



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

**DZIEDZINA NAUKI INŻYNIERYJNO-TECHNICZNE**

DYSCYPLINA AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA I TECHNOLOGIE  
KOSMICZNE

**AUTOREFERAT ROZPRAWY  
DOKTORSKIEJ**

*Budowa i algorytmy sterowania inspekcyjnego robota  
latającego*

Autor: mgr inż. Grzegorz Suchanek

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Andrzej Gołaś

Promotor pomocniczy: dr inż. Wojciech Ciesielka

Praca wykonana: Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie,  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki,  
Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska

Kraków, 2023r.

## Streszczenie

Celem pracy było zaprojektowanie, wykonanie konstrukcji oraz synteza algorytmów sterowania wyspecjalizowanego wielowirnikowego robota latającego, dedykowanego do lokalizacji źródeł zanieczyszczeń powietrza cząstkami stałymi. W opracowanym prototypie robota latającego układ sterowania realizuje zadania planowania trasy przelotu, sterowania ruchem robota oraz przetwarzania danych z czujników w czasie rzeczywistym podczas realizacji misji. Dobór parametrów algorytmu sterowania ruchem oraz struktury robota latającego wykonano na podstawie dynamicznych równań ruchu i metody planowania eksperymentu. Opracowanie efektywnie działającego systemu wymagało również wprowadzenia oryginalnych kryteriów oraz opracowania autorskiego algorytmu poszukiwania na podstawie modelu pola zanieczyszczenia. Dobór parametrów, takich jak m.in. lokalizacja czujników układu pomiarowego był możliwy dzięki przeprowadzonym symulacjom modelu numerycznego pola przepływu wokół wirników robota. Zakres przeprowadzonych prac badawczych obejmował również opracowanie metody przetwarzania danych pomiarowych z czujników cząstek stałych oraz opracowanie projektu autorskiego stanowiska hamowni układów napędowych robotów wielowirnikowych w celu wyznaczenia ich charakterystyk i zweryfikowania poprawności obliczeń przepływowych. Walidację przeprowadzono eksperymentalnie, dla różnych poziomów tła pomiarowego i trzech scenariuszy: lotów w obszarze bez źródła zanieczyszczenia, lotów w obszarze ze źródłem emisji zanieczyszczeń oraz referencyjnych pomiarów bez źródła zanieczyszczenia i bez zakłóceń od pracujących wirników robota latającego. Przeprowadzona analiza głównych składowych (PCA), umożliwiła zdefiniowanie funkcji klasyfikującej, która rozdziela grupy lotów ze źródłem i bez źródła zanieczyszczenia. Najważniejszą własnością funkcji klasyfikującej jest poprawne wykrywanie źródła zanieczyszczenia niezależne od stężenia tła. Ocena działania opracowanego rozwiązania przeprowadzona w czasie badań terenowych z zastosowaniem kryterium dopuszczalnego błędu względnego lokalizacji położenia źródła zanieczyszczenia wykazała jednoznacznie, że opracowany system działa poprawnie a cel pracy został w pełni zrealizowany.

# Abstract

The objective of this thesis was to devise, construct, and synthesize a control algorithms for a specialized multi-rotor aerial robot specifically designed for the localization of airborne particulate matter (PM) pollution sources. The developed aerial robot prototype encompasses a comprehensive control system responsible for flight path planning, movement control, and real-time sensor data processing throughout its missions. The motion control algorithm parameters and the aerial robot's structure were meticulously chosen based on dynamic motion equations and experiment planning methodology. Furthermore, the establishment of an effective system necessitated the introduction of original criteria and the formulation of a novel search algorithm grounded in the pollution field model. The selection of critical parameters, such as the sensors location of the measurement system, was executed using a constructed numerical model of the flow field around the robot's rotors. The research scope extended to the formulation of a methodology for processing measurement data obtained from particulate matter sensors, as well as the development of a dedicated dynamometer stand for the drive sets of multi-rotor robots to determine their characteristics and verify the accuracy of flow calculations. The verification of the developed system encompassed conducting experiments under various ambient PM concentrations and three distinct scenarios: flights conducted in polluted and non-polluted areas, as well as reference measurements performed without a pollution source and without interference from the aerial robot's rotors. Principal components analysis (PCA) facilitated the creation of a classification function capable of distinguishing between flight groups with and without a pollution source. The primary characteristic of this classification function lies in its accurate detection of the pollution source, irrespective of ambient concentration levels. During field tests, the system's performance was assessed based on the permissible relative error criterion for the pollution source's location. The results unequivocally demonstrated that the developed system operates correctly, achieving the intended objectives of this study in their entirety.

# Spis treści

<b>Streszczenie</b> .....	2
<b>Abstract</b> .....	3
<b>1. Wprowadzenie</b> .....	5
1.1. Sformułowanie wymagań dla budowanego inspekcyjnego robota latającego.....	5
1.2. Postawienie celu i określenie zakresu pracy.....	7
<b>2. Wspomagany modelowaniem proces projektowania robota latającego</b> .....	9
2.1. Dobór parametrów algorytmu sterowania lotem.....	9
2.2. Dobór parametrów systemu pomiarowego.....	13
2.3. Dobór algorytmu poszukiwania źródeł zanieczyszczeń.....	15
<b>3. Budowa i weryfikacja robota latającego</b> .....	18
3.1. Budowa robota latającego poszukującego źródeł zanieczyszczenia.....	18
3.2. Weryfikacja działania robota latającego w warunkach terenowych.....	21
<b>4. Podsumowanie</b> .....	27
4.1. Oryginalne rozwiązania w pracy.....	30
4.2. Kierunki dalszych badań.....	31
<b>Lista najważniejszych publikacji</b> .....	33
<b>Bibliografia</b> .....	34

# 1. Wprowadzenie

Cywilizacja przemysłowa i rozwój miast przyniosły ludzkości nie tylko ogromny dobrobyt, ale również poważne problemy środowiskowe. Stałe zanieczyszczenie powietrza stało się wyznacznikiem naszych czasów i nieodłącznym elementem życia mieszkańców miast na całym świecie. Zanieczyszczone powietrze powoduje ogromne szkody dla zdrowia ludzkiego. Jest ono czwartym, co do wielkości, wiodącym czynnikiem zwiększającym ryzyko zgonu [10], gdzie zajmuje niechlubne miejsce wśród takich czynników jak palenie tytoniu, wysokie ciśnienie tętnicze, niewłaściwa dieta czy wysoka glikemia. Smog w samej Polsce odpowiedzialny jest za przedwczesny zgon dziesiątek tysięcy ludzi rocznie, a także za powszechność alergii i innych chorób, w tym nowotworowych. Wskazuje się również [3], że wysokie stężenia cząstek stałych zmniejszają korzyści z aktywności fizycznej na świeżym powietrzu. Do szkód zdrowotnych należy doliczyć również mniej oczywiste koszty, takie jak ogromne wydatki na służbę zdrowia, koszty środowiskowe czy niszczące fasady budynków. Dlatego stałe analizowanie zanieczyszczeń powietrza ma kluczowe znaczenie dla celów ochrony środowiska. W związku z nieustępującym problemem zachodzi potrzeba budowania, rozwijania i stosowania rozwiązań, które umożliwią automatyczną lokalizację źródeł zanieczyszczeń.

## 1.1. Sformułowanie wymagań dla budowanego inspekcyjnego robota latającego

Pracę rozpoczęto od przeprowadzenia przeglądu literatury. Na tej podstawie zidentyfikowano następujące kluczowe luki badawcze:

- Stosowanie robotów sterowanych przez operatora, którego zadaniem jest pokierowanie robota w okolice źródła i utrzymanie układu pomiarowego w strudze zanieczyszczenia.
- Wykorzystywanie, nawet autorskiego, systemu pomiarowego niezależnego od układu sterowania robota. Często możliwe jest wprowadzenie stałych współrzędnych, po których robot ma się przemieszczać. Pozwala w pewnym stopniu zautomatyzować pomiary, jednakże taki robot nie jest autonomiczny.
- Wysoka złożoność obliczeniowa algorytmów. Brak integracji z wewnętrznym oprogramowaniem układowym systemu sterującego robota. Prowadzenie obliczeń na stacji naziemnej, co sprawia że robot musi być w stałej widoczności radiowej ze stacją. Wrażliwość systemu na stosowanie zakłóaczy (ang. *jammer*).

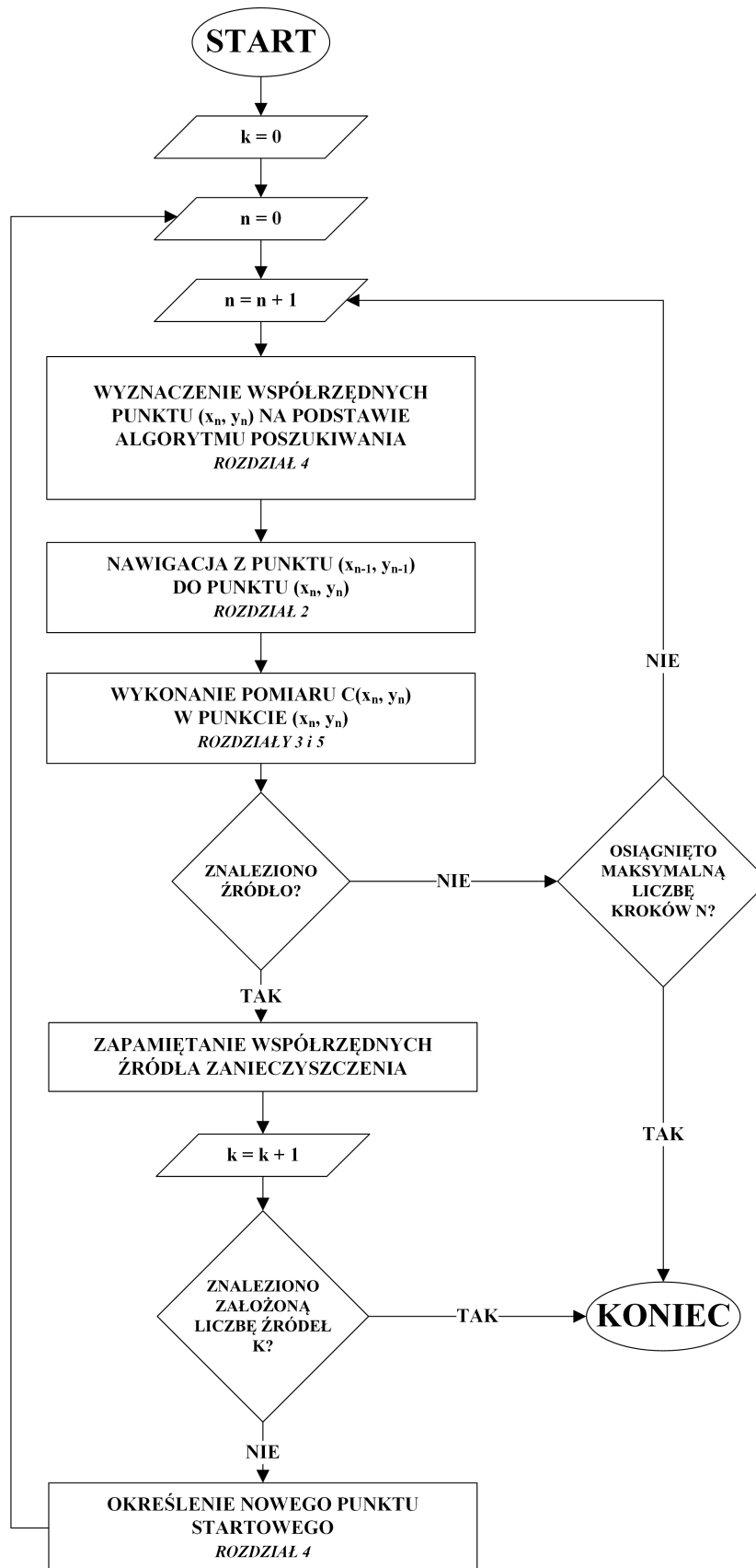
- Wymaganie informacji o położeniu szukanego źródła w niektórych algorytmach, np. w badaniach związanych z infotaksją.
- Konieczność ustalenia określonych wartości progowych, aby stwierdzić kontakt z źródłem i określić jego położenie, mimo zmienności tła pomiarowego.
- Brak konsensusu w literaturze co do lokalizacji układu pomiarowego względem wirników robota. Obecnie wydaje się, że w przypadku pomiaru cząstek stałych panuje trend umieszczania wlotu układu pomiarowego nad robotem. Jednakże brak w literaturze wytycznych w kontekście poszukiwania źródła zanieczyszczenia.
- Brak weryfikacji przeprowadzonych obliczeń CFD na dedykowanym stanowisku hamowni. Analizy komercyjnych rozwiązań robotów, w których, nie można w łatwy sposób zintegrować systemu pomiarowego do celów automatycznego poszukiwania źródła zanieczyszczenia.

