



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA NAUKI INŻYNIERYJNO-TECHNICZNE

DYSCYPLINA AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA I TECHNOLOGIE
KOSMICZNE

ROZPRAWA DOKTORSKA

*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 anglojęzycznych skrótów

- ADC (ang. *Analog to Digital Converter*) – przetwornik analogowo-cyfrowy,
- BLDC (ang. *Brushless Direct-Current Motor*) – synchroniczny silnik bezszczotkowy prądu stałego,
- CFD (ang. *Computational Fluid Dynamics*) – obliczeniowa mechanika płynów,
- CSV (ang. *Comma-Separated Values*) – format przechowywania danych w plikach tekstowych,
- ESC (ang. *Electronic Speed Controller*) – elektroniczny komutator (sterownik) silnika BLDC,
- GPS (ang. *Global Positioning System*) – system nawigacji satelitarnej,
- LiPo (ang. *Lithium-Polymer*) litowo-polimerowy (akumulator)
- PCA (ang. *Principal Component Analysis*) – analiza głównych składowych,
- PM (ang. *Particulate Matter*) – pył zawieszony,
- PWM (ang. *Pulse-Width Modulation*) – modulacja szerokości impulsów,
- RC (ang. *Radio Control*) – sterowanie radiowe,
- RC FPV (ang. *Remote Controlled First Person View*) – dziedzina modelarstwa RC,
- SVD (ang. *Singular Value Decomposition*) – rozkład według wartości osobliwych,
- UAV (ang. *Unmanned Aerial Vehicle*) – bezzałogowy statek powietrzny,
- VOC (ang. *Volatile Organic Compounds*) – lotne związki organiczne,
- uMAP (ang. *Uniform Manifold Approximation and Projection*) – metoda nieliniowej redukcji wymiarowości,

Spis treści

Streszczenie	2
Abstract	3
Spis angielskich skrótów	4
1. Wprowadzenie	8
1.1. Przegląd zastosowań inspekcyjnych robotów latających.....	9
1.1.1. Wykorzystanie robotów latających do określenia stanu środowiska	16
1.1.2. Zastosowania robotów latających wyposażonych w czujniki gazów	23
1.2. Przegląd metod modelowania i poszukiwania źródeł zanieczyszczeń powietrza....	25
1.2.1. Modelowanie zjawiska rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń	25
1.2.2. Metody poszukiwania źródeł zanieczyszczeń	28
1.3. Normatywy pyłów zawieszonych PM w Polsce	36
1.4. Sformułowanie wymagań dla budowanego inspekcyjnego robota latającego	38
1.5. Postawienie celu i określenie zakresu pracy	41
1.6. Autorski algorytm poszukiwania źródeł zanieczyszczeń powietrza.....	43
2. Dobór parametrów algorytmu sterowania lotem oraz struktury robota na podstawie modelu dynamicznego ruchu	45
2.1. Model dynamiczny robota latającego	46
2.2. Wybór struktury robota latającego na podstawie dynamicznych równań ruchu	53
2.3. Przegląd standardowych algorytmów sterowania ruchem robota.....	55
2.3.1. Regulatory PID	55
2.3.2. Algorytm regulacji liniowo-kwadratowej	57
2.3.3. Algorytm sterowania predykcyjnego	58
2.4. Budowa układu sterującego robota latającego.....	61
2.4.1. Układ napędowy robota	62
2.4.2. Podsystem sterujący lotem robota	66

2.5. Dobór parametrów algorytmu sterowania lotem na podstawie dynamicznych równań ruchu i metody planowania eksperymentu	76
2.6. Podsumowanie	84
3. Dobór parametrów systemu pomiarowego na podstawie modelu pola przepływu ..	85
3.1. Budowa modelu pola przepływu wokół wirników robota	85
3.1.1. Budowa i analiza układów z jednym wirnikiem	97
3.1.2. Budowa i analiza układu dwóch wirników	100
3.1.3. Budowa i analiza układu czterech wirników	103
3.1.4. Budowa i analiza układu sześciu wirników	105
3.2. Dobór lokalizacji wlotu układu pomiarowego stężenia cząstek stałych.....	108
3.3. Podsumowanie	115
4. Dobór algorytmu poszukiwania źródeł zanieczyszczenia na podstawie modelu pola zanieczyszczeń.....	116
4.1. Model matematyczny pola zanieczyszczenia	116
4.2. Algorytmy poszukiwania źródeł zanieczyszczeń	118
4.2.1. Wyznaczanie regularnej siatki punktów pomiarowych.....	118
4.2.2. Wyznaczanie punktów pomiarowych na podstawie infotaksji	120
4.2.3. Wyznaczanie kierunku lotu na podstawie wartości maksymalnej.....	125
4.2.4. Wyznaczanie kierunku lotu na podstawie planu eksperymentu.....	127
4.2.5. Wyznaczanie kierunku lotu na podstawie gradientu pola zanieczyszczenia	129
4.3. Badania symulacyjne algorytmów poszukiwania.....	132
4.4. Koncepcje poszukiwania wielu źródeł zanieczyszczenia.....	140
4.5. Podsumowanie	142
5. Budowa prototypu robota latającego poszukującego źródeł zanieczyszczenia.....	143
5.1. Budowa podsystemu pomiarowo–sterującego.....	143
5.1.1. Budowa podsystemu poszukującego źródeł zanieczyszczenia	143
5.1.2. Dobór parametrów podsystemu pomiarowego stężenia cząstek stałych	145
5.2. Identyfikacja parametrów zespołu napędowego robota.....	150
5.2.1. Budowa stanowiska pomiarowego.....	151
5.2.2. Kalibracja stanowiska	154
5.2.3. Pomiary zespołów napędowych na stanowisku	155
5.2.4. Identyfikacja parametrów zespołów napędowych	157
5.3. Wykonanie prototypu robota latającego	160
5.4. Podsumowanie	162

6. Weryfikacja działania robota latającego w warunkach terenowych.....	164
6.1. Weryfikacja poprawności działania systemu pomiarowego	166
6.1.1. Wyniki badań wstępnych	167
6.1.2. Analiza korelacji wyników pomiarów stężeń cząstek stałych.....	171
6.1.3. Redukcja wielowymiarowych danych i klasyfikacja pomiarów	173
6.2. Weryfikacja algorytmów poszukiwania.....	176
6.3. Podsumowanie	184
7. Podsumowanie.....	187
7.1. Oryginalne rozwiązania w pracy	192
7.2. Kierunki dalszych badań.....	193
Bibliografia	195
Załącznik A. Analityczne oszacowanie parametru y^+.....	218
Załącznik B. Wyniki badań symulacyjnych z wykorzystaniem analizowanych algo- rytmów poszukiwania źródeł zanieczyszczenia.....	220
Załącznik C. Pomiary parametrów zespołów napędowych na stanowisku hamowni	231
Załącznik D. Wyniki analiz korelacji Pearsona stężeń cząstek stałych.....	234

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. Nieraz źródłem takiego zanieczyszczenia są nieprzewidywalne wypadki bądź awarie, które powodują uwolnienie do środowiska toksycznych substancji. Jednakże, dla mieszkańców miast i terenów podmiejskich szczególnie dokuczliwa jest niska emisja, gdzie źródłem stają się same domy mieszkalne. Tam nadal powszechne są praktyki spalania odpadów, niskiej jakości węgla bądź niskokalorycznych pozostałości po jego produkcji (miałów) w bezklasowych piecach na paliwa stałe, tzw. *kopciuchach*.

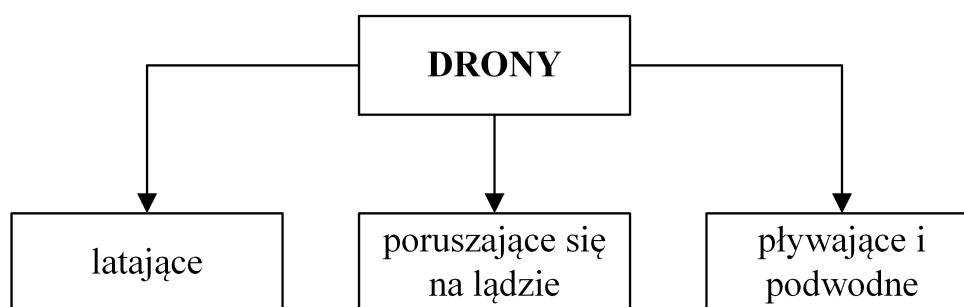
Zanieczyszczone powietrze powoduje ogromne szkody dla zdrowia ludzkiego. Jest ono czwartym co do wielkości wiodącym czynnikiem zwiększającym ryzyko zgonu [152], gdzie zajmuje niechlubne miejsce wśród czynników takich jak palenie tytoniu, wysokie ciśnienie tętnicze, niewłaściwa dieta czy wysoka glikemia. W dostępnej literaturze wykazano istnienie istotnej zależności pomiędzy zdrowiem publicznym, a poziomem zanieczyszczenia powietrza [224]. Smog w samej Polsce odpowiedzialny jest za przedwczesny zgon dziesiątek tysięcy ludzi rocznie, powszechność alergii czy innych chorób, w tym nowotworowych. Wysokie stężenie cząstek stałych PM_{2.5} jest odpowiedzialne m.in. za choroby układu oddechowego. W [188] wskazano, że istnieje zwiększone ryzyko wystąpienia przewlekłych chorób płuc takich jak AECOPD (ang. *Acute exacerbation of chronic obstructive pulmonary disease*) w warunkach wysokich stężeń cząstek stałych, niskiej temperatury otoczenia i niskiej wilgotności. Są to warunki odpowiadające okresowi zimowemu, kiedy to właśnie na skutek niskiej emisji obserwuje się podwyższone stężenia. Wskazuje się również [43], że wysokie stężenia cząstek stałych zmniejszają korzyści z aktywności fizycznej na świeżym powietrzu, takich jak spacer czy jazda na rowerze. Do szkód zdrowotnych należy doliczyć również mniej oczywiste koszty, takie jak ogromne wydatki na służbę zdrowia, koszty środowiskowe czy niszczące fasady budynków.

Dlatego też stałe analizowanie zanieczyszczeń powietrza, a w szczególności monitorowanie stężenia cząstek stałych, ma kluczowe znaczenie dla celów ochrony środowiska. W związku z nieustępującym problemem zachodzi potrzeba budowania, rozwijania i stosowania rozwiązań,

które będą umożliwiać automatyczną lokalizację źródeł zanieczyszczeń. Najogólniej, metody zbierania danych i lokalizowania źródeł pyłów zawieszonych można podzielić na metody stacjonarne bądź mobilne. W metodach stacjonarnych wykorzystuje się stałą siatkę pomiarową, którą stanowią stacjonarne stacje meteorologiczne. Największe znaczenie mają jednakże metody mobilne, w szczególności te wykorzystujące wielowirnikowe latające roboty, powszechnie określane jako *drony*. Wykorzystanie robotów latających w celu automatycznego poszukiwania źródła zanieczyszczenia jest obecnie jednym z najbardziej popularnych tematów badawczych. Możliwość prowadzenia inspekcji z powietrza czy łatwa obsługa robota to istotne zalety tego rozwiązania. Jako że poszukiwane ekstrema środowiskowe mogą być transparentne czy toksyczne, to zadanie poszukiwania może być skomplikowane, a nawet niemożliwe innymi metodami.

1.1. Przegląd zastosowań inspekcyjnych robotów latających

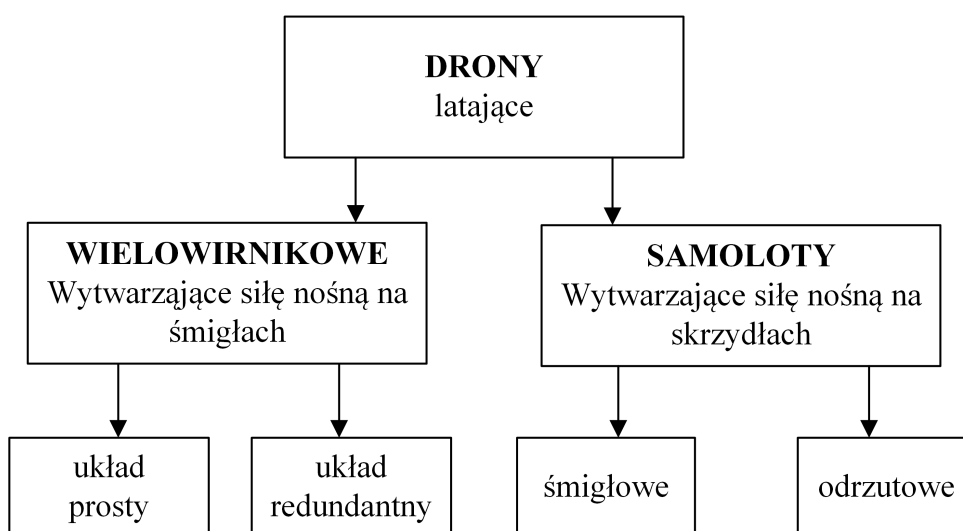
Badania dotyczące zastosowania robotów, a w szczególności dronów są obecnie jednym z najbardziej popularnych tematów badawczych. Samo słowo *dron* pochodzi od angielskiego określenia *drone*, oznaczającego trzmieła bądź trutnia. W języku potocznym zwykle określać się w ten sposób większość bezzałogowych statków powietrznych UAV (ang. *unmanned aerial vehicle*), mimo że wiele z nich nie spełnia wymogu pracy autonomicznej. W zależności od określonych cech, drony dzielą się na różne kategorie. Podział ze względu na środowisko poruszania się zaprezentowano na rysunku 1.1.



Rys. 1.1. Podział robotów ze względu na środowisko poruszania

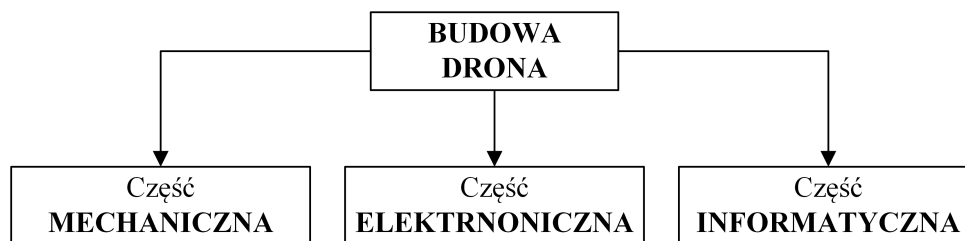
Drony zazwyczaj projektowane są do konkretnego środowiska, ale spotykane są również konstrukcje przystosowane do poruszania się w więcej niż jednym z nich. Roboty przeznaczone do poruszania się po powierzchni ziemi to przede wszystkim roboty kołowe [102, 103], gąsienicowe ale również i chodzące. Roboty przeznaczone do pracy w środowisku wodnym to roboty pływające i podwodne [74, 78], konstrukcyjnie przypominające łodzie lub zwierzęta wodne. Roboty latające, których dotyczyć będzie ten podrozdział można podzielić dalej w zależności od miejsca wytwarzania siły nośnej: na skrzydłach (płatach) lub na śmigłach

(Rys. 1.2). Dalej drony można podzielić w zależności od zastosowanego napędu, ten podział jest również zależny od liczby zastosowanych wirników. Do robotów wielowirnikowych należą wielopłaty, które posiadają więcej niż dwa silniki. Należy tutaj wskazać konfiguracje prostą i redundantną. W konfiguracji prostej na jedno ramię robota przypada jeden napęd, w redundantnej zaś dwa napędy: górny i dolny. Sterowanie takim robotem polega na zmianie prędkości obrotowej odpowiednich wirników. Do zalet tychże należy zaliczyć możliwości: pionowego startu oraz zawisu. Z kolei drony skrzydłowe mają możliwość kontynuacji lotu po awarii napędów oraz wymagają mniej energii do lotu, tym samym umożliwiają latanie na większych dystansach. Drony skrzydłowe w zależności od napędu można podzielić na: typ śmigłowy (napędzane przy pomocy śmigieł) i odrzutowy (wyposażone w silniki odrzutowe).



Rys. 1.2. Podział robotów latających

Zagadnienia budowy każdego typu robota można podzielić na (rys. 1.3) trzy zasadnicze części: część mechaniczną, elektroniczną i informatyczną (oprogramowanie). Najważniejszą z tych części, w przypadku dronów wielowirnikowych, jest część elektroniczna. Bez niej, robot nie jest w stanie sam utrzymać się w powietrzu, gdyż robot wielowirnikowy wymaga dedykowanego układu stabilizującego w przeciwieństwie do samolotu [7]. Część elektroniczna drona to przede wszystkim jednostka sterująca, określana również mianem kontrolera lotu [187]. Opisywane w literaturze kontrolery różnią się między sobą w sposób znaczący stopniem zaawansowania części elektronicznej oraz informatycznej. Najprostsze rozwiązania modelarskie wykorzystują popularną platformę Arduino [29]. Prowadzone były również eksperymenty nad minimalnymi wymaganiami co do mocy obliczeniowej jednostki sterującej [201]. Bardziej złożone rozwiązania wykorzystują 32-bitowe mikrokontrolery z rdzeniem ARM, takie jak kontroler Pixhawk (o otwartym oprogramowaniu) w różnych odmianach [111, 185] czy Raspberry Pi [193]. Kontroler o modułowej konstrukcji, wykorzystujący dedykowane czujniki wieloosiowych firmy Analog Instruments opisano w [73].

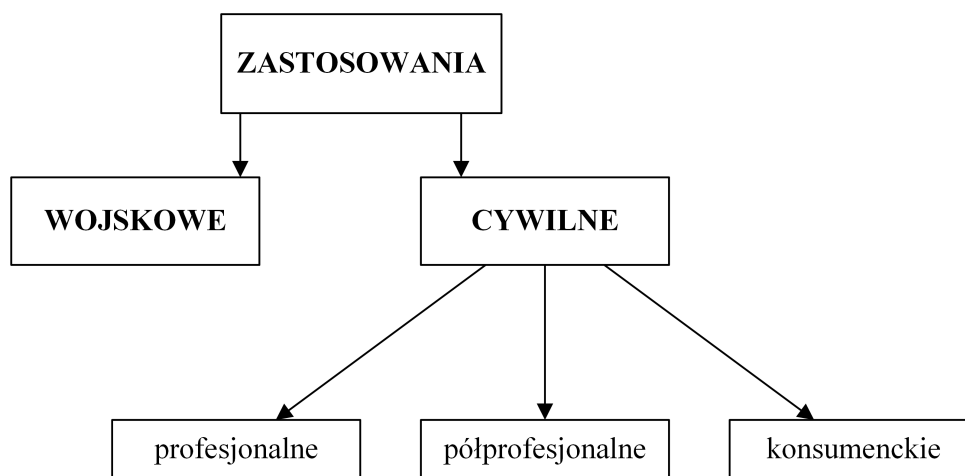


Rys. 1.3. Podstawowy podział części robotów latających

Oprócz części elektronicznej, w przypadku konstrukcji robota nie mniejszą rolę odgrywa część mechaniczna, czyli m.in. konstrukcja ramy. Sposób jej wykonania oraz odpowiednie materiały gwarantują odpowiednią wytrzymałość mechaniczną oraz przekładają się na ogólne osiągi robota, w tym czas lotu. Prace optymalizacyjne w tym kierunku są prowadzone [209]. Optymalizuje się również inne elementy konstrukcji, takie jak napędy [94]. Ostatnią część stanowi dedykowane oprogramowanie i algorytmy. Publikacje z tej kategorii dotyczą nie tylko opisu algorytmów sterowania robota [20], opisu dynamiki ruchu bezzałogowego statku powietrznego [109] czy użytkowych modeli matematycznych do celów sterowania [121]. Można postawić tezę, że do celów sterowania i utrzymania robota w powietrzu, poza regulatorami PID, implementowano wszystkie powszechnie znane rodzaje regulatorów. Jako przykłady można wskazać: regulatory nieliniowe [163], rozmyte [122, 60], adaptacyjne [205] czy predykcyjne [225]. Badania prowadzone są również nad odpowiednim przetwarzaniem danych pomiarowych z wielu czujników jednocześnie, m.in. w celu zwiększenia precyzji lądowania [86]. Konstrukcję robota 12-wirnikowego o wysokim stopniu zaawansowania opisano w [226]. W pracy przedstawiono kompletny model matematyczny dopuszczający możliwość pracy od 4 do 12 wirników, dla zmiennej długości ramion robota. Model następnie zweryfikowano i w tym przypadku zaproponowano regulatory PID do śledzenia zadanej trajektorii. Wirniki rozmieszczono w następujący sposób: 8 z góry na dłuższych ramionach, 4 z dołu na krótszych, ale nie w jednej osi. Taki układ stanowi bardziej korzystne rozwiązanie od układu Kamowa (stosowanego w robotach wielowirnikowych w konfiguracji redundantnej), gdzie na każdym z ramion znajduje się para przeciwbieżna dwóch silników (silnik pod silnikiem). Jest to związane z faktem, że w układzie Kamowa silnik dolny pcha powietrze już wstępnie przyspieszone przez silnik górny, osiągając tym samym niższy ciąg znamionowy przy tych samych obrotach.

Ze względu na konstrukcję mechaniczną wielowirnikowych robotów latających, cechują się one stosunkowo dużym poborem energii. Przekłada się to bezpośrednio na krótki czas lotu, który może ograniczać ich zastosowanie. Dlatego też, prowadzone są prace nad alternatywnymi źródłami zasilania robotów wielowirnikowych, o gęstości energii wyższej w stosunku do powszechnie stosowanych (elektrochemicznych) akumulatorów litowo-jonowych. Do takich źródeł, nieodwracalnych, należą ogniwa paliwowe [208], ponieważ obecnie źródła

odwracalne, takie jak baterie słoneczne mają zbyt małą sprawność. Duże nadzieje rokują proponowane techniki bezprzewodowego ładowania [134], które umożliwiłyby doładowywanie akumulatorów podczas lotu, zwiększając znacznie użyteczność robotów i wydłużyły by możliwą do pokonywania przez nich trasę. Optymalizację poboru energii robota latającego można również zrealizować poprzez ograniczające pobór mocy sterowanie [184], czy też optymalizację trasy przelotu [148, 83], tak aby robot przemieścił się po wszystkich zadanych punktach, pokonując najkrótszą trasę z uwzględnieniem przeszkód. W pracy [84] przedstawiono nowatorskie podejście, wykorzystując algorytmy uczenia maszynowego do stworzenia modelu zużycia energii dla robota latającego.



Rys. 1.4. Główne zastosowania robotów latających

Bezzałogowe roboty latające (UAV) pierwotnie znalazły zastosowanie w wojsku (Rys. 1.4). Armia wykorzystuje je do celów rozpoznawania taktycznego, niszczenia wrogich celów oraz również do celów transportowych. Robot wyposażony w kamerę termowizyjną, spektrometr może służyć do identyfikacji [112] i neutralizacji materiałów wybuchowych. Zastosowania konsumenckie obejmują wykorzystanie dronów głównie do celów modelarskich i hobbystycznych. W celach rozrywkowych organizowane są wyścigi robotów latających, gdzie uczestnicy ścigają się na ogół najmniejszymi robotami, z wykorzystaniem googli FPV. Do zastosowań robotów latających w celach półprofesjonalnych należy przede wszystkim fotografia lotnicza, gdzie dają one możliwość filmowania z powietrza. Robota latającego można również wykorzystać do celów transportowych. Transportować można przesyłki, artykuły medyczne [2], lub próbki materiałów biologicznych do laboratorium [106]. W tym ostatnim przypadku autorzy artykułu prezentują jak można przy pomocy odpowiednich manewrów przygotować (wymieszać) zawartość próbek już podczas transportu. Szerszy opis aktualnych możliwości robotów opisano w [234].

Zastosowania profesjonalne to: poszukiwanie, ratownictwo, kartografia i geodezja, rolnictwo precyzyjne czy inspekcja infrastruktury. Nierzadko zachodzi konieczność dokonania

ogłędzin, naprawy, konserwacji czy czyszczenia w trudnodostępnych miejscach. Do takich miejsc można zaliczyć duże wysokości i głębokości, długie, wąskie rurociągi, przestrzeń kosmiczną, miejsca zagrożone wybuchem, pożarem lub takie, gdzie obecne są trujące bądź łatwopalne gazy. Sama obecność człowieka w takim środowisku naraża go na duże niebezpieczeństwo, z utratą życia włącznie. Trudności mogą sprawiać nawet zbyt małe miejsca, gdzie nie mieści się dorosły człowiek. Takie właśnie obszary stanowią naturalne środowisko dla robotów inspekcyjnych. Istnieje wiele typów takich robotów, których konstrukcja i wyposażenie zależą od jego przeznaczenia. Do celów inspekcyjnych robot musi być ściśle dostosowany do swojego zadania, aby samą swoją obecnością nie zakłócał dokonywanych pomiarów. Obecnie, roboty latające znajdują zastosowanie w policji, straży granicznej, służbach ratownictwa i innych służbach mundurowych. Tam przede wszystkim służą do prowadzenia poszukiwań. Dzięki możliwości szybkiego dotarcia w trudno dostępne miejsca i zastosowania termowizji akcja może być prowadzona skuteczniej i taniej. Do innych zastosowań należy chociaż obserwacja i mierzenie natężenia ruchu drogowego. Kryteria doboru robotów latających do zadań inspekcji i transportu opisano w [118].

Roboty wielowirnikowe znalazły również szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłu. Do jednej z takich dziedzin należy budownictwo, gdzie wykorzystuje się je do kontrolowania różnego rodzaju prac w trakcie realizacji projektów budowlanych. Przy ich użyciu możliwa jest inspekcja z góry elementów trudno dostępnych budynku, takich jak dach czy komin bez konieczności montowania rusztowań. W artykule [202] wskazano że firma budowlana Skanska wykorzystuje roboty latające do wykonywania ortofotomap, pomiaru stanu zerowego i kontrolowania różnego rodzaju prac, w szczególności ziemnych. W pracy [232] opisano robota kołowo-wielowirnikowego przystosowanego do pracy na rurociągu. Jest to nowa aplikacja robotów wielowirnikowych do badań nieniszczących instalacji naftowych i gazowych. Wyprowadzono model matematyczny, zaproponowano regulator predykcyjny i zbadano stabilność zaprojektowanego systemu. Jak wskazują autorzy, aktualnie trwają prace nad implementacją praktyczną tego rozwiązania. Takie zastosowania robotów latających to m.in. wykorzystanie w geologii węglanowej, gdzie w pracy [140] autorzy przedstawiają możliwości, wyzwania i zastosowania robotów w mapowaniu geochemicznym. Inne interesujące zastosowania to: sieć bezzałogowych statków powietrznych przeznaczona do bezprzewodowej transmisji danych dalekiego zasięgu [222], czy budowa lokalnej sieci WiFi [182] gdzie autorzy wyznaczają maksymalną dopuszczalną odległość między sąsiednimi robotami dla zachowania zadanego czasu transportu pakietów sieciowych.

W rolnictwie roboty latające umożliwiły autonomiczne zbieranie danych o trzodzie i uprawach, wykrywanie pasożytów, monitorowanie plonów, prowadzenie oprysków, szybciej i skuteczniej niż byliby w stanie wykonać ludzie. Możliwa jest również obserwacja środowiska naturalnego w celu wykrywania: nielegalnego górnictwa, wycinki drzew, penetracji

i kłusownictwa na obszarach chronionych, oraz śledzenie zwierząt w celach ochrony przyrody. Inspekcja z góry terenów niebezpiecznych jest podstawowym przypadkiem, gdzie potrzebny jest wysoko specjalizowany robot latający. Roboty takie mogą być stosowane zarówno do inspekcji budynków grożących zawaleniem, jak i diagnostyki linii energetycznych [107], masztów radiowo-telewizyjnych, czy elektrowni wiatrowych.

Po wyposażeniu robota w odpowiednie czujniki i oprzyrządowanie można również prowadzić badania zanieczyszczenia środowiska [23], monitorować zjawiska pogodowe, czy zbierać ogólne dane meteorologiczne. Zainstalowany na robocie system wizyjny, termowizyjny i pomiaru zanieczyszczeń powietrza może służyć do inspekcji spalarni, huty lub oczyszczalni ścieków. W literaturze można natknąć się na wiele opisów takich konstrukcji, gdzie albo dostosowano dostępnego handlowo robota do celów monitorowania zanieczyszczeń powietrza [113], albo wykonano konstrukcję specjalnie do tych celów [1]. W pracy [115] zastosowano robota latającego do lokalizacji śmieci na zdjęciach zebranych przez bezzałogowy statek powietrzny na małej wysokości podczas autonomicznej misji patrolowej. Praca [1] zasługuje na szczególną uwagę, gdyż opisano w niej wykonany model dużego robota sześćo-wirnikowego (heksacoptera), zdolnego do wykonywania pomiarów na znacznych wysokościach. Natknąć się można również na opisy współpracy roju robotów [39] do celów monitorowania środowiska, zarówno latających jak i kołowych. W skład zanieczyszczeń, jakie można mierzyć przy pomocy robota latającego w pracy [28] wskazano : stężenie gazów tlenku węgla CO, tlenku azotu (IV) NO₂, ozonu O₃, tlenku siarki SO₂, a także zawieszonych w powietrzu cząstek stałych PM₁₀ i PM_{2,5} oraz ołowiu Pb. W literaturze pojawiają się również opisy samych systemów monitorowania, które można zamontować na robocie [28, 221]. W pracy [68] opisano system monitorowania zanieczyszczeń świetlnych przy pomocy robotów lub balonów powietrznych. W handlu dostępna jest sonda pomiarowa *Nosacz 2* firmy Flytronic S.A. [173]. Jest to sonda o niewielkiej masie (< 680 g) dedykowana do montażu na robotach wielowirnikowych firmy DJI, która może współpracować z robotem wielowirnikowym bądź samodzielnie. Współpracuje ona z dedykowaną stacją naziemną, z którą komunikuje się bezprzewodowo. Może zostać ona wyposażona w następujące czujniki: temperatury, wilgotności, pyłów zawieszonych (PM_{1,0}, PM_{2,5}, PM₁₀), lotnych związków organicznych (LZO), formaldehydu (HCHO), chlorowodoru (HCl), cyjanowodoru (HCN), tlenków azotu (NO_x), siarkowodoru (H₂S) oraz amoniaku (NH₃). Jak wskazuje firma, po wyposażeniu w nią robota wielowirnikowego, możliwe jest prowadzenie inspekcji i wykrywanie spalania nielegalnych paliw w paleniskach. Jednakże w tym przypadku inspekcja prowadzona jest przy bezpośrednim sterowaniu robotem przez operatora.

Należy wspomnieć również o zagrożeniach związanych z eksploatacją i wykorzystaniem robotów latających. Wraz z upływem czasu zaczęto coraz większą uwagę przykładąć do spraw bezpieczeństwa, poprzez implementację stosownych rozwiązań na poziomie elektroniki czy też stosowania odpowiednich algorytmów. Ma to na celu minimalizację zagrożenia

związanego z awarią robota latającego. Szczególne znaczenie ma to w przypadku współpracy dwóch lub większej liczby robotów [35]. Konieczna wtedy jest odpowiednia koordynacja obu maszyn, aby nie zderzyły się czy wpadły we własne strugi zaśmigłowe. Wobec rosnącej popularności robotów latających konieczne stało się również utworzenie odpowiednich regulacji prawnych mających ograniczenie ich użycia. Konieczność wprowadzenia tego typu ograniczeń związana była z nasilającym się ich wykorzystaniem do inwigilacji czy naruszania prywatności. Niemalże znaczenie miały również incydenty z udziałem robotów, które mogą spowodować zagrożenie w ruchu lądowym i lotniczym. W mediach można było usłyszeć o nieuprawnionych wtargnięciach na obszar lotniska czy zbliżeniu się do samolotu w powietrzu. Osoby mające zamiar wykorzystywać w pracy roboty latające zobowiązane są do uzyskania odpowiednich uprawnień. Roboty zaś powinny posiadać specjalny identyfikator umożliwiający ich bezprzewodowe rozpoznanie. Ponadto piloci zobowiązani są do wykupienia polisy ubezpieczeniowej od odpowiedzialności cywilnej (OC). Analizę ryzyka związanego z użytkowaniem popularnych robotów można znaleźć w [170, 65]. Aspekty prawne wykorzystania robotów do celów transportu powietrznego opisano w [206]. W związku z nasilającym się problemem terroryzmu wprowadza się odpowiednie regulacje prawne, jak np. w Zjednoczonych Emiratach Arabskich [153]. Użytkowanie, nawet zabawkowych, robotów wielowirnikowych w ostatnich latach przez osoby nieposiadające specjalistycznej wiedzy związanej z przestrzenią powietrzną spowodowało tylko dalsze spiętrzenie się zagrożeń. Stąd, powstała potrzeba opracowania skutecznych metod ich wykrywania robotów i zabezpieczenia przed nimi [168]. Analizę metod detekcji bezałogowych statków powietrznych zaprezentowano w [66]. Systemy takie działają na zasadzie detekcji obrazu i dźwięku generowanego przez robota podczas pracy. Inne rozwiązania polegają na zasadzie wykrywania sygnału sieci WiFi bądź sygnałów aparatury sterującej. W pracy [167] zaprezentowano system wizyjny do śledzenia robota przy pomocy obrotowej kamery. Do detekcji robotów można z powodzeniem wykorzystać również radar [71].

Sam fakt wykrycia robota w strzeżonej strefie jest na ogół niewystarczający, i konieczne jest podjęcie odpowiednich działań mających na celu usunięcie go. Najprostszy system można zrealizować z wykorzystaniem sieci WiFi [200] gdzie po wykryciu robota przesyłane są odpowiednie ramki zakłócające transmisję do operatora. W przypadku prostych systemów sterujących statku powoduje to automatyczne lądowanie, a bardziej zaawansowane jednostki przechodzą w tryb automatycznego wycofania się ze strzeżonej strefy. Przegląd profesjonalnych przenośnych systemów do przechwytywania robotów latających zaprezentowano w [127]. Systemy te obejmują albo specjalistyczne urządzenia do zakłócania (ang. *jammer*) w formie pistoletu z antenami kierunkowymi emitujące fale energetyczne o dużej energii. Fale te zakłócają komunikację bezprzewodową z operatorem, sygnał GPS, a w przypadku najprostszych robotów nawet pracę jednostki sterującej powodując destabilizację statku.

Użycie tego typu urządzeń możliwe jest nawet w przypadku obecności postronnych ludzi czy w sąsiedztwie budynków. Gdy takie obiekty nie są obecne możliwe jest wykorzystanie innych systemów, takich jak automatycznie naprowadzane działa laserowe lub specjalne naboje do strzelb miotających siatki w kierunku celu.

1.1.1. Wykorzystanie robotów latających do określenia stanu środowiska

W literaturze można wskazać wiele przykładów wykorzystania dronów do określenia i ochrony stanu środowiska, m.in. [214, 176, 30]. W pracy [114] przedstawiono konstrukcję zbudowaną z łatwo dostępnych w handlu komponentów, w tym kontroler lotu *Pixhawk* [111]. Dodatkowo zaprojektowano specjalne osłony na śmigła minimalizujące ryzyko uszkodzenia ich przy uderzeniu w przeszkodę. Wyznaczono również wstępne rozkłady pól prędkości i turbulencji w programie *SolidWorks* wokół robota dla trzech różnych przypadków zamontowania układu pomiarowego. W pracy jednakże nie przedstawiono samej jednostki do pomiaru zanieczyszczeń. W pracy [144] skupiono się zaś na zaprezentowaniu układu do pomiaru zanieczyszczeń gazowych. Wyposażono go w następujące czujniki półprzewodnikowe: metanu CH_4 , tlenku węgla CO , dwutlenku węgla CO_2 , czujnik reagujący na wiele gazów takich jak NH_3 , NO_x , alkohol, benzen oraz czujnik temperatury. Do zbierania danych pomiarowych z czujników wykorzystano popularną platformę Arduino. Dane rejestrowane są na karcie SD wraz z danymi telemetrycznymi pozyskanymi przez protokół *MAVlink* z kontrolera lotu oraz wyświetlane na ekranie podglądu video OSD (ang. *On Screen Display*). Jako robot wielowirnikowy do przenoszenia układu pomiarowego wykorzystano robot sześciowirnikowy. Zaznaczono że wykorzystanie takiego robota jest niezbędne ze względu na wymaganą odporność systemu na awarię dowolnego z silników. Bardziej zaawansowane badania zaprezentowano w [117]. Podobnie jak w wcześniej wymienionej pracy wykorzystano czujniki półprzewodnikowe do detekcji źródła tlenku węgla CO . Zaprezentowano dwa algorytmy pomiarów: dla źródeł punktowych (gdzie lokalizacja źródła jest znana) oraz dla nieznanego położenia. W pierwszym przypadku wykonywane jest 8 pomiarów wokół źródła zanieczyszczenia, w drugim zastosowano regularną 24-punktową siatkę pomiarową, dzieląc obszar na podobszary o powierzchni 1 m^2 . Wobec tego można stwierdzić że badany był stosunkowo mały obszar o wymiarach $6 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ gdzie maksymalnie zarejestrowano 24 wartości stężenia tlenku węgla CO . Pomiarów wykonywano poprzez ręczne przestawienie robota, na stałej wysokości 1 m (2D), utrzymując jego położenie w zadanym punkcie pomiarowym przez 10 s aby uśrednić pomiary i uwzględnić stosunkowo długi czas reakcji czujnika. W pracy uwzględniono wpływ wiatru, a zastosowany algorytm ten traktuje model dystrybucji gazu jako problem szacowania gęstości. Analiza danych była przeprowadzona

po wykonaniu wszystkich pomiarów, na ziemi. Posiadając już te dane, możliwe było ustalenie położenia źródła tlenku węgla dla przypadku gdzie jego położenie było nieznane oraz oszacowanie natężenia dla źródła o znanym położeniu, w którym to pomiar nie był bezpośrednio wykonywany. W pracy przedstawiono również bardziej zaawansowaną analizę położenia układu pomiarowego, ale rozważono tylko dwie wytypowane lokalizacje. Analizę przeprowadzono w module *CFD* programu *SolidWorks*. Wskazano również, że umieszczenie układu pomiarowego na wysięgniku może pogorszyć stabilność platformy pomiarowej.

Z wszystkich typów robotów mobilnych, to robot latający wprowadza największe ograniczenie w zakresie wymiarów i masy zamontowanego na nim układu pomiarowego. Stąd też na ogół wynika brak możliwości montażu czujników klasy laboratoryjnej i zazwyczaj wykorzystuje się niskokosztowe odpowiedniki. W pracy [96] zaprezentowano obszerny przegląd dotyczący zastosowania dronów i oprzyrządowania służącego do monitorowania zanieczyszczenia powietrza. Wynikająca z niskich kosztów szeroka dostępność i powszechność czujników dała możliwość nie tylko wykorzystania ich w robotach, ale i w urządzeniach IoT (ang. *Internet of Things*), jak przydomowe stacje meteorologiczne. Oprócz pomiarów: temperatury, opadów, prędkości i kierunku wiatru, można mierzyć również zanieczyszczenia powietrza. Spowodowało to powszechny wzrost świadomości publicznej w zakresie ogólnej jakości powietrza. Przegląd 50 nisko-kosztowych czujników zaprezentowano w [4]. Przy implementacji czujnika w systemie znaczenie ma zarówno: interfejs połączeniowy, wymagania w zakresie zasilania, wymiary i masa, a także sposób pomiaru. W zastosowaniach gdzie konieczne jest wykonanie dokładnych pomiarów konieczne jest jednakże wykonanie wstępnej kalibracji. W pracy [6] zaprezentowano przegląd dominujących metod i instrumentów do pomiaru cząstek stałych, takich jak m.in. metody grawimetryczne czy optyczne. W [125] zaprezentowano nowatorski algorytm kalibracji czujników. Opisano również wpływ warunków atmosferycznych takich jak wilgotność, temperatura i natężenie światła otoczenia na wyniki pomiarów. W tych i wielu innych badaniach wskazuje się w szczególności, że duża wilgotność ma wpływ na obniżenie dokładności pomiaru. W [190] wykonano badania terenowe z wykorzystaniem siatki wielu jednakowych czujników na terenie miejskim. W pracy [104] porównano dwa niskokosztowe czujniki, w pomieszczeniach zamkniętych. Najbardziej rozbudowane badania zaprezentowano w [34], gdzie analizowano własności pomiarowe 40 różnych niskokosztowych czujników. W wszystkich przypadkach dane porównano z pomiarami z przyrządów klasy laboratoryjnej. Na podstawie podanych prac możliwy jest dobór odpowiedniego czujnika do konstruowanego robota mobilnego.

Pomiary cząstek stałych przy wykorzystaniu robotów wielowirnikowych opisano m.in. w [47, 91, 124]. W [183] opracowano na bazie balonu/drona platformę do monitorowania zanieczyszczeń $PM_{2,5}$ na różnej wysokości i śledzenia dyfuzji zanieczyszczeń powietrza. W pracy [130] porównano wyniki pomiarów cząstek stałych i ozonu z wykorzystaniem

drona skrzydłowego i sterowca na dużych wysokościach (niskiej troposferze). Podobne badania, z wykorzystaniem wyłączenie drona skrzydłowego zaprezentowano w [131]. W [216] wyznaczono profil pionowy m.in. cząstek $PM_{2,5}$ czy ozonu O_3 na wysokościach do 140 m, w [143] zaprezentowano pomiary prowadzone w mieście w okresie dużego natężenia ruchu przy pomocy robota typu quadcopter. Pod robotem zamontowano prosty rejestrator oparty o platformę Arduino wyposażony w czujniki temperatury, wilgotności i sensor cząstek stałych. W [50] przedstawiono podobny prosty system również oparty o platformę Arduino, wykorzystano czujniki wilgotności, temperatury i PM. Zaprezentowano wykresy trójwymiarowe mierzonych wartości dla przykładowych lotów. W pracy [87] zaproponowano modułowy system, zaprezentowano przykładowe pomiary $PM_{2,5}$ i NO_2 . Celem pracy [5] było opracowanie metodologii monitorowania cząstek pyłu PM_{10} wytwarzanych w wyniku działalności wydobywczej. Przeprowadzono eksperyment aerodynamiczny, gdzie robot został umieszczony na słupie o wysokości 2,5 m, i wykonywano pomiary przy pomocy anemometru. Na podstawie pomiarów wygenerowano trójwymiarową mapę przepływu powietrza wokół robota. Na tej podstawie zdecydowano się umieścić wlot układu pomiarowego na wyniesionej platformie, około 50 cm ponad robotem. Przedstawiono również analizę optymalnego czasu zawisu. Zbyt krótki czas zawisu (i tym samym pomiaru) jest niepożądany, gdyż zwiększa błędy pomiarowe. Czas zbyt długi zaś redukuje liczbę możliwych punktów pomiarowych. W pracy [211] przedstawiono podobne badania, gdzie badany był opływ powietrza wokół robota typu heksacopter. Badania wykonano przy pomocy ręcznego anemometru, którego pozycja była śledzona przez system *VICON* (ang. *Vicon Motion System Ltd., Oxford, UK*). System ten umożliwia śledzenie i lokalizację położenia i orientacji obiektu w pomieszczeniu. Oprócz detektora cząstek stałych oceniono również wykorzystanie czujników gazów CO_2 , CO , NO_2 , NO do oceny możliwych osiągnięć opartego o robota latającego systemu pomiaru emisji z silnika wysokoprężnego. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono m.in., że najlepszym rozwiązaniem jest montaż czujników na wysięgniku w odległości ok. 1,0 m – 1,2 m od geometrycznego środka robota. Gdy robot znajduje się poza strugą (pod nią lub ponad nią), to mierzone stężenia zarówno gazów jak i cząstek stałych są mniejsze niż w przypadku gdy robot znajduje się wewnątrz. Śmigła powodują efekt rozrzedzania, co objawia się jako spadek stężenia gazu wskazywanego przez czujniki zamontowane bliżej środka robota. W przypadku kiedy jest wymagana odporność robota na silne podmuchy wiatru lub gdy trasa lotu szybko zmienia się w sposób nagły czy częsty, bardziej odpowiednie okazać się może rozmieszczenie czujników bliżej środka masy robota, mimo tego że błąd pomiaru będzie wtedy większy. Nie zajdzie wtedy sytuacja możliwego oderwania się lub zniszczenia układu pomiarowego. Może to dotyczyć przypadku kiedy robot podąża za szybko poruszającym się źródłem zanieczyszczeń.

W pracy [15] wykorzystano robot wielowirnikowy do pomiaru zanieczyszczeń powietrza podczas pożarów na dużym obszarze (powyżej 1000 ha). Podobne badania dotyczące

pomiarów stężeń bioaerozoli, czyli aerozoli pochodzenia biologicznego zaprezentowano w [108, 24]. W [180] oceniono przydatność dronów do obserwacji wulkanicznych, gdzie zaproponowano metodę pomiaru w warunkach terenowych prędkości wiatru, cząstek i gazów. W [142] zaprezentowano możliwość wykorzystania drona do automatycznego neutralizowania zanieczyszczeń CO i PM z wykorzystaniem chłonących arkuszy węgla aktywnego. W [31] opracowano oparty o robot typu quadcopter system do wysokiej rozdzielczości pomiarów pionowego rozkładu stężenia cząstek PM, czarnego węgla, ozonu, tlenków azotu (NO_x) i tlenku węgla oraz temperatury i wilgotności. Podobne rozwiązanie zaprezentowano w [46, 49, 14]. W pracy [126] oszacowano przestrzenny (trójwymiarowy) profil rozprzestrzeniania się zanieczyszczenia powietrza przy skrzyżowaniu w gęsto zaludnionym obszarze. Zastosowano metodologię współpracy stacjonarnych pomiarów, pomiarów z wykorzystaniem dronów i procesu modelowania rozproszenia atmosferycznego (model WRF-CFD). Wskazano, że porównywalność danych uzyskanych eksperymentalnie i tymi na drodze procesu modelowania gwarantuje możliwość identyfikacji obszarów o istotnie podwyższonym stężeniu (hotspotów). Jednakże, w procesie modelowania założono brak innych źródeł zanieczyszczenia poza tymi pochodzącymi z ruchu ulicznego. Podobne badania opisano w [123] gdzie wyznaczono pionowe profile cząstek stałych na ulicy otoczonej wysokimi budynkami (ang. *street canyon*). W pracy [53] zaprojektowano system do pomiaru zanieczyszczeń powietrza złożony z: kompatybilnego ze środowiskiem Arduino dedykowanego niskokosztowego układu pomiarowego oraz robota wielowirnikowego typu heksacopter. System jednakże obecnie wyposażony w możliwość pomiaru CO, NO_2 , temperatury i wilgotności. Z jego wykorzystaniem wykorzystaniem systemu przeprowadzono pomiary tychże zanieczyszczeń w warunkach miejskich, a następnie na podstawie zgromadzonych danych wygenerowano mapy zanieczyszczenia. Podobny niskokosztowy system, który może zostać wyposażony w maksymalnie 9 różnych czujników zaprezentowano w [171]. Dzięki temu urządzeniu można wykryć wiele szkodliwych związków chemicznych, takich jak amoniak, heksan, benzen, tlenek węgla i dwutlenek węgla, a także substancje palne, takie jak wodór i metan. Dodatkowo bardzo ważną funkcją jest możliwość wykonywania pomiarów pyłów zawieszonych $\text{PM}_{2,5}$ i PM_{10} . Praca [141] zaś miała na celu opracowanie ujednoczonego systemu czujników i komunikacji dalekiego zasięgu jako innowacyjnej platformy do pomiarów atmosferycznych z wykorzystaniem robota wielowirnikowego. W pracy [215] skupiono się na analizie i wyznaczeniu profilu pionowego rozkładu cząstek stałych. Robota sześciowirnikowego wyposażono w czujnik *AM510* $\text{PM}_{2,5}$. Pomiary wykonywano na wysokościach do 1000 m. Przedstawiono również wady i zalety różnych metod pomiarów cząstek stałych, takich jak : stacja naziemna, wieża meteorologiczna, balon na uwięzi, naziemny *LiDAR*, teledetekcje satelitarną oraz załogowe i bezzałogowe statki powietrzne. W przypadku bezzałogowego statku konieczne jest zastosowanie odpowiednich środków bezpieczeństwa, poprzez unikanie stref

przy lotniskach i zatłoczonych zbiorowisk ludzkich, a także unikanie prowadzenia pomiarów przy ekstremalnych warunkach pogodowych. Pomiary przeprowadzono dla kilku różnych godzin. Omówiono również wpływ temperatury i wilgotności na pionowy rozkład cząstek stałych. Zwrócono uwagę na problem zweryfikowania dokładności pomiarów wykonywanych przy pomocy robota latającego, dlatego też przeprowadzono pomiary porównawcze z balonem na uwięzi. Wskazano, że konieczna jest redukcja wpływu turbulentnego przepływu wokół robota poprzez odpowiednie zlokalizowanie wlotu układu pomiarowego.

Prace w kierunku analizy i opisu ruchu powietrza w okół robota to przede wszystkim [36], gdzie zaprezentowano mały komercyjny robot *Crazyflie 2.0* typu nano-quadrocopter o masie zaledwie 27 g. Zastosowanie takiego robota jest tym samym ograniczone do pomieszczeń zamkniętych i małych nateżeń wiatru. W pracy pokazano wizualizacje zjawisk aerodynamicznych wokół robota w tunelu aerodynamicznym. Praca [164] dotyczy zaś monitorowania upraw przy pomocy robota wielowirnikowego. W tym celu przeprowadzono zaawansowane badania w środowisku ANSYS robota komercyjnego *Phantom* firmy *DJI*. Zarówno bryła śmigła, jak i cały robot zostały zeskanowane przy pomocy skanera 3D. Do analizy zastosowano siatkę niestrukturalną. Na podstawie otrzymanych wyników, ustalono że dwa multispektralne czujniki wzrostu upraw powinny znaleźć się na końcach symetrycznego wysięgnika o długości 1.5 m. Analiza danych pomiarowych odbywa się na stacji naziemnej. W pracy [137] zaprezentowano numeryczny model do dynamicznej symulacji rozproszenia pod wpływem ruchu śmigieł. W pracy [186] wykorzystano dym do wizualizacji zjawisk aerodynamicznych wokół robota o czterech wirnikach (typu quadrocopter). W pracy [154] wykorzystano podejście polegające na umieszczeniu czujników na symetrycznym wysięgniku. Komercyjny robot i zbudowany przez autorów we własnym zakresie układ pomiarowy służą do wykonywania pomiarów elektrowni wiatrowych. Szczegółową analizę efektywności pomiarów cząstek stałych z wykorzystaniem dronów zaprezentowano w [90]. Wskazano że wpływ wirników robota na proces pomiaru ma niewielki wpływ na rozkład wielkości cząstek, ale silnie istotny na stężenie tychże. Na przykładzie cząstek $PM_{2.5}$, wykazano różnice w mierzonym stężeniu w zakresie od -70% do ponad 400% przy porównywaniu pomiarów przed i po włączeniu wirników. Wskazano również, iż zarówno sposób montażu czujnika jak i położenie wlotu układu pomiarowego są krytycznym aspektem pomiarów wykonywanych z wykorzystaniem dronów. Wskazano również wytyczne, że obszar bezpośrednio nad dronem wydaje się być optymalnym miejscem do zamontowania czujnika. W [172] zaś, wykonano badania zanieczyszczenia powietrza cząstek stałych $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$ i PM_{10} za pomocą tanich czujników zamontowanych na bezzałogowym statku powietrznym. Analiza obejmowała zmianę mierzonych wartości stężenia w zależności od wysokości lotu drona. Zastosowano metodę drzewa decyzyjnego, która pozwoliła na określenie optymalnej wysokości lotu drona pomiarowego w określonym obszarze. W artykule [92] podsumowano ogólnie kwestie

optymalnego umieszczenia układu pomiarowego, czyli wpływu wirników na rozpraszanie się mierzonego stężenia gazu oraz ogólne działanie czujników. Tak jak wspomniano wyżej, jak i w tym artykule wskazano że efekt ten był brany pod uwagę i prowadzono różne badania w celu wyznaczenia optymalnego położenia dla układu pomiarowego właśnie. Rozważono różne rozwiązania: pod wirnikami robota, na jego środku zarówno wyniesiony powyżej lub poniżej platformy, pomiędzy wirnikami lub na wysięgniku. Jak wskazują autorzy na podstawie prowadzonych w różnych pracach symulacjach *CFD*, wizualizacjach przy pomocy dymu, czy pomiarach ciśnień i przepływu przy wirnikach można wyciągnąć pewne wnioski, mimo sprzecznych wyników. Ogólny konsensus jest taki, że robot na układ pomiarowy ma wpływ negatywny : wyniki pomiarów stężenia gazów są zaniżane i zwiększa się ich niepewność. Najbardziej dokładne pomiary można uzyskać z czujnika umieszczonego poza obszarem zakłócanym przez wirniki, jednakże może powodować to problemy ze stabilnością platformy podczas lotu. Panaceum może być układ pomiarowy z pompą, gdzie wlot umieszczony byłby poza platformą, jednak zwiększa to również ciężar platformy. Dlatego też, najczęściej spotykaną w literaturze praktyką jest umieszczenie układu pomiarowego centralnie, wyniesionego nad robotem, tak jak uczyniono to i w tej pracy. Biorąc pod uwagę duży wzrost zainteresowania zastosowań i badań związanych z wykrywaniem gazu przy pomocy robotów latających, autorzy przewidują, że specjalnie zaprojektowane nowe czujniki przyniosą znaczące korzyści i będą ważnym obszarem dla przyszłych badań.

Metody zbierania danych dotyczących stężenia cząstek stałych można podzielić na metody stacjonarne (stacyczne), czyli takie gdzie występuje stała siatka pomiarowa (stacjonarne stacje meteorologiczne) lub mobilne, czyli wykorzystujące roboty. Pomiary, które wykonuje robot można wykorzystać na bieżąco, gdy robot wyposażony jest w odpowiednie czujniki, tak jak było to opisywane wyżej. Drugą opcją są takie konstrukcje robotów, gdzie robot nie jest wyposażony w analizator, tylko w układ poboru próbek powietrza. Powietrze pobierane jest do specjalnych zbiorników bądź worków, a analiza składu odbywa się na ziemi po powrocie robota. Przykładem takiej pracy może być [45, 44]. Układ poboru powietrza [45], dedykowany do ekstrakcji lotnych związków organicznych VOC (ang. *volatile organic compounds*), został przymocowany do teleskopowego wału aby wlot układu znajdował się poza silnym strumieniem powietrza pochodzącego od śmigieł. W tym przypadku zastosowano układ pomiarowy w postaci specjalnej (o średnicy igły) cienkiej rurki (ang. *needle trap sampler*). Wskazano że jest to lepsze rozwiązanie niż zbiornik powietrza ze stali nierdzewnej lub teflonowe worki. Wyniki zweryfikowano w kontrolowanych warunkach. Optymalna lokalizacja wlotu została wyznaczona przy pomocy oprogramowania *SolidWorks*. W pracy [59] przedstawiono przegląd dostępnych metod poboru próbek lotnych związków organicznych. Rozwiązania te eliminują problemy niskiej dokładności czujników umieszczanych bezpośrednio na robocie. Czujniki takie przede wszystkim ze względu na pożądane cechy niskiej masy własnej nie mają

własności pomiarowych podobnych do stacjonarnych urządzeń użytkowanych w laboratoriach. Jednakże w tym przypadku nie jest możliwe wykorzystywanie danych przez robota na bieżąco, i tym samym m.in. automatycznego prowadzenia poszukiwań źródeł maksymalnego stężenia zanieczyszczenia.

W pracy [10] zaprezentowano aktywny system *AirCore* zamontowany na robocie wielowirnikowym do prowadzenia pomiarów atmosferycznych frakcji molowych: CO₂, CH₄ i CO. W przeciwieństwie do koncepcji pasywnego próbkowania powietrza przy użyciu gradientu ciśnienia atmosferycznego podczas zniżania, aktywny system zasysa próbki powietrza atmosferycznego do rury przy pomocy pompy, co daje możliwość próbkowania przestrzennego powietrza. Układ pomiarowy o masie ok. 1,1 kg zawiera w sobie 50 m rurki o średnicy około 3 mm ze stali nierdzewnej, mikro-pompę oraz otwór wlotowy o średnicy 45 μm. Całość mieści się w obudowie ze włókna węglowego. System uzupełnia dodatkowo rejestrator lotu oparty o platformę Arduino który rejestruje inne dane meteorologiczne z: dwóch czujników ciśnienia, pięciu czujników temperatury, wilgotności względnej i położenie GPS. Układ został zaprojektowany na czas lotu wynoszący do 16 minut. Pewną wadą tego rozwiązania jest to, że rurkę pomiarową trzeba przed lotem przepłukać (napełnić) wcześniej gazem wypełniającym z domieszką ok. 10 ppm CO, który jednak potem pomaga zidentyfikować punkt początkowy pobierania próbek powietrza podczas późniejszej analizy. System pomiarowy (pompa) załączany jest ręcznie krótko przed startem i wyłączana po wylądowaniu. System ten zatem jest zupełnie niezależny od robota latającego. Podobna praca [3] to artykuł na temat testowania statków do pomiaru zanieczyszczeń. Zaprezentowano robota z systemem do poboru powietrza do worka i późniejszej analizy w laboratorium. System sterujący i pomiarowy robota również w tej pracy tu działają niezależnie. Wspomniano ogólnie o tym że możliwe jest też zbudowanie systemu na robocie który będzie służyć do wykonywania pomiarów bezpośrednio w powietrzu. W pracy [38] zaś zaprezentowano uniwersalny system (rejestrator) do montażu na robocie wielowirnikowym. Ma on postać zwartej skrzynki którą autorzy testowali zarówno z wykorzystaniem samolotu i robota sześciowirnikowego. W obu przypadkach układ zamontowano pod robotem. Układ mierzy wiele wartości w czasie rzeczywistym i rejestruje je na kartę SD. Co najważniejsze, w pracy przedstawiono analizę korelacyjną pomiędzy wszystkimi mierzonymi wartościami.

1.1.2. Zastosowania robotów latających wyposażonych w czujniki gazów

Specjalizowane roboty wyposażone w czujniki gazów wykorzystuje się do wielu celów [203, 9, 40], a wśród tych szczególnie istotnych należy wymienić inspekcję źródeł naturalnych, do których można zaliczyć cele monitorowania aktywności wulkanów, czy pomiary atmosferyczne. Wulkany stanowią naturalne źródło zarówno gazów reaktywnych (m.in. zawierających fluor czy siarkę) oraz pasywnych (m.in. dwutlenku węgla). Przykładami takich prac mogą być [191, 178]. W pracy [48] zaprezentowano regionalne pomiary atmosferyczne CO₂ w niskiej troposferze w Japonii (na wysokościach 500 m, 400 m, 300 m, 200 m, 100 m i 10 m nad ziemią).

Zastosowania takie jak detekcja awarii sieci rurociągów gazowych opisano w [69, 72, 232], wycieków oleju [116], gazów [186], czy metanu [223]. Okresowa inspekcja rurociągów jest niezbędna. Wykorzystanie robotów latających jest szczególnie atrakcyjne w sytuacjach, gdzie prowadzi się inspekcję trudno dostępnych części rurociągów, oraz tam gdzie montaż stałej sieci detektorów gazów jest niepraktyczny lub nieopłacalny. Prowadzenie inspekcji po znanej trasie przebiegu sieci rur może być łatwo zautomatyzowane. Wytypowanie miejsc podwyższonego stężenia gazu możliwe jest zarówno podczas misji lub po powrocie robota do stacji bazowej. Prowadzenie inspekcji w ten sposób nie wymaga obecności personelu w miejscach niebezpiecznych, w których to mogą występować bezbarwne, bezwonne szkodliwe gazy niewyczuwalne przez człowieka.

Detekcję gazów powstałych podczas spalania materiałów niebezpiecznych opisano w [76]. Takie gazy powstają podczas pożarów, w tym nawet podziemnych pożarów złóż węgla [61]. Robot może zostać wykorzystany jako pomoc w właściwym rozpoznaniu sytuacji podczas akcji gaszenia pożaru przez zastępy straży pożarnej. Szybka lokalizacja z powietrza, może przyspieszyć odizolowanie i zatrzymanie źródła wycieku, co przekłada się na oszczędność czasu, kosztów, strat materialnych i redukuje ryzyko obrażenia ludzi (załogi).

Kolejnym istotnym punktem jest inspekcja przemysłowych źródeł zanieczyszczeń powietrza (kominów) [116], takich jak m.in. platformy wiertnicze, rafinerie ropy naftowej/gazu, zakłady produkcji chemicznej czy elektrownie jądrowe. Wykrywanie i śledzenie ruchu cząstek w powietrzu, czyli dynamiczne monitorowanie zachowania się chmury umożliwi dalsze szacowanie i prognozowanie poziomu zagrożenia, składu i dalszego rozprzestrzeniania się. Do kominów można zastosować bezkontaktową inspekcję wizyjną [105], dzięki czemu możliwe jest wykrycie pęknięć bez konieczności wysyłania wykwalifikowanego personelu do prac na wysokościach. Wysokie koszty takiej manualnej inspekcji i związane z nią duże ryzyko jest stałym czynnikiem napędowym do poszukiwania alternatywnych metod. Autorzy pracy [207] zaprezentowali wykorzystanie robota do ultradźwiękowego pomiaru

grubości powłok powierzchni metalowych i korozji elementów (jak na przykład zbiorników środków chemicznych, kominów) różnych zakładów przemysłowych. Dzięki temu, możliwe staje się prowadzenie inspekcji kontaktowej z wykorzystaniem specjalnego wysięgnika, w tym w miejscach niedostępnych tradycyjnymi metodami. W tym momencie, do obsługi potrzebnych jest dwóch operatorów: jeden operuje robotem, drugi z nich wysięgnikiem. Wysięgnik może służyć do inspekcji powierzchni pod dowolnym kątem. W czasie przeprowadzania badania, po uzyskaniu fizycznego kontaktu z badaną powierzchnią robot ma możliwość kompensacji podmuchów wiatru i drgań na podstawie czujników nacisku zamontowanych w głowicy inspekcyjnej. Składany, dedykowany wysięgnik o niewielkiej masie opisano również w [119]. Do celów z tej kategorii można też włączyć inspekcję emisji cząstek stałych PM i CO₂ przez statek na morzu [212]. Badania te miały na celu wyznaczenie stosunku liczby emitowanych cząstek na jednostkę paliwa.

Finalnie inspekcję niskiej emisji, czyli gospodarstw domowych, opisano m.in. w [213]. Roboty tego typu znajdują się już na wyposażeniu straży miejskiej [8]. Wspierają one służby w zakresie prowadzonych kontroli dotyczących przestrzegania zakazu spalania odpadów, trawy, wypalania traw i łąk. Dzięki zastosowaniu robota możliwe jest zawężenie obszaru poszukiwań i wskazanie źródła szkodliwych zanieczyszczeń. W związku z tym że robot porusza się ponad budynkami w publicznej przestrzeni powietrznej nie jest wymagane uzyskanie zgody od właściciela budynku do przeprowadzenia kontroli. Ponadto możliwe jest wykonywanie pomiarów w godzinach nocnych, kiedy służby nie mogą wejść do domu. Jak wskazano na stronie internetowej, na podstawie czujników w które wyposażono robota możliwe jest odróżnienie czy spalany jest należytej jakości węgiel w piecu co najmniej III klasy czy też spalane są produkty z PCV np. wykładziny, tworzywa sztuczne PET, słabej jakości węgiel, mokre drewno albo też spalanie przebiega w piecu starej generacji (poniżej III klasy).

