

# Koncepcja budowy prototypu mobilnej platformy inspekcyjnej dedykowanej do pracy w kopalniach

Maciej Cader

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, Al. Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa

Leszek Kasprzyczak

Instytut Techniki Innowacyjnych EMAG, ul. Leopolda 31, 40-189 Katowice

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki prac projektu badawczego, którego celem było zrealizowanie mobilnej platformy inspekcyjnej (MPI). Zadaniem MPI jest monitoring stref zagrożonych wybuchem w kopalniach węgla kamiennego. W artykule opisano koncepcję budowy platformy bazującą na normach zharmonizowanych z dyrektywą ATEX.

**Słowa kluczowe:** Mobilna Platforma Inspekcyjna, dyrektywa ATEX, koncepcja budowy, kopalnia węgla kamiennego

## 1. Wprowadzenie

Liczba powstających konstrukcji robotów górniczych świadczy o tym, że istnieje na rynku zapotrzebowanie na tego typu produkty [2–5]. Licencję robota Gemini-Scout zakupiła firma Black-I Robotics z Bostonu z intencją uruchomienia produkcji. Natomiast chińska firma Tangshan Kaicheng Electronic szacuje swoje możliwości produkcyjne na 1800 robotów rocznie. Podstawową funkcjonalnością robotów górniczych jest pomiar stężeń niebezpiecznych gazów i warunków klimatycznych. Wzrost świadomości dotyczącej bezpieczeństwa, a także odpowiedzialność prowadzących akcję powodują, że sztab wolałby użyć robota inspekcyjnego niż narażać człowieka (podobnie jak ma to miejsce w działaniach saperskich i pirotechnicznych). Przewiduje się, że analogiczne rozwiązania mogą być obligatoryjne w górnictwie.

Mobilna Platforma Inspekcyjna (MPI) jest pojazdem kołowym. Koła MPI są napędzane silnikami elektrycznymi sprzęgniętymi z przekładnią i luzownikiem. Wszystkie te komponenty (łącznie z oponami) są wykonane według właściwych norm zharmonizowanych z dyrektywą ATEX lub komponentów posiadających certyfikaty lub opinie techniczne dot. zapewnienia odpowiedniego zabezpieczenia przeciwwybuchowego.

Przeznaczeniem docelowego prototypu Mobilnej Platformy Inspekcyjnej w wersji komercyjnej są strefy wybuchowe i zagrożone wybuchem grupy I. Z tego względu konstrukcja komercyjna powinna spełniać właściwe wymagania dyrektywy 94/9/WE

(ATEX), 2004/108/WE (EMC) i 2006/42/WE (MD). Spełnienie wymagań odpowiednich norm zharmonizowanych z tymi dyrektywami powinno wykazać przez domniemanie zgodności, spełnienie wymagań przedmiotowych dyrektyw.

Ogólnie MPI spełnia następujące wymagania funkcjonalne i konstrukcyjne:

- wykonanie zewnętrznych części platformy, obudowy i mechanicznych podzespołów MPI z materiałów o ograniczonej zawartości stopów metali lekkich i cyrkonu, a także tworzyw sztucznych,
- zapewnienie stopnia ochrony obudowy – co najmniej IP54,
- zastosowanie napędów elektrycznych i ich odpowiednie zabezpieczenie dwoma niezależnymi środkami ochrony w celu uzyskania kategorii M1,
- zasięg platformy do 1 km w głąb wyrobiska,
- możliwość pokonywania: pochyłości co najmniej 30°, progów o wysokości co najmniej 20 cm, miejsc zawodnionych o głębokości co najmniej 40 cm,
- praca w temperaturze do +60 °C i wilgotności względnej bliskiej 100% dla urządzeń elektronicznych i 100% dla części mechanicznych związanych z podwoziem i napędami,
- obserwacja trasy przejazdu kamerą z transmisją obrazu do stanowiska operatora. Kamery i oświetlenie mają funkcję zdalnego wyłączania w celu oszczędzania energii elektrycznej,
- możliwość dokonywania pomiaru ciągłego i/lub na żądanie stężeń:
  - CH<sub>4</sub> – w zakresie: 0...100%,
  - CO – w zakresie 0...1000 ppm,
  - CO<sub>2</sub> – w zakresie 0...5%,
  - O<sub>2</sub> – w zakresie 0...25%,
  - temperatura – w zakresie 10 °C...+60 °C,
  - wilgotność względna – minimum do 95%,
- pomiar metanu na wysokości przynajmniej ok. 1,7 m,
- wykonywanie cyklicznych pomiarów (z miejsca docelowego) i przesyłanie ich do konsoli operatora permanentnie lub na żądanie operatora,