Zgodnie z aktualnym stanem wiedzy należy wyrazić przekonanie, że obecnie istnieje zapotrzebowanie na zaawansowanego robota inspekcyjnego, który automatycznie lokalizuje źródła zagrożenia środowiskowego. Do skutecznego wykonywania tego zadania niezbędne jest techniczne urządzenie, które automatycznie przemieszcza układ pomiarowy w przestrzeni zgodnie z określoną trajekcją. W obecnej fazie rozwoju technologii, robot latający jest odpowiednim kandydatem do tego celu. Konstrukcja takiego robota jednakże wymaga rozwiązania wielu trudnych problemów technicznych. Kluczowym zadaniem jest opracowanie algorytmu sterowania robota złożonego z komponentów takich jak: planowanie trasy przelotu, generowanie trajektorii lotu, sterowanie ruchem robota, przetwarzanie danych z czujników nawigacyjnych oraz pomiar stężeń zanieczyszczeń.

## 1.2. Postawienie celu i określenie zakresu pracy

Celem pracy było zaprojektowanie, wykonanie konstrukcji oraz synteza algorytmów sterowania wyspecjalizowanego wielowirnikowego robota latającego, dedykowanego do lokalizacji źródeł zanieczyszczeń powietrza cząstkami stałymi PM (ang. *particulate matter*), a następnie weryfikacja poprawności jego działania. W procesie syntezy algorytmów sterowania robota latającego wykorzystano modele: dynamiczny robota, pola przepływu oraz pola zanieczyszczeń. W opracowanym prototypie robota latającego układ sterowania realizuje zadania planowania trasy przelotu, generowania trajektorii lotu, sterowania ruchem robota oraz przetwarzania danych z czujników nawigacyjnych i pomiaru zanieczyszczeń. Efektem przeprowadzonych prac badawczych jest prototypowy system do wykrywania źródeł zanieczyszczeń powietrza cząstkami stałymi, złożony z autorskiego uniwersalnego robota latającego oraz autorskiego układu sterowania poszukującego źródła zanieczyszczeń i wyznaczającego trajektorię lotu w czasie rzeczywistym podczas realizacji misji. Ostatecznie, zbudowany system został przetestowany w warunkach eksploatacyjnych.

Aby skonstruować robota zdolnego do automatycznego lokalizowania źródeł zanieczyszczenia, konieczne było sformułowanie i wdrożenie odpowiedniego algorytmu. Na rysunku 1.1 przedstawiono sformułowany algorytm w formie schematu blokowego, opracowany na podstawie wniosków z poszczególnych rozdziałów. W algorytmie zakłada się, że badania źródła odbywają się na płaszczyźnie. Według tego algorytmu, robot porusza się po kolejnych, dynamicznie określanych punktach pomiarowych i wykonuje pomiary. Decyzja o zlokalizowaniu źródła opiera się na zgromadzonych danych. Kluczowymi parametrami algorytmu są dodatkowe wartości, które zależą od wybranego algorytmu poszukiwania, takie jak maksymalna liczba (kroków) punktów pomiarowych ( $N$ ) i maksymalna liczba poszukiwanych źródeł zanieczyszczenia ( $K$ ).



Rys. 1.1. Algorytm poszukiwania źródeł zanieczyszczenia. Oznaczenia:  $n$  – indeks punktu pomiarowego,  $k$  – indeks źródła zanieczyszczenia

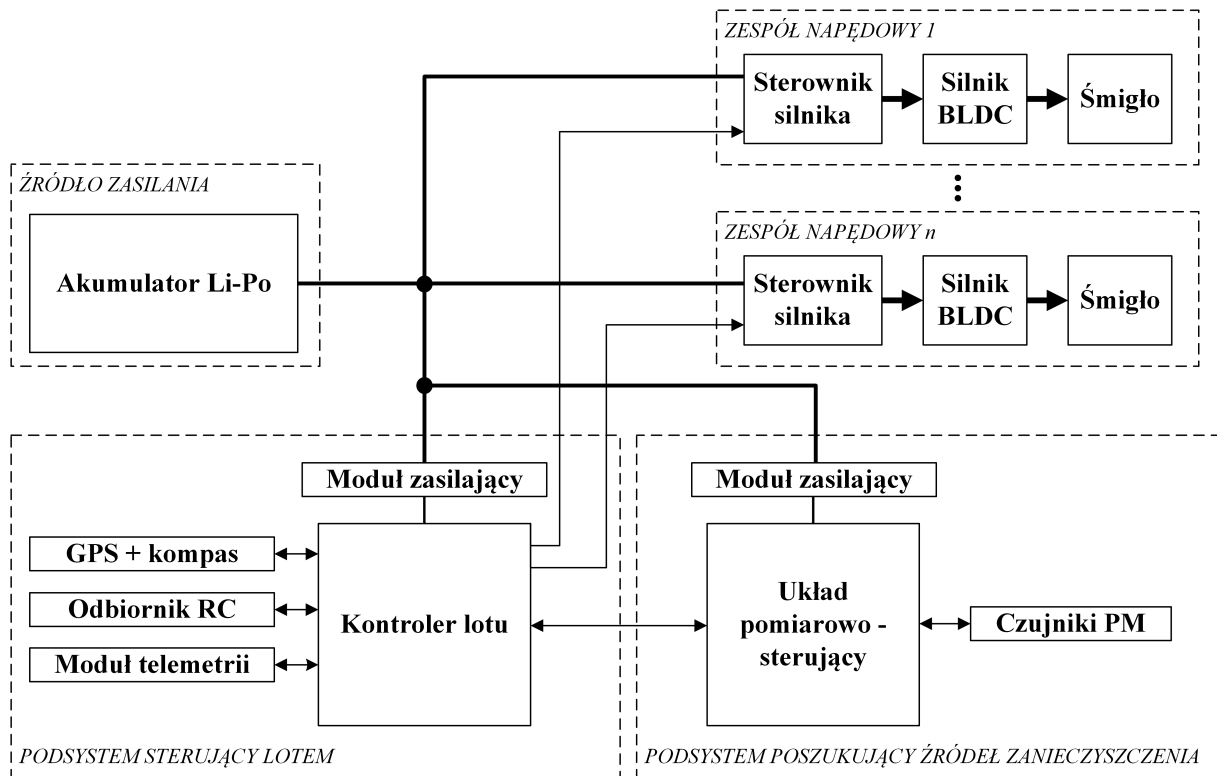


## **2. Wspomagany modelowaniem proces projektowania robota latającego**

### **2.1. Dobór parametrów algorytmu sterowania lotem**

Sekwencję instrukcji w postaci programu komputerowego, której zadaniem jest sterowanie ruchem robota w celu realizacji określonych zadań, można określić mianem algorytmu sterowania. Algorytm sterowania określa sposób wyznaczania decyzji sterujących na podstawie informacji wejściowych. Ten algorytm składa się z elementów takich jak: planowanie trasy przelotu, generowanie trajektorii lotu, sterowanie ruchem, oraz dostosowywanie do zmiennych warunków lotu i zagwarantowanie bezpieczeństwa. Planowanie trasy przelotu polega na wyznaczeniu punktów docelowych, które robot musi osiągnąć, oraz połączenia tych punktów w trasę lotu. Wyznaczanie punktów docelowych realizuje algorytm poszukiwania źródła zanieczyszczenia. Na tej podstawie wyznaczana jest trajektoria lotu, czyli sekwencja punktów, przez które robot będzie musiał przelecieć. Trajektoria powinna minimalizować parametry takie jak czas lotu czy zużycie energii. Następnie algorytm sterowania lotem wykorzystuje różne techniki regulacji, m.in. proste algorytmy PID, regulator liniowo-kwadratowy LQR (ang. *Linear-Quadratic Regulator*) czy sterowanie predykcyjne z modelem MPC (ang. *Model Predictive Control*), aby osiągnąć cel śledzenia zadanej trajektorii. W przypadku sterowania ruchem robota latającego, algorytm sterowania można traktować w sposób węższy, jako opis (model matematyczny) urządzenia sterującego [2]. Sterowanie ruchem polega na ciągłym monitorowaniu położenia i prędkości robota oraz na tej podstawie dostosowywaniu sterowania, tak aby robot pozostawał na wyznaczonej trajektorii mimo stale zmiennych warunków lotu, spowodowanych przez wiatr, opady czy zmiany temperatury. Finalnie algorytm sterowania powinien zapewniać bezpieczeństwo, reagując na zagrożenia w przestrzeni powietrznej czy wykryte błędy w układzie sterowania, w celu uniknięcia kolizji czy innych niebezpieczeństw. Celem algorytmu jest osiągnięcie stabilnej, precyzyjnej i skutecznej kontroli nad robotem, co w ostateczności umożliwia realizację zadania poszukiwania źródeł zanieczyszczenia.

W celu implementacji algorytmów sterowania zastosowano podział robota na podsystemy składowe (Rys. 2.1). Podsystem sterujący lotem robota jest odpowiedzialny za utrzymanie robota w powietrzu oraz realizuje zadanie śledzenia trajektorii wyznaczonej przez podsystem poszukujący źródeł zanieczyszczenia. Autorski podsystem poszukujący źródeł zanieczyszczenia jest odpowiedzialny za wykonywanie pomiarów i kierowanie robota na

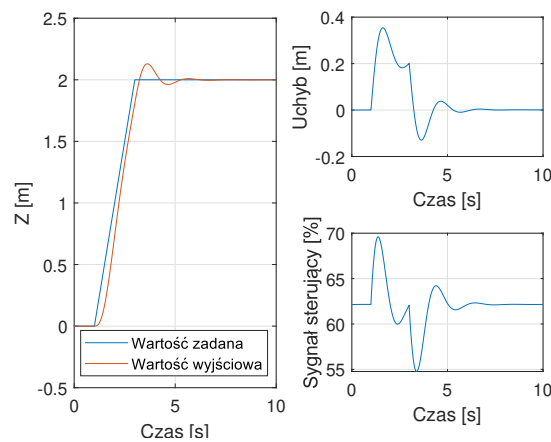


Rys. 2.1. Schemat blokowy robota wielowirnikowego z podziałem na podsystemy składowe

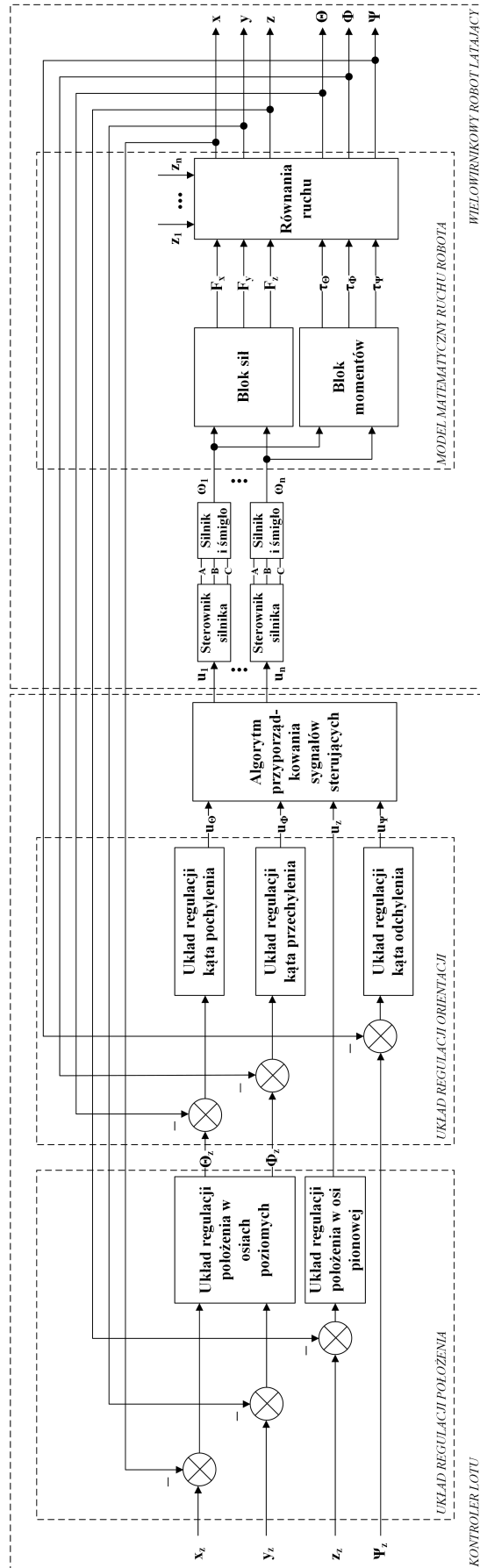
wymagane współrzędne. Na rysunku 2.3 przedstawiono schemat blokowy układu sterowania robota. Układ sterowania składa się z układu regulacji położenia oraz układu regulacji orientacji [1, 7, 9]. Wartościami zadanymi w układzie regulacji są jedynie położenia w trzech osiach  $x_z$ ,  $y_z$  i  $z_z$ , oraz wartość kąta odchylenia  $\Psi_z$ , ponieważ śledzenie trajektorii w osiach poziomych odbywa się na podstawie zadawania odpowiednich wartości kątów przechylenia i pochylenia ( $\Theta_z$  i  $\Phi_z$ ). Regulatory położenia w osiach poziomych zostały zaznaczone na rysunku wspólnie, gdyż w tym bloku występuje także dodatkowo rzutowanie z osi lokalnych robota na globalne, w zależności od wartości kąta odchylenia. Na wyjściu regulatorów orientacji znajduje się algorytm syntezy (przyporządkowania) sygnałów sterujących z regulatorów do odpowiednich zespołów napędowych, określane również jako mikser [6, 7]. Wyjściami z tego bloku są sygnały sterujące sterownikami silników robota ( $u_1 - u_n$ ). Odpowiednia zmiana prędkości obrotowych wirników w parach powoduje przemieszczanie (blok sił:  $F_x$ ,  $F_y$  i  $F_z$ ) oraz zmianę orientacji robota (blok momentów:  $\tau_x$ ,  $\tau_y$  i  $\tau_z$ ) [8].