1.2. Przegląd metod modelowania i poszukiwania źródeł zanieczyszczeń powietrza

1.2.1. Modelowanie zjawiska rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń

W celu przeprowadzenia badań symulacyjnych algorytmów poszukiwania źródeł zanieczyszczenia (ang. *mobile robot olfaction*), niezbędny jest opis matematyczny (model) zjawiska rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w powietrzu. Opisanie pola takiego rozkładu nie jest zadaniem trywialnym. Jest to związane z faktem że na sposób rozchodzenia się strugi zanieczyszczenia ma wpływ wiele stałe zmiennych czynników pogodowych, przede wszystkim kierunek i natężenie wiatru. W przypadku gazów istotne znaczenie ma również ich gęstość (w stosunku do atmosfery), w przypadku cząstek stałych frakcja. Nie mniejsze znaczenie ma również źródło zanieczyszczeń, czyli to czy spalanie odbywa się poza budynkiem, czy w budynku, gdzie trzeba uwzględnić położenie i kształt komina. W literaturze zostały opisane bardzo różne podejścia co do sposobu opisanie tychże zjawisk. W pracy [132] zaprezentowano trywialny model analityczny uśrednionej w czasie rozpraszania się gazu z źródła punktowego umieszczonego na podłodze. Jako że jest to praca sprzed 15 lat, to wskazano że numeryczne symulacje rozchodzenia się gazu są niepraktyczne ze względu na zbyt dużą złożoność obliczeniową. Taki model może stanowić punkt wyjścia do wstępnych badań, ale zastosowana argumentacja obecnie traci na znaczeniu. W pracach [219, 218] zastosowano podobnie bardzo prosty model matematyczny wykorzystujący równanie dyfuzji w przestrzeni 2D. Model ten można opisać przy pomocy liniowego parabolicznego równania różniczkowego cząstkowego, i przyjęto taki model w związku z zastosowaniem robotów jeżdżących. Praca ta dotyczyła również równoczesnego zastosowania wielu robotów w celu szybszego zlokalizowania źródła zanieczyszczenia.

W pracy [26] wskazano, że zbudowanie modelu rozprzestrzeniania się gazu nie jest zadaniem trywialnym, gdyż w wielu realistycznych sytuacjach gaz jest rozpraszany w sposób turbulentny. Dlatego też celem pracy było stworzenie rozkładu uśrednionego. Zbudowano model statystyczny na podstawie rzadkiej siatki pomiarowej, traktując odczyty z czujnika gazu jako wartości losowe. Po założeniu ustalonego (statycznego) wypływu gazu, oraz wykonując dostateczną liczbę pomiarów stwierdzono, że reprezentacja taka zapewnia wiarygodną reprezentację. Metoda została zweryfikowana przy użyciu rzeczywistych danych pomiarowych i pomimo obecności zakłóceń, uzyskana mapa prawidłowo odzwierciedla maksymalną wartość stężenia oraz przybliżoną lokalizację źródła. Jednakże badania przeprowadzono z wykorzystaniem robota jeżdżącego w pomieszczeniu zamkniętym, gdzie nie występowały silne podmuchy wiatru. Model Gaussowski do opisu rozchodzenia się zanieczyszczenia gazowego opisano w pracach [217, 92, 88]. We wszystkich tych pozycjach podano również

postać analityczną funkcji opisującej stężenie zanieczyszczenia dla określonego punktu w przestrzeni. W pracy [88] wykorzystano model 2D, gdyż analiza była prowadzona dla stałej wysokości zawisu robota latającego. W pracach [217, 92] wykorzystano model 3D, przy czym w pracy [92] opisano również izotropowy (IP) i porównano go z Gaussowskim. Model izotropowy zakłada izotropową dyfuzję ze źródła zanieczyszczenia. W pracy [217] wskazano że model Gaussowski ma pewne zalety w stosunku do bardziej złożonych podejść, gdyż wymaga tylko kilku parametrów wejściowych i możliwe jest go stosowanie w przypadkach gdzie konieczne jest szybkie obliczanie modelu. Jednakże zaznaczono że model taki jest wiarygodny dla pola bliskiego.

Zasadniczo odmiennym podejściem jest przede wszystkim praca [12], gdzie zaprezentowano wykorzystanie modelu dyspersji w środowisku *OpenFOAM* [165]. Praca uwzględnia dynamiczne pomiary zanieczyszczenia (model dynamiczny z uwzględnieniem czasu). W pracy [189] zaprezentowano zaawansowany model (ang. *sparse Gaussian process mixture model*), który pozwala łatwo reprezentować obszary dużego stężenia przy niskim poziomie stężenia tła (otoczenia). Model został przetestowany przy wykorzystaniu danych zebranych przez robota mobilnego z czujnikiem gazu i anemometrem. Tworzenie mapy zanieczyszczeń powietrza można zrealizować albo polegając na modelu, albo wykorzystując podejście statystyczne (bez modelu). Przykładem pracy z tej drugiej kategorii jest [133]. W pracy zaprezentowano algorytm taktujący modelowanie dyspersji jako problem szacowania gęstości, z wykorzystaniem którego uzyskano zgodność otrzymanych map z rzeczywistym rozkładem pola zanieczyszczeń. Praca [77] zaś dotyczy koordynacji wielu robotów wielowirnikowych do poszukiwania źródła zanieczyszczenia. Zarówno zachowanie się pola jak i zespołu robotów wykorzystano model w postaci cząstkowych równań różniczkowych. Do zanieczyszczenia wykorzystano równania adwekcji. Podobnie, w [75] wykorzystano równania adwekcji-dyfuzji (w 3D) do opisu średniego zanieczyszczenia w przestrzeni trójwymiarowej. W [62] przeprowadzono badania symulacyjne wpływu przeszkód terenowych na działanie algorytmu poszukiwania źródła. Przeprowadzono analizę dla szkółki leśnej, gdzie drzewa rozmieszczone są na siatce. Analizę przeprowadzono dla różnych rozstaw drzew. Wskazano, że gęsta zabudowa w znaczącym stopniu pogarsza osiągi algorytmu poszukiwania zanieczyszczenia.

Jako nowoczesne podejście w zakresie modelowania rozkładu pól zanieczyszczenia można wskazać pracę [150], gdzie zaprezentowano symulator *GADEN*. Został on przygotowany w języku C++ i zaimplementowany w środowisku ROS (ang. *Robot Operating System*) [54, 235]. Jest to środowisko, które umożliwia również zaimplementowanie w nim innych algorytmów, w szczególności tych dotyczących poszukiwania źródła zanieczyszczenia. W ROS'ie możliwe jest zasymulowanie działania czujników MOX (ang. *Metal Oxide Semiconductors*), detektorów fotojonizacyjnych czy anemometrów. Działanie modelu oparte

jest o założenia mechaniki płynów *CFD*. Modelowany jest przepływ powietrza i emisja zanieczyszczeń w przestrzeni 3D. Do symulatora można wczytać dowolną geometrię z modelu CAD, co jak wskazują autorzy jest dużą zaletą, gdyż inne prace pozwalają jedynie na przyjęcie przeszkód o uproszczonej geometrii. Symulator również uwzględnia możliwość występowania więcej niż jednego źródła gazu. Do przeprowadzenia oceny ilościowej i jakościowej symulatora, wykorzystano tunel aerodynamiczny w którym umieszczono szereg czujników MOX. Równolegle zbudowano model CAD przygotowanego tunelu i przeprowadzono badania porównawcze dla różnych warunków przepływu. Dla niskich wartości natężenia przepływu występuje duża zgodność wyników, dla przepływu turbulentnego zaś rozbieżności są większe. Związane jest to ze stochastycznym charakterem turbulencji, który nie został uwzględniony na bieżącym etapie prac. Kolejne planowane prace mają również dotyczyć rozbudowania modelu o zaburzenia rozkładu gazu które powodowane jest przez obecność i poruszanie się samego robota.

W pracy [129] weryfikowano wpływ regionalnych warunków wiatrowych na rozpraszanie się cząstek stałych ($PM_{2,5}$) emitowanych przez ruch drogowy na obszarze miejskim. Tworzenie odpowiednich kanałów wentylacyjnych w mieście, umożliwiających rozpraszanie się zanieczyszczeń jest ważnym aspektem planowania i projektowania urbanistycznego oraz zarządzania miastem. Aby wyznaczyć omawiany wpływ, przeprowadzono zarówno badania numeryczne w środowisku *ANSYS* jak i terenowe przy wykorzystaniu robota latającego. Badania terenowe przeprowadzone na terenie akademików lokalnego uniwersytetu umożliwiły wyznaczenie trójwymiarowego rozkładu pola cząstek stałych. Badania przeprowadzono przy różnych prędkościach wiatru. Wielowirnikowy robot latający został wyposażony w czujniki: ozonu, temperatury i wilgotności względnej, cząstek stałych $PM_{2,5}$ oraz sadzy atmosferycznej. Ze względu na to że analizator $PM_{2,5}$ wyposażony jest w układ poboru powietrza z wentylatorem, należało sprawdzić wpływ robota (wpływ pracujących śmigieł) na układ pomiarowy i dokonać kalibracji. Ta część pracy została wykonana w tunelu aerodynamicznym w którym umieszczono wlot układu pomiarowego „z wiatrem” i „pod wiatr” i zadawano różne natężenia do 14 ms^{-1} . W związku z tym wlot rurki układu pomiaru zanieczyszczeń powietrza na robocie umieszczono 15 cm ponad robotem, gdzie jak wskazano przepływ jest ustalony. Całość badań wykonano na wężykowej trajektorii: horyzontalnie na obszarze zawierającym się na terenie akademików $290 \text{ m} \times 470 \text{ m}$, a wertykalnie w trzech punktach na wysokościach do 120 m. Rozchodzenie się cząstek stałych $PM_{2,5}$ wewnątrz budynków analizowano w pracy [139]. Analizę przeprowadzono w pakiecie *ANSYS*, dla pomieszczenia o wymiarach $6 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, dla różnych prędkości powietrza. Wskazano że sposób działania wentylacji w pomieszczeniu bezpośrednio wpływa na rozkład cząstek stałych.

1.2.2. Metody poszukiwania źródeł zanieczyszczeń

Dotychczas opublikowano wiele prac dotyczących zastosowania robotów wielowirnikowych do zadania mapowania czy poszukiwania gazowego źródła zanieczyszczenia. W pracy [136] wskazano że w literaturze dominują cztery metody poszukiwania zanieczyszczeń *RAO* (ang. *robot active olfaction*). Są to: metody biologiczne (polegające na naśladowaniu zwierząt), metody oparte o dynamikę płynów, metody statystyczne, oraz metody wykorzystujące wiele robotów. W pracy [192] wykonano szereg pomiarów różnych gazów, takich jak: CO, CO₂, NO, NO₂, O₂, O₃. Zaprezentowano metody interpolowania dyskretnych pomiarów do postaci mapy zanieczyszczenia. Na podstawie otrzymanych wyników autorzy są w stanie określić zmianę rozkładu pola zanieczyszczenia w czasie. Ponadto, można sprawdzić czy na określonym terenie nie są wykorzystywane do celów ogrzewania niedozwolone substancje (na przykład odpady). W pracy [19] zaprezentowano przegląd metod poszukiwania, które mogą być zastosowane do różnych substancji (w tym gazu), czy wycieków na morzu. Mapowanie zanieczyszczenia parami alkoholu opisano w [41]. Do badań wykorzystano mikro-robota z czujnikiem alkoholu. Jednakże ze względu na małe wymiary, robot ten nie nadaje się do pracy poza pomieszczeniami zamkniętymi. W wymienionych pracach stosowano po jednym czujniku każdego rodzaju. Pojawia się wtedy wątpliwość związana z właściwą lokalizacją czujnika tak, aby z jednej strony mierzone gazy docierały do niego odpowiednio szybko, z drugiej strony zaś aby punkt poboru próbki znajdował się możliwie daleko od zakłóconego przez robota pola przepływu powietrza. Prace, gdzie zamontowano kilka czujników na jednym robocie (tzn. gdzie celem było wykorzystanie gradientu lokalnego) to [136, 204]. W pracy [204] na robocie typu quadcopter zostały zamontowane cztery pary czujników (pod każdym ze śmigieł). Dla wskazanych przypadków było możliwe rozpoznanie kierunku z jakiego niesione jest zanieczyszczenie. Praca jednakże nie prezentuje żadnego algorytmu śledzenia zanieczyszczenia z takim zestawem czujników. W pracy [136] zastosowano trzy czujniki, gdyż jak słusznie zauważono, robot w istotny sposób wprowadza zakłócenia naturalnego pola przepływu do środowiska gdzie emitowane jest zanieczyszczenie. Wskazano, że jeden czujnik może nie wystarczyć, gdyż co poparto rysunkami zanieczyszczenie może w niekorzystnym przypadku zostać rozproszone tak, że czujnik nie wykryje go. Ponadto, zwrócono uwagę na to że estymacja kierunku i prędkości wiatru jest możliwa na podstawie ruchów robota, ale jest mało dokładna. Zaznaczono że nie można opierać się tylko na estymacji kierunku wiatru ale konieczne też na czujnikach zamontowanych na robocie. Ze względu na złożoność obliczeniową, obliczenia prowadzone są na komputerze naziemnym. Jest to niewątpliwie pewna słabość tej pracy. Jednakże autorzy wspominają że możliwa jest implementacja algorytmów

sterowania bezpośrednio na robocie wielowirnikowym po wyposażeniu go w np. moduł Nvidia Jetson lub FPGA. Zaimplementowany algorytm wykorzystuje transformatę falkową.

W pracy [228] zaprezentowano robota i algorytmy sterowania do poszukiwania źródła CO₂ w tunelu. Do lokalizacji i sterowania go w środowisku bez zasięgu GPS wykorzystano pięć czujników ultradźwiękowych, w celu utworzenia możliwości podążania za ścianami w przestrzeni trójwymiarowej. Ponadto, zastosowano osiem czujników CO₂ wykorzystujących zjawisko absorpcji światła podczerwonego (podczerwieni). Czujniki zamontowano parami na czterech wysięgnikach. Algorytm lokalizacji źródła gazu podzielono na trzy etapy wykrycia strugi, podążania w strudze oraz określenie źródła zanieczyszczenia. Najpierw stosowany jest algorytm detekcji strugi, co zrealizowano przy pomocy trajektorii zygzakowej. Następnie, po jej znalezieniu, robot porusza się w strudze na zasadzie opartego o gradient podążania za stężeniem gazu. Na podstawie pomiarów z wszystkich czujników obliczany jest trójwymiarowy wektor stężenia (stężenia z czujników są w odpowiedni sposób sumowane). W przypadku ostatniej fazy (określenia źródła) wskazano że odbywa się to na podobnej zasadzie jak w pierwszej fazie, czyli przekroczenia pewnego poziomu progowego. W pracy połączono dwa algorytmy: nawigacji i poszukiwania źródła zanieczyszczenia. Jak wskazują autorzy, konieczne jest dalsze zbadanie praktyczności zaproponowanego rozwiązania.

Jeśli chodzi o podejścia z kategorii biologicznych, to należy wskazać pracę [21]. Do zadania mapowania zaproponowano zastosowanie trzech typów robotów: jeżdżących przystosowanych do poruszania się wewnątrz i na zewnątrz budynków oraz robota latającego (na zewnątrz). W pracy [157] zaprezentowano przykład wykorzystania robota latającego do mapowania zanieczyszczeń gazowych. Przedstawiono sposób estymacji kierunku i prędkości wiatru przy pomocy tylko jednostki inercjalnej robota. Inne podobne prace to [162, 128]. W pracy [120] mały robot poszukiwał źródła gazowego (oparów etanolu) w pomieszczeniu. Robot poruszał się na stałej wysokości 1,2 m na terenie o wymiarach 7 m × 12 m. W pracy [159] wykorzystano jednego robota. Algorytm poszukiwania źródła zanieczyszczenia podzielony jest na kilka faz: poszukiwanie strugi, śledzenie strugi oraz identyfikację źródła. Do poszukiwania strugi wskazano dwie strategie: bierną, czyli zawis robota w przestrzeni i oczekiwanie na wykrycie stężenia ponad progiem lub aktywną, czyli losowe przemieszczanie się robota po przestrzeni. Podczas fazy śledzenia strugi robot przemieszcza się pod wiatr w kierunku źródła zanieczyszczenia. Artykuł ten uwzględnia obecność jednego źródła zanieczyszczenia. Skupiono się na trzech algorytmach śledzenia:

1. Metoda gwałtownych ruchów/skoków w kierunku źródła (ang. *surge-cast algorithm*), gdzie robot porusza się w kierunku źródła tak długo, aż poziom zanieczyszczenia spadnie poniżej wartości progowej. Następnie robot przemieszcza się w kierunkach poprzecznych do czasu ponownego znalezienia strugi. Metoda ta naśladuje ruchy ćmy.

2. Metoda zygzakowa, gdzie robot porusza się po linii prostej do czasu utraty kontaktu ze strugą. Wtedy robot zmienia trajektorię o zadany kąt α , i ponownie porusza się do przodu. Wypadkowa trajektoria ma kształt zygzaka.
3. Autorska metoda pseudo-gradientowa, gdzie robot porusza się w kierunku źródła na podstawie zmiany gradientu. Pomiar stężenia zanieczyszczenia oraz wiatru za każdym razem wykonywany jest w dwóch miejscach, i na tej podstawie wyznaczany jest nowy kierunek ruchu.

Przechodząc do kolejnej kategorii metod poszukiwania źródeł zanieczyszczenia, to w pracy [175] do tego celu wykorzystano sieć neuronową. Sieć została nauczona na podstawie narzędzia do symulacji dyspersji atmosferycznej. Służy ona do lokalizacji źródła emisji i jego ilościowego określenia z potencjalnych kandydatów. Algorytm wymaga wskazania położenia kandydatów (źródeł zanieczyszczenia). Autorzy wskazują że podejście to nie wymaga trudnych do uzyskania danych meteorologicznych. Przeprowadzono symulacje numeryczne dla różnych warunków, aby sprawdzić dokładność i stabilność proponowanego rozwiązania. W przeprowadzonym eksperymencie terenowym poszukiwanym gazem był SO_2 . W pracy założono obecność tylko jednego aktywnego źródła zanieczyszczenia. W pracy [25] wykorzystano podejście polegające na budowaniu mapy. Wykorzystano algorytm *3D Kernel DM* (ang. *kernel extrapolation distribution mapping*) zaimplementowany na komputerze pokładowym robota. Mapa zanieczyszczenia jest aktualizowana w czasie rzeczywistym, gdy robot porusza się po ustalonej trasie. Źródłem zanieczyszczeń były specjalne palone cegły, a do eksperymentu wykorzystano czujnik silnie reagujący na tlenek węgla i etanol. Robot poruszał się po stałej trajektorii przeszukania na regularnej siatce punktów, na obszarze $10 \text{ m} \times 16 \text{ m}$. W pracy [13] zaprezentowano algorytm aktywnej lokalizacji wycieku gazu. Wykorzystano podejście oparte na modelu, dzięki czemu możliwe jest wykonanie niewielkiej liczby pomiarów. Lokalizacja źródła zanieczyszczenia odbywa się na zasadzie minimalizacji rozbieżności pomiędzy zmierzonymi wartościami, a tymi przewidywanymi na podstawie działania symulatora. Zaprezentowano dwa podejścia: offline i online. W podejściu offline, robot mierzył stężenie gazu CO_2 w 16 punktach na terenie o wymiarach $80 \text{ m} \times 45 \text{ m}$ na stałej wysokości 4 m. Poszukiwanym źródłem była umieszczona w dowolnym miejscu na wyznaczonym terenie butla z gazem. Następnie na podstawie zgromadzonych pomiarów stężenia, kierunku i prędkości wiatru wyznaczono mapy przy pomocy trzech metod, w tym autorskiej. W części online, robot poruszał się po obszarze $40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$, gdzie teren podzielono na elementy o powierzchni 4 m^2 . W tej części każde mierzone kolejno położenie było wyznaczane na podstawie procedury optymalizacyjnej, na miejsce które w danym kroku algorytmu ma największe prawdopodobieństwo obecności źródła zanieczyszczenia. Ten krok

był powtarzany dopóki, dopóty procedura wskazywała jako nowe położenie to samo położenie w którym robot obecnie się znajduje.

W niektórych opracowaniach w literaturze zamiast klasycznego czujnika, wykorzystano spektrometr [158]. W pracach [156, 160], przygotowano mapy na podstawie pomiarów przy pomocy spektrometru. Jednakże ponieważ wykorzystany sensor nie zwraca informacji o odległości, konieczne jest wykorzystanie również dalmierza laserowego. Autorzy przedstawili praktyczną implementację tego zastosowania dla warunków polowych. Do wygenerowania mapy 2D zanieczyszczenia wykorzystywany jest algorytm tomograficznej rekonstrukcji. Problem rozchodzenia się zanieczyszczenia gazowego w tej metodzie traktowany jest jako problem optymalizacyjny. W pracy [179] opisano projekt i implementację szerokopasmowego spektrometru na robocie sześciowirnikowym. Spektrometr wykorzystuje światło podczerwone i umożliwia uzyskanie widma oscylacyjno-rotacyjnego. Wykorzystanie spektrometru niesie za sobą wiele zalet, z których jedną z istotniejszych jest krótki czas reakcji. Jednakże ten kierunek nie był dotąd badany ze względu na dużą komplikację spektrometru tak, aby miał on stosunkowo niskie wymiary i masę oraz był odporny na przyspieszenia i wibracje. W przypadku powszechnie stosowanych czujników półprzewodnikowych jak wskazano jest to czas do nawet około 20 s. Czujniki te cechują się również niską selektywnością (typowe czujniki reagują na kilka gazów) pomimo ich zalet związanych z niewielkimi wymiarami i masą. Gazami, które wykorzystano do przeprowadzenia badań terenowych były dwutlenek węgla CO_2 oraz propan C_3H_8 . Robot poszukiwał źródła gazu na terenie 720 m^2 na wysokości 4 m, poruszając się na trajektorii wężykowej. Dane z spektrometrów były próbkowane podczas lotu w odstępach czasowych wynoszących 0,7 s. Jak wskazują autorzy, przeprowadzona interpolacja *Bayesa* uzyskanych w punktach pomiarowych umożliwia lokalizację źródła gazu z dokładnością około 1 m oraz uzyskanie mapy rozkładu wraz z oszacowaniem niepewności pomiarowej. Wykorzystanie szybszych czujników, o krótszym czasie reakcji daje możliwość zbadania większego obszaru przez robota. Jest to związane z tym, że wymagany jest krótszy czas zawisu w danym punkcie. Nieco inne podejście opisano w [230] i [231]. Został tam przedstawiony algorytm poszukiwania źródła zanieczyszczenia, sprawdzony na robocie typu quadcopter. Wykorzystano model rozchodzenia się zanieczyszczenia oparty na modelu dyfuzji cząsteczek, działający na następujących założeniach: zachowaniu stałej liczby cząsteczek, oraz zależnością między strumieniem pola a gęstością. Algorytm składa się z dwóch części. Część metaheurystyczna (gradientowa), wykorzystywana jest do śledzenia rosnącego gradientu stężenia zanieczyszczenia. Ta część została wybrana na podstawie przeprowadzonych symulacji i porównania niektórych klasycznych technik. Część probabilistyczna dopełnia pierwszą część poprzez zawężenie poszukiwań w obszarach najbardziej prawdopodobnych w przeszukiwanym obszarze. Ta część wykorzystuje metodologię *Bayesa* do budowy i aktualizacji mapy prawdopodobieństwa źródła zanieczyszczenia z każdym nowym pomiarem, podczas gdy

robot przemieszcza się w terenie. Zastosowany algorytm ten zakłada istnienie jednego źródła zanieczyszczenia na poszukiwanym obszarze. Robot latający wyposażony jest tylko w jeden czujnik. Algorytm przetestowano w pomieszczeniu zamkniętym na obszarze $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ na stałej wysokości $0,7\text{ m}$. Podejście probabilistyczne zaprezentowano w [22]. Praca dotyczy modelowania przepływu wiatru, który wykorzystuje pomiary natężenia i kierunku wiatru zgromadzone na podstawie siatki pomiarowej rzadkiej. W [161] zaprezentowano wykorzystanie również takiej siatki, dla czujników rozmieszczonych ponad gruntem w stałych lokalizacjach. Budowę mapy przestrzennej zanieczyszczenia opisano w [149]. W artykule zaprezentowano mapy zanieczyszczenia tlenku węgla CO wygenerowane przy pomocy robota w trzech wymiarach. Zaprezentowano również algorytm optymalnej trasy do wykonywania pomiarów z uwzględnieniem niskiej częstotliwości próbkowania (dużej stałej czasowej) czujników stężenia gazów. W pracy [169] przedstawiono algorytm do dynamicznej estymacji rozpraszania się (stężenia) zanieczyszczenia oraz planowania optymalnych tras dla robotów latających wyposażonych w czujniki środowiskowe. Zaproponowany system integruje otrzymywane dane pomiarowe do symulacji środowiskowej, jednocześnie sterując procesami pomiarowymi. Dynamiczna ewolucja smugi zanieczyszczenia została opisana równaniem adwekcji-dyfuzji. Aby zintegrować niekompletne i zakłócone pomiary do tego systemu wykorzystano podejście offline-online. Inne podejście polegające na budowaniu mapy to [92]. W artykule przedstawiono poszukiwanie źródła zanieczyszczenia na podstawie generowanej mapy z stałych punktów pomiarowych. Praca jest szczególnie cenna, gdyż badania były prowadzone na większym terenie $36\text{ m} \times 36\text{ m}$, na wysokościach do 4 m . Na podstawie przeprowadzonych pomiarów możliwe było wygenerowanie mapy i określenie źródła zanieczyszczenia (oparów acetonu). Na komercyjnie dostępnym robocie firmy *DJI* został zamontowany dodatkowy komputer pokładowy (*Nvidia Tegra*), a do odczytywania danych z czujników gazów wykorzystano komunikującą się z nim platformę *Arduino*. Niestety na obecnym etapie prac algorytmy obliczeniowe uruchomione są na stacji naziemnej (laptopie). Jako czujnik wykorzystano detektor *PID* czuły na lotne związki organiczne i izobutylen. Budowanie mapy opisano też w [89]. Wykrywanym gazem był propan. Do detekcji gazu wykorzystano czujnik *MEMS* gazów łatwopalnych. Ważną cechą pracy jest to, że uwzględniono obecność przeszkód terenowych na poszukiwanym terenie. Maksymalny przeszukiwany teren miał wymiary $9\text{ m} \times 13\text{ m}$. Tu również obliczenia prowadzone są na stacji naziemnej.

W przypadku jednoczesnego wykorzystania wielu robotów, to z tym podejściem związane są dodatkowe trudności związane z koniecznością koordynacji robotów w powietrzu. Nie istnieje wyłącznie ryzyko kolizji robotów, ale należy również zadbać o to żeby nie zbliżyły się do siebie zbyt blisko, gdyż wpadną we własne strugi zaśmigłowe. Niedopuszczalna jest również sytuacja gdzie jeden robot znajdzie się nad drugim. Pojawiają się również problemy z wzajemną komunikacją między robotami. Wpływ opóźnień analizowano w [85].

Algorytm sterowania chmury robotów zaprezentowano w pracy [135]. Składa się on z dwóch części: koordynacji robotów i śledzenia zanieczyszczenia. Zagadnienie współpracy robotów (niestety jeżdżących) opisano w [227]. Jeden rodzaj robotów z wentylatorami generują przepływ, drugie, wyposażone w czujniki mierzą. W artykule [28] przedstawiono projekt, którego celem jest gromadzenie danych o głównych czynnikach zanieczyszczenia powietrza w środowiskach miejskich na różnych wysokościach przy wykorzystaniu robotów latających. Projekt zakłada wykorzystanie chmury pomiarowej robotów wielowirnikowych. Roboty mają zostać rozmieszczone w pionowej kolumnie, w odstępach 10 m między sobą. Po wykonaniu pomiaru w warunkach statycznych roboty zostaną uniesione 5 m, aby uzyskać zarówno horyzontalny i wertykalny rozkład pola zanieczyszczeń. W pracy zasygnalizowano jedynie problem wpływu przepływu powietrza wokół wirników na układ pomiarowy. Wskazano, że jeśli ten wpływ będzie zbyt duży to koniecznym będzie zbudowanie długiego na 20 cm wysięgnika z układem pomiarowym i dodanie stosownej przeciwwagi. Zaprezentowano przykładowy przepływ powietrza wokół śmigła z źródła zewnętrznego. Jak wspomniano wyżej, takie rozmieszczenie robotów, jakie zostało zaprezentowane w tej pracy, jest kłopotliwe. Roboty w pionowej kolumnie mogą mieć problemy z utrzymaniem się w powietrzu. Zjawiska aerodynamiczne nie zostały uwzględnione, roboty mogą spaść na siebie nie tylko w związku z błędami pozycjonowania w powietrzu. Przepływ turbulentny w takiej kolumnie może być jeszcze bardziej spotęgowany, co pogorszy lub uniemożliwi przeprowadzenie wiarygodnych pomiarów. Kłopotliwe jest również pozycjonowanie kolumny przy przeszkodach na różnych wysokościach. Ponadto, praca nie jest skończona i nie zostały zaprezentowane wyniki pomiarów ani praktyczne rozwiązanie problemów wzajemnej komunikacji pomiędzy robotami. Bardzo zaawansowana praca to [70], gdzie zastosowano trzy roboty, ale przewidziano możliwość zwiększenia tej liczby. Zaimplementowany algorytm działa w następujący sposób:

1. Wykonywana jest inicjalizacja pozycji i prędkości każdego z robotów z populacji.
2. Każdy z robotów rozpoczyna poszukiwanie strugi zanieczyszczenia metodą zygzakową. Po znalezieniu strugi przez dowolnego robota wszystkie roboty przechodzą do kroku następnego.
3. Każdy z robotów zapamiętuje aktualnie zmierzoną wartość stężenia gazu. Stanowi ona poziom dopasowania w aktualnym kroku.
4. Wszystkie roboty obliczają położenia do których będą się przemieszczać na podstawie algorytmu PSO (ang. *Particle Swarm Optimization*).
5. Każdy z robotów uaktualnia swoją prędkość i pozycję, oraz uaktualnia maksimum lokalne i globalne, dopóki nie znajdzie maksimum lokalnego.

6. Po znalezieniu lokalnego maksimum przez danego robota, robot podejmuje decyzję czy jest to maksimum lokalne lub globalne. Jeśli jest to globalne, to algorytm kończy się, gdyż znaleziono źródło zanieczyszczenia. Jeżeli jest lokalne, to dana pozycja ustawiana jest jako pozycja zabroniona (detraktor).

W celu koordynacji ruchów robotów zaimplementowano metodę grawitacyjną PSO (ang. *Particle Swarm Optimization*) która polega na tym że w przestrzeni znajdują się różne atraktory i detraktory. Atraktoem jest zwiększający poziom stężenia gazu, detraktorem może być inny robot lub znalezione maksimum lokalne. Atraktory i detraktory mają określone zasięgi działania, poza którymi nie mają wpływu na roboty. W przypadku tej pracy problemem staje się koordynacja wielu robotów w przestrzeni. Wobec powyższego, wszystkie roboty muszą znać swoje położenie i innych. Należy również odpowiednio dobrać liczbę robotów do danego terenu, ponieważ zbyt duża liczba robotów na zbyt małym terenie spowoduje ciągłe (i przypadkowe) wpadanie robotów na siebie. Należy również zauważyć, że metoda ta pośrednio uwzględnia możliwą obecność więcej niż jednego źródła zanieczyszczeń. Roboty szukają maksimum globalnego. Inne prace wykorzystujące wiele robotów latających to [181, 77, 88]. W [88] przedstawiono badania symulacyjne, gdzie porównano pod względem czasu i osiągnięć różne metody skanowania zadanej przestrzeni takie jak: przeszukanie na regularnej siatce punktów, zygzak, spirala, wrzeciono. W pracy [229] zaprezentowano rozwiązanie optymalnego podziału badanego obszaru pomiędzy wiele robotów latających oraz zaplanowania trasy robota w wydzielonym pod-obszarze. Praca nie obejmuje jednak praktycznej implementacji przedstawionego rozwiązania. Zaprezentowany algorytm wymaga również a priori informacji o rozkładzie zanieczyszczenia w zadanym środowisku, a pomiary prowadzone są na stałej wysokości. Praca [16] dotyczy wykorzystania autonomicznego roju robotów latających do wykrywania i mapowania toksycznej strugi. Proponowana metoda polega na koncepcji inteligencji roju: każdy robot wykonuje podstawowe interakcje ze środowiskiem i innymi robotami bez potrzeby wykorzystania scentralizowanej techniki koordynacyjnej. Metoda łączy unikanie kolizji, łączenie się w grupy, stymeryczną komunikację oraz przeszukiwanie strugi nazywane metodą wewnątrz-zewnątrz. Symulacje przeprowadzono przy założeniach, że m.in. w akcji bierze udział 20 robotów oraz przeszukiwany jest teren o powierzchni 640000 m². W pracy sprawdzono różne podejścia, aby możliwa była ocena udziału każdej z technik w metodzie. Były to: lot losowy, komunikacja stymeryczna (roboty wabione są przez cyfrowy feromon, emitowany przez roboty wewnątrz strugi), stymergia i grupowanie, metoda wewnątrz-zewnątrz (kiedy robot znajduje się w strudze to utrzymuje stały kierunek aby szybko się przez nią przemieścić). Gdy robot znajdzie się poza strugą (wykrywane stężenie spadnie poniżej wartości progowej), to robot wykonuje obrót w losowym kierunku i ponownie zaczyna przemieszczać się naprzód aby uzyskać kontakt. Jeśli uda się to w określonym czasie, to procedura jest ponawiana, jeśli nie to robot zaczyna poszukiwanie od

początku. Ostatnie podejście łączone wykorzystuje wszystkie wymienione techniki. W artykule [17] opisano wykorzystanie dwóch robotów do wykonywania pomiarów CO₂. Roboty wykonywały pomiary w magazynie o wymiarach 100 m × 80 m × 30 m na wysokości 3 m. Najpierw, każdy z robotów wykonywał pomiary na odpowiadającym mu fragmencie badanego terenu. Następnie, po interpolacji, zmierzone wartości stężeń zostały wczytane do programów *Fluent* i *Matlab* aby wyznaczyć wszystkie pod-mapy stężeń odpowiadające każdemu z robotów. Dla nie mierzonych pustych obszarów wśród sąsiednich podmap zastosowano algorytm naprawy obrazu oparty na modelu CCD (ang. *Clustered Directed Diffusion*) do naprawy podmap. Następnie mapy podrzędne są łączone w całościową mapę. Wyniki symulacji pokazały, że ten algorytm naprawy obrazu oparty na modelu CDD może uzyskać zadowalające wyniki gdy stężenie zmienia się niewiele i obszar niemierzony jest stosunkowo wąski.

1.3. Normatywy pyłów zawieszonych PM w Polsce

Dla pyłów zawieszonych określone zostały następujące normatywy [174]:

- Poziom dopuszczalny – standard jakości powietrza, określony ze względu na ochronę zdrowia ludzi i ochronę roślin.
- Poziom informowania – przekroczenie którego oznacza, że istnieje zagrożenie zdrowia ludzkiego wynikające z krótkotrwałego narażenia na działanie zanieczyszczeń wrażliwych grup ludności.
- Poziom alarmowy – którego nawet krótkotrwałe przekroczenie może powodować zagrożenie dla zdrowia ludzi.

Obecnie obowiązujące wartości wyżej wymienionych poziomów zestawiono w tabeli 1.1.

Tabela 1.1. Wartości poziomów dopuszczalnych, informowania i alarmowych dla pyłów zawieszonych [174]

	Okres uśredniania wyników pomiarów	Poziom [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
		dopuszczalny	informowania	alarmowy
PM ₁₀	24 godziny	50	100	150
	rok kalendarzowy	40	–	–
PM _{2,5}	rok kalendarzowy	20	–	–

W tabeli 1.2 zestawiono dane z okresu ostatnich 5 lat dla wybranej stacji pomiarowej, zlokalizowanej na Alejach Krasińskiego niedaleko uczelni AGH w Krakowie. Odnosząc wartości średnich rocznych do wartości poziomów dopuszczalnych, należy stwierdzić że były one przekroczone we wszystkich latach bez wyjątku. Podobnie maksimum roczne pyłu PM₁₀ we wszystkich latach wartość prognozy alarmowej około dwukrotnie. Nawet te dane, pozwalają stwierdzić że zanieczyszczone powietrze stanowi istotny i aktualny problem. Dlatego też, w całej Polsce wprowadzane są obecnie liczne rozwiązania, które mają na celu zmniejszenie zanieczyszczenia. w województwie małopolskim są to m.in.:

- ograniczanie ruchu samochodowego w centrum miasta, w tym wprowadzenie zakazu ruchu starszymi pojazdami nie spełniających normy spalin Euro 4,
- wprowadzenie zakazu palenia w 2019 roku, który to spowodował masową wymianę sposobu ogrzewania budynków na m.in. gazowe, elektryczne,

- sieci wypożyczalni miejskich: rowerów, hulajnóg,
- możliwość bezpłatnego skorzystania z komunikacji miejskiej w przypadku stężenia pyłów przekraczającego poziom alarmowy,
- dopłaty do termomodernizacji budynków.

Tabela 1.2. Dane pomiarowe pyłów zawieszonych w latach 2018–2022 dla stacji pomiarowej w Krakowie zlokalizowanej na Alejach Krasińskiego [174]

Rok	PM _{2,5} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]			PM ₁₀ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	minimum roczne	maksimum roczne	średnia roczna	minimum roczne	maksimum roczne	średnia roczna
2018	3,0	201,9	39,4	3,5	415,4	56,6
2019	3,0	179,7	29,2	3,4	251,4	49,5
2020	3,0	226,1	23,9	3,0	248,3	39,0
2021	1,7	144,8	25,2	2,0	394,0	44,4
2022	1,0	161,2	26,4	2,9	317,2	46,5

W związku z nieustępującym problemem zachodzi potrzeba budowania, rozwijania i wprowadzania rozwiązań, które umożliwią dalszą poprawę jakości powietrza.

1.4. Sformułowanie wymagań dla budowanego inspekcyjnego robota latającego

Wśród ogromu opublikowanych prac, wliczając w to rozwiązania dostępne w handlu, wychodzi się z założenia że robot sterowany jest przez operatora. W takim przypadku jego zadaniem jest ręczne pokierowanie robota w okolice źródła i utrzymanie układu pomiarowego w strudze zanieczyszczenia. Co więcej, nawet autorski system pomiarowy zamontowany na gotowej platformie wielowirnikowej, jest zupełnie niezależny od układu sterowania robota. Wprawdzie większość kontrolerów lotu umożliwia a priori wprowadzenie stałych współrzędnych po których taki robot może się przemieszczać, jednakże zazwyczaj ze względów bezpieczeństwa nie ma możliwości automatycznego przejęcia kontroli nad trajektorią robota. Wtedy w pewnym stopniu można zautomatyzować pomiary, lecz nadal trudno mówić o pełni automatycznym robocie. Są to istotne trudności związane z automatycznym prowadzeniem poszukiwań.

W przypadku części prac, brakowało dedykowanego układu pomiarowego, a obliczenia prowadzone były na stacji naziemnej. Tym samym robot musi być w stałej widoczności radiowej ze stacją, i stąd część z nich tym samym była prowadzona na stosunkowo małym terenie. Taką łączność można zakłócić, paraliżując działanie systemu. Podobne zagrożenie występuje w przypadku, gdzie wykorzystywano kilka współpracujących robotów. Wtedy również potrzebna jest taka łączność między robotami, do celów ich wzajemnej koordynacji. Wrażliwość systemu na stosowanie zakłódczy (ang. *jammer*) może być wykorzystana przez osoby praktykujące palenie nielegalnych paliw w paleniskach. Dlatego też najbardziej pożądanym byłby robot zupełnie autonomiczny.

Jeśli chodzi o algorytmy poszukiwania, to literatura jest bardzo bogata w tym zakresie. Opisywany był cały wachlarz różnych rozwiązań, poczynając od prostego przeszukania na jednolitej siatce punktów, przechodząc przez różnego rodzaju metody gradientowe, a kończąc na bardzo kosztownych obliczeniowo algorytmów wykorzystujących mapę. W tym zakresie konieczne jest wykonanie analizy algorytmów, w celu wybrania rozwiązań, które z jednej strony mają niskie wymagania co do mocy obliczeniowej, z drugiej zaś ograniczają losowe błędzenie robota. Niskie zapotrzebowanie na moc obliczeniową pozwala na to, aby dany algorytm mógł stanowić wewnętrzną część oprogramowania układowego systemu sterującego robota. W ten sposób gwarantuje się szybkie wykonywanie obliczeń i wyznaczanie trajektorii ruchu. Tutaj również można wskazać szereg luk badawczych, związanych w szczególności z trudnościami w praktycznej implementacji tychże. Były to m.in.:

- wymaganiu a priori informacji o położeniu źródła, którego poszukiwania są prowadzone. Taka informacja była np. wymagana w pracach dotyczących infotaksji, gdzie

warunek zakończenia polegał na detekcji spadku różnicy pomiędzy położeniem robota a położeniem źródła poniżej ustalonej wartości progowej. Przy takim założeniu działanie robota jest bezcelowe.

- konieczności podziału algorytmu na dwa etapy: uzyskania kontaktu ze strugą i podążania w niej do źródła. Takie wymaganie było konieczne w szczególności dla metod gradientowych, gdzie skuteczne wyznaczenie gradientu możliwe jest dopiero po uzyskaniu kontaktu ze strugą. Ten etap zazwyczaj realizowany był albo na zasadzie losowego poruszania się w różnych kierunkach albo zawisu robota w miejscu i oczekiwaniu na kontakt, co stanowi słabość tych rozwiązań. Algorytm raczej powinien być deterministyczny, i składać się z etapów: fazy szybkiego przeszukania wstępnego terenu, oraz fazy precyzyjnej lokalizacji źródła zanieczyszczenia. W ten sposób można szybko sprawdzić czy na badanym terenie znajduje się źródło bądź nie.
- konieczności przyjęcia konkretnych wartości progowych, potrzebnych do określenia kontaktu ze strugą i uznania położenia źródła. Trudność w przyjęciu tychże związana jest z zmiennym tłem pomiarowym, które trzeba poznać na etapie przeszukania wstępnego. Najbardziej pożądane było by stworzenie systemu pomiarowego i klasyfikatora, który pozwala wykryć źródło niezależnie od tła pomiarowego.

W niektórych pracach, wykorzystywano półprzewodnikowe czujniki gazów zamiast czujników PM. Czujnik taki cechuje się krótszym czasem reakcji, co umożliwia szybsze prowadzenie poszukiwań. Związane jest to również z tym, że tego typu czujnik na ogół wyposażony jest w układ wymuszający obieg powietrza, a pomiar odbywa się z wykorzystaniem metod optycznych. W niektórych poszukiwaniach większe znaczenie będzie miało samo wykrycie zadymienia, niż stwierdzenie jaki konkretnie materiał jest palony.

Jeśli chodzi o lokalizację układu pomiarowego względem wirników robota, to literatura w tym zakresie jest niezgodna, i są stosowane różne podejścia co do umieszczenia czujników pomiarowych. Można pokusić się o wniosek, że nie było jeszcze kompleksowego podejścia do tego tematu, choćby dlatego, że nie zaproponowano jeszcze rozwiązania które gwarantowało by wykrywanie zanieczyszczeń i gazów niezależnie od warunków pracy robota. Często nie wykonywano takiej analizy, a w pracach gdzie określono pewne wytyczne, były one określone aby pomiar obarczony był jak najmniejszym błędem. Obecnie wydaje się, że w przypadku pomiaru cząstek stałych, panuje trend umieszczania wlotu układu pomiarowego nad robotem. Te wytyczne mają mniejsze zastosowanie w przypadku poszukiwania źródła, gdzie zawyżanie mierzonych stężeń może być korzystne. W warunkach terenowych następuje silne zanikanie strugi zanieczyszczenia wraz z oddalaniem się od źródła i tym samym mierzone stężenia są niewiele wyższe od poziomu stężenia tła. Pozostałe luki badawcze związane były m.in. z analizą jedynie jednej konfiguracji robota, brak weryfikacji wykonanych obliczeń (kalibracji modelu)

na dedykowanym stanowisku hamowni. Inne braki związane są z analizą komercyjnych rozwiązań robotów, w których jak wspomniano, ze względu na swoją konstrukcję nie można w łatwy sposób zintegrować systemu pomiarowego do celów automatycznego poszukiwania źródła zanieczyszczenia.

Podsumowując, do celów lokalizowania źródeł zanieczyszczenia potrzebne jest urządzenie techniczne które będzie automatycznie przenosić układ pomiarowy w przestrzeni po zadanej trajektorii. Na podstawie aktualnego stanu wiedzy należy stwierdzić, że do tego celu może służyć dedykowany robot latający. Budowa takiego robota wymaga jednak rozwiązania całego szeregu problemów cząstkowych. Co najistotniejsze, należy przeprowadzić proces syntezy algorytmu sterowania, który umożliwi dotarcie robota do ekstremum zagrożenia środowiskowego. Algorytm sterowania takiego robota składa się z kilku zasadniczych części, takich jak: algorytmy przetwarzania danych z czujników, utrzymania robota w powietrzu i śledzenia zadanych trajektorii, sposób przeszukiwania przestrzeni oraz parametry algorytmu sterowania, takie jak odpowiedni czas pomiaru w zadanym punkcie. Trzeba zatem stwierdzić, że na chwilę obecną jest zapotrzebowanie na wysoko specjalizowany inspekcyjny robot latający, który odznaczał by się następującymi cechami:

- Robot nie powinien wprowadzać zakłócenia do pola zanieczyszczenia które mierzy. To jest wymaganie ogólnie określane dla różnych przyrządów technicznych, jednakże w rzeczywistości niemożliwe do spełnienia. Nie mniej jednak należy dążyć do zminimalizowania tego zakłócenia, bądź określenia jego istotności i wykonania odpowiedniej filtracji.
- Robot powinien być łatwy w obsłudze aby była możliwość jego użytkowania, modernizacji i naprawy przez niewykwalifikowany personel.
- Robot byłby zaprogramowany do automatycznej kontroli obszaru o określonych parametrach (powierzchni), a nie konkretnych współrzędnych, stąd miałby możliwość poszukiwania źródła na dowolnym obszarze.
- W wariantcie najbardziej rozbudowanym, powinien realizować swoje zadania w sposób w pełni autonomiczny, bez udziału człowieka. Wtedy robot wylatywałby cyklicznie na zwiad z stałym lub zmiennym interwałem czasowym, w tym w nocy, co utrudniało by spalanie odpadów.
- Robot na bieżąco, lub po powrocie do stacji bazowej dostarczałby informacji, czy na kontrolowanym terenie znaleziono źródła zanieczyszczenia, a jeśli tak, to w jakim miejscu.

1.5. 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 opracowanym prototypie robota latającego układ sterowania realizuje zadania planowania trasy przelotu, generowania trajektorii lotu, sterowania ruchem robota oraz przetwarzania danych z czujników nawigacyjnych oraz 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.

Realizacja tak sformułowanego celu wymagała rozwiązania całego szeregu problemów cząstkowych, które w całości lub w części miały charakter oryginalny. Były to:

- Budowa systemu pomiarowego robota, umożliwiającego w możliwie najkrótszym czasie zlokalizowanie najsilniejszego źródła zanieczyszczenia. Realizacja tego zadania wymagała opracowania algorytmów przetwarzania danych z sensorów zanieczyszczeń powietrza oraz czujników wykorzystywanych do nawigacji, generacji strategii przeszukiwania przestrzeni oraz doboru warunków pomiaru zanieczyszczeń, takich jak m.in.: czas pomiaru w zadanym punkcie.
- Modelowanie i analiza numeryczna pola przepływu z wykorzystaniem metody objętości skończonych w celu opracowania metod przetwarzania danych pomiarowych oraz efektywnie działającego systemu pomiarowego robota, skonstruowanego w oparciu o autorskie kryterium umożliwiające wskazanie właściwej lokalizacji wlotu układu pomiarowego. Przeprowadzone prace miały na celu oszacowanie wpływu pracy wirników robota latającego na zaburzenia naturalnego pola przepływu, a także dokonanie doboru odpowiedniej liczby wirników oraz parametrów konstrukcyjnych i lokalizacji czujników.
- Opracowanie algorytmów lokalizacji źródeł emisji zanieczyszczeń. W algorytmie wykorzystano model rozprzestrzeniania się strugi zanieczyszczeń w ośrodku ciągłym. Przeprowadzono szereg eksperymentów dla wybranych algorytmów w celu wyznaczenia parametrów decyzyjnych takich jak konieczna do przebycia droga, czas lotu oraz aktualizowanych wartości pomiarów w czasie rzeczywistym w celu wskazania właściwego sposobu przeszukiwania przestrzeni. Dla algorytmu „state-of-the-art”, infotaksji, zaproponowano autorskie kryterium zakończenia poszukiwań.

- Dobór parametrów algorytmu sterowania lotem oraz struktury robota na podstawie modelu dynamicznego ruchu i metody planowania eksperymentu.
- Opracowanie projektu i wykonanie systemu pomiarowego robota wielowirnikowego, w którego konstrukcji i algorytmach zastosowano wyniki przeprowadzonych uprzednio badań literaturowych, modelowych i eksperymentalnych.
- Projekt i wykonanie autorskiego dedykowanego stanowiska hamowni zespołów napędowych robotów wielowirnikowych, umożliwiającego jednoczesny pomiar kluczowych parametrów zespołu napędowego robota. W celu umożliwienia szybkiego wykonywania pomiarów porównawczych różnych zespołów napędowych stanowisko zostało zautomatyzowane. Opracowane stanowisko zostało wykorzystane między innymi w procesie weryfikacji i walidacji opracowanego modelu pola przepływu.
- Opracowanie metody przetwarzania danych pomiarowych z zastosowanych czujników cząstek stałych, charakteryzujących się zmienną częstotliwością próbkowania, zależną od mierzonego stężenia. Zastosowanie metod uśredniania mierzonych sygnałów w dziedzinie czasu umożliwiło przeprowadzenie synchronizacji danych z kilku czujników cząstek stałych.
- Przeprowadzenie testów robota w warunkach eksploatacyjnych i weryfikacja zaimplementowanych algorytmów poszukiwania źródła zanieczyszczeń. Pomiar stężenia cząstek stałych przeprowadzono dla różnych poziomów tła pomiarowego, dla trzech scenariuszy: lotów w obszarze bez źródła zanieczyszczenia, lotów w obszarze ze źródłem emisji zanieczyszczeń oraz referencyjnych pomiarów bez źródła zanieczyszczenia i bez wpływu zakłóceń powodowanych pracą wirników.
- Przeprowadzenie analizy statystycznej, korelacji, głównych składowych i wizualizacji wielowymiarowych wyników przeprowadzonych pomiarów w warunkach rzeczywistych dla czujników cząstek stałych w zależności od miejsca montażu tych czujników. Na podstawie uzyskanych wyników badań wybrano właściwą lokalizację czujnika cząstek stałych. Opracowano autorską funkcję umożliwiającą automatyczną klasyfikację pomiarów na te ze źródłem zanieczyszczenia i bez, niezależnie od poziomu tła.
- Krytyczne spojrzenie na wyniki i propozycje udoskonaleń. Wskazano kierunki dalszych badań i możliwe modyfikacje zastosowanych modeli i algorytmów.

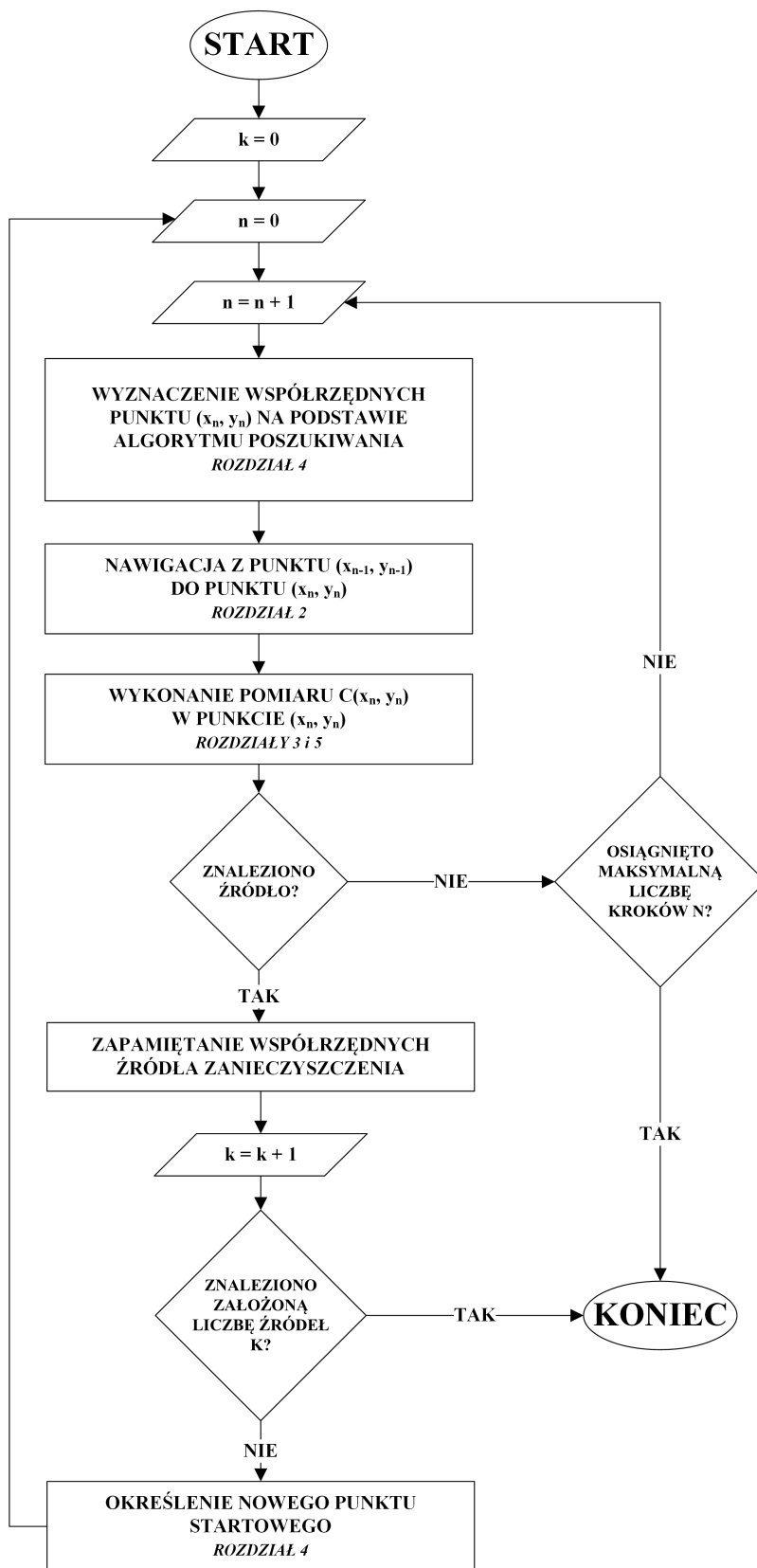
1.6. Autorski algorytm poszukiwania źródeł zanieczyszczeń powietrza

Aby konstruowany robot automatycznie lokalizował źródła zanieczyszczenia, należało sformułować i wdrożyć odpowiedni algorytm postępowania. Na rysunku 1.5 zaprezentowano sformułowany algorytm w postaci schematu blokowego, sformułowany na podstawie wniosków z poprzednich podrozdziałów. Przyjęto tutaj uproszczenie, że poszukiwania źródła prowadzone będą na płaszczyźnie na określonej wysokości. Zgodnie z tym algorytmem, robot kolejno przemieszcza się na kolejne wyznaczone na bieżąco punkty pomiarowe i wykonuje pomiary. Określenie czy zlokalizowano źródło, podejmowana jest na podstawie zgromadzonych danych. W badaniach symulacyjnych decyzja była wykonywana na podstawie przekroczenia ustalonej wartości progowej (rozdział 4). W badaniach eksperymentalnych poszukiwana była wartość maksymalna zanieczyszczenia, a następnie stworzono dedykowany klasyfikator (rozdział 6). Najistotniejsze kroki algorytmu to kolejno:

- Wyznaczenie współrzędnych docelowego w danym kroku n punktu pomiarowego na podstawie odpowiedniego algorytmu poszukiwania. Zagadnienia te opisano szczegółowo w rozdziale 4.
- Nawigacja pomiędzy punktami pomiarowymi. Istota tego zagadnienia została opisana szczegółowo w rozdziale 2.
- Wykonanie pomiaru stężenia w wyznaczonym punkcie. Te zagadnienia opisano w rozdziałach 3 i 5 dotyczących odpowiednio doboru parametrów i budowy podsystemu pomiarowego robota.
- Określenie nowego punktu startowego, w przypadku kiedy na terenie znajduje się jednocześnie wiele źródeł zanieczyszczenia, opisanego w rozdziale 4.

Ponadto istotnymi elementami algorytmu są dodatkowe parametry, wartości których zależą od zastosowanego algorytmu poszukiwania (rozdział 4):

- Maksymalna liczba punktów pomiarowych (kroków) wynosząca N . Ten warunek stanowi również ograniczenie na maksymalny czas poszukiwań. Z znanych odległości pomiędzy punktami i założenia stałej prędkości poruszania się robota wynika bezpośrednio maksymalny czas lotu.
- Maksymalna liczba poszukiwanych źródeł zanieczyszczenia K .



Rys. 1.5. Algorytm poszukiwania źródeł zanieczyszczenia. Oznaczenia: n – indeks punktu pomiarowego, k – indeks źródła zanieczyszczenia

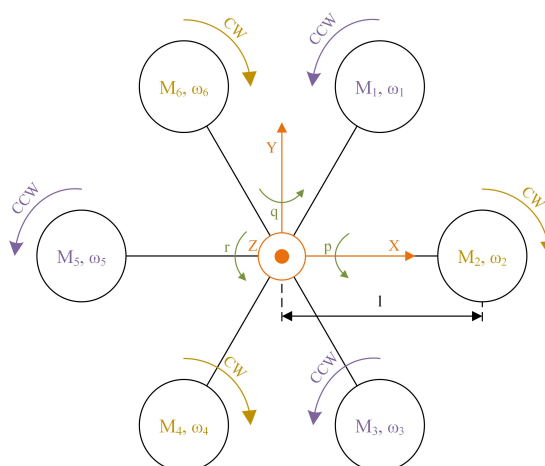
2. Dobór parametrów algorytmu sterowania lotem oraz struktury robota na podstawie modelu dynamicznego ruchu

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. Jest to złożony algorytm, który pobiera dane z czujników i na ich podstawie generuje odpowiednie sterowania. Postać algorytmu zależy od rodzaju robota i jego zastosowania. Algorytm ten składa się z elementów takich jak: planowanie trasy przelotu, generowanie trajektorii lotu, sterowanie ruchem, oraz dostosowywanie do zmiennych warunków lotu i bezpieczeństwo.

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 czas lotu, zużycie energii bądź inne parametry. Następnie algorytm sterowania ruchem, wykorzystuje algorytmy takie jak: PID, LQR czy MPC 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 [33]. Sterowanie ruchem polega na ciągłym monitorowaniu położenia i prędkości robota, i na tej podstawie dostosowywaniu sterowania, tak aby robot pozostawał na wyznaczonej trajektorii mimo stale zmiennych warunków lotu, powodowanych przez wiatr, opady czy zmiany temperatury. Finalnie algorytm sterowania powinien zapewniać bezpieczeństwo, poprzez reagowanie na zagrożenia w przestrzeni powietrznej czy wykryte błędy w układzie sterowania w celu uniknięcia kolizji czy innych niebezpieczeństw.

2.1. Model dynamiczny robota latającego

Praktyka inżynierska wymaga najpierw przeprowadzenia analizy zachowania, a następnie zbudowania układu sterowania analizowanego obiektu. w tym procesie korzysta się z modelowania matematycznego. Celem jest zbudowanie modelu, który z wystarczającą dokładnością odzwierciedla zachowanie układu, będąc jednocześnie na tyle prosty na ile jest to możliwe. Prezentowany model został wyprowadzony z wykorzystaniem równań Eulera–Lagrange’a [138, 109] i zaimplementowany w środowisku *Matlab/Simulink*, ale możliwe jest również wykorzystanie środowiska *LabView* [99, 100]. W pracy analizowane były trzy najczęściej stosowane konfiguracje robotów latających: o czterech, sześciu (w układzie prostym) i ośmiu (w układzie redundantnym) wirnikach. Wejściem modelu jest prędkość obrotowa poszczególnych wirników, wyjściem położenie i orientacja kątowna robota w przestrzeni. Schemat robota o sześciu wirnikach zaprezentowano na rysunku 2.1, na którym to pokazano przyjęty układ współrzędnych i oznaczenia wirników.



Rys. 2.1. Schemat robota wielowirnikowego typu heksacopter. Oznaczenia na rysunku: CW – prawy, CCW – lewy kierunek obrotów wirników

Robot typu heksacopter wyposażony jest w sześć wirników, oznaczonych kolejno numerami 1–6 w kierunku zgodnym z wskazówkami zegara. Numerem pierwszym oznaczono wirnik prawy przedni. Wirniki 1, 3 i 5 mają lewy kierunek obrotów, natomiast 2, 4 i 6 – prawy. Wyposażony w śmigło silnik, którego wał obraca się z prędkością ω_i , generuje moment M_i i siłę ciągu F_i , pobierając przy tym moc P_i . Zarówno siła F_i , jak i moment M_i generowane przez zespół napędowy są proporcjonalne do kwadratu prędkości obrotowej, moc P zaś do sześcianu [80], zgodnie z równaniami:

$$F_i = k\omega_i^2, \quad M_i = b\omega_i^2 + I_M\dot{\omega}_i, \quad P = p\omega^3 \quad (2.1)$$

gdzie: k , b , p – odpowiednio stałe: ciągu, momentu i mocy, I_M – moment bezwładności silnika. Stałe te nie są zwyczajowo podawane przez producenta, i tym samym do ich wyznaczenia wykorzystano zbudowane dedykowane stanowisko hamowni (podrozdział 5.2). w przypadkach, kiedy robot porusza się z niewielkimi prędkościami, bądź analizowany jest stan ustalony kiedy robot znajduje się w stanie zawisu, wpływ ω_i można pominąć. Ponadto, powszechnie do napędu w robotach wielowirnikowych stosuje się dedykowane bezszczotkowe synchroniczne silniki prądu stałego z zewnętrznym wirnikiem, typu BLDC (ang. *Brushless DC*). Masa wirnika silnika tego typu jest niewielka, dlatego też moment bezwładności silnika jest niewielki.