### Autor korespondujący:

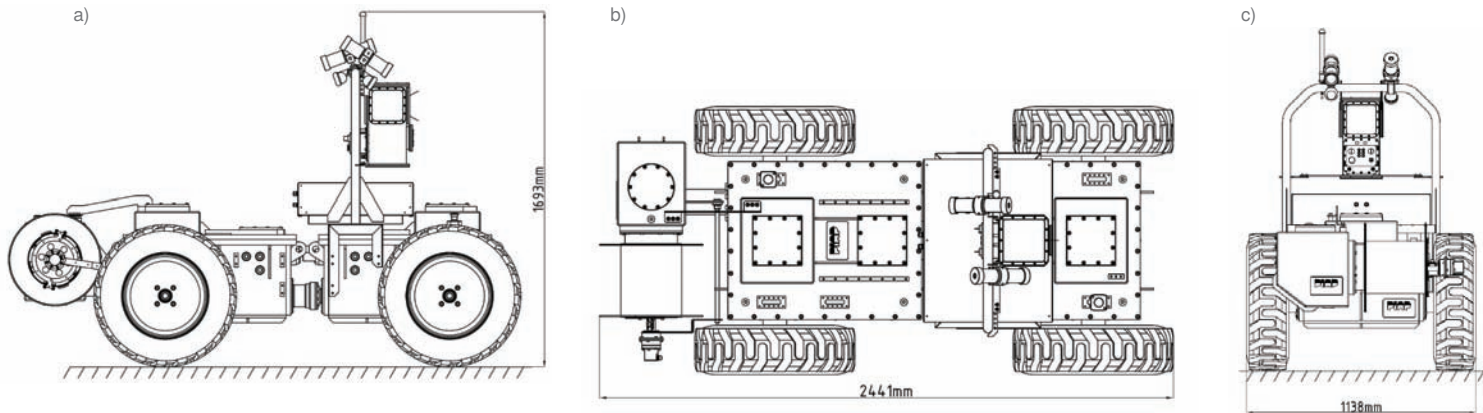
Maciej Cader, mcader@piap.pl

### Artykuł recenzowany

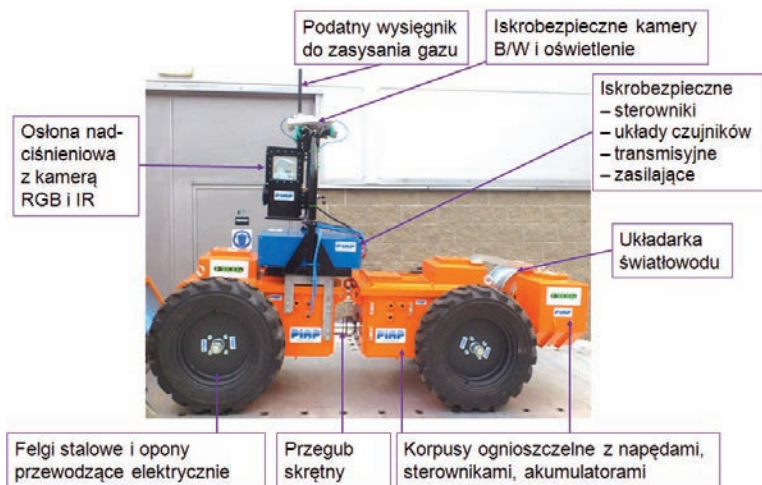
nadesłany 20.11.2015 r., przyjęty do druku 1.02.2016 r.



