mine rescue robots, 2010-11-03, <http://www.whatsonxiamen.com/tech475.html> (stan na 18.04.2016)
- Timofiejczuk A., Adameczyk M., Bagiński M., Golicz P.: *Requirements for robots participating in rescue operations in underground coal mines*, 2nd International Conference "Mechanizacja Automatykacja i Robotyzacja w Górnictwie", 2015, s.43
- Trenczek S.: *Levels of possible self-heating of coal against current research*, Archives of Mining Sciences 53(2), 2008, s. 293-317.
- Trenczek S., Kasprzyczak L., Nowak D., Szwejkowski P.: *Założenia funkcjonalne i koncepcje rozwiązań technicznych Mobilnej Platformy Inspekcyjnej*, EMTECH Conference, 2013, s.193-202.
- WA robot called in to help NZ mine rescue, 23.11.2010 <http://www.watoday.com.au/wa-news/wa-robot-called-in-to-help-nz-mine-rescue-20101123-184vo.html> (stan na 18.04.2016)

LESZEK KASPRZYCZAK, PAWEŁ SZWEJKOWSKI
Instytut Technik Innowacyjnych EMAG
l.kasprzyczak@ibemag.pl; p.szwejkowski@ibemag.pl

MACIEJ CADER
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP
mcader@piap.pl