Przyjęto układ współrzędnych, gdzie oś Y jest skierowana do przodu, w kierunku lotu, oś X skierowana jest w prawo, oś Z zaś do góry. Robot obraca się w swoim układzie lokalnym z prędkościami kątowymi p , q i r odpowiednio w osiach X , Y i Z . w układzie globalnym, jego położenie w ruchu postępowym reprezentowane jest przez współrzędne liniowe x , y i z , a w obrotowym poprzez kąty θ (oś X), ϕ (oś Y), ψ (oś Z). w układzie lokalnym na robot działa pojedyncza siła u w osi Z , która pochodzi od obracających się śmigieł. Wektor sił działających na robota w układzie lokalnym $\hat{\mathbf{F}}$ zapisuje się jako:

$$\hat{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

gdzie u to suma sił pochodzących od poszczególnych wirników, czyli na podstawie równania 2.1:

$$u = \sum_{i=1}^6 F_i = k \sum_{i=1}^6 \omega_i^2 \quad (2.3)$$

Siła ta powoduje ruch postępowy robota w układzie globalnym. Wielkość odpowiednich składowych wektora \mathbf{F}_ξ w poszczególnych osiach jest zależna od aktualnej orientacji katowej robota, co zapisano jako:

$$\mathbf{F}_\xi = \mathbf{R}\hat{\mathbf{F}} \quad (2.4)$$

\mathbf{R} to macierz obrotu, określona jako:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} C_\psi C_\phi & C_\psi S_\phi S_\theta - S_\psi C_\theta & C_\psi S_\phi C_\theta + S_\psi S_\theta \\ S_\psi C_\phi & S_\psi S_\phi S_\theta + C_\psi C_\theta & S_\psi S_\phi C_\theta - C_\psi S_\theta \\ -S_\phi & C_\phi S_\theta & C_\phi C_\theta \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Macierz ta stanowi iloczyn poszczególnych macierzy obrotu w osiach X , Y i Z :

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_z \mathbf{R}_y \mathbf{R}_x \quad (2.6)$$

gdzie:

$$\mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} C_\psi & -S_\psi & 0 \\ S_\psi & C_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} C_\phi & 0 & S_\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -S_\phi & 0 & C_\phi \end{bmatrix}, \mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_\theta & -S_\theta \\ 0 & S_\theta & C_\theta \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Na podstawie tych zależności wektor \mathbf{F}_ξ zapisuje się jako:

$$\mathbf{F}_\xi = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u(C_\psi S_\phi C_\theta + S_\psi S_\theta) \\ u(S_\psi S_\phi C_\theta - C_\psi S_\theta) \\ u(C_\theta C_\phi) \end{bmatrix} = k \sum_{i=1}^6 \omega_i^2 \begin{bmatrix} (C_\psi S_\phi C_\theta + S_\psi S_\theta) \\ (S_\psi S_\phi C_\theta - C_\psi S_\theta) \\ (C_\theta C_\phi) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Postać wektora momentów $\boldsymbol{\tau}_\eta$, które powodują obrót robota w układzie lokalnym, zależy bezpośrednio od zależności geometrycznych (rysunek 2.1):

$$\boldsymbol{\tau}_\eta = \begin{bmatrix} \tau_\theta \\ \tau_\phi \\ \tau_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2}kl & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2}kl & -\frac{\sqrt{3}}{2}kl & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}kl \\ -\frac{1}{2}kl & -kl & -\frac{1}{2}kl & \frac{1}{2}kl & kl & \frac{1}{2}kl \\ -b & b & -b & b & -b & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \\ \omega_5^2 \\ \omega_6^2 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

gdzie: l – połowa odległości pomiędzy osiami silników (rysunek 2.1), k i b – stała ciągu i momentu (równanie 2.1). Wielkości zarówno momentów, jak i sił zależą bezpośrednio od prędkości obrotowych silników. Odpowiednia zmiana tych prędkości, powoduje zmianę wektora momentów. To powoduje obrót robota w odpowiedniej osi, i tym samym przemieszczanie się go w odpowiednim kierunku. w ten sposób, sterując kątami przechylenia, pochylenia i odchylenia odbywa się sterowanie położeniem robota w przestrzeni. Reasumując, w układzie sterowania ruchem robota poprzez odpowiedni dobór prędkości obrotowych wirników, steruje się wielkością siły w osi Z i momentów w osiach X , Y i Z :

$$\begin{bmatrix} \hat{F}_z \\ \tau_\theta \\ \tau_\phi \\ \tau_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k & k & k & k & k & k \\ \frac{\sqrt{3}}{2}kl & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2}kl & -\frac{\sqrt{3}}{2}kl & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}kl \\ -\frac{1}{2}kl & -kl & -\frac{1}{2}kl & \frac{1}{2}kl & kl & \frac{1}{2}kl \\ -b & b & -b & b & -b & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \\ \omega_5^2 \\ \omega_6^2 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$\boldsymbol{\Omega}$ to wektor prędkości kątowych w układzie lokalnym robota, $\boldsymbol{\xi}$ to wektor położenia liniowych w układzie globalnym, $\boldsymbol{\eta}$ to wektor kątów w układzie globalnym:

$$\boldsymbol{\Omega} = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\xi} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} \theta \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Przyjęto następujące współrzędne uogólnione:

$$q_1 = x, q_2 = y, q_3 = z, q_4 = \theta, q_5 = \phi, q_6 = \psi \quad (2.12)$$

Wektor współrzędnych uogólnionych \mathbf{q} zapisano jako:

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\xi} \\ \boldsymbol{\eta} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Lagrange'an to różnica energii kinetycznej E_k i potencjalnej E_p , co zapisano jako:

$$L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = E_k - E_p = E_k^{tr} + E_k^{rot} - E_p \quad (2.14)$$

W tym przypadku na całość energii kinetycznej E_k sumuje się energia kinetyczna ruchu postępowego E_k^{tr} i obrotowego E_k^{rot} . Równania ruchu, na podstawie definicji wyprowadza się z:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} \right) = \mathbf{Q} \quad (2.15)$$

\mathbf{Q} to wektor sił uogólnionych:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_\xi \\ \boldsymbol{\tau}_\eta \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

gdzie: \mathbf{F}_ξ – wektor sił w ruchu postępowym, $\boldsymbol{\tau}_\eta$ – wektor momentów w ruchu obrotowym. Energia kinetyczna ruchu postępowego E_k^{tr} jest równa:

$$E_k^{tr} = \frac{1}{2} m \dot{\boldsymbol{\xi}}^T \dot{\boldsymbol{\xi}} \quad (2.17)$$

gdzie: m – całkowita masa robota, $\dot{\boldsymbol{\xi}}$ to wektor prędkości liniowych w układzie globalnym. Energia potencjalna E_p zaś, to:

$$E_p = mgz \quad (2.18)$$

gdzie: g – przyspieszenie ziemskie, przyjmuje się $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$. Energia kinetyczna ruchu obrotowego E_k^{rot} jest równa:

$$E_k^{rot} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\Omega}^T \mathbf{I} \boldsymbol{\Omega} \quad (2.19)$$

$\boldsymbol{\Omega}$ to wektor prędkości kątowych w układzie lokalnym, zgodnie z równaniem 2.11. Tensor bezwładności zapisano w postaci macierzy \mathbf{I} :

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Ponieważ robot jest symetryczny, w macierzy \mathbf{I} występują jedynie główne momenty bezwładności I_{xx} , I_{yy} i I_{zz} . Pomiedzy prędkościami kątowymi w układzie lokalnym robota $\boldsymbol{\Omega}$ a odpowiadającymi im prędkościami $\dot{\boldsymbol{\eta}}$ w układzie globalnym zachodzi zależność:

$$\boldsymbol{\Omega} = \mathbf{W}_\eta \dot{\boldsymbol{\eta}} \quad (2.21)$$

gdzie macierz przekształcenia \mathbf{W}_η określa zależność pomiędzy tymi prędkościami, w zależności od aktualnej orientacji katowej robota, czyli katów przechylenia θ i pochylenia ϕ .

$$\mathbf{W}_\eta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -S_\phi \\ 0 & C_\theta & C_\phi S_\theta \\ 0 & -S_\theta & C_\phi C_\theta \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Tensor bezwładności \mathbf{J} w układzie globalnym zmienia się w zależności od tychże katów, co zapisuje się równaniem:

$$\mathbf{J} = \mathbf{W}_\eta^T \mathbf{I} \mathbf{W}_\eta \quad (2.23)$$

Po wykonaniu niezbędnych przekształceń tensor przyjmuje ostateczną postać:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & -I_{xx}S_\phi \\ 0 & I_{yy}C_\theta^2 + I_{zz}S_\theta^2 & (I_{yy} - I_{zz})C_\phi C_\theta S_\theta \\ -I_{xx}S_\phi & (I_{yy} - I_{zz})C_\phi C_\theta S_\theta & I_{xx}S_\phi^2 + I_{yy}C_\phi^2 S_\theta^2 + I_{zz}C_\phi^2 C_\theta^2 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

W ten sposób energię kinetyczną ruchu obrotowego E_k^{rot} wyraża się w układzie globalnym jako:

$$E_k^{rot} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\Omega}^T \mathbf{I} \boldsymbol{\Omega} = \frac{1}{2} \dot{\boldsymbol{\eta}}^T \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\eta}} \quad (2.25)$$

Równania ruchu wyznaczono na podstawie równania 2.15. Przeprowadzono osobną analizę dla ruchu postępowego i obrotowego. Jeśli chodzi o ruch postępowy, to równanie 2.15 przyjmie postać:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\boldsymbol{\xi}}} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{\xi}} \right) = \mathbf{F}_\xi \quad (2.26)$$

Po wykonaniu niezbędnych przekształceń równanie to przyjmuje następującą postać:

$$m\ddot{\boldsymbol{\xi}} + mg\mathbf{E}_z = \mathbf{F}_\xi \quad (2.27)$$

gdzie: \mathbf{E}_z to wektor przyspieszenia ziemskiego, które oddziałuje tylko w osi Z :

$$\mathbf{E}_z = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Jeśli chodzi zaś o ruch obrotowy, to równanie 2.15 przyjmuje następującą postać:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\boldsymbol{\eta}}} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{\eta}} \right) = \boldsymbol{\tau}_\eta \quad (2.29)$$

Do wyznaczenia finalnej postaci równań ruchu posłużono się dedykowanym pakietem programu *Matlab* służącym do obliczeń symbolicznych. Równania ruchu wielowirnikowego robota latającego w ostatecznej postaci są następujące:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} F_x \quad (2.30)$$

$$\ddot{y} = \frac{1}{m} F_y \quad (2.31)$$

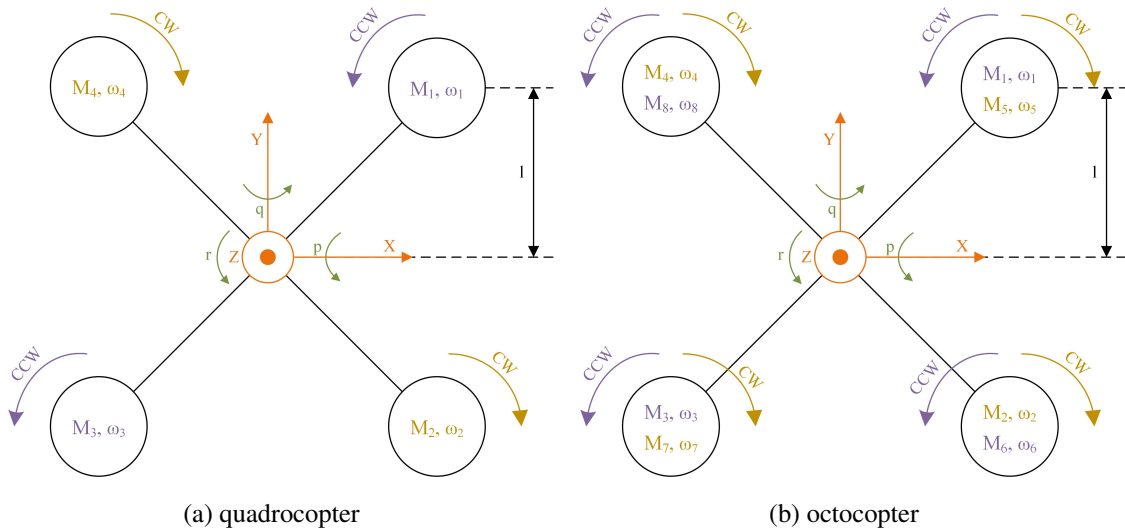
$$\ddot{z} = \frac{1}{m} F_z - g \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} = \frac{1}{I_{xx}} & \left(\tau_{\theta} - \frac{1}{2} \dot{\phi} (I_{yy} - I_{zz}) (\dot{\phi} S_{2\theta} + \dot{\psi} C_{\phi} - 2\dot{\psi} C_{\phi} C_{\theta}^2) \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} \dot{\psi} (I_{yy} - I_{zz}) C_{\theta} (2\dot{\phi} C_{\theta}^2 - \dot{\phi} + 2\dot{\psi} C_{\phi} C_{\theta} S_{\theta}) + I_{xx} (\ddot{\psi} S_{\phi} + \dot{\phi} \dot{\psi} C_{\phi}) \right) \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\phi} = \frac{1}{I_{yy} C_{\theta}^2 + I_{zz} S_{\theta}^2} & \left(\tau_{\phi} + \frac{1}{2} I_{xx} \dot{\psi}^2 S_{2\phi} - I_{xx} \dot{\theta} \dot{\psi} C_{\phi} - I_{zz} \dot{\psi}^2 C_{\phi} C_{\theta}^2 S_{\phi} - I_{yy} \dot{\psi}^2 C_{\phi} S_{\theta}^2 S_{\phi} \right. \\ & \left. - (I_{zz} - I_{yy}) (\dot{\theta} \dot{\phi} S_{2\theta} + \dot{\theta} \dot{\psi} C_{\phi} S_{\theta}^2 + \dot{\phi} \dot{\psi} C_{\theta} S_{\theta} S_{\phi}) - (I_{yy} - I_{zz}) (C_{\theta} C_{\phi} S_{\theta} \ddot{\psi} + \dot{\theta} \dot{\psi} C_{\phi} C_{\theta}^2) \right) \end{aligned} \quad (2.34)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\psi} = \frac{1}{I_{xx} S_{\phi}^2 + I_{yy} S_{\theta}^2 C_{\phi}^2 + I_{zz} C_{\theta}^2 C_{\phi}^2} & \left(\tau_{\psi} + I_{xx} (S_{\phi} \ddot{\theta} + \dot{\theta} \dot{\phi} C_{\phi} - \dot{\phi} \dot{\psi} S_{2\theta}) \right. \\ & \left. - (I_{yy} - I_{zz}) (C_{\theta} C_{\phi} S_{\theta} \ddot{\phi} + \dot{\theta} \dot{\phi} C_{\phi} C_{\theta}^2 + 2\dot{\phi} \dot{\psi} C_{\theta} S_{\theta} C_{\phi}^2) - (I_{zz} - I_{yy}) (\dot{\phi}^2 C_{\theta} S_{\phi} S_{\theta} + \dot{\theta} \dot{\phi} C_{\phi} S_{\theta}^2) \right. \\ & \left. + 2\dot{\phi} \dot{\psi} (I_{zz} C_{\theta}^2 C_{\phi} S_{\phi} + I_{yy} S_{\theta}^2 C_{\phi} S_{\phi}) \right) \end{aligned} \quad (2.35)$$

gdzie: \ddot{x} , \ddot{y} i \ddot{z} – przyspieszenia wzdłuż osi X , Y i Z , $\ddot{\theta}$, $\ddot{\phi}$ i $\ddot{\psi}$ – przyspieszenia kątowe wokół osi X , Y i Z , F_x , F_y i F_z – siły, M_x , M_y i M_z – momenty w osiach X , Y i Z , m – masa, I_{xx} , I_{yy} i I_{zz} – momenty bezwładności robota.



Rys. 2.2. Schematy robotów latających o czterech i ośmiu wirnikach

W przypadku robotów latających typu quadcopter i octocopter (rysunek 2.2), poza parametrami modelu takimi jak: masa, wymiary, stałe napędu czy momenty bezwładności,

to jedyną różnicą w modelu matematycznym jest inna postać równań 2.3 i 2.9. Te układy wirników, ze względu na największe znaczenie praktyczne, były również analizowane w pracy. Na podstawie analiz opisanych w późniejszych rozdziałach było możliwe wybranie najbardziej właściwego układu. Dla robota quadcopter zapisuje się równania:

$$u = \sum_{i=1}^4 F_i \quad (2.36)$$

$$\boldsymbol{\tau}_\eta = \begin{bmatrix} \tau_\theta \\ \tau_\phi \\ \tau_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} kl & -kl & -kl & kl \\ -kl & -kl & kl & kl \\ -b & b & -b & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Dla robota octocopter zaś:

$$u = \sum_{i=1}^8 F_i \quad (2.38)$$

$$\boldsymbol{\tau}_\eta = \begin{bmatrix} \tau_\theta \\ \tau_\phi \\ \tau_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} kl & -kl & -kl & kl & kl & -kl & -kl & kl \\ -kl & -kl & kl & kl & -kl & -kl & kl & kl \\ -b & b & -b & b & -b & b & -b & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \\ \omega_5^2 \\ \omega_6^2 \\ \omega_7^2 \\ \omega_8^2 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

W ten sposób model modyfikuje się do dowolnego pożądanego układu wirników. Równania, nawet dla nieregularnego układu wirników modyfikuje się w następujący sposób. W pierwszych dwóch wierszach z współczynnikami kl znak dodatni lub ujemny odpowiada umieszczeniu wirnika po zgodnej bądź przeciwnej stronie osi obrotu. Wartość współczynnika odpowiada odległości wirnika (dla układów czterech i ośmiu wirników wynosi l) od danej osi obrotu. W ostatnim wierszu dodatni lub ujemny znak przy współczynniku b odpowiada odpowiednio prawemu bądź lewemu kierunkowi obrotów wirnika. Współczynnik ten pozostaje stały.

2.2. Wybór struktury robota latającego na podstawie dynamicznych równań ruchu

Prędkość obrotową wirników ω_h w stanie zawisu (ang. *hover state*) robota wyznaczono, zakładając równowagę: sumy sił ciągu generowanych przez wirniki $F_h = \sum_{i=1}^n F_i = nk\omega_h^2$ i siły ciężkości $F_g = mg$ robota (równanie 2.10):

$$\omega_h = \sqrt{(mg/n)/k} \quad (2.40)$$

gdzie: m – masa robota, g – przyspieszenie ziemskie ($9,81 \text{ m}^2/\text{s}$), n – liczba wirników, k – stała ciągu.

Wartości prędkości obrotowych wirników dla analizowanych struktur [118] robotów latających zebrano w tabeli 2.2. Wartości te wyznaczono zakładając masę robota $m = 2,4 \text{ kg}$ i wyznaczone parametry zespołu napędowego na stanowisku hamowni zebrane w tabeli 2.1. Badania na stanowisku hamowni opisane zostały w podrozdziale 5.2. Dla robota o ośmiu wirnikach, przyjęto dodatkowe założenie że silniki pracujące w kolumnie mają sprawność wynoszącą 80%. Niższa sprawność w tym układzie wynika z wzajemnego wpływu wirników na siebie.

Tabela 2.1. Przyjęte do analizy parametry napędu robota latającego

Parametr	Stała ciągu	Stała momentu	Stała mocy
Wartość	$k = 1,691 \cdot 10^{-5} [\text{N s}^2]$	$b = 2,932 \cdot 10^{-7} [\text{Nm s}^2]$	$p = 2,936 \cdot 10^{-7} [\text{W s}^3]$

Tabela 2.2. Prędkości obrotowe wirników w stanie zawisu i moce dla analizowanych układów wirników

Robot	Quadrocopter	Heksacopter	Octocopter
Liczba wirników	4	6	8
$\omega_h [\text{rad s}^{-1}]$	590	482	466
Moc [W]	241	197	238

Na podstawie prędkości obrotowych wirników wyznaczono dodatkowo moc pobieraną przez poszczególne konfiguracje w stanie zawisu. Na podstawie podanych wartości należy wyciągnąć wniosek że dla przyjętych założeń konfiguracja o sześciu wirnikach cechuje się najmniejszym poborem energii. Oszacowano również, że aby robot o czterech wirnikach pobierał tyle samo mocy musi mieć masę mniejszą o 14,5%, o ośmiu wirnikach zaś 13,6%

mniejszą od założonej. Dlatego dalsza analiza będzie prowadzona dla konfiguracji o sześciu wirnikach.

Tabela 2.3. Zestawienie zależności między prędkościami obrotowymi wirników przy przemieszczaniu i zmianach orientacji robota w kierunkach dodatnich

Tryb lotu	Kierunek lotu	Zależności między prędkościami obrotowymi wirników
Zawis	–	$(\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = \omega_5 = \omega_6) = \omega_h$
Wznoszenie	Z	$(\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = \omega_5 = \omega_6) > \omega_h$
Opadanie	Z	$(\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = \omega_5 = \omega_6) < \omega_h$
Lot w osi poziomej	X	$\omega_4 + \omega_5 + \omega_6 > \omega_1 + \omega_2 + \omega_3$
	Y	$\omega_3 + \omega_4 > \omega_1 + \omega_6$
Zmiana orientacji	X	$\omega_1 + \omega_6 > \omega_3 + \omega_4$
	Y	$\omega_4 + \omega_5 + \omega_6 > \omega_1 + \omega_2 + \omega_3$
	Z	$\omega_2 + \omega_4 + \omega_6 > \omega_1 + \omega_3 + \omega_5$

Odpowiednia zmiana prędkości obrotowych wirników, w parach, powoduje przemieszczanie i zmianę orientacji robota [93]. Zależności między prędkościami obrotowymi wirników przy przemieszczaniu i zmianach orientacji robota o sześciu wirnikach w kierunkach dodatnich, czyli takich gdzie wartość danej współrzędnej się zwiększa, zestawiono w tabeli 2.3. W tabeli 2.4 zaprezentowane wyznaczone przykładowe wartości prędkości obrotowych, aby w poszczególnych osiach obrotu (równanie 2.9) otrzymać moment o wartości 0.05 Nm.

Tabela 2.4. Wyznaczone wartości prędkości obrotowych wirników przy zmianach orientacji robota w kierunkach dodatnich

Tryb lotu	Oś obrotu	Wymagane prędkości obrotowe wirników [rad s^{-1}]					
		ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6
Zawis	–	482	482	482	482	482	482
Zmiana orientacji	X	485	482	478	478	482	485
	Y	480	478	480	484	485	484
	Z	452	511	452	511	452	511

2.3. Przegląd standardowych algorytmów sterowania ruchem robota

Algorytm sterowania kontrolą lotu jest odpowiedzialny za śledzenie zadanego toru ruchu przez robota. Realizacja tego zadania polega na ciągłym monitorowaniu położenia i prędkości robota w przestrzeni i takim dostosowywaniu sterowania, aby poruszał się on po zadanej trajektorii. Algorytm sterowania musi działać w czasie rzeczywistym i dostosowywać się do stale zmiennych warunków lotu, powodowanych przez wiatr, opady czy zmiany temperatury. W praktycznej realizacji algorytmu wykorzystuje się 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*). Sterowanie wielowirnikowym robotem latającym polega na zmianie prędkości obrotowych odpowiednich silników. Celem algorytmu jest osiągnięcie stabilnej, precyzyjnej i skutecznej kontroli nad robotem, co finalnie umożliwia realizację zadania poszukiwania źródeł zanieczyszczenia.

2.3.1. Regulatory PID

Regulatory proporcjonalno–całkująco–różniczkujące PID (ang. *Proportional–Integral–Derivative*) to jedne z najpowszechniej stosowanych regulatorów umożliwiających precyzyjne śledzenie zadanego toru ruchu [101]. Do osiągnięcia tego celu regulator wykorzystuje informacje o położeniu, prędkości i przyśpieszeniu robota. Powszechność zastosowania regulatorów PID wynika stąd, że nie wymagają znajomości modelu matematycznego sterowanego obiektu, oraz są stosunkowo proste do zrozumienia i zaimplementowania. Co więcej regulator PID ma niskie wymagania co do mocy obliczeniowej, co jest szczególnie istotne w przypadku robotów latających, gdzie każde opóźnienie może mieć znaczący wpływ na stabilność i precyzję lotu.

Zasada działania regulatora polega na porównywaniu położenia zadanego (ang. *setpoint*) $y_s(t)$ z położeniem robota $y(t)$ i na tej podstawie wyznaczenia sterowania $u(t)$, aby zminimalizować uchyb $e(t) = y_s(t) - y(t)$. Algorytm ten opisuje się jest równaniem:

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_{t_0}^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.41)$$

gdzie: $u(t)$ – sygnał sterujący, $e(t)$ – uchyb, a K_P , K_I i K_D to odpowiednio wzmocnienia członów: proporcjonalnego, całkującego i różniczkującego. Dyskretną realizację regulatora PID uzyskuje się stosując na przykład złożoną kwadraturę prostokątów do całkowania i różnicę wsteczną do różniczkowania:

$$u(k) = K_P e(k) + K_I \sum_{i=0}^k e(i)T_s + K_D \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \quad (2.42)$$

gdzie: T_s – okres próbkowania.

Proces doboru parametrów regulatora PID, który polega na znalezieniu odpowiednich wartości nastaw (parametrów K_P , K_I i K_D), powszechnie nazywany jest strojeniem. W przypadku braku znajomości modelu matematycznego obiektu parametry regulatora dobiera się ręcznie. Alternatywnie stosuje się znane metody doboru parametrów regulatora PID, takie jak metoda Zieglera–Nicholsa bądź Cohena–Coona. Te metody jednak wymagają wprowadzenia obiektu w stabilne oscylacje, albo wyznaczenia odpowiedzi skokowej układu otwartego. Stąd metody te nie nadają się do zastosowania w praktyce w przypadku obiektu latającego, który bez układu regulacji nie jest w stanie utrzymać się w powietrzu. W warunkach terenowych kolejną trudnością jest konieczność wyizolowania obiektu od wpływu zewnętrznych zakłóceń (takich jak np wiatr). Można jednakże je zastosować w przypadku badań symulacyjnych. Alternatywnie w celu znalezienia nastaw stosuje się metody optymalizacji, m.in. z wykorzystaniem algorytmów gradientowych lub genetycznych. Te metody wymagają jednak znacznych zasobów obliczeniowych.

Sterowanie, wynikające m.in. z przyjętych nastaw regulatora, które poprowadzi robota na zadane współrzędne jest niejednoznaczne. Oznacza to że można wyznaczyć wiele dopuszczalnych przebiegów sygnałów sterujących pozwalających zrealizować cel osiągnięcia zadanego punktu docelowego. Dlatego poza stabilnością, która jest podstawową cechą pozwalającą na osiągnięcie celów sterowania, w układach sterowania wprowadza się dodatkowe kryteria [97, 98]. Mogą być to dopuszczalne parametry odpowiedzi skokowej: czas narastania, czas regulacji, maksymalna wartość pierwszego przeregulowania, czy proporcja pierwszego i drugiego przeregulowania. Alternatywnie wprowadza się wskaźnik jakości sterowania:

$$J = \int_{t_0}^{t_k} g(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) dt \quad (2.43)$$

gdzie: g – funkcjonał: stanu $\mathbf{x}(t)$, sterowania $\mathbf{u}(t)$ oraz czasu t . Metody dokładnego doboru parametrów algorytmu polegają na minimalizacji wybranego wskaźnika ze względu na wartość poszukiwanych parametrów. Wybrane stosowane wskaźniki jakości, na przykładzie układu z jednym sygnałem sterującym zebrano w tabeli 2.5.

Tabela 2.5. Wybrane wskaźniki jakości regulacji

Opis matematyczny	Nazwa wskaźnika jakości regulacji
$J = \int_{t_0}^{t_k} u(t)^2 dt$	całka z kwadratu sygnału sterującego (minimum energetyczne)
$J = \int_{t_0}^{t_k} u(t) dt$	całka z wartości bezwzględnej sygnału sterującego
$J = \int_{t_0}^{t_k} e(t)^2 dt$	całka z kwadratu uchybu
$J = \int_{t_0}^{t_k} e(t) dt$	całka z wartości bezwzględnej uchybu
$J = \int_{t_0}^{t_k} dt$	minimum czasowe

2.3.2. Algorytm regulacji liniowo-kwadratowej

Algorytm LQR (ang. *Linear-Quadratic Regulator*) [97] wykorzystuje model matematyczny robota, opisany przez układ liniowych równań różniczkowych, do wyznaczenia optymalnego sterowania minimalizującego koszt opisany kwadratowym wskaźnikiem jakości (określanym również jako funkcja kosztu). Funkcja kosztu najczęściej definiowana jest jako suma kwadratów uchybów od wartości zadanych. W ogólnym przypadku przyjmuje się odpowiednie wagi, związane z wektorem stanu i sterowania, np. tak aby zminimalizować zużycie energii.

Dla liniowego układu niezmiennego w czasie LTI (ang. *Linear Time-Invariant*) określonego równaniem:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (2.44)$$

wraz z kwadratowym wskaźnikiem jakości J :

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \left(\mathbf{x}(t)^T \mathbf{Q} \mathbf{x}(t) + \mathbf{u}(t)^T \mathbf{R} \mathbf{u}(t) \right) dt \quad (2.45)$$

gdzie: \mathbf{A} i \mathbf{B} – macierze układu i sterowania, $\mathbf{x}(t)$ i $\mathbf{u}(t)$ – wektory stanu i sterowania, \mathbf{Q} i \mathbf{R} – macierze wag stanu i sterowania. Problem minimalizacji kwadratowego wskaźnika jakości na trajektoriach układu LTI dla $t \rightarrow \infty$ określany jest jako problem liniowo-kwadratowy z nieskończonym horyzontem czasowym. Sterowanie $\mathbf{u}(t)$ minimalizujące ten wskaźnik określone jest równaniem:

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t) \quad (2.46)$$

Macierz \mathbf{K} jest określona równaniem:

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \quad (2.47)$$

Natomiast macierz \mathbf{P} znajduje się rozwiązując równanie Riccatiego w postaci:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0 \quad (2.48)$$

Analogicznie, dla układu dyskretnego opisanego równaniem:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k \quad (2.49)$$

Wraz z dyskretnym odpowiednikiem funkcji kosztu J :

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} (\mathbf{x}_k^T \mathbf{Q} \mathbf{x}_k + \mathbf{u}_k^T \mathbf{R} \mathbf{u}_k) \quad (2.50)$$

Sterowanie \mathbf{u}_k określone jest równaniem:

$$\mathbf{u}_k = -\mathbf{K}\mathbf{x}_k \quad (2.51)$$

Macierz \mathbf{K} jest określona jako:

$$\mathbf{K} = (\mathbf{R} + \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \quad (2.52)$$

Natomiast macierz \mathbf{P} znajduje się rozwiązując dyskretne równanie Riccatiego:

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q} + \mathbf{A}^T (\mathbf{P} - \mathbf{P} \mathbf{B} (\mathbf{R} + \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}) \mathbf{A} \quad (2.53)$$

Istotną niedogodnością związaną z zastosowaniem tego algorytmu jest konieczność wyspecyfikowania macierzy wag stanu i sterowania, oraz sprawdzenie jakie efekty dało ich zastosowanie w praktyce. Działanie to najczęściej ma charakter iteracyjny, powtarzany do czasu osiągnięcia pożądanych wyników. w przypadku robotów latających, algorytm implementowany jest na różne sposoby [64], takie jak:

- Linearyzacja modelu robota w punkcie pracy (w stanie zawisu) i wykorzystanie stałej macierzy wzmocnień \mathbf{K} .
- Linearyzacja modelu robota w punkcie pracy i wykorzystanie programowo zmiennej macierzy wzmocnień \mathbf{K} , zależnej od wielkości odchyłki od punktu pracy.
- Re-linearyzacja modelu na bieżąco i ponowne wyznaczenie macierzy wzmocnień \mathbf{K} z częstotliwością mniejszą lub równą częstotliwości głównej pętli sterowania.

2.3.3. Algorytm sterowania predykcyjnego

Algorytmy sterowania predykcyjnego MPC (ang. *Model Predictive Control*) [32, 37] nie stanowią ściśle określonej strategii sterowania, lecz stanowią bardziej szeroki zakres algorytmów sterowania opracowanych wokół pewnych wspólnych idei. Algorytmy predykcyjne wykorzystują model matematyczny robota, aby dostosować sterowanie z wyprzedzeniem, zanim nastąpią zmiany wielkości wyjściowych. Jest to pierwsza cecha odróżniająca ten

typ algorytmów od tradycyjnych algorytmów z sprzężeniem zwrotnym, które wyznaczają sterowanie w odpowiedzi na zmiany wielkości wyjściowych. Kolejną istotną cechą tychże jest możliwość uwzględnienia ograniczeń podczas projektowania układu regulacji, nałożonych zarówno na wielkości regulowane:

$$y_{min} \leq y(k+i|k) \leq y_{max}, \quad i = N_1, N_1 + 1, \dots, N \quad (2.54)$$

jak i sterujące:

$$u_{min} \leq u(k+i|k) \leq u_{max}, \quad i = 0, 1, \dots, N_u - 1 \quad (2.55)$$

gdzie: N_u – horyzont sterowania, N – horyzont predykcji, N_1 – chwila początkowa. Zazwyczaj $N_u < N$, $1 \leq N_1 \leq N$.

Zasada pracy dyskretnego układu regulacji predykcyjnej polega na [32] minimalizacji różnic, w sensie określonego kryterium jakości, między wielkościami regulowanymi $y(k+i|k)$ przewidywanymi w chwili k na przyszłą chwilę $k+i$, a wartościami zadanymi tych wyjść $y_s(k+i|k)$ na horyzoncie predykcji N ($i = 1, 2, \dots, N$). Stosowana jest zasada przesuwanego horyzontu, co oznacza że w następnej chwili czasowej $k+1$ wykonywany jest kolejny pomiar wielkości wyjściowej, i procedura jest powtarzana dla takiego samego horyzontu N . Zakłada się również zerowy przyrost sygnału sterującego po upływie horyzontu sterowania.

Funkcja celu, określająca jakość regulacji na horyzoncie predykcji, ma najczęściej postać:

$$J(k) = \sum_{i=N_1}^N (\mathbf{y}_s(k+i|k) - \mathbf{y}(k+i|k))^T \mathbf{Q}(i) (\mathbf{y}_s(k+i|k) - \mathbf{y}(k+i|k)) + \sum_{i=0}^{N_u-1} \Delta \mathbf{u}(k+i|k)^T \mathbf{R}(i) \Delta \mathbf{u}(k+i|k) \quad (2.56)$$

gdzie: $\mathbf{y}_s(k+i|k)$ i $\mathbf{y}(k+i|k)$ – wektory wartości zadanych i wyjściowych, $\Delta \mathbf{u}(k+i|k)$ – wektor przyrostów sterowań, $\mathbf{Q}(i)$ i $\mathbf{R}(i)$ – macierze wag wektora uchybów i przyrostów sterowania.

Minimum funkcji celu $J(k)$ obliczane jest począwszy od chwili $k+N_1$ do końca horyzontu predykcji N . w celu predykcji wyjść $\mathbf{y}(k+i|k)$ niezbędny jest model matematyczny obiektu. Historycznie wykorzystywane były wyłącznie modele liniowe, ze względu na mniejsze wymagania co do mocy obliczeniowej sterownika. Obecnie wykorzystuje się również modele nieliniowe, wymagające optymalizacji nieliniowej, która jest trudna obliczeniowo i czasochłonna ze względu na występowanie minimów lokalnych. Najbardziej znane algorytmy predykcyjne to m.in.:

- DMC (ang. *Dynamic Matrix Control*) wykorzystujący dyskretny model liniowy i kwadratową funkcję kosztu. Wadą tychże było traktowanie ograniczeń w sposób przybliżony.

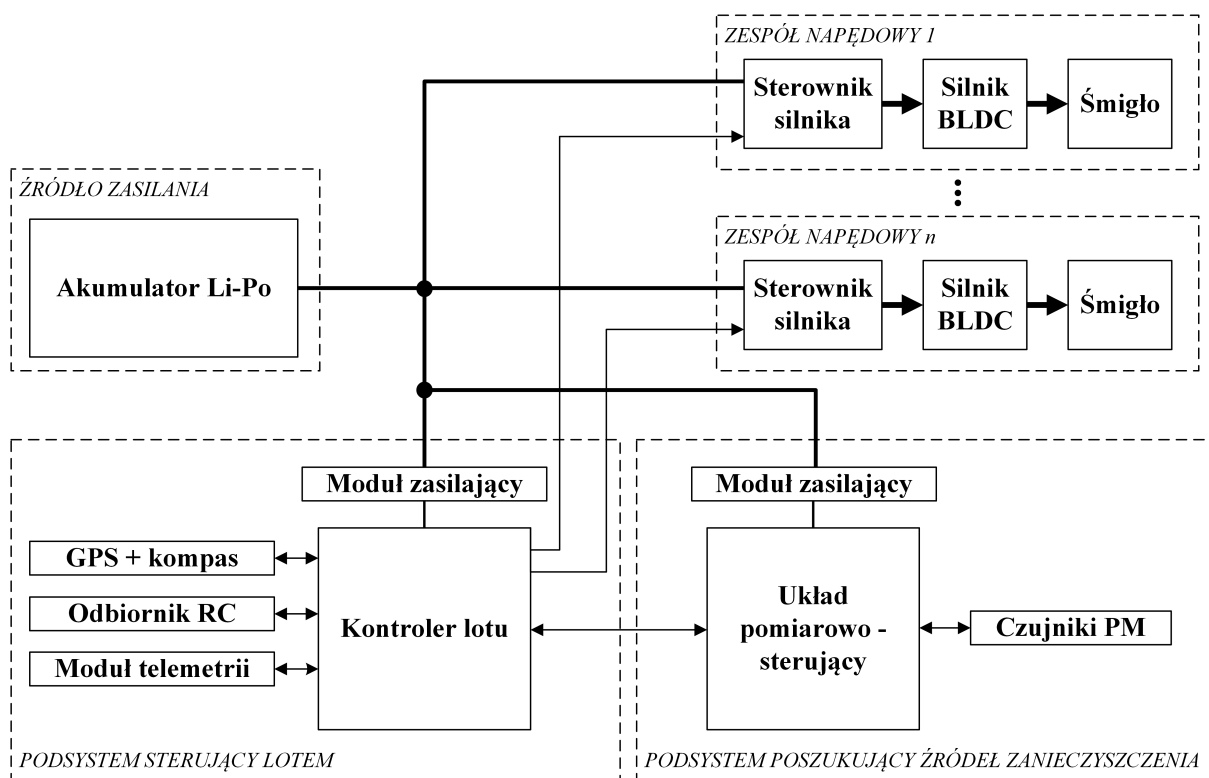
- QDMC (ang. *Quadratic Dynamic Matrix Control*) w których dla każdej dyskretnej chwili czasowej wyznaczone są sygnały sterujące wynikające z minimalizacji funkcji kosztu, przy liniowych ograniczeniach na sygnał sterujący i wyjściowy.
- GPC (ang. *Generalized Predictive Control*) w których zastosowano model obiektu opisany równaniami różnicowymi (transmitancją dyskretną).

Współczesne algorytmy predykcyjne wykorzystują model obiektu w postaci równań stanu.

2.4. Budowa układu sterującego robota latającego

W celu implementacji algorytmu sterowania zastosowano następujący podział robota na następujące podsystemy składowe:

- podsystemu sterującego lotem robota (szczegóły w podrozdziale 2.4.2),
- podsystemu poszukującego źródeł zanieczyszczenia (szczegóły w rozdz. 6),
- źródła zasilania, które stanowi akumulator litowo-polimerowy (Li-Po),
- zespołów napędowych (szczegóły w podrozdziale 2.4.1), których liczba odpowiada liczbie wirników robota.



Rys. 2.3. Schemat blokowy robota wielowirnikowego z podziałem na podsystemy składowe

Schemat blokowy robota uwzględniający wyżej wymieniony podział zaprezentowano na rysunku 2.3. Podsystem sterujący lotem robota jest odpowiedzialny za utrzymanie robota w powietrzu, oraz realizuje zadanie śledzenia trajektorii wyznaczonej przez podsystem poszukujący źródeł zanieczyszczenia. Głównym komponentem podsystemu sterującego lotem jest kontroler lotu *Pixhawk* [111], ale podsystem wyposażony jest również w dodatkowe podzespoły podrzędne takie jak: odbiornik GPS i zewnętrzny kompas, odbiornik aparatury

sterującej RC oraz radio telemetryczne. Kontroler lotu wyznacza wartości sygnałów sterujących, i na podstawie tychże sterownik silnika generuje odpowiednie napięcia na uzwojeniach silnika. Autorski podsystem poszukujący źródeł zanieczyszczenia jest odpowiedzialny za wykonywanie pomiarów i kierowanie robota na wymagane współrzędne. Został on wyposażony w odpowiednie czujniki zanieczyszczeń powietrza cząstkami stałymi. Oba podsystemy wyposażone są w moduły zasilające obniżające i stabilizujące napięcie z akumulatora. Wydzielenie podsystemów robota umożliwiło podział funkcji związanych bezpośrednio z lotem i algorytmami poszukiwania źródła zanieczyszczenia. Komunikacja w warstwie sprzętowej odbywa się z wykorzystaniem magistrali UART. Od strony programowej zaś wykorzystano protokół *Mavlink* [145].

2.4.1. Układ napędowy robota

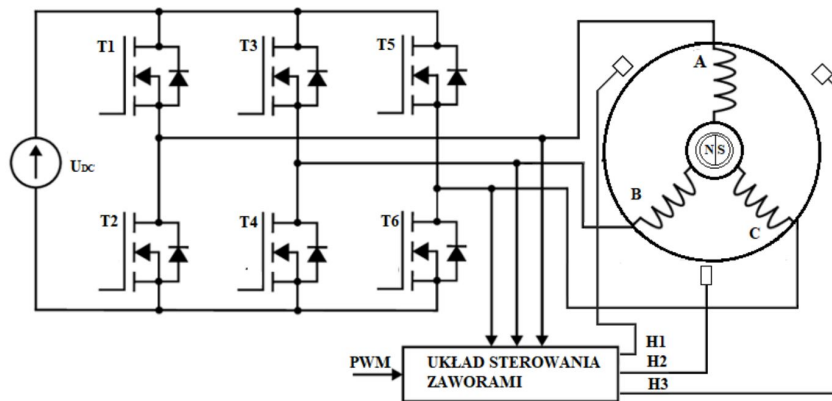
Pojedynczy napęd robota wielowirnikowego stanowi układ złożony z sterownika silnika, silnika BLDC oraz śmigła. Liczba napędów odpowiada liczbie wirników robota. Schemat blokowy układu napędowego zaprezentowano na rysunku 2.4.



Rys. 2.4. Schemat blokowy układu napędowego robota wielowirnikowego

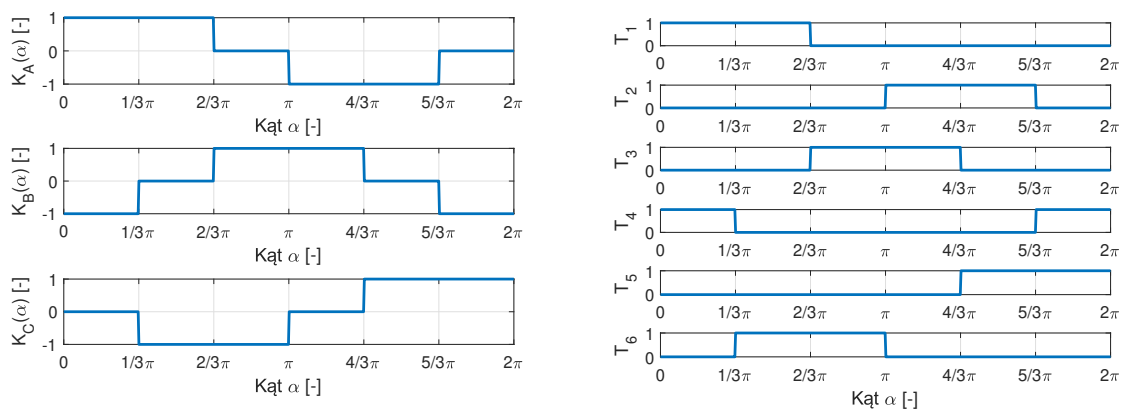
Układy napędowe z bezszczotkowymi synchronicznymi silnikami prądu stałego z magnesami trwałymi typu BLDC są stosowane powszechnie do napędu robotów latających ze względu na swoje zalety. Do zalet tych należą przede wszystkim [82, 56]: wysoka sprawność, mała masa i gabaryty silnika, duża trwałość i cicha praca układu napędowego zależąca praktycznie od jakości zastosowanych łożysk. Dodatkowo, silniki te pozbawione są wad silników wyposażonych w kłopotliwy i wymagający okresowej konserwacji komutator. Do głównych wad tego typu silnika należy zaliczyć wysoki koszt wynikający z zastosowania magnesów trwałych oraz konieczność zastosowania dodatkowego elektronicznego układu sterującego pracą silnika. Schemat podstawowego układu sterowania silnika BLDC zaprezentowano na rysunku 2.5. w takim układzie zarówno kierunek jak i prędkość obrotowa wirnika zależy od częstotliwości i kolejności przełączania tranzystorów $T1 - T6$ trójfazowego mostka tranzystorowego. w danej chwili zasilane są dwa z trzech uzwojeń silnika, czyli jednocześnie przewodzi jeden górny i jeden dolny tranzystor mostka (np. na rysunku $T1$ i $T4$).

Wyróżnia się dwie główne struktury układów sterowania (Rys. 2.8): klasyczne, w których stosuje się czujniki położenia wirnika względem stojana, oraz bezczujnikowe,



Rys. 2.5. Schemat podstawowego układu sterowania silnika BLDC [56]

gdzie położenie to określa się na podstawie pomiarów prądów i napięć. w przypadku robotów wielowirnikowych powszechnie stosuje się bezczujnikowe metody wykorzystujące siłę elektromotoryczną, co powoduje zmniejszenie liczby połączeń silnika z sterownikiem i zwiększa niezawodność układu napędowego. Określenie położenia wirnika odbywa się na podstawie obserwacji wartości napięcia na aktualnie niezasilanej fazie uzwojenia i napięcia punktu neutralnego. Metody te można stosować w zakresie wysokich prędkości obrotowych, gdyż wtedy wartość SEM jest odpowiednio duża aby na jej podstawie poprawnie określać położenie wirnika. Mikroprocesor sterujący w czasie rzeczywistym wyznacza położenie wirnika oraz oblicza pozostałe zmienne niezbędne do prawidłowego sterowania silnikiem i momentów przełączania zasilania kolejnych faz. w sterownikach silników dedykowanych do robotów wielowirnikowych stosuje się dedykowane oprogramowanie [58, 57].



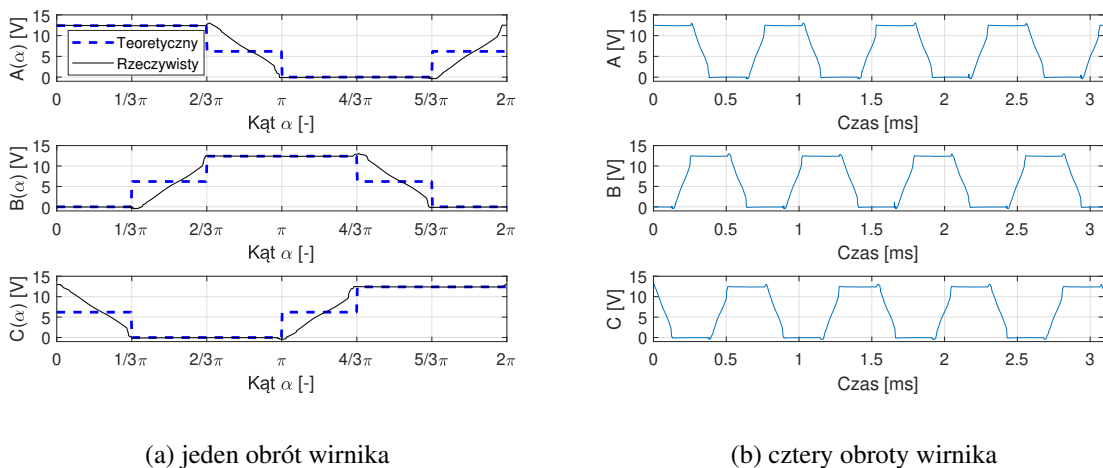
(a) funkcja komutatorowa $K_k(\alpha)$ dla faz $k = A, B, C$ (b) histogram sterowania tranzystorami $T_1 - T_6$

Rys. 2.6. Funkcja komutatorowa i histogram sterowania tranzystorami, na podstawie [81]

Prostownikowe działanie układu sterowania zaworami (komutatora elektronicznego) opisuje się funkcją komutatorową $K(\alpha)$ [81], zaprezentowaną na rysunku 2.6a. Kąt α mierzony jest między nieruchomą osią układu prądowego fazy a a osią wirującą magnesów stałych. Funkcja ta przyjmuje następujące wartości:

- $K_k(\alpha) = 1$, gdy początek fazy uzwojenia k jest połączony z dodatnim biegunem źródła napięcia. Wtedy dla fazy uzwojenia A na rysunku 2.5 przewodzi tranzystor $T1$.
- $K_k(\alpha) = -1$, gdy początek fazy uzwojenia k jest połączony z ujemnym biegunem źródła napięcia. Wtedy dla fazy uzwojenia A na rysunku 2.5 przewodzi tranzystor $T2$.
- $K_k(\alpha) = 0$, gdy początek fazy uzwojenia k nie jest połączony ani z dodatnim, ani z ujemnym biegunem źródła napięcia. Wtedy dla fazy uzwojenia A na rysunku 2.5 nie przewodzi ani tranzystor $T1$, ani $T2$.

Opisany sposób sterowania nosi nazwę sterowania trapezowego i polega na zasilaniu dwóch pasm uzwojenia, przy cyklicznym przełączaniu zasilanych faz A , B , C . Na rysunku 2.6b zaprezentowano histogram sterowania tranzystorami $T_1 - T_6$. Wartość 1 oznacza że dany tranzystor jest włączony, 0 natomiast że jest wyłączony dla określonej wartości kąta α . Na rysunku 2.7a porównano rzeczywisty i teoretyczny przebieg napięć na uzwojeniach silnika podczas jednego obrotu wirnika. Na rysunku 2.7b zaprezentowano przebieg czasowy podczas czterech obrotów wirnika. Wirnik silnika wykorzystanego do pomiarów obracał się z prędkością równą $1293,64 \text{ rad s}^{-1}$.

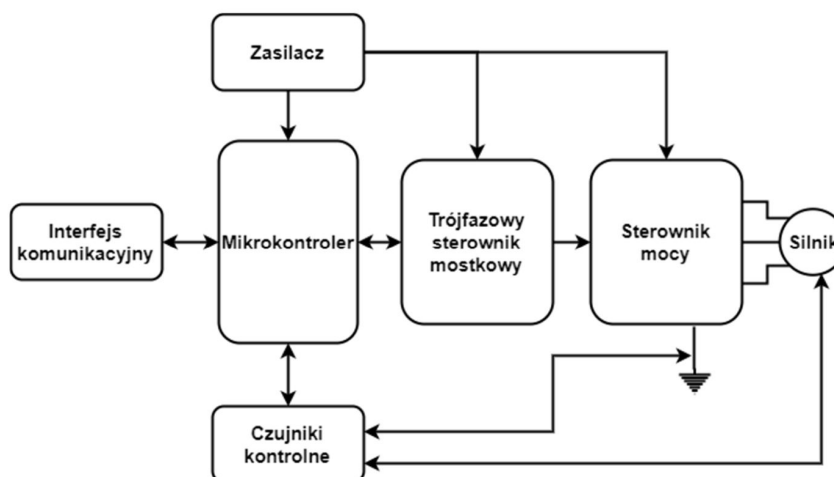


(a) jeden obrót wirnika

(b) cztery obroty wirnika

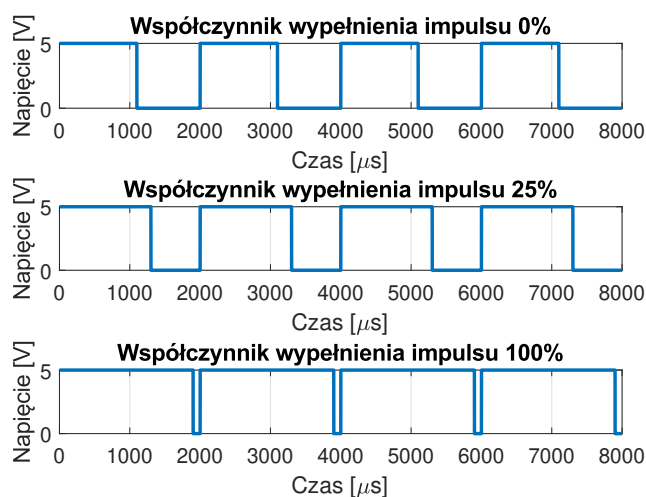
Rys. 2.7. Rzeczywiste przebiegi napięcia na uzwojeniach silnika BLDC przy sterowaniu trapezowym

Do sterownika silnika BLDC, poza zasilaniem, doprowadzonych jest zazwyczaj kilka sygnałów sterujących. Określają one m.in.: kierunek, prędkość obrotów czy wybór sposobu hamowania (poprzez wolny wybieg silnika albo szybkie polegające



Rys. 2.8. Schemat blokowy struktury układu sterowania silnika BLDC [56]

na zwarcie uzwojeń silnika). W przypadku sterowników silników dedykowanych do robotów wielowirnikowych wprowadza się pewne uproszczenia, gdyż sygnał sterujący stanowi jedynie sygnał PWM określający zadaną prędkość obrotową. Jest to związane z tym że kierunek obrotów danego wirnika nie zmienia się w czasie lotu. Podobnie nie stosuje się wyłączania napędów przy spadku napięcia zasilającego poniżej pewnej wartości progowej, gdyż spowodowałyby to upadek i w konsekwencji zniszczenie robota.



Rys. 2.9. Przebiegi sygnału sterującego dla współczynników wypełnienia impulsu 0%, 25% i 100%, odpowiadającym wartościom napięcia skutecznego 2,75 V, 3,25 V i 4,75 V

Przebieg sygnału sterującego PWM (ang. *Pulse Width Modulation*) do sterownika silnika zaprezentowano na rysunku 2.9. Okres sygnału i amplituda są stałe i wynoszą odpowiednio $2000 \mu\text{s}$ (500 Hz) i 5 V. Długość impulsu zmienia się w zakresie od

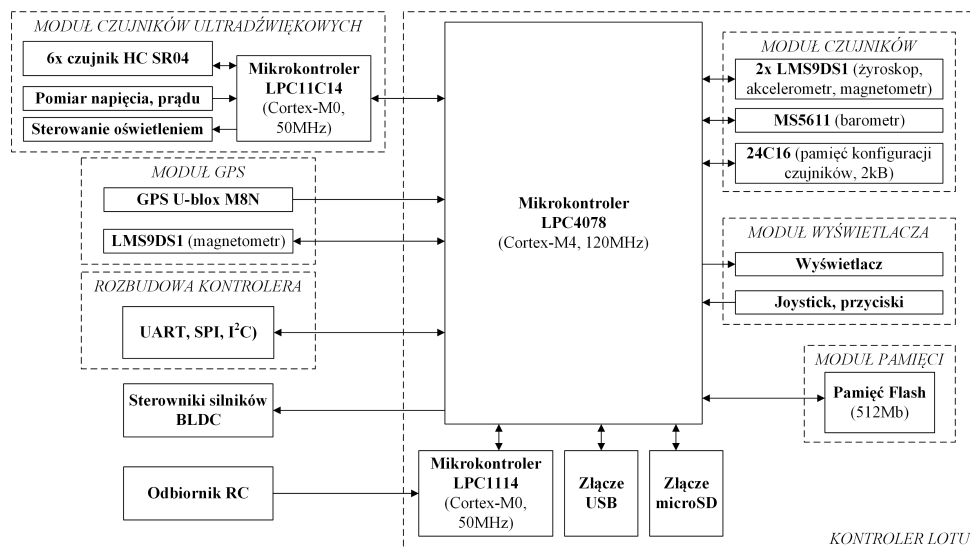
1100 do 1900 μs , co odpowiada współczynnikowi wypełnienia 0% do 100% (u_d). Odpowiada to wartościom napięcia skutecznego w zakresie od 2,75 V do 4,75 V (u_V). Zależność tą opisuje się równaniem:

$$u_V = 2,75 + 0,02 \cdot u_d \quad (2.57)$$

gdzie: u_d , u_V – sygnał sterujący wyrażony odpowiednio jako współczynnik wypełnienia impulsu i jako wartość napięcia skutecznego. Ograniczenie na długość impulsu sterującego stosuje się aby zapewnić możliwość wykrywania zaniku sygnału sterującego w celu wyłączenia silnika ze względów bezpieczeństwa podczas awarii kontrolera lotu.

2.4.2. Podsystem sterujący lotem robota

Najważniejszym komponentem podsystemu sterującego lotem robota jest kontroler lotu. w tym kontrolerze zaimplementowane są algorytmy sterowania robota wielowirnikowego, pozwalające na śledzenie zadanej trajektorii, wyznaczonej przez podsystem poszukujący źródeł zanieczyszczenia. Pracę nad własnym systemem sterowania prezentowano w [195, 52, 196]. Schemat blokowy własnego kontrolera lotu zaprezentowano w 2.10.



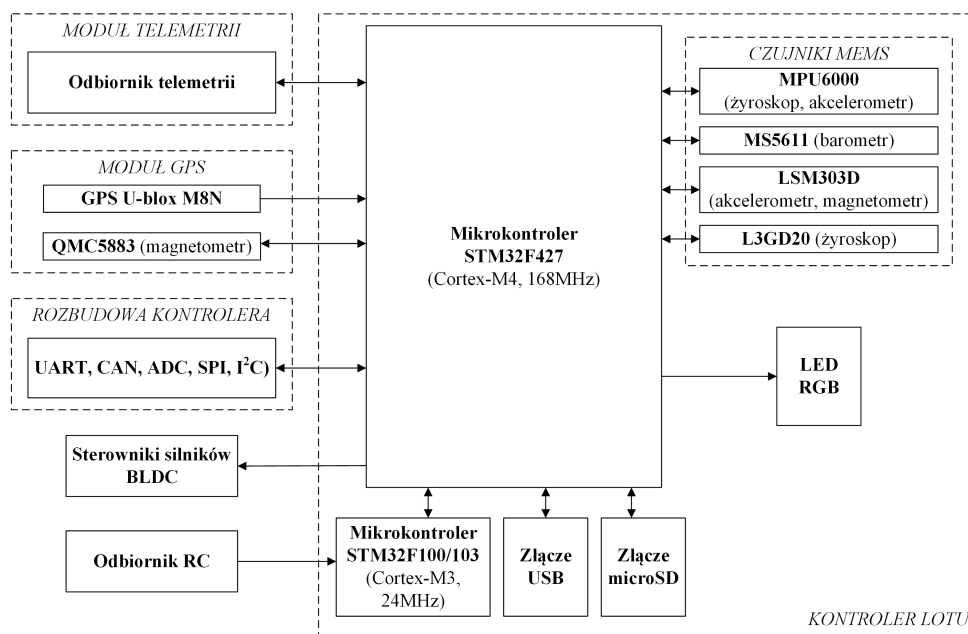
Rys. 2.10. Schemat blokowy własnego kontrolera lotu, na podstawie [195]

Własny kontroler lotu ma modułową konstrukcję. Główne komponenty to mikrokontroler LPC4078 firmy NXP, moduł z czujnikami pomiarowymi MEMS (ang. *Microelectromechanical systems*), dodatkowy mikrokontroler LPC1114 do odbioru sygnałów z aparatury sterującej, moduł czujników ultradźwiękowych do wykrywania przeszkód terenowych czy moduł GPS. Własne rozwiązanie daje możliwość implementacji zarówno algorytmów poszukiwania, jak i sterowania w jednym podsystemie. Jednakże w celu uproszczenia konstrukcji na obecnym etapie prac zastosowano omówiony wcześniej podział na podsystem sterujący lotem

i podsystem wyszukiwania. Dlatego jako kontroler lotu zastosowano ostatecznie kontroler lotu Pixhawk [111], obecnie retrospektywnie określany jako Pixhawk 1.



Rys. 2.11. Kontroler lotu mRo Pixhawk (mRobotics) [110]



Rys. 2.12. Schemat blokowy kontrolera lotu Pixhawk, na podstawie [110]

Kontroler Pixhawk ten należy do szerokiej gamy kontrolerów o otwartej architekturze sprzętowej (ang. *open-hardware*), z oprogramowaniem PX4 pracującym pod kontrolą systemu operacyjnego czasu rzeczywistego RTOS (ang. *Real-time Operating System*) NuttX. Zastosowany wariant pierwotnie został wprowadzony na rynek przez firmę 3D Robotics

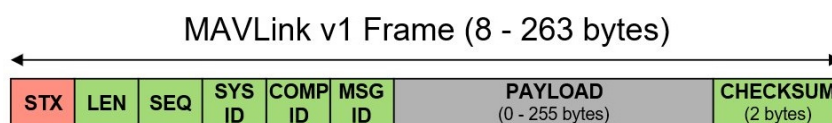
(3DR), gdzie szybko okazał się sukcesem zarówno w społecznościach akademickich, wśród hobbystów oraz w przemyśle. Mimo, że firma 3DR obecnie nie produkuje już tego kontrolera, to nadal na rynku dostępne są w pełni zgodne sprzętowo zamienniki wielu producentów, np. firmy mRobotics (Rys. 2.11). Stąd też ta architektura sprzętowa i oprogramowanie Pixhawk stanowią powszechnie znane i stosowane standardy budowanych dronów. Należy również dodać, że na chwilę obecną dostępne są nowsze kontrolery o zgodnej architekturze. Najważniejsze parametry kontrolera Pixhawk zamieszczono w tabeli 2.6. Schemat blokowy kontrolera zaprezentowano na rysunku 2.12.

Tabela 2.6. Wybrane parametry kontrolera Pixhawk [110]

Mikrokontroler główny	STM32F427 Cortex-M4, 168 MHz
Mikrokontroler pomocniczy	STM32F100\103 Cortex-M3, 24 MHz
Wbudowane czujniki MEMS	L3GD20 (żyroskop), LSM303D (akcelerometr i magnetometr), MPU6000 (żyroskop i akcelerometr), MS5611 (barometr)
Złącza komunikacyjne	UART, CAN, PPM, PWM, I ² C, SPI, ADC, USB
Wymiary zewnętrzne	82 mm × 50 mm × 16 mm
Masa	38 g

Komunikacja z kontrolerem lotu w warstwie sprzętowej odbywa się z wykorzystaniem magistrali UART, od strony programowej z wykorzystaniem protokołu MAVLink (ang. *Micro Air Vehicle Message Marshalling Library*) [145]. z wykorzystaniem tego protokołu wydawane są zarówno polecenia do podsystemu sterującego lotem w celu kierowania robota na pożądane współrzędne, jak i odczytywane są informacje z systemu pokładowego (m.in.: aktualna pozycja GPS, napięcie akumulatora czy pobierany prąd). Protokół MAVLink został wprowadzony w 2009 roku i jest dedykowany zarówno do komunikacji z dronem, oraz między komponentami pokładowymi drona. Protokół występuje w dwóch wersjach: podstawowej v1 i rozszerzonej v2, wprowadzającej m.in. szyfrowanie wiadomości. Nowszy wariant jest kompatybilny wstecznie z wersją pierwszą. Na chwilę obecną został wdrożony w wielu systemach, w tym komercyjnych, gdzie umożliwia łączenie komponentów pokładowych różnych producentów. Protokół umożliwia jednoczesną współpracę 255 komponentów w jednej sieci. Ponadto cechuje się wysoką wydajnością, gdyż minimalna długość ramki danych wynosi 8 i 14 bajtów odpowiednio dla wersji v1 i v2. Komunikacja może być prowadzona za pośrednictwem zakłóconych kanałów transmisyjnych, w tym takich o dużych opóźnieniach, gdyż protokół zapewnia mechanizmy detekcji utrat i uszkodzeń pakietów. Ramka protokołu MAVLink w wersji v1 zaprezentowano na rysunku

2.13, jej długość wynosi minimalnie 8, maksymalnie 263 bajty. Opis pól zamieszczono w tabeli 2.7.



