

# Badanie sprawności prototypu robota w prowadzeniu akcji ratunkowo-gaśniczych

Sebastian Jakubowski

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Mechaniki Stosowanej i Robotyki, Al Powstańców Warszawy 8, 35-029 Rzeszów

**Streszczenie:** Liczba interwencji ratowniczych straży pożarnej w Polsce rośnie. Odpowiedzią na potrzeby kontroli miejsc skażonych substancjami niebezpiecznymi dla zdrowia i życia człowieka jest projekt kołowego robota inspekcyjnego wspomagającego akcje pożarnicze. Urządzenie wyposażone jest w platformę jezdnią, układ sterowania, odpowiednią sensorykę, system wizyjny oraz nadajnik poszerzający zakres jego możliwości rewizyjnych. Projekt obejmuje dodatkowo kwestie zaadoptowania urządzenia do warunków rzeczywistych, a także porusza wybrane zagadnienia projektowania mechatronicznego i szybkiego prototypowania. Główne cele robota to wspieranie Straży Pożarnej w działaniach na terenie skażonym, poszukiwanie osób poszkodowanych, wykonywanie inspekcji bez narażania ratowników na bezpośrednią ekspozycję szkodliwych czynników. Poruszony został również aspekt możliwych oszczędności zasobów finansowych w jednostce straży pożarnej, w której wdrożone zostałyby omawiane rozwiązania. W ramach prac został zbudowany oraz zaprogramowany prototyp typu PoC.

**Słowa kluczowe:** robot inspekcyjny, straż pożarna, mechatronika, robotyka, ratownictwo

## 1. Wprowadzenie

Porównując dane zawarte w rocznikach statystycznych z lat 2019 oraz 2021, opublikowanych przez Główny Urząd Statystyczny, stwierdza się, że w Polsce stale rośnie liczba przeprowadzanych akcji ratowniczych. W 2018 r. straż pożarna RP przeprowadziła 502 200 akcji ratowniczych, w 2020 r. liczba ta wynosiła już 583 300. Zauważalna tendencja wzrostowa zachowuje się od 2010 r. W dużej części przypadków były to zagrożenia miejscowe, do których zaliczane są m.in. różnego rodzaju awarie techniczne, wypadki w komunikacji i katastrofy naturalne. W 2019 r. zdarzenia te stanowiły 312 000 akcji, w 2020 r. liczba ta wzrosła do 413 900 akcji. Na podstawie przytoczonych danych stwierdza się, że straż pożarna w Polsce zmaga się z rosnącą liczbą interwencji.

Podobnie jak przy zdarzeniach miejscowych, tak przy pożarach różnego typu wydzielają się gazy i substancje lotne stanowiące zagrożenie dla zdrowia i życia człowieka. Do najczęściej spotykanych należą tlenki węgla, węglowodory, dwutlenek siarki, siarkowodór, chlor. Dodatkowym zagrożeniem w przypadku niektórych substancji jest możliwość wybuchu lub samozapłonu. Obecność omawianych związków chemicznych

spowalnia lub uniemożliwia prowadzenie działań ratowniczych. Powodem tego jest możliwość bezpośredniego lub pośredniego zagrożenia zdrowia i/lub życia zarówno ratowników, jak i osób poszkodowanych i postronnych [9].

W przypadku zgłoszenia możliwego wycieku substancji niebezpiecznej, straż pożarna podejmuje szereg procedur, których zadaniem jest maksymalne zminimalizowanie zagrożenia oraz zoptymalizowanie działań ratowników. Priorytetem jest oszacowanie poziomu zagrożenia, następnie zabezpieczony zostaje obszar działań i pojazdy służb ratunkowych, a także przygotowani są ratownicy do wejścia na teren skażenia [10]. Po wykonaniu procedur, przystępuje się do akcji ratunkowej osób poszkodowanych. Czas niezbędny do zabezpieczenia całego obszaru nie jest stały, może się zmieniać w zależności od rodzaju zgłoszenia. Szacunkowo waha się od kilku do nawet kilkunastu minut po przybyciu straży pożarnej na miejsce zdarzenia [11]. W przypadku, gdy osoby poszkodowane pozostają wystawione na ekspozycję substancji zaklasyfikowanej jako niebezpieczna lub w obszarze zagrożonym wybuchem, czas jest czynnikiem decydującym o ich zdrowiu i życiu [1]. Problem ten dotyczy również pożarów, gdzie osoby pozostające na miejscu zdarzenia mogą być przez dłuższy czas wystawione na działanie produktów spalania.

Jako przykład wyposażenia specjalistycznego straży pożarnej przeanalizowano oprzyrządowanie samochodu specjalnego ratownictwa chemicznego typu SLRch opublikowanego w 2012 r. [12]. Analizując pojazd, a także wyposażenie innych wozów straży pożarnej stwierdzono, że aktualnie Państwowa Straż Pożarna nie korzysta z żadnych rozwiązań wykorzystujących inspekcyjną robotykę mobilną. Ponadto stosowanie innych urządzeń mechatronicznych jest niewielkie. Aparatura, która obecnie jest stosowana w ratownictwie to w większości narzędzia do obsługi ręcznej. Wykorzystanie ich w okolicznościach skażenia determinuje wcześniejsze przygotowanie operatora. Ratownik dokonu-

### Autor korespondujący:

Sebastian Jakubowski, d599@stud.prz.edu.pl

### Artykuł recenzowany

nadesłany 21.01.2025 r., przyjęty do druku 09.02.2026 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Int.

jący ręcznego pomiaru jest narażony na bezpośrednie działanie oparów, których dokładny skład nie jest znany.

Na podstawie dostępnych źródeł oraz analiz stwierdza się, że problem pracy straży pożarnej w warunkach skażenia substancjami niebezpiecznymi jest istotny oraz będzie on eskalował w najbliższym czasie. Dodatkowo kwestia ta dotyczy w podobnym stopniu zarówno strażaków ochotników, strażaków zawodowych oraz jednostki specjalistyczne.

## 2. Analiza istniejących rozwiązań

Według analizowanego standardu wyposażenia samochodu specjalnego ratownictwa chemicznego typu SLRch stwierdza się, że załoga ma sześć mierników stężenia gazu niebezpiecznego, jeden miernik stężenia tlenu oraz jeden miernik stężenia gazów i par palnych [12]. Detektor Multi Gas Clip Pump IR stanowi podstawowe wyposażenie wielu oddziałów straży pożarnej zarówno jednostek powiatowych, wojewódzkich, ratownictwa chemicznego, jak i Ochotniczej Straży Pożarnej [13]. Urządzenie cechuje się prostotą obsługi i kalibracji, a także funkcjonalnością. Zastosowanie w przyrządzie detektora podczerwonego gazów pozwala na pomiar bez udziału tlenu i ryzyka rozkalibrowania [13]. Przyrząd umożliwia pomiar zawartości tlenu, siarkowodoru, tlenku węgla. Możliwe jest również sprawdzenie obecności gazu wybuchowego, takiego jak metan, wodór, etan, propan, pentan, heksan w powietrzu. Liczba substancji, które można zmierzyć, a także ich rodzaj zależy od zainstalowanego sensora oraz jego skalibrowania.