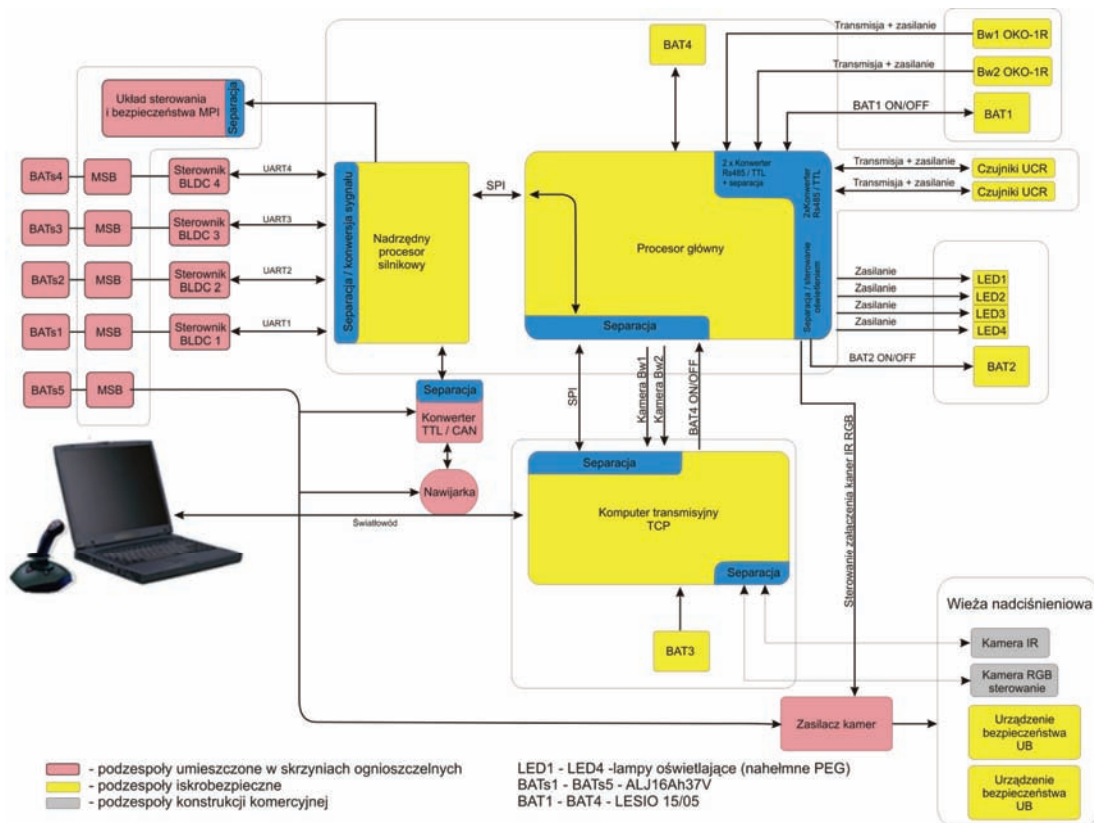
Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0



Rys. 1. Podstawowe, całkowite wymiary MPI: a) wysokość, b) długość, c) szerokość  
 Rys. 1. The basic, MPI dimensions : a) height, b) length, c) width



Rys. 2. Widok poglądowy Mobilnej Platformy Inspekcyjnej z opisanymi podzespołami  
 Rys. 2. A pictorial view of the Inspection Mobile Platform with components description