Do doboru parametrów układu regulacji, wykorzystującego regulatory PID, z wykorzystaniem modelu matematycznego ruchu robota i planu eksperymentu, zastosowano następującą procedurę. Dla układu regulacji położenia w osi pionowej, o strukturze P-P-PID, dobrano 4 wartości parametrów:  $K_{p1}$ ,  $K_{p2}$ ,  $K_{p3}$  i  $K_{i3}$ . Zaplanowano całkowity eksperyment dwupoziomowy [5] dla 4 parametrów, co oznacza, że przeprowadzono łącznie

16 symulacji. Jako funkcję celu przyjęto wskaźnik jakości  $J$  w postaci całki z kwadratu sygnału uchybu regulatora głównego. Dodatkowo wprowadzono ograniczenie na sygnał sterujący ostatniego regulatora pomocniczego, takie że maksymalny współczynnik wypełnienia sygnału sterującego  $u_{max}$  (sygnał sterujący  $u$  zmienia się w zakresie od 0% do 100%) podawany na wejście sterownika silnika nie może przekroczyć wartości progowej  $u_t$ . To kryterium zostało przyjęte w celu umożliwienia jak najdokładniejszego śledzenia zadanej trajektorii. Ponieważ w algorytmie syntezy sygnałów sterujących, poszczególne wyjścia z regulatorów są sumowane, wprowadzenie ograniczenia na sygnał sterujący miało na celu zapewnienie zapasu dla pozostałych układów. Współczynniki funkcji regresji obliczono poprzez aproksymację za pomocą metody najmniejszych kwadratów. Minimum funkcji regresji znaleziono, korzystając z punktów wyznaczonych za pomocą metody hipersześcianów łańciskich. Analizowany układ był stabilny dla wszystkich kombinacji wartości minimalnych i maksymalnych założonych parametrów. Na rysunku 2.2 przedstawiono przebiegi wejściowe i wyjściowe układu regulacji położenia w osi pionowej dla dobranych wartości parametrów. Opisana procedura doboru parametrów pozwoliła na oszacowanie pierwszych przybliżonych wartości nastaw oraz sprawdzenie ich istotności w układzie regulacji. Na tej podstawie dokonano ostatecznego doboru nastaw rzeczywistego układu.



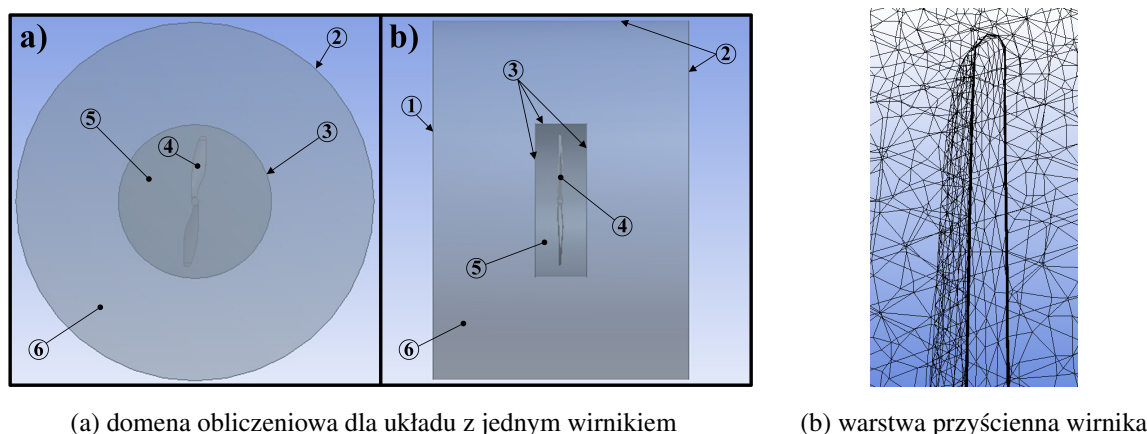
**Rys. 2.2.** Przebiegi wejściowe i wyjściowe układu regulacji położenia w osi pionowej dla dobranych wartości parametrów na podstawie planu eksperymentu



Rys. 2.3. Schemat struktury układu sterowania robota wielowirnikowego z modelem matematycznym

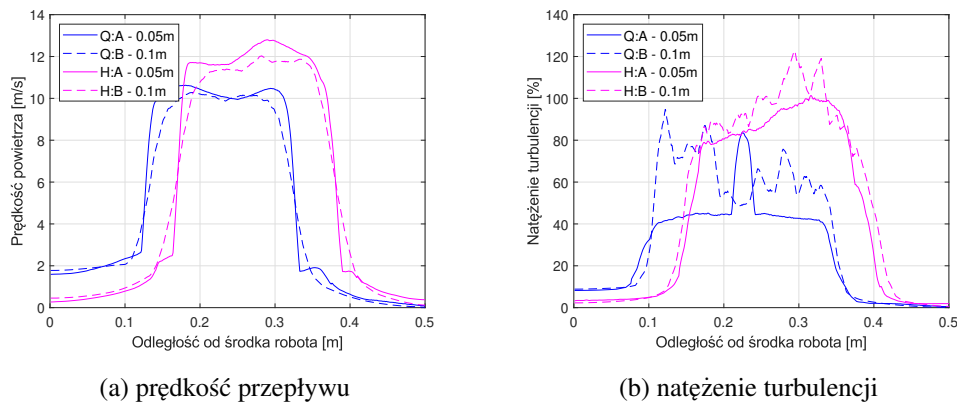
## 2.2. Dobór parametrów systemu pomiarowego

Obracające się wirniki robota wielowirnikowego podczas pracy wprowadzają duże zaburzenia do naturalnego pola przepływu powietrza i niosących cząstki gazów, co zakłóca proces ich pomiaru. Zgodnie z opracowanym algorytmem postępowania dokonano oszacowania zaburzenia naturalnego pola przepływu spowodowanego przez wirniki dedykowanego robota latającego. Oszacowanie to pozwoli na prawidłowe zaprojektowanie układu pomiarowego stężenia cząstek stałych w celu lokalizacji źródła zanieczyszczenia. Wyniki tych badań zostały opublikowane m.in. w pracach [12, 13, 14]. Analizę przeprowadzono przy użyciu dedykowanego oprogramowania do obliczeń przepływowych, jakim jest *ANSYS Fluent*. Opracowano modele z jednym, dwoma, czterema i sześcioma wirnikami, które zostały zweryfikowane poprzez badania niezależności rozwiązania od siatki obliczeniowej oraz z wykorzystaniem stanowiska hamowni. Domenę obliczeniową dla układu z jednym wirnikiem przedstawiono na rysunku 2.4a. Górną powierzchnię walca strefy statycznej (6) określono jako wlot (1), natomiast dolną i boczne powierzchnie (2) określono jako wylot. Warunki brzegowe na wlocie i wylocie były oparte na znanej wartości ciśnienia na odpowiadającej powierzchni. W obu przypadkach przyjęto zerową wartość ciśnienia, przy ciśnieniu odniesienia wynoszącym 1 atmosferę. Liczba wszystkich elementów tego modelu (rysunek 2.4b) wynosiła około 4,4 miliona.



**Rys. 2.4.** Model z jednym wirnikiem. Oznaczenia na rysunku: a) widok z góry, b) widok z boku, 1 – wlot, 2 – wylot, 3 – wewnętrzne powierzchnie styku domen, 4 – powierzchnia sztywnej bryły śmigła, 5 – domena obrotowa, 6 – domena nieruchoma [13]

Na etapie post-processingu, wykorzystując polarny układ współrzędnych rozmieszczono punkty kontrolne na okręgach o rosnących średnicach. Dla każdego z tych okręgów wyznaczono następnie wartości maksymalne parametrów prędkości przepływu i natężenia turbulencji. Na rysunku 2.5 zaprezentowano dane dla modeli z czterema ( $Q$ ) i sześcioma ( $H$ )

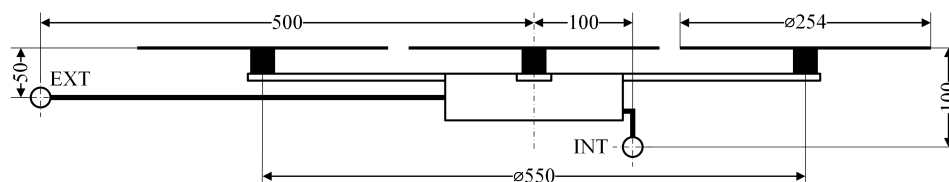


**Rys. 2.5.** Obwiednie prędkości przepływu i natężenia turbulencji w wskazanych przekrojach poprzecznych dla układów z czterema i sześcioma wirnikami

wirnikami. W przypadku układu z czterema wirnikami prędkość bliżej środka geometrycznego robota jest większa. Dlatego też, gdyby umieszczać czujniki pomiarowe pod robotem, bardziej odpowiednia jest konfiguracja o sześciu wirnikami, którą wybrano do dalszych analiz. Na podstawie analizy przebiegu parametrów wskazanych na rysunku 2.5 zdecydowano się ostatecznie na przyjęcie kryterium zapewniające brak przekroczenia maksymalnej prędkości przepływu:

$$r^* = \arg \max_{r \in \langle r_{min}, r_{max} \rangle} V_{max}(r), \text{ pod warunkiem, że: } V_{max}(r) < V_t \quad (2.1)$$

Oznacza to, że szukana jest minimalna odległość do wirnika, dla której prędkość  $V_{max}(r)$  osiąga wartość maksymalną przy jednoczesnym spełnieniu podanego warunku. Ponieważ prędkość przepływu przyjmuje wartości maksymalne w ograniczonym przedziale, znaleziono dwie wartości promienia  $r$ ,  $r_{int}$  i  $r_{ext}$ , dla których zachodzi przekroczenie wartości progowej  $V_t$  (przyjętej na  $1,0 \text{ ms}^{-1}$ ). Biorąc pod uwagę także natężenie turbulencji, lokalizację wlotu układu pomiarowego należy wybrać (Rys. 2.6): pod robotem wybrano odległość 0,10m od środka robota, gdzie maksymalne natężenie turbulencji dla tej lokalizacji wynosi 4,80%; na wysięgniku wybrano odległość 0,50m od środka robota, gdzie maksymalne natężenie turbulencji wynosiło 1,96%.



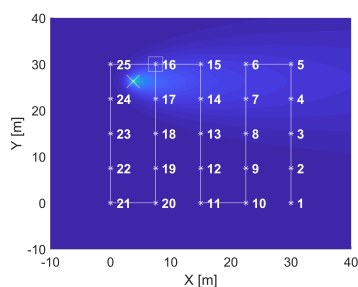
**Rys. 2.6.** Schemat robota z zaznaczoną lokalizacją wlotu czujników. Oznaczenia na rysunku: *INT* – wlot czujnika pod robotem, *EXT* – wlot czujnika na wysięgniku [14]

## 2.3. Dobór algorytmu poszukiwania źródeł zanieczyszczeń

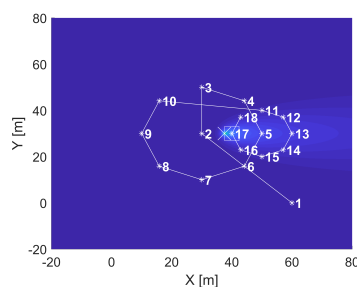
Dobór algorytmu lokalizowania źródła zanieczyszczenia został dokonany na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych [15]. Zadanie poszukiwania zostało sformułowane z wykorzystaniem funkcji argument maksimum  $\arg \max$ . Zwraca ona parę współrzędnych  $(x, y)$  punktu, w którym funkcja opisująca rozkład pola zanieczyszczenia  $C(x, y)$  osiąga wartość maksymalną:

$$\arg \max_{x \in \langle x_{min}, x_{max} \rangle, y \in \langle y_{min}, y_{max} \rangle} C(x, y) \quad (2.2)$$

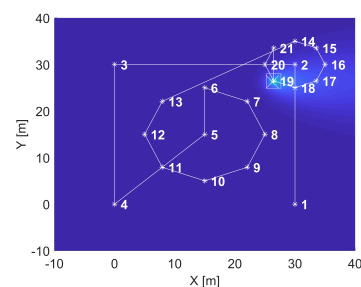
gdzie:  $C(x, y)$  – stężenie w punkcie o współrzędnych  $(x, y)$ ,  $x_{min}$ ,  $x_{max}$ ,  $y_{min}$  i  $y_{max}$  – granice obszaru poszukiwań.