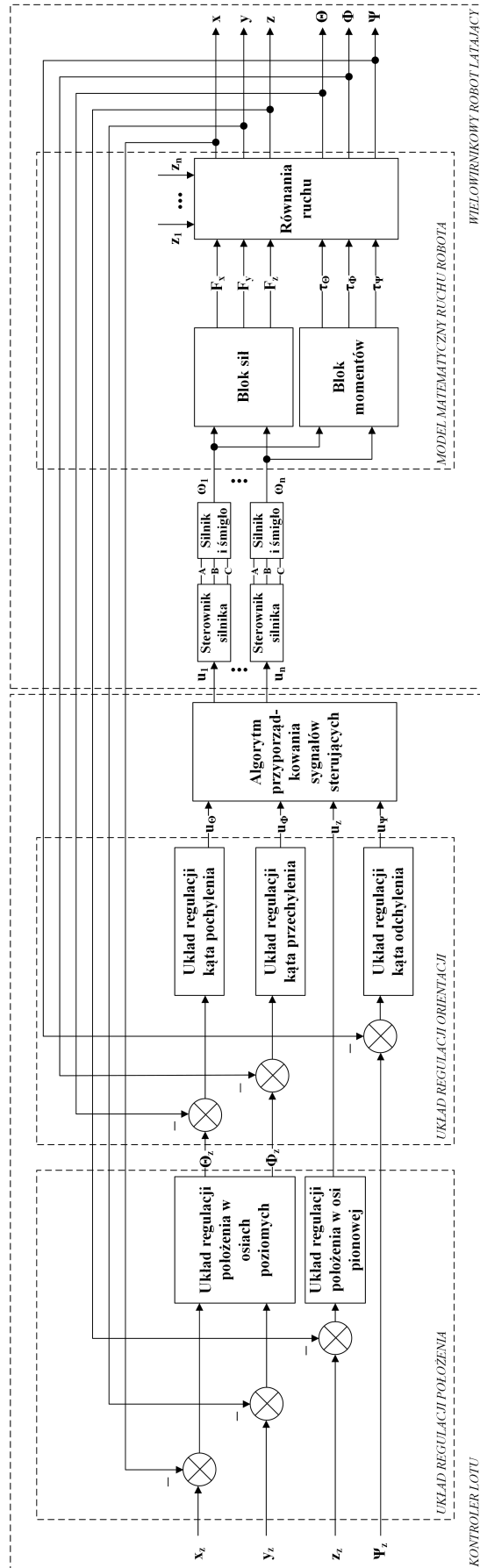
Rys. 2.13. Ramka danych protokołu *MAVLink v1* [145]

Tabela 2.7. Opis pól ramki danych protokołu *MAVLink v1* (na podstawie [145])

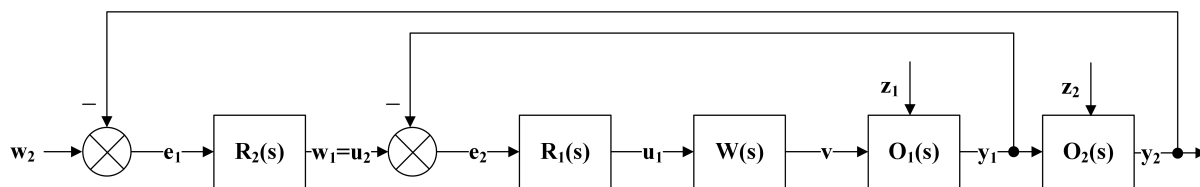
Nr bajtu	Symbol	Znaczenie
0	STX	Znacznik początku pakietu
1	LEN	Liczba bajtów pola <i>PAYLOAD</i>
2	SEQ	Numer sekwencji
3	SYS ID	Znacznik systemu
4	COMP ID	Znacznik podsystemu
5	MSG ID	Znacznik typu wiadomości
6 – (n+5)	PAYLOAD	Właściwe dane wiadomości
(n+6) – (n+7)	CHECKSUM	Suma kontrolna CRC-16

Na rysunku 2.14 zaprezentowano schemat blokowy układu sterowania robota. Układ sterowania składa się z układu regulacji położenia oraz układu regulacji orientacji [27, 79, 151]. Wartościami zadanymi w układzie regulacji są jedynie położenia w trzech osiach x_z , y_z i z_z oraz wartość kąta odchylenia Ψ_z , jako że śledzenie trajektorii w osiach poziomych odbywa się na podstawie zadawania odpowiednich wartości kątów przechylenia i pochylenia (Θ_z i Φ_z). Regulatory położenia w osiach poziomych zostały zaznaczone na rysunku wspólnie, gdyż w tym bloku występuje jeszcze dodatkowo rzutowanie z osi lokalnych robota na globalne, w zależności wartości kąta odchylenia. Żeby nie komplikować rysunku, w pętli sprzężenia zwrotnego zaznaczono wyłącznie kąty (Θ , Φ i Ψ) i położenia (x , y i z).

Na wyjściu regulatorów orientacji znajduje się dodatkowy blok. Jest to algorytm syntezy (przyporządkowania) sygnałów sterujących z regulatorów do odpowiednich zespołów napędowych, określany również jako mikser [73, 79]. Wyjściami z tego bloku są sygnały sterujące sterownikami silników robota ($u_1 - u_n$). Jak już wspomniano w podrozdziale 2.1, odpowiednia zmiana prędkości obrotowych wirników, w parach, powoduje przemieszczanie (blok sił: F_x , F_y i F_z) i zmianę orientacji robota (blok momentów: τ_x , τ_y i τ_z) [93]. Na rysunku zaznaczono również zakłócenia działające na sterowany obiekt ($z_1 - z_n$).



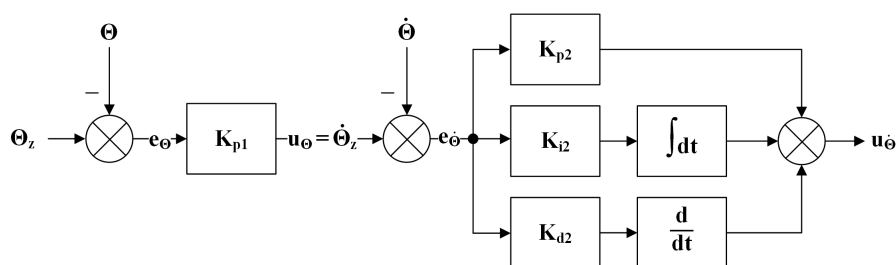
Rys. 2.14. Schemat struktury układu sterowania robota wielowirnikowego z modelem matematycznym



Rys. 2.15. Schemat struktury kaskadowego układu regulacji. Oznaczenia bloków na rysunku: R_1 , R_2 – odpowiednio regulatory podrzędny i nadrzędny, W – układ wykonawczy, O_1 , O_2 – odpowiednio proces wtórny i pierwotny obiektu

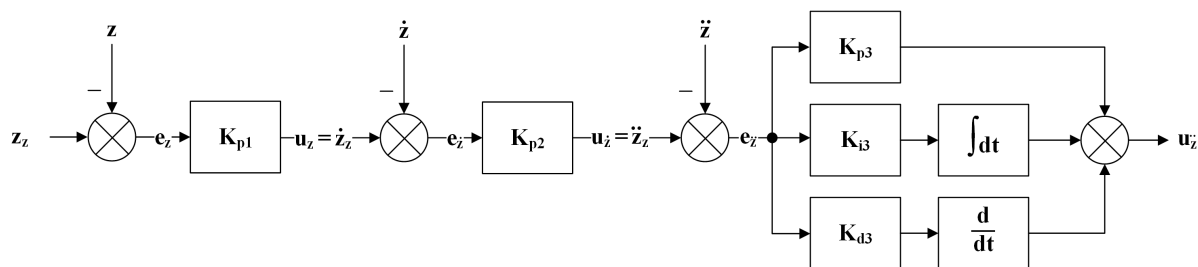
Taka struktura układu sterowania robota, gdzie jeden regulator steruje nastawami kolejnego, nazywana jest kaskadowym układem regulacji. Wyodrębniony układ dla dwóch regulatorów zaprezentowano na rysunku 2.15. w tym układzie nadrzędny (zewnętrzny) regulator R_2 pracuje w zewnętrznej pętli sprzężenia zwrotnego, która steruje pierwotną zmienną procesową, taką jak położenie. Regulator podrzędny (wewnętrzny) R_1 pracuje zaś w wewnętrznej pętli, sterując wtórną zmienną procesową. Wartością zadaną tego regulatora w_1 jest sygnał sterujący u_2 regulatora nadrzędnego. Wtórna zmienna procesowa (taka jak prędkość), zazwyczaj podlega szybszym zmianom. Podrzędny regulator steruje elementem wykonawczym W , oddziałując za jego pośrednictwem bezpośrednio na proces wtórny. w takim układzie wyróżnia się dwie wielkości regulowane: pierwotną y_2 dla regulatora zewnętrznego i wtórną y_1 dla regulatora wewnętrznego.

Na kolejnych rysunkach zaprezentowano szczegóły układ regulacji z wykorzystaniem regulatorów PID. Na rysunku 2.16 zaprezentowano schemat struktury układów regulacji wchodzących w skład układu regulacji orientacji z rysunku 2.14. Struktura kaskadowa układów regulacji kątów przechylenia, pochylenia i odchylenia jest jednakowa. Jako regulator główny zastosowano regulator P, jako pomocniczy PID.



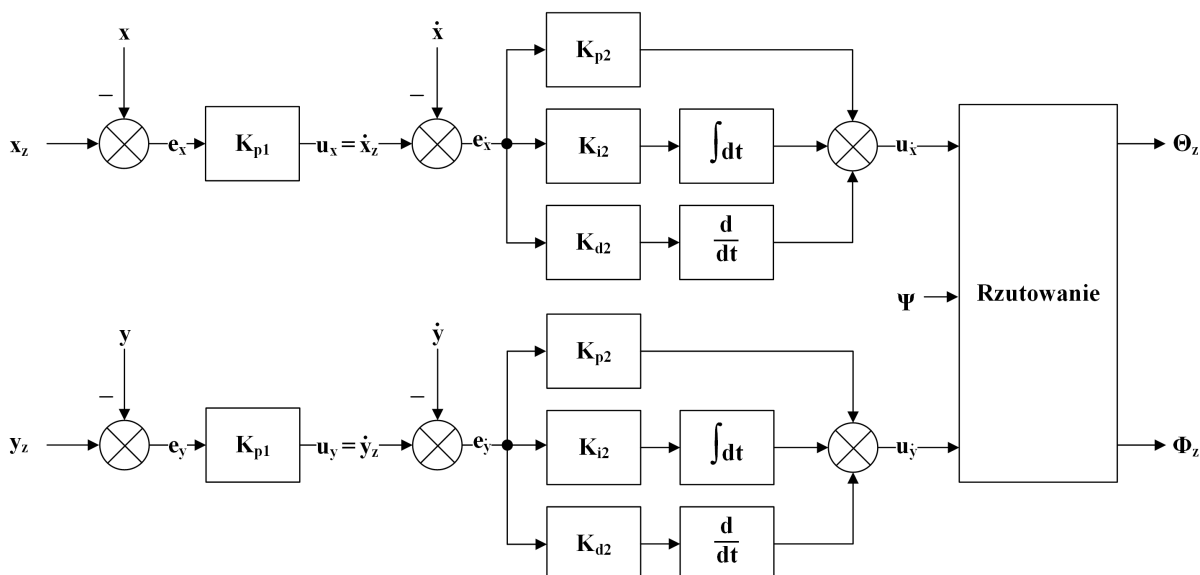
Rys. 2.16. Schemat struktury układu regulacji kąta pochylenia. Oznaczenia na rysunku: K_{p1} , K_{p2} , K_{i2} i K_{d2} – parametry układów regulacji kąta i prędkości kątowej wokół osi X (pochylenia), Θ – kąt pochylenia, e – uchyb, u – sygnał sterujący

Struktura układu regulacji położenia jest odmienna dla osi pionowej (Z) i poziomych (X i Y). Na rysunku 2.17 zaprezentowano schemat struktury układu regulacji w osi pionowej. Jako regulator główny zastosowano regulator P, jako pomocniczy P i PID.



Rys. 2.17. Schemat struktury układu regulacji położenia w osi pionowej. Oznaczenia na rysunku: K_{p1} , K_{p2} , K_{p3} , K_{i3} i K_{d3} – parametry układów regulacji położenia, prędkości i przyspieszenia wzdłuż osi Z , z – położenie na osi Z , e – uchyb, u – sygnał sterujący

Na rysunku 2.18 zaprezentowano schemat struktury układu regulacji w osiach poziomych. Jako regulator główny zastosowano regulator P, jako pomocniczy PID. Wartości parametrów obu regulatorów (X i Y) są jednakowe.



Rys. 2.18. Schemat struktury układu regulacji położenia w osiach poziomych. Oznaczenia na rysunku: K_{p1} , K_{p2} , K_{i2} i K_{d2} – parametry układów regulacji położenia i prędkości wzdłuż osi X i Y , x , y – położenia na osi X i Y , e – uchyb, u – sygnał sterujący

Dodatkowy blok *Rzutowanie* konieczny jest do rzutowania sygnałów sterujących z układu globalnego na układ lokalny robota, w zależności od wartości kąta odchylenia ψ . Po rzutowaniu, wyjścia z tych dwóch regulatorów stanowią sygnały sterujące kątami przechylenia i pochylenia. Zależność ta jest opisana jako:

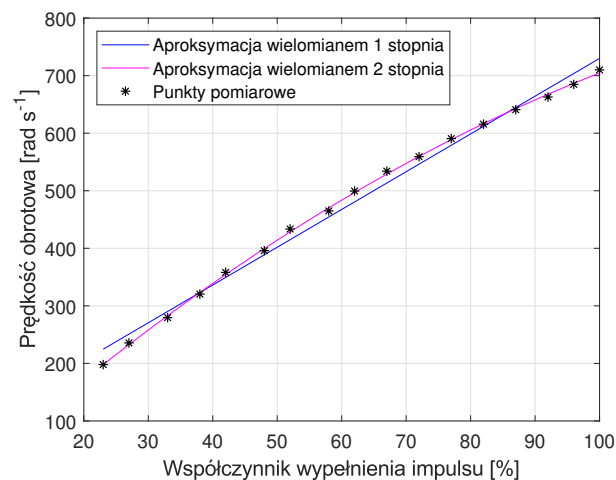
$$\begin{bmatrix} \Theta_z \\ \Phi_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_\psi & S_\psi \\ -S_\psi & C_\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\dot{x}} \\ u_{\dot{y}} \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

gdzie: S_ψ , C_ψ – odpowiednio sinus i kosinus kąta odchylenia.

Kolejnym istotnym elementem układu sterowania rysunku 2.14 jest algorytm syntezy sygnałów sterujących z układu regulacji na sygnały sterujące do sterowników silników. Postać tego bloku wynika z lokalizacji wirników względem środka ciężkości robota i dla robota o sześciu wirnikach jest określony jako:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & -1 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 1 \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & -1 & 1 \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & 1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 1 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\theta \\ u_\phi \\ u_\psi \\ u_z \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

Wyznaczoną eksperymentalnie zależność pomiędzy sygnałem sterującym sterownika silnika (współczynnikiem wypełnienia impulsu) u_i , a prędkością obrotową silnika ω_i zaprezentowano na rysunku 2.19. Badania na stanowisku hamowni opisane zostały w podrozdziale 5.2).



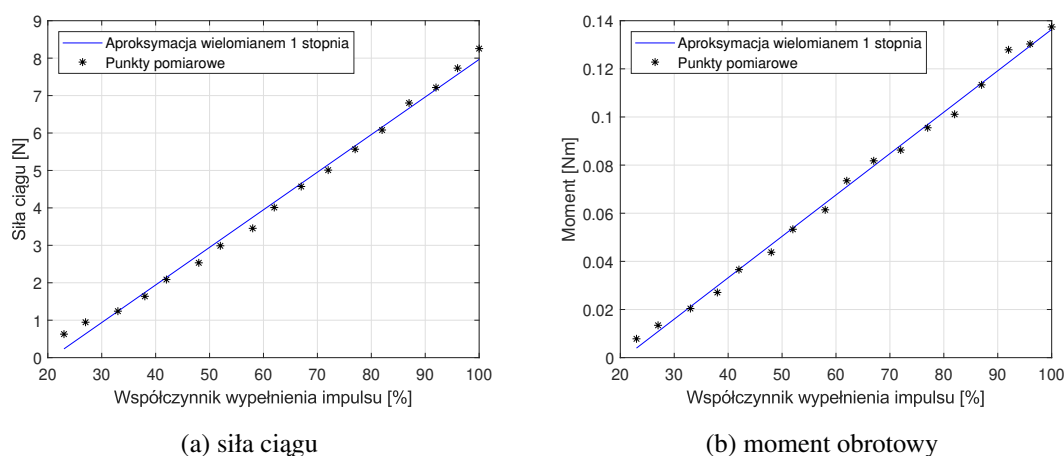
Rys. 2.19. Wyznaczona eksperymentalnie zależność pomiędzy współczynnikiem wypełnienia impulsu a prędkością obrotową silnika

Zależność aproksymowano z wykorzystaniem wielomianów 1 i 2 stopnia. Zależności proste i odwrotne podane na rysunku 2.19 zamieszczono w tabeli 2.8. Współczynnik wypełnienia podano na rysunku w zakresie od 20% do 100% ponieważ w tym zakresie zawiera się użyteczny zakres pracy silnika.

Tabela 2.8. Zależności pomiędzy współczynnikiem wypełnienia impulsu a prędkością obrotową silnika z śmigłem z rysunku 2.19

Zależność	Aproksymacja wielomianem 1 stopnia	Aproksymacja wielomianem 2 stopnia
Prosta	$\omega_i = 6,5626 \cdot u_i + 73,7526$	$\omega_i = -0,0286 \cdot u_i^2 + 10,1011 \cdot u_i - 19,1495$
Odwrotna	$u_i = 0,1510 \cdot \omega_i - 10,5909$	$u_i = 0,0001 \cdot \omega_i^2 + 0,0601 \cdot \omega_i + 7,8268$

Z praktycznego punktu widzenia, należy jeszcze rozpatrzyć zależność pomiędzy sygnałem sterującym sterownika silnika u_i , a siłą ciągu F_i (rysunek 2.20a) i momentem obrotowym M_i (rysunek 2.20b).



Rys. 2.20. Wyznaczone eksperymentalnie zależności pomiędzy współczynnikiem wypełnienia impulsu a siłą ciągu i momentem

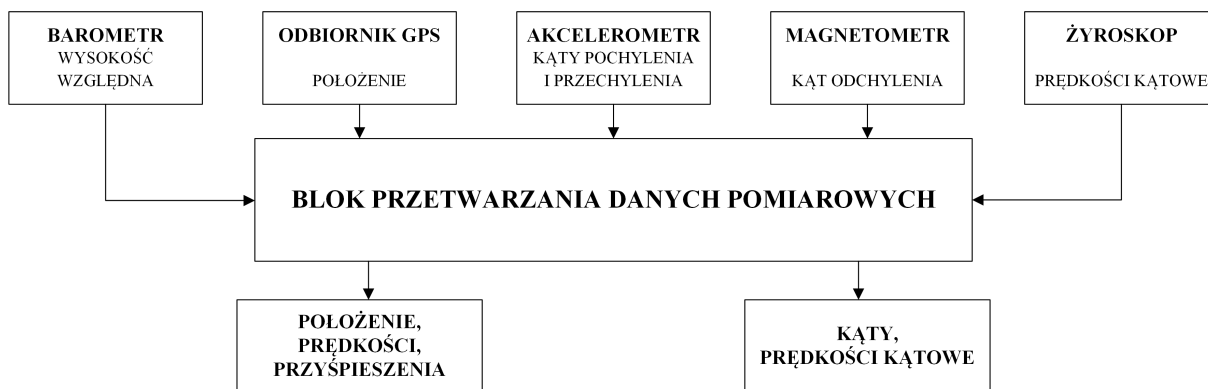
Tabela 2.9. Wyznaczone zależności pomiędzy współczynnikiem wypełnienia impulsu a siłą ciągu i momentem obrotowym

Zależność	Siły ciągu	Momentu
Prosta	$F_i = 0,1004 \cdot u_i - 2,0753$	$M_i = 0,0017 \cdot u_i - 0,0356$
Odwrotna	$u_i = 9,8967 \cdot F_i + 20,9261$	$u_i = 579,2429 \cdot M_i + 20,8549$

Jako że zależności te mają charakter liniowy, aproksymowano je wyłącznie z wykorzystaniem wielomianów 1 stopnia. Zależności proste i odwrotne podane zamieszczono w tabeli 2.9. Zależności odwrotne pozwalają wyznaczyć wartość współczynnika wypełnienia impulsu przy założeniu wymaganej wartości siły ciągu w układzie sterowania robota. Z liniowej

zależności pomiędzy tymi wartościami wynika uzasadnienie zastosowania regulatorów PID w układzie regulacji.

Ostatnie trzy bloki z rysunku 2.14 dotyczą modelu matematycznego ruchu robota. Dla robota o sześciu wirnikach, *Blok sił* opisany jest równaniem 2.8, *Blok momentów* opisany jest równaniem 2.9, *Równania ruchu* opisano równaniami 2.30 – 2.35.



Rys. 2.21. Sposób przetwarzania danych pomiarowych

W rzeczywistym układzie sterowania orientacja kątowna i położenie robota wyznaczone jest nie na podstawie modelu (jak na rys. 2.14), a na podstawie danych pomiarowych z pokładowych czujników z wykorzystaniem m.in. rozszerzonego filtru Kalmana EKF (ang. *extended Kalman filter*) [67]. Sposób przetwarzania danych pomiarowych przedstawiono schematycznie na rysunku 2.21. Położenie robota wyznacza się na podstawie odbiornika GPS, barometru i akcelerometru. Czujniki MEMS (ang. *microelectromechanical system*): żyroskop, akcelerometr i magnetometr (kompas) zostają wykorzystane do wyznaczenia orientacji kątowej robota, pozbawioną błędów wynikających z ich specyfiki. Najbardziej istotne niedoskonałości tych czujników są następujące. Żyroskop cechuje się wolno zmiennym błędem systematycznym polegającym na tym że do mierzonej wartości prędkości kątowej dodawana jest pewna stała wartość (dryft), która jest zależna od temperatury otoczenia. Akcelerometr cechuje się szumem, dodatkowe zakłócenia wynikają także z ruchu obiektu którego orientacja kątowna jest wyznaczana. Magnetometr cechuje się szumem oraz wrażliwością na zakłócenia pola magnetycznego, pochodzącą również od napędów robota.

Aby robot miał możliwość poruszania się po zadanych współrzędnych GPS [177], w układzie występują dodatkowe czujniki, na podstawie których wyznacza się położenie robota. Są to: odbiornik GPS oraz barometr, z którego na podstawie mierzonego ciśnienia wyznacza się wysokość względną. Zastosowany kontroler lotu umożliwia podłączenie innego rodzaju czujników pozwalających określić położenie w przestrzeniach bez zasięgu sygnału GPS, np. optycznych.

2.5. Dobór parametrów algorytmu sterowania lotem na podstawie dynamicznych równań ruchu i metody planowania eksperymentu

Każdy z omówionych algorytmów sterowania ruchem robota (PID, LQR, MPC) ma swoje zalety i wady. Ostatecznie jednak, w układzie regulacji w zastosowanym kontrolerze lotu wykorzystano algorytmy PID, ze względu na minimalny wymagany nakład obliczeniowy. Ta cecha algorytmu ma szczególnie istotne znaczenie ponieważ do prawidłowej pracy robota latającego wymagane są duże częstotliwości próbkowania w pętli sterowania. Algorytmy LQR i MPC cechują się znacznie większym wymaganym nakładem obliczeniowy dla nieliniowych obiektów, gdzie zadania optymalizacji muszą być rozwiązywane w każdym kroku próbkowania. Z wykorzystaniem algorytmu PID możliwe jest zastosowanie kaskadowego układu regulacji, gdyż w tym układzie sterowania daje się wyróżnić wielkości pomocnicze (prędkości, przyspieszenia), dla których opóźnienie w stosunku do sygnału zakłócającego jest znacznie mniejsze niż opóźnienie głównej wielkości regulowanej (położenia) [32]. W takim układzie regulator główny to P, pomocniczy to PID.

Do dobrania 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 (Rys. 2.17) dobierano 4 wartości parametrów: K_{p1} , K_{p2} , K_{p3} i K_{i3} . Tym samym założono strukturę P-P-PI, bo przy niezerowej wartości parametru K_{d3} układ nie był stabilny. Zaplanowano całkowity eksperyment dwupoziomowy [55] dla 4 parametrów, czyli wykonano łącznie 16 symulacji gdzie w każdym przypadku przyjęto odmienną kombinację założonych wartości minimalnych i maksymalnych każdego z parametrów. Jako funkcję celu przyjęto wskaźnik jakości J w postaci całki z kwadratu sygnału uchybu (podane w tabeli 2.5) regulatora głównego. Dodatkowo wprowadzono ograniczenie na sygnał sterujący ostatniego regulatora pomocniczego (przyspieszenia), że maksymalny współczynnik wypełnienia sygnału sterującego u_{max} (sygnał sterujący u zmienia się w zakresie $\langle 0\%, 100\% \rangle$) podawanego na wejście sterownika silnika nie może przekroczyć wartości progowej u_t przyjętej na 70%:

$$\arg \min_{t_1, t_2, t_3, t_4} J(t_1, t_2, t_3, t_4) \text{ pod warunkiem, że: } u_{max}(t_1, t_2, t_3, t_4) < u_t \quad (2.60)$$

gdzie: $t_1 \in \langle t_{1,min}, t_{1,max} \rangle$, $t_2 \in \langle t_{2,min}, t_{2,max} \rangle$, $t_3 \in \langle t_{3,min}, t_{3,max} \rangle$, $t_4 \in \langle t_{4,min}, t_{4,max} \rangle$. Przyjęto takie kryterium aby przede wszystkim umożliwić jak najdokładniejsze śledzenie zadanej trajektorii. Jako że w algorytmie syntezy sygnałów sterujących poszczególne wyjścia z regulatorów są sumowane, to ograniczenie na sygnał sterujący wprowadzono dlatego, aby zapewnić zapas dla pozostałych układów.

Dla czterech zmiennych standaryzowanych $t_1 - t_4$ w przestrzeni eksperymentu $(-1, 1)$ założono funkcję regresji w postaci:

$$f(t_1, t_2, t_3, t_4) = a_0 + a_1 t_1 + a_2 t_2 + a_3 t_3 + a_4 t_4 + a_5 t_1 t_2 + a_6 t_1 t_3 + a_7 t_1 t_4 + a_8 t_2 t_3 + a_9 t_2 t_4 + a_{10} t_3 t_4 \quad (2.61)$$

Wartości parametrów naturalnych K_{p1} , K_{p2} , K_{p3} i K_{i3} skalowane są na parametry standaryzowane $t_1 - t_4$ w sposób liniowy. Współczynniki funkcji regresji wykonano poprzez aproksymację metodą najmniejszych kwadratów. Minimum funkcji regresji poszukiwano z wykorzystaniem 100000 punktów wyznaczonych metodą hipersześcianów łacińskich LHS (ang. *Latin Hypercube Sampling*). Wszystkie symulacje przeprowadzono dla manewru wznoszenia robota o 2 m w czasie 2 s, czyli z prędkością 1 m s^{-1} . Całkowity czas jednej symulacji wynosił 10 s. Parametry silnika przyjęto zgodnie z tabelą 2.1. Poza tym przyjęto układ sześciu wirników dla robota o masie 2,4 kg i momentach bezwładności $I_{xx} = I_{yy} = 0,1 \text{ kg m}^2$, $I_{zz} = 0,2 \text{ kg m}^2$. Ponadto, początkowo robot znajduje się w stanie zawisu gdzie prędkości obrotowe poszczególnych wirników są równe i wynoszą $\omega_h = 482 \text{ rad s}^{-1}$ (równanie 2.40). Założone i otrzymane wartości parametrów zestawiono w tabeli 2.10. Analizowany układ był stabilny dla wszystkich kombinacji wartości minimalnych i maksymalnych założonych parametrów.

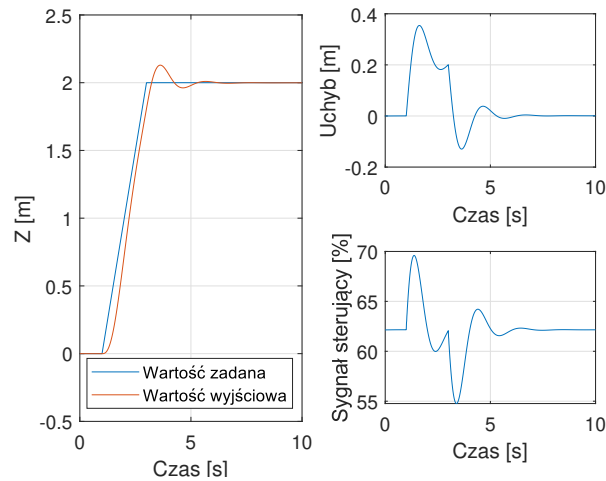
Tabela 2.10. Wartości parametrów układu regulacji położenia w osi pionowej o strukturze z rysunku 2.17

Oznaczenie parametru		Wartość parametru		
Standaryzowane	Naturalne	Minimalna	Maksymalna	Otrzymana
t_1	K_{p1}	1,50	4,50	4,4573
t_2	K_{p2}	6,00	12,00	6,6114
t_3	K_{p3}	0,75	2,25	2,2308
t_4	K_{i3}	0,15	0,75	0,1863
—	K_{d3}	0,00	0,00	0,0000

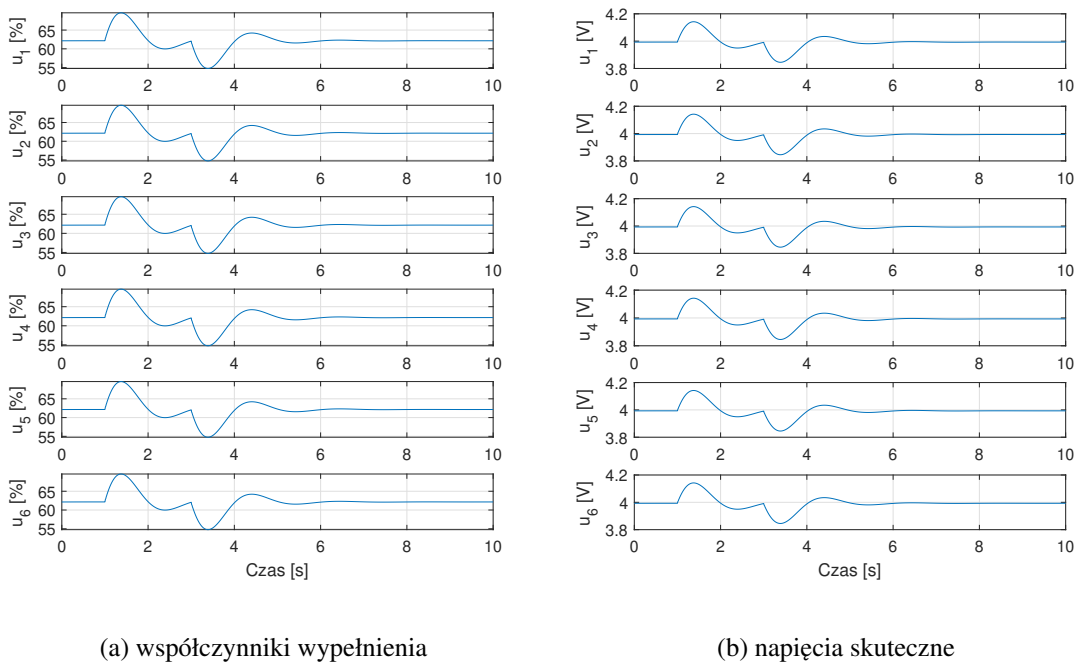
Tabela 2.11. Otrzymane współczynniki funkcji regresji określonej równaniem 2.61

Współczynnik	a_0 (-)	—	a_1 (t_1)	a_2 (t_2)	a_3 (t_3)	a_4 (t_4)
Wartość	0,6027	—	-0,3872	-0,1621	-0,1505	-0,0230
Współczynnik	a_5 ($t_1 \cdot t_2$)	a_6 ($t_1 \cdot t_3$)	a_7 ($t_1 \cdot t_4$)	a_8 ($t_2 \cdot t_3$)	a_9 ($t_2 \cdot t_4$)	a_{10} ($t_3 \cdot t_4$)
Wartość	0,0647	0,0568	0,0271	0,1104	-0,0047	0,0116

Wszystkie współczynniki funkcji regresji zebrano w tabeli 2.11. Na podstawie wartości współczynników $a_1 - a_4$ można wnioskować o istotności odpowiadającego parametru. Należy więc stwierdzić, że istotność parametru K_{p1} jest największa, K_{i3} jest najmniejsza, a pozostałe mają podobne znaczenie.



Rys. 2.22. Przebiegi wejściowe i wyjściowe układu regulacji położenia w osi pionowej dla dobranych wartości parametrów na podstawie planu eksperymentu



(a) współczynniki wypełnienia

(b) napięcia skuteczne

Rys. 2.23. Parametry opisujące przebiegi sygnałów sterujących poszczególnych silników robota podczas wznoszenia

Na rysunku 2.22 zaprezentowano przebiegi wejściowe i wyjściowe układu regulacji położenia w osi pionowej dla dobranych wartości parametrów z wykorzystaniem opisanej procedury. Jako że założono że początkowo robot jest w stanie zawisu, to do wyjścia regulatora dodawana jest wartość 62.14%. Wartość ta została określona na podstawie zależności pomiędzy sygnałem sterującym a prędkością obrotową wirników (podanego w tabeli 2.8) i wyznaczonej prędkości obrotowej wirników w stanie zawisu równej 482 rad s^{-1} z tabeli 2.2.

Wartość wskaźnika jakości, na podstawie którego znaleziono wartości parametrów wynosiła 0,11. Wartość tego wskaźnika dla dobranych parametrów wynosi 0,14, co oznacza że aproksymację wykonano prawidłowo. Na rysunku 2.23 zaprezentowano przebiegi sygnałów sterujących poszczególnych silników podczas omawianego manewru w postaci współczynnika wypełnienia impulsu wyrażonego w procentach i napięcia skutecznego uzyskanego po zamianie współczynnika na zakres napięcia (2,75 V, 4,75 V) (równanie 2.57).

Tabela 2.12. Wartości parametrów układu regulacji kąta odchylenia o strukturze z rysunku 2.16

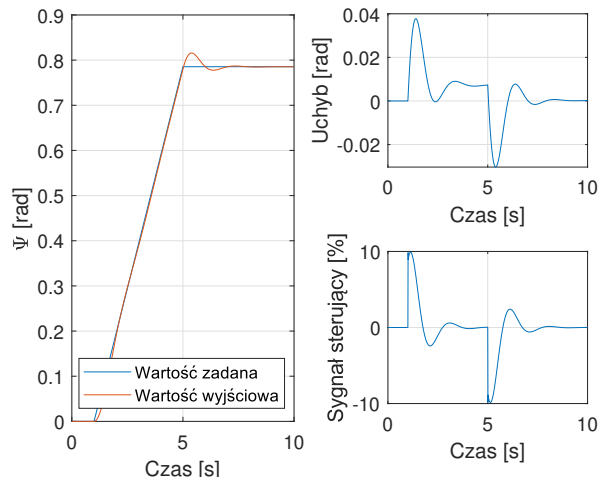
Oznaczenie parametru		Wartość parametru		
Standaryzowane	Naturalne	Minimalna	Maksymalna	Otrzymana
t_1	K_{p1}	10,00	25,00	24,2014
t_2	K_{p2}	10,00	25,00	10,1741
t_3	K_{i2}	0,50	2,00	0,7414
t_4	K_{d2}	0,50	2,00	1,9694

Tabela 2.13. Otrzymane współczynniki funkcji regresji określonej równaniem 2.61

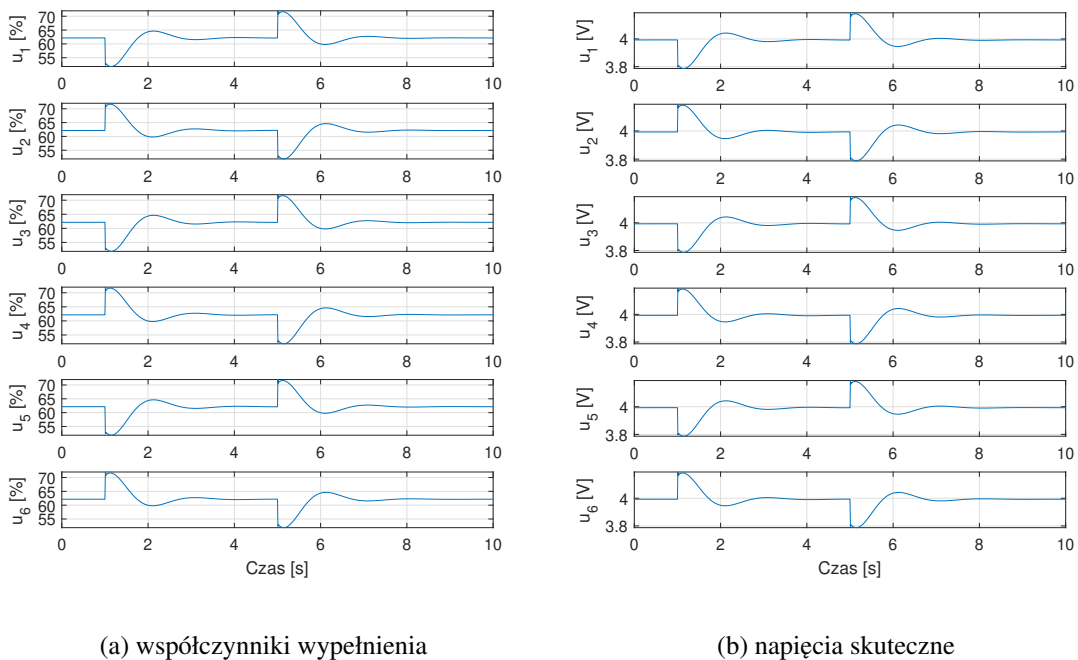
Współczynnik	$a_0 (-)$	—	$a_1 (t_1)$	$a_2 (t_2)$	$a_3 (t_3)$	$a_4 (t_4)$
Wartość	0,0041	—	-0,0027	-0,0021	0,0002	-0,0012
Współczynnik	$a_5 (t_1 \cdot t_2)$	$a_6 (t_1 \cdot t_3)$	$a_7 (t_1 \cdot t_4)$	$a_8 (t_2 \cdot t_3)$	$a_9 (t_2 \cdot t_4)$	$a_{10} (t_3 \cdot t_4)$
Wartość	0,0015	-0,0001	0,0007	-0,0002	0,0010	-0,0002

Analogiczną procedurę zastosowano dla regulatora kąta odchylenia o strukturze P-PID (Rys. 2.16), gdzie również dobierano 4 wartości parametrów: K_{p1} , K_{p2} , K_{i2} i K_{d2} . Analogicznie wykonano 16 symulacji gdzie w każdym przypadku przyjęto odmienną kombinację założonych wartości minimalnych i maksymalnych każdego z nich. Wszystkie symulacje przeprowadzono dla manewru obrotu wokół osi Z o kąt $\pi/4$ [rad] w czasie 4 s, czyli z prędkością $\pi/16 \text{ rad s}^{-1}$. Istotną różnicą było ograniczenie na sygnał sterujący, które przyjęto w tym przypadku na

10%. Założone i otrzymane wartości parametrów zestawiono w tabeli 2.12. Analizowany układ był stabilny dla wszystkich kombinacji wartości minimalnych i maksymalnych założonych parametrów. Ponadto, podczas symulacji był również włączony układ regulacji położenia w osi pionowej, o dobranych uprzednio parametrach.



Rys. 2.24. Przebiegi wejściowe i wyjściowe układu regulacji kąta odchylenia dla dobranych wartości parametrów na podstawie planu eksperymentu



(a) współczynniki wypełnienia

(b) napięcia skuteczne

Rys. 2.25. Parametry opisujące przebiegi sygnałów sterujących poszczególnych silników robota podczas obrotu wokół osi Z

Wszystkie współczynniki funkcji regresji zebrano w tabeli 2.13. Na podstawie wartości współczynników $a_1 - a_4$ można wnioskować o istotności odpowiadającego parametru. Należy więc stwierdzić, że w tym układzie regulacji istotność parametrów K_{p1} i K_{p2} jest największa, K_{d2} jest pośrednia, a K_{i2} praktycznie nie ma istotnego wpływu na zachowanie układu. Na rysunku 2.24 zaprezentowano przebiegi wejściowe i wyjściowe układu regulacji kąta odchylenia dla dobranych wartości parametrów z wykorzystaniem opisanej procedury.

Wartość wskaźnika jakości, na podstawie którego znaleziono wartości parametrów wynosiła 0,0010. Wartość tego wskaźnika dla dobranych parametrów wynosi 0,0013, co oznacza że aproksymację wykonano prawidłowo. Na rysunku 2.25 zaprezentowano przebiegi sygnałów sterujących poszczególnych silników podczas omawianego manewru w postaci współczynnika wypełnienia impulsu wyrażonego w procentach i napięcia skutecznego uzyskanego po zamianie współczynnika na zakres napięcia (2,75 V, 4,75 V).

Opisana procedura doboru parametrów pozwoliła na oszacowanie pierwszych przybliżonych wartości nastaw oraz sprawdzenie ich istotności w układzie regulacji. Na tej podstawie wykonano ostateczny dobór nastaw rzeczywistego układu. Dobre parametry układów regulacji orientacji i położenia zastosowanego kontrolera lotu Pixhawk zaprezentowano w tabelach 2.14 i 2.15. Parametry były modyfikowane w sposób iteracyjny, tak aby zminimalizować oscylacje robota powodowane zakłóceniami w postaci podmuchów wiatru oraz zmniejszenie czasu regulacji. Najpierw modyfikowano parametry układu regulacji orientacji, później układu regulacji położenia, przy czym najpierw dobrano parametry regulatora pomocniczego, a następnie głównego. Układ regulacji położenia nie wymagał wprowadzenia istotnych korekt nastaw. Struktura układu regulacji odpowiada tej z rysunku 2.14. Oznaczenia K_P , K_I i K_D odpowiadają tym z algorytmu PID (równanie 2.42). Nazwy parametrów układu regulacji orientacji zawarte w tabeli 2.14 odpowiadają wewnętrznym oznaczeniom w oprogramowaniu układowym kontrolera Pixhawk i oznaczają:

- *ATC* oznacza układ regulacji orientacji (skrót ang. *Attitude Controller*).
- *RAT* oznacza układ regulacji prędkości kątowej (skrót ang. *RATE*).
- *ANG* oznacza układ regulacji prędkości kątowej (skrót ang. *ANGLE*)
- *RLL* oznacza kąt pochylenia (skrót ang. *ROLL*)
- *PIT* oznacza kąt przechylenia (skrót ang. *PITCH*)
- *YAW* oznacza kąt pochylenia (ang. *YAW*)

Tabela 2.14. Parametry układu regulacji orientacji kontrolera lotu Pixhawk

Nazwa parametru	Wartość parametru				Opis
	Min.	Maks.	Domyślna	Zastosowana	
ATC_RAT_RLL_P	0,01	0,50	0,1350	0,1900	Parametry K_P , K_I i K_D układu regulacji prędkości kątowej wokół osi X (pochylenia)
ATC_RAT_RLL_I	0,01	2,00	0,1350	0,1650	
ATC_RAT_RLL_D	0,00	0,05	0,0036	0,0036	
ATC_RAT_PIT_P	0,01	0,50	0,1350	0,1900	Parametry K_P , K_I i K_D układu regulacji prędkości kątowej wokół osi Y (przechylenia)
ATC_RAT_PIT_I	0,01	2,00	0,1350	0,1650	
ATC_RAT_PIT_D	0,00	0,05	0,0036	0,0036	
ATC_RAT_YAW_P	0,10	2,50	0,1800	0,2000	Parametry K_P , K_I i K_D układu regulacji prędkości kątowej wokół osi Z (odchylenia)
ATC_RAT_YAW_I	0,01	1,00	0,0180	0,0200	
ATC_RAT_YAW_D	0,00	0,02	0,0000	0,0000	
ATC_ANG_RLL_P	3,00	12,00	4,5000	4,7500	Parametr K_P układu regulacji kąta pochylenia
ATC_ANG_PIT_P	3,00	12,00	4,5000	4,7500	Parametr K_P układu regulacji kąta przechylenia
ATC_ANG_YAW_P	3,00	12,00	4,5000	4,8500	Parametr K_P układu regulacji kąta odchylenia

Tabela 2.15. Parametry układu regulacji położenia kontrolera lotu Pixhawk

Nazwa parametru	Wartość parametru				Opis parametru
	Min.	Maks.	Domyślna	Zastosowana	
PSC_ACCZ_P	0,20	1,50	0,50	0,50	Parametry K_P , K_I i K_D układu regulacji przyspieszenia wzdłuż osi Z (pionowej)
PSC_ACCZ_I	0,00	3,00	1,00	1,00	
PSC_ACCZ_D	0,00	0,40	0,00	0,00	
PSC_VELZ_P	1,00	8,00	5,00	5,00	Parametr K_P układu regulacji prędkości wzdłuż osi Z (pionowej)
PSC_POSZ_P	1,00	3,00	1,00	1,05	Parametr K_P układu regulacji położenia na osi Z (pionowej)
PSC_VELXY_P	0,10	6,00	2,00	2,00	Parametry K_P , K_I i K_D układu regulacji prędkości wzdłuż osi X i Y (poziomych)
PSC_VELXY_I	0,02	1,00	1,00	1,00	
PSC_VELXY_D	0,00	1,00	0,50	0,50	
PSC_POSXY_P	0,50	2,00	1,00	1,00	Parametr K_P układu regulacji położenia na osiach X i Y (poziomych)

Nazwy parametrów układu regulacji położenia zawarte w tabeli 2.15 odpowiadają wewnętrznym oznaczeniom w oprogramowaniu układowym kontrolera Pixhawk i oznaczają:

- *PSC* oznacza układ regulacji położenia (skrót ang. *Position Controller*).
- *ACCZ* oznacza układ regulacji przyspieszenia wzdłuż osi *Z* (skrót ang. *Acceleration Z-Axis*).
- *VELZ* oznacza układ regulacji prędkości wzdłuż osi *Z* (skrót ang. *Velocity Z-Axis*)
- *POSZ* oznacza układ regulacji położenia na osi *Z* (skrót ang. *Position Z-Axis*)
- *VELXY* oznacza układ regulacji prędkości wzdłuż osi *X* i *Y* (skrót ang. *Velocity X and Y-Axes*)
- *POSXY* oznacza układ regulacji położenia na osiach *X* i *Y* (ang. *Position X and Y-Axes*)

2.6. Podsumowanie

W tym rozdziale opisano proces doboru komponentów i parametrów podsystemu sterującego lotem aby umożliwić śledzenie trajektorii wyznaczonej przez podsystem wyszukujący źródła zanieczyszczenia. Najpierw zaprezentowano model matematyczny trzech analizowanych konfiguracji robotów latających: o czterech, sześciu (w układzie prostym) i ośmiu (w układzie redundantnym) wirnikach. Na podstawie wstępnej analizy modelu matematycznego oszacowano pobór mocy w stanie zawisu przez wszystkie konfiguracje, na podstawie czego wybrano układ sześciu wirników do dalszych prac. Następnie opisano podział wyodrębnionych podsystemów składowych robota latającego na: źródło zasilania, zespoły napędowe, podsystem sterujący lotem robota i autorski podsystem poszukujący źródeł zanieczyszczenia. Dalej dobrano algorytmy sterowania ruchem robota latającego. Opisano m.in. proste regulatory PID, regulator liniowo-kwadratowy LQR (ang. *Linear-quadratic regulator*) czy sterowanie predykcyjne MPC (ang. *Model Predictive Control*). Każdy z tych algorytmów ma swoje zalety i wady. Ostatecznie jednak, w układzie regulacji w zastosowanym kontrolerze lotu wykorzystano regulatory PID, ze względu na minimalny wymagany nakład obliczeniowy. Ta cecha algorytmu ma szczególnie istotne znaczenie ponieważ do prawidłowej pracy robota latającego wymagane są duże częstotliwości próbkowania w pętli sterowania. Algorytmy LQR i MPC cechują się znacznie większym wymaganym nakładem obliczeniowy dla nieliniowych obiektów, gdzie zadania optymalizacji muszą być rozwiązywane w każdym kroku próbkowania. Dobór wstępnych wartości parametrów regulatorów PID wykonano na podstawie modelu matematycznego i metody planowania eksperymentu. Opisana procedura doboru parametrów pozwoliła na oszacowanie pierwszych przybliżonych wartości nastaw oraz sprawdzenie ich istotności w układzie regulacji. Na tej podstawie wykonano ostateczny dobór nastaw rzeczywistego układu.

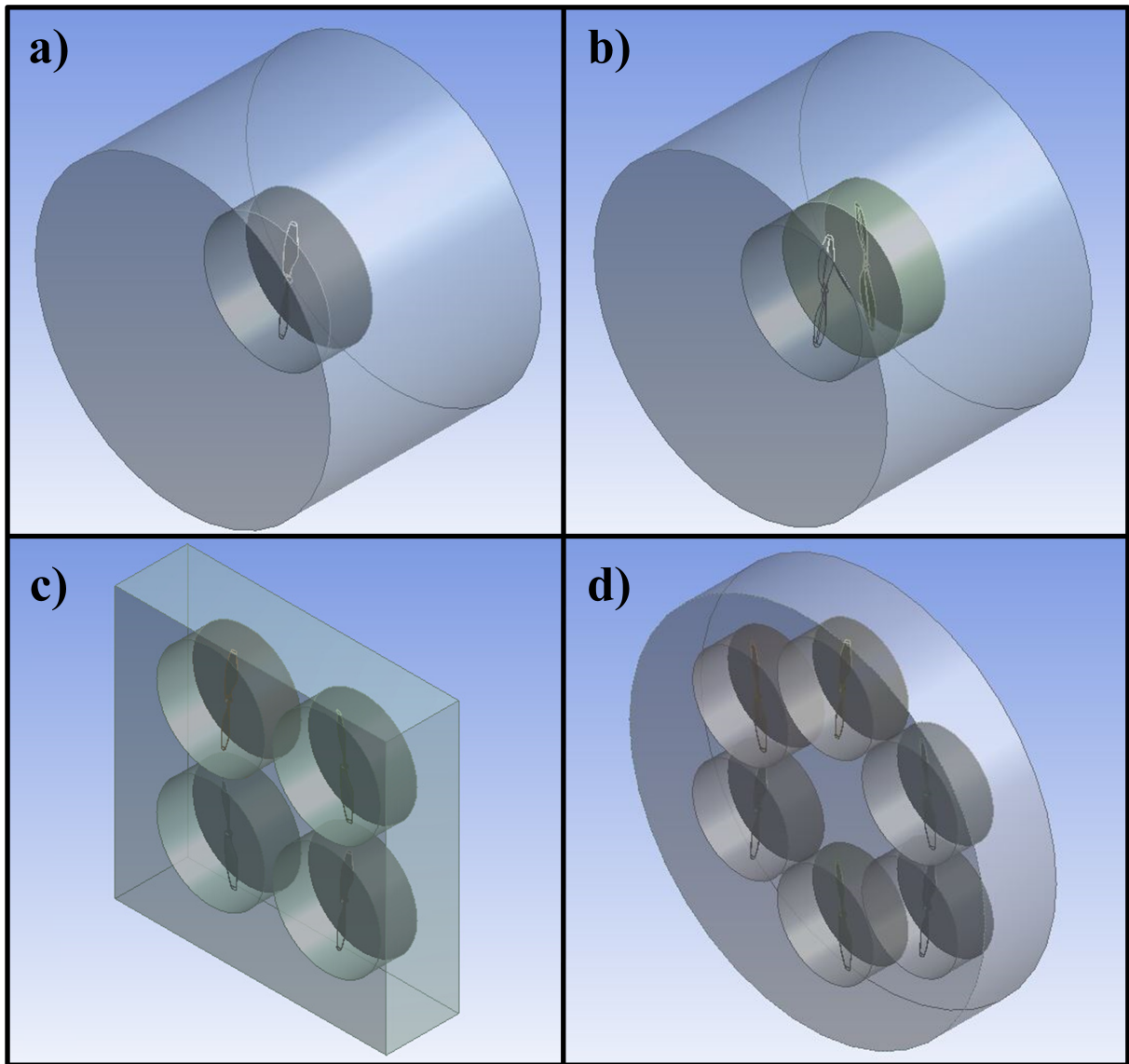
3. Dobór parametrów systemu pomiarowego na podstawie modelu pola przepływu

Obracające się wirniki robota wielowirnikowego podczas pracy wprowadzają duże zaburzenie do naturalnego pola przepływu powietrza i niosących cząstki gazów, tym samym zakłócając proces ich pomiaru. Dlatego konieczne jest oszacowanie zaburzenia naturalnego pola przepływu powodowanego przez wirniki dedykowanego robota latającego. Szacowanie pozwoli na prawidłowe zaprojektowanie układu pomiarowego stężenia cząstek stałych do poszukiwania źródła zanieczyszczenia. Wykonanie takiej analizy jest niezbędne, aby robot mógł pełnić wyznaczoną mu funkcję lokalizacji źródeł zanieczyszczenia.

Przedmiotem analizy były układy z jednym wirnikiem, dwoma, czterema i ostatecznie sześcioma (Rys. 3.1). Te układy były bezpośrednio związane z trzema analizowanymi typami robotów latających: quadro-, hekso- i octocoptera. Dla tychże układów zbudowany został model komputerowy pola przepływu, a następnie wyznaczono rozkłady pól prędkości, ciśnień oraz natężenia turbulencji. Na podstawie tychże danych wyznaczono odpowiednią konfigurację do dalszych badań i właściwe miejsce lokalizacji wlotu układu pomiarowego. Sformułowano również szczegółowy schemat postępowania przy prowadzeniu tego typu badań, który zaprezentowano na przykładzie układu z pojedynczym wirnikiem. Na tej podstawie możliwe jest przeprowadzenie analizy dla dowolnego układu wirników. Uzyskane wyniki pozwalają na ulepszenia konstrukcyjne systemu pomiarowego robota i równocześnie ulepszenie sterowania które umożliwi dokładniejszą i szybszą lokalizację źródła zanieczyszczeń. Wyniki tych badań publikowano m.in. w [194, 197, 198].

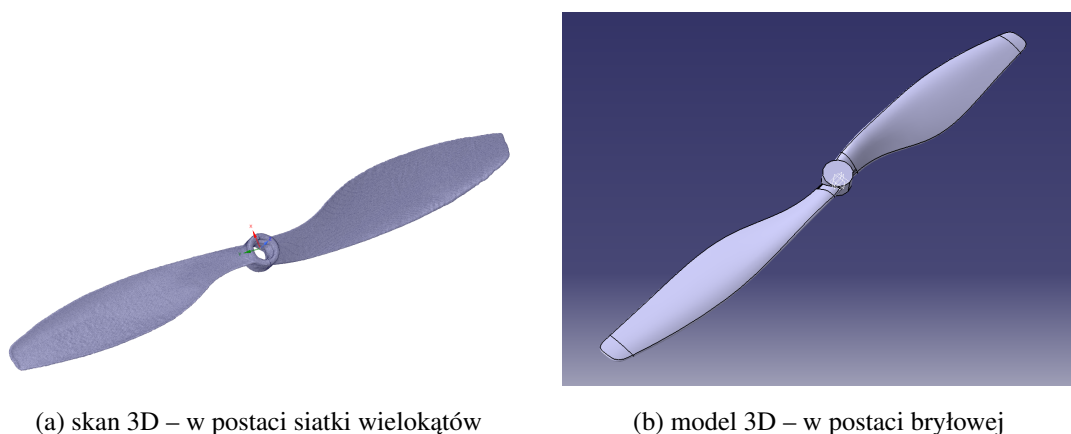
3.1. Budowa modelu pola przepływu wokół wirników robota

Aby przeprowadzić analizę zjawisk aerodynamicznych zachodzących wokół wirników robota wielowirnikowego, należy postępować zgodnie z zaprezentowanym na rysunku 3.3 algorytmem. Analizę rozpoczyna się od założenia jakie konfiguracje będą analizowane oraz



Rys. 3.1. Modele geometryczne analizowanych konfiguracji wirników: a) układ z jednym wirnikiem, b) układ dwóch wirników, c) układ czterech wirników, d) układ sześciu wirników

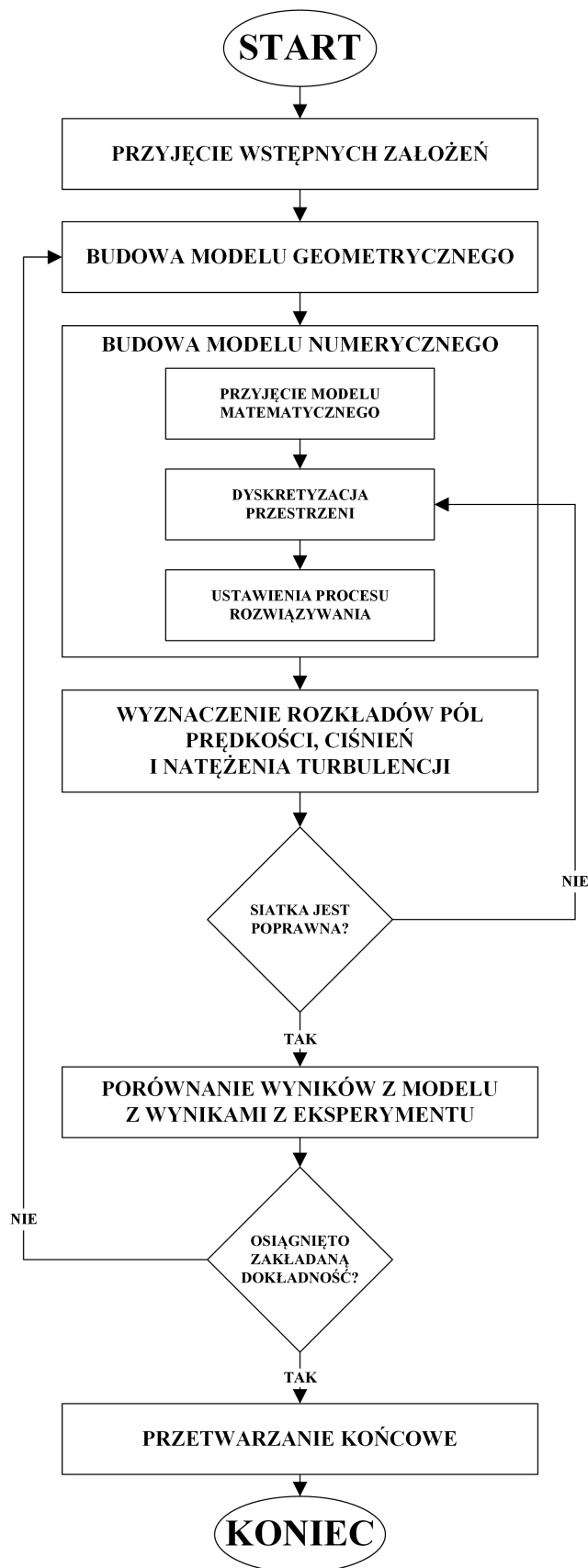
wyboru odpowiedniego oprogramowania do wykonania obliczeń. Analizę przeprowadzono w dedykowanym do obliczeń przepływowych oprogramowaniu *ANSYS Fluent*. Pierwszym krokiem algorytmu jest budowa modelu geometrycznego wirnika (śmigła). W tym przypadku pracę rozpoczęto od wykonania skanu 3D wytypowanych na stanowisku hamowni śmigieł. Były to śmigła firmy Gefman typu 1045 (o średnicy 10 cali) analizowane dla układu z jednym, czterema i sześcioma wirnikami, i 1238 (o średnicy 12 cali), analogicznie dla układów z jednym i dwoma wirnikami. Ze względu na analogię postępowania dla dowolnego układu wirników, dalszy opis algorytmu będzie dotyczyć układu z pojedynczym mniejszym (1045) śmigłem.



Rys. 3.2. Model geometryczny śmigła 1045 firmy GEFMAN

W wyniku procesu skanowania uzyskano plik w formacie siatki wielokątów STL (rysunek 3.2a). Taki plik nie nadaje się do przeprowadzenia dalszych obliczeń, gdyż potrzebny jest model w postaci bryłowej. Należy zatem wykonać inżynierię odwrotną bryły śmigła na podstawie przygotowanego skanu. Model w postaci siatki wielokątów odpowiednio zorientowano w układzie współrzędnych, oraz przede wszystkim uproszczono chropowatą powierzchnię powstałą w procesie skanowania. W tym celu najpierw wykorzystano dedykowany do celów inżynierii odwrotnej program *SpaceClaim* wchodzący w skład pakietu *ANSYS*. Ostatecznie jednak wykorzystano program *CATIA*. Na rysunku 3.2b zaprezentowano model geometryczny śmigła w postaci bryłowej.