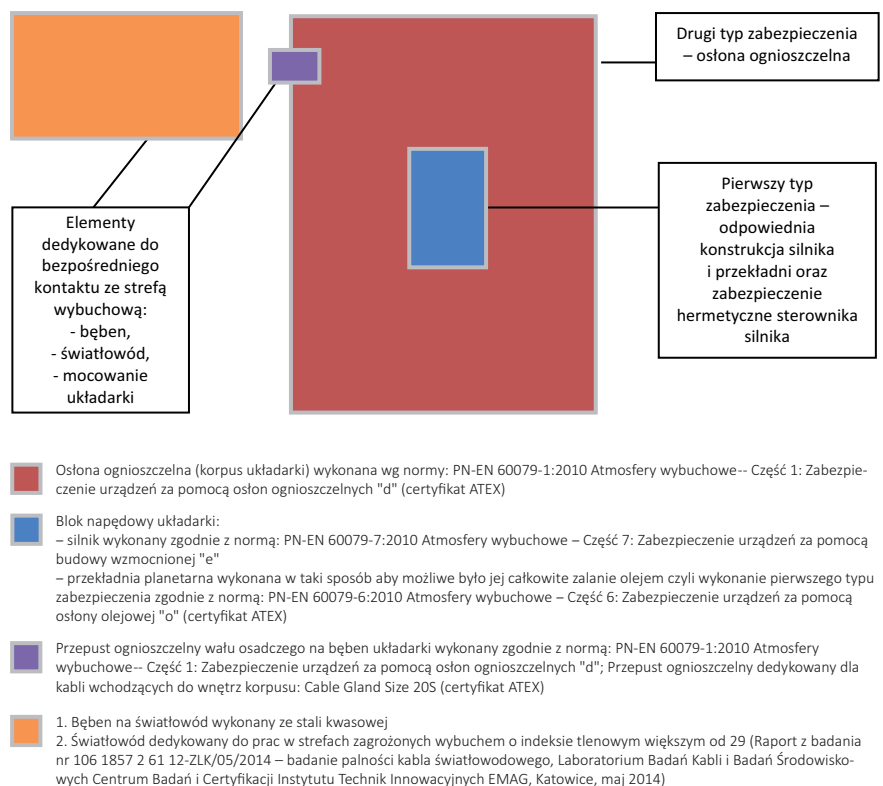
Rys. 3. Schemat blokowy układów elektronicznych i programowalnych elektronicznych Mobilnej Platformy Inspekcyjnej  
 Rys. 3. The block diagram of electronic circuits and programmable electronic of Mobile Inspection Platform

k) możliwość archiwizowania obrazów i wyników pomiarów na polecenie operatora.

MPI M1 jest demonstratorem technologii opracowanym w ramach projektu badawczego. Celem projektu realizowanego w konsorcjum Instytut Technik Innowacyjnych EMAG – Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP jest opracowanie demonstratora technologii Mobilnej Platformy Inspekcyjnej MPI z napędem elektrycznym do stref zagrożonych wybuchem w kopalniach węgla. Projekt pt. „Badanie i studium wykonalności modelu mobilnej platformy inspekcyjnej kategorii M1 z napędami elektrycznymi do stref zagrożonych wybuchem” finansowany jest przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Badań i Rozwoju w ramach Programu Badań Stosowanych. Rolą PIAP jest opracowanie mobilnej platformy mechanicznej z uwzględnieniem wszystkich wymaganych zabezpieczeń przeciwwybuchowych. Zadaniem Instytutu EMAG jest opracowanie wyposażenia elektronicznego i programowalnego mobilnej platformy wraz z oprogramowaniem sterującym.

MPI M1 na obecnym etapie prac nie jest produktem sprzedażnym.

Kluczowe podzespoły mechaniczne MPI mają już certyfikaty ATEX, certyfikaty producentów gotowych podzespołów na zgodność wykonania z dyrektywą ATEX lub opinie techniczne z jednostek notyfikowanych na dyrektywę ATEX.