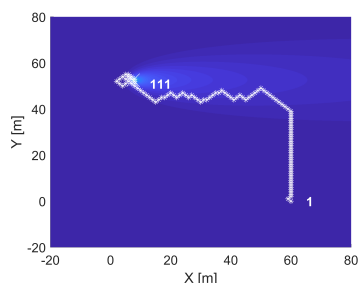
(a) 1, obszar 30 m × 30 m



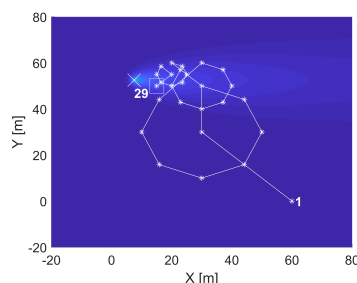
(b) 2, wariant a, obszar 60 m × 60 m



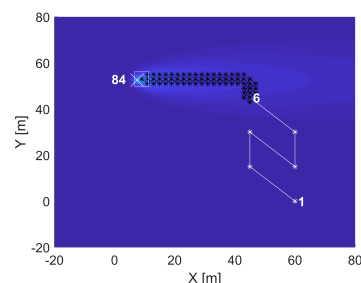
(c) 2, wariant b, obszar 30 m × 30 m



(d) 3, obszar 60 m × 60 m



(e) 4, wariant b, obszar 60 m × 60 m



(f) 5, obszar 60 m × 60 m

**Rys. 2.7.** Przykładowe trajektorie dla testowanych algorytmów. Oznaczenia na rysunku:

1 – poszukiwanie na regularnej siatce punktów, 3 – infotaksja, 2, 4 i 5 – wyznaczenie kierunku lotu na podstawie odpowiednio: wartości maksymalnej, planu eksperymentu i gradientu

Działanie wszystkich opisanych algorytmów poszukiwania przeanalizowano dla obszarów o następujących rozmiarach: 30 m × 30 m, 60 m × 60 m, 100 m × 100 m i 200 m × 200 m. Badania symulacyjne przeprowadzono w środowisku *Matlab* w celu oceny ich dokładności i przygotowania do praktycznej implementacji. Dla każdego przypadku źródło zanieczyszczenia było umiejscowione na trzech różnych współrzędnych. Informacja o rzeczywistym położeniu źródła zanieczyszczenia nie była dostępna podczas działania

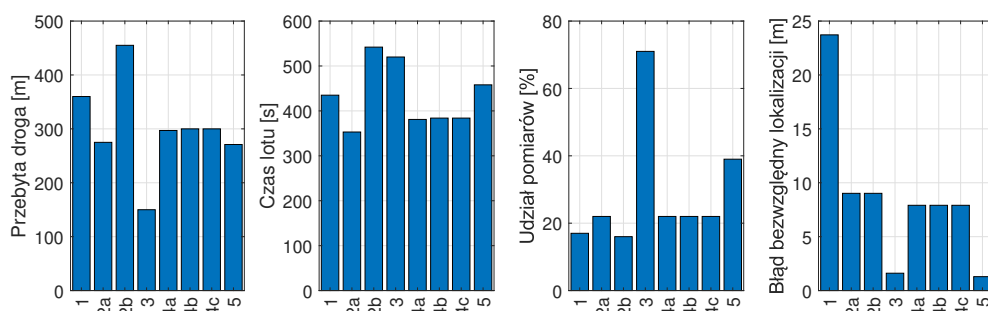
któregokolwiek z algorytmów. Na rysunku 2.7 przedstawiono algorytmy poszukiwania na regularnej siatce punktów (*a*), wyznaczania kierunku lotu na podstawie wartości maksymalnej (*b*, *c*), infotaksję (*d*), wyznaczania kierunku lotu na podstawie planu eksperymentu (*e*) oraz algorytm gradientowy (*f*). Tłem dla każdego z prezentowanych przypadków jest profil zanieczyszczenia, gdzie ciemniejsze kolory oznaczają niższe stężenia, a cieplejsze oznaczają wyższe. Dokładne położenie źródła zanieczyszczenia, gdzie stężenie jest największe, zostało zaznaczone białym krzyżykiem. Na tym etapie założono również, że na przeszukiwanym obszarze występuje tylko jedno źródło zanieczyszczenia. Dla każdej trajektorii z rysunku 2.7 wskazano kolejność odwiedzanych punktów. Robot rozpoczyna przeszukiwanie terenu od punktu nr 1. Punkty, w których dokonywane są pomiary, zaznaczono białymi gwiazdkami. Ostateczną wyznaczoną lokalizację, którą robot uznaje za położenie źródła zanieczyszczenia, oznaczono białym kwadratem. Podczas badań symulacyjnych wyznaczono następujące parametry: położenie źródła, odległość w linii prostej do niego, całkowitą przebytą drogę, całkowity czas lotu robota, udział pomiarów – czyli procentowy wskaźnik, ile z czasu lotu zajęło wykonanie pomiarów, a nie przemieszczanie się, odległość pomiędzy faktycznym a wskazanym położeniem źródła, czas obliczeń (symulacji w środowisku *Matlab*) i zmierzone stężenia – największe, najmniejsze i średnie. Dane dotyczące czasu lotu wyznaczono przy założeniu, że robot porusza się z prędkością  $1 \text{ m s}^{-1}$ , a pomiar stężenia w jednym punkcie trwa 3 sekundy.

Na rysunku 2.8 przedstawiono wybrane wyniki symulacji algorytmów dla rosnącego rozmiaru terenu, przy niezmiennym natężeniu źródła zanieczyszczenia. Należy zauważyć, że w każdym przypadku zarówno długość trasy, jak i czas lotu rosną wraz ze zwiększaniem obszaru poszukiwań. Najwyższą dokładność lokalizacji osiągnięto przy użyciu algorytmu gradientowego, a następnie infotaksji, aproksymacji, wyboru wartości maksymalnej i ostatecznie przeszukiwania na regularnej siatce punktów. Najkrótszy czas lotu był charakterystyczny dla algorytmu 2 (wariant *a*), a następnie algorytmu 4 (wariant *a*), przeszukiwania na siatce punktów, algorytmu gradientowego, i w końcu algorytm infotaksja. Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że najważniejszym kryterium doboru algorytmów poszukiwania do praktycznej implementacji jest minimalny czas lotu. Czas, w którym robot latający może pozostać w powietrzu, stanowi główne ograniczenie. Dlatego też określono następujące kryterium wyboru algorytmów:

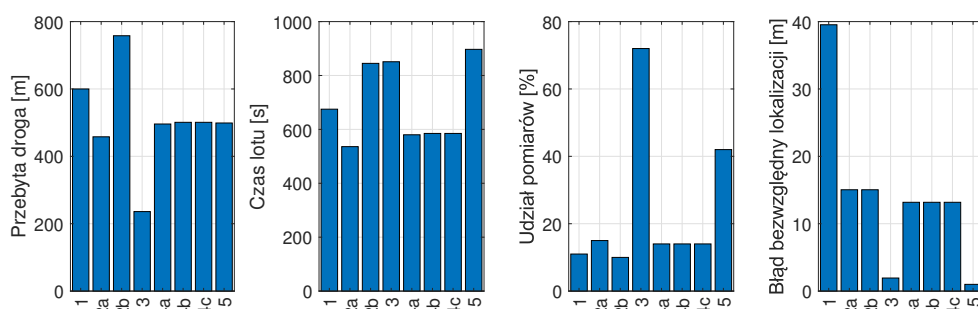
$$\arg \min_{n=1,2,\dots,5} f(n) = t_l(n) \quad (2.3)$$

gdzie:  $n$  – indeks algorytmu,  $t_l$  – całkowity czas lotu. Na podstawie przyjętego kryterium, w dalszych pracach zdecydowano się zaimplementować i przetestować w pierwszej kolejności algorytmy 1, 2 i 4. Te algorytmy są dedykowane w szczególności do wstępnego sprawdzenia terenu w celu ustalenia zgrubnej lokalizacji źródła. Pozostałe algorytmy (gradientowy





(a) Obszar  $60\text{ m} \times 60\text{ m}$ , start w pozycji  $(60\text{ m}, 0\text{ m})$ , źródło na pozycji  $(7,5\text{ m}, 52,5\text{ m})$ , odległość w linii prostej do źródła  $74,25\text{ m}$



(b) Obszar  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ , start w pozycji  $(100\text{ m}, 0\text{ m})$ , źródło na pozycji  $(12,5\text{ m}, 87,5\text{ m})$ , odległość w linii prostej do źródła  $123,74\text{ m}$

**Rys. 2.8.** Wyniki symulacji algorytmów dla zwiększającego rozmiaru terenu. Oznaczenia na rysunku: 1 – poszukiwanie na regularnej siatce punktów, 3 – infotaksja, 2, 4 i 5 – wyznaczanie kierunku lotu na podstawie odpowiednio: wartości maksymalnej (warianty *a* i *b*), planu eksperymentu (warianty *a*, *b* i *c*) i gradientu

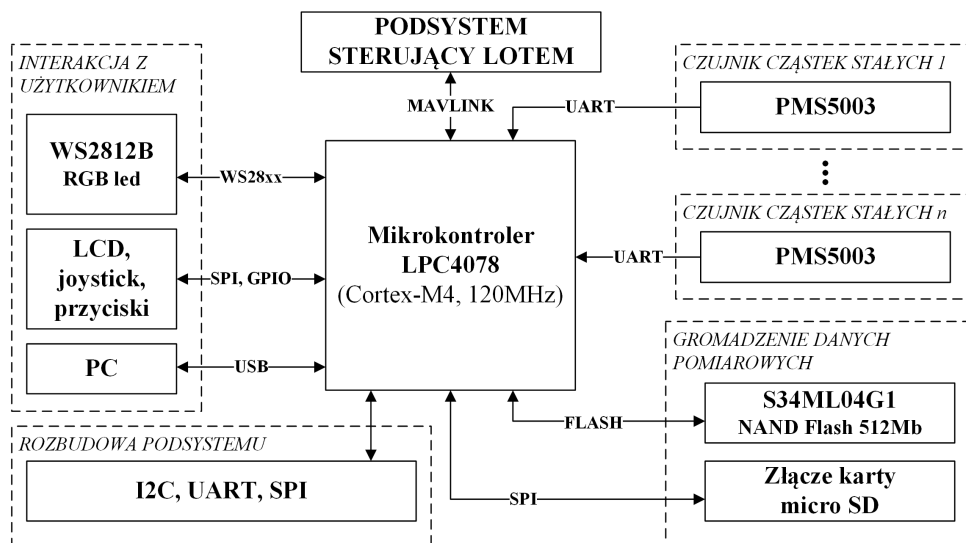
i infotaksja) cechują się zdecydowanie dłuższym czasem lotu, co wynika z dużej liczby koniecznych do wykonania pomiarów. Te algorytmy należy wykorzystać na etapie precyzyjnej lokalizacji źródła, po uzyskaniu kontaktu ze strugą zanieczyszczenia.

W rzeczywistych przypadkach, na terenie, na którym będą prowadzone poszukiwania, może znajdować się większa liczba źródeł zanieczyszczenia niż jedno. Aby robot mógł odnaleźć wszystkie źródła, konieczne jest wprowadzenie dodatkowych modyfikacji do analizowanych algorytmów. Jedną z analizowanych koncepcji polega na poszukiwaniu na regularnej siatce punktów, a w momencie wykrycia strugi przejście na algorytm gradientowy. Następnie, po odnalezieniu źródła, zapamiętane zostają jego współrzędne, a robot wraca do poszukiwań na regularnej siatce punktów. Alternatywnie, należy rozważyć metodę wykorzystania dodatkowej funkcji kary do odrzucania kierunku, w którym znajduje się już odnalezione źródło na podstawie jego zapamiętanych współrzędnych. Wtedy, z wykorzystaniem dodatkowej informacji o kierunku wiatru, algorytm skierowałby robota w obszar poza strugą odnalezionej już źródła zanieczyszczenia.

## 3. Budowa i weryfikacja robota latającego

### 3.1. Budowa robota latającego poszukującego źródeł zanieczyszczenia

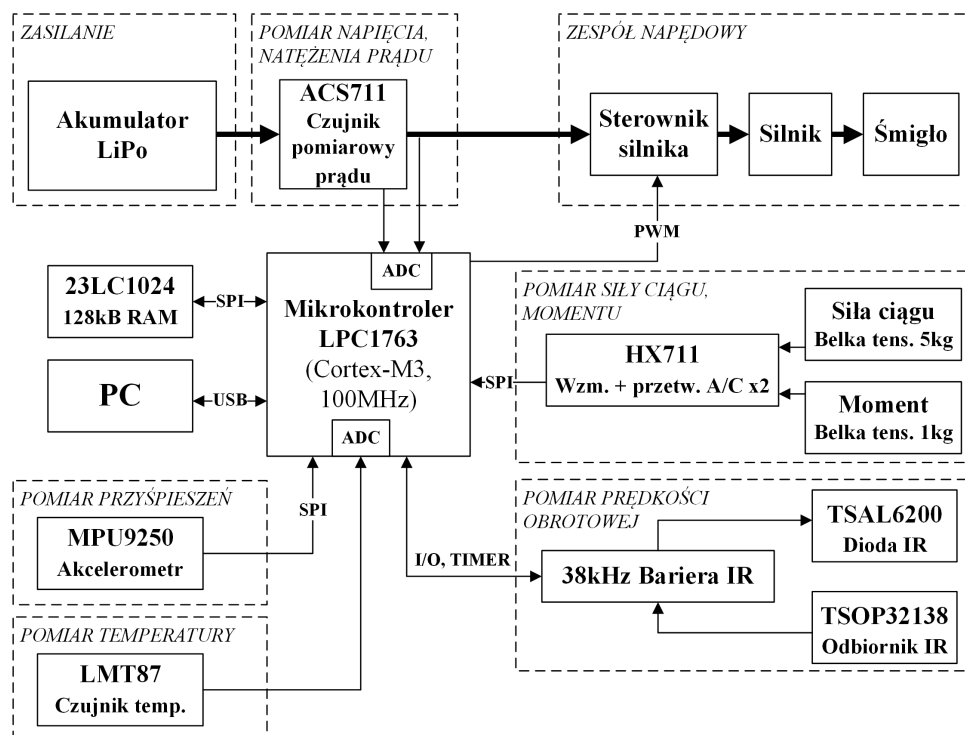
Autorski podsystem pomiarowo-sterujący stanowi najważniejszą część robota latającego, ponieważ ten system realizuje zadanie poszukiwania źródeł zanieczyszczenia. W tym podsystemie przetwarzane są dane z czujników cząstek stałych i gromadzone do wbudowanej pamięci nieulotnej. Podsystem ma modułową konstrukcję i współpracuje z kontrolerem lotu z wykorzystaniem protokołu MAVLink.