Średni robot PIAP Patrol, osadzony na podwoziu gasienicowym, został zaprojektowany przez Sieć Badawczą Łukasiewicz – Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP. Służy on do wykrywania zagrożeń chemicznych, biologicznych, radiologicznych, wybuchowych i nuklearnych. Wyposażony jest w ramię o sześciu stopniach swobody zakończone chwytakiem wraz z kamerą na wysięgniku [2]. Robot jest urządzeniem wielozadaniowym i uniwersalnym. Może być stosowany przez różnego rodzaju służby, takie jak wojsko, policja, straż pożarna [2].

Shark Robotics „Rhyno” [14] to urządzenie o charakterze zadaniowym. Umożliwia prowadzenie działań w zamkniętych przestrzeniach, takich jak tunele, hale magazynowe lub fabryczne. Jego maksymalny czas pracy w niesprzyjającym środowisku to 8 godzin. Dla porównania ratownik w aparacie powietrznym przy pracy ciężkiej może spędzić około 15 minut. Francuska maszyna jest obecnie wykorzystywana m.in. przez paryskie oddziały straży pożarnej. Robot jest propozycją mającą na celu zastąpienie strażaka w sytuacjach skrajnie niebezpiecznych. Został wyposażony tak, aby możliwie w jak największym stopniu odzwierciedlał umiejętności ratownika i jego wyposażenia.

Kolejna konstrukcja Instytutu Łukasiewicz – PIAP o nazwie TRM to mały robot stosowany do rozpoznania i zwiadu w terenie otwartym lub w budynkach podczas operacji prowadzonych przez służby porządkowe. Zaprojektowany został z myślą o działaniu w terenie trudno dostępnym i/lub niebezpiecznym [3]. Konstrukcja została wyposażona w sztywno osadzone trzecie koło, stanowiące podparcie dla kół napędowych. Dzięki temu rozwiązaniu robot łatwo pokonuje niewielkie przeszkody oraz nierówności terenu.

W ramach przeglądu literatury oraz wywiadów z funkcjonariuszami Państwowej Straży Pożarnej i Podkarpackiej Jednostki Ratownictwa Chemicznego dokonano analizy zastosowania robotów w działaniach ratowniczych. Robot PIAP GRYF, podobnie jak inne konstrukcje Instytutu Łukasiewicz – PIAP (Patrol, TRM), nie jest dedykowany dla straży pożarnej [15] – charakteryzuje się wysokimi kosztami zakupu i utrzymania, złożoną obsługą oraz ograniczoną odpornością eksploatacyjną, co uniemożliwia jego powszechne wdrożenie. Aktualnie najczęściej stosowanym narzędziem pozostaje ręczny detektor czteroga-

zowy, którego zastosowanie obciążone jest ryzykiem dla ratownika i wydłużonym czasem reakcji. Przykład robota gaśniczego „Rhyno” firmy Shark Robotics wskazuje na kierunek rozwoju w stronę zastępowania strażaka, jednak praktyka dowodzi, że człowiek w działaniach ratowniczych pozostaje niezastąpiony. Wskazuje się natomiast na potrzebę projektowania kompaktowych robotów inspekcyjnych, wyposażonych w moduły sensoryczne, prostych w obsłudze i transporcie oraz relatywnie tanich, które mogłyby realnie wspierać działania jednostek PSP.

## 3. Projekt prototypu

Podstawowym założeniem projektu było rozwinięcie koncepcji robota inspekcyjnego sterowanego przez operatora, którego podstawowe zadania zdefiniowano jako: dotarcie w wyznaczone miejsce, pomiar istotnych wielkości dla działań ratunkowych, oraz przekazanie zebranych danych i obrazu. Niezwykle istotne było użycie komponentów nieiskrzących oraz zachowujących swoje właściwości mechaniczne w atmosferze gazów nieostrych.



Rys. 1. Prototyp pierwszej wersji robota inspekcyjnego  
Fig. 1. The prototype of the first version of the inspection robot

Punktem wyjścia procesu projektowania była pierwsza wersja robota przedstawiona na rysunku 1. Urządzenie stanowiło pierwsze przybliżenie rozwiązania omawianego problemu. Prototyp umożliwił określenie newralgicznych punktów urządzenia. Projekt był prowadzony równolegle z pracami nad drugim prototypem, dzięki czemu możliwe było systematyczne weryfikowanie rozwiązań z rzeczywistym modelem. Rozwiązanie to pozwoliło na dostosowanie komponentów mechaniki, elektroniki, oprogramowania i sterowania w czasie równoległym, dzięki czemu możliwe było współbieżne dopracowanie tych rozwiązań.

Finalna wersja omawianego prototypu znacznie odbiegała od swojego pierwowzoru pod względem konstrukcji. Bazując na testach pierwszej wersji wprowadzono liczne modyfikacje. Nowy prototyp demonstruje sposób działania zaprojektowanego urządzenia oraz przedstawia wprowadzone zmiany i innowacje. Urządzenie, w myśl koncepcji PoC (ang. *Proof of Concept*) wykonano z podzespołów i materiałów możliwie łatwo dostępnych, jednak starano się zaimplementować jak najwięcej elementów wskazujących docelowe rozwiązania. Robot wyposażono w małe, dwukółowe podwozie, którego korpus wykonany jest z tworzywa PETG. Gwarantuje ono dostęp do trudno osiągalnych miejsc. Zaimplementowano elektronikę sterującą, kamerę, zasilanie, enkodery, bezpieczniki, sygnalizator dźwiękowy oraz świetlny, cztery czujniki gazów, dwa cyfrowe czujniki temperatury oraz akcelerometr i system zrzutu nadajnika. Komunikacja urządzenia realizowana jest drogą radiową. Integralnymi elementami



Rys. 2. Prototyp drugiej wersji robota inspekcyjnego  
Fig. 2. Prototype of the second version of the inspection robot

prototypu są: panel operatora, który umożliwia w czasie rzeczywistym wymianę informacji z robotem, ładowarka, a także oprogramowanie wraz z GUI napisane w języku Python3. Nową iterację urządzenia przedstawiono na rysunku 2.

Przeprojektowane podwozie robota wyposażono w dwa koła napędowe i jedno podpierające. Wzorowano się na konstrukcjach stosowanych szeroko w rozpoznaniu przez grupy antyterrorystyczne, takich jak omawiany robot PIAP TRM. Urządzenie uległo miniaturyzacji, zostało znacznie obniżone, dzięki czemu zwiększyła się stabilność robota. Kształt korpusu został zaokrąglony oraz lepiej dostosowany do podzespołów. Zredukowana została również masa urządzenia. Wszystkie wymienione operacje zwiększyły mobilność i zwrotność robota, a także ułatwiły sterowanie oraz transport urządzenia.