Rys. 4. Schemat zabezpieczeń ATEX dot. korpusu układarki

Rys. 4. The ATEX regarding security scheme of paver body

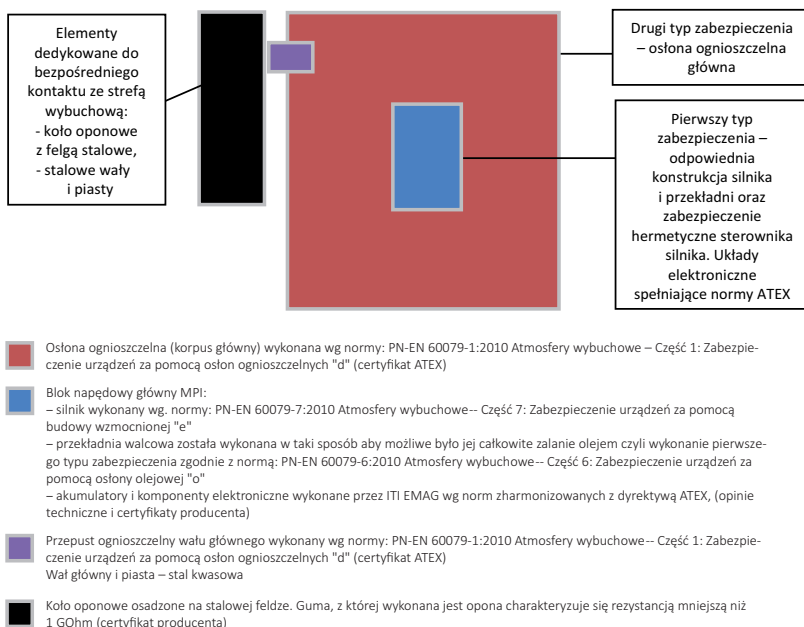
Mobilna Platforma Inspekcyjna (MPI) opracowana w ramach projektu jest konstrukcją stalową poruszającą się na kołach oponowych o odpowiedniej rezystancji. Całkowita masa MPI wynosi 1100 kg. Jej wymiary ogólne zostały przedstawione na rys. 1.

## 2. Opis koncepcji rozwiązań technicznych

Koncepcję rozwiązania technicznego obudów głównych i obudów układarki światłowodu MPI, opracowano na podstawie wytycznych dyrektywy ATEX i norm z nią zharmonizowanych. Dlatego w procesie konstruowania MPI przyjęto następujące schematy zabezpieczenia zobrazowane na schematach.

Opracowanie opinii technicznej zlecono jednostce certyfikującej na całościową konstrukcję MPI celem sprawdzenia zgodności dla urządzeń grupy I kategorii M1 wg PN-EN 50303 przez model Mobilnej Platformy Inspekcyjnej. Przedmiotowa opinia zawiera następujące konkluzje:

„Ośrodek Badań, Atestacji i Certyfikacji OBAC Sp. z o.o. potwierdza, że zapisy zawarte w dokumentacji wymienionej w punkcie 1 będącym przedmiotem niniejszej opinii są zgodne



Rys. 5. Schemat zabezpieczeń ATEX dot. korpusów głównych

Rys. 5. The ATEX regarding security scheme of main body

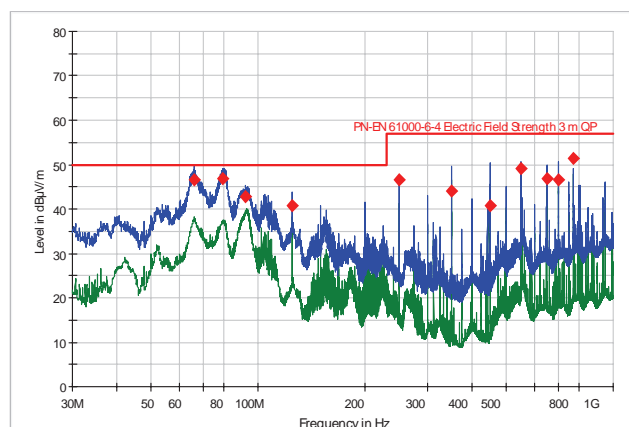




Rys. 6. Badanie odporności MPI na promieniowane pole elektromagnetyczne o częstotliwości radiowej  
Rys. 6. The radiated electromagnetic field of radio frequency test



Rys. 7. Ustawienie robota MPI w komorze bezodbiorniczej podczas pomiaru elektromagnetycznych zaburzeń promieniowanych  
Rys. 7. Orientation of MPI in anechoic chamber during the measurement of radiated electromagnetic disturbances