Rys. 3.1. Schemat blokowy układu pomiarowo-sterującego robota wielowirnikowego

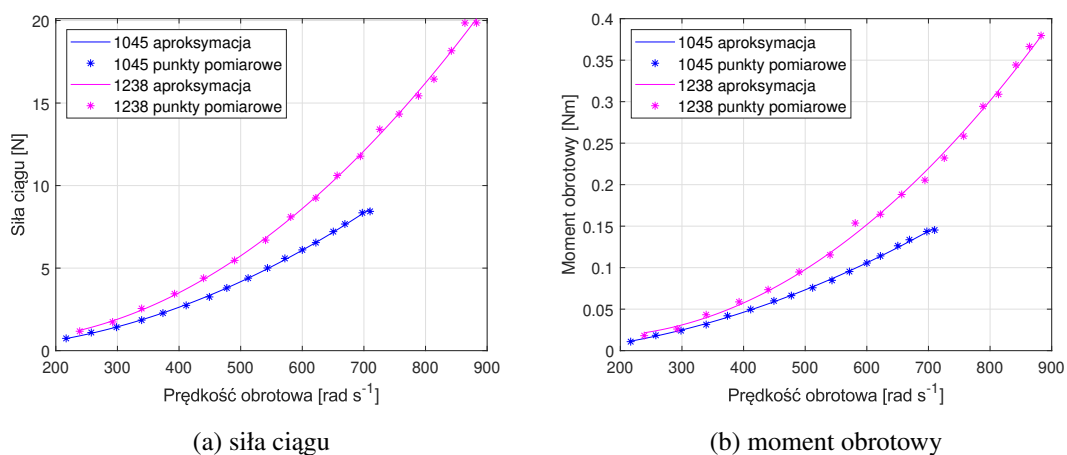
Na rysunku 3.1 przedstawiono schemat blokowy układu [15, 11]. Całkowita masa układu pomiarowo-sterującego z jednym czujnikiem cząstek stałych typu PMS5003 wynosi 0,33 kg. Ponadto, w celu wyznaczenia nieznanymi parametrów zespołów napędowych, konieczne było zaprojektowanie, wykonanie i oprogramowanie mobilnego stanowiska hamowni. Budowa stanowiska pozwoliła na zidentyfikowanie zespołu napędowego, który cechuje się największą osiąganą siłą ciągu. Otrzymane dane umożliwiły również weryfikację modelu matematycznego CFD. Stanowisko hamowni oraz wyniki badań opisano również w [4, 13]. W projekcie

stanowiska hamowni przyjęto następujące założenia projektowe: umożliwienie pomiarów siły ciągu, momentu obrotowego, prędkości obrotowej śmigła, napięcia zasilającego i prądu (wartości skuteczne) pobieranego przez silnik, temperatury podstawy silnika oraz wibracji zespołu napędowego (przyśpieszeń) w trzech osiach. Na podstawie tych wartości można również obliczyć dodatkowe parametry, takie jak moc elektryczna i mechaniczna. Schemat blokowy części elektronicznej stanowiska przedstawiono na rysunku 3.2.

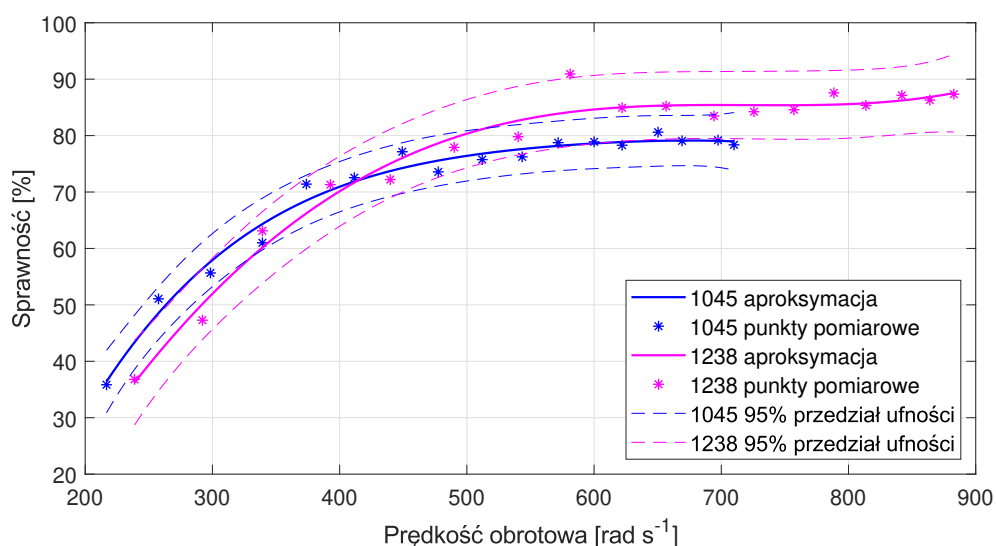


Rys. 3.2. Schemat blokowy stanowiska hamowni

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wybrano konfiguracje charakteryzujące się największą generowaną siłą ciągu i momentem napędowym. W przypadku mniejszego silnika, były to śmigła o średnicy 10 cali i skoku 4,5 cala, natomiast w przypadku większego silnika, śmigła o średnicy 12 cali i skoku 3,8 cala. Na podstawie zebranych danych wyznaczono następujące charakterystyki: siły ciągu, momentu obrotowego (Rys. 3.3) oraz mocy, w zależności od prędkości obrotowej wirnika. Dla tych danych przeprowadzono aproksymację wielomianową, którą również przedstawiono na wykresie. W przypadku siły ciągu i momentu obrotowego zastosowano wielomian drugiego stopnia, a dla mocy wielomian trzeciego stopnia. Współczynnik determinacji  $R^2$  przekroczył wartość 0,99 we wszystkich przypadkach. Jak pokazano na rysunku 3.4, oba wirniki osiągają sprawność przekraczającą 70% dla prędkości obrotowej powyżej 400  $\text{rad s}^{-1}$ . Poniżej tych prędkości obrotowych sprawność znacząco spada, osiągając poziom około 35%.



**Rys. 3.3.** Wyznaczone charakterystyki siły ciągu i momentu dla obu wirników

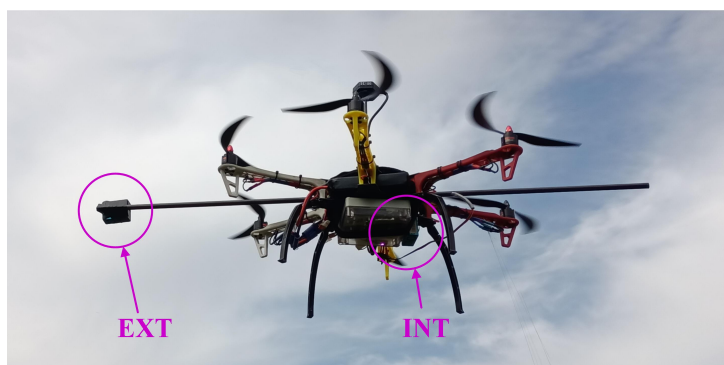


**Rys. 3.4.** Wyznaczone charakterystyki sprawności dla obu wirników

Na podstawie decyzji projektowych ostatecznie wykorzystano robota o sześciu wirnikach. Maksymalne wymiary zewnętrzne robota wynosiły  $0,81 \text{ m} \times 0,81 \text{ m} \times 0,23 \text{ m}$ . Do napędu tego robota wykorzystano sześć zestawów, w skład których wchodziły: silnik BLDC MT2213 firmy EMAX, 30 A sterownik silnika z oprogramowaniem BIHeli i śmigło 1045 firmy Gefman o długości 10 cali i skoku 4,5 cala. Jeden zestaw tego typu był w stanie wygenerować ciąg do 0,86 kg, co oznaczało udźwig wynoszący 5,16 kg. Robot został zbudowany na ramie z tworzywa sztucznego firmy TAROT klasy 550, co oznaczało, że rozstaw silników (największa odległość między silnikami) wynosił 0,55 m. Robot wyposażony został w dwa akumulatory 3S o pojemności 6,5 Ah, co łącznie daje wynikową pojemność 13 Ah. Masa własna robota wraz z układem pomiarowo-sterującym wynosiła 2,57 kg i zapewniała czas lotu na poziomie maksymalnie 25 minut.

## 3.2. Weryfikacja działania robota latającego w warunkach terenowych

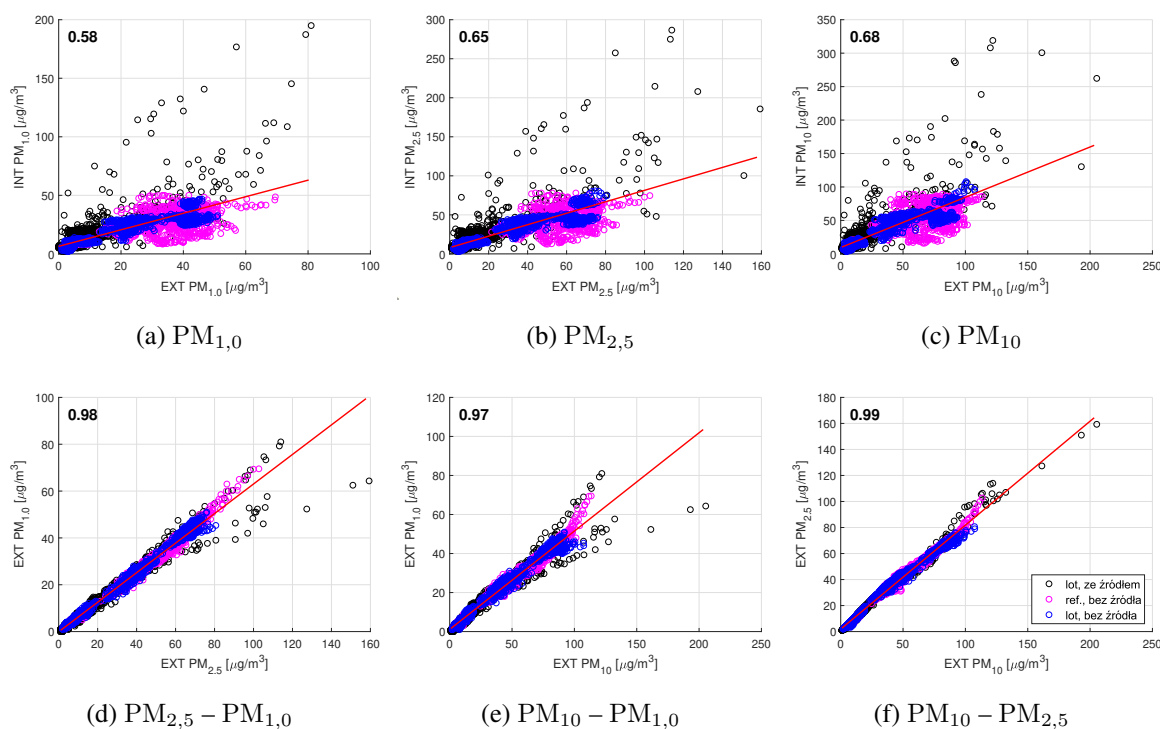
Walidację robota latającego w warunkach terenowych [14, 15] przeprowadzono etapami. Wstępne badania obejmowały trzy grupy pomiarów: loty bez źródła zanieczyszczenia, loty z źródłem zanieczyszczenia oraz referencyjne pomiary bez źródła zanieczyszczenia i przy wyłączonych wirnikach. Eksperymenty były realizowane zarówno w trybie zawisu, jak i podczas ruchu po różnych trajektoriach. W przypadku prób bez pracy wirników, trajektorie były śledzone ręcznie poprzez przemieszczanie robota, który był podparty na pionowym wysięgniku. Testy terenowe przeprowadzono na płaskim terenie, na którym wybrano lokalizację źródła zanieczyszczeń powietrza. Źródłem był niewielki grill gastronomiczny, a jego położenie określono przy użyciu taśmy pomiarowej. To położenie nie było znane dla systemu sterującego robotem, co pozwoliło na ocenę dokładności testowanych algorytmów. Źródło zanieczyszczeń powietrza znajdowało się na wysokości 0,5 m. W trakcie testów robot utrzymywał stałą wysokość około 4 m nad poziomem gruntu, a prędkość pozioma była ograniczona do  $1,0 \text{ m s}^{-1}$ . Ponadto, robot utrzymywał stałą orientację, z wysięgnikiem zwróconym na północ (Rys. 3.5).