Pozostając przy założeniach szybkiego prototypowania, opracowano model CAD urządzenia, który posłużył do przygotowania plików produkcyjnych korpusu, a także do przeprowadzenia wstępnych analiz i symulacji metodą elementów skończonych. Na podstawie geometrii modelu oraz oszacowanej masy urządzenia przeprowadzono dobór napędu. Obliczenia zostały przeprowadzone na podstawie danych literaturowych [4]. Dla otrzymanego wyniku zastosowano współczynnik bezpieczeństwa, który został przyjęty na poziomie 20 %. Uzyskano w ten sposób moment napędowy o wartości  $M_N = 0,3946 \text{ Nm}$ .

Dobrano silnik najbardziej zbliżony do uzyskanych parametrów, stosując przekładnię 63:1. Do drugich stron wałów silników zostały przymocowane enkodery magnetyczne ze czujnikami Halla TLE4946-2K. Jednostki napędowe wraz z czujnikami położenia wału zostały umieszczone w obudowach i zabezpieczone. Dobór przewodów został przeprowadzony na bazie danych literaturowych [16, 17] oraz pomiarów prądu w trakcie pracy ciągłej silników, przy hamowaniu i ruszaniu.

Do pomiaru temperatury wybrano moduł z wbudowanym cyfrowym czujnikiem temperatury DS18B20. Pomiary zawartości dwutlenku węgla i gazów łatwopalnych w powietrzu realizowane są za pomocą dwóch modułów firmy Waveshare serii MQ. Do konwersji sygnału analogowego dobrano 12-bitowy 4-kanalowy moduł ADC. W prototypie zastosowano akcelerometr GY-291 ADXL345 umożliwiający monitorowanie zdarzeń, takich jak ruch, upadek i kontakt z ciałem obcym robota.

W trakcie prowadzonych przez straż pożarną akcji ratunkowych osób poszkodowanych istotną kwestią jest odnalezienie w jak najkrótszym czasie ludzi znajdujących się w stanie zagrożenia zdrowia i życia [1].

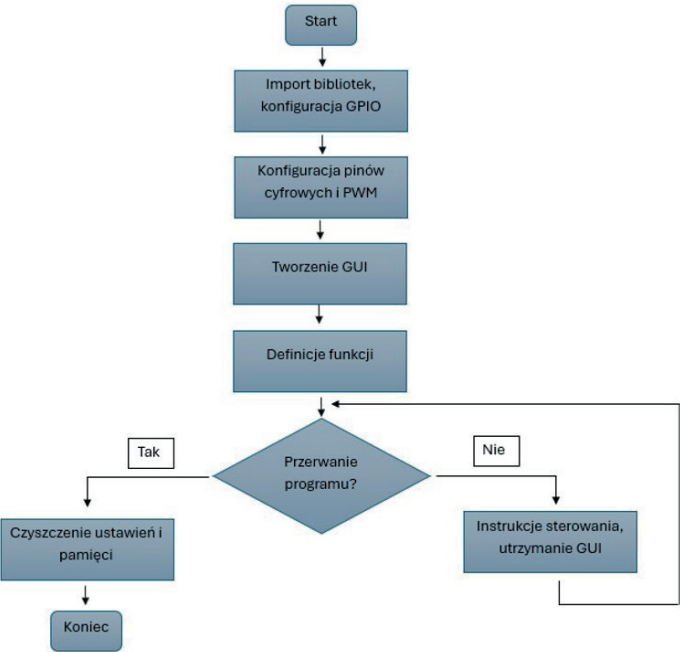
Zgodnie z założeniem projektowym prototyp robota inspekcyjnego został wyposażony w sygnalizację świetlną i dźwiękową umożliwiającą oznaczenie zdarzenia oraz lokalizację urządzenia

w sytuacjach awaryjnych. Na płycie głównej zainstalowano brzęczyk aktywowany cyfrowo, a na obudowie umieszczono sygnalizator świetlny wytypowany przez strażaków Podkarpackiej Jednostki Ratownictwa Chemicznego. Zastosowana lampa LED firmy Lalizas, zgodna z konwencją SOLAS (ang. *Safety of Life at Sea*), jest standardowo wykorzystywana przez ratowników PSP do oznaczania pozycji w warunkach ograniczonej widoczności oraz sygnalizacji alarmowej. Urządzenie ma własne zasilanie, automatycznie aktywuje się po kontakcie z wodą i może być stosowane niezależnie od robota, np. w przypadku uszkodzenia lampki osobistej ratownika [16].

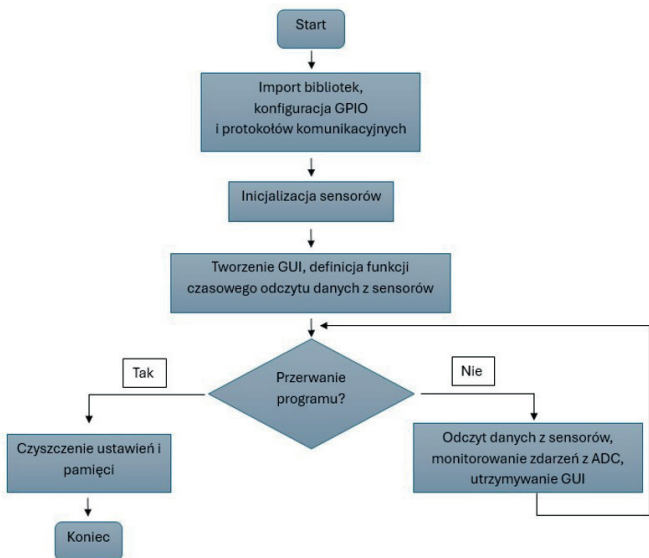
Oprogramowanie zostało podzielone na trzy osobne podprogramy: program sterujący, program służący do odczytu danych z sensorów oraz program do obsługi funkcji autonomicznych. Dzięki takiemu rozwiązaniu wysyłane przez operatora polecenia nie spowolniają aktualizowania informacji z czujników, a interfejs graficzny jest bardziej responsywny. Oprogramowanie w całości zostało napisane w języku Python3. Język ten został wybrany ze względu na kompatybilność z systemem mikrokomputera robota. Uproszczony schemat algorytmu podprogramu do sterowania robotem został przedstawiony na rysunku 3, a schemat algorytmu podprogramu do odczytu danych z sensorów na rysunku 4.

Komunikacja z komputerem robota odbywa się za pomocą pulpitu zdalnego. W omawianej konfiguracji wykorzystano program VNC Viewer. Zaimplementowano również środowisko Thonny. Zastosowana została wewnętrzna biblioteka programu Python do tworzenia graficznych interfejsów użytkownika GUI, o nazwie Tkinter. Aplikacja jest przeznaczona do stosowania w panelach dotykowych. Uproszczony schemat algorytmu podprogramu do realizacji funkcji autonomicznych został zilustrowany na rysunku 5. Finalną wersję interfejsu przedstawiono na rysunku 6. Prezentowany interfejs ma przyciski panelu dotykowego, wskaźniki wartości odczytanych z sensorów oraz widok z kamery robota.