— Preview Result 2-AVG  
— Preview Result 1-FK+  
— PN-EN 61000-6-4 Electric Field Strength 3m OP  
◆ Final\_Result CFK

Rys. 8. Wykresy uzyskane podczas pomiaru elektromagnetycznych zaburzeń promieniowanych z MPI potwierdzające emisję poniżej dopuszczalnego limitu wyznaczonego przez normę PN-EN 61000-6-4  
Rys. 8. Graphs obtained after the measurement of electromagnetic disturbances radiated from the MPI confirming emissions below the permissible limit set by the PN-EN 61000-6-4



Rys. 9. Kadr z filmu obrazujący zjazd MPI do korytarza kopalni, po równi pochyłej  
Rys. 9. MPI entry to the mine passage across the slippery slope

z wymaganiami dla urządzeń grupy I kategorii M1 wg PN-EN 50303:2004 w takim zakresie, w jakim ocenione zostały podzespoły wchodzące w skład Mobilnej Platformy Inspekcyjnej MPI.

W celu potwierdzenia zgodności Mobilnej Platformy Inspekcyjnej MPI z wymaganiami dla urządzeń grupy I kategorii M1 wszystkie podzespoły wchodzące w skład MPI muszą być ocenione i przebadane w pełnym zakresie norm, pod które podlegają. Zastosowanie dwóch niezależnych środków budowy przeciwybuchowej potwierdzonych badaniami laboratoryjnymi i przeprowadzoną pełną oceną techniczną, pozwoli na spełnienie przez Mobilną Platformę Inspekcyjną MPI wymagań, jakie stawiane są dla urządzeń grupy I kategorii M1 wg PN-EN 50303:2004.”

W trakcie realizacji projektu prowadzono prace związane z przystosowaniem konstrukcji Mobilnej Platformy Inspekcyjnej do spełnienia wymagań dyrektywy 2004/108/WE (EMC) i norm z nią zharmonizowanych oraz przeprowadzono badania w akredytowanym Laboratorium Badań Kompatybilności Elektromagnetycznej Instytutu Technik Innowacyjnych EMAG.

Przeprowadzono badania odporności na wyładowania elektrostatyczne ESD:

- kontaktowe do powierzchni przewodzących  $\pm 4$  kV,
- w powietrzu do powierzchni izolacyjnych  $\pm 2$  kV,  $\pm 4$  kV,  $\pm 8$  kV.



Rys. 10. MPI po zjeździe do korytarza kopalnianego, przed wykonaniem testów

Rys. 10. MPI in excavation before performing tests



Rys. 11. MPI podczas postojowego testu kamer – „oślepienie” kamery – test reakcji kamer na rozbłytki

Rys. 11. MPI during the parking test cameras – „dazzling” camera – a reaction test to flashes of cameras

EUT spełnił kryterium oceny działania A, a więc brak pogorszenia funkcjonowania w trakcie narażania.

Następnie przeprowadzono badania odporności na promieniowane pole elektromagnetyczne (rys. 6) o częstotliwości radiowej:

- 80–1000 MHz: 10 V/m,
- 1,4–2,0 GHz: +3 V/m,
- 2,0–2,7 GHz: +1 V/m.

EUT spełnił kryterium oceny działania A.

W celu stwierdzenia, czy MPI emituje pole elektromagnetyczne o niedopuszczalnych wartościach, dokonano pomiaru elektromagnetycznych zaburzeń promieniowanych (rys. 7) i osiągnięto dopuszczalne wartości przedstawione na wykresie (rys. 8).

Podczas narażania EUT na pole elektromagnetyczne stwierdzono, że organy wykonawcze robota nie wykonują żadnych niekontrolowanych ruchów. Prawidłowo pracuje również wyposażenie osłony nadciśnieniowej, która stanowi zabezpieczenie dla urządzeń będących częścią wyposażenia dodatkowego MPI (kamery RGB i termowizyjną). Nie stwierdzono jakichkolwiek problemów z transmisyjnymi pomiędzy konsolą operatora a częścią mobilną robota.