**Rys. 3.5.** Robot sześciowirnikowy wyposażony w wysięgnik podczas lotu. Oznaczenia na rysunku: *INT* – czujnik wewnętrzny, *EXT* – zewnętrzny

Na rysunku 3.6 zaprezentowano wybrane wykresy rozrzutu z wyznaczonymi współczynnikami determinacji  $R^2$ . Grupy oznaczono w następujący sposób: zgromadzone podczas lotów przy obecnym (zbiór czarny) bądź braku (zbiór niebieski) źródła zanieczyszczenia, oraz bez źródła zanieczyszczenia przy wyłączonych wirnikach (zbiór różowy). Najważniejszym celem tych analiz było sprawdzenie występowania silnych korelacji liniowych, niezależnych od warunków zewnętrznych czy trajektorii poruszania się robota. Współczynniki determinacji przedstawione na rysunku 3.6 potwierdzają występowanie takich zależności. Wysoka korelacja wewnętrzna czujników wynika z uwzględnienia pomiarów

cząstek o mniejszej średnicy w pomiarach cząstek o większych średnicach (rysunki 3.6d–f). Punkty dla grupy lotów z obecnym źródłem zanieczyszczenia dzielą się na dwie osobne grupy. Najbardziej widoczne jest to na wykresie rozrzutu cząstek  $PM_{1,0}$  i  $PM_{10}$  (rysunek 3.6e). Podobne zależności zachodzą dla drugiego z czujników i wynikają one z różnego rodzaju (składu) zanieczyszczenia. Daje to perspektywę na rozpoznawanie rodzaju spalanych elementów w przyszłości. Ponadto, w tej grupie jest wyraźnie więcej wartości skoncentrowanych w wąskim zakresie stężeń niż wartości skrajne. Są to stężenia tła, podczas gdy wartości ekstremalne pojawiają się podczas kontaktu robota ze strugą zanieczyszczenia. Podsumowanie danych, z podziałem na poszczególne grupy, przedstawiono w tabeli 3.1. Tabela zawiera informacje o całkowitym czasie pomiarów, współczynniki liniowej zależności  $PM_{10,int} = a_1 \cdot PM_{10,ext} + a_0$ , oraz współczynniki korelacji  $r$ -Pearsona i determinacji  $R^2$ .



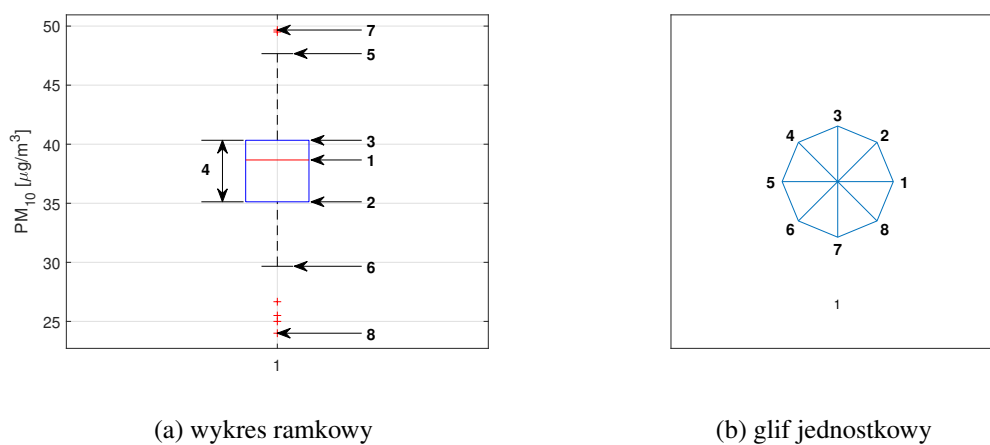
**Rys. 3.6.** Wykresy rozrzutu i wyznaczone współczynniki determinacji  $R^2$  dla jednakowych frakcji cząstek z obu czujników (a–c) i różnych frakcji z czujnika ulokowanego na wysięgniku (d–f)

Należy zauważyć, że współczynnik determinacji jest największy w warunkach lotu (z pracującymi wirnikami). W szczególności, w przypadku lotów bez źródła zanieczyszczenia osiąga on wartość 0,87. Oznacza to, że różnica między czujnikami, a konkretnie liniowa zależność, zwiększa się po uruchomieniu śmigieł. Ta zależność staje się silniejsza w warunkach pracujących wirników i obecności źródła zanieczyszczenia. Wynika to z faktu, że prędkość przepływu powietrza z zawartymi w nim zanieczyszczeniami, generowana przez ruch wirników, dominuje nad prędkością powietrza opływającego drona. Występowanie i dowiedziona

**Tabela 3.1.** Podsumowanie danych zebranych w warunkach terenowych

Wirniki	Źródło zanieczyszczeń	Całkowity czas	Wsp. zależności liniowej		Wsp. kor. $r$ -Pearsona	Wsp. det. $R^2$
			$a_1$	$a_0$		
WYŁ	BRAK	57 min 30 s	0,5970	14,3742	0,74	0,55
WŁ	BRAK	72 min 54 s	0,7362	8,5585	0,93	0,87
	OBECNE	90 min 45 s	1,1984	4,9370	0,84	0,70
RAZEM		221 min 09 s	0,7513	9,5049	0,82	0,68

słuszność takiej liniowej zależności wskazuje, że na podstawie pomiaru dokonanego przez jeden z czujników możliwe jest oszacowanie wartości zmierzonej przez drugi. Na przykład, w przypadku stężenia  $PM_{10}$ , obejmującego wszystkie mierzone cząstki, w trakcie lotów z obecnym źródłem zanieczyszczenia stężenia na czujniku pod robotem są wyższe niż na czujniku na wysięgniku. Jednak, gdy robot znajduje się z dala od źródła, zmierzone stężenia są tylko nieznacznie większe od tła. Stąd wynika, że w zadaniach poszukiwania źródła zanieczyszczenia bardziej odpowiedni jest czujnik umieszczony pod robotem.



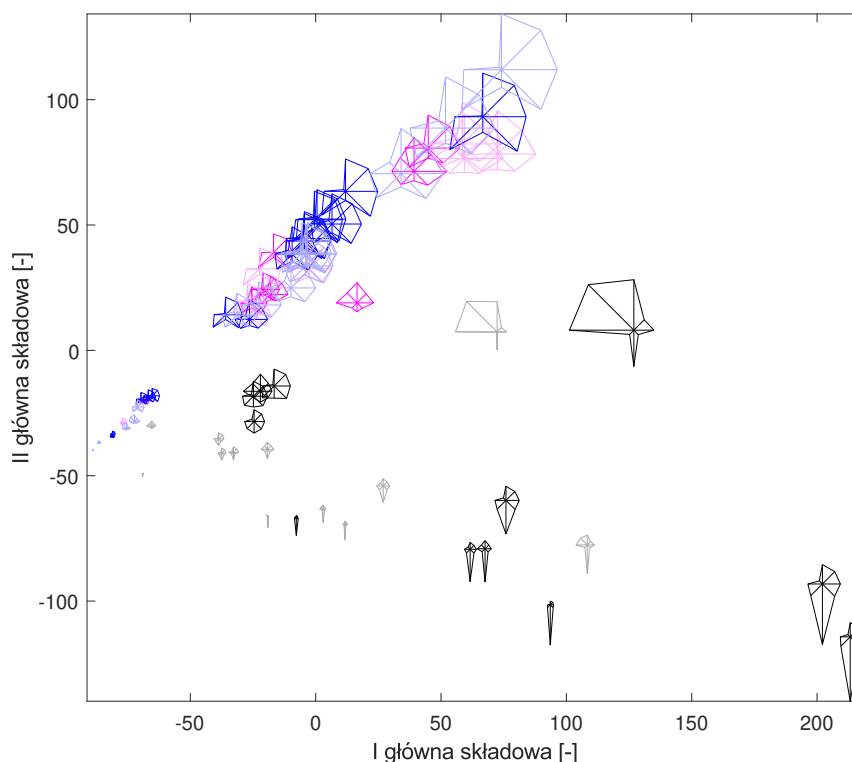
(a) wykres ramkowy

(b) glif jednostkowy

**Rys. 3.7.** Konstrukcja glifu

Dalszą analizę przeprowadzono przy użyciu tzw. glifów. Dla każdego z pomiarów wyznaczono osiem cech statystycznych (Rys. 3.7a) oddzielnie, a były to: (1) mediana, kwantyle 25% i 75% (2 i 3), przedział między-kwantylowy (4), wartości minimalne i maksymalne pomiarów po odrzuceniu wartości odstających (5 i 6), oraz te same wartości skrajne bez odrzucania (7 i 8). Następnie dokonano normalizacji wszystkich danych do zakresu  $\langle 0, 1 \rangle$ , a znormalizowana wartość każdej cechy została wykorzystana jako odległość od środka glifu do określonego wierzchołka (Rys. 3.7b). Kolejnym etapem było wykonanie analizy głównych składowych PCA (ang. *Principal Component Analysis*). W jej wyniku wielowymiarowe

dane zostały zredukowane do mniejszej liczby wymiarów, co spowodowało utratę informacji o fizycznych wymiarach osi. Powstała nowa przestrzeń, w której najwięcej zmienności wyjaśniają początkowe składowe. Na rysunku 3.8 przedstawiono wszystkie utworzone glify, zlokalizowane w przestrzeni za pomocą analizy PCA.

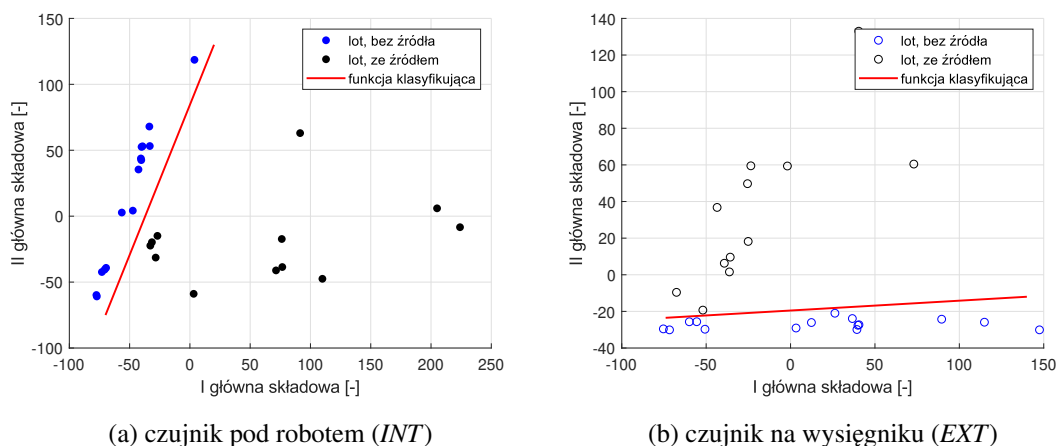


**Rys. 3.8.** Glify rozmieszczone w przestrzeni 2D przy pomocy analizy głównych składowych

Obserwacje z lotów, w których obecne jest źródło zanieczyszczenia, wyraźnie grupują się w prawym dolnym rogu rysunku 3.8. Pozostałe grupy natomiast są umieszczone w lewym górnym rogu. Lokalizacja tych grup w jednym obszarze potwierdza podobieństwo między nimi, którym jest brak źródła zanieczyszczenia. Co więcej, na podstawie rysunku można stwierdzić, że obie grupy (z i bez źródła) można rozdzielić za pomocą liniowej funkcji klasyfikującej. W celu wyznaczenia tej liniowej funkcji klasyfikującej, przeprowadzono osobno analizę dla lotów z i bez źródła, dla każdego z czujników. Równania funkcji klasyfikującej przedstawione na rysunku 3.9a to  $PC2 = 2,28 \cdot PC1 + 84,44$ , a na rysunku 3.9b to  $PC2 = 0,05 \cdot PC1 - 19,52$ . Oznaczenia  $PC1$  i  $PC2$  oznaczają odpowiednio pierwszą (I) i drugą (II) główną składową. Równania linii zostały określone ręcznie, aby utworzona linia rozdzielała grupy, a odległości między obserwacjami a funkcją były jak największe. Najbardziej istotną cechą tak utworzonego kryterium jest to, że pozwala ono na wykrycie obecności źródła zanieczyszczenia, niezależnie od poziomu tła. Odległości między obserwacjami a funkcją klasyfikującą są większe w przypadku czujnika zlokalizowanego pod robotem. Podsumowując, wewnętrzny czujnik



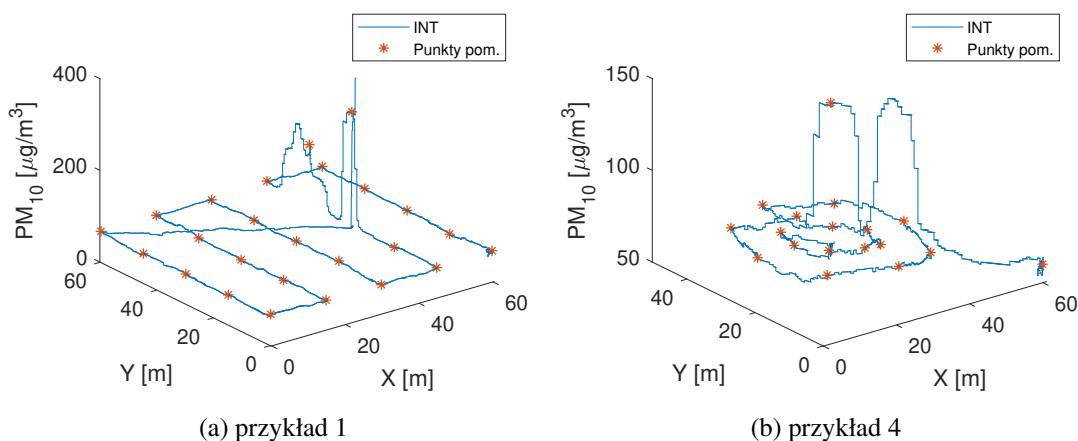
umiejscowiony pod robotem jest bardziej odpowiedni, na podstawie którego wskazań powinien kierować się robot poszukujący źródła zanieczyszczenia.