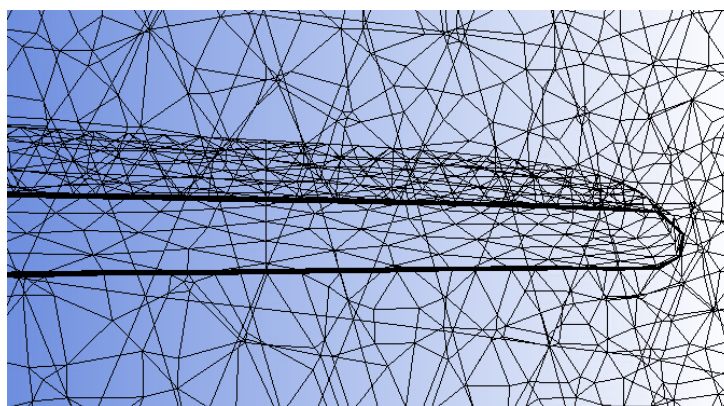
Kolejnym krokiem algorytmu jest przygotowanie modelu geometrycznego otoczenia, w którym będzie pracował wirnik. Tą część wykonano w module *Geometry* pakietu *ANSYS*. Do modułu geometrii wczytano przygotowany model śmigła, i umieszczono je w cylindrze o średnicy 0,3 m i wysokości 0,1 m. Dalej utworzono kolejny cylinder, o średnicy 0,7 m i wysokości 0,5 m. Finalnym krokiem było odjęcie objętości mniejszego cylindra od większego, a następnie bryły śmigła od mniejszego z nich. Te operacje wykonano przy wykorzystaniu funkcji *boolean subtract*. Ostatecznie, model geometryczny zawiera dwie bryły (rysunek 3.1a). Pierwsza to duży cylinder bez objętości małego cylindra, nazywany dalej strefą statyczną



Rys. 3.3. Algorytm budowy komputerowego modelu pola przepływu

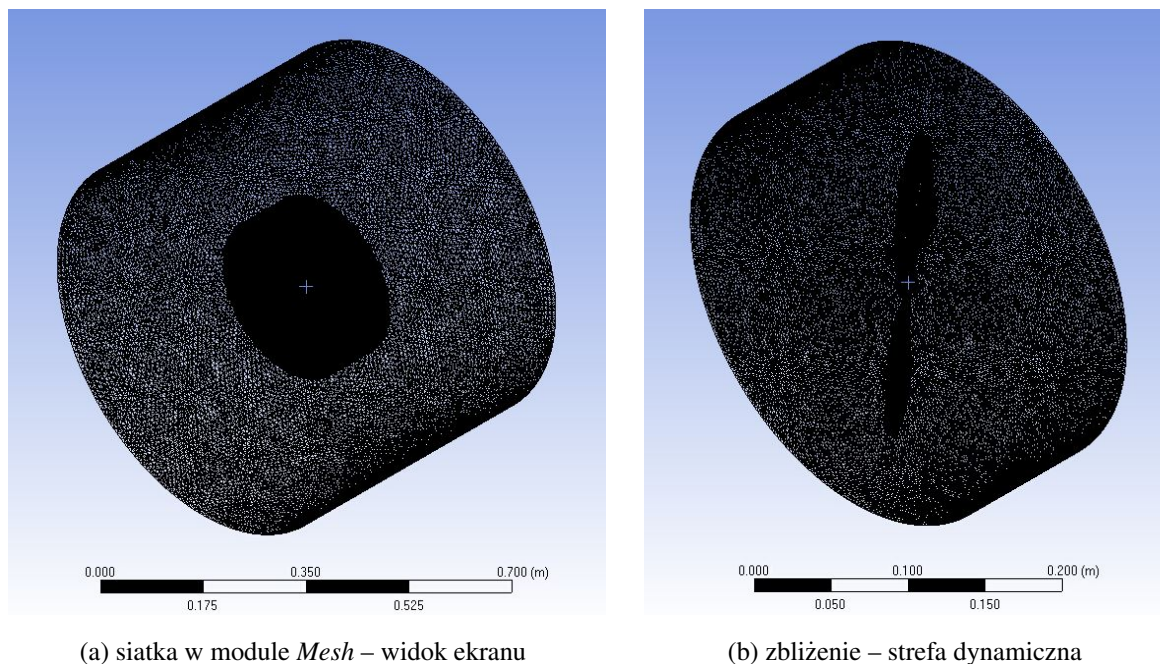
(nieruchomą). Druga zaś to mały cylinder bez objętości bryły śmigła, nazywany dalej strefą dynamiczną (obrotową).

Następnym krokiem jest przygotowanie modelu numerycznego. Ze względu na złożoną geometrię bryły śmigła, przygotowano siatkę niestrukturalną w module *Mesh*. Siatka niestrukturalna generowana jest automatycznie poprzez oprogramowanie na podstawie definiowanych wytycznych. W szczególności ustalono, aby rozmiar elementu w strefie obrotowej nie przekraczał 0,003 m, a w statycznej 0,01 m. Dodatkowo, aby modelowane zjawiska aerodynamiczne w pobliżu wirnika uznać za prawidłowe, wymaga się aby w wyniku obliczeń bezwymiarowa odległość od ścianki na powierzchni wirnika miała na całej powierzchni wirnika wartość mniejszą od 1. Ten parametr bezwymiarowej odległości od ściany, który określany jest przy modelowaniu przepływów w okolicy sztywnych ścian, nazywany jest y^+ i odtąd będzie tak oznaczany.



Rys. 3.4. Zbliżenie na powierzchnię wirnika – warstwa przyścienna

Aby uzyskać y^+ na określonym poziomie, przyjęto: odpowiednią wysokość pierwszej warstwy przyściennej y , stopień inflacji, czyli stopień przyrostu wysokości kolejnych warstw oraz liczbę tych warstw. W ten sposób wykonano znaczne lokalne zagęszczenie siatki (jak pokazano na rys. 3.4) przy powierzchni ścianki (tutaj: powierzchni wirnika). Proces wyznaczania parametru y^+ opisano w załączniku 7.2. Na podstawie obliczeń analitycznych przyjęto wysokość pierwszej warstwy przyściennej y równą 0,006 mm. Ponadto, przyjęto: 8 warstw przyściennych dla wirnika, i stopień inflacji równy 1,2. Tak jak omawiano wcześniej oznacza on skalę powiększania się kolejnych warstw, zaczynając od warstwy przyściennej. Liczba wszystkich elementów w tak przygotowanej siatce (rysunek 3.5) wynosiła około 4,4 mln. W tym etapie algorytmu przygotowuje się również dane wejściowe do programu *Fluent*, czyli specjalny plik tekstowy, który zawiera listę poszczególnych poleceń. Polecenia te obejmują wczytanie siatki, wybranie odpowiedniego modelu obliczeniowego oraz zdefiniowanie warunków brzegowych.



Rys. 3.5. Przygotowana siatka w module *Mesh*

ANSYS Fluent domyślnie rozwiązuje równania przepływu w nieruchomym układzie odniesienia. Układ z jednym bądź wieloma obracającymi się wirnikami należy jednakże do grupy problemów, dla których konieczne jest rozwiązywanie równań w nieinercyjnym układzie odniesienia. Po aktywowaniu ruchomego układu odniesienia dla każdego z modelowanych wirników układu, równania ruchu są przez oprogramowanie modyfikowane w celu uwzględnienia dodatkowych wyrazów przyspieszenia, które występują w związku z transformacją od stacjonarnego do poruszającego się układu odniesienia. Oś obrotu układu będącego w ruchu określona jest z wykorzystaniem wektora kierunkowego \mathbf{a} , stąd zachodzi zależność:

$$\boldsymbol{\omega} = \omega \mathbf{a} \quad (3.1)$$

gdzie: ω – prędkość obrotowa, \mathbf{a} – jednostkowy wektor kierunkowy. Prędkości przepływu przenoszone są z układu stacjonarnego do poruszającego się zgodnie z:

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{v} - \mathbf{u}_r, \quad \mathbf{u}_r = \mathbf{v}_t + \boldsymbol{\omega} \mathbf{r} \quad (3.2)$$

gdzie: \mathbf{v}_r – wektor prędkości względnej (obserwowanej z ruchomego układu odniesienia), \mathbf{v} – wektor prędkości bezwzględnej (obserwowanej z nieruchomego układu odniesienia), \mathbf{u}_r – prędkość ruchomego układu odniesienia względem nieruchomego układu odniesienia, \mathbf{v}_t i $\boldsymbol{\omega}$ – odpowiednio prędkość liniowa i kątowa ruchomego układu odniesienia. W analizowanych układach o wielu domenach, należy określić wewnętrzne powierzchnie styku domen jako interfejsy (ang. *interface*). Sposób definicji interfejsu prowadzi do dwóch przybliżonych metod modelowania przepływu w stanie ustalonym, są to: płaszczyzny mieszania *MPM*

(ang. *Mixing Plane Model*) bądź metoda wielokrotnego układu odniesienia *MRF* (ang. *Multiple Reference Frame*), którą zastosowano w tym przypadku. W tej metodzie definiowane są prędkości obrotowe wielu domen, a na powierzchniach ich styku przeprowadzana jest lokalna transformacja układu odniesienia i aproksymacja parametrów przepływu. W przypadku układu z jednym wirnikiem możliwe jest określenie całej domeny jako obrotowej, bez wyodrębnionego podziału na części obrotowe i nieruchome. Ten wariant jest określany w literaturze jako *SRF* (ang. *Single Reference Frame*). Jednakże, jako że w tej pracy analizowane były układy różnych wirników, obracające się z różnymi prędkościami obrotowymi, nie zastosowano tego podejścia.

Gdy równania ruchu są rozwiązywane w ruchomym układzie odniesienia, do wyznaczenia przyspieszenia płynu są uwzględniane dodatkowe warunki, które pojawiają się w równaniach pędu. W tym przypadku równania są formułowane poprzez wyrażanie równań pędu przy użyciu prędkości bezwzględnych jako zmiennych zależnych w równaniach pędu, co jest znane jako formułowanie prędkości bezwzględnej. Do wykonania obliczeń wykorzystano dedykowane mechanice płynów oprogramowanie *ANSYS Fluent* [11], które rozwiązuje równania różniczkowe cząstkowe Naviera-Stokesa wynikające z zasady zachowania masy i pędu. Jeśli przepływ jest turbulentny, należy dodać dodatkowe równania transportu. Równanie bilansu masy ma postać uogólnioną:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = S_m \quad (3.3)$$

gdzie: ρ to gęstość płynu, \mathbf{u} to prędkość, a S_m to źródło masy. Równanie bilansu pędu dla nieruchomego układu odniesienia jest opisane [18] przez:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{u}) + (\rho \mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (3.4)$$

gdzie: p to ciśnienie statyczne, $\bar{\bar{\tau}}$ to tensor naprężenia, a $\rho \mathbf{g}$ i \mathbf{F} to odpowiednio siła grawitacyjna i siły zewnętrzne. Tensor naprężenia $\bar{\bar{\tau}}$ jest opisany przez:

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{u} \mathbf{I} \right] \quad (3.5)$$

gdzie: μ to lepkość kinetyczna, \mathbf{I} to tensor jednostkowy. W pracy przyjęto uproszczenia, dotyczące: braku źródeł masy ($S_m = 0$), braku sił zewnętrznych ($\mathbf{F} = 0$) oraz stałej gęstości płynu ($\rho = const$), które upraszczają równania 3.3 i 3.4 do postaci:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3.6)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right] = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \mathbf{g} \quad (3.7)$$

Podejście polegające na bezpośrednim rozwiązywaniu numerycznym tychże równań jest znane w literaturze jako metoda *DNS* (ang. *Direct Navier-Stokes*). Jednakże ze względu na bardzo

duże zapotrzebowanie tejże metody na moc obliczeniową ma ona nikłe znaczenie praktyczne. Ze względu na konieczność rozwiązania tych równań w sposób numeryczny, zastosowano metodę objętości skończonych do wyznaczenia przybliżonego rozwiązania, a konkretnie wariant *RANS* (ang. *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*). W tej metodzie chwilowe (dokładne) zmienne rozwiązania w równaniach Naviera-Stokesa są rozbijane na średnie (uśrednione w przestrzeni lub uśrednione w czasie) i składniki zmienne. Dla prędkości przepływu u_i w kierunku x_i ($i = 1, 2, 3$) i wielkości skalarnych ϕ :

$$u_i(x_i, t) = \bar{U}_i(x_i) + u'_i(x_i, t), \quad \phi(x_i, t) = \bar{\Phi}(x_i) + \phi'(x_i, t) \quad (3.8)$$

gdzie: \bar{u}_i i u'_i są odpowiednio średnimi i zmiennymi składowymi prędkości, $\bar{\phi}$ i ϕ' to średnie i zmienne w czasie składowe wielkości skalarnie, takie jak ciśnienie, energia lub natężenie. Proces uśredniania dla okresu T zapisuje się jako:

$$\bar{U}_i(x_i) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T u_i(x_i, t) dt, \quad \bar{\Phi}(x_i) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T \phi(x_i, t) dt \quad (3.9)$$

Standardowy model $k - \omega$, dostępny w oprogramowaniu *Ansys Fluent* [11] jest oparty na modelu zaproponowanym przez Wilcoxa [220]. Ten zaś z kolei jest modelem empirycznym bazującym na równaniach transportu energii kinetycznej turbulencji (k) i specyficznej szybkości rozproszenia (ω). Z biegiem lat model ten był ulepszany przez dodanie warunków produkcji do obu równań, co zwiększyło dokładność modelu do przewidywania przepływów swobodnego ścinania. Głównym problemem związanym z modelem Wilcoxa jest jego dobrze znana silna wrażliwość na warunki swobodnego strumienia. Model bazowy $k - \omega$ (*BSL*) został opracowany przez Mentera [147], aby skutecznie połączyć solidne i dokładne sformułowanie modelu w regionie przyściennym z niezależnością modelu w polu dalekim. Model *BSL* jest podobny do modelu standardowego, ale zawiera różne stałe modelowania. Dodatkowo standardowy model $k - \omega$ i przekształcony model $k - \epsilon$ są mnożone przez funkcję mieszania i oba modele są do siebie dodawane. Funkcja mieszania została zaprojektowana tak, aby wynosiła jeden w obszarze blisko ściany, co aktywuje model standardowy $k - \omega$, i zero z dala od powierzchni, co aktywuje przekształcony model $k - \epsilon$. Kolejną różnicą jest, że model *BSL* zawiera w równaniu człon pochodny tłumionej dyfuzji krzyżowej. Model *Shear-Stress Transport (SST)* $k - \omega$ zawiera wszystkie udoskonalenia modelu *BSL*, a dodatkowo uwzględnia transport naprężeń ścinających w warunkach turbulentnych w definicji lepkości turbulentnej. Cechy te sprawiają, że model *SST* [147] jest dokładniejszy i bardziej niezawodny dla szerszej klasy przepływów (na przykład przepływy o niekorzystnym gradiencie ciśnienia, opływy profili lotniczych) niż modele standardowe i *BSL*. Model opisuje się przy pomocy następujących równań [146]. Równanie transportu dla energii kinetycznej turbulencji k :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = \tilde{P}_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (3.10)$$

Oraz równanie transportu dla specyficznej szybkości rozproszenia ω :

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \omega)}{\partial x_i} = \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (3.11)$$

F_1 to funkcja mieszania (ang. *blending function*), która wynosi jeden w obszarze blisko ściany, i zero z dala od jej powierzchni:

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega,2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \right\} \quad (3.12)$$

gdzie: y to odległość do najbliższej ściany, a $CD_{k\omega}$ to dodatnia część członu dyfuzji krzyżowej (ang. *positive portion of the cross-diffusion term*):

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right) \quad (3.13)$$

Oznaczając ϕ_1 dowolną stałą (np. β_1) modelu standardowego $k - \omega$, oraz ϕ_2 odpowiadającą jej stałą (β_2) przekształconego modelu $k - \epsilon$, to stała końcowego modelu ϕ jest określona jako:

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2 \quad (3.14)$$

Stałe modelu wynoszą: $\sigma_{k,1}=1,176$; $\sigma_{\omega,1}=2,0$; $\sigma_{k,2}=1,0$; $\sigma_{\omega,2}=1,168$; $a_1=0,31$; $\beta_1=0,075$; $\beta_2=0,0828$; $\beta^*=0,09$. Lepkość turbulentna ν_t (ang. *turbulent eddy viscosity*) jest określona jako:

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)} \quad (3.15)$$

gdzie: S to prędkość odkształcania (ang. *invariant measure of the strain rate*), F_2 to druga funkcja mieszania:

$$F_2 = \tanh \left[\left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right] \quad (3.16)$$

Istotnym składnikiem modelu jest również limiter wartości naprężeń głównych przepływu P_k (ang. *production limiter*):

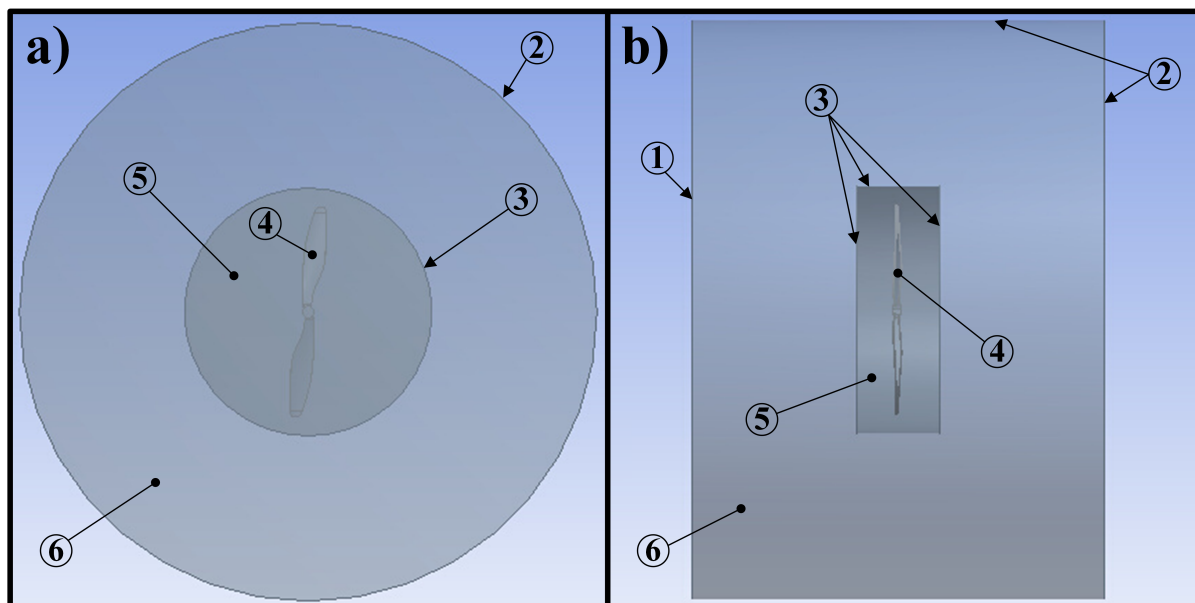
$$P_k = \mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \rightarrow \tilde{P}_k = \min(P_k, 10 \cdot \beta^* \rho k \omega) \quad (3.17)$$

Jednym z istotnych parametrów pola, jest natężenie turbulencji I (ang. *turbulence intensity*), który określony jest równaniem 3.18:

$$I = \frac{u'}{\bar{U}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 u_i'^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^3 \bar{U}_i^2}} \quad (3.18)$$

gdzie: u' to wartość skuteczna zmian prędkości turbulentnej (ang. *turbulent velocity fluctuations*), \bar{U} średnia prędkość przepływu. Parametr z definicji wyrażany jest w procentach. Przepływy o wysokim natężeniu turbulencji cechują się wartością tego parametru od 5% do 20%, a w przypadku średniego natężenia, od 1% do 5%. Należy również zauważyć, że wartość natężenia równa 0% nie oznacza zerowej prędkości przepływu.

Domene obliczeniową dla układu z jednym wirnikiem zaprezentowano na rysunku 3.6. Górną płaszczyznę (1) walca strefy statycznej (6) określono jako wlot. Natomiast powierzchnie:



Rys. 3.6. Domena obliczeniowa dla układu z jednym wirnikiem: a) widok z góry, b) widok z boku. Oznaczenia: 1 – wlot, 2 – wylot, 3 – wewnętrzne powierzchnie styku domen, 4 – powierzchnia sztywnej bryły śmigła, 5 – domena obrotowa, 6 – domena nieruchoma [197]

dolną, jak i boczne (2) określono jako wylot. Warunki brzegowe na wlocie, jak i na wylocie oparte są na znanej wartości ciśnienia na odpowiadającej powierzchni. W obu przypadkach przyjęto zerową wartość ciśnienia, przy ciśnieniu odniesienia wynoszącym 1 atmosferę. Dla tychże warunków brzegowych, określa się wartość ciśnienia całkowitego, czyli sumy ciśnienia statycznego i dynamicznego:

$$p_0 = p + \frac{1}{2}\rho U^2 \quad (3.19)$$

gdzie: p_0 – ciśnienie całkowite, p – ciśnienie statyczne, ρ – gęstość powietrza, U – prędkość przepływu. Z wykorzystaniem ciśnienia statycznego, wyznaczana jest najpierw prędkość przepływu U , a następnie wartości wielkości turbulentnych k i ω :

$$k = \frac{3}{2}(UI)^2, \quad \omega = \frac{\rho k}{\mu} \left(\frac{\mu_t}{\mu} \right)^{-1} \quad (3.20)$$

gdzie I to wartość początkowa natężenia turbulencji na wlocie. Przyjęto tutaj wartość 5% ze względu na stosunkowo niewielką odległość płaszczyzn wlotu i wylotu od wirnika. Dla ilorazu

lepkości turbulencji μ_t i dynamicznej lepkości molekularnej μ , określanego jako turbulentny stosunek lepkości $\frac{\mu_t}{\mu}$, przyjęto wartość 10. Przyjęcie ustalonych wartości na powierzchni granicy domeny obliczeniowej określa się jako typ warunku brzegowego Dirichleta.

Następnie, po wykonaniu pojedynczego kroku obliczeń, uaktualniana jest wartość ciśnienia statycznego. Na tej podstawie wyznaczana jest ponownie wartość prędkości przepływu. Tym samym wraz z ustalaniem się pola przepływu, jego parametry zbliżają się do wartości ustalonych (finalnych). Na wewnętrznych powierzchniach styku domen (3), wykonywana jest aproksymacja parametrów przepływu ze strefy obrotowej (5) i nieruchomej (6). Powierzchnie tego typu określa się mianem interfejsów (ang. *interface*). Dla prędkości liniowej \mathbf{v}_t zachodzi zależność:

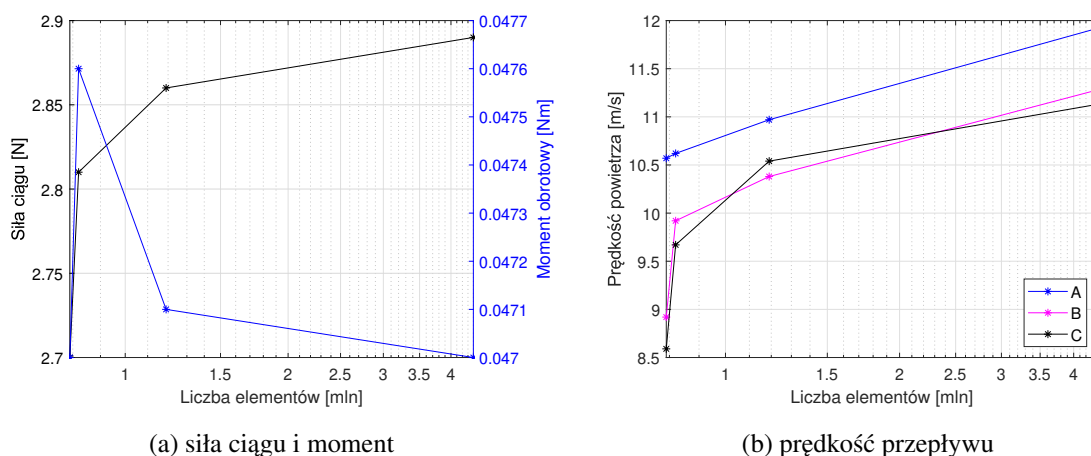
$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_r + \boldsymbol{\omega}\mathbf{r} + \mathbf{v}_t \quad (3.21)$$

Gradient prędkości bezwzględnej opisany jest jako:

$$\nabla\mathbf{v} = \nabla\mathbf{v}_r + \nabla\boldsymbol{\omega}\mathbf{r} \quad (3.22)$$

Wielkości skalarne, takie jak ciśnienie statyczne, gęstość są odczytywane bezpośrednio z sąsiadujących stref (komórek). Sama bryła śmigła (4) jest sztywna i obraca się razem z domeną obrotową (5). Na powierzchni wirnika energia kinetyczna turbulencji k_w wynosi 0, natomiast specyficzna prędkość rozpraszania ω_w wynosi:

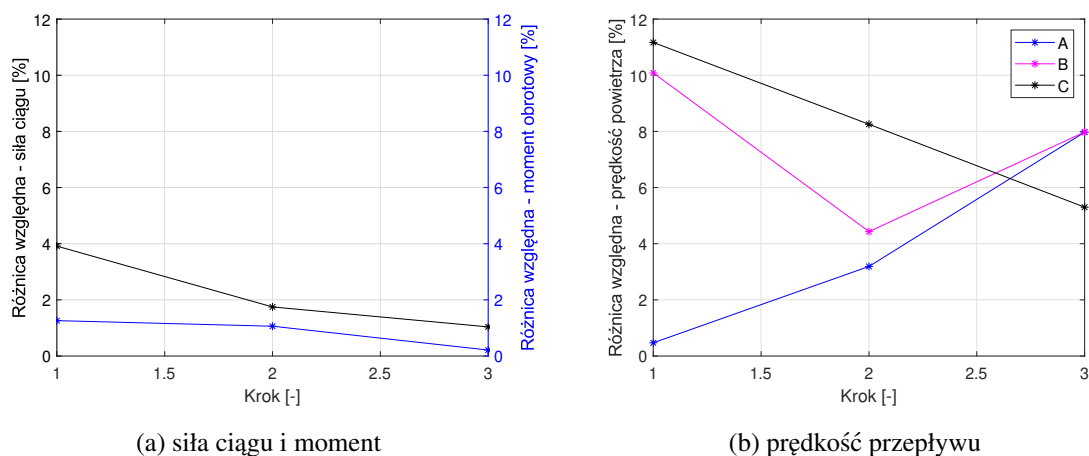
$$\omega_w = \frac{\rho(U)^2}{\mu}\omega^+, \quad \omega^+ = \frac{6}{\beta(y^+)^2} \quad (3.23)$$



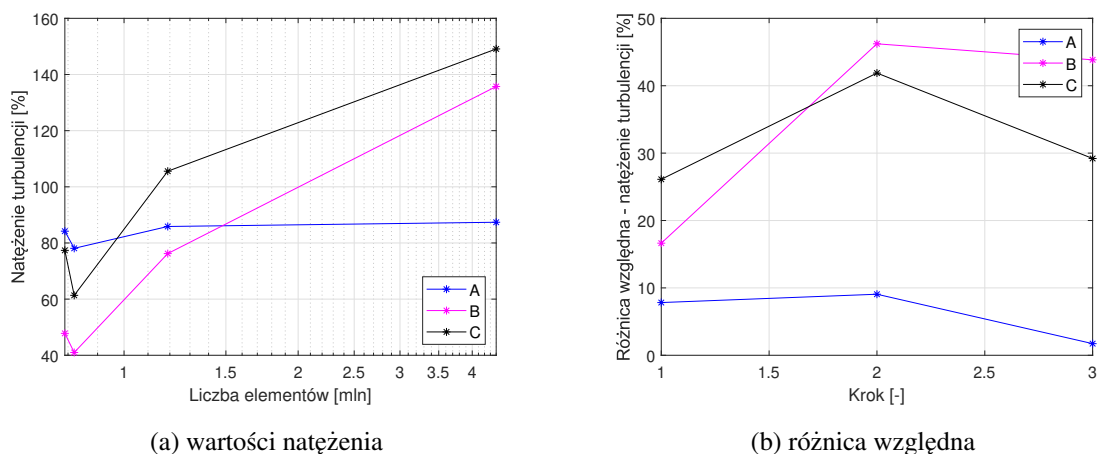
Rys. 3.7. Wyjściowe parametry modelu komputerowego dla różnej liczby elementów siatki

Ostatnie etapy algorytmu z rysunku 3.3 obejmują wykonanie obliczeń (wyznaczenie rozkładów pól prędkości, ciśnień i natężenia turbulencji), porównanie wyników z modelu z wynikami z eksperymentu i przetwarzanie końcowe (ang. *post-processing*). W przypadku

uzyskania zbieżności rozwiązania, należy sprawdzić otrzymane parametry na wirniku: maksymalną wartość parametru y^+ , a także porównać wynikowy moment i siłę ciągu z danymi z eksperymentu. Bada się również niezależność rozwiązania od siatki obliczeniowej. Jeśli wszystkie parametry są prawidłowe, to obliczenia należy uznać za poprawne. W przeciwnym wypadku należy zmodyfikować siatkę obliczeniową i zweryfikować warunki brzegowe, a następnie ponownie wykonać obliczenia.



Rys. 3.8. Różnica względna parametrów dla kolejnych kroków zagęszczania siatki



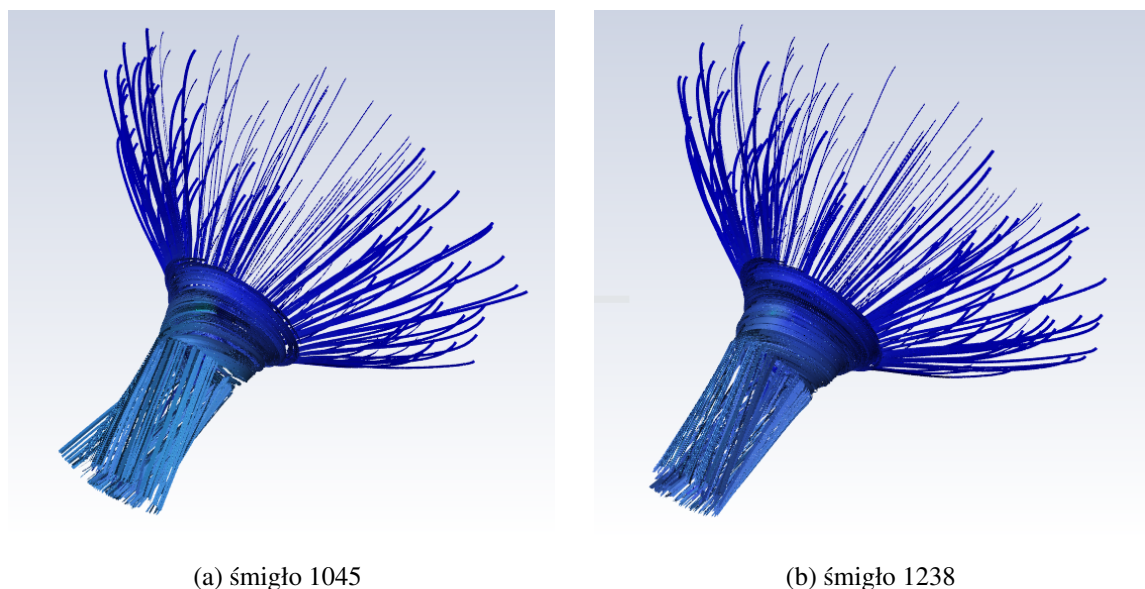
Rys. 3.9. Natężenie turbulencji w wybranych przekrojach dla kolejnych kroków zagęszczania siatki

Badanie niezależności rozwiązania od siatki obliczeniowej wykonano w następujący sposób: na rysunku 3.7a przedstawiono wyznaczone parametry siły ciągu i momentu na wirniku, natomiast na rysunku 3.7b maksymalne wartości prędkości przepływu w przekrojach poprzecznych oznaczonych jako A, B i C, zlokalizowanych odpowiednio 0,05 m, 0,1 m i 0,2 m pod płaszczyzną wirnika. Parametry te zostały wykreślone jako funkcje różnej

liczby elementów siatki. Przyjęto następujące kryterium, aby różnica względna wartości tychże w stosunku do kroku poprzedniego wynosiła mniej niż 10%. W kroku ostatnim (finalnym) różnica ta w przypadku parametrów na wirniku wynosiła około 1% (rysunek 3.8a), w przypadku prędkości przepływu (rysunek 3.8b) około 8%. Pozwoliło to stwierdzić, że uzyskano niezależność rozwiązania od siatki obliczeniowej. Na rysunku 3.9 przedstawiono dane z tych samych przekrojów, jednakże dotyczące natężenia turbulencji. W tych przypadkach uzyskano największe różnice, co oznacza że analizując model pod kątem tego parametru należałoby jeszcze zagęścić siatkę. Testowano również siatkę o liczbie elementów około 10 mln, przy której różnice względne tychże parametrów były mniejsze. Jednakże na obecnym etapie procesu modelowania, otrzymane wyniki należy uznać za dostatecznie dokładne.

3.1.1. Budowa i analiza układów z jednym wirnikiem

W przypadku układów z jednym wirnikiem były analizowane trzy przypadki. Układy z mniejszym wirnikiem (o średnicy 10 cali, czyli około 0,254 m) analizowano dla warunków pracy robotów o czterech i sześciu wirnikach. W tych przypadkach cylindryczna domena obrotowa miała średnicę 0,3 m i wysokość 0,1 m. Domena nieruchoma miała zaś średnicę 0,7 m i wysokość 0,5 m. Układ z większym wirnikiem (o średnicy 12 cali czyli około 0,305 m) był analizowany dla warunków pracy robota o ośmiu wirnikach.



Rys. 3.10. Trajektorie ruchu cząstek dla układów z pojedynczym wirnikiem

W tym przypadku jednak strefa dynamiczna miała średnicę 0,36 m i wysokość 0,12 m, statyczna zaś średnicę 0,8 m i wysokość 0,6 m. Ponieważ w tym przypadku wykorzystano inny model śmigła, ponownie oszacowano wysokość pierwszej warstwy przyściennej. Przyjęto

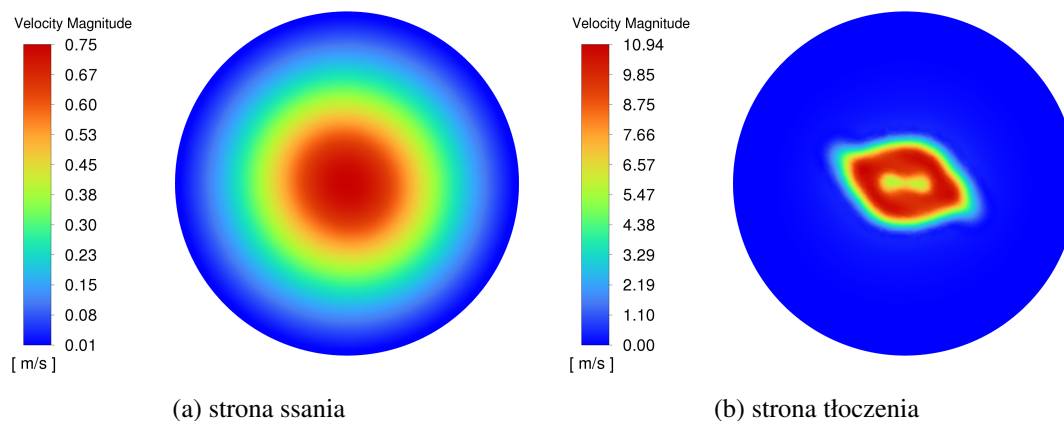
ostatecznie: $y = 5 \cdot 10^{-6}$ m, maksymalny rozmiar elementu w strefie obrotowej 0,0025 m, w statycznej 0,01 m. Liczba elementów w tak przygotowanej siatce wynosiła około 9,5 mln. Na rysunku 3.10 zaprezentowano trajektorie ruchu cząstek dla obu wirników. Po wykonaniu obliczeń przeprowadzono analizę otrzymanych danych. Najpierw sprawdzono otrzymane parametry na wirniku. Maksymalna wartość parametru y^+ na całej powierzchni wirnika dla wszystkich przypadków nie przekraczała wartości 1. Dla mniejszego z śmigieł była to maksymalnie wartość ok. 0,74. Następnie sprawdzono uzyskiwane momenty i siły ciągu. Otrzymane wyniki dla wszystkich przypadków, wraz z danymi pochodzącymi z eksperymentu zestawiono w tabeli 3.1. Dane eksperymentalne wyznaczono na przygotowanym stanowisku hamowni, którego opis zamieszczono w rozdziale 5.2. Uzyskiwanie podobnych wyników dotyczących tychże wartości, dla różnego stopnia zagęszczenia siatki obliczeniowej pozwoliło na stwierdzenie, że uzyskano niezależność rozwiązania od siatki obliczeniowej.

Tabela 3.1. Zestawienie danych eksperymentalnych z danymi uzyskanymi na drodze modelowania dla układów z jednym wirnikiem. Oznaczenia w tabeli: *CFD* – dane z modelu, *E* – dane z eksperymentu, *R* – różnica wyrażona w procentach

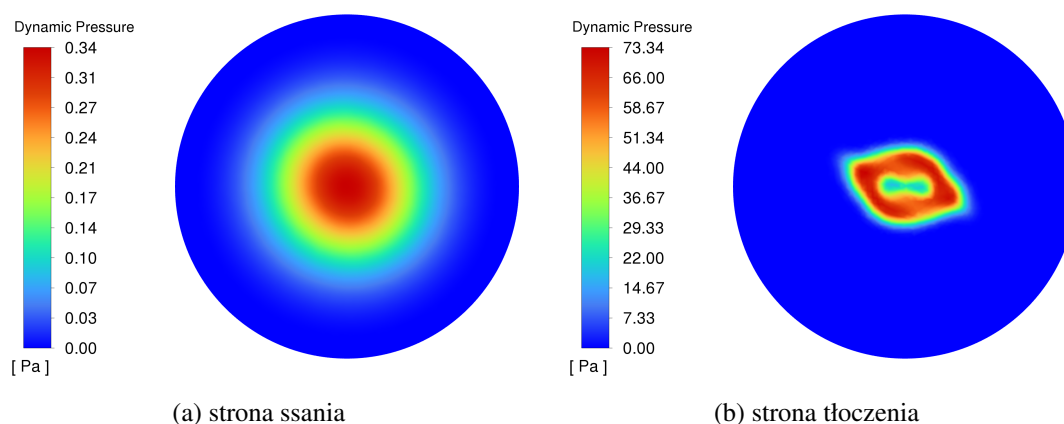
Typ wirnika	1045						1238		
	421,92			481,50			438,25		
Obr. [rad s ⁻¹]	CFD	E	R [%]	CFD	E	R [%]	CFD	E	R [%]
–	CFD	E	R [%]	CFD	E	R [%]	CFD	E	R [%]
Siła ciągu [N]	2,90	2,94	1,36	3,78	3,86	2,07	3,94	4,29	8,16
Moment [Nm]	0,047	0,052	9,62	0,061	0,068	10,29	0,061	0,071	14,08
Moc mech. [W]	19,83	21,79	9,00	29,37	32,67	10,10	26,73	33,17	19,42
Moc elektr. [W]	–	30,08	–	–	43,09	–	–	43,30	–
Sprawność [%]	–	72,59	–	–	75,73	–	–	74,88	–

Jak pokazano w tabeli 3.1, otrzymane różnice pomiędzy danymi z modelu a tymi z eksperymentu dla mniejszego wirnika nie przekraczały ok. 10%. Dla większego wirnika było to około 19,5%, jednakże dotyczyło to mocy mechanicznej. W przypadku siły ciągu i momentów były to różnice odpowiednio około 8% i 14%. Źródeł tych różnic należy doszukiwać się przede wszystkim w: uproszczeniu złożonej geometrii śmigła w procesie inżynierii odwrotnej, niedokładności wyznaczeniu parametrów silnika, czy też ogólnie samym modelem numerycznym. Jednakże te różnice należy uznać za nieistotne, a obliczenia uznać za dostatecznie dokładne. Kolejnym istotnym aspektem badań było wyznaczenie rozkładów pól prędkości i ciśnień w obu domenach. Na rysunku 3.11 zaprezentowano prędkości powierza po stronie ssania i tłoczenia. Na rysunku 3.12 pokazano ciśnienie dynamiczne po stronie ssania

i tłoczenia. Poprzez oznaczenia strony ssania rozumie się górną, tłoczenia – dolną powierzchnię walca domeny nieruchomej.

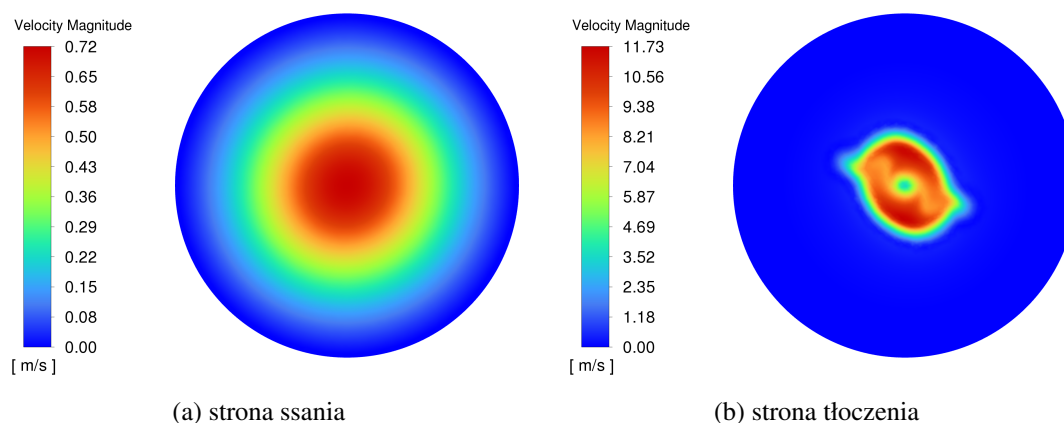


Rys. 3.11. Pola prędkości powietrza dla pojedynczego wirnika 1045 pracującego z prędkością obrotową wirników robota o czterech wirnikach

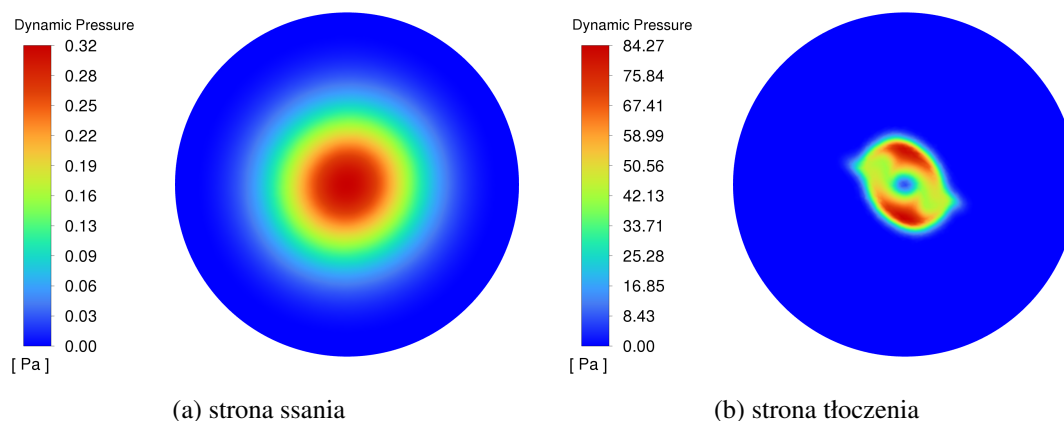


Rys. 3.12. Pola ciśnień dynamicznych dla pojedynczego wirnika 1045 pracującego z prędkością obrotową wirników robota o czterech wirnikach

Maksymalne wartości prędkości powietrza po stronie tłoczenia dochodziły do około 11 ms^{-1} . Po stronie ssającej była to wartość jedynie ok. $0,75 \text{ ms}^{-1}$. W przypadku ciśnienia dynamicznego były to odpowiednio wartości ok. 73 Pa i $0,3 \text{ Pa}$. W analogiczny sposób wyznaczono te same rozkłady dla większego wirnika. Na rysunku 3.13 zaprezentowano prędkości powietrza po stronie ssania i tłoczenia. Na rysunku 3.14 pokazano ciśnienie dynamiczne po stronie ssania i tłoczenia.



Rys. 3.13. Pola prędkości powietrza dla pojedynczego wirnika 1238 pracującego z prędkością obrotową wirników robota o ośmiu wirnikach

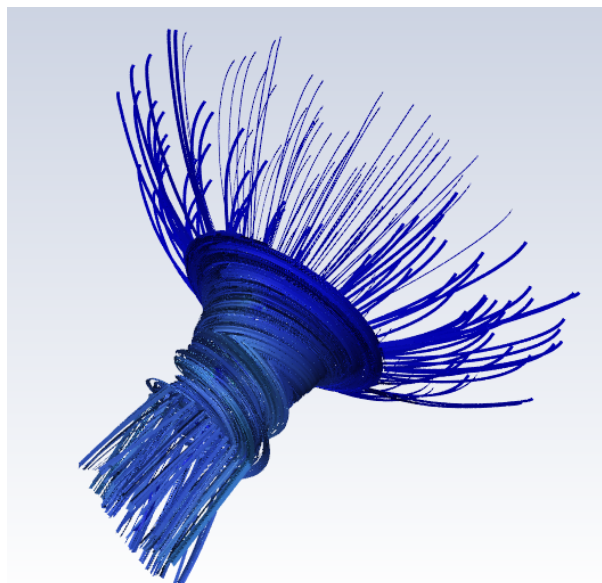


Rys. 3.14. Pola ciśnień dynamicznych dla pojedynczego wirnika 1238 pracującego z prędkością obrotową wirników robota o ośmiu wirnikach

Maksymalne wartości prędkości powietrza po stronie tłoczenia dochodziły do około 12 ms^{-1} . Po stronie ssącej była to wartość jedynie ok. $0,72 \text{ ms}^{-1}$. W przypadku ciśnienia dynamicznego były to odpowiednio wartości ok. 84 Pa i 0,32 Pa. Są to wartości niewiele większe niż w przypadku mniejszego wirnika, jednakże w tym przypadku rozmiary domen są większe, i tym samym większe są odległości od pracującego wirnika.

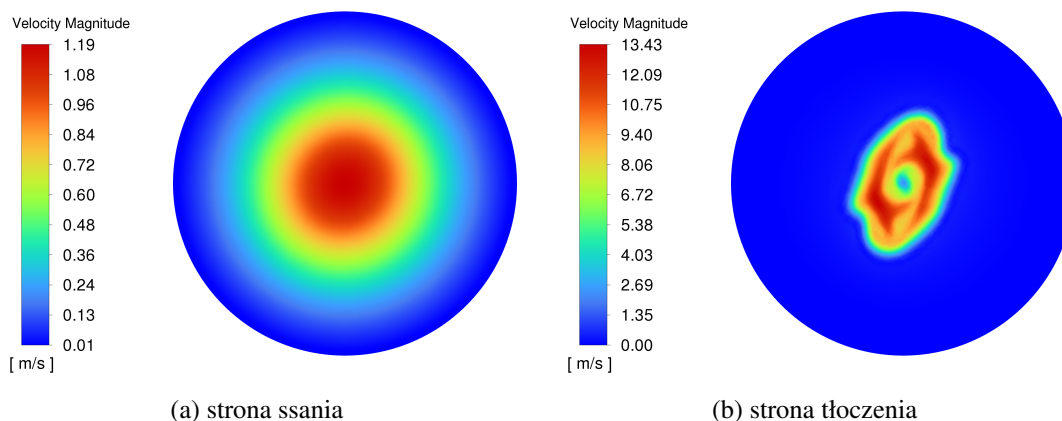
3.1.2. Budowa i analiza układu dwóch wirników

Po przeprowadzeniu analizy dla pojedynczego wirnika, wykonano analizę dla układu dwóch wirników. Taki układ wirników, nazywany jest również kolumną bądź parą przeciwbieżną. W tym celu konieczne było utworzenie dwóch stref dynamicznych nad sobą, podobnie w kształcie walca o średnicy 0,36 m i wysokości 0,12 m. Górna strefa zawiera śmigło lewe,



Rys. 3.15. Trajektorie ruchu cząstek dla układu dwóch wirników

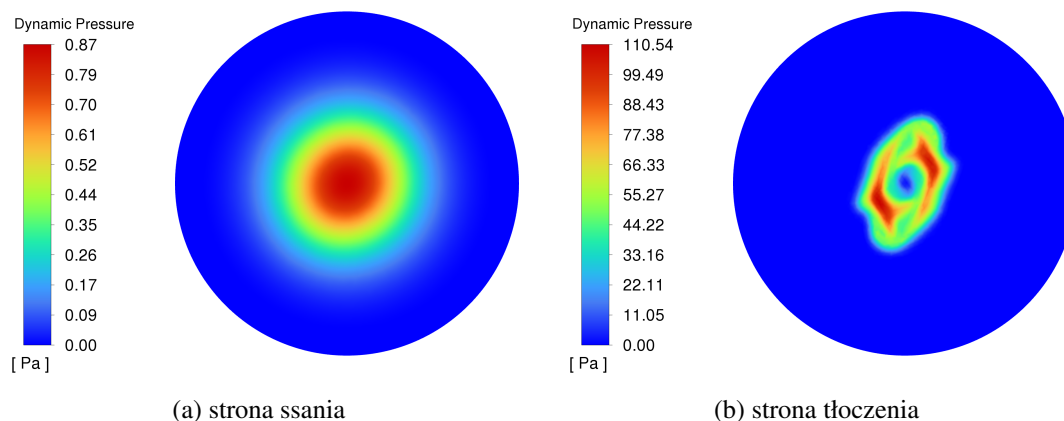
dolna prawa. Śmigła obracają się z identycznymi prędkościami obrotowymi, ale w przeciwnych kierunkach. Całość została zamknięta w strefie statycznej również w kształcie walca o średnicy 0,8 m i wysokości 0,6 m (rysunek 3.1b), czyli o takich samych wymiarach zewnętrznych jak w przypadku analizy dla pojedynczego wirnika tego typu. Na rysunku 3.15 zaprezentowano trajektorie ruchu cząstek dla tego układu.



Rys. 3.16. Pola prędkości powietrza dla układu dwóch wirników

Prędkość obrotową wirników przyjęto taką samą jak w przypadku analizy dla jednego wirnika, podobnie rozmiary elementów w poszczególnych strefach. Przyjęto: $y = 6 \cdot 10^{-6}$ m, maksymalny rozmiar elementu w strefie obrotowej 0,0025 m, w statycznej 0,01 m. Ze względu na obecność dwóch stref dynamicznych liczba elementów siatki tegoż układu była większa i wynosiła 16,3 mln. Po wykonaniu obliczeń osiągnięto maksymalną wartość parametru y^+ na

powierzchni obu wirników na poziomie 0,82. Na rysunku 3.16 zaprezentowano prędkości powierza po stronie ssania i tłoczenia. Na rysunku 3.17 pokazano ciśnienie dynamiczne po stronie ssania i tłoczenia. Maksymalne wartości prędkości powietrza, występujące pod



Rys. 3.17. Pola ciśnień dynamicznych dla układu dwóch wirników

wirnikami na dolnej powierzchni, dochodziły do $13,4 \text{ ms}^{-1}$. Po stronie ssącej była to wartość $1,19 \text{ ms}^{-1}$. Na powierzchni bocznej ta prędkość dochodziła do ok $0,27 \text{ ms}^{-1}$. Ciśnienie dynamiczne, po stronie wylotowej osiągało wartości 111 Pa. Na powierzchni górnej osiągało ono wartość 0,9 Pa, bocznej – 0,04 Pa. Były to porównywalne, albo nieco większe wartości jak w przypadku poprzednio omawianych przypadków, jednakże domena statyczna była znacznie większa, a te wartości zostały określone na jej granicach. W większej odległości od wirników te wartości będą mniejsze.

Tabela 3.2. Porównanie układów z jednym i z dwoma wirnikami na podstawie danych uzyskanych na drodze modelowania

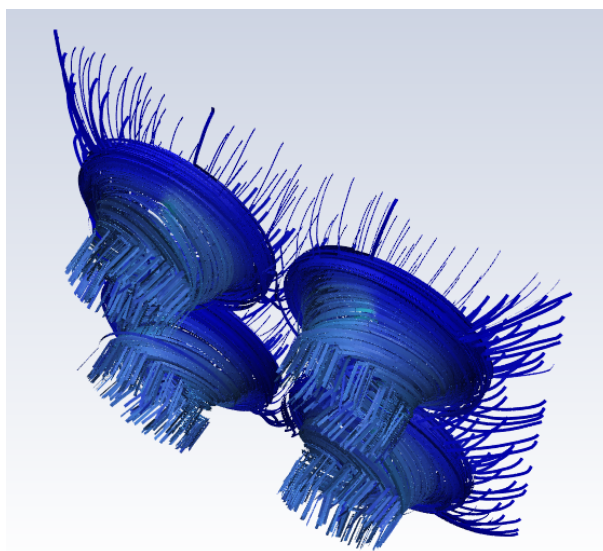
Układ	pojedynczy (L)	podwójny		
		górny (L)	dolny (P)	suma
Siła ciągu [N]	3,94	3,66	2,11	5,77
Moment obrotowy [Nm]	-0,06	-0,06	0,05	-0,01
Moc mechaniczna [W]	26,73	26,30	21,91	48,21

Kolejnym aspektem analizy było wyznaczenie wypadkowych sił ciągu i momentów obrotowych dla każdego ze śmigieł. Otrzymane wyniki zestawiono w tabeli 3.2 i zestawiono z tymi dotyczącymi pojedynczego wirnika. Zastosowano tutaj następujące oznaczenia: L – lewy, P – prawy kierunek obrotów. Należy stwierdzić przede wszystkim że pracujące w kolumnie wirniki generują różne co do wartości siły i momenty. Porównując dane z tymi

wyznaczonymi dla pojedynczego niezależnego wirnika, to pracując w kolumnie wirnik górny generuje siłę na poziomie 93%, moment zaś 98%. Dolny zaś już jedynie odpowiednio 53% i 81%. Innymi słowy, wirnik dolny generuje jedynie 37% całkowitej siły ciągu dla całej kolumny. Generowany moment dla silnika dolnego jest on 11% mniejszy. Wynika to przede wszystkim z faktu, że silnik dolny zasilany jest powietrzem już wstępnie przyśpieszonym przez silnik górny. Ponadto, kolumna wymaga około 90% mocy w porównaniu do dwóch pojedynczych wirników, przy czym sumarycznie generuje siłę ciągu na poziomie 73% dwóch niezależnych pojedynczych wirników.

3.1.3. Budowa i analiza układu czterech wirników

Kolejnym etapem prac było przeprowadzenie analizy dla układu czterech wirników.

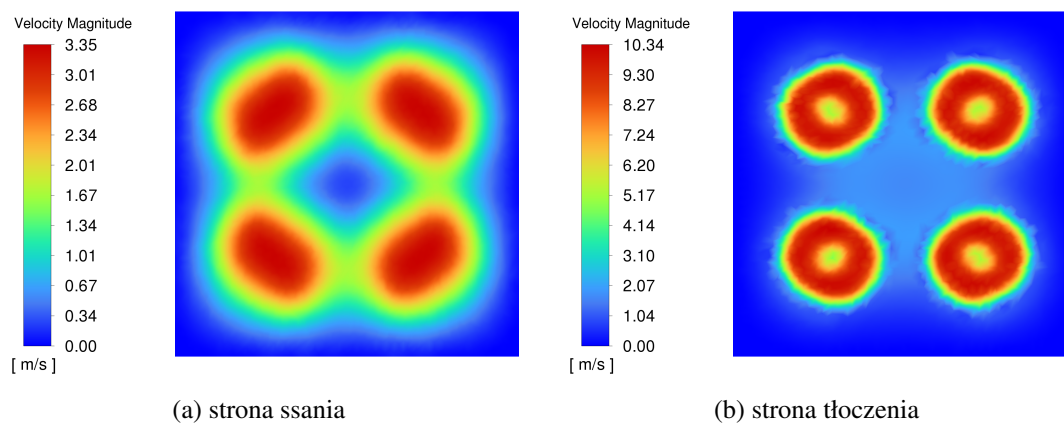


Rys. 3.18. Trajektorie ruchu cząstek dla układu czterech wirników

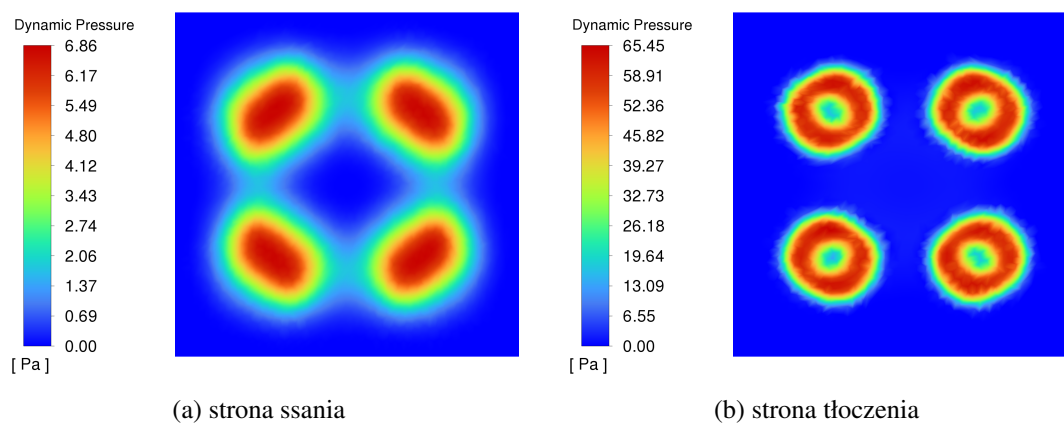
Podobnie jak dla przypadku z pojedynczym wirnikiem 1045, utworzono strefę obrotową o kształcie cylindra o średnicy 0,3 m i wysokości 0,1 m. Następnie zaś przy pomocy narzędzi translacji i odbicia utworzono trzy dodatkowe strefy obrotowe ze śmigłami w pożądanej konfiguracji (naprzemiennie śmigła lewe i prawe). Całość zamknięto w strefie statycznej, o kształcie prostopadłościanu o wymiarach 0,75 m \times 0,75 m \times 0,20 m. Finalnym krokiem było odjęcie objętości wszystkich cylindrów od strefy statycznej, a następnie każdej z brył śmigieł od odpowiadającej mu domeny obrotowej (rysunek 3.1c). Na rysunku 3.18 zaprezentowano trajektorie ruchu cząstek dla tego układu.

Po wykonaniu obliczeń, parametr y^+ nie przekraczał wartości 0,97 na powierzchni wirników. Przyjęto również: $y = 6 \cdot 10^{-6}$ m, maksymalny rozmiar elementu w strefie obrotowej

0,003 m, w strefie statycznej 0,02 m. Liczba elementów w tak przygotowanej siatce wynosiła ok 18,7 mln. Na rysunku 3.19 zaprezentowano prędkości powietrza po stronie ssania i tłoczenia. Na rysunku 3.20 pokazano ciśnienie dynamiczne po stronie ssania i tłoczenia.



Rys. 3.19. Pola prędkości powietrza dla układu czterech wirników



Rys. 3.20. Pola ciśnień dynamicznych dla układ czterech wirników

Maksymalne wartości prędkości powietrza wynosiły do $10,3 \text{ ms}^{-1}$, i zaobserwowano je pod wirnikami na dolnej powierzchni, nazywanej tutaj stroną tłoczenia. Na powierzchni bocznej ta prędkość była mniejsza i dochodziła do ok $0,6 \text{ ms}^{-1}$. Ciśnienie dynamiczne wynosiło: pod robotem $65,5 \text{ Pa}$, nad $6,9 \text{ Pa}$, na powierzchni bocznej $0,2 \text{ Pa}$. Kolejnym aspektem analizy było wyznaczenie wypadkowych sił ciągu i momentów obrotowych dla każdego ze śmigieł. Otrzymane wyniki zaprezentowano w tabeli 3.3.

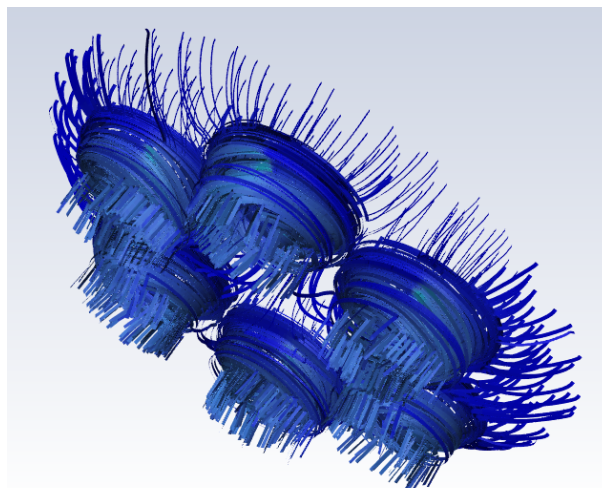
Tabela 3.3. Siły ciągu i momenty obrotowe w układzie czterech wirników

Wirnik	1	2	3	4	Suma
Kierunek obrotów	L	P	L	P	—
Siła [N]	2,730	2,730	2,730	2,730	10,920
Moment obrotowy [Nm]	-0,045	0,045	-0,045	0,045	0,000

Zarówno siły ciągu jak i momenty generowane przez poszczególne śmigła są równe co do wartości. W przypadku momentów wartości dla śmigieł lewych (patrząc na robota od góry – obracających się przeciwnie do wskazówek zegara) są ujemne, a prawych dodatnie. W porównaniu do układu z jednym wirnikiem (siła 2,90 N, moment 0,047 Nm), uzyskano mniejsze wartości. W przypadku sił uzyskano wynik około 6% mniejszy, w przypadku momentów około 4% mniejszy. Jest to związane z wpływaniem na siebie pracujących wirników.

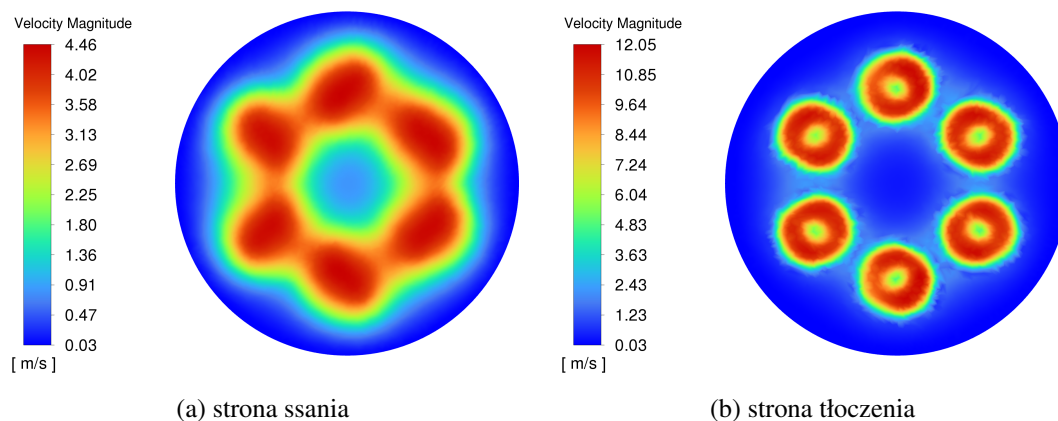
3.1.4. Budowa i analiza układu sześciu wirników

Układ sześciu wirników jest bardzo podobny do układu czterech wirników. Wyposażony jest on w ten sam typ śmigieł, dlatego też przyjęto takie same strefy dynamiczne. Uwzględniono dodatkowe wirniki, i całość została zamknięta w strefie statycznej w kształcie walca o średnicy 0,5 m i wysokości 0,2 m (rysunek 3.1d).