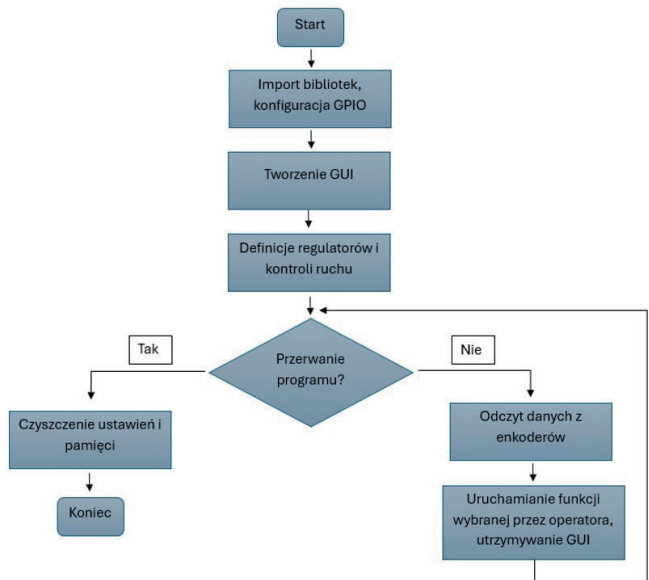
System wizyjny urządzenia składa się z kamery Raspberry Pi Camera HD v2 8MPx oraz mikrokomputera wraz ze specjalnym oprogramowaniem. Zastosowano, podobnie jak w przypadku pierwszej wersji robota, pakiet Motion. Zawiera on wiele narzędzi pozwalających na rejestrację obrazu, a także transmitowanie go i przetwarzanie w czasie rzeczywistym.



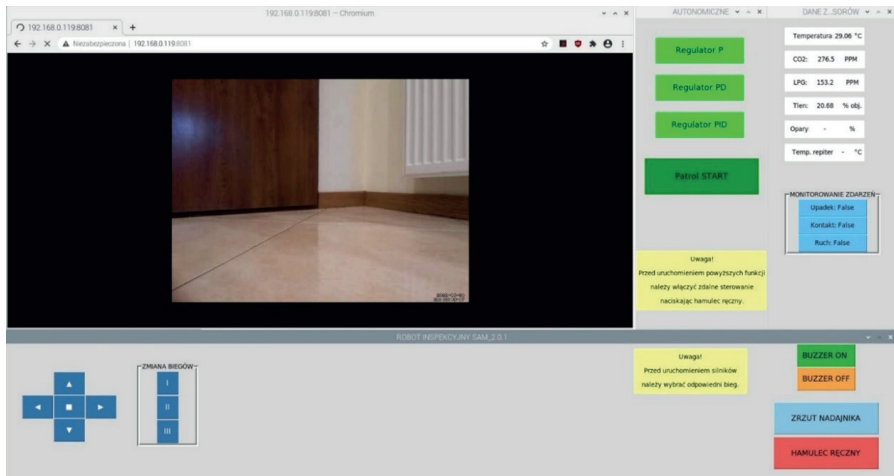
Rys. 3. Uproszczony schemat algorytmu podprogramu do sterowania robotem  
Fig. 3. Simplified diagram of the algorithm for the robot control program



**Rys. 4. Uproszczony schemat algorytmu podprogramu do odczytu danych z sensorów**  
Fig. 4. Simplified diagram of the algorithm for the program for reading data from sensors



**Rys. 5. Uproszczony schemat algorytmu podprogramu do realizacji funkcji autonomicznych**  
Fig. 5. Simplified diagram of the algorithm for the program for implementing autonomous functions



**Rys. 6. Prezentacja działania programów pożarniczego robota inspekcyjnego**  
Fig. 6. Presentation of the operation of fire inspection robot programs

## 4. Projekt przekaźnika sygnału

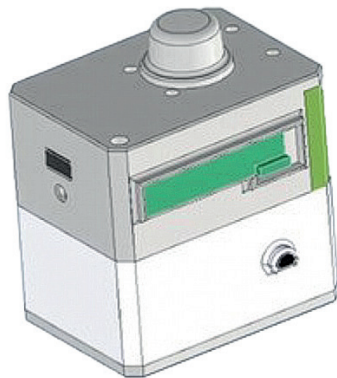
Ze względu na zmianę sposobu komunikacji, z przesyłania informacji drogą przewodową na standard Wi-Fi, niezbędne były dodatkowe modyfikacje systemu. Z racji relatywnie niskiego zasięgu, jakim dysponował robot inspekcyjny bez użycia dodatkowych przekaźników, zaprojektowano powielacz sygnału. Zadaniem urządzenia jest zwiększanie obszaru, po którym robot może się poruszać. Przekaznik sygnału wykonano na płytce ESP32 WROOM. Układ ustanawia punkt dostępu sieci, z którym łączy się komputer operatora oraz automatycznie mikrokomputer robota. Model zaprojektowanego urządzenia w programie CAD przedstawiono na rysunku 7.

Przekaznik sygnału zaprojektowano tak, aby możliwe było działanie we współpracy z większą liczbą urządzeń. Projekt zakłada umieszczenie jednego egzemplarza na robocie oraz oddanie dwóch kolejnych do dyspozycji operatora. Zrzut powielacza sygnału z urządzenia może zostać zainicjowany przez strażaka w momencie osłabienia jakości transmisji lub gdy uzna on, że robot wjeżdża w obszar, w którym możliwa jest utrata łączności. Może on zostać również pozostawiony w miejscu, któremu przypisano najwyższy priorytet inspekcyjny z punktu widzenia celu operacji. Powielacz został wyposażony również w czujnik stężenia oparów benzyny MQ-135. Jeżeli nie ma potrzeby wprowadzania robota do miejsca skażenia lub nie jest to możliwe, strażak może stosować nadajnik jako samodzielne urządzenie i za jego pomocą realizować niezbędne pomiary wrzucając go do obszaru badanego i uzyskując wyniki na panelu operatorskim. Zaproponowana koncepcja zyskała uznanie pracowników straży pożarnej, którzy stwierdzili dużą praktyczność i użyteczność zaproponowanego urządzenia.

## 5. Symulacja statyczna korpusu robota

W projekcie robota inspekcyjnego dla straży pożarnej znaczące było opracowanie modelu podwozia i wykonanie jego prototypu przy zastosowaniu technologii druku 3D. Na podstawie modelu CAD podwozia robota, przeprowadzono analizę naprężeń z uwzględnieniem masy całkowitej urządzenia.