**Rys. 3.9.** Wyniki osobnych analiz PCA dla obserwacji z obu czujników

W celu sprawdzenia funkcjonowania analizowanych algorytmów w rzeczywistych warunkach, przeprowadzono testy praktyczne. Na rysunku 3.10 przedstawiono wybrane przykłady z przeprowadzonych pomiarów. Pokazano tam pomiar ciągły (linia niebieska) oraz pomiar punktowy (znaczniki pomarańczowe). Wartości liczbowe zebrano w tabeli 3.2. Dla każdego przypadku wyznaczono następujące dane: typ algorytmu (oznaczony liczbą), rozmiar obszaru, liczbę punktów pomiarowych, czas trwania algorytmu (czas lotu), błąd bezwzględny lokalizacji (odległość pomiędzy rzeczywistym a wskazanym położeniem źródła) oraz wartości maksymalne, minimalne i średnie zmierzonych stężeń  $PM_{10}$  dla wszystkich punktów pomiarowych. Na podstawie tych wyników można wnioskować, że w przypadku, gdy stosunek maksymalnego zmierzonego stężenia do stężenia tła (tu rozumianego jako średnia wartość) jest niski, dokładność jest najniższa (przypadek 3). Na przykład, na obszarze  $60m \times 60m$ , najkrótszy czas poszukiwania osiągnięto z wykorzystaniem algorytmu 2 (przypadek 4). W porównaniu do algorytmu przeszukiwania na regularnej siatce punktów (przypadek 2), czas był krótszy o około 37,1%. W przypadku algorytmu wyznaczania kierunku lotu na podstawie planu eksperymentu osiągnięto podobne wyniki, jak w przypadku wyznaczania kierunku na podstawie wartości maksymalnej. Pomiarzy te były przeprowadzane w okresie wiosennym, kiedy prędkość wiatru dochodziła do 11 km/h. Dodatkowo, w przypadku tego algorytmu, poszczególne etapy były niezależne od siebie. W przypadku algorytmu wyznaczania kierunku na podstawie wartości maksymalnej, gdzie wybierana była maksymalna wartość z pomiarów, była ona wybierana spośród wszystkich etapów. W tej sytuacji, podczas ruchu robota, kiedy zmieniały się warunki zewnętrzne (prędkość i kierunek wiatru), działanie nie było przerywane, ponieważ algorytm był ustawiony na stałą liczbę kroków. Dlatego można wywnioskować, że potrzebne jest dodanie dodatkowych warunków, aby zakończyć pracę, gdy

stężenia na kolejnych etapach pomiaru są niższe niż na poprzednich etapach. W takiej sytuacji można by założyć, że robot stracił kontakt ze źródłem zanieczyszczenia. Przyjmując kryterium maksymalnego dopuszczalnego błędu bezwzględnego lokalizacji źródła zanieczyszczenia równego 20 m, można stwierdzić, że zbudowany system działa poprawnie (przypadki 1-9). W przypadku 10 robot stracił kontakt ze strugą. Stąd skuteczność opracowanego systemu można oszacować na 90%.



**Rys. 3.10.** Algorytmy wyznaczania kierunku lotu na podstawie wartości maksymalnej i przeszukania na regularnej siatce punktów – obszar 60 m × 60 m – zmierzone stężenia

**Tabela 3.2.** Podsumowanie zaprezentowanych przykładów – wszystkie algorytmy

Nr prz.	Ozn. alg.	Obszar	Liczba pkt	Czas lotu	Błąd bez. lok. [m]	PM <sub>10</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]		
						Maks.	Min.	Średnie
1	1	60 m × 60 m	25	10 min 39 s	7,50	314	58	80,6
2	1	60 m × 60 m	25	10 min 22 s	7,50	125	58	69,8
3	2	60 m × 60 m	21	11 min 14 s	14,73	34	23	28,6
4	2	60 m × 60 m	18	6 min 31 s	7,50	138	60	68,3
5	2	100 m × 100 m	18	11 min 7 s	5,00	858	47	115,6
6	2	100 m × 100 m	18	10 min 19 s	0,00	367	31	72,8
7	4	60 m × 60 m	29	8 min 24 s	12,27	285	15	67,5
8	4	60 m × 60 m	29	8 min 9 s	15,26	61	20	28,3
9	4	60 m × 60 m	29	8 min 18 s	19,20	225	23	48,7
10	4	60 m × 60 m	29	9 min 23 s	55,22	73	7	19,4

## 4. Podsumowanie

Podsumowując, zaprojektowano, zbudowano i przetestowano w warunkach eksploatacyjnych wielowirnikowy inspekcyjny robot latający, dedykowany do poszukiwania źródeł zanieczyszczenia powietrza cząstkami stałymi. Efektem przeprowadzonych prac badawczych jest prototypowy system do wykrywania źródeł zanieczyszczeń powietrza cząstkami stałymi, złożony z autorskiego uniwersalnego robota latającego oraz autorskiego układu sterowania poszukującego źródła zanieczyszczeń i wyznaczającego trajektorię lotu w czasie rzeczywistym podczas realizacji misji. Opracowanie efektywnie działającego systemu było możliwe m.in. dzięki wykorzystaniu modeli: dynamicznego robota, pola przepływu i pola zanieczyszczenia. Skonstruowane urządzenie pozwala na automatyczne prowadzenie poszukiwań najsilniejszego źródła zanieczyszczenia powietrza cząstkami stałymi. Na podstawie przeprowadzonych badań potwierdzono poprawne działanie zaprojektowanego systemu, co pozwala stwierdzić, że cel pracy został osiągnięty.

Pracę rozpoczęto od przeprowadzenia przeglądu literatury dotyczącej robotów wielowirnikowych. Na podstawie aktualnego stanu wiedzy stwierdzono, że do celów lokalizowania źródeł zanieczyszczenia może służyć dedykowany robot latający. Budowa takiego robota jednak wymagała rozwiązania całego szeregu problemów cząstkowych. Co najważniejsze, konieczne było przeprowadzenie procesu syntezy algorytmu sterowania, który umożliwiłby dotarcie robota do źródła zagrożenia środowiskowego. Jest to złożony algorytm, który składa się z kilku kluczowych elementów, takich jak: planowanie trasy przelotu, generowanie trajektorii lotu, sterowanie ruchem robota oraz przetwarzanie danych z czujników nawigacyjnych oraz pomiar zanieczyszczeń.

Aby robot mógł poruszać się po dowolnych trajektoriach, system sterowania należy przygotować od podstaw, albo wykorzystać bądź zmodyfikować istniejące rozwiązanie. W drugim rozdziale opisano proces doboru algorytmu sterowania ruchem robota latającego, który umożliwia śledzenie trajektorii wyznaczonej przez podsystem wyszukujący źródła zanieczyszczenia. Najpierw przedstawiono model matematyczny trzech analizowanych konfiguracji robotów latających: o czterech, sześciu i ośmiu wirnikach. Analizowane konfiguracje wirników mają największe znaczenie praktyczne, ze względu na najprostszą konstrukcję kadłuba. Następnie opisano podział wyodrębnionych podsystemów składowych robota latającego. Na tej podstawie dokonano wyboru odpowiednich komponentów oraz

opracowano algorytm sterowania ruchem robota latającego. W tym rozdziale również zaprezentowano szczegółową strukturę zastosowanego układu sterowania. Przeanalizowano wybrane algorytmy sterowania ruchem robota, takie jak regulator PID, liniowo-kwadratowy LQR czy sterowanie predykcyjne MPC. Ostatecznie jednak, w układzie regulacji zastosowanego kontrolera lotu wykorzystano algorytmy PID, ze względu na minimalny wymagany nakład obliczeniowy. Wstępne wartości parametrów regulatorów PID zostały dobrane na podstawie modelu matematycznego i metody planowania eksperymentu. Opisana procedura pozwoliła na oszacowanie pierwszych przybliżonych wartości nastaw oraz sprawdzenie ich istotności w układzie regulacji. Na tej podstawie dokonano ostatecznego doboru nastaw rzeczywistego układu.

W trzecim rozdziale dokonano oszacowania zaburzeń naturalnego pola przepływu spowodowanych przez wirniki robota latającego. Przeprowadzone badania umożliwiły właściwe zaprojektowanie układu pomiarowego cząstek stałych w celu efektywnego poszukiwania źródła zanieczyszczenia. Analizie poddawane były układy wirników bezpośrednio związane z trzema analizowanymi typami robotów latających, zgodnie z sformułowanym szczegółowym schematem postępowania. Dla każdego rozpatrywanego układu wirników opracowano model i przeprowadzono analizę numeryczną pola przepływu, wykorzystując metodę objętości skończonych. Badania rozpoczęto od układu z jednym wirnikiem, którego weryfikacja była oparta na danych eksperymentalnych zebranych na specjalnie przygotowanym stanowisku hamowni. Rozbieżności pomiędzy modelem komputerowym a wynikami eksperymentu uznano za pomijalne. Po weryfikacji uzyskanych danych, możliwe było rozszerzenie analizy na układy z większą liczbą wirników. Przeprowadzone obliczenia pozwoliły na określenie trudnych do uzyskania eksperymentalnie rozkładów pól prędkości, ciśnień oraz natężenia turbulencji. Na podstawie tych rozkładów można było porównać różne konfiguracje wirników oraz dokonać wyboru lokalizacji układu pomiarowego. Wykazano, że odpowiednie umieszczenie czujnika ma znaczący wpływ na wyniki pomiaru. Przeprowadzone analizy pozwoliły na ustalenie kryterium na podstawie natężenia turbulencji, co umożliwiło wskazanie właściwej lokalizacji układu pomiarowego robota.

W czwartym rozdziale przedstawiono analizę wybranych algorytmów poszukiwania, których celem jest wyznaczenie odpowiedniej trajektorii robota w celu dotarcia do źródła zanieczyszczenia. Przeprowadzono analizę kilku wybranych algorytmów, rozpoczynając od wyznaczania regularnej siatki punktów pomiarowych, kierunku lotu opartego na wartości maksymalnej, planowania eksperymentu, gradientu, aż do algorytmu infotaksji. Ten ostatni algorytm, w cytowanych pracach i dostępnych implementacjach, charakteryzował się niepraktycznym kryterium zakończenia poszukiwań, które wymagało znajomości położenia źródła, które jest przedmiotem poszukiwań. Dlatego zaproponowano oryginalne kryterium,

---

które rozwiązało ten problem i umożliwiło praktyczną implementację. Przeprowadzono serię badań symulacyjnych, co pozwoliło na porównanie algorytmów. Na podstawie uzyskanych wyników ustalono kryterium doboru algorytmów, które polegało na minimalizacji czasu lotu i zostało uznane za najważniejszy parametr w przypadku wykorzystania robota latającego. Dodatkowo przedstawiono koncepcyjne rozważania w zakresie rozszerzenia poszukiwań na wiele źródeł zanieczyszczenia, co dowiodło, że nadal można efektywnie wyszukiwać wiele źródeł zanieczyszczenia przy stosunkowo niskim zapotrzebowaniu na moc obliczeniową.

W piątym rozdziale opisano proces budowy prototypu robota latającego. Kluczowym elementem tego robota jest autorska jednostka pomiarowo-sterująca, na której zaimplementowano algorytmy poszukiwania źródła zanieczyszczenia. Całe oprogramowanie układowe, skrypty wykorzystywane podczas symulacji, przetwarzania i wizualizacji zgromadzonych danych oraz moduły elektroniczne zostały przygotowane w pełni samodzielnie. Następnie przeprowadzono analizę właściwości pomiarowych zastosowanych czujników cząstek stałych, co umożliwiło dobranie odpowiednich parametrów systemu pomiarowego. Opracowano także dedykowane automatyczne stanowisko hamowni, które pozwoliło na zweryfikowanie poprawności obliczeń przepływów powietrza wokół robota oraz wyznaczenie nieznanych charakterystyk zespołów napędowych robota. W tej części pracy zaproponowano również właściwy sposób przetwarzania danych pomiarowych i zdefiniowano wytyczne metodyki badań terenowych. W kolejnym etapie prac zbudowano prototyp i zaplanowano serię eksperymentów weryfikacyjnych.