Z uwagi na to, że MPI jest maszyną mobilną zaistniała konieczność zastosowania wymagań dyrektywy maszynowej 2006/42/WE i norm z nią zharmonizowanych. Na podstawie normy PN-EN ISO 12100 przeprowadzono proces oceny ryzyka, na który składają analiza ryzyka i ewaluacja ryzyka. W zakresie analizy ryzyka wyodrębniono ograniczenia maszyny, zidentyfikowano zagrożenia i oszacowano ryzyko. W przypadku mało prawdopodobnej awarii polegającej na niekontrolowanej jeździe pojazdu zagrażającemu zdrowiu otaczających go osób należy zastosować funkcję zatrzymania awaryjnego opartą o układ sterowania związany z bezpieczeństwem opisaną w artykule [1].

### 3. Testy i weryfikacja założeń projektu

Mobilna Platforma Inspekcyjna w ramach jednego z zadań w projekcie została powierzona specjalistom z Centralnej Stacji Ratownictwa Górniczego w celu realizacji badań funkcjonalnych i trakcyjnych MPI w kopalni Królowa Luiza (rys. 12). Testy trakcyjne polegały na przejechaniu zadanego odcinka wyrobiska górniczego oraz na pokonaniu równi pochyłej o kącie nachylenia ok. 30°, która stanowiła zjazd/wyjazd z korytarzy testowych wyrobiska kopalni.

Podczas testów dokonano weryfikacji pokonania wszystkich założonych w projekcie przeszkód, z wyjątkiem przejazdu przez teren zawodniony. Weryfikacji przejazdu przez tę przeszkodę ze względu na brak przeszkody tego typu dokonano w innym terminie. Próba zakończyła się sukcesem.

Wyniki testu przeprowadzonego przez CSRG opisano w raporcie: „Raport z badań trakcyjnych Mobilnej Platformy Inspekcyjnej MPI, Centralna Stacja Ratownictwa Górniczego SA, Laboratorium Badania i Opiniowania Sprzętu, Bytom, czerwiec 2015”

Główne wnioski z raportu CSRG zacytowano poniżej:

„5. Ocena końcowa wyników badań  
Przeprowadzone badania trakcyjne Mobilnej Platformy Inspekcyjnej MPI pozwalają stwierdzić, z uwzględnieniem uwag przywołanych w treści niniejszego raportu, iż:

1) założone właściwości i cechy mogą w zidentyfikowanych sytuacjach pozwolić na zastąpienia człowieka – ratownika platformą MPI podczas wykonywania inspekcji poziomych podziemnych wyrobisk i pomiarów parametrów środowiska, szczególnie w warunkach utrudnionego poruszania się z uwagi na występujące niewielkie przeszkody na trasie inspekcji.

2) wykonanie części mobilnej spełnia w sposób wystarczający założone właściwości i cechy, które opisane zostały w pkt. 1. Przeszkody napotykane na trasie były sprawnie omijane lub przekraczane, co jednakże powodowało istotne wydłużenie czasu przejazdu względem maksymalnych możliwości platformy. Prędkość, z jaką pokonywany był podjazd pod wzniesienie o dużym nachyleniu wskazuje na posiadanie znacznych rezerw mocy urządzenia.

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.”

### 4. Wnioski

Roboty górnicze oprócz wymagań funkcjonalnych muszą spełniać wymagania dyrektyw europejskich – ATEX, EMC i MD. Niestety osłony ognioszczelne, osłony z nadciśnieniem i hermetyzacja powodują wzrost masy i gabarytów, a co za tym idzie pogorszenie funkcjonalności. W trakcie trwa-