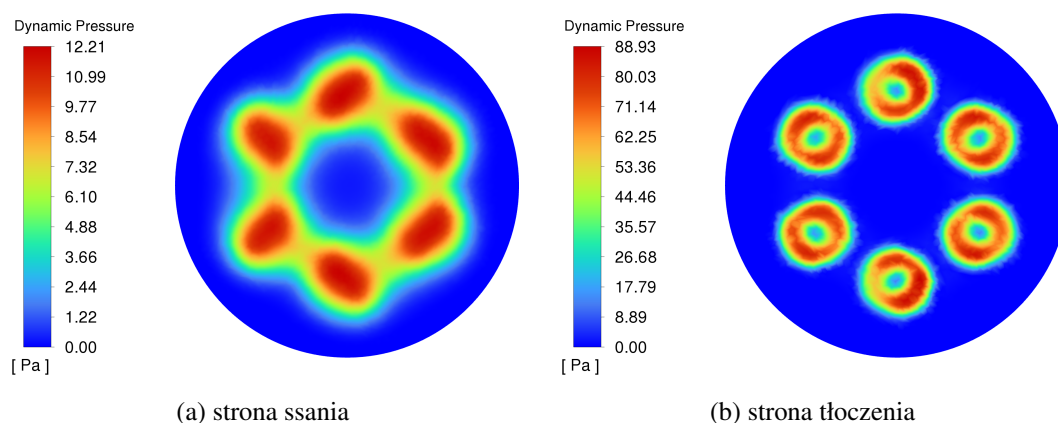
**Rys. 3.21.** Trajektorie ruchu cząstek dla układu sześciu wirników

Przyjęto również: $y = 5 \cdot 10^{-6}$ m, maksymalny rozmiar elementu w strefie obrotowej 0,003 m, w strefie statycznej 0,02 m. Liczba elementów w tak przygotowanej siatce wynosiła ok 15,3 mln. Na rysunku 3.21 zaprezentowano trajektorie ruchu cząstek dla tego

układu. Po wykonaniu obliczeń osiągnięto parametr y^+ na poziomie 0,95. Na rysunku 3.22 zaprezentowano prędkości powierza po stronie ssania i tłoczenia. Na rysunku 3.23 pokazano ciśnienie dynamiczne po stronie ssania i tłoczenia. Wartości prędkości powietrza były



Rys. 3.22. Prędkość powietrza – układ sześciu wirników



Rys. 3.23. Ciśnienie dynamiczne – układ sześciu wirników

większe w porównaniu do układu o czterech wirnikach. Maksymalne wartości dochodziły do 12 ms^{-1} , i podobnie występują one pod wirnikami na dolnej powierzchni. W porównaniu do poprzedniego przypadku były większe o około 17%. Na powierzchni bocznej ta prędkość była podobna i dochodziła do ok $0,6 \text{ ms}^{-1}$. Ciśnienie dynamiczne, które na wylocie osiągało wartości 89 Pa było około 36% większe niż w przypadku układu czterech wirników. Na powierzchni bocznej osiągało ono wartość 0,2 Pa. Kolejnym aspektem analizy było wyznaczenie wypadkowych sił ciągu i momentów obrotowych dla każdego ze śmigieł. Otrzymane wyniki zaprezentowano w tabeli 3.4.

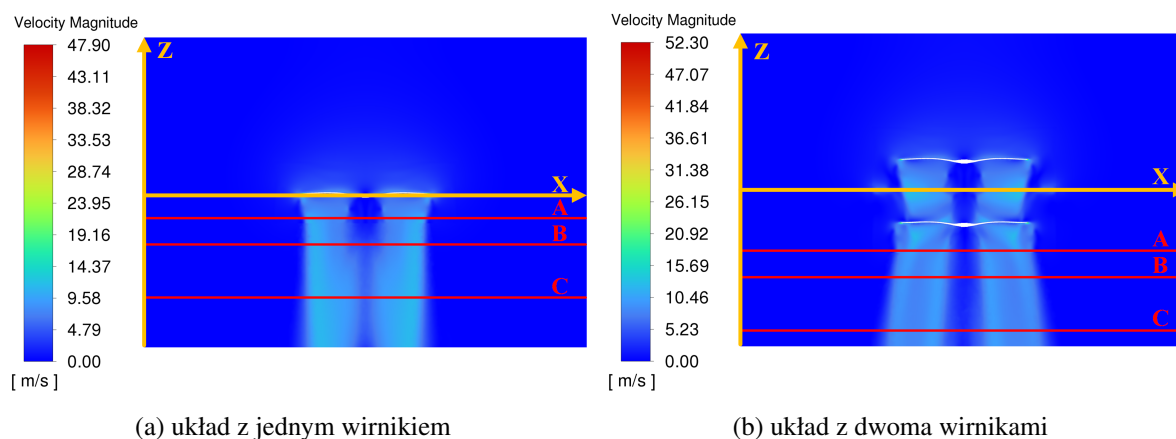
Tabela 3.4. Siły ciągu i momenty obrotowe w układzie sześciu wirników

Wirnik	1	2	3	4	5	6	Suma
Kierunek obrotów	L	P	L	P	L	P	–
Siła [N]	3,360	3,380	3,400	3,430	3,380	3,390	20,340
Moment obrotowy [Nm]	-0,058	0,058	-0,057	0,058	-0,059	0,059	0,001

Jak zaprezentowano w tabeli 3.4 zarówno siły ciągu jak i momenty generowane przez poszczególne śmigła są zbliżone co do wartości. W porównaniu do układu z jednym wirnikiem (siła 3,78 N, moment 0,061 Nm), uzyskano mniejsze wartości. W przypadku sił uzyskano wynik około 10% mniejszy, w przypadku momentów około 5% mniejszy. Jest to, analogicznie jak w układzie czterech wirników, związane z wpływaniem na siebie pracujących śmigieł. Podsumowując, w porównaniu do poprzedniego układu, uzyskano nieznacznie większą różnicę w wartościach siły od wirników, natomiast w przypadku momentów różnice są na porównywalnym poziomie.

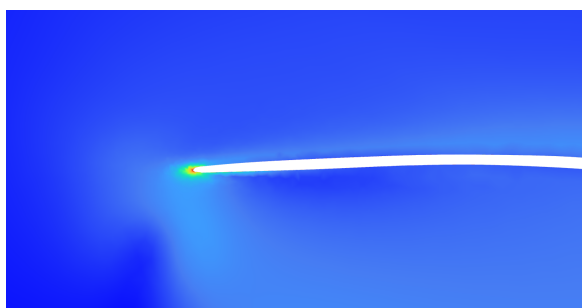
3.2. Dobór lokalizacji wlotu układu pomiarowego stężenia cząstek stałych

Po zweryfikowaniu modeli komputerowych z wykorzystaniem przygotowanego stanowiska hamowni, wykorzystano otrzymane dane do celów wyznaczenia właściwej lokalizacji wlotu układu pomiarowego robota.



Rys. 3.24. Rozkłady pola prędkości w przekrojach podłużnych dla układów z wirnikami 1238

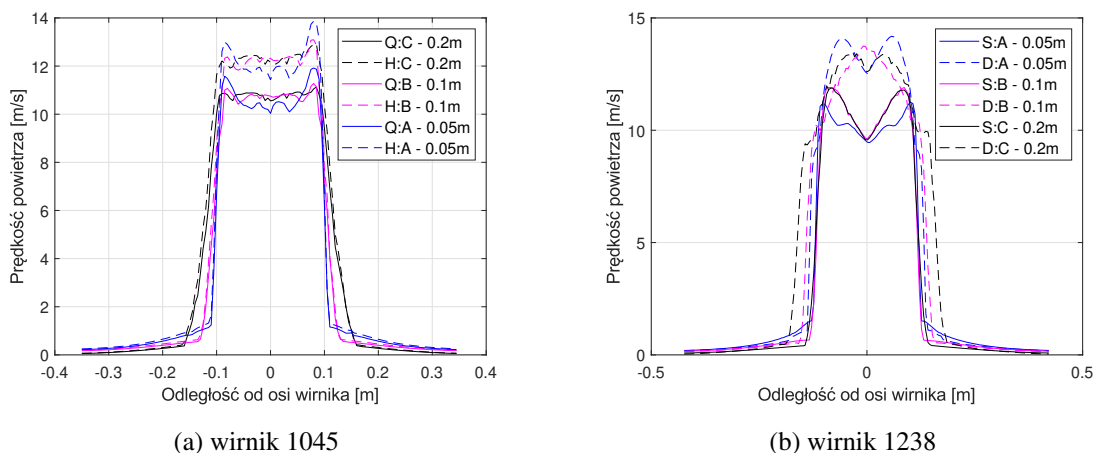
Wstępnie, jako parametr pozwalający na określenie lokalizacji wlotu układu pomiarowego określono natężenie turbulencji. Parametr ten umożliwił również porównanie różnych konfiguracji robotów. Jako próg wybrano wstępnie wartość natężenia mniejszą niż 2%. Analizę rozpoczęto od wyznaczenia poprzecznych przekrojów pól prędkości i natężenia turbulencji. Na rysunku 3.24 zestawiono rozkłady pól prędkości przepływu dla układów z jednym i dwoma wirnikami 1238.



Rys. 3.25. Rozkład pola prędkości w przekroju podłużnym dla układu z jednym wirnikiem 1238 (powiększenie rysunku 3.24a)

Ponadto, na rysunku oznaczono literami kolejno *A*, *B* i *C* trzy płaszczyzny, zlokalizowane odpowiednio 0,05 m, 0,1 m i 0,2 m pod płaszczyzną wirnika. W przypadku układu z dwoma

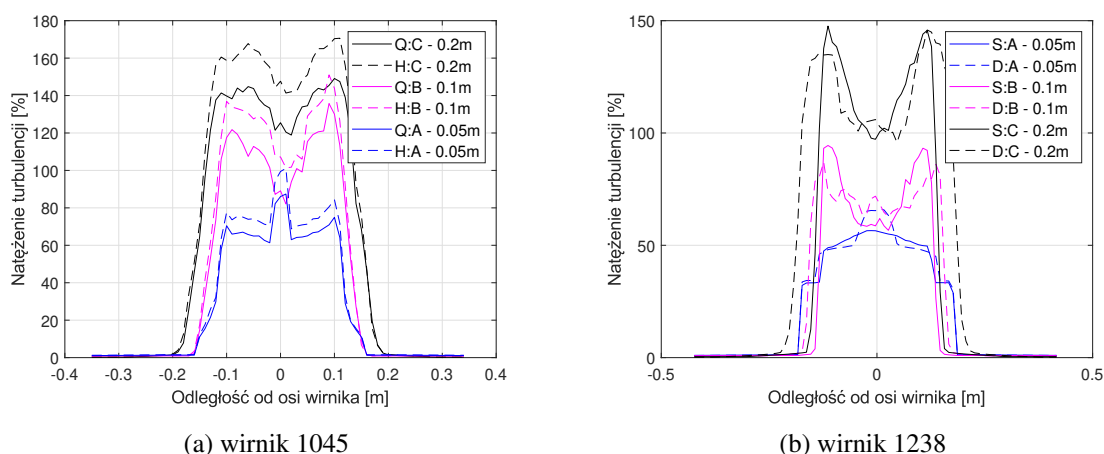
wirnikami, odległości te były określone pod płaszczyzną tym razem dolnego wirnika. Są to wtedy odległości 0,11m, 0,16m i 0,26m od środka strefy statycznej. Na tychże rozkładach należy również zaobserwować, że prędkości powietrza osiągały maksymalne wartości ok. 48 ms^{-1} oraz 52 ms^{-1} , odpowiednio dla jednego i dwóch śmigieł. Dla porównania, dla mniejszego wirnika były to maksymalnie wartości ok. 38 ms^{-1} . Te wartości występują na końcach łopat wirnika, jak zaprezentowano w powiększeniu na rysunku 3.25.



Rys. 3.26. Obwiednie pola prędkości w wskazanych przekrojach poprzecznych dla analizowanych układów

Dla każdego z przypadków i dla każdej z tych trzech płaszczyzn wyeksportowano z programu *Fluent* dane dotyczące natężenia turbulencji oraz prędkości przepływu. Jako że dane z programu były w postaci chmury punktów, to konieczne było na ich podstawie wyznaczenie obwiednie obu parametrów. Zadanie to wykonano za pomocą przygotowanych skryptów w programie *Matlab*. Na rysunkach 3.26 i 3.27 zestawiono te wyniki, dla poszczególnych płaszczyzn, w zależności od odległości od osi obrotu wirnika. Na rysunkach zastosowano następujące oznaczenia: *Q* i *H* oznaczają odpowiednio wirnik 1045 pracujący dla warunków pracy robota o czterech i sześciu wirnikach, *S* i *D* oznaczają odpowiednio wirnik 1238 pracujący dla warunków pracy robota o ośmiu wirnikami w układach z jednym i dwoma wirnikami.

Na podstawie rysunku 3.27 należy zauważyć, że natężenie turbulencji rośnie wraz z zmniejszającą się odległością od wirnika. Co do wartości prędkości (rysunek 3.26), to dla każdej wybranej z analizowanych konfiguracji rozkład i wartości maksymalne są na podobnym poziomie niezależnie od wybranego przekroju. Taka sytuacja nie ma miejsca dla natężenia turbulencji, gdzie dla przekrojów bardziej oddalonych są to wartości większe. Co więcej, dla większego wirnika 1238, to wartości natężenia turbulencji w przypadku układu podwójnego



Rys. 3.27. Obwiednie natężenia turbulencji w wskazanych przekrojach poprzecznych dla analizowanych układów

otrzymano nieco mniejsze, wartości prędkości powietrza otrzymano zaś większe w porównaniu do układu z pojedynczym śmigłem.

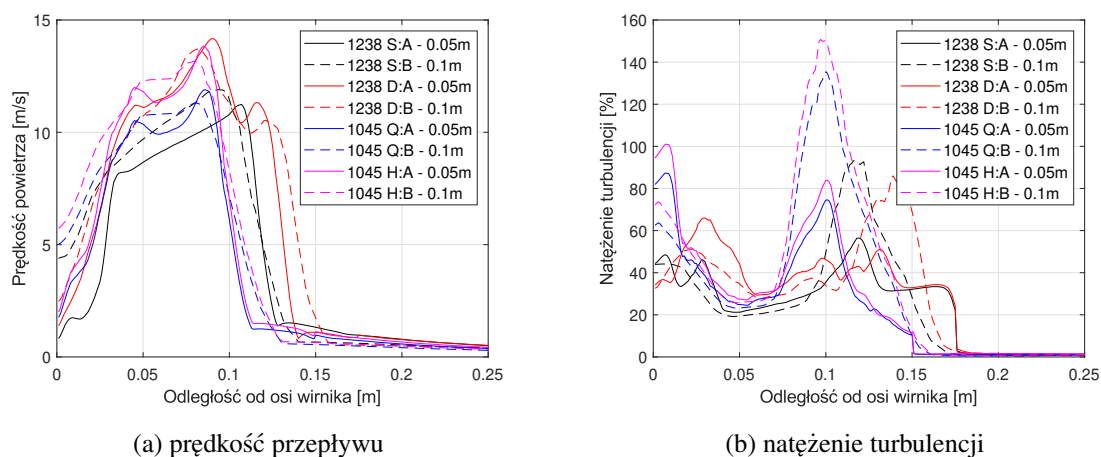
W tabeli 3.5 zestawiono minimalne odległości od osi wirnika d_{min} oraz prędkości przepływu dla tychże $v(d_{min})$, dla których to wskazany parametr natężenia turbulencji był mniejszy od przyjętego progu 2%. W tabeli zastosowano takie same oznaczenia jak na rysunkach: Q i H oznaczają odpowiednio wirnik 1045 pracujący dla warunków pracy robota o czterech i sześciu wirnikach, S i D oznaczają odpowiednio wirnik 1238 pracujący dla warunków pracy robota o ośmiu wirnikach w układach z jednym i dwoma wirnikami. Z danych

Tabela 3.5. Omawiane parametry we wskazanych przekrojach dla progu natężenia turbulencji $< 2\%$

Wirnik		1045		1238	
Przekrój	Parametr	Q	H	S	D
A	d_{min} [m]	0,150	0,150	0,175	0,177
	$v(d_{min})$ [ms^{-1}]	0,80	0,91	0,80	0,62
B	d_{min} [m]	0,153	0,153	0,144	0,174
	$v(d_{min})$ [ms^{-1}]	0,49	0,55	0,64	0,50
C	d_{min} [m]	0,189	0,192	0,175	0,227
	$v(d_{min})$ [ms^{-1}]	0,27	0,32	0,36	0,32

zgromadzonych w tabeli wynika, że minimalna odległość d_{min} rośnie zarówno dla konfiguracji z większą liczbą wirników, jak i dla zwiększającej się prędkości obrotowej wirnika. Należy zauważyć, że odległość ta jest zawsze większa niż połowa średnicy śmigieł, które wynosiły odpowiednio 0,127 m i 0,152 m. Dla tych samych czynników podobnie rośnie prędkość

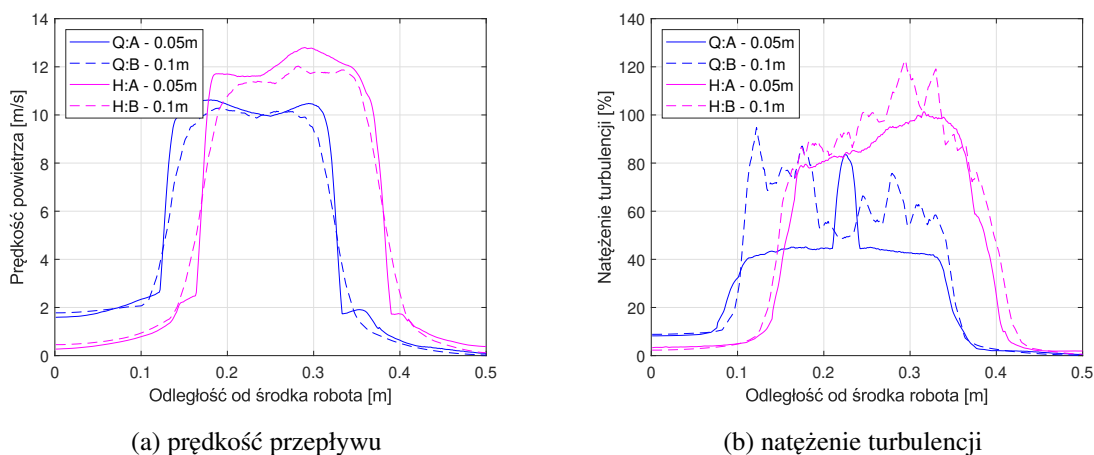
przepływu, jednakże dla przyjętego progu 2% nie przekraczała ona 1 ms^{-1} we wszystkich przypadkach. Co do odległości d_{min} , to różnice pomiędzy przekrojami A i B są stosunkowo małe dla każdego z przypadków. Wynika to z faktu, że dla przekroju A (który w przybliżeniu odpowiada położeniu ramienia robota) natężenie turbulencji gwałtownie wzrasta do poziomu 10%, co widać na rysunku 3.27. Porównując konfiguracje z większym wirnikiem, należy również wziąć pod uwagę, że odległości dla układu podwójnego D są zdefiniowane poniżej dolnego wirnika i wynoszą odpowiednio 0,11 m, 0,16 m i 0,26 m pod osią ramienia robota.



Rys. 3.28. Obwiednie prędkości przepływu i natężenia turbulencji w wskazanych przekrojach poprzecznych dla układów z jednym i dwoma wirnikami

Na podstawie otrzymanych danych z modelu komputerowego, omawiane dane przeanalizowano jeszcze w inny sposób. Na etapie post-processingu, wykorzystując polarny układ współrzędnych rozmieszczono punkty kontrolne na okręgach, dla promieni zwiększających się z krokiem 0,001 m. Współrzędne punktów wybrano tak, aby rozdzielczość kątowa dla każdego okręgu była stała i wyniosła 0,0013 radiana (tym samym utrzymano stałą liczbę 500 punktów na każdym okręgu). We wszystkich punktach odczytano dane prędkości przepływu i natężenia turbulencji do oprogramowania *Matlab*. Dla każdego z tych okręgów wyznaczono następnie wartości maksymalne tychże parametrów, i uzyskane obwiednie zestawiono na wykresach. Takie podejście również umożliwia łatwe porównanie i ocenę każdej z konfiguracji. Jednakże w tym przypadku nie obserwuje się różnic numerycznych pomiędzy połówkami modelu.

Na rysunku 3.28 zaprezentowano porównanie analizowanych układów z jednym i dwoma wirnikami pod względem natężenia turbulencji i prędkości przepływu. Na podstawie tychże danych możliwe jest przyjęcie kryterium, które umożliwi wskazanie właściwej odległości od wirnika, przy założeniu stałej (mniejszej niż) wartości prędkości przepływu bądź natężenia turbulencji. Zastosowano tutaj takie same oznaczenia jak w wcześniejszych rysunkach. Ze względu na dużą liczbę krzywych zaprezentowano tylko dane dla przekrojów A i B.



Rys. 3.29. Obwiednie prędkości przepływu i natężenia turbulencji w wskazanych przekrojach poprzecznych dla układów z czterema i sześcioma wirnikami

Na podstawie danych zaprezentowanych w sposób graficzny należy zauważyć iż dla przekroju bardziej oddalonego prędkość przepływu maleje o ok. 5%. Dla układu dwóch wirników w szczególności należy zauważyć że zwiększone wartości obserwuje się w większej odległości od wirnika. Wniosek, iż układ z większym wirnikiem cechuje się mniejszym natężeniem turbulencji jest nie poprawny, gdyż podane odległości w przypadku tego układu są zbyt małe. Tym samym na tychże wykresach nie ma widocznego całościowego rozwinięcia zakłóconego pola, tak jak na przekroju C. Należy zauważyć (rysunek 3.28a) że natężenia szybko spadają w okolice niewielkich wartości 2-3% w przypadku mniejszego wirnika dla odległości 0,15 m, natomiast dużego w okolicach 0,175 m. Związane jest to z tym, że odległości te odpowiadają długości łopaty śmigła. Prędkości (rysunek 3.28b) osiągają wartości maksymalne w odległości około 0,09 m. Zaletą tego podejścia jest to, że w ten sam sposób możliwe było porównanie modeli z czterema i sześcioma wirnikami. Na rysunku 3.29 zaprezentowano te same dane dla tychże układów. W tym przypadku określono te wartości w odniesieniu do środka robota. Zastosowano tutaj następujące oznaczenia: Q , H – odpowiednio układ czterech i sześciu wirników.

Należy stwierdzić iż w przypadku konfiguracji z sześcioma wirnikami, zarówno natężenia turbulencji jak i prędkość przepływu są większe w porównaniu do układu z czterema wirnikami. Jednakże w przypadku układu z czterema wirnikami prędkość bliżej środka geometrycznego robota jest większa. Związane jest to z tym iż odległości pomiędzy wirnikami w przypadku robota typu quadcopter jest mniejsza. Dlatego też, gdyby umieszczać czujniki pomiarowe pod robotem, bardziej odpowiednia była by konfiguracja o większej liczbie wirników. Dlatego do dalszych analiz wybrano konfigurację z sześcioma wirnikami. Dla tej konfiguracji, największe wartości występują w odległości około od 0,15 m do 0,4 m względem środka robota, czyli bezpośrednio pod wirnikami. Należy również zauważyć (rysunek 3.29b) że natężenia

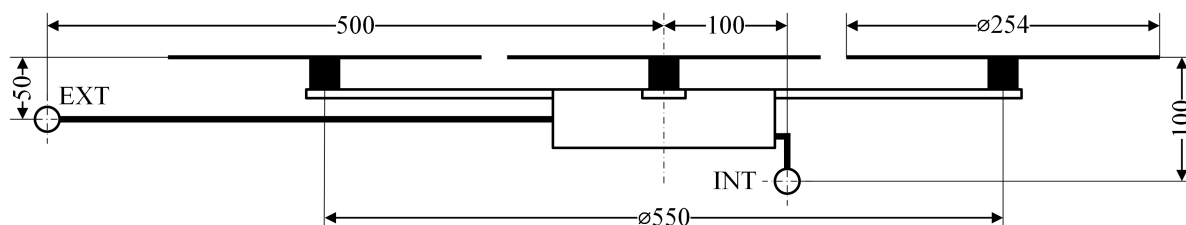
turbulencji szybko spadają w okolice niewielkich wartości rzędu 2–3% w dla odległości mniejszych niż 0,1 m, oraz większych niż 0,45 m. Na podstawie analizy przebiegu parametrów wskazanych na rysunku 3.29 zdecydowano się ostatecznie na przyjęcie kryterium zapewniające brak przekroczenia maksymalnej prędkości przepływu:

$$r^* = \arg \max_{r \in \langle r_{min}, r_{max} \rangle} V_{max}(r), \text{ pod warunkiem, że: } V_{max}(r) < V_t \quad (3.24)$$

Oznacza to, że szukana jest minimalna odległość do wirnika, dla którego prędkość $V_{max}(r)$ osiąga wartość maksymalną przy jednoczesnym spełnieniu podanego warunku. Wartości promieni r_{min} i r_{max} wynoszą odpowiednio 0 i 0,5 m. Ponieważ prędkość przepływu przyjmuje wartości maksymalne w ograniczonym przedziale, dla tychże progów znaleziono dwie wartości promienia r : r_{int} i r_{ext} dla których następuje przekroczenie wartości progowej. Innymi słowy prędkość przepływu jest większa od wartości progowej dla promienia mniejszego od r_{int} i większego od r_{ext} . Rozważono 3 wartości progowe V_t : $V_{max} < 0,5, 1,0$ i $2,0 \text{ ms}^{-1}$. Wyniki dla obu analizowanych przekrojów zestawiono w tabeli 3.6. W tabeli zamieszczono również wartości T_{max} maksymalnego natężenia turbulencji dla podanych promieni. Analizując dane

Tabela 3.6. Omawiane parametry w wskazanych przekrojach dla progów prędkości przepływu

V_t	Przekrój	r_{int}	r_{ext}	$T_{max}(r_{int})$	$T_{max}(r_{ext})$
$< 0,5 \text{ ms}^{-1}$	A 0,05 m	0,065 m	0,470 m	3,98 %	1,87 %
	B 0,10 m	0,032 m	0,448 m	2,52 %	2,58 %
$< 1,0 \text{ ms}^{-1}$	A 0,05 m	0,118 m	0,428 m	6,71 %	3,77 %
	B 0,10 m	0,105 m	0,421 m	5,33 %	11,6 %
$< 2,0 \text{ ms}^{-1}$	A 0,05 m	0,144 m	0,389 m	24,2 %	45,5 %
	B 0,10 m	0,142 m	0,404 m	33,6 %	41,1 %



Rys. 3.30. Rysunek techniczny robota heksacofter z zaznaczoną lokalizacją wlotu czujników. Oznaczenia na rysunku: *INT* – wlot czujnika pod robotem, *EXT* – wlot czujnika na wysięgniku [198]

zestawione w tabeli, zdecydowano się na przyjęcie wartości progowej V_t równej $1,0 \text{ ms}^{-1}$. Wartość ta była najbardziej odpowiednia, gdyż dla wartości $0,5 \text{ ms}^{-1}$ promienie znajdują się

praktycznie na granicach domeny obliczeniowej. Dla wartości $2,0 \text{ ms}^{-1}$ natężenia turbulencji znajdują się w przedziale 24,2 % do 41,1 %, czyli są to już duże natężenia. Biorąc pod uwagę również natężenie turbulencji, wlot układu pomiarowego należy lokalizować (Rys. 3.30):

- pod robotem – 0,10 m pod płaszczyzną wirników, nie dalej niż 0,105 m, gdyż na tym promieniu maksymalne natężenie turbulencji nie przekracza 5,33 %. Wybrano odległość 0,10 m od środka robota, gdzie maksymalne natężenie turbulencji dla tej lokalizacji wynosi 4,80 %.
- na wysięgniku – 0,05 m pod płaszczyzną wirników, w odległości większej od 0,428 m, gdyż na tym promieniu maksymalne natężenie turbulencji nie przekracza 3,77 %. Wybrano odległość 0,50 m od środka robota, gdzie maksymalne natężenie turbulencji wynosiło 1,96 %.

3.3. Podsumowanie

Podsumowując, przeprowadzono analizę zaburzenia pola wokół wirników robotów wielowirnikowych. Najpierw wykonano kalibrację modelu z jednym wirnikiem na podstawie danych z zbudowanego dedykowanego stanowiska hamowni, którego opis zamieszczono w rozdziale 5.2. Na stanowisku wyznaczono charakterystyki siły ciągu, momentu obrotowego, mocy mechanicznej i elektrycznej oraz sprawności badanych wirników. Różnice pomiędzy danymi z modelu a tymi z eksperymentu dla mniejszego z analizowanych wirników nie przekraczały ok. 10%. Dla większego wirnika było to około 19,5%, jednakże dotyczyło to mocy mechanicznej. W przypadku siły ciągu i momentów były to różnice odpowiednio około 8% i 14%. Uzyskane rozbieżności pomiędzy modelem komputerowym, a eksperymentem należy uznać za nieistotne, a obliczenia uznać za dostatecznie dokładne.

Po weryfikacji otrzymanych danych, możliwe było rozbudowanie analizy o układy z większą liczbą wirników. Badania umożliwiły również wyznaczenie rozkładu pola prędkości, ciśnień i natężenia turbulencji. Tego typu rozkłady były by bardzo trudne do wyznaczenia na drodze eksperymentalnej. Aby je wykonać w praktyce należałoby umieścić kilka czujników w ustalonych odległościach od osi wirnika. Jednakże były by to pomiary zgrubne, tylko w wybranych punktach i sama obecność czujników zakłócałaby przepływ powietrza. Poprawność obliczeń zweryfikowano również na podstawie weryfikacji ruchu trajektorii cząstek. Sformułowano również szczegółowy schemat postępowania przy prowadzeniu tego typu badań. Na tej podstawie możliwe jest przeprowadzenie analizy dla dowolnego układu wirników.

Wykonane analizy umożliwiły określenie i porównanie dwóch kryteriów maksymalnego natężenia turbulencji i maksymalnej prędkości przepływu. Do dalszych prac przyjęto drugie z wymienionych. Jest to kryterium, na podstawie którego wskazano właściwą lokalizację układu pomiarowego robota, jak i odpowiedni układ wirników, którym okazał się robot o sześciu wirnikach o średnicy 10 cali. Prawidłowe zaprojektowanie układu pomiarowego stężenia cząstek stałych do poszukiwania źródła zanieczyszczenia ma kluczowe znaczenie, aby robot mógł pełnić wyznaczoną mu funkcję lokalizacji źródeł zanieczyszczenia. Podczas budowy prototypu zdecydowano się zbadać dalej dwie lokalizacje dla wlotu układu pomiarowego robota. Na podstawie podanych wytycznych, wlot pod robotem należało by zlokalizować 0,10 m pod płaszczyzną wirników i 0,10 m od środka robota. Maksymalne natężenie turbulencji dla tej lokalizacji wynosi 4,80 %. Wlot na wysięgniku natomiast, 0,05 m pod płaszczyzną wirników i w odległości 0,50 m od środka robota, gdzie maksymalne natężenie turbulencji wynosiło 1,96 %.

4. Dobór algorytmu poszukiwania źródeł zanieczyszczenia na podstawie modelu pola zanieczyszczeń

Wybór algorytmu który będzie w najszybszy i najdokładniejszy sposób lokalizował źródło zanieczyszczenia wykonano na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych opisanych w niniejszym rozdziale. Wyniki badań w tym zakresie prezentowano również w [199].

4.1. Model matematyczny pola zanieczyszczenia

Jednym z najprostszych modeli, przy pomocy których można w przybliżony sposób w przestrzeni dwuwymiarowej opisać rozkład pola zanieczyszczenia, jest model [132]:

$$C(x, y) = \frac{q}{2\pi K} \frac{1}{r} e^{-\frac{V}{2K}(r-x\hat{w})} \quad (4.1)$$

gdzie:

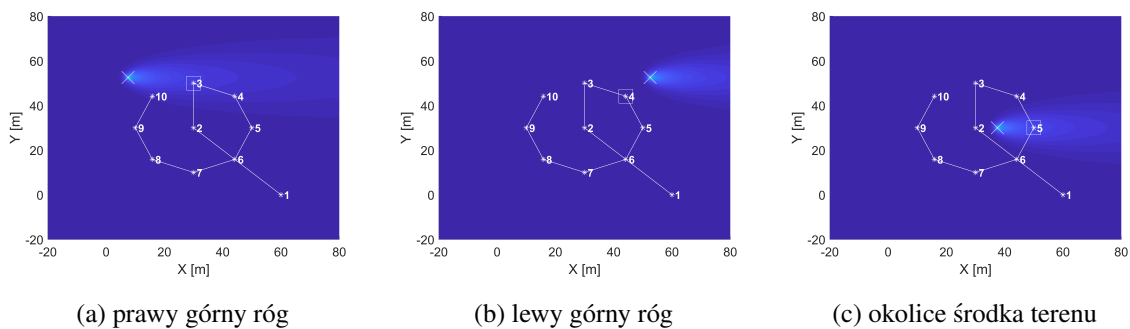
$$r = \sqrt{(x_s - x)^2 + (y_s - y)^2}, \quad x\hat{w} = (x_s - x) \cos \theta + (y_s - y) \sin \theta \quad (4.2)$$

Model ten opisuje stan ustalony, gdzie źródło zanieczyszczenia emituje nieskończenie długo w nieskończoną przestrzeń. Stężenie C w punkcie o współrzędnych (x, y) jest zależne od czynników takich jak: K – turbulentny współczynnik dyfuzji, (x_s, y_s) – położenie źródła zanieczyszczenia, q – natężenie źródła, V – średnia prędkość wiatru, θ – kierunek wiatru, $1/r$ – współczynnik zanikania. Model uwzględnia symetryczny współczynnik zanikania $1/r$ oraz asymetryczny wykładniczy współczynnik zanikania w odniesieniu do kierunku wiatru. Jednakże wykorzystanie tego modelu do badań symulacyjnych było kłopotliwe, ze względu na mało realistyczny opis zjawiska w warunkach praktycznych. Nie zanikające (stałe) wartości stężeń dla kierunku „z wiatrem”, niezależnie od odległości do źródła powodują niepoprawne działanie algorytmów poszukiwania, których strategia poruszania zakłada że stężenia bliższe do źródła będą większe. Dlatego też wszystkie algorytmy zostały przetestowane

przy wykorzystaniu modelu dyfuzji gazu, który opisuje się następującym równaniem [63]:

$$C(r|r_s) = \frac{R}{2\pi D} e^{-(x-x_s)V/2D} K_0\left(\frac{|r-r_s|}{\lambda}\right), \quad \lambda = \sqrt{\frac{D\tau}{1+V^2\tau/4D}} \quad (4.3)$$

gdzie: $C(r|r_s)$ – analogicznie wartość natężenia cząstek w pozycji r jeśli źródło zanieczyszczenia znajduje się na pozycji r_s , V – średnia prędkość wiatru, D – efektywny izotropowy współczynnik dyfuzji, R – natężenie emisji źródła zanieczyszczenia, τ – średni czas życia cząstek uwalnianych przez źródło zanieczyszczenia, K_0 – modyfikowana funkcja Bessela drugiego rodzaju, $|r-r_s|$ – odległość liniowa między położeniem źródła zanieczyszczenia a pozycją dla której natężenie jest wyznaczane. W tym modelu zjawisko zanikania jest dodatkowo modelowane poprzez współczynnik K_0 , powodujący zmniejszanie się stężeń, dla kierunku „z wiatrem”. Drugim powodem wykorzystania tego właśnie modelu do przeprowadzenia analizy było to, że jest to model w oparciu o który działa algorytm infotaksja. Do analizy przyjęto wartości parametrów podobne do tych podawanych w literaturze: $R = 100 \text{ Hz}$, $V = 0,5 \text{ m s}^{-1}$, $D = 0,6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ oraz $\tau = 500 \text{ s}$.



Rys. 4.1. Rozkład pola zanieczyszczenia dla wybranych lokalizacji źródła

Założono wstępnie, że teren na którym będą prowadzone poszukiwania ma kształt kwadratu o boku A i znajduje się na nim jedno źródło zanieczyszczenia. Na rysunku 4.1 zaprezentowano rozkład pola zanieczyszczenia dla trzech analizowanych przypadków rozmieszczenia źródła, dla obszaru o wymiarach $60 \text{ m} \times 60 \text{ m}$. Położenie źródła oznaczono przy pomocy białego znaku X . Robot rozpoczyna poszukiwania od punktu o współrzędnych $(A, 0)$ (patrz na rysunek 4.1 od prawego dolnego rogu). Kolejne cyfry oznaczają kolejność odwiedzanych punktów. Zaprezentowano tutaj przykładowy przebieg dla trajektorii zbliżonej do okręgu. Kierunek lotu wyznaczany jest na podstawie wartości maksymalnej. Oznacz to że robot wykonuje pomiary w wyznaczonych punktach, a następnie znajdowana jest wartość maksymalna stężenia. Za lokalizację źródła zanieczyszczenia uznaje się punkt, dla którego zmierzona wartość stężenia była najwyższa. Dla każdego z analizowanych algorytmów, źródło zanieczyszczenia było umiejscowione w 3 różnych współrzędnych opisanych w sposób parametryczny: $(\frac{7}{8}A, \frac{7}{8}A)$ –

w prawym górnym rogu (Rys. 4.1a), $(\frac{1}{8}A, \frac{7}{8}A)$ – w lewym górnym rogu (Rys. 4.1b) i $(\frac{5}{8}A, \frac{1}{2}A)$ – w okolicy środka obszaru (Rys. 4.1c). Badania symulacyjne przeprowadzono dla obszarów o następujących rozmiarach: $30\text{ m} \times 30\text{ m}$, $60\text{ m} \times 60\text{ m}$, $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ i $200\text{ m} \times 200\text{ m}$.

4.2. Algorytmy poszukiwania źródeł zanieczyszczeń

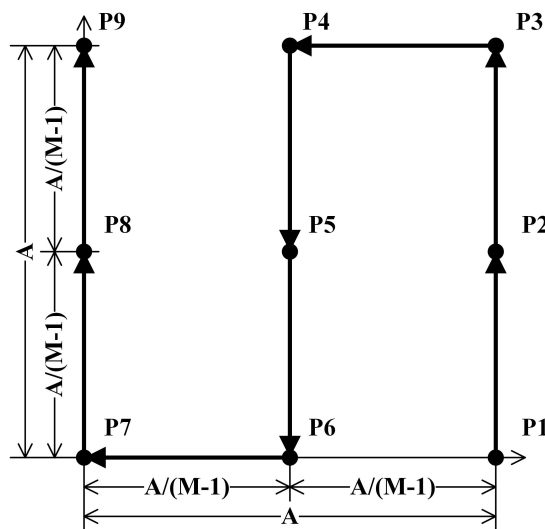
W tym podrozdziale zostaną omówione analizowane algorytmy poszukiwania źródeł zanieczyszczeń. Zadanie poszukiwania zapisano z wykorzystaniem funkcji argument maksimum $\arg \max$. Zwraca ona parę współrzędnych (x, y) punktu, dla którego funkcja opisująca rozkład pola zanieczyszczenia $C(x, y)$ osiąga wartość maksymalną:

$$\arg \max_{x \in \langle x_{min}, x_{max} \rangle, y \in \langle y_{min}, y_{max} \rangle} C(x, y) \quad (4.4)$$

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

4.2.1. Wyznaczanie regularnej siatki punktów pomiarowych

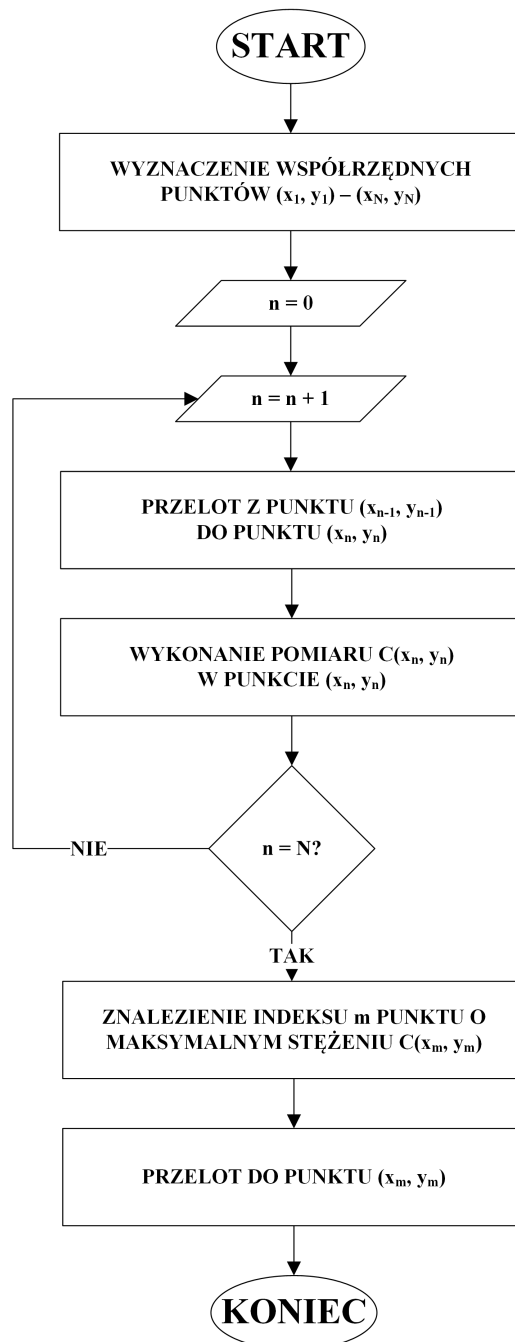
Algorytm poszukiwania naśladujący sposób poruszania się kosiarki polega na wykonaniu pomiarów na jednorodnej siatce punktów pomiarowych. Algorytm taki ma znikome wymagania



Rys. 4.2. Schemat sposobu przemieszczania się robota dla algorytmu poszukiwania na regularnej siatce punktów

dotyczące mocy obliczeniowej. Parametrami algorytmu są tutaj długość boku kwadratu A oraz liczba punktów pomiarowych wzdłuż boku M . Całkowita liczba punktów pomiarowych jest równa $N = M^2$. Robot rozpoczyna poszukiwania od punktu o współrzędnych $(A, 0)$, czyli

tak jak na rysunku 4.2 – od prawego dolnego rogu. Najpierw wyznaczone są współrzędne punktów, a następnie zgodnie z ich kolejnością robot wykonuje kolejno pomiary. Po wykonaniu wszystkich pomiarów, znajdujemy punkt o maksymalnej zmierzonej wartości stężenia, który to uznajemy za lokalizację źródła zanieczyszczenia. Algorytm w postaci schematu blokowego zaprezentowano na rysunku 4.3.



Rys. 4.3. Algorytm poszukiwania na regularnej siatce punktów w postaci schematu blokowego

4.2.2. Wyznaczanie punktów pomiarowych na podstawie infotaksji

Infotaksja (ang. *Infotaxis*) [210] jest to algorytm pochodzący z dziedziny teorii informacji i uczenia maszynowego, który jest stosowany do rozwiązywania problemów optymalizacji i lokalizacji. Algorytm ten opiera się na założeniu, że dane informacje o środowisku są związane z wartościami nieznanymi zmiennych, a jego głównym celem jest znalezienie punktu najbardziej informacyjnego na podstawie tych danych. Infotaksja wykorzystuje teorię informacji do wyliczenia prawdopodobieństwa wystąpienia określonej wartości zmiennej w każdym punkcie środowiska i wybiera punkt, który jest najbardziej informacyjny, czyli taki, który oferuje najwięcej informacji na temat nieznannej wartości. W ten sposób algorytm infotaksji umożliwia skuteczne rozwiązanie wielu problemów, takich jak m.in.: lokalizacja źródła dźwięku czy znalezienie najlepszej lokalizacji dla czujnika. Infotaksja jest często wykorzystywana w aplikacjach związanych z bezpieczeństwem, monitorowaniem środowiska i innych dziedzinach, w których konieczne jest wykorzystanie informacji do podejmowania decyzji. Algorytm ten został dobrze opisany w pracach [210, 63], dostępna jest również implementacja w języku Python [166]. Te materiały zostały wykorzystane do własnej implementacji w środowisku *Matlab*.

Infotaksja składa się z trzech głównych części. Są to: ocena bieżącego stanu informacji, funkcja celu i strategia poruszania się robota prowadzącego poszukiwania. Obszar poszukiwania dzielony na pod-obszary z wykorzystaniem regularnej siatki punktów. Początkowo, zakłada się że każdy pod-obszar ma jednakowe prawdopodobieństwo zawierania źródła. Następnie, w każdym kroku algorytmu, dla każdego możliwego kierunku w którym może poruszyć się robot, wyznaczana jest wartość funkcji celu. Kierunek, w którym przemieści się robot jest tym kierunkiem, dla którego spadek entropii informacji jest największy. Innymi słowy jest to kierunek dla którego zysk informacji będzie największy. Z każdym wykonanym krokiem wykonywana jest aktualizacja rozkładu prawdopodobieństwa każdego z pod-obszarów. Wraz ze spadkiem entropii, robot zbliża się do położenia źródła zanieczyszczenia. W wszystkich poniższych rozważaniach zakłada się, że poszukiwania są prowadzone na przestrzeni dwuwymiarowej.

Istota infotaksji polega na tym, że istnieje możliwość przewidywania stężenia cząstek uwalnianych przez źródło wokół lokalizacji w której znajduje się robot. Do przewidywania stężenia cząstek uwalnianych przez źródło w dowolnym miejscu przestrzeni wykorzystywany jest model dyfuzji gazu, w postaci ogólnej opisany równaniem:

$$0 = V\nabla C(r|r_s) + D\Delta C(r|r_s) - (1/\tau)C(r|r_s) + R\delta(r|r_s) \quad (4.5)$$

gdzie V – średnia prędkość wiatru, D – efektywny izotropowy współczynnik dyfuzji, R – natężenie emisji źródła zanieczyszczenia, δ – delta Kroneckera, τ – średni czas życia cząstek uwalnianych przez źródło zanieczyszczenia, $C(r|r_s)$ – wartość natężenia cząstek w pozycji

r jeśli źródło zanieczyszczenia znajduje się na pozycji r_s . Po wykonaniu przekształceń oraz zakładając dwuwymiarową przestrzeń, model przyjmuje postać:

$$C(r|r_s) = \frac{R}{2\pi D} e^{-(x-x_s)V/2D} K_0 \left(\frac{|r-r_s|}{\lambda} \right), \quad \lambda = \sqrt{\frac{D\tau}{1+V^2\tau/4D}} \quad (4.6)$$

gdzie: K_0 – modyfikowana funkcja Bessela drugiego rodzaju, $|r-r_s|$ – odległość liniowa między położeniem źródła zanieczyszczenia a pozycją dla której natężenie jest wyznaczane.

Bieżący stan informacji robota, dotyczących lokalizacji źródła zanieczyszczenia, określony jest rozkładem prawdopodobieństwa $P(r_s|L_{1:k+1})$, gdzie $L_{1:k} = \{Z_i(r_i)\}_{1 \leq i \leq k}$ to zbiór wszystkich wykonanych pomiarów od momentu rozpoczęcia poszukiwań do kroku k . Wykorzystując schemat Bayesa do aktualizacji rozkładu prawdopodobieństwa, proces aktualizacji opisuje się następującym równaniem:

$$P(r_s|L_{1:k+1}) = \frac{g(z_{k+1}(r_{k+1})|r_s)P(r_s|L_{1:k})}{P(z_{k+1}(r_{k+1})|L_{1:k})} \quad (4.7)$$

gdzie $P(z_{k+1}(r_{k+1})|L_{1:k}) = \int g(z_{k+1}(r_{k+1})|r_s)P(r_s|L_{1:k})dr_s$ to stała normalizująca. Jako że zdarzenia wykrycia i niewykrycia cząstek uwalnianych przez źródło są niezależne to nie można wyrazić ich przy pomocy rozkładu Poissona. Dlatego też liczba zdarzeń wykrycia (kontaktu ze strugą) w czasie od $k-1$ to k wyraża się jako $g(z(r)|r_s) = (\mu^z/z)e^{-\mu}$, gdzie $\mu = R(r|r_s)\beta$. β to różnica czasu pomiędzy chwilami $k-1$ i k , $R(r|r_s)$ to określone formułą Smoluchowskiego prawdopodobieństwo że robot o średnicy zewnętrznej a wykryje cząstki uwalniane przez źródło:

$$R(r|r_s) = \frac{2\pi DC(r|r_s)}{\ln(\lambda/a)} \quad (4.8)$$

W przestrzeni dwuwymiarowej, równanie to przybiera postać:

$$R(r|r_s) = \frac{R}{\ln(\lambda/a)} e^{((x-x_s)V/2D)} K_0 \left(\frac{|r-r_s|}{\lambda} \right) \quad (4.9)$$

Należy zauważyć, że wymiar λ musi być większy od wymiaru zewnętrznego robota a prowadzącego poszukiwania.

Drugą istotną częścią algorytmu Infotaxis stanowi funkcja celu. Jest to kryterium służące do oceny informacji pochodzących z pomiarów, w celu określenia sposobu poruszania się robota. W pracy wykorzystywano dwie podstawowe funkcje celu, znane jako *Infotaxis* i *Infotaxis II*. W obu przypadkach, pojęcia entropii informacji (lub krótko entropii), używa się do opisanego niepewności lokalizacji poszukiwanego źródła zanieczyszczenia. Im wyższa ta niepewność, tym wyższa wartość entropii, co stanowi kluczową ideę tego algorytmu. Podczas każdego kroku poszukiwań, robot aktualizuje mapę prawdopodobieństwa lokalizacji źródła na podstawie schematu Bayesa i oblicza zmianę entropii w celu ustalenia kierunku dalszego poruszania się. Wielkość entropii informacji w kroku k opisuje się jako:

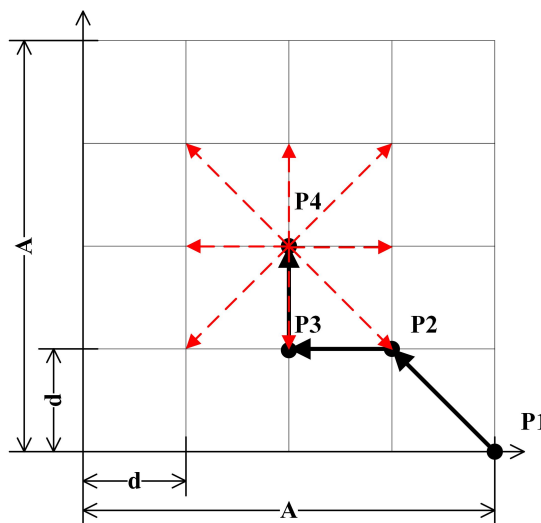
$$S_k = - \sum P(r_s|L_{1:k}) \log P_t(r_s|L_{1:k}) \quad (4.10)$$

Najpierw oblicza się entropię dla każdego z możliwych kierunków, a kierunek w którym entropia maleje najszybciej jest kierunkiem w którym powinien w następnym kroku przemieścić się robot. Funkcja celu w tym przypadku określona jest następującym równaniem:

$$\Delta S_{full} = P_{s_found}(r_s|L_{1:k})(-S_k) + P_{s_not_found}(r_s|L_{1:k})\Delta S_{s_not_found} \quad (4.11)$$

gdzie: P_{s_found} to suma prawdopodobieństw odnalezienia źródła na mapie, $P_{s_not_found}$ to suma prawdopodobieństw nie odnalezienia źródła, $-S_k$ odnosi się do zmniejszania entropii kiedy odnaleziono źródło. W wyidealizowanym przypadku, po znalezieniu źródła, entropia powinna wynosić 0. Wyrażenie $\Delta S_{s_not_found} = \sum_{i=0}^k (P(hit = i)\Delta S_i)$ odnosi się zaś do zmniejszania entropii bez znalezienia źródła zanieczyszczenia. Składnik P_{s_found} równania 4.11 ma znaczenie jedynie, gdy położenie źródła r_s odpowiada położeniu jednemu z punktów węzłowych. Gdy tak nie jest, to składnik ten można pominąć. Prowadzi to sformułowania funkcji celu *Infotaxis II*, w postaci:

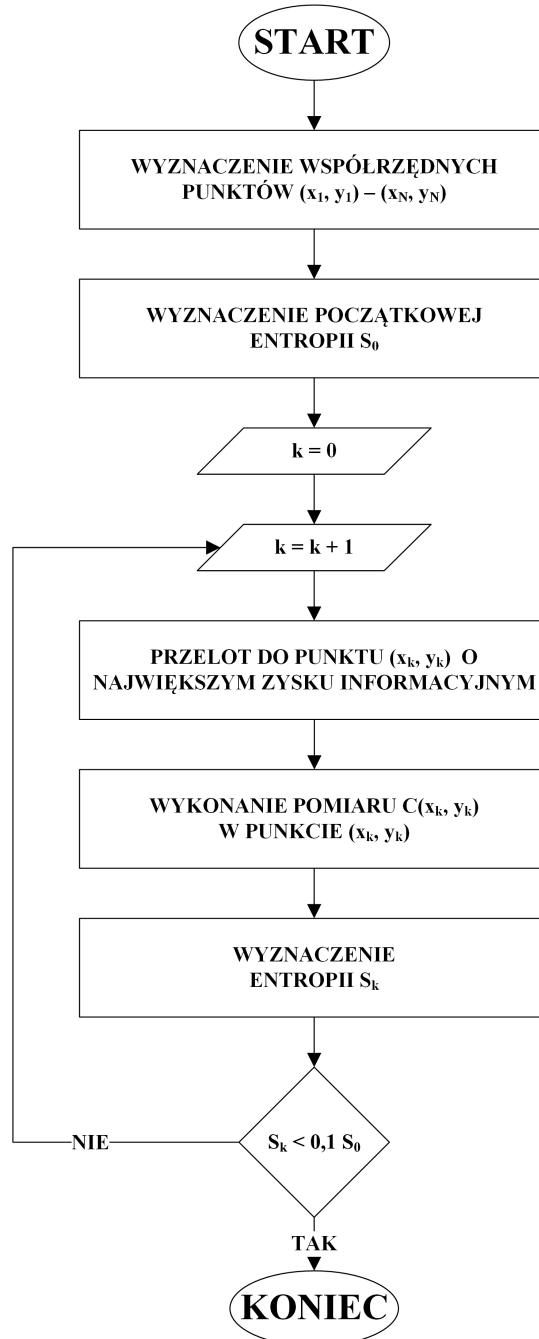
$$\Delta S_{full} = P_{s_not_found}(r_s|L_{1:k})\Delta S_{s_not_found} \quad (4.12)$$



Rys. 4.4. Schemat sposobu przemieszczania się robota dla infotaksji (wariant *Infotaxis 8*)

Reasumując, robot ocenia każdy możliwy kierunek ruchu z wykorzystaniem funkcji celu, i na tej podstawie podejmowana jest decyzja o wybranym kierunku ruchu. Zbiór możliwych kierunków ruchu określany jest mianem strategii poruszania się robota. Dla obszaru dwuwymiarowego, wyróżnia się strategie *Infotaxis 4* i *Infotaxis 8*. W strategii *Infotaxis 4* wyróżnia się cztery możliwe kierunki ruchu: $(x + \Delta l, y)$, $(x - \Delta l, y)$, $(x, y + \Delta l)$ i $(x, y - \Delta l)$, dla robota znajdującego się w położeniu $r(x, y)$ i kroku Δl . Natomiast, w strategii *Infotaxis 8*, wyróżnia się 8 kierunków: $(x + \Delta l, y)$, $(x - \Delta l, y)$, $(x, y + \Delta l)$, $(x, y - \Delta l)$, $(x + \Delta l, y + \Delta l)$, $(x - \Delta l, y + \Delta l)$, $(x + \Delta l, y - \Delta l)$ i $(x - \Delta l, y - \Delta l)$. Odpowiedni wybór strategii poruszania

się przekłada się na minimalizację koniecznej do przebycia drogi i tym samym zmniejszenia czasu poszukiwania. Mniejsza liczba kierunków ruchu przekłada się również na mniejsze zapotrzebowanie na moc obliczeniową robota.



Rys. 4.5. Algorytm infotaksja w postaci schematu blokowego

Dla dwóch podanych funkcji celu, i dwóch strategii poruszania się, wyróżnia się tym samym cztery warianty algorytmu: *Infotaxis 4*, *Infotaxis 8*, *Infotaxis Ii 4* i *Infotaxis II 8*. Po przeprowadzeniu wstępnych testów, najkrótszym czasem poszukiwania cechował się algorytm

Infotaxis 8, i dalsze odniesienia w pracy odnoszą się do tego wariantu. Infotaksję w postaci schematu blokowego zaprezentowano na rysunku 4.5. W praktycznej implementacji (Rys. 4.4) obszar jest podzielony na siatkę o rozmiarze $d \times d$. Robot, zaczynając od pozycji $(A, 0)$, porusza się po tej siatce w ten sposób iż z każdej pozycji może przemieścić się na 8 sąsiednich. Innymi słowy, może poruszać się do przodu/do tyłu, w lewo/w prawo i po przekątnych, tak jak pokazano na rysunku. W przypadku, gdy robot znajduje się na granicy obszaru poszukiwań, liczba możliwych pozycji jest ograniczona. Jest to konieczne, aby robot nie opuścił wyznaczonego obszaru. Przykładowo z pozycji początkowej (P1) robot może przemieścić się tylko na 3 sąsiednie pozycje.

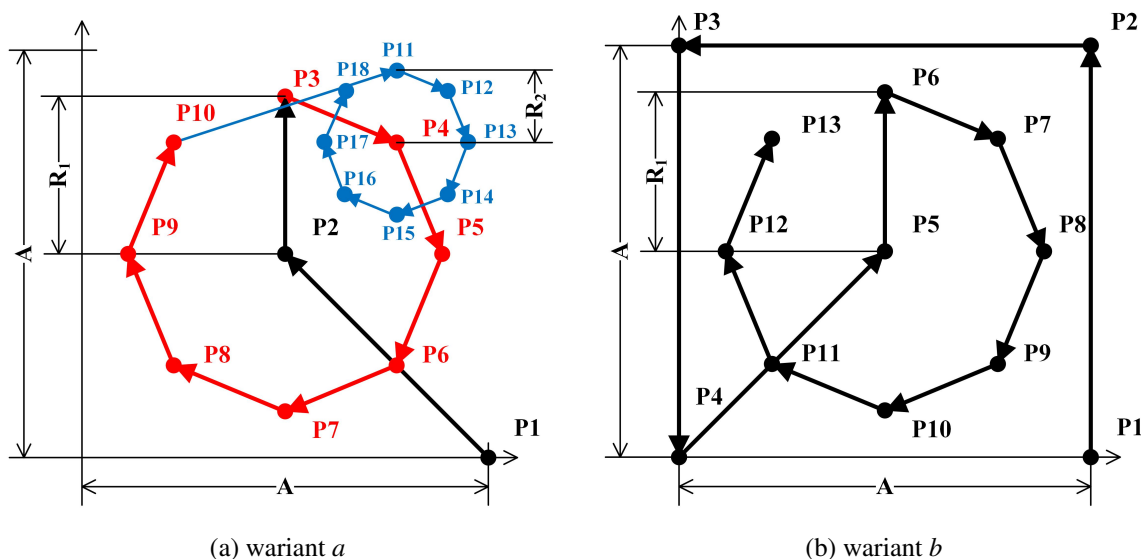
W przytoczonych pracach zastosowano niepraktyczny warunek zatrzymania poszukiwań. Zgodnie z nim, gdy odległość między położeniem robota a źródłem zanieczyszczenia spadnie poniżej określonego z góry progu, uznaje się że robot znalazł źródło zanieczyszczenia. Co najistotniejsze, to gdy to położenie jest znane, to nie ma potrzeby jego poszukiwania. Dlatego też, zamiast tego warunku zastosowano warunek polegający na zmniejszaniu się entropii informacji, który okazał się w tym przypadku dać zadowalające rezultaty. Mianowicie, przyjęto warunek jeżeli w danym kroku k wartość entropii S_k spadnie poniżej 10% początkowej wartości S_0 :

$$S_k < 0,1 \cdot S_0 \quad (4.13)$$

to następuje przerwanie wykonywania algorytmu. Położenie źródła ustalone zostaje na podstawie mapy prawdopodobieństwa, w miejscu gdzie jest ono największe. To położenie powinno być tożsame (bądź zbliżone) do faktycznego położenia źródła zanieczyszczenia. Ta pozycja jest uznawana za deklarowaną ostateczną pozycję źródła. Szczegóły tej implementacji opisano szerzej w rozdziale dotyczącym badań symulacyjnych.

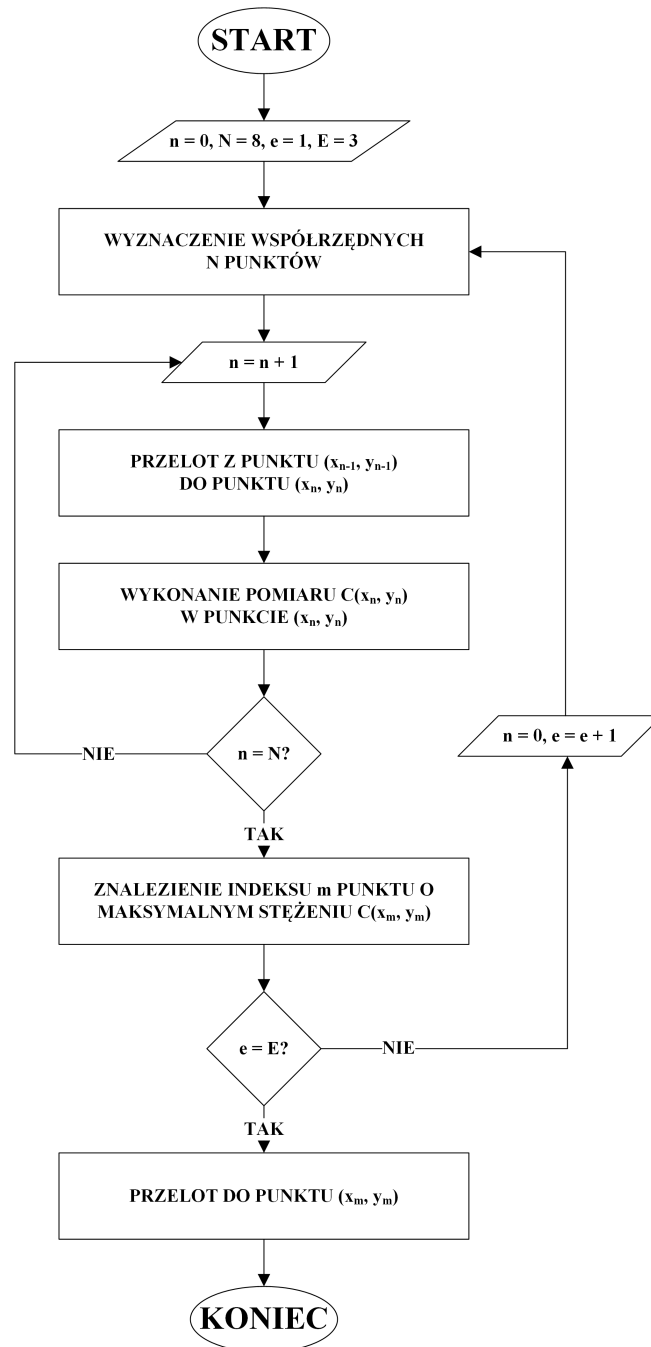
4.2.3. Wyznaczanie kierunku lotu na podstawie wartości maksymalnej

Kolejnym z analizowanych algorytmów był algorytm polegający na poruszaniu się po trajektorii zbliżonej do okręgu (Rys. 4.6). W tym przypadku przeanalizowano dwa warianty. W obu przypadkach robot rozpoczyna poszukiwania od prawego dolnego rogu obszaru (punkt P1). W przypadku wariantu *a* (Rys. 4.6a), robot przemieszcza się na środek terenu na którym prowadzone są poszukiwania (punkt P2) i wykonuje lot po okręgu o promieniu R_1 (czerwony okrąg). Następnie z tych punktów wybierany jest punkt o najwyższym odnotowanym stężeniu (w tym przykładzie jest to P4). Następnie wokół tego punktu generowane są kolejne punkty na okręgu o (mniejszym) promieniu R_2 (niebieski okrąg). Ta procedura jest powtarzana dla ustalonej liczby kroków, dla kolejnych etapów e (okręgów o malejących średnicach). Algorytm w postaci schematu blokowego zaprezentowano na rysunku 4.7.