Badając podwozie robota założono, że uchwyty na jednostki napędowe oraz montaż koła podpierającego są nieruchome. Przyjęto również, że całkowita masa robota została zasymulowana jako obciążeniem równomiernie rozłożone na podwoziu. Materiał zdefiniowano jako tworzywo sztuczne PET. Wyniki analizy w postaci naprężeń i współczynnika bezpieczeństwa przedstawiono na rysunkach 8–13.



**Rys. 7. Model CAD repeatera sygnału**  
Fig. 7. CAD model of the signal repeater

Na rysunku 8 przedstawiono współczynnik bezpieczeństwa w podwoziu robota, którego wartość dla omawianego elementu wynosi 15. Pozorne przewymiarowanie jest zabiegiem celowym ze względu na kilka czynników, takich jak potrzeba gwarancji wysokiego stopnia odporności konstrukcji już na etapie analizy statycznej, wykonanie korpusu technologią druku przestrzennego, w której uzyskanie właściwości porównywalnych z komponentami odlewanyymi lub wtryskiwanymi jest trudne, a także umożliwienie zmiany materiału z zachowaniem wysokiego współczynnika bezpieczeństwa. Elementy korpusu finalnie zostały wydrukowane z tworzywa PETG co oznacza, że materiał zawierał domieszkę glikolu.

Napężenie Von Misesa w podwoziu robota inspekcyjnego, przedstawione na rysunku 9, pozwala stwierdzić, że zakładany materiał nie przekracza granicy plastyczności pod wpływem złożonego stanu naprężenia. Dla PETG granica plastyczności wynosi 50–70 MPa, w zależności od specyfikacji materiału i producenta [8].

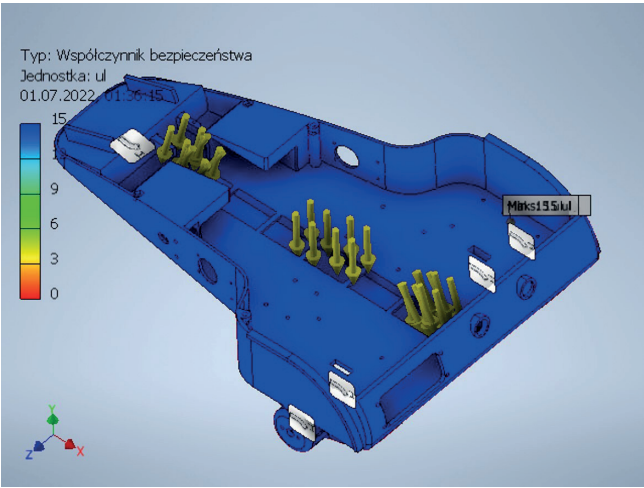
Analiza pierwszego naprężenia głównego, rysunki 10 i 11, pozwala zidentyfikować maksymalne naprężenia normalne w konstrukcji. Szczególnymi punktami koncentracji naprężeń są otwory, narożniki i połączenia, jednak uzyskane wartości są dalekie od wytrzymałości PETG na rozciąganie [8].

Naprężenia, jakie występują w podwoziu robota, są znikome i nie mają wymiernego wpływu na komponent. Na podstawie analizy statycznej stwierdza się, że zaprojektowany element jest

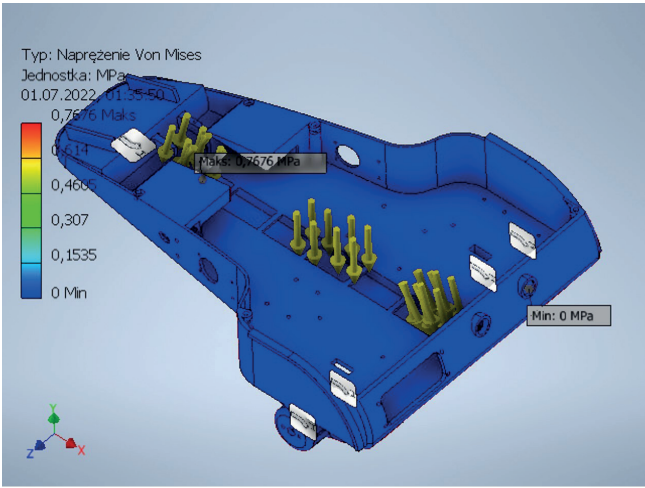
przesztyniony i wszelkie naprężenia, które w nim występują, są dalekie od granicy plastyczności materiału. Biorąc pod uwagę docelową aplikację oraz wymiary robota, nadmierne usztywnienie korpusu nie będzie miało negatywnego wpływu na działanie prototypu. Uwzględniając bardzo dużą wytrzymałość zaprojektowanej części zdecydowano o zredukowaniu wypełnienia w wydruku elementów obudowy.

## 6. Sterowanie robotem i jego testy

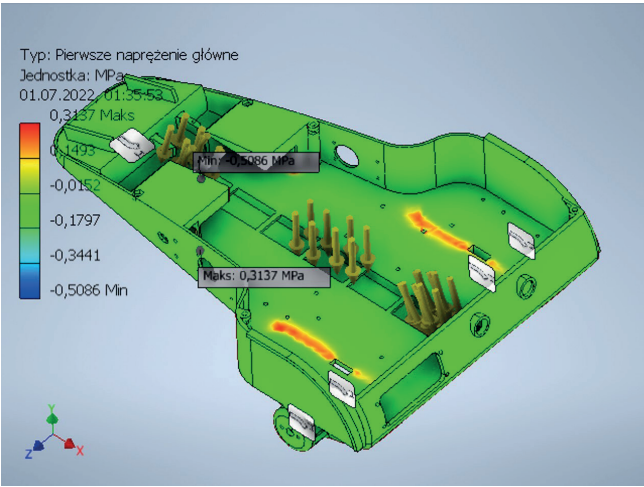
Sterowanie robotem, podobnie jak w pierwszej wersji urządzenia, zrealizowano na dwukanałowym sterowniku L298N, który zawiera elektroniczne mostki H. Moduł jest sterowany za pomocą sygnałów cyfrowych. Na jego podstawie opracowano zdalne oraz autonomiczne sterowanie. Korzystając z doświadczenia pracowników straży pożarnej stwierdzono, że najbardziej pożądaną formą sterowania robotem jest sterowanie ręczne przez operatora. Większość konstrukcji omówionych w przeglądzie literatury, cechuje się właśnie takim rodzajem sterowania. Zaproponowano także tryby półautonomiczne wspomagające operatora. W ramach omawianego rozwiązania zaprogramowano patrolowanie terenu w formie objazdu po ustalonej trajektorii okręgu. Dla tej funkcjonalności zaimplementowano trzy klasyczne regulatory (P, PD, PID), które zostały przetestowane w identycznych warunkach. W ten sposób porównano ich skuteczność utrzymani-



Rys. 8. Współczynnik bezpieczeństwa podwozia robota inspekcyjnego – jednostka bezwymiarowa  
Fig. 8. Safety Factor in the Undercarriage of an Inspection Robot - ul (unitless) - dimensionless unit