Rys. 12. Plan wyrobiska górniczego z zaznaczoną trasą przejazdu MPI (ok. 400 m) na czerwono oraz z zaznaczoną kolorem zielonym równią pochyłą  
 Rys. 12. Mine working plan with the selected route passing MPI (approx. 400 m) in red and with a marked slippery slope

nia projektu rozwiązano szereg problemów konstrukcyjnych godząc funkcjonalność robota z wymaganiami norm przeciwwybuchowych, kompatybilności elektromagnetycznej oraz bezpieczeństwa maszyn. W efekcie twórcy demonstratora Mobilnej Platformy Inspekcyjnej otrzymali wyróżnienia na krajowych i światowych wystawach:

- 17 kwietnia 2015 r. w Genewie w Szwajcarii – srebrny medal,
- 21–23 maja 2015 r. w Kuala Lumpur w Malezji – srebrny medal,
- 26 czerwca 2015 r. w Krakowie – złoty medal,
- XVIII Moskiewski Międzynarodowy Salon Archimedes 2015, Rosja – złoty medal,
- 12–14 października 2015 r. – 9. Międzynarodowa Warszawska Wystawa Wynalazków, IWIS 2015 – brązowy medal.

Dalszy rozwój MPI powinien iść w kierunku minimalizacji gabarytów i masy, poprzez optymalne wykorzystanie przestrzeni wewnątrz osłon i zastosowanie nowych, lżejszych materiałów na osłony ognioszczelne, łatwy demontaż i montaż podzespołów robota, np. kół celem przesunięcia MPI przez lutnię w tamie o średnicy 80 cm, montaż układarki światłowodów na środku pojazdu celem zachowania równowagi środka ciężkości masy przy pokonywaniu wzniesień, zintegrowanie kilku mikrokontrolerów w jeden o większej mocy obliczeniowej i przez to zredukowanie liczby obwodów izolowanych, nadanie większej autonomii przez zastosowanie skanerów laserowych i tworzenie przestrzennych map korytarzy.

## Podziękowania

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

## Bibliografia

1. Kasprzyczak L., Szejkowski P., Nowak D., Cader M., *Analiza funkcji bezpieczeństwa i dobór napędów dla górniczej Mobilnej Platformy Inspekcyjnej*, „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe”, Nr 2/2015 (106), Katowice, 99–106.
2. Kasprzyczak L., Nowak D., Gołąbek A., *Przegląd inspekcyjnych robotów górniczych*, „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa”, 9(511)/2013, 31–36.
3. Green J., *Mine rescue robots requirements. Outcomes from an industry workshop*, 6<sup>th</sup> Robotics and Mechatronics Conference (RobMech), 2013, 111–116, DOI: 10.1109/RoboMech.2013.6685501.
4. Kasprzyczak L., Trenczek S., Cader M., *Robot for monitoring hazardous environments as a mechatronic product*, „Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems JAMRIS”, Vol. 6, No. 4, 2012, 57–64.
5. Murphy R., Kravitz J., Stover S., Shoureshi R., *Mobile robots in mine rescue and recovery*, IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 16, No. 2, 2009, 91–103, DOI: 10.1109/MRA.2009.932521.



## The Concept of Building a Prototype of the Mobile Inspection Platform Dedicated for Use in Coal Mines

**Abstract:** The article presents the results of a research project whose aim was to realize mobile platform inspection (MPI). MPI task is to monitor hazardous areas in underground coal mines. The article describes the concept of building a platform based on harmonized standards with the ATEX Directive.

**Keywords:** mobile inspection platform, ATEX Directive, concept of building, coal mine

### mgr inż. Maciej Cader

mcader@piap.pl

Absolwent Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Obecnie pracownik Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów PIAP. Zajmuje się konstruowaniem, zaawansowanymi symulacjami komputerowymi i technologiami przyrostowymi. Współautor kilkunastu publikacji o tematyce związanej z robotyką mobilną.



### dr inż. Leszek Kasprzyczak

l.kasprzyczak@ibemag.pl

Absolwent Politechniki Śląskiej w Gliwicach na kierunku Automatyka i Robotyka oraz Politechniki Opolskiej na specjalności Budowa i Eksploatacja Maszyn. Specjalizuje się w mechatronice, bezpieczeństwie funkcjonalnym, oprogramowaniu CAD i LabVIEW.