Rys. 4.6. Schemat sposobu przemieszczania się robota dla algorytmu wyznaczania kierunku lotu na podstawie wartości maksymalnej

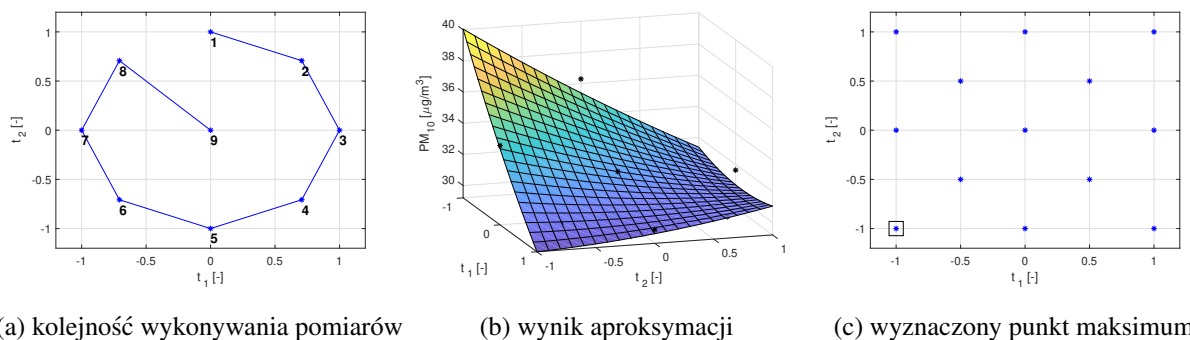
W przypadku wariantu *b* (Rys. 4.6b), robot wykonuje wstępny oblot wokół granic terenu (przez P1, P2, P3, P4, a następnie przemieszcza się na punkt P5 – środek), i dalej kontynuuje jak w pierwszym wariacie. Dodanie tych dodatkowych punktów było związane z faktem, że jeśli źródło zanieczyszczenia będzie znajdować się poza pierwszym okręgiem i struga zanieczyszczenia będzie rozpraszać się poza nim, to źródło zanieczyszczenia mogłoby pozostać niewykryte. W tym przypadku parametrami algorytmu są: jak poprzednio długość boku kwadratu A , liczba punktów na okręgu N (tutaj 8) oraz średnice R_1, R_2, \dots kolejnych okręgów.



Rys. 4.7. Algorytm wyznaczania kierunku lotu na podstawie wartości maksymalnej w postaci schematu blokowego

4.2.4. Wyznaczanie kierunku lotu na podstawie planu eksperymentu

Kolejnym z analizowanych algorytmów, był algorytm polegający na wyznaczeniu kierunku lotu na podstawie planu eksperymentu. Co do zasady przemieszczania się, to robot porusza się w sposób analogiczny jak dla poprzedniego przypadku. W wyznaczonych punktach (Rys. 4.8a) wykonywane są pomiary stężeń, zgodnie z schematem CCI [55]. W tym przypadku konieczne jest się wykonanie dodatkowego pomiaru na środku okręgu. Aproksymacja wykonywana jest



Rys. 4.8. Wyniki aproksymacji funkcją bazową drugiego stopnia

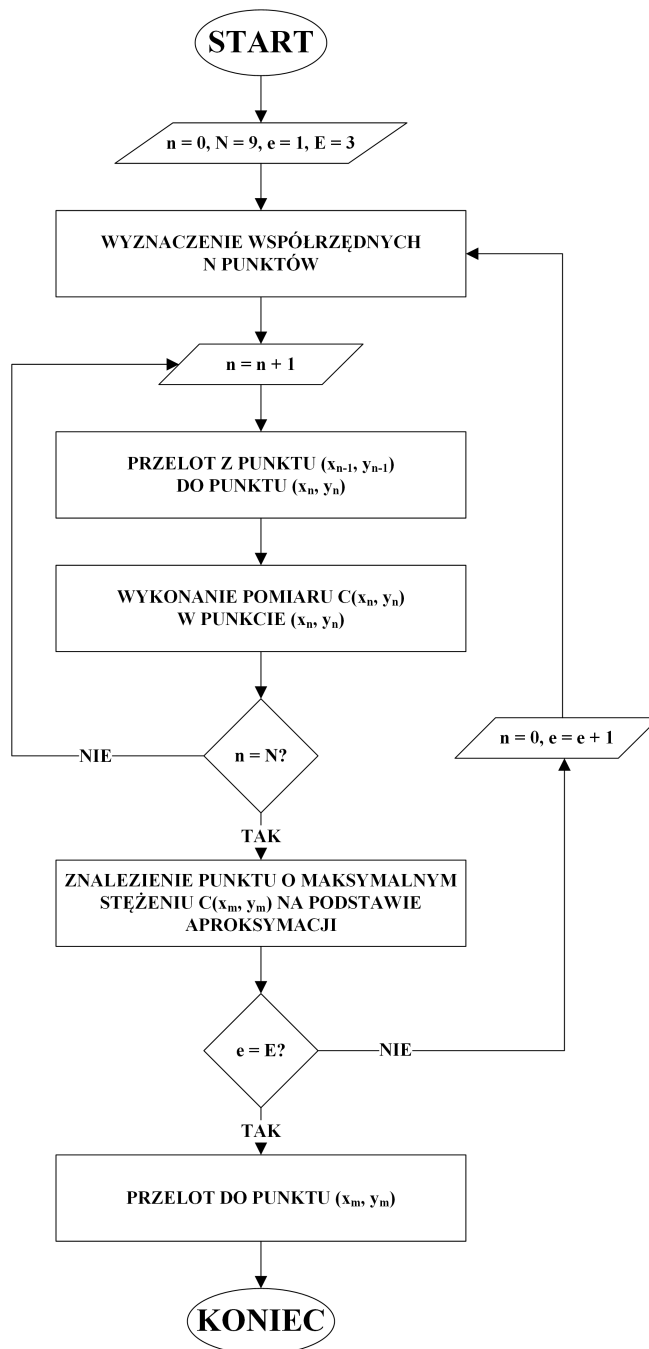
dopiero od drugiego etapu *e* włącznie, czyli dla pierwszego okręgu (o największej średnicy) wybierana jest wartość maksymalna. Algorytm analizowano w trzech wariantach, oznaczonych kolejno: *a*, *b* i *c*. Na podstawie wykonanych pomiarów wykonywana jest aproksymacja stężenia przy pomocy funkcji bazowej drugiego stopnia (warianty *a* i *b*):

$$f_1(t_1, t_2) = a_{00} + a_{10}t_1 + a_{01}t_2 + a_{11}t_1t_2 + a_{20}t_1^2 + a_{02}t_2^2 \quad (4.14)$$

W wariancie *c* trzeciego stopnia:

$$f_2(t_1, t_2) = f_1(t_1, t_2) + a_{21}t_1^2t_2 + a_{12}t_1t_2^2 + a_{30}t_1^3 + a_{03}t_2^3 \quad (4.15)$$

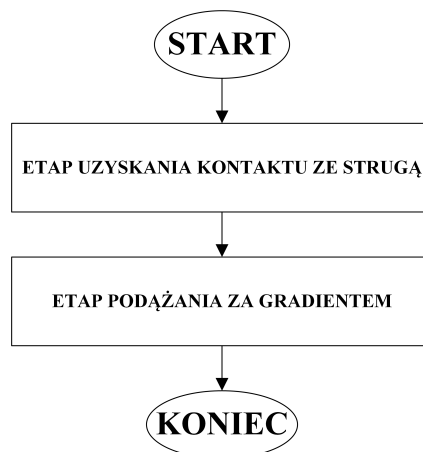
Na rysunku 4.8b zaprezentowano wynik aproksymacji, wykonanej metodą najmniejszych kwadratów dla funkcji bazowej drugiego stopnia. W celu wyznaczenia miejsca do którego powinien przemieścić się robot w kolejnym kroku, na powierzchni odpowiedzi znaleziona zostaje wartość największa stężenia, w wariancie *a* dla siatki 13 (9 punktów plus narożniki, tak jak na rysunku 4.8c) lub w wariantach *b* i *c* na regularnej siatce 5×5 punktów. Współrzędne uogólnione t_1 oraz t_2 skalowane są na współrzędne rzeczywiste x i y w sposób liniowy. Głównym celem implementacji tego algorytmu była weryfikacja skuteczności działania, w porównaniu do algorytmu opartego o wybieranie punktu o największym stężeniu. Wykorzystując aproksymację wykonywane jest uśrednianie, kiedy zwiększone stężenia zarejestrowano w kilku sąsiadujących punktach. Algorytm w postaci schematu blokowego zaprezentowano na rysunku 4.9.



Rys. 4.9. Algorytm wyznaczania kierunku lotu na podstawie planu eksperymentu w postaci schematu blokowego

4.2.5. Wyznaczanie kierunku lotu na podstawie gradientu pola zanieczyszczenia

Algorytm gradientowy, ze względów praktycznych, podzielony jest na dwa etapy (Rys. 4.10).



Rys. 4.10. Algorytm wyznaczania kierunku lotu na podstawie gradientu w postaci schematu blokowego

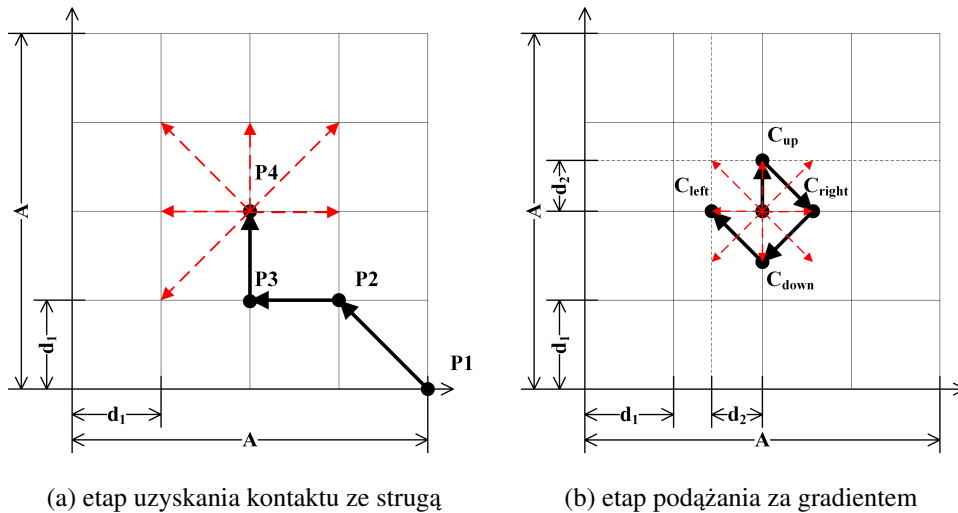
Pierwszy z etapów polega na poruszaniu się robota w sposób losowy, do uzyskania kontaktu ze strugą. Ten etap jest konieczny, gdyż kiedy robot nie ma kontaktu ze strugą algorytm gradientowy nie będzie prawidłowo kierować robota. Najpierw na terenie zostaje wyznaczona siatka punktów, tak jak dla algorytmu poszukiwania na regularnej siatce punktów. Następnie robot porusza się po nich w sposób losowy, ale z danej pozycji z krokiem d_1 może przejść jedynie na 8 sąsiadujących (analogicznie jak w infotaksji, rysunek 4.11a), jednakże jednocześnie unikając wchodzenia na pozycje już odwiedzone, przy następujących zasadach:

1. jeżeli w danym kroku są dostępne co najmniej dwie pozycje nieodwiedzone, to robot losuje jedną z nich i tam się udaje,
2. jeżeli jest dostępna tylko jedna pozycja nieodwiedzona, to robot przemieszcza się na tę pozycję,
3. w przypadku kiedy wszystkie pozycje wokół zostały już odwiedzone, to robot losuje którąś z odwiedzonych i tam się udaje.

Robot porusza się przy tym w taki sposób, aby nie opuszczać terenu na którym prowadzone są poszukiwania. Oznacza to, że na granicy terenu liczba możliwych pozycji na które robot może się przemieścić jest mniejsza niż 8. Robot porusza się w ten sposób, dopóki:

- uzyska kontakt ze strugą zanieczyszczenia, czyli zmierzone w aktualnym kroku stężenie przekroczy ustaloną wartość progową, albo,

- odwiedzi wszystkie pozycje na wyznaczonej siatce. Wtedy kolejny etap rozpoczyna się od pozycji na której zmierzone stężenie było największe, albo,
- przekroczone zostanie maksymalna ustalona liczba kroków tego etapu.



Rys. 4.11. Schemat sposobu przemieszczania się robota dla algorytmu gradientowego

Drugi etap algorytmu polega na podążaniu robota za gradientem źródła zanieczyszczenia. W każdym kroku tego etapu robot przemieszcza się w wyjściowej pozycji na cztery pozycje, odpowiednio: w przód, w tył, w lewo i w prawo (z odpowiednio mniejszym krokiem d_2 , tak jak na rys. 4.11b). W tych punktach mierzone są stężenia, a następnie obliczany jest zgodnie z równaniem:

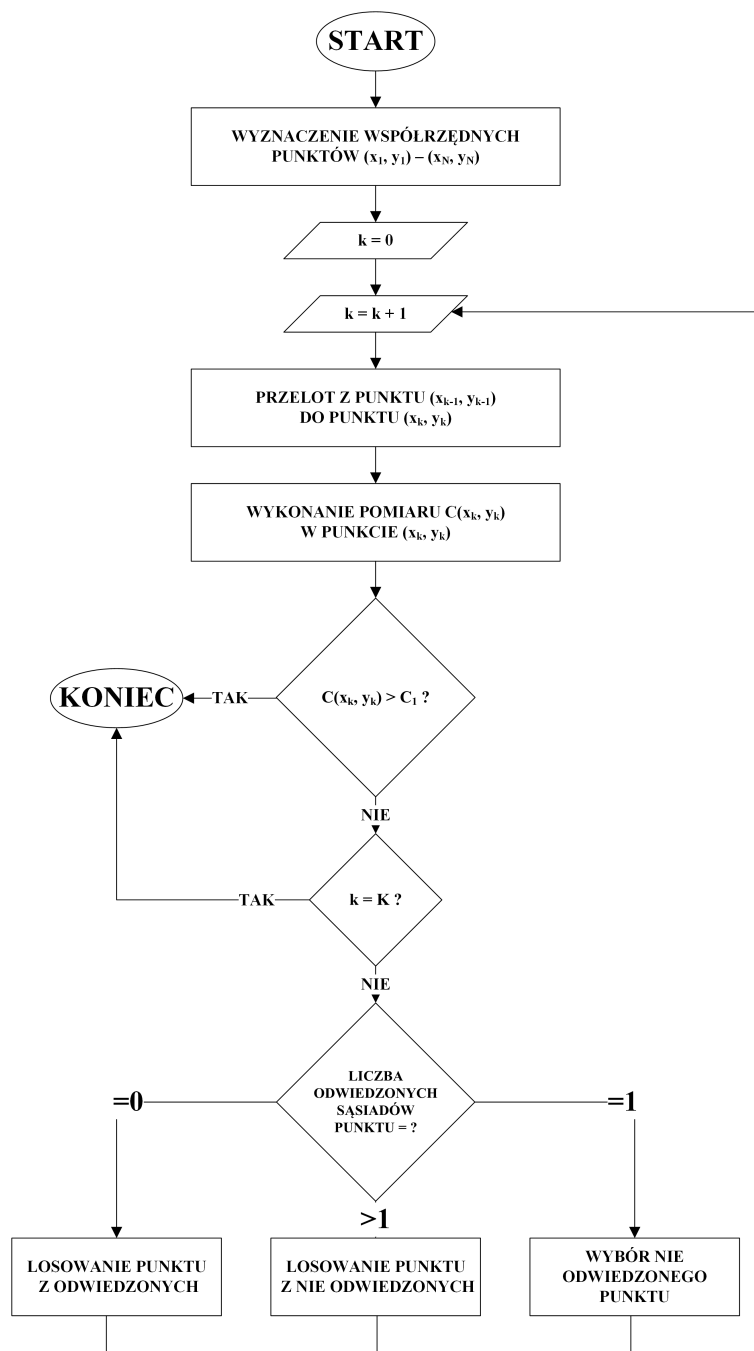
$$\Delta_y = C_{up} - C_{down}, \quad \Delta_x = C_{right} - C_{left} \quad (4.16)$$

Następnie na podstawie tych różnic wyznacza się kierunek poruszania, zgodnie z równaniem:

$$\alpha = \text{atan2}(\Delta_y, \Delta_x) \quad (4.17)$$

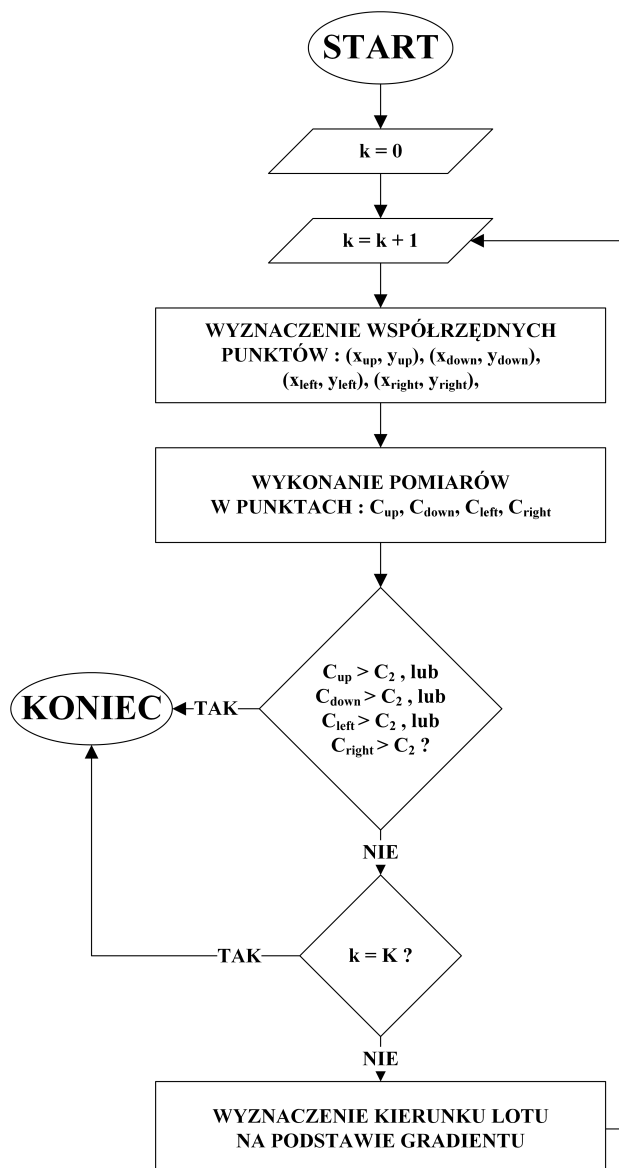
Kąt α wyznacza kierunek, w którym powinien przemieszczać się robot. Na podstawie obliczonej wartości kąta, robot przemieszcza się w odpowiadającym kierunku (z dostępnych 8). Następnie wykonywany jest kolejny krok, czyli robot przemieszcza się na cztery pozycje i wykonuje obliczenia jak opisano wyżej. Sytuacja powtarza się, dopóki:

- w jednym z czterech punktów, w których wykonywane są pomiary stężeń w aktualnym kroku, zarejestrowana wartość stężenia przekroczy ustaloną wartość progową,
- przekroczone zostanie maksymalna ustalona liczba kroków tego etapu,
- trzykrotnie zdarzy się sytuacja, kiedy dla następujących po sobie krokach robot przemieści się na poprzednio wyznaczoną pozycję.



Rys. 4.12. Algorytm wyznaczania kierunku lotu na podstawie gradientu – etap uzyskania kontaktu ze strugą

Ostatnia z wymienionych sytuacji może wydarzyć się kiedy robot znajdowałby się w okolicy źródła, jednakże w żadnym z wyznaczonych punktów nie mierzona byłaby wartość przekraczająca ustaloną wartość progową. Schemat blokowy pierwszego i drugiego etapu zaprezentowano odpowiednio na rysunkach 4.12 i 4.13.



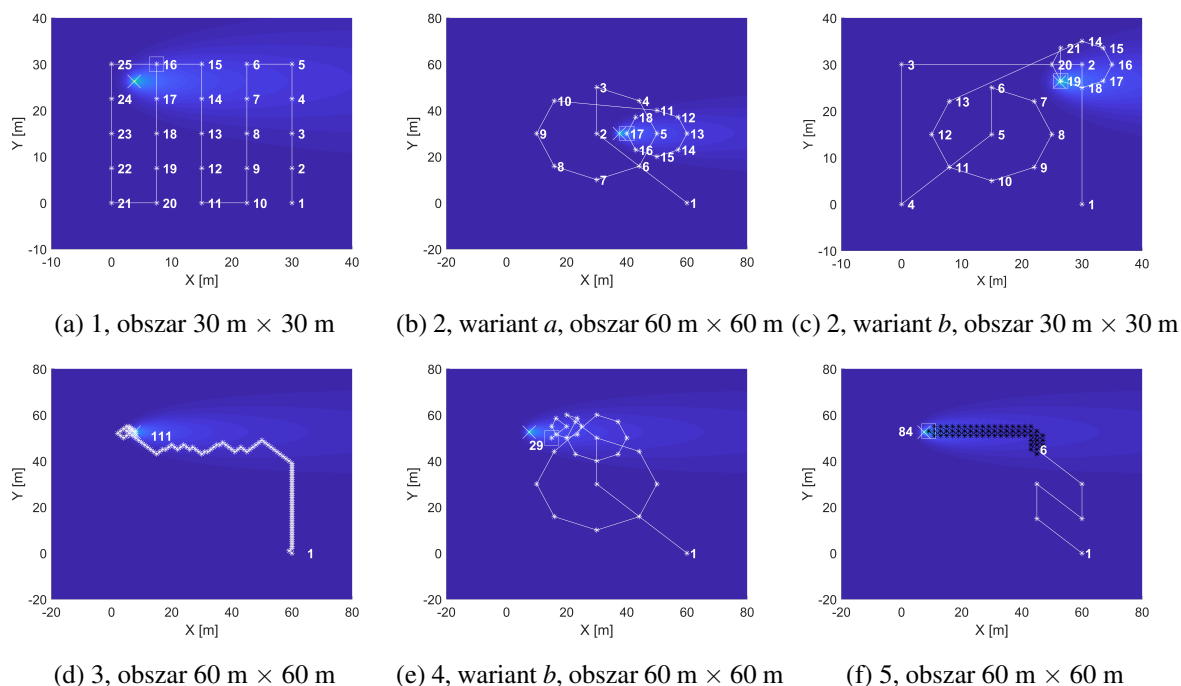
Rys. 4.13. Algorytm wyznaczania kierunku lotu na podstawie gradientu – etap podążania za gradientem

4.3. Badania symulacyjne algorytmów poszukiwania

Bazując na przedstawionym modelu pola zanieczyszczenia, przeanalizowano działanie wszystkich opisanych algorytmów dla obszarów o następujących rozmiarach: 30 m × 30 m, 60 m × 60 m, 100 m × 100 m i 200 m × 200 m. Wszystkie algorytmy zostały zaimplementowane w środowisku *Matlab*, co umożliwiło zweryfikowanie ich działania dla różnych przypadków rozkładu pola zanieczyszczenia. Badania symulacyjne miały również na celu sprawdzenie oceny ich dokładności i przygotowania do praktycznej implementacji. Dla każdego z przypadków, źródło zanieczyszczenia było umiejscowione na 3 różnych współrzędnych opisanych w sposób parametryczny. Ta informacja o rzeczywistym

położeniu źródła zanieczyszczenia nie była dostępna dla robota podczas wykonywania któregośkolwiek z algorytmów. Wygenerowane przykładowe trajektorie, z zaznaczonymi punktami pomiarowymi dla omawianych algorytmów, przedstawiono na rys. 4.14. Na rysunku 4.14a zaprezentowano algorytm poszukiwania na regularnej siatce punktów dla $A = 30$ m i $M = 5$. Oznacza to 25 punktów pomiarowych, z rozdzielczością (tutaj minimalną odległością pomiędzy nimi) wynoszącą 7,5 m. Algorytm wyznaczania kierunku lotu na podstawie wartości maksymalnej zaprezentowano na: rys. 4.14b wariant a dla $A = 60$ m, $N = 8$, $R_1 = 20$ m i $R_2 = 10$ m, rys. 4.14c wariant b dla $A = 30$ m, $N = 8$, $R_1 = 10$ m i $R_2 = 5$ m. Te wskazane tutaj parametry algorytmów były wprowadzane ręcznie i pozostawały niezmiennie podczas wykonywania. W przeprowadzonych badaniach wartości parametrów zostały określone w taki sposób, aby objąć jak największą powierzchnię badanego obszaru, jednocześnie unikając możliwości opuszczania robota poza ustalone granice terenu na którym prowadzone są poszukiwania. Przy wyznaczaniu kierunku lotu na podstawie wartości maksymalnej i planu eksperymentu przede wszystkim oznaczało to, aby suma promieni okręgów R_1, R_2, \dots nie przekraczała połowy szerokości A wyznaczonego obszaru. Dlatego też, podczas testów przyjęto wstępnie następujące zależności, że $R_1 = A/3$, $R_2 = R_1/2$, a $R_{n+1} = R_n/2$. Na rysunku 4.14e trajektorie przy wyznaczaniu kierunku lotu na podstawie planu eksperymentu dla takich samych parametrów, na rysunku 4.14f dla algorytmu gradientowego. W tym przypadku etap początkowy (linia biała) realizowany jest dla takiej samej regularnej siatki jak w przypadku pierwszego algorytmu, etap podążania za gradientem (linia czarna) z krokiem wynoszącym 1 m. Na podstawie przeprowadzonych wstępnych badań dotyczących infotaksji, wariant *Infotaxis 8* wykazał się najlepszą dokładnością, w związku z czym ten wariant wykorzystano w badaniach. Przykładowa trajektoria została przedstawiona na rys. 4.14d. Obszar o boku $A = 60$ m, na którym przeprowadzane są poszukiwania (i tym samym mapa prawdopodobieństwa), został podzielony na pod-obszary o rozmiarze $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$. Robot wykonuje kolejno pomiary i aktualizuje mapę prawdopodobieństwa na podstawie tego, czy miał kontakt ze strugą zanieczyszczenia, czy nie. Następnie wykonuje krok w jednym z ośmiu dopuszczalnych kierunków, w ten sposób, aby spowodować maksymalny spadek entropii.

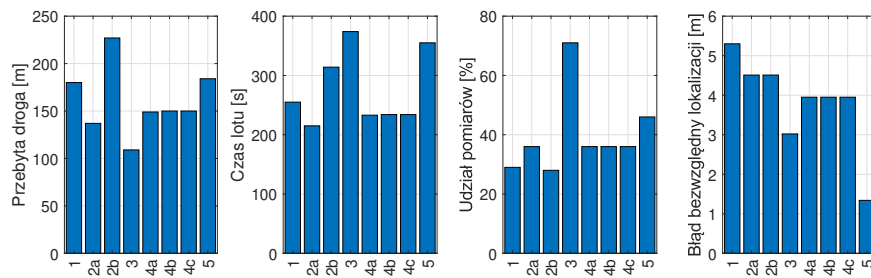
Tłem dla każdego z prezentowanych przypadków jest profil zanieczyszczenia, gdzie ciemniejsze kolory oznaczają niższe stężenia, cieplejsze – wyższe. Dokładne położenie źródła zanieczyszczenia, gdzie stężenie jest największe, zostało zaznaczone białym krzyżykiem. Ta dokładna pozycja nie była znana podczas działania żadnego z prezentowanych algorytmów, a parametrem wejściowym był jedynie rozkład pola zanieczyszczeń. Na obecnym etapie założono również, że na przeszukiwanym obszarze będzie występować tylko jedno źródło zanieczyszczenia. Dla każdej trajektorii z rysunku 4.14 wskazano kolejność odwiedzanych punktów. Trajektoria, po której porusza się robot (który prowadzi poszukiwania) jest oznaczona białą linią. Robot rozpoczyna przeszukiwanie terenu od punktu nr 1. Punkty, w których



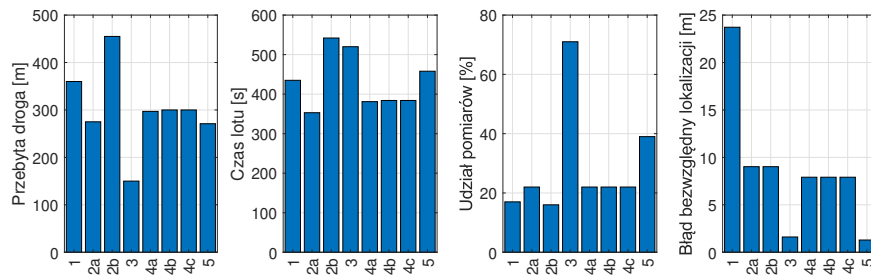
Rys. 4.14. Przykładowe trajektorie dla testowanych algorytmów. Oznaczenia na rysunku: 1 – poszukiwanie na regularnej siatce punktów, 3 – infotaksja, 2, 4 i 5 – wyznaczenie kierunku lotu na podstawie odpowiednio: wartości maksymalnej, planu eksperymentu i gradientu

dokonywane są pomiary, zaznaczono białymi gwiazdkami. Robot sukcesywnie wykonuje pomiary w wyznaczonych punktach i na podstawie mierzonych tam stężeń podejmowana jest decyzja jak poruszać się dalej. Ostateczną wyznaczoną lokalizację, którą robot uznaje za położenie źródła zanieczyszczenia, oznaczono białym kwadratem.

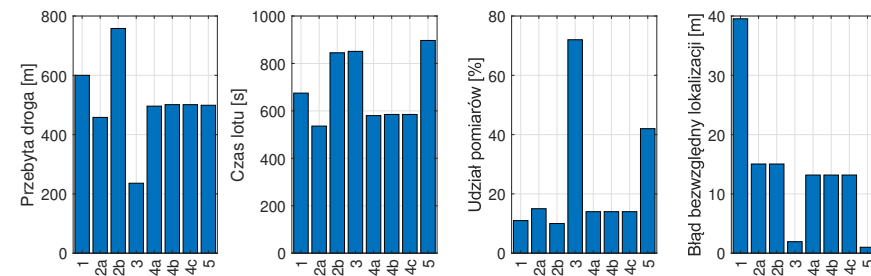
Dla wszystkich 12 kombinacji (szczegóły w załączniku 7.2) wyznaczono następujące parametry: położenie źródła, odległość w linii prostej do niego, całkowita przebyta droga, całkowity czas lotu robota, udział pomiarów — czyli procentowy wskaźnik ile z czasu lotu zajęło wykonanie pomiarów, a nie przemieszczanie 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 m s^{-1} , a pomiar stężenia w jednym punkcie trwa 3 sekundy. W przypadku infotaksji wykorzystuje się rozkład Poissona do określenia, czy robot miał kontakt ze strugą zanieczyszczenia, czy nie, ponieważ estymacja prawdopodobieństwa jest wykonywana dla tych samych parametrów, co model zanieczyszczeń wejściowych. Dlatego też, algorytm ten zachowuje się w sposób niedeterministyczny, a podane dla niego wartości w tabeli są wartościami średnimi z trzech kolejnych symulacji. Takie samo podejście zastosowano dla algorytmu gradientowego, którego pierwszy etap zachowuje się również w sposób niedeterministyczny.



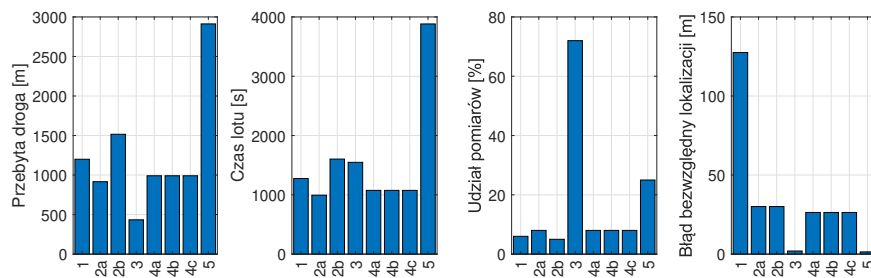
(a) Obszar 30 m × 30 m, start w pozycji (30 m, 0 m), źródło na pozycji (3,75 m, 26,25 m), odległość w linii prostej do źródła 37,12 m



(b) Obszar 60 m × 60 m, start w pozycji (60 m, 0 m), źródło na pozycji (7,5 m, 52,5 m), odległość w linii prostej do źródła 74,25 m



(c) Obszar 100 m × 100 m, start w pozycji (100 m, 0 m), źródło na pozycji (12,5 m, 87,5 m), odległość w linii prostej do źródła 123,74 m



(d) Obszar 200 m × 200 m, start w pozycji (200 m, 0 m), źródło na pozycji (25 m, 175 m), odległość w linii prostej do źródła 247,49 m

Rys. 4.15. Wyniki symulacji algorytmów dla zwiększającego rozmiaru terenu – źródło w lewym górnym rogu obszaru. Oznaczenia na rysunku: 1 – poszukiwanie na regularnej siatce punktów, 3 – infotaksja, 2, 4 i 5 – wyznaczenie kierunku lotu na podstawie odpowiednio: wartości maksymalnej (warianty a i b), planu eksperymentu (warianty a, b i c) i gradientu

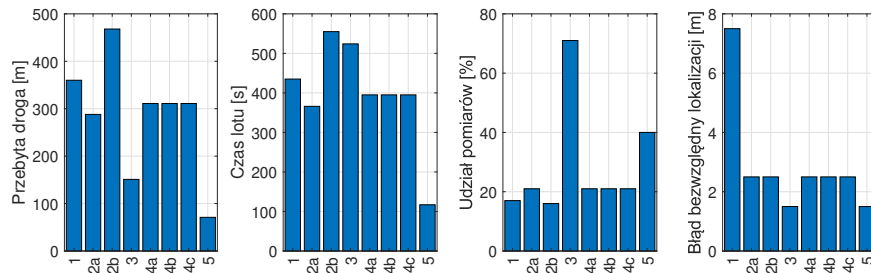
Na rysunku 4.15 pokazano wyniki symulacji algorytmów dla rosnącego rozmiaru terenu. Źródło zanieczyszczeń znajdowało się na pozycji $(\frac{1}{8}A, \frac{7}{8}A)$. W tym przypadku zwiększany był tylko teren, pozostałe parametry modelu były niezmiennie. Tym samym natężenie źródła zanieczyszczenia nie ulegało zmianie. Należy zauważyć, że dla każdego przypadku zarówno długość trasy jak i czas lotu rośnie, wraz z zwiększaniem obszaru poszukiwań. Algorytm polegający na poruszaniu się po trajektorii zbliżonej do okręgu, a konkretnie wariant *a* charakteryzuje się krótszym przebytym dystansem, dla wariantu *b* przebywany dystans jest dłuższy w porównaniu do przeszukania na regularnej siatce punktów. Czas lotu dla infotaksji jest najdłuższy, co związane jest z dużą liczbą wykonywanych pomiarów, i tym samym na ich duży procentowy udział. W tym przypadku założony czas pomiaru można by skrócić, ponieważ przebywane odległości w każdym kroku są stosunkowo małe (ok. 1 m). W przypadku algorytmu z aproksymacją różnice pomiędzy wariantami są znikome, jednakże wykazują one w tych przypadkach mniejszy błąd lokalizacji, w porównaniu do wariantu bez niej. Najlepszą dokładność lokalizacji osiągnięto dla algorytmu gradientowego, następnie infotaksji, aproksymacji, wybierania wartości maksymalnej i ostatecznie przeszukania na regularnej siatce punktów. Najkrótszym czasem lotu charakteryzował się algorytm 2 (wariant *a*), następnie 4 (również wariant *a*), przeszukanie na siatce punktów, algorytm gradientowy i finalnie infotaksja. W przypadku prostych algorytmów dokładność lokalizacji źródła zanieczyszczenia pogarsza się wraz ze wzrostem powierzchni terenu na którym prowadzone są poszukiwania. Wiąże się to z parametrycznym określeniem ich parametrów, a co za tym idzie odległości pomiędzy wyznaczanymi punktami są większe. Dla stałej wydajności źródła, a powiększającej się powierzchni obszaru poszukiwań odnotowuje się również niższe maksymalne wartości stężeń. Należy wyciągnąć jednak wniosek, że skalowalność tych algorytmów jest możliwa, jednakże kosztem dokładności. W przypadku infotaksji błąd bezwzględny lokalizacji pozostaje na stałym poziomie, ponieważ rozdzielczość mapy jest utrzymywana niezmiennie na poziomie 1 m. Analogiczna sytuacja występuje dla algorytmu gradientowego.

Biorąc pod uwagę złożoność obliczeniową, to infotaksja ma znacznie większe wymagania co do mocy obliczeniowej. W związku z tym czas obliczeń dla tego algorytmu jest znacznie większy od pozostałych. Ten czas również szybko rośnie ze względu na konieczność wykonywania operacji na macierzach (mapie) o rosnących rozmiarach, odpowiednio: 31×31 , 61×61 , 101×101 i 201×201 . Ponadto, przytoczone przykłady, jak [63] opierają się na niepraktycznym warunku zatrzymania algorytmu, zgodnie z którym gdy odległość między położeniem robota a źródłem zanieczyszczenia spadnie poniżej z góry określonego progu, uznaje się że robot znalazł źródło zanieczyszczenia. Jest to warunek który sprawia że praktyczna implementacja tego algorytmu jest bezcelowa, gdyż wymaga znajomości położenia źródła zanieczyszczenia przez robota, który prowadzi poszukiwania. Gdy to położenie jest znane, to nie ma potrzeby jego poszukiwania. Dlatego też, zamiast tego

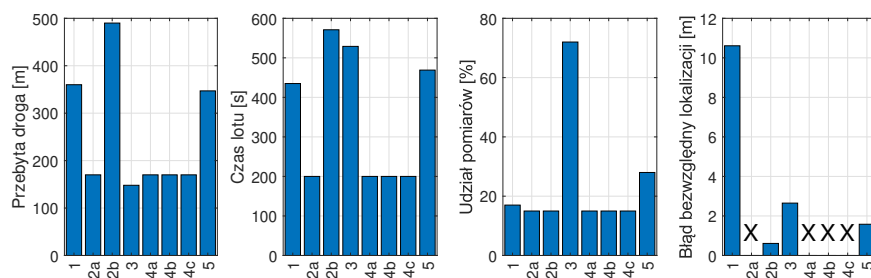
warunku zastosowano warunek polegający na zmniejszaniu się entropii informacji, który okazał się w tym przypadku dać dobre rezultaty. Warunek ten opisano szerzej w podrozdziale poświęconym infotaksji. W przypadku, gdy zmierzone stężenia nie przekroczyły ustalonej wartości progowej (przyjęto wartość 1,0), uznano że robot nie znalazł źródła zanieczyszczenia. W takim przypadku, w odpowiednich wierszach tabel (załącznik 7.2) zamiast wartości błędu bezwzględnego lokalizacji źródła zanieczyszczenia wstawiono znak „-”. W przypadku poszukiwania na regularnej siatce punktów odpowiadało to sytuacji, kiedy ta wartość progowa nie została przekroczona we wszystkich punktach. W przypadku wyznaczenia kierunku lotu na podstawie wartości maksymalnej i planu eksperymentu, wtedy, gdy nie została ona przekroczona podczas pierwszego etapu. Ostatecznie, w infotaksji i algorytmie gradientowym za niepowodzenie uznaje się sytuację kiedy określony warunek (odpowiednio spadek entropii bądź nieprzekroczenie przyjętych progów) nie zostanie osiągnięty po wykonaniu maksymalnej dopuszczalnej liczby kroków (przyjętej tutaj na 500). Na rysunku 4.16 przedstawiono wyniki symulacji algorytmów dla stałego obszaru $60 \text{ m} \times 60 \text{ m}$, a różnego położenia źródła zanieczyszczenia.

Na podstawie podanych przypadków należy zauważyć, że czas lotu dla algorytmu 1, 2b, 3 i 5 pozostaje na porównywalnym poziomie dla różnego umiejscowienia źródła. Wyjątek od tego wystąpił tylko dla pierwszego przypadku (Rys. 4.16a), gdzie algorytm gradientowy (5) cechował się najkrótszym czasem lotu. Był to również najkrótszy czas spośród wszystkich algorytmów. Największa zmienność błędu lokalizacji źródła wystąpiła dla pierwszego algorytmu. Wynika ona z różnej wzajemnej relacją pomiędzy generowanymi punktami a rzeczywistą lokalizacją źródła zanieczyszczenia. Podobnie jak w poprzednim przykładzie, ta dokładność jest największa dla algorytmu gradientowego i infotaksji. Gdy źródło zanieczyszczenia znajdowało się w lokalizacji (52,5 m, 52,5 m), wariant *a* algorytmu 2 i algorytm 4 nie wskazały lokalizacji źródła zanieczyszczenia, co na rysunku 4.16b zaznaczono przy pomocy znaku *X*. W tym przypadku źródło zanieczyszczenia znajdowało się w narożniku i struga zanieczyszczenia rozchodziła się poza wyznaczony teren poszukiwań (w szczególności poza pierwszy okrąg). W tym przypadku sprawdził się wariant 2b, jednakże wtedy robot opuszcza wyznaczony obszar, na którym prowadzone są poszukiwania. Odpowiada to sytuacji z rysunku 4.14c. Z drugiej strony, wtedy konieczna do przebycia droga jest jeszcze większa niż dla pierwszego algorytmu. Jednakże dla takiej sytuacji w warunkach rzeczywistych działanie wszystkich algorytmów może być niezadowolające, gdyż struga zanieczyszczenia będzie omijać większość obszaru terenu na którym prowadzone są poszukiwania. Wariant 2a testowany był również dla dwóch większych wielkości promienia początkowego, jako że na 12 analizowanych przypadków algorytm w 4 przypadkach nie odnalazł źródła. Dla promieni $R_1 = A/2$ (tabela B.3) oraz $R_1 = \sqrt{2}A/2$ (tabela B.4) algorytm nie odnalazł źródła zanieczyszczenia odpowiednio tylko w jednym i dwóch przypadkach. Stąd wariant dla

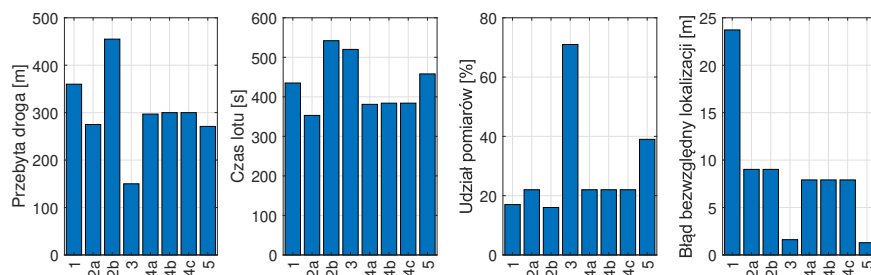
$R_1 = A/2$ należy uznać za najbardziej skuteczny, jednakże kosztem koniecznej do przebycia drogi (dłuższej o około 30%).



(a) Źródło na pozycji (37,5 m, 30,0 m), odległość w linii prostej do źródła 37,5 m



(b) Źródło na pozycji (52,5 m, 52,5 m), odległość w linii prostej do źródła 53,03 m



(c) Źródło na pozycji (7,5 m, 52,5 m), odległość w linii prostej do źródła 74,25 m

Rys. 4.16. Wyniki symulacji algorytmów dla różnego położenia źródła zanieczyszczenia – obszar 60 m × 60 m, start w pozycji (60 m, 0 m). Oznaczenia na rysunku: 1 – poszukiwanie na regularnej siatce punktów, 3 – infotaksja, 2, 4 i 5 – wyznaczenie kierunku lotu na podstawie odpowiednio: wartości maksymalnej (warianty a i b), planu eksperymentu (warianty a, b i c) i gradientu

Na podstawie zaprezentowanych wyników stwierdzono że najbardziej istotnym kryterium doboru algorytmów poszukiwania do praktycznej implementacji jest minimalny czas lotu. Czas, w którym robot latający może utrzymać się w powietrzu, stanowi największe ograniczenie. Dlatego też określono następujące kryterium wyboru algorytmów:

$$\arg \min_{n=1,2,\dots,5} f(n) = t_l(n) \quad (4.18)$$

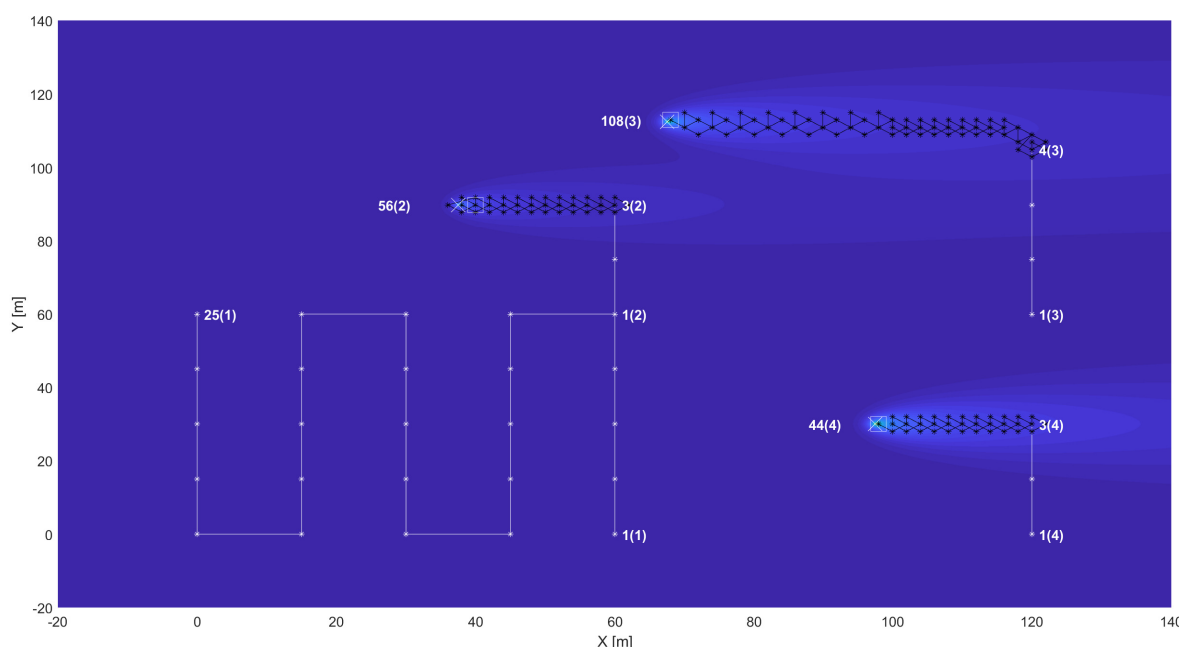
gdzie: n – indeks algorytmu, t_l – całkowity czas lotu. Na podstawie przyjętego kryterium w dalszych pracach, zdecydowano się zaimplementować i przetestować w pierwszej kolejności

algorytmy 1, 2 i 4. Te algorytmy dedykowane są w szczególności do wstępnego sprawdzenia terenu w celu ustalenia zgrubnej lokalizacji źródła. Pozostałe algorytmy (gradientowy 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.

4.4. Konceptcje poszukiwania wielu źródeł 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. W tym podrozdziale zostaną przedstawione wybrane konceptcje wyszukiwania wielu źródeł.

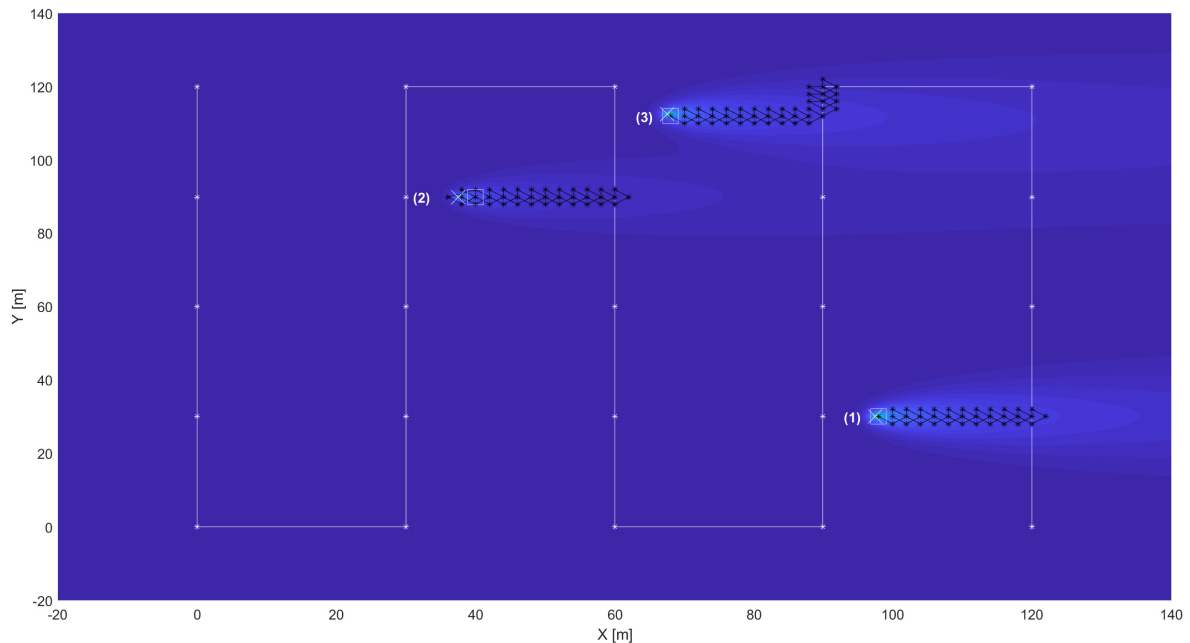
Pierwsza koncepcja polega na podziale terenu na którym prowadzone są poszukiwania na pod-obszary. W tej koncepcji wprowadza się założenie, że na obszarze występować będzie co najwyżej jedno dominujące źródło. Obszar $120\text{ m} \times 120\text{ m}$ został podzielony na cztery pod-obszary o rozmiarze $60\text{ m} \times 60\text{ m}$ (Rys. 4.17).



Rys. 4.17. Trajektoria robota dla koncepcji podziału terenu na pod-obszary z zastosowaniem dwóch algorytmów poszukiwania. Oznaczenia na rysunku: liczba w nawiasie oznacza indeks pod-obszaru, liczba przed nawiasem indeks kroku algorytmu

Do poszukiwania źródła zastosowano dwa prezentowane już algorytmy. Robot rozpoczyna wyszukiwanie z wykorzystaniem regularnej siatki punktów, do momentu uzyskania kontaktu ze strugą. Jeśli nie wykryto strugi, to uznaje się że na terenie nie ma źródła i robot rozpoczyna poszukiwanie na kolejnym pod-obszarze. Taka sytuacja występuje dla terenu o indeksie 1, na którym nie ma źródła. Na trzech kolejnych pod-obszarach (o indeksach 2, 3 i 4) zlokalizowano źródło zanieczyszczenia. Dla tych pod-obszarów po wykryciu strugi uruchamiany jest drugi etap dokładnego poszukiwania z wykorzystaniem algorytmu gradientowego.

Kolejna koncepcja polega na podziale etapów poszukiwania na etapy wstępnego rozpoznania i dokładnego wyszukania. Etap wstępnego rozpoznania polega na wykonaniu przelotu na regularnej siatce punktów. Następnie z każdego z punktów w których stwierdzono kontakt ze strugą podczas etapu wstępnego rozpoznania rozpoczynany jest etap dokładnego wyszukania z wykorzystaniem algorytmu gradientowego.



Rys. 4.18. Trajektoria robota dla koncepcji podziału poszukiwania na etap wstępnego rozpoznania i dokładnego wyszukania

Przykład trajektorii robota dla tej koncepcji zaprezentowano na rysunku 4.18. Na terenie zlokalizowano trzy źródła. Wartą przeanalizowaną alternatywną koncepcją jest: rozpoczęcie poszukiwania na regularnej siatce punktów, i w momencie wykrycia strugi przejście na algorytm gradientowy. Następnie po odnalezieniu źródła zapamiętanie jego współrzędnych i powrót do poszukiwania na regularnej siatce punktów. W przypadku tych koncepcji, na analizowanym obszarze może znajdować się wiele źródeł zanieczyszczenia, i robot jest w stanie odnaleźć każde z nich. W przypadku pierwszej koncepcji podziału terenu na pod-obszary, odnalezione zostałyby jedynie jedno źródło, gdyż algorytm gradientowy znalazłby jedynie maksimum lokalne. 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 odnalezionego już źródła zanieczyszczenia.

4.5. Podsumowanie

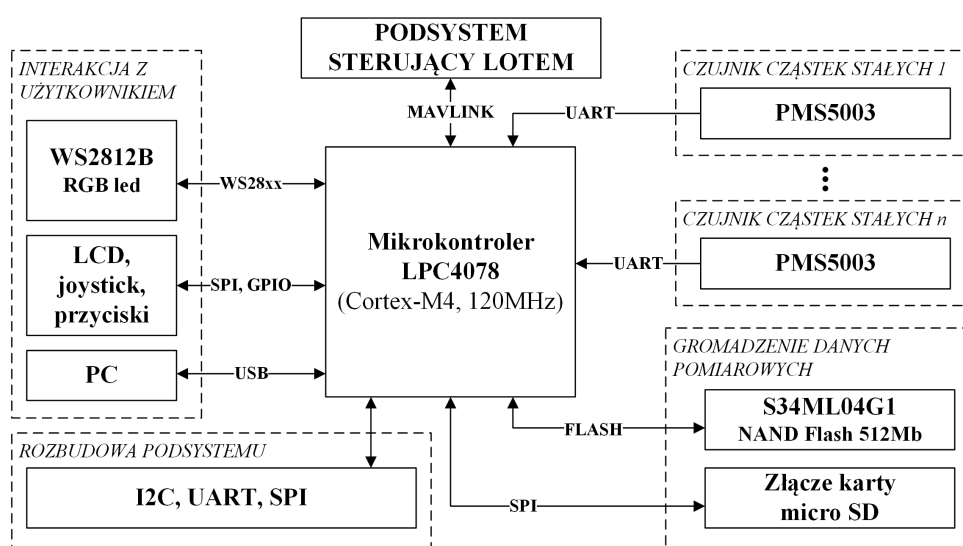
W tym rozdziale przedstawiono analizę wybranych algorytmów poszukiwania, których zadaniem jest wyznaczenie odpowiedniej trajektorii robota w celu dotarcia do źródła zanieczyszczenia. Przeanalizowano kilka wybranych algorytmów, poczynając wyznaczania regularnej siatki punktów pomiarowych, wyznaczania kierunku lotu na podstawie wartości maksymalnej, planowania eksperymentu, gradientu i finalnie infotaksji. Ten ostatni z nich, zarówno w cytowanych pracach, jak i dostępnych implementacjach cechował się niepraktycznym kryterium zakończenia poszukiwań wymagającym znajomości położenia źródła które jest poszukiwane. Dlatego zaproponowano oryginalne kryterium, które pozwoliło na praktyczną implementację. Wykonano szereg badań symulacyjnych, dzięki czemu możliwe było porównanie algorytmów dla takich samych rozkładów pola zanieczyszczenia. Następnie, na podstawie zaprezentowanych wyników ustalono kryterium doboru algorytmów. Był to warunek minimalnego czasu lotu, najbardziej istotny w przypadku wykorzystania robota latającego. Reasumując, rezultatem tej części pracy był wybór sposobów poszukiwania przestrzeni które następnie implementowano w części pracy dotyczącej badań eksperymentalnych. Zdecydowano się w ten sposób najpierw na implementację algorytmów poszukiwania na regularnej siatce punktów, oraz wyznaczania kierunku lotu na podstawie wartości maksymalnej i planu eksperymentu, które będą stanowić wstępny etap przeszukania terenu w celu ustalenia zgrubnej lokalizacji źródła. Pozostałe analizowane algorytmy sprawdzają się na etapie, kiedy robot jest już w pobliżu źródła. Związane jest to z tym że wymagany jest tam zazwyczaj mały krok w przestrzeni, co wydłuża czas lotu i powoduje że dotarcie do źródła od punktu startowego trwa niepraktycznie długo. Te algorytmy należy wykorzystać na etapie precyzyjnej lokalizacji źródła. Wstępne koncepcyjne rozważania w tym zakresie zaprezentowano w podrozdziale dotyczącym rozszerzenia poszukiwań na wiele źródeł zanieczyszczenia. Przeprowadzono dodatkowe symulacje z wykorzystaniem algorytmów poszukiwania na regularnej siatce punktów i gradientowego. W ten sposób pokazano że nadal przy stosunkowo niskim zapotrzebowaniu na moc obliczeniową możliwe jest wyszukiwanie wielu źródeł zanieczyszczenia.

5. Budowa prototypu robota latającego poszukującego źródeł zanieczyszczenia

5.1. Budowa podsystemu pomiarowo–sterującego

5.1.1. Budowa podsystemu poszukującego źródeł zanieczyszczenia

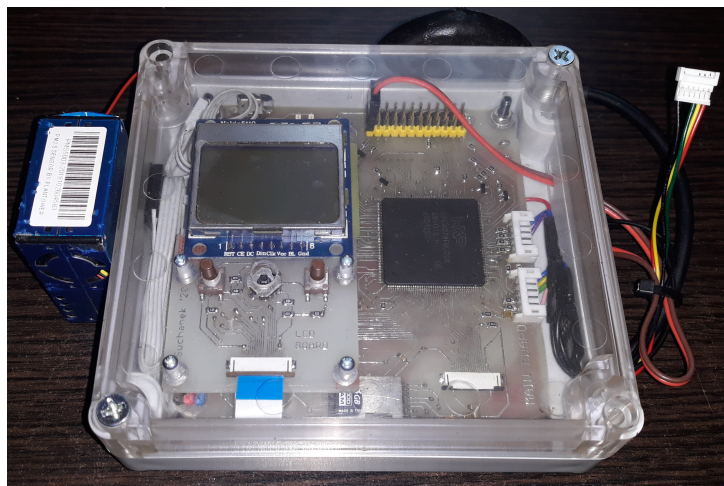
Autorski podsystem pomiarowo–sterujący stanowi najważniejszą część robota latającego, gdyż ten system realizuje zadanie poszukiwania źródeł zanieczyszczenia. W tym podsystemie przetwarzane i gromadzone do wbudowanej pamięci nieulotnej są również dane z czujników cząstek stałych. Podsystem ma modułową konstrukcję i współpracuje z kontrolerem lotu z wykorzystaniem protokołu MAVLink, co opisano w podrozdziale 2.4.2. Ponadto, do celów testowych przewidziano możliwość pracy niezależnej. W tym przypadku do układu dołącza się odbiornik GPS oraz układ zasilający z akumulatorem. Na rysunku 5.1 zaprezentowano



Rys. 5.1. Schemat blokowy układu pomiarowo–sterującego robota wielowirnikowego

schemat blokowy układu. Przygotowany układ [199, 195] został umieszczony w obudowie z twardego tworzywa sztucznego o wymiarach 0,12 m × 0,12 m × 0,04 m. Układ zasilany

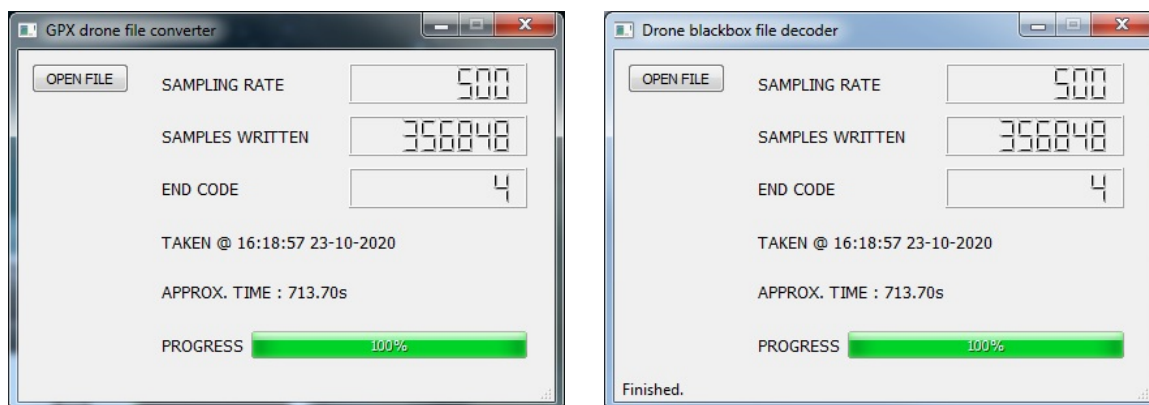
jest z niezależnej przetwornicy BEC (ang. *Battery Elimination Circuit*) dostarczającej napięcie 5 V. Całkowita masa układu pomiarowo–sterującego z jednym czujnikiem cząstek stałych typu PMS5003 wynosi 0,33 kg. Na rysunku 5.2 zaprezentowano przygotowany układ sterująco–pomiarowy.



Rys. 5.2. Przygotowany układ pomiarowo–sterujący

Najważniejszymi komponentami układu są:

- mikrokontroler LPC4078 z rdzeniem Cortex–M4 (120 MHz) firmy NXP,
- 512 Mb szybkiej pamięci Flash pozwalającej na rejestrację danych przez około 35 min przy próbkowaniu 500 Hz,
- złącze karty microSD umożliwiające łatwe przenoszenie zgromadzonych danych do komputera,
- czujnik(i) cząstek stałych PMS5003,
- zegar czasu rzeczywistego RTC (wbudowany w mikrokontroler),
- interfejs użytkownika w postaci wyświetlacza LCD PCD8544, joysticka i dodatkowych przycisków,
- wielokolorowa dioda LED WS2812B, której to kolor sygnalizuje obecny stan pracy układu pomiarowego,
- dodatkowa bateria litowo–jonowa 3,7 V 1 Ah z przetwornicą podnoszącą napięcie do 5V i układem zabezpieczającym ogniwo z ładowarką oraz odbiornik GPS – w przypadku pracy samodzielnej.



(a) program do generowania pliku GPX

(b) program do generowania plików do środowiska Matlab

Rys. 5.3. Przygotowane programy do przetwarzania danych pomiarowych [195]

Zebrane podczas testów dane pomiarowe mają postać binarną. Stąd aby wykonać analizę zgromadzonych danych konieczne jest przetworzenie ich na pliki tekstowe danych oddzielonych przecinkami, w formacie CSV (ang. *comma-separated values*). W tym celu przygotowano programy (rysunek 5.3). Pierwszy z programów generuje trajektorię w postaci pliku GPX (ang. *GPS Exchange Format*), razem z wyszczególnionymi punktami pomiarowymi. Po załadowaniu danych do dedykowanej aplikacji, np. internetowej *GPSVisualizer* [155], aplikacja wyświetla podgląd z pliku trajektorią robota, oraz wyznaczone punkty pomiarowe z opisami. Drugi program natomiast generuje plik z danymi do programu *Matlab*, plik informacyjny z informacjami diagnostycznymi oraz plik współrzędnych punktów pomiarowych z określonymi dla nich wartościami stężeń.