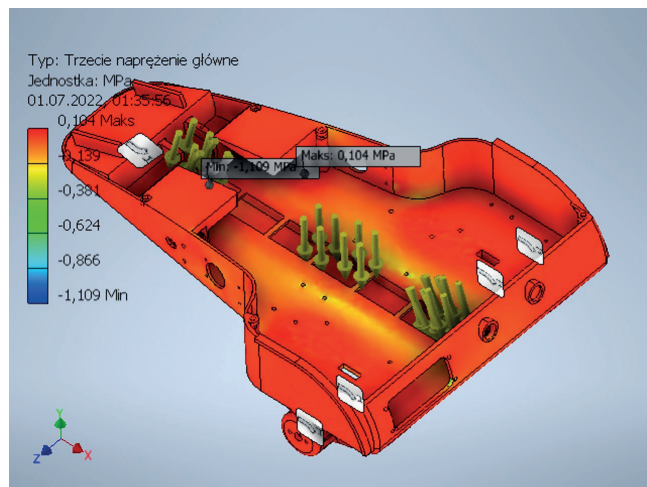
Rys. 9. Napężenie Von Misesa w podwoziu robota inspekcyjnego  
Fig. 9. Von Mises stress in the bottom of an inspection robot chassis



Rys. 10. Pierwsze naprężenie główne w podwoziu robota inspekcyjnego; widok z góry  
Fig. 10. First principal stress in the bottom of the inspection robot chassis; top view



Rys. 11. Pierwsze naprężenie główne w podwoziu robota inspekcyjnego; widok z dołu  
Fig. 11. First principal stress in the bottom of the inspection robot chassis; bottom view



**Rys. 12. Trzecie naprężenie główne w podwoziu robota inspekcyjnego; widok z góry**  
Fig. 12. Third principal stress in the bottom of the inspection robot chassis; top view

wania robota na zadanym torze. Każdy regulator został oceniony pod względem wartości uchybu ustalonego, czasu regulacji oraz przebiegu odpowiedzi na zakłócenia (np. nierówności podłoża). Najlepsze rezultaty pod względem stabilności i precyzji uzyskano dla regulatora PID.

Testy prototypu podzielono na cztery grupy: sensoryka, system wizyjny, mobilność oraz autonomia. Każda grupa miała określoną metodę i scenariusze testowe, które pozwalały na obiektywną ocenę działania urządzenia.

Testy sensoryki zostały przeprowadzone w początkowej fazie projektu. Sprawdzano skuteczność czujników gazów ( $\text{CO}_2$ , LPG,  $\text{O}_2$ ) w warunkach kontrolowanych. W każdej próbie emitowano określoną ilość gazu w odległości 20, 50 i 100 cm od robota. Wynikiem pozytywnym była rejestracja sygnału powyżej progu detekcji w ciągu 5 sekund od ekspozycji. Czujniki wykazały poprawne działanie, jednak z zauważalnym błędem pomiarowym ( $\pm 15\%$ ). Dla czujnika tlenu prowadzono testy z wypieraniem powietrza  $\text{CO}_2$ , a detekcja spadku poziomu  $\text{O}_2$  potwierdziła poprawność działania układu. Z uwagi na brak atestów, planuje się zastosowanie czujników klasy przemysłowej w kolejnej wersji.

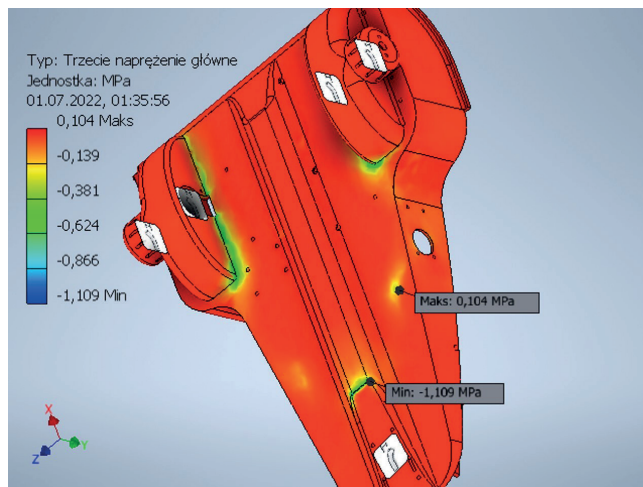
Oceniano jakość obrazu w transmisji bezprzewodowej oraz zdolność do wykrywania ruchu. Scenariusz testowy zakładał zdalne prowadzenie robota w zaciemnionym pomieszczeniu z przeszkodami. Miary oceny obejmowały opóźnienie transmisji (średnio 200 ms przy odległości 5 m) oraz subiektywną ocenę operatorów (skala 1–5, średnia ocena 4,2). Funkcja detekcji ruchu działała poprawnie dla obiektów większych niż  $15 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ , z prędkością ruchu powyżej  $0,3 \text{ m/s}$  oraz z minimalnej odległości 40 cm.

Sprawdzano zachowanie pojazdu na różnych nawierzchniach (beton, trawa, kafele) i przy różnych prędkościach. Rejestrowano przyspieszenia (maks.  $2,3 \text{ m/s}^2$ ), skuteczność hamowania (dystans hamowania z prędkości maksymalnej – 0,9 m), oraz reakcje na komendy zdalne. Wszystkie próby zakończyły się powodzeniem, bez utraty kontroli nad urządzeniem.

W trybie patrolowym robot miał za zadanie wykonać przejazd po trajektorii okręgu o promieniu 1 m. W teście porównano działanie regulatorów P, PD i PID. Otrzymane wyniki:

- P – krótki czas reakcji, ale niestabilność przy zakłóceniach,
- PD – lepsze tłumienie oscylacji, umiarkowany czas regulacji,
- PID – najlepsza stabilizacja trajektorii, najmniejszy błąd ustalony ( $< 3 \text{ cm}$ ).

Testy wykazały, że prototyp spełnia podstawowe wymagania funkcjonalne. Jednak wykryto również ograniczenia, przede wszystkim w dokładności sensorów oraz ograniczonej stabilności transmisji na większych odległościach. Na podstawie analizy stwierdzono, że niezbędna jest wymiana czujników na certyfiko-



**Rys. 13. Trzecie naprężenie główne w podwoziu robota inspekcyjnego; widok z dołu**  
Fig. 13. Third principal stress in the bottom of the inspection robot chassis; bottom view

wane, wprowadzenie algorytmów estymacji trajektorii dla autonomii oraz rozbudowa interfejsu sterowania.

## 7. Dostosowanie do warunków rzeczywistych

Ostateczna wersja urządzenia wymaga pełnej zgodności z dyrektywą ATEX. Definiuje ona wszystkie wymagania, jakie musi spełniać narzędzie przeznaczone do pracy w warunkach zagrożenia pożarowego i wybuchowego [17]. Na podstawie projektu, budowy i testów dwóch prototypów robotów inspekcyjnych określono najważniejsze wymagania dla finalnego prototypu.