W szóstym rozdziale przeprowadzono walidację działania robota latającego w warunkach eksploatacyjnych. W przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych uwzględniono następujące scenariusze: nieruchome wirniki robota oraz brak źródła zanieczyszczenia, lot robota w obszarze bez źródła zanieczyszczenia oraz lot robota w obszarze ze źródłem zanieczyszczenia. Badania przeprowadzono dla różnych wartości stężeń tła, różnych warunków atmosferycznych, a także różnych trajektorii ruchu robota. Wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych potwierdziły poprawność wniosków wyciągniętych na podstawie analizy numerycznej modelu. W przypadku poszukiwania źródeł zanieczyszczenia, bez konieczności dokładnego pomiaru stężenia pyłów zawieszonych, teoria zaczerpnięta z literatury, która zaleca umieszczenie wlotu układu pomiarowego nad robotem, została jednoznacznie uznana za nieprawidłową. Sformułowane autorskie kryterium umożliwiło określenie dwóch możliwych lokalizacji położenia wlotu układu pomiarowego, z których ostatecznie wybrano położenie zweryfikowane na podstawie terenowych badań eksperymentalnych, które potwierdziły poprawność przyjętego kryterium. Reasumując, umiejscowienie czujnika pod robotem należy uznać za właściwe. Wskazania tego czujnika powinny stanowić podstawę do wyznaczenia trajektorii lotu robota w kierunku źródła zanieczyszczenia. Ponadto, potwierdzono zależność pomiędzy wskazaniem czujników zamontowanych w wybranych

miejscach, co sugeruje, że na podstawie pomiaru jednego czujnika można oszacować wartość na drugim. Ostatecznie, z uwagi na to, że korelacja wskazań czujników w przypadku występowania źródła zanieczyszczenia rozdziela się na dwie osobne grupy, możliwe jest w przyszłości rozpoznawanie rodzaju spalanych substancji. Uzyskane wyniki potwierdziły prawidłowe funkcjonowanie systemu. Na podstawie przedstawionych przykładów skuteczność opracowanego systemu oszacowano na 90%.

## 4.1. Oryginalne rozwiązania w pracy

Realizacja celu pracy wymagała rozwiązania całego szeregu problemów cząstkowych, które w całości lub w części miały charakter oryginalny. Najważniejsze osiągnięcia oryginalne to:

- Synteza algorytmów sterowania wyspecjalizowanego wielowirnikowego robota latającego, dedykowanego do lokalizacji źródeł zanieczyszczeń powietrza cząstkami stałymi. Do wspomnianej syntezy wykorzystano modele: dynamiczny robota, pola przepływu oraz pola zanieczyszczeń.
  - Synteza algorytmu sterowania ruchem robota. Dobór parametrów algorytmu sterowania lotem oraz struktury robota na podstawie modelu dynamicznego ruchu i metody planowania eksperymentu.
  - Zaprojektowanie i dobór parametrów efektywnie działającego systemu pomiarowego robota poprzez modelowanie i analizę numeryczną pola przepływu z wykorzystaniem metody objętości skończonych. Określenie autorskiego kryterium umożliwiającego dobranie właściwej lokalizacji wlotu układu pomiarowego.
  - Wyznaczenie trajektorii ruchu robota do źródła zanieczyszczenia poprzez badania symulacyjne algorytmów poszukiwania źródeł zanieczyszczeń. Określenie kluczowych parametrów decyzyjnych oraz opracowanie autorskiego kryterium zakończenia poszukiwań w infotaksji.
- Opracowanie projektu i wykonanie autorskiego robota wielowirnikowego, w którego konstrukcji i algorytmach zastosowano wyniki przeprowadzonych badań literaturowych, modelowych i eksperymentalnych.
  - Opracowanie projektu i wykonanie autorskiego, zautomatyzowanego stanowiska hamowni, dedykowanego do estymacji parametrów zespołów napędowych oraz weryfikacji i walidacji opracowanego modelu pola przepływu.

- Budowa systemu pomiarowego robota. Opracowanie metody przetwarzania danych pomiarowych z czujników cząstek stałych.
  - Zaplanowanie i przeprowadzenie testów robota w warunkach eksploatacyjnych. Weryfikacja zaimplementowanych algorytmów poszukiwania źródła zanieczyszczeń.
  - Przeprowadzenie analizy statystycznej, korelacji, głównych składowych i finalnie wizualizacji wyników pomiarów, stanowiąca innowacyjne podejście do tego zagadnienia. Opracowanie funkcji umożliwiającej automatyczną klasyfikację pomiarów jako te z źródłem zanieczyszczenia lub bez, niezależnie od poziomu tła pomiarowego, co dotąd nie było stosowane w tej dziedzinie.
- Krytyczne spojrzenie na wyniki. Wskazanie kierunków dalszych badań, propozycji udoskonaleń i możliwych modyfikacji zastosowanych modeli oraz algorytmów.

## 4.2. Kierunki dalszych badań

Istotnym kierunkiem dalszych badań jest rozbudowanie modelu pola przepływu, poprzez zastosowanie większej domeny obliczeniowej, rozbudowanie modelu o bryłę robota oraz umieszczenie cząstek stałych w polu przepływu. Należy również wykonać analizy czasowe sliding-mesh, które cechują się dużą dokładnością przy dużych prędkościach przepływu. W celu analizy i wizualizacji ogromnej ilości zgromadzonych wielowymiarowych danych można zastosować zaawansowane metody redukcji wymiarowości, takie jak tSNE czy UMAP. Wyznaczenie funkcji klasyfikującej pomiary należałoby zrealizować przy użyciu innych metod, takich jak maszyna wektorów nośnych (SVM). Klasyfikację można również zastosować do wycinków czasowych pomiarów, aby umożliwić jej stosowanie w czasie rzeczywistym podczas lotu. Należy także zaplanować serię dodatkowych testów, w których robot będzie nawigował z wykorzystaniem czujnika umieszczonego na wysięgniku. W ten sposób można porównać wyniki dla wykorzystanych algorytmów poszukiwania źródła zanieczyszczeń, a następnie dokładnie oszacować efektywność energetyczną proponowanego rozwiązania wynikającą z wyższej czułości zaprojektowanego układu pomiarowego zanieczyszczeń.

Kierunki nowych badań obejmują m.in. wykorzystanie kamery termowizyjnej, dodatkowych czujników gazów oraz środków neutralizacji zanieczyszczeń. Można również rozważyć wyposażenie robota w system wstępnego rozpoznawania emitenta oraz szacowania odległości od niego, co pozwoliłoby na wstępne ocenienie, czy robot znajduje się blisko słabego źródła czy daleko od silnego źródła. Do określenia kierunku wiatru można rozważyć wykorzystanie sieci neuronowych. Inną możliwością jest zastosowanie metod planowania eksperymentu w celu dostosowania parametrów algorytmów poszukiwania. W przyszłych

badaniach planuje się również wykorzystanie algorytmów o najkrótszej trasie do pokonania, a niekoniecznie o najkrótszym czasie lotu. Jednakże taki podejście będzie wymagało jednostki pomiarowo–sterującej o większej mocy obliczeniowej. W dalszej fazie prac należy także zweryfikować działanie robota w przypadku źródeł o różnych parametrach, z uwzględnieniem poszukiwania wielu źródeł. W planach przyszłych badań znajduje się także osiągnięcie pełnej autonomii robota, redukcja masy konstrukcji nośnej robota oraz optymalizacja kształtu płata śmigła.

Zastosowanie tego rodzaju robotów w przyszłości można przewidywać w zakresie przesyłania i gromadzenia informacji dotyczących wykrywania wypadków i awarii. W ten sposób możliwe byłoby wykrywanie substancji, które nie są wykrywalne innymi metodami. Taki robot można również wykorzystać do lokalizacji baz i pojedynczych pojazdów wojskowych. Pozwoliłby on na ocenę wiarygodności obiektów, które zostały wykryte innymi metodami, ponieważ makiety pojazdów zazwyczaj nie są wyposażone w układy symulujące generowanie zanieczyszczeń.



## Lista najważniejszych publikacji

- **(140pkt)** Suchanek G., Filipek R., Gołaś A., **Design and implementation of a particulate matter measurement system for energy-efficient searching of air pollution sources using a multirotor robot**, *Energies*, 2023 – **IF: 3.2**,
- **(70pkt)** Suchanek G., Filipek R., **Computational fluid dynamics (CFD) aided design of a multi-rotor flying robot for locating sources of particulate matter pollution**, *Applied Computer Science*, 2022,
- **(40pkt)** Suchanek G., Filipek R., **CFD analysis of a multi-rotor flying robot for air pollution inspection**, *Journal of Physics: Conference Series*, 2022,
- **(100pkt)** Suchanek G., Wołoszyn J., Gołaś, A., **Evaluation of selected algorithms for air pollution source localisation using drones**, *Sustainability*, 2022 – **IF: 3.889**,
- **(80pkt)** Ciesielka W., Suchanek G., **Modelling and simulation tests of a quadcopter flying robot**, *New trends in production engineering : monograph. Pt. 2, Social sciences*, 2019,
- **(5pkt)** Suchanek G., Ciesielka W., **Design and experimental research of a quadcopter flying robot**, *E3S Web of Conferences*, 2018,
- **(15pkt)** Ciesielka W., Suchanek G., **Project of flying robot type quadcopter**, *Polish Journal of Environmental Studies*, 2017 – **IF: 1.871**.

## Bibliografia

- [1] S. Bogdan, M. Orsag i P. Oh. „*Multi-rotor Systems, Kinematics, Dynamics, and Control of*”. W: *Encyclopedia of Robotics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020, s. 1–7. ISBN: 978-3-642-41610-1. DOI: [10.1007/978-3-642-41610-1\\_62-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-41610-1_62-1).
- [2] Z. Bubnicki. „*Teoria i algorytmy sterowania*”. Wydawnictwo Naukowe PWN SA, 2005. ISBN: 8301144149.
- [3] D. Chandia-Poblete i in. „*The influence of air pollution exposure on the short- and long-term health benefits associated with active mobility: A systematic review*”. W: *Science of The Total Environment* 850 (2022), s. 157978. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157978>.
- [4] W. Ciesielka i G. Suchanek. „*Modelling and simulation tests of a quadcopter flying robot*”. W: *New Trends in Production Engineering 2* (2019), s. 486–495. DOI: [10.2478/ntpe-2019-0052](https://doi.org/10.2478/ntpe-2019-0052).
- [5] I. Czajka i A. Gołaś. „*Inżynierskie metody analizy numerycznej i planowanie eksperymentu*”. SU1744. Wydawnictwa AGH, 2017. ISBN: 978-83-7464-992-6.
- [6] S. Gardecki. „*Stabilizacja lotu wielowirnikowego robota latającego z napędem elektrycznym w warunkach zmiennego obciążenia i konfiguracji z wykorzystaniem pokładowych systemów mikroawioniki*”. Rozprawa doktorska. Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny, Instytut Automatyki i Inżynierii Informatycznej, 2017.
- [7] W. Giernacki. „*Roboty latające. Laboratorium*”. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2017. ISBN: 978-83-7775-467-2.
- [8] M. Idrissi, M. Salami i F. Annaz. „*A Review of Quadrotor Unmanned Aerial Vehicles: Applications, Architectural Design and Control Algorithms*”. W: *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 104.2 (2022), s. 22. DOI: [10.1007/s10846-021-01527-7](https://doi.org/10.1007/s10846-021-01527-7).
- [9] D. Moskal i in. „*Algorytmy sterowania quadrotora*”. Raport akademicki. Politechnika Wrocławska. 2013. URL: [http://www.kcir.pwr.edu.pl/~jjakubia/ProjektPrzejsciowy/docs/projprze\\_quadrotor\\_algorytmy.pdf](http://www.kcir.pwr.edu.pl/~jjakubia/ProjektPrzejsciowy/docs/projprze_quadrotor_algorytmy.pdf) (term. wiz. 2019-11-25).

- [10] C. J. L. Murray i in. „*Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019*”. W: *The Lancet* 396.10258 (2020), s. 1223–1249. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30752-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30752-2).
- [11] G. Suchanek. „*Wielowirnikowy robot latający*”. Praca magisterska. Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, 2017.
- [12] G. Suchanek i R. Filipek. „*CFD analysis of a multi-rotor flying robot for air pollution inspection*”. W: *Journal of Physics: Conference Series* 2367.1 (2022), s. 012010. DOI: [10.1088/1742-6596/2367/1/012010](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2367/1/012010).
- [13] G. Suchanek i R. Filipek. „*Computational fluid dynamics (CFD) aided design of a multi-rotor flying robot for locating sources of particulate matter pollution*”. W: *Applied Computer Science* 18.3 (2022), s. 86–104. DOI: [10.35784/acs-2022-23](https://doi.org/10.35784/acs-2022-23).
- [14] G. Suchanek, R. Filipek i A. Gołaś. „*Design and Implementation of a Particulate Matter Measurement System for Energy-Efficient Searching of Air Pollution Sources Using a Multirotor Robot*”. W: *Energies* 16.7 (2023). DOI: [10.3390/en16072959](https://doi.org/10.3390/en16072959).
- [15] G. Suchanek, J. Wołoszyn i A. Gołaś. „*Evaluation of Selected Algorithms for Air Pollution Source Localisation Using Drones*”. W: *Sustainability* 14.5 (2022). DOI: [10.3390/su14053049](https://doi.org/10.3390/su14053049).