Robot powinien być urządzeniem w pełni iskrobezpiecznym, aby nie stwarzać dodatkowego zagrożenia na terenie skażonym substancją łatwopalną. Założenia projektowe wykluczają również możliwość występowania w pojeździe różnego rodzaju zjawisk termicznych [18]. Konstrukcja urządzenia powinna być wykonana z materiałów ognioodpornych, a zarazem obojętnych na działanie wysokiej temperatury w stopniu zgodnym z dyrektywą ATEX.

Poszczególne elementy robota nie mogą tracić swoich właściwości w wyniku zmian temperatury oraz działania substancji chemicznych [17].

Jak podają autorzy pracy „Analiza i wpływ zagrożeń chemicznych na środowisko i zdrowie pracowników straży pożarnej” [5] substancje drażniące, jakie mogą występować na obszarze pracy strażaków to: amoniak, chlor, fosgen, fluor, ftalany i tlenki azotowe. Finalne urządzenie powinno być wyposażone w zestaw wymiennych nadajników, repeaterów z sensorami wszystkich wymienionych substancji. Dodatkowo elementy o dużej odpowiedzialności, takie jak sensory, moduły sterujące oraz zasilające powinny mieć odpowiednie atesty. Do poprawnego działania robota niezbędne jest również przeszkolenie personelu, a także regularne przeprowadzanie ćwiczeń z wykorzystaniem urządzenia. Opisane środki bezpieczeństwa są wzorowane na konstrukcjach o podobnym stopniu odpowiedzialności. Sformułowane zostały na podstawie literatury branżowej oraz przeprowadzonych własnych wywiadów i badań.

Na podstawie przeprowadzonych testów proponowane są sensory, które mają odpowiednią certyfikację. Jako podstawowy czujnik dwutlenku węgla robota inspekcyjnego rekomenduje się sensor Senseair serii K30, do odczytu wartości gazu LPG czujnik firmy Figaro TGS2611-C00, jako sensor temperatury rekomenduje się termoparę typu K. Do pomiarów oparów benzyny rekomenduje się MiniPID 2 firmy Ion Science, czujnik tlenu SEN0322 stosowany w omawianym prototypie jest odpowiedni do dalszego użycia.

## 8. Potencjał optymalizacji sprawności prowadzenia akcji ratunkowo-gaśniczych

Kwestią bezdyskusyjną jest stwierdzenie, iż wszystkie prace unowocześniające stosowane w przemyśle specjalnym, jakim jest sprzęt ratowniczy, mają za zadanie podnoszenie sprawności działania. Definiując zagadnienie sprawności można wskazać na osiąganie celów w zakresie bezpieczeństwa w sposób szybszy, prostszy, bezpieczniejszy, ale również przy mniejszych nakładach energetycznych, finansowych i czasowych.

Zastosowanie robota inspekcyjnego, który może w określonych okolicznościach zastąpić lub wspomóc strażaka, ograniczając tym samym jego ekspozycję na czynniki zagrażające jego życiu lub zdrowiu, ma realną szansę na podniesienie bezpieczeństwa prowadzonych działań. Ograniczenie potrzeby długotrwałego przygotowywania ratownika do wejścia w obszar skażony również może wpłynąć pozytywnie na sprawność prowadzenia działań na rzecz szybkości oraz uproszczenia procedury.

Należy podkreślić znaczenie omawianego projektu w kontekście podniesienia wskaźnika sprawności działań ratowniczych w obszarze zmniejszenia kosztów uzyskania celów bezpieczeństwa. Na koszt akcji ratunkowej prowadzonej przez straż pożarną składają się: koszty pracownicze strażaków w czasie prowadzenia działań, koszty zużycia wyposażenia, koszty dojazdu i motogodzin wozów bojowych, koszty administracyjne. W analizowanym przypadku nie poruszana jest kwestia kosztów związanych z ewentualnymi naprawami uszkodzonych sprzętów, leczeniem oraz rehabilitacją poszkodowanych ratowników i kosztów związanych z wypadkiem śmiertelnym, które również uwzględniane są w kalkulacjach społeczno-ekonomicznych [6].

Biorąc pod uwagę intensywność interwencji straży pożarnej, czas trwania poszczególnych akcji oraz relatywnie niewielki koszt związany z wdrożeniem robotów inspekcyjnych stwierdza się, że uzyskanie redukcji czasu trwania jednego wyjazdu nawet niewielkiego rzędu jest w stanie generować w stosunku rocznym znaczne oszczędności dla jednostki straży pożarnej. Narracja wpisuje się również w optymalizację wskaźnika sprawności ekonomicznej zgodnie z podejściem branżowym, gdzie jest on definiowany jako:

$$W_{Ek} = \frac{K_{uz}}{K_{rz}},$$

gdzie:  $W_{Ek}$  – wskaźnik ekonomiczności,  $K_{uz}$  – finansowy wynik użyteczny działań organizacyjnych,  $K_{rz}$  – koszty działań organizacyjnych kwalifikowalne do oceny ekonomiczności [7].

Zwiększenie wskaźnika ekonomiczności oznacza, że organizacja staje się bardziej efektywna ekonomicznie, choć jeszcze nie osiąga pełnej rekompensaty kosztów przez uzyskane korzyści. Warto zauważyć, że wskaźnik ekonomiczności ilustruje jedynie zyski w aspekcie materialnym organizacji.

Zastosowanie inspekcyjnego robota pożarniczego pozwoliłoby również na optymalizację innych wskaźników sprawności dla poszczególnych walorów praktycznych sprawnego działania takich jak wskaźnik celowości, skuteczności, prostoty, ostrożności itd. Podniesienie wartości omawianych wskaźników przyczyniłoby się do nie tylko wymiernego, ale również realnego podniesienia sprawności prowadzenia akcji ratunkowo-gaśniczych [7].

## 9. Podsumowanie

Zaprojektowano robota wspomagającego akcje pożarnicze oraz wykonano jego funkcjonalny prototyp. W tym celu wykorzystano doświadczenie nabyte w czasie realizacji wcześniejszych prac nad poprzednią wersją urządzenia. Podstawowym celem

jest wspomaganie straży pożarnej w czasie oględzin miejsca zdarzenia oraz podczas badania obszaru akcji ratunkowej, na której możliwe jest skażenie czynnikami zagrażającymi zdrowiu i życiu człowieka. Projekt zakłada, że wykorzystanie robota przyczyni się do przyspieszenia pracy na miejscu akcji ratunkowej oraz zminimalizuje ryzyko, na które narażani są ratownicy, a także zwiększy sprawność prowadzenia działań oraz zmniejszy ich koszty.

Prototyp typu PoC w końcowej fazie prowadzonych prac charakteryzował się masą całkowitą około 2 kg i wymiarami 37 cm długości, 39 cm szerokości oraz 15 cm wysokości (bez skanera laserowego). Konstrukcja odznacza się dużą sztywnością i stabilnością.

Dane uzyskane w trakcie budowy nowego prototypu oraz testów pozwalają wskazać obszary projektu, które wymagają dalszego rozwoju. Niezbędne jest lepsze dostosowanie podwozia do warunków terenowych oraz dodanie do systemu wizyjnego kamery termowizyjnej. Prototyp powinien być wyposażony w większą liczbę elementów umożliwiających stosowanie urządzenia w warunkach rzeczywistych, aby możliwe było przeprowadzanie testów w warunkach całkowicie odzwierciedlających te spotykane w czasie akcji ratunkowo-gaśniczych.

Wdrożenie robota inspekcyjnego do jednostki straży pożarnej może ograniczyć ekspozycję strażaków na zagrożenia, skrócić czas przygotowania do działań w strefach niebezpiecznych oraz przyczynić się do redukcji kosztów operacyjnych, co w skali rocznej generuje istotne oszczędności. Zastosowanie tego rozwiązania przekłada się na poprawę wskaźników ekonomiczności oraz innych parametrów sprawności, takich jak skuteczność, celowość czy prostota działania, podnosząc ogólną efektywność akcji ratowniczo-gaśniczych.

Zastosowany tok działań, polegający na równoległym projektowaniu mechaniki, elektroniki, sterowania oraz oprogramowania urządzenia, pozwolił na dobre dopasowanie wszystkich części składowych. Współbieżna z projektem budowa nowego prototypu robota pozwoliła na weryfikację kreowanych aktualnie rozwiązań. Wieńczące prace testy wskazały wady oraz zalety konstrukcji, a także umożliwiły zweryfikowanie funkcjonowania robota jako spójnego urządzenia mechatronicznego.

## Bibliografia

- Chilcott R.P., *Managing mass casualties and decontamination*, "Environment International", Vol. 72, 2014, 37–45, DOI: 10.1016/j.envint.2014.02.006.
- Dudek M., Raźniak A., Masłowski A., Perski A., Czupryniak R., *Development of criteria for the selection and investigation of PEMFC stacks as components of hybrid energy sources for UGVs*, 28th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 2024, 568–573, 10.1109/MMAR62187.2024.10680776.
- Urbański M., Szewczyk R., *Analysis of Response Time of Carbon Dioxide Sensor in Chemical Sensor System for Mobile Robot*, Progress in Automation, Robotics and Measuring Techniques, Vol. 3, 2015, 277–284, DOI: 10.1007/978-3-319-15835-8\_30.
- Hendzel Z., Żylski W., *Mechanika ogólna, Dynamika*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, wydanie 6, Rzeszów, 2017.
- Bajdur W.M., Roman M., Maj M., *Analiza i wpływ zagrożeń chemicznych na środowisko i zdrowie pracowników straży pożarnej*, „Prace Naukowe Akademii im. Jana Długosza w Częstochowie. Technika, Informatyka, Inżynieria Bezpieczeństwa”, 2018, Nr 6, 337–354, DOI: 10.16926/tiib.2018.06.24.
- Pecio M., *Spoleczno-ekonomiczne koszty pożarów*, „Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza”, Vol. 35, No. 3, 2014, 39–45, DOI: 10.12845/bitp.35.3.2014.4.

7. Gromek P., *Teoria organizacji bezpieczeństwa na przykładzie masowej ewakuacji ludności*, Difin SA, 2017, Rozdz. 7. Sprawność organizacji bezpieczeństwa.
8. Snopeczyński M., Kotliński J., Musiałek I., *Badanie właściwości mechanicznych materiałów stosowanych w technologii FDM*, „Mechanik”, 2019, 92, DOI: 10.17814/mechanik.2019.4.37.
9. Sawicki T., Czynniki zagrażające bezpieczeństwu strażaków w warunkach pożaru, Sąd Okręgowy w Legnicy, Legnica, 2004.
10. Galica J., Zasady organizacji ratownictwa chemicznego i ekologicznego w krajowym systemie ratowniczo-gaśniczym, Komenda Główna Państwowej Straży Pożarnej, Warszawa, 2025.
11. NFPA 1710 – Standard for the Organization and Deployment of Fire Suppression Operations, Emergency Medical Operations, and Special Operations to the Public by Career Fire Departments, National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2020.
12. *Analiza standardu wyposażenia samochodu specjalnego ratownictwa chemicznego typu SLRch*, GUS, Warszawa, 2012.
13. *Detektor wielogazowy w straży pożarnej*, 2019, [https://remiza.com.pl/detektor-wielogazowy-w-straży-pożarnej/].
14. *Rhyno Protect. Compact firefighting robot*, [www.shark-robotics.com/rhyno-protect-firefighting-robot/].
15. *PIAP GRYF*, [www.antyterrorizm.com/oferta/robot-piap/robot-piap-gryf/].
16. *Sygnalizator świetlny do kamizelek*, [https://strefa998.pl/kamizelki-asekuracyjne/994-sygnalizator-swietlny-do-kamizelek.html].
17. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0034&from=EN
18. Świerżewski M., *Urządzenia elektryczne w przestrzeniach zagrożonych wybuchem*, Miesięcznik elektro.info, Vol. 9/10, 2007, 8–12.

## Inne źródła

# Performance Evaluation of a Robot Prototype in Rescue and Firefighting Operations

**Abstract:** The number of rescue interventions by the fire brigade in Poland is growing. The answer to the need to check places contaminated with substances hazardous to human health and life is the design of a wheeled inspection robot supporting firefighting operations. The device is equipped with a mobile platform, a control system, appropriate sensors, a vision system and a transmitter that extends the scope of its revision capabilities. The project additionally covers the issues of adapting the device to real conditions, and also addresses selected issues of mechatronic design and rapid prototyping. The primary goals of the robot are to support the Fire Brigade in activities in the contaminated area, search for injured people, carry out inspections without exposing rescuers to direct exposure to harmful factors. The aspect of possible savings of financial resources in the fire brigade unit, where the discussed solution would be implemented, was also discussed. As part of the work, a prototype of the PoC (Proof of Concept) type was built and programmed.

**Keywords:** inspection robot, fire brigade, mechatronics, robotics, rescue

mgr inż. Sebastian Jakubowski

d599@stud.prz.edu.pl

ORCID: 0009-0003-5233-6198

Jest doktorantem w Katedrze Mechaniki Stosowanej i Robotyki na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. Specjalizuje się w mechatronice, robotyce i autonomii pojazdów lądowych. Zawodowo związany z przemysłem obronnym. Zainteresowania badawcze obejmują metody sterowania, algorytmy mapowania i nawigacji, metody fuzji danych oraz sztucznej inteligencji w zastosowaniach do ciężkich platform gaśniczych. Aktywnie uczestniczy w projektach B+R krajowych i międzynarodowych.