5.1.2. Dobór parametrów podsystemu pomiarowego stężenia cząstek stałych

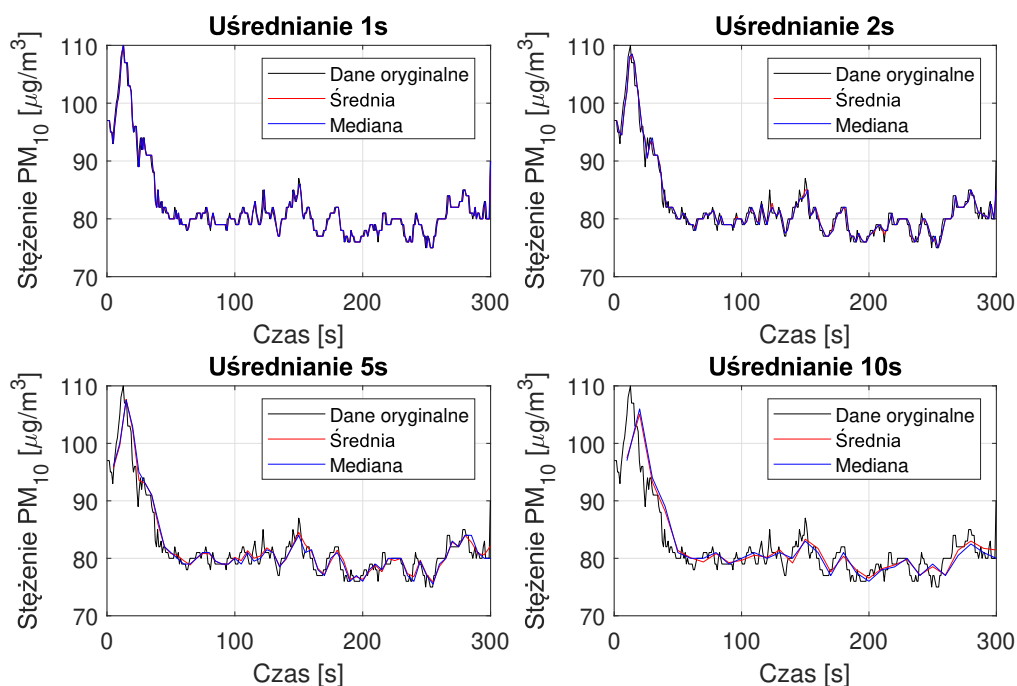
Wstępne próby wykonano z jednym czujnikiem cząstek stałych, który został umieszczony centralnie pod robotem, ze względów praktycznych. Odpowiednie umieszczenie czujnika ma kluczowe znaczenie w przypadku robota wielowirnikowego. Robot tego typu podczas pracy w istotnym stopniu wprowadza zaburzenie dla mierzonej strugi zanieczyszczenia. Dlatego też ta kwestia odpowiedniego umieszczenia czujnika ma strategiczne znaczenie dla celów poszukiwania źródła zanieczyszczenia. W celu znalezienia właściwego miejsca montażu została wykonana analiza pola przepływu powietrza wokół robota. Wyniki tych analiz omówiono w rozdziale 3. Przygotowany układ ma możliwość jednoczesnego zbierania danych z większej liczby czujników. Analizy danych zebranych jednocześnie z dwóch czujników (gdy jeden zamontowano pod robotem, drugi na wysięgniku) opisano w rozdziale 6.1.

Motywacją do wykorzystania niskokosztowego czujnika PMS5003 było to, że posiada on aktywny system poboru powietrza (jest wyposażony w niewielkich wymiarów wentylator) oraz ma niski czas całkowitej odpowiedzi. Jest ona w istotny sposób mniejsza niż w przypadku półprzewodnikowych czujników gazów. Dzięki temu robot może poruszać się szybciej, i pozostawać krócej w wyznaczonych punktach pomiarowych. Parametry czujnika PMS5003 typu z noty katalogowej producenta [233] zestawiono w tabeli 5.1.

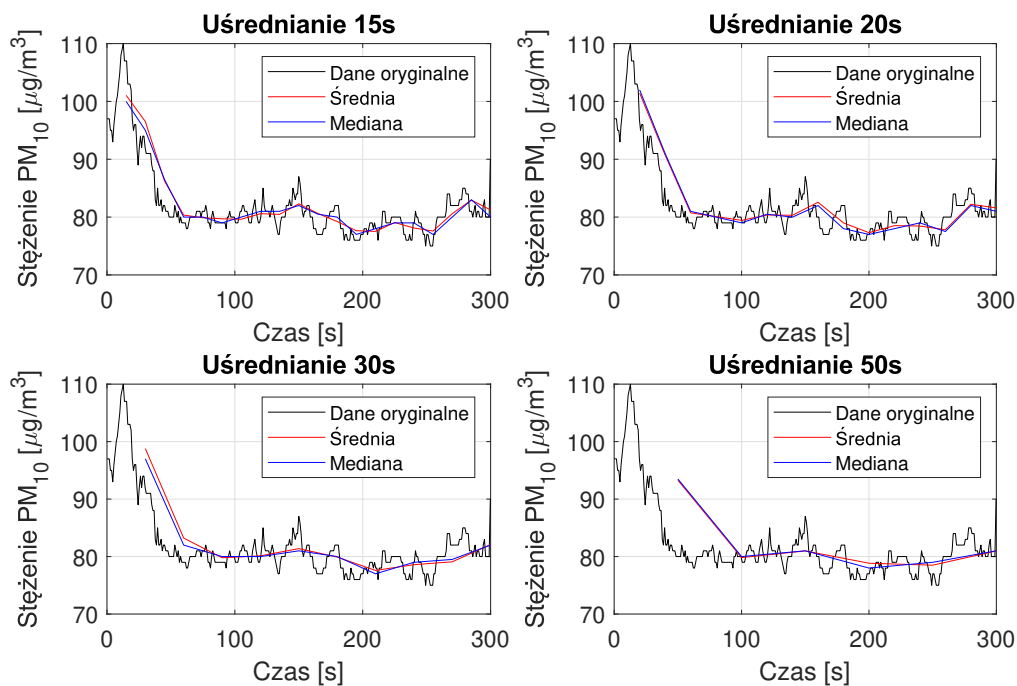
Tabela 5.1. Wybrane parametry czujnika PMS5003 [233]

Parametr	Wartość
Zakres pomiarowy	0,3 – 1,0 μm , 1,0 – 2,5 μm , 2,5 – 10,0 μm
Skuteczność zliczania	50% dla 0,3 μm , 98% dla $\geq 0,5 \mu\text{m}$
Rozdzielczość	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Całkowity czas odpowiedzi	≤ 10 s
Napięcie zasilania	4,5 – 5,5 V
Pobór prądu	≤ 100 mA
Temperatura pracy	-10 – 60 °C
Wymiary zewnętrzne	50 mm \times 38 mm \times 21 mm
Masa	38 g

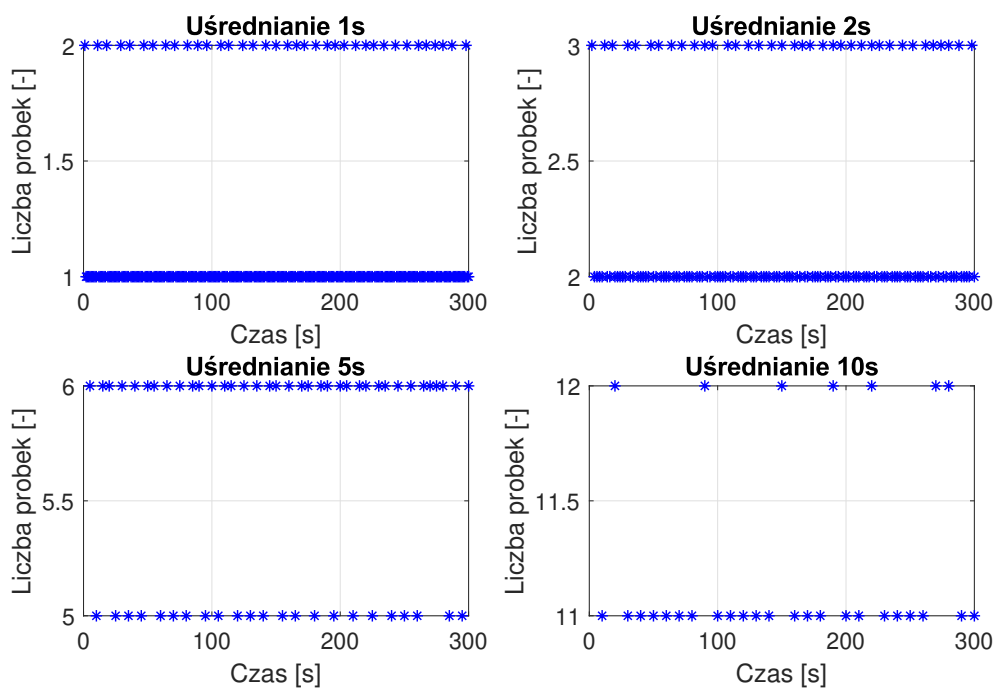
Zastosowany czujnik cząstek stałych PMS5003 charakteryzuje się zmienną częstotliwością próbkowania, która jest zależna od mierzonego stężenia (dla większych stężeń jest ona większa). Na rysunkach 5.4 i 5.5 zaprezentowano przebieg czasowy mierzonego stężenia PM_{10} . Minimalna częstotliwość próbkowania w tym przypadku wynosiła 1,087 Hz, maksymalna 1,191 Hz, średnia – 1,123 Hz. Takie zachowanie czujnika powoduje dodatkową trudność w porównaniu danych, które pochodzą z kilku niezależnie działających czujników. W celu przeprowadzenia synchronizacji danych z różnych czujników, zdecydowano się na zweryfikowanie możliwości wyznaczenia średniej i mediany z danych dla wybranych okresów uśredniania. Na rysunkach 5.6 i 5.7 zaprezentowano liczby próbek, zawierające się w kolejnych okresach.



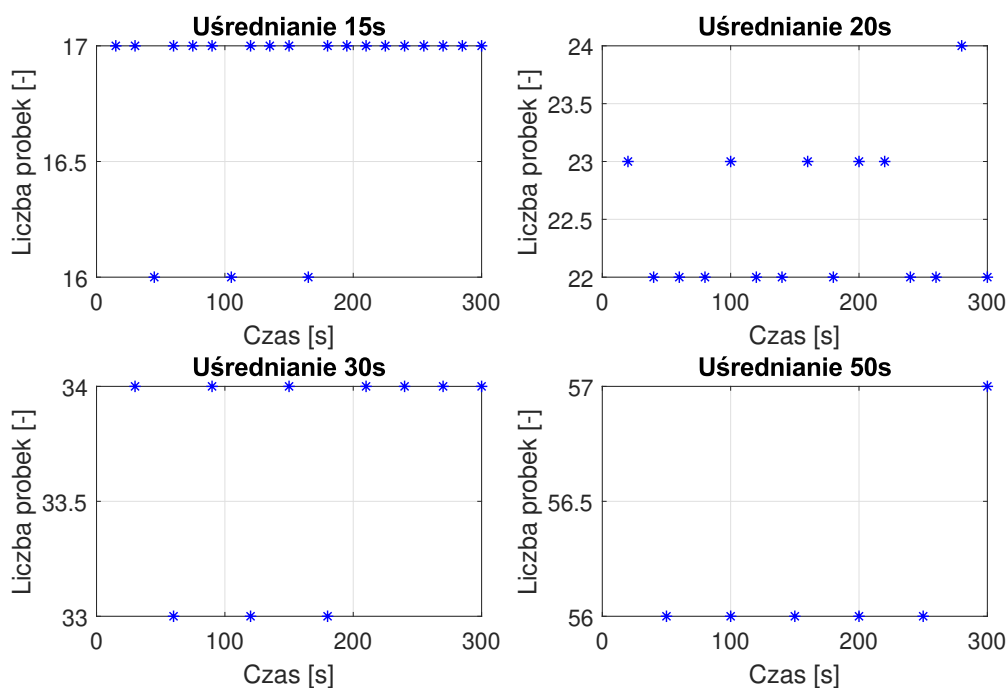
Rys. 5.4. Średnia i mediana z danych z czujnika dla wybranych okresów uśredniania (1 s – 10 s)



Rys. 5.5. Średnia i mediana z danych z czujnika dla wybranych okresów uśredniania (15 s – 50 s)



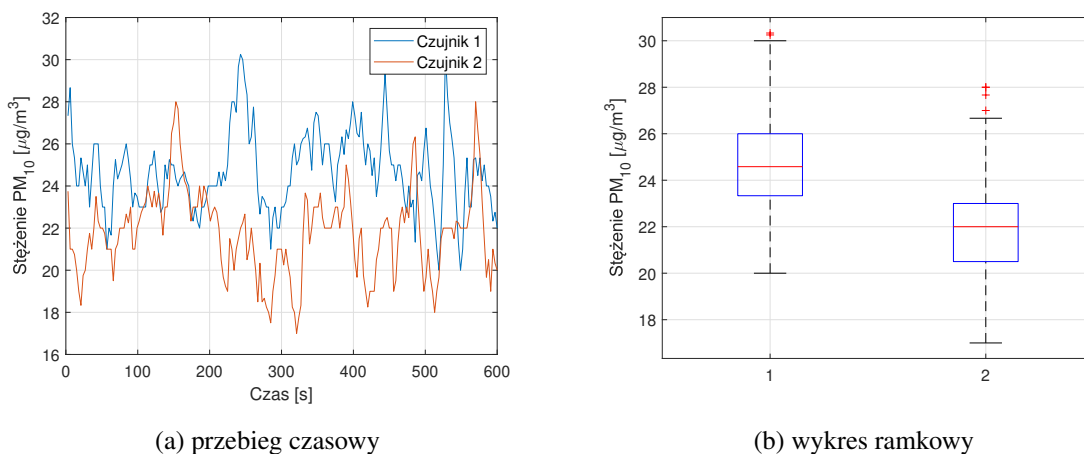
Rys. 5.6. Liczby próbek dla różnych czasów uśredniania danych (1 s – 10 s)



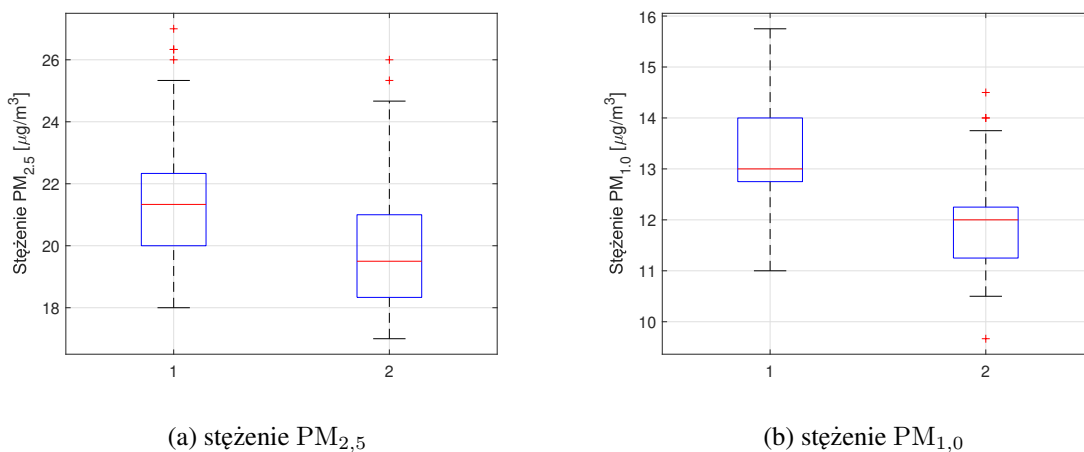
Rys. 5.7. Liczby próbek dla różnych czasów uśredniania danych (15 s – 50 s)

Analiza miała na celu zbadania własności pomiarowych wykorzystanych czujników i wybrania odpowiedniego okresu uśredniania. Ponieważ nie było istotnych różnic pomiędzy

obiema wersjami, zdecydowano się na wykorzystanie średniej, a nie mediany. Ponieważ czujnik ma zostać zamontowany na robocie wielowirnikowym, to czas uśredniania nie może być zbyt długi. Na podstawie przedstawionych danych, najbardziej odpowiedni czas zawierał się w zakresie od 2 s do 5 s. Ostatecznie zdecydowano się na czas 3 s. Przyjmując tą wartość, wykonano pomiary stężeń w zamkniętym pomieszczeniu z użyciem dwóch identycznych czujników. Zarejestrowano dane stężeń $PM_{1,0}$, $PM_{2,5}$ oraz PM_{10} w ciągu 10 minut. Wyniki zaprezentowano na rysunkach 5.8 i 5.9. Oznaczenia na wykresach: 1 – czujnik 1, 2 – czujnik 2.

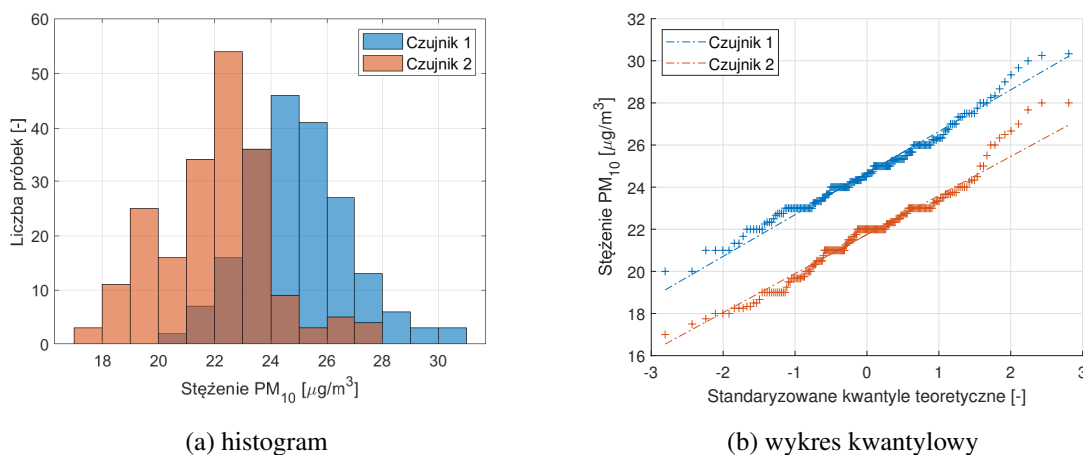


Rys. 5.8. Zmierzone stężenia PM_{10}



Rys. 5.9. Wykresy ramkowe dla pozostałych mierzonych stężeń

Na podstawie tychże danych przeprowadzono analizę, czy uzyskane rozkłady mają charakter rozkładu normalnego. Analizę graficzną zaprezentowano na rysunku 5.10 w postaci histogramu oraz wykresu kwantylowego. W szczególności na podstawie rysunku 5.10b, należy przyjąć że dane mają charakter normalny, w znaczeniu praktycznym. Dalej, wyznaczono parametry statystyczne, które zestawiono w tabeli 5.2.



Rys. 5.10. Charakterystyki statystyczne danych stężenia PM_{10}

Tabela 5.2. Wyznaczone dane statystyczne dla dwóch testowanych czujników typu PMS5003

	Czujnik 1			Czujnik 2		
	$PM_{1,0}$	$PM_{2,5}$	PM_{10}	$PM_{1,0}$	$PM_{2,5}$	PM_{10}
Wartość średnia [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	13,38	21,39	24,70	11,93	19,88	21,76
Odchylenie standardowe [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	1,03	1,82	1,89	0,74	1,87	2,02
Niepewność standardowa [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	0,07	0,13	0,13	0,05	0,13	0,14
Niepewność rozszerzona [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	0,15	0,26	0,27	0,10	0,26	0,29

Średnie częstotliwości próbkowania dla tej próby wynosiły odpowiednio 1,1476 Hz i 1,1560 Hz, dla czujników 1 i 2. Liczby zgromadzonych próbek wynosiły odpowiednio 687 i 692. Po operacji uśrednienia, liczba próbek wynosiła 200 dla obu czujników. Przy tak dużej liczbie obserwacji, współczynnik rozszerzania można było przyjąć na wartość 2,0 w celu uzyskania przedziału ufności na poziomie 95,45%.

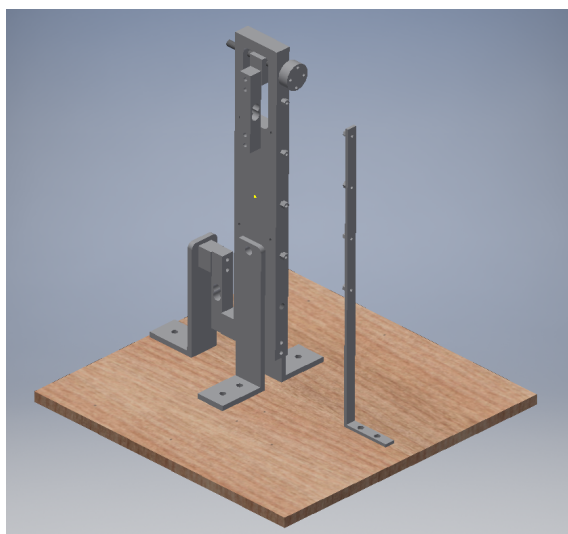
5.2. Identyfikacja parametrów zespołu napędowego robota

W celu wyznaczenia nieznanymi parametrów zespołów napędowych, niezbędnym okazało się zaprojektowanie, wykonanie i oprogramowanie mobilnego stanowiska hamowni. Budowa stanowiska umożliwiła zidentyfikowanie zespołu napędowego, który będzie cechował się największą osiąganą siłą ciągu. Ponadto uzyskane dane umożliwiły weryfikację modelu matematycznego CFD, który został opisany w podrozdziale 3. Stanowisko hamowni i wyniki badań opisano również w [51, 197]. Przygotowane mobilne stanowisko pomiarowe

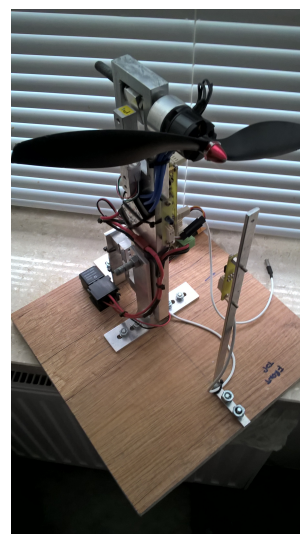
(hamownia) umożliwia pobieranie danych potrzebnych do wyznaczenia charakterystyk zespołów napędowych robotów wielowirnikowych. Przez zespół napędowy rozumieć należy kompletny zestaw składający się ze: śmigła, silnika i sterownika silnika ESC (ang. *Electronic Speed Controller*). Do konstruowanego stanowiska przyjęto następujące założenia projektowe, że będzie umożliwiać ono wykonywanie pomiarów: siły ciągu, momentu obrotowego, prędkości obrotowej śmigła, napięcia zasilającego i prądu pobieranego przez silnik, temperatury podstawy silnika, oraz wibracji zespołu napędowego (przyśpieszeń) w trzech osiach. Na podstawie tychże wartości możliwe jest wyznaczenie również dodatkowych parametrów, takich jak moc elektryczna i mechaniczna.

5.2.1. Budowa stanowiska pomiarowego

Przed fizycznym wykonaniem części mechanicznej zamodelowano wszystkie potrzebne elementy w programie *Autodesk Inventor* (rys. 5.11a). Podstawę konstrukcji stanowi drewniana płyta o wymiarach 0,3 m × 0,3 m o grubości 18 mm. Pozostałe elementy wykonano z aluminium. Wysokość całego stanowiska wynosi około 0,34 m. Na rysunku 5.11b zaprezentowano zdjęcie wykonanego stanowiska hamowni.



(a) model stanowiska z programu Inventor

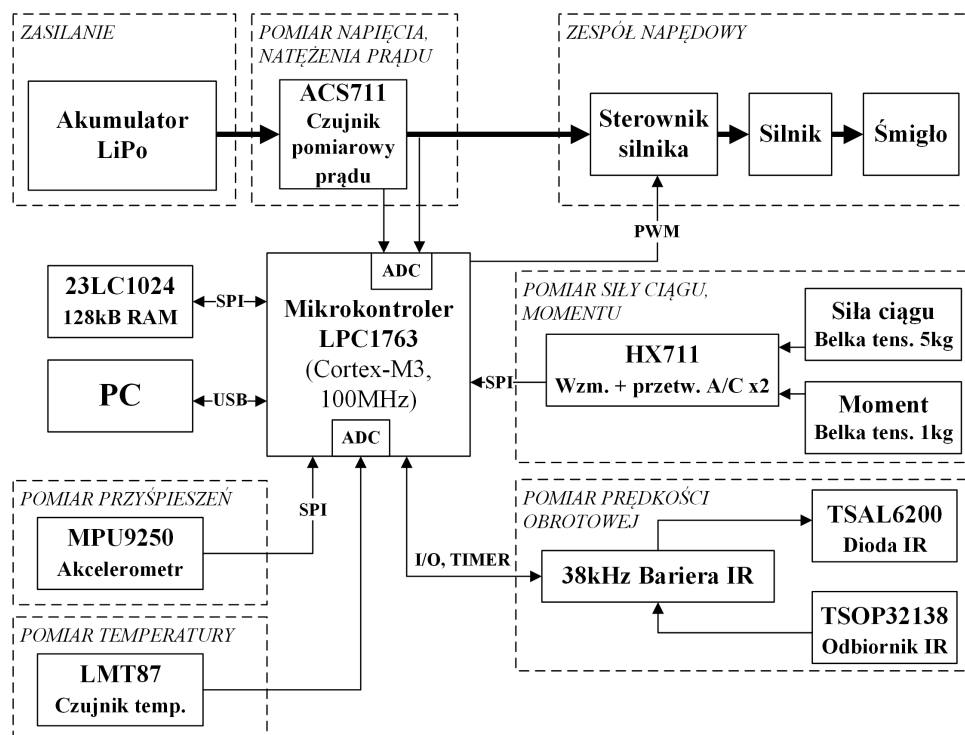


(b) zdjęcie stanowiska

Rys. 5.11. Stanowisko hamowni

Głównym elementem części elektronicznej systemu jest mikrokontroler LPC1763 firmy NXP z rdzeniem Cortex-M3 taktowany częstotliwością 100 MHz. Mikrokontroler ten pełni funkcję pomiarowo – sterującą. Schemat blokowy części elektronicznej stanowiska zaprezentowano na rysunku 5.12. Do wzmacniania i konwersji na postać cyfrową sygnału z belek tensometrycznych zastosowano dedykowane do wag cyfrowych dwa układy HX711

firmy AVIA Semiconductor. Układy te zawierają stabilizator zasilania belki, wzmacniacz o programowanym wzmocnieniu i 24-bitowy przetwornik ADC. Do pomiaru ciągu wykorzystano belkę o dopuszczalnym obciążeniu 5 kg, do pomiaru momentu 1 kg. Pomiar prądu silnika zrealizowano przy wykorzystaniu przetwornika prąd/napięcie typu ACS711 firmy Allegro Microsystems umożliwiający pomiar prądu do 25 A. Pomiar napięcia zasilania, pomiar napięcia z czujnika prądu i czujnika temperatury LMT87 (o dokładności $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$) zrealizowano przy wykorzystaniu wbudowanego w mikrokontroler 12-bitowego przetwornika ADC. Pomiar wibracji zrealizowano wykorzystując wbudowany w układ MPU9250 firmy TDK \Invensense 16-bitowy akcelerometr 3-osiowy. Pomiar prędkości obrotowej śmigła realizowany jest przy pomocy bariery optycznej. Odbiornik bariery stanowi układ odbiornika podczerwieni TSOP32138. Nadajnik stanowi dioda IR TSAL6200 zasilana impulsami o częstotliwości 38 kHz. Taka konstrukcja bariery zapewnia eliminację wpływu migotania obecnych w pomieszczeniu źródeł światła na pomiar prędkości obrotowej śmigła. Bariere optyczną można zamontować w trzech różnych położeniach, tym samym dopasować ją do rozmiaru zamontowanego śmigła. Dane pomiarowe gromadzone są w zewnętrznej pamięci 23LC1024 o pojemności 128 kB. Możliwość komunikacji układu z komputerem PC zapewniono poprzez wykorzystanie układu FT232RL, czyli scalonego konwertera USB \UART.

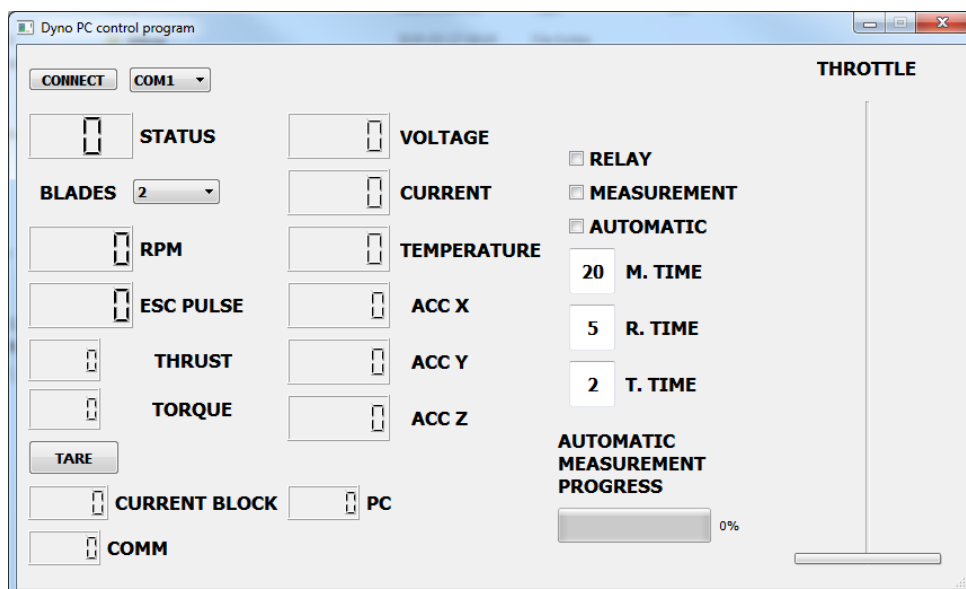


Rys. 5.12. Schemat blokowy stanowiska hamowni

W celu zapewnienia koniecznych środków bezpieczeństwa hamownię wyposażono w standardowy przełącznik samochodowy, sterowany programowo z mikrokontrolera.

Przełącznik odłącza zasilanie silnika w przypadku: zawieszenia się programu mikrokontrolera, utraty komunikacji z komputerem PC bądź zawieszenia się programu na komputerze PC. W układzie zastosowano jeszcze dodatkowy wyłącznik bezpieczeństwa odłączający cewkę przełącznika.

Oprogramowanie mikrokontrolera sterującego pracą hamowni przygotowano w języku C w środowisku *MCUXpresso*. Program przygotowano na niskim poziomie poszczególnych rejestrów procesora, aby uzyskać największą wydajność pobierania i przetwarzania danych pomiarowych. Główne przerwanie pomiarowe wywoływane jest z częstotliwością 100 Hz, i z taką częstotliwością pobierane są dane z czujnika przyspieszenia. Pozostałe dane pobierane są z niższymi częstotliwościami ze względu na ograniczenia sprzętowe czujników pomiarowych i wynoszą: z wbudowanego przetwornika ADC jest to 25 Hz, belek tensometrycznych 10 Hz, a prędkość obrotowa mierzona jest raz na sekundę (1 Hz). Pobierane dane z czujników gromadzone są w buforze kołowym o pojemności 64 bloków znajdującym się w pamięci. Każdy z bloków zajmuje 2 kB i mieści się w nim 64 kompletne pomiary. Przy próbkowaniu 100 Hz jest to zapis z ostatnich 0,64 s pomiarów, a w całej pamięci można zarejestrować 40,96 sekundy pomiaru. Po skompletowaniu 64 pomiarów, czyli wypełnieniu bloku, jest on przesyłany pojedynczo do komputera. Implementacja bufora kołowego była konieczna do zapewnienia spójności przesyłanych do komputera danych, gdyż ze względu na sposób działania systemu operacyjnego na komputerze PC dane nie byłyby pobierane w jednakowych odstępach czasu.



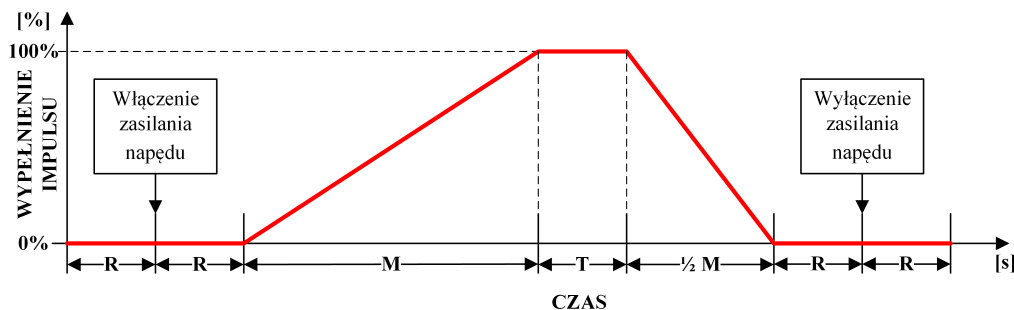
Rys. 5.13. Widok ekranu programu sterującego na komputerze PC

Oprogramowanie współpracujące z hamownią na komputer PC przygotowano w języku C++ w środowisku *Qt*. Oprogramowanie umożliwia sterowanie stanowiskiem po podłączeniu

go do komputera przy pomocy kabla USB. Przygotowany program (rysunek 5.13) wyświetla wszystkie mierzone parametry bieżące, informacje o stanie hamowni, a także umożliwia sterowanie przełącznikiem, przepustnicą oraz rozpoczęcie rejestracji danych pomiarowych (również w trybie automatycznym). Dane kalibracyjne, potrzebne do przeliczenia otrzymywanych ze stanowiska wartości, wprowadzane są do programu w postaci pliku tekstowego. Funkcja zerowania (tzw. tary) jest w programie niezbędna ze względu na istotny wpływ temperatury otoczenia na wskazania z belek tensometrycznych. W automatycznym trybie pomiaru definiuje się trzy parametry:

- Czas przełączania przełącznika R . Czas ten jest niezbędny, aby zdążył uruchomić się sterownik silnika (ESC) po włączeniu zasilania.
- Czas zmiany współczynnika wypełnienia impulsu (0% - 100%) M . Jest to zarówno czas rozbiegu i wybiegu, konieczny aby przeciążenia stanowiska nie były zbyt wysokie.
- Czas maksymalnych obrotów T , czyli czas kiedy utrzymywane są stałe maksymalne obroty silnika.

Sposób zmiany wypełnienia impulsu sterującego sterownik silnika przedstawiono na rysunku 5.14.



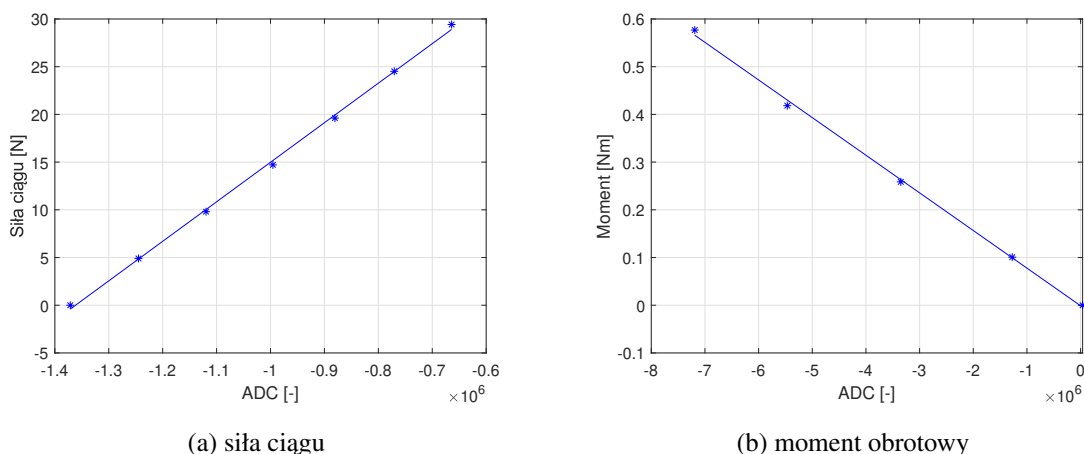
Rys. 5.14. Przebieg zmiany wypełnienia impulsu sterującego w trybie pomiaru automatycznego

Gromadzone dane pomiarowe pobrane z stanowiska zapisywane są do pliku w formacie CSV. Jest to format tekstowy, gdzie dane zapisywane są w postaci wartości oddzielonych przecinkami. Analizę danych w postaci plików CSV przeprowadzono w oprogramowaniu *Matlab*.

5.2.2. Kalibracja stanowiska

Aby możliwe było wykonywanie pomiarów napędów, należało najpierw wykonać kompleksowy proces kalibracji wskazań wszystkich mierzonych parametrów. Niektóre z nich nie wymagały kalibracji, a jedynie weryfikacji poprawności wskazań (tak jak m.in. optyczny

miar prędkości obrotowej). Najbardziej złożony proces kalibracji dotyczył wskazań siły ciągu i momentu obrotowego. Do kalibracji tychże należało wykonać dodatkowe pomocnicze elementy mechaniczne. Podczas kalibracji wskazania siły ciągu (rysunek 5.15a) wykorzystano siedem punktów pomiarowych, odpowiadających kolejno siłom: 0 N, 4,9 N, 9,8 N, 14,7 N, 19,6 N, 24,5 N, 29,4 N. Dla wskazania momentu (rysunek 5.15b) zaś pięć, kolejno : 0 Nm, 0,10 Nm, 0,26 Nm, 0,42 Nm oraz 0,58 Nm.

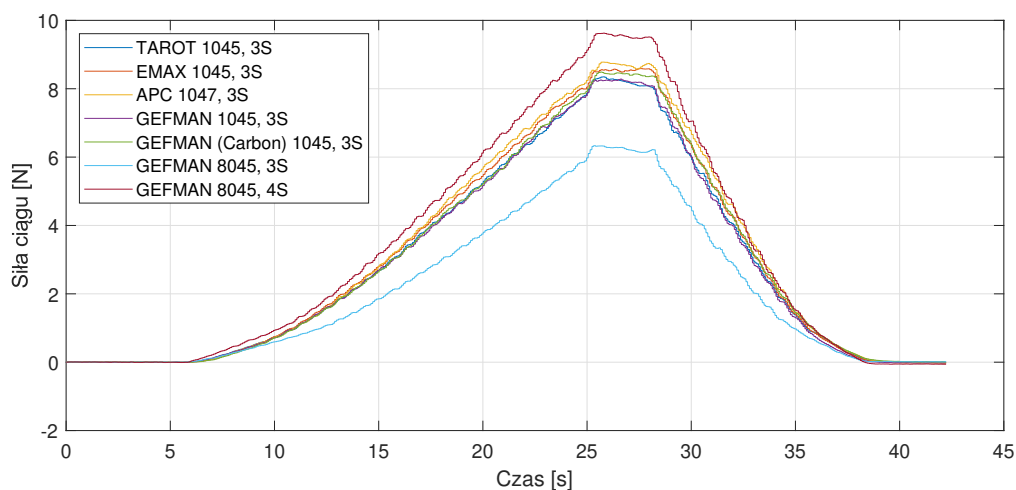


Rys. 5.15. Dopasowane proste w procesie kalibracji wskazań stanowiska hamowni

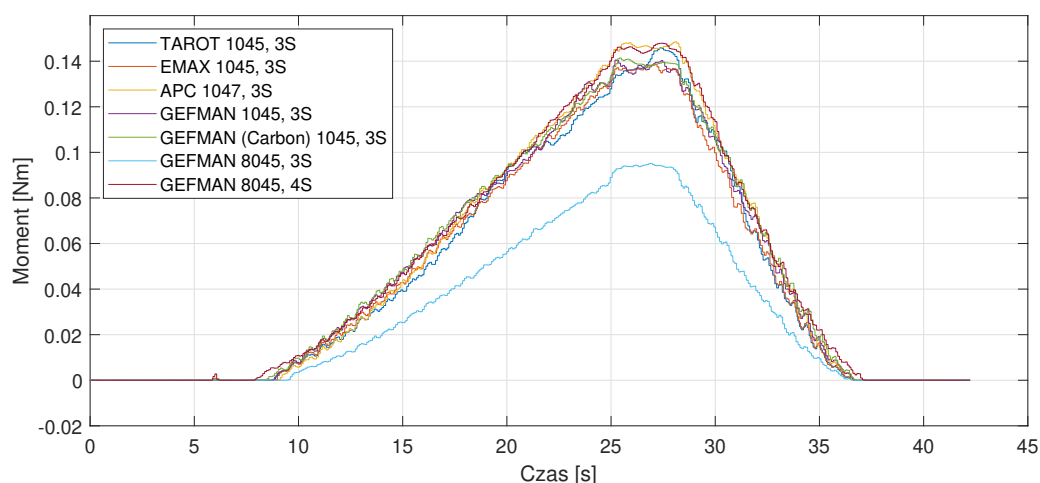
Na rysunku 5.15 przedstawiono dopasowane proste z zaznaczonymi punktami. Należy zauważyć, że uzyskano liniowe zależności, co oznacza prawidłowe funkcjonowanie stanowiska. Wartość uzyskanego współczynnika kierunkowego prostej zależy od sposobu podhaczenia belki tensometrycznej. Współczynnik determinacji R^2 dla obu wyznaczonych aproksymacji przekraczał wartość 0,99.

5.2.3. Pomiary zespołów napędowych na stanowisku

Dysponując stanowiskiem hamowni możliwe było szybkie i łatwe wykonanie dużej liczby pomiarów. Na rysunku 5.16 zaprezentowano odpowiednio siłę ciągu i moment zmierzony dla silnika MT2213 w trybie automatycznym dla różnych konfiguracji śmigieł oraz napięcia zasilającego. W legendzie rysunków zastosowano następującą nomenklaturę: pierwszy człon oznaczenia typu wskazuje producenta śmigła (Tarot, Emax, APC i Gefman). Wszystkie śmigła wykonane są z tworzywa ABS, poza jednym typem o większej sztywności z włókna węglowego, określonego na rysunku jako *Carbon*. Kolejny człon oznacza rozmiar śmigła, gdzie: 1045 – średnica 10 cali, skok 4,5 cala; 1047 – średnica 10 cali, skok 4,7 cala; 8045 – średnica 8 cali, skok 4,5 cala. Ostatni człon oznacza typ akumulatora: 3S (nominalne napięcie 11,1 V) albo 4S (14,8 V). Pozostałe mierzone parametry na przykładzie zestawu w którego skład wchodziło śmigło typu 1045 firmy Gefman z ABS zamieszczono w załączniku 7.2.



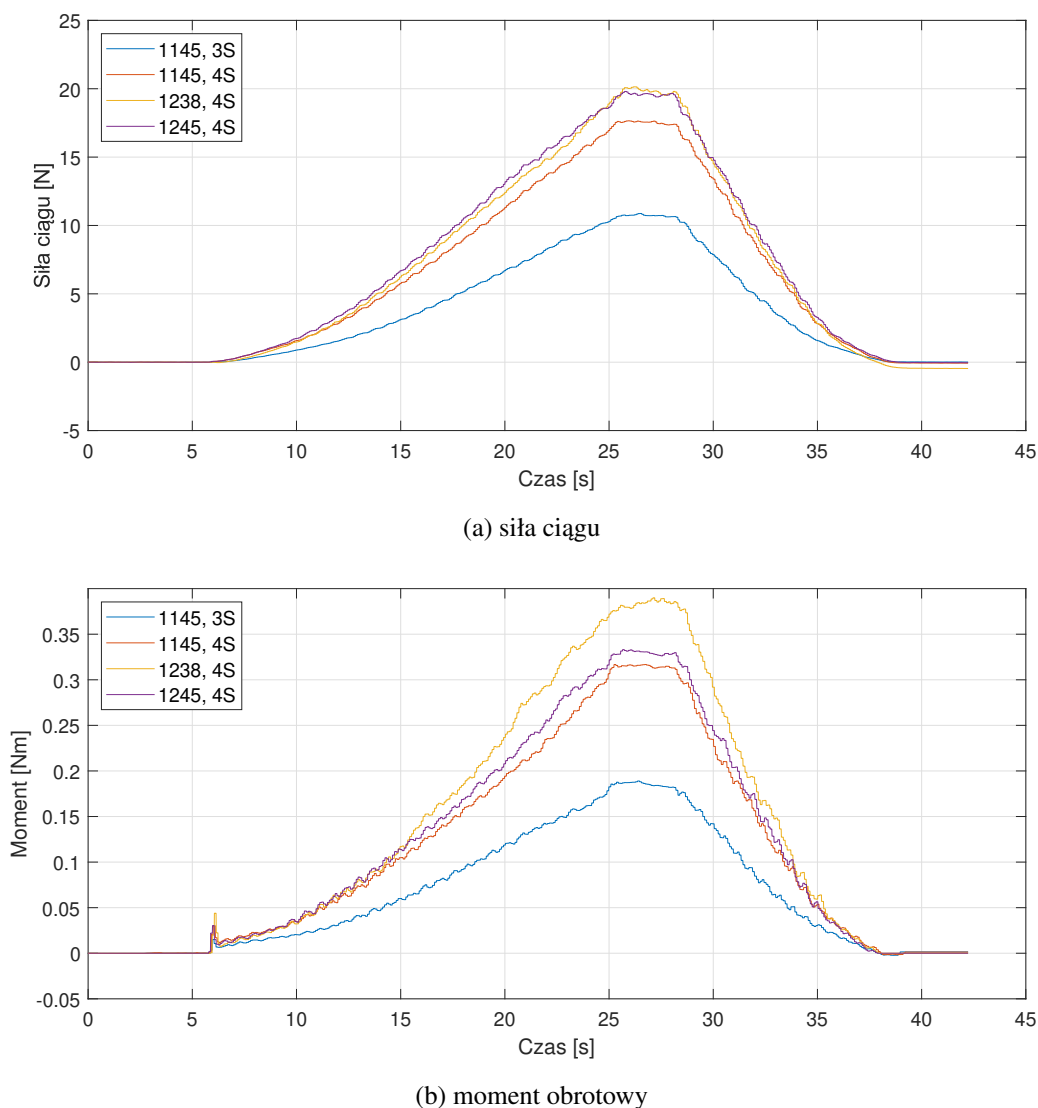
(a) siła ciągu



(b) moment obrotowy

Rys. 5.16. Porównanie różnych konfiguracji pracy silnika MT2213

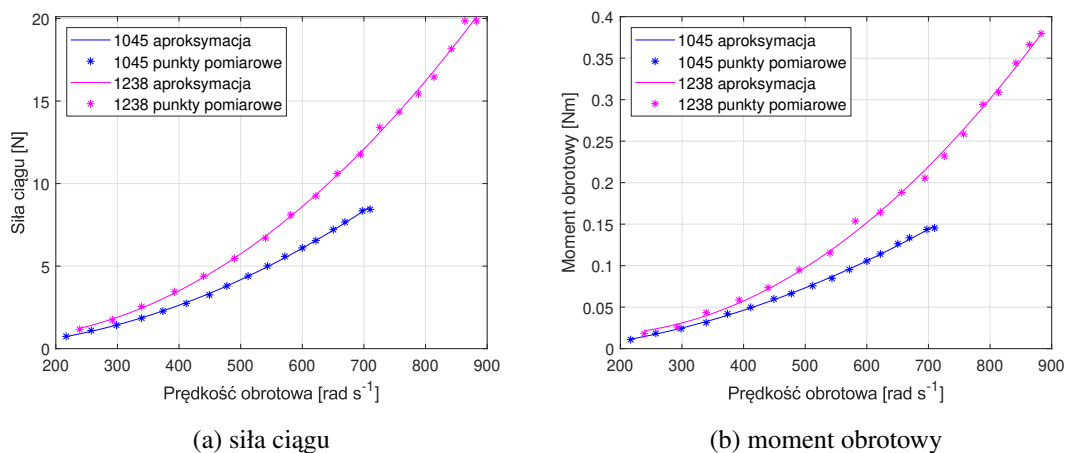
Na rysunku 5.17 pokazano te same parametry dla silnika MT2814 dla różnych konfiguracji śmigieł oraz napięcia zasilającego. W legendzie rysunków zastosowano podobną nomenklaturę: pierwszy człon oznacza rozmiar śmigła, gdzie: 1145 – średnica 11 cali, skok 4,5 cala; 1238 – średnica 12 cali, skok 3,8 cala; 1245 – średnica 12 cali, skok 4,5 cala. Ostatni człon oznacza typ akumulatora: 3S (11,1 V) albo 4S (nominalne napięcie 14,8 V). Producentem wszystkich śmigieł była firma Gefman i były wykonane z tworzywa ABS. Pozostałe mierzone parametry na przykładzie zestawu w którego skład wchodziło śmigło typu 1238 firmy Gefman z ABS zamieszczono również w załączniku 7.2.



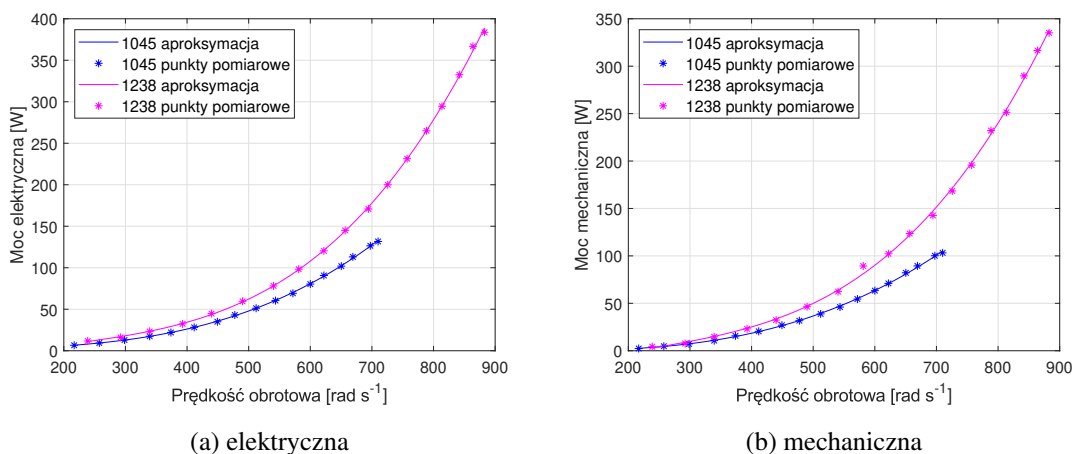
Rys. 5.17. Porównanie różnych konfiguracji pracy silnika MT2814

5.2.4. Identyfikacja parametrów zespołów napędowych

Na podstawie wykonanych pomiarów wybrano konfiguracje cechujące się największą generowaną siłą ciągu i momentem napędowym. W przypadku mniejszego silnika było to śmigło o średnicy 10 cali i skoku 4,5 cala, dla większego o średnicy 12 cali i skoku 3,8 cala. Na podstawie otrzymanych danych możliwe było wyznaczenie charakterystyk: siły ciągu, momentu obrotowego oraz mocy w funkcji prędkości obrotowej wirnika.



Rys. 5.18. Wyznaczone charakterystyki siły ciągu i momentu dla obu wirników



Rys. 5.19. Wyznaczone charakterystyki mocy dla obu wirników

Tabela 5.3. Zidentyfikowane parametry napędów (dla modeli określonych równaniami 2.1)

Oznaczenie wirnika	k [N s^2]	b [Nm s^2]	p_{mech} [W s^3]	p_{el} [W s^3]
1045	$1,691 \cdot 10^{-5}$	$2,932 \cdot 10^{-7}$	$2,936 \cdot 10^{-7}$	$3,742 \cdot 10^{-7}$
1238	$2,512 \cdot 10^{-5}$	$4,628 \cdot 10^{-7}$	$4,698 \cdot 10^{-7}$	$5,457 \cdot 10^{-7}$

Na rysunkach 5.18 i 5.19 zaprezentowano wyznaczone charakterystyki. Na podstawie danych pomiarowych wykonano aproksymację wielomianową, którą również zaprezentowano na wykresie. W przypadku siły ciągu i momentu wykonano dopasowanie wielomianem drugiego stopnia, mocy – trzeciego stopnia. W tabeli 5.3 zaprezentowano zidentyfikowane

parametry napędów dla modeli wykorzystujących sam człon wykładniczy, danych równaniami 2.1. Współczynnik determinacji R^2 dla wszystkich przypadków przekraczał wartość 0,99. Na rysunku 5.19 zaprezentowano wyznaczone moce elektryczną i mechaniczną. Moc elektryczna została wyznaczona jako iloczyn napięcia zasilającego U i pobieranego prądu I , zgodnie z równaniem:

$$M_e = UI \quad (5.1)$$

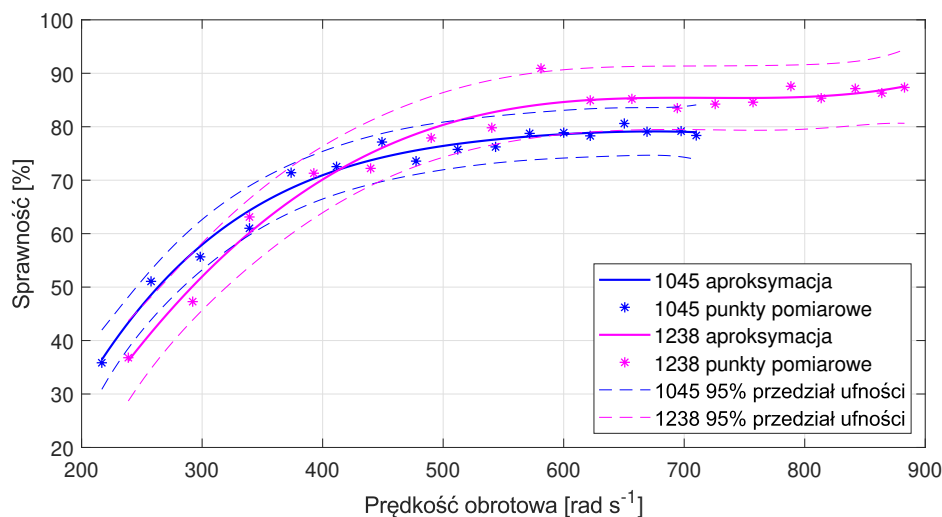
Moc mechaniczna zaś została wyznaczona jako iloczyn momentu obrotowego M i prędkości obrotowej silnika ω , zgodnie z równaniem:

$$M_m = M\omega \quad (5.2)$$

Moc mechaniczna jest zawsze mniejsza od elektrycznej, i związane jest to przede wszystkim ze stratami na kluczach w sterowniku silnika oraz występowaniu oporów mechanicznych. Niemniej jednak, po wyznaczeniu obu mocy, wyznaczono sprawność napędów (rys. 5.20) jako iloraz mocy mechanicznej M_m i elektrycznej M_e :

$$\eta = \frac{M_m}{M_e} \quad (5.3)$$

Na wykresie przedstawiono dane pomiarowe, aproksymacje wielomianową dla wielomianu 4 stopnia oraz 95% przedziały ufności. Współczynnik determinacji R^2 dla przypadku mniejszego śmigła wynosił 0,98, dla większego zaś 0,97.



Rys. 5.20. Wyznaczone charakterystyki sprawności dla obu wirników

Jak pokazano na rysunku 5.20 oba wirniki uzyskują sprawność przekraczającą 70% dla obrotów przekraczających 400 rad s⁻¹. Poniżej tychże prędkości obrotowej sprawność spada szybko w okolice 35%. Powyżej zaś, zwiększa się nieznacznie osiągając dla mniejszego wirnika

maksymalnie około 79%, dla większego około 88%. W przypadku większego z wirników, jeden z punktów pomiarowych znalazł się poza wskazanym przedziałem ufności, co najpewniej jest wynikiem błędu pomiarowego.

5.3. Wykonanie prototypu robota latającego

Do początkowych prac i testów wykorzystywano platformę o czterech wirnikach. Do budowy części mechanicznej robota typu quadcopter (rys. 5.21) wykorzystano gotową ramę firmy *TAROT* klasy 450, co oznacza że rozstaw silników napędowych wynosi 0,45 m. Maksymalne wymiary zewnętrzne robota wynosiły 0,71 m × 0,71 m × 0,23 m. Główny napęd konstrukcji stanowią cztery dedykowane do robotów wielowirnikowych silniki MT2213 firmy *EMAX*. Pojedynczy silnik generuje maksymalny ciąg 0,86 kg (czyli w przypadku tej konstrukcji jest to w sumie 3,4 kg). Jako sterowniki silnika wykorzystano ESC Budget 18 A firmy *EMAX*, na który wgrano oprogramowanie *BlHeli*. Silnik współpracuje również ze śmigłem typu 1045, czyli o średnicy 10 cali i skoku 4,5 cala. Całkowita masa startowa robota wyposażonego jedynie w kontroler lotu bez układu do pomiaru zanieczyszczeń wynosi około 1 kg, z dodatkową elektroniką około 1,35 kg. Masy poszczególnych elementów części mechanicznej robota wynoszą: rama kompletna – 0,28 kg, komplet silników, śmigieł i sterowników silników – 0,35 kg, akumulator 2,2 Ah – 0,16 kg, dodatkowe nogi – 0,07 kg, pozostałe elementy montażowe – 0,11 kg. W tej konfiguracji akumulator litowo-polimerowy (LiPo) o pojemności 2,2 Ah pozwalał na czas lotu na poziomie maksymalnie 11 minut.



Rys. 5.21. Robot latający o czterech wirnikach (quadcopter) [199]

Na podstawie danych z stanowiska hamowni przeanalizowano różne możliwe warianty zasilania robota. Jest to związane z faktem, iż montując akumulator o większej pojemności czas lotu teoretycznie się wydłuży. Pojemniejszy akumulator będzie miał również mniejszą

rezystancję wewnętrzną, i tym samym nie będą na nim występować znaczne spadki napięcia przy obciążeniu dużym prądem. Jednakże pojemniejszy akumulator będzie oczywiście cięższy, co sprawia że będzie istnieć pewne maksimum czasu lotu. Dalsze zwiększanie pojemności, i tym samym masy, gdy przekroczy możliwości udźwigu robota spowoduje brakiem możliwości lotu. Bazową masę robota do analizy (tabela 5.4) (bez akumulatora) przyjęto na 0,93 kg. Rzeczywiste czasy lotu (w stanie zawisu robota) wyznaczono czas w którym akumulator wyładował się do napięcia 3 V na celę, czyli w tym przypadku 9 V. Do wyznaczenia tego czasu zmierzono faktyczną pojemność dwóch egzemplarzy posiadanych akumulatorów 2,2 Ah, które wynosiły odpowiednio 2,0 Ah (w tabeli ozn. jako *Akumulator 2,0 Ah*) i 1,5 Ah (*Akumulator 3,5 Ah*).

Tabela 5.4. Szacowane i rzeczywiste czasy lotu dla wybranych konfiguracji

Konfiguracja	Pojemność [Ah] akumulatora	Masa [kg]	Czas lotu [min]	
			szacowany	rzeczywisty
Wyjściowa	2,20	1,09	13,69	—
Akumulator 2,0 Ah	2,00	1,09	12,44	10,50
Akumulator 3,5 Ah	3,50	1,25	18,21	15,00
Akumulator 5,0 Ah	5,00	1,23	26,35	—

Różnice pomiędzy szacowanym a rzeczywistym czasem lotu wynikają również z tego że dla większego prądu obciążenia napięcie na akumulatorze obniża się bardziej, a akumulator rozładowywany jest do napięcia 9 V. Akumulatorów tego typu nie wyładowuje się do napięć niższych (a w szczególności bliskich 0 V), gdyż jest to szkodliwe dla ogniw. Po przekroczeniu tego progu robot powinien natychmiast lądować na pozycji w której się w danym momencie znajduje. W przypadku gdy wykorzystywane są autonomiczne tryby lotu, to poziom wyładowania akumulatora ma jeszcze większe znaczenie i należy zarezerwować pewien poziom na powrót do pozycji startowej, kiedy wykorzystywany jest tryb RTH (ang. *return to home*). Ostatecznie zdecydowano się na wykorzystanie pojedynczego akumulatora o pojemności 5 Ah. Zastosowanie pojemniejszego akumulatora nie było zasadne, gdyż masa w pełni wyposażony robot do testowania algorytmów poszukiwania źródła zanieczyszczenia wynosiła 2,2 kg. Czas lotu dla tej konfiguracji wynosił maksymalnie 15 minut.

Na podstawie decyzji projektowych z rozdziałów 2 i 3, ostatecznie wykorzystano robota o sześciu wirnikach. Konstrukcja tego robota (rys. 5.22) jest bardzo podobna do opisanego już robota o czterech wirnikach i wykorzystuje on wiele elementów identycznego typu. Maksymalne wymiary zewnętrzne robota wynosiły 0,81 m × 0,81 m × 0,23 m. Do napędu tego robota wykorzystano sześć zestawów w skład który wchodzi: 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 jest w stanie wygenerować ciąg do 0,86 kg jak wskazywano na stanowisku hamowni. Tym samym oznacza to udźwig wynoszący 5,16 kg. Robot został zbudowany na ramie z tworzywa sztucznego firmy TAROT klasy 550, co oznacza że rozstaw silników (największa odległość między silnikami) wynosi 0,55 m. Robot wyposażony został w dwa akumulatory 3S o pojemności 6,5 Ah, co oznacza wynikową pojemność 13 Ah. Masa własna robota wraz z układem pomiarowo–sterującym wynosi 2,57 kg, i zapewniał czas lotu na poziomie maksymalnie 25 minut.



Rys. 5.22. Robot latający o sześciu wirnikach (heksakopter) [199]

5.4. Podsumowanie

W tym rozdziale opisano proces budowy prototypu robota latającego. Istotną częścią tego robota jest autorska dedykowana jednostka pomiarowo-sterująca, na której implementowano algorytmy poszukiwania źródła zanieczyszczenia. Opisane w pracy oprogramowanie układowe przygotowywano na najniższym poziomie poszczególnych rejestrów procesora. Ogół oprogramowania przygotowano w pełni samodzielnie w językach C i C++. Tak samo samodzielnie przygotowano wykorzystywane w pracy skrypty w języku Matlab, które wykorzystywano głównie do testów różnych rozwiązań i prezentowania zgromadzonych danych. Od tej reguły były nieliczne wyjątki, gdzie wykorzystano dostępne biblioteki programistyczne. Podobnie jak w przypadku oprogramowania wykonano w pełni samodzielnie moduły elektroniczne w pracy. Na ten proces składały się procesy projektowania i wykonania w większości dwuwarstwowych obwodów drukowanych oraz samego procesu montażu

elementów o milimetrycznych rozmiarach z wykorzystaniem tradycyjnej lutownicy bądź gorącego powietrza. Finalnie zaprezentowano wykonany prototyp robota wielowirnikowego.

Następnie wykonano analizę własności pomiarowych zastosowanych czujników cząstek stałych. Analiza miała przede wszystkim na celu wskazać właściwy sposób przetwarzania danych pomiarowych. Zastosowany czujnik charakteryzuje się zmienną częstotliwością próbkowania, która jest zależna od mierzonego stężenia. Takie zachowanie czujnika powoduje dodatkową trudność w porównaniu danych, które pochodzą z kilku niezależnie działających czujników. W celu przeprowadzenia synchronizacji danych z różnych czujników, należało określić odpowiedni okres uśredniania. Ponieważ czujnik ma zostać zamontowany na robocie wielowirnikowym, to ten czas nie może być zbyt długi. W wyniku analizy zdecydowano się na czas 3 s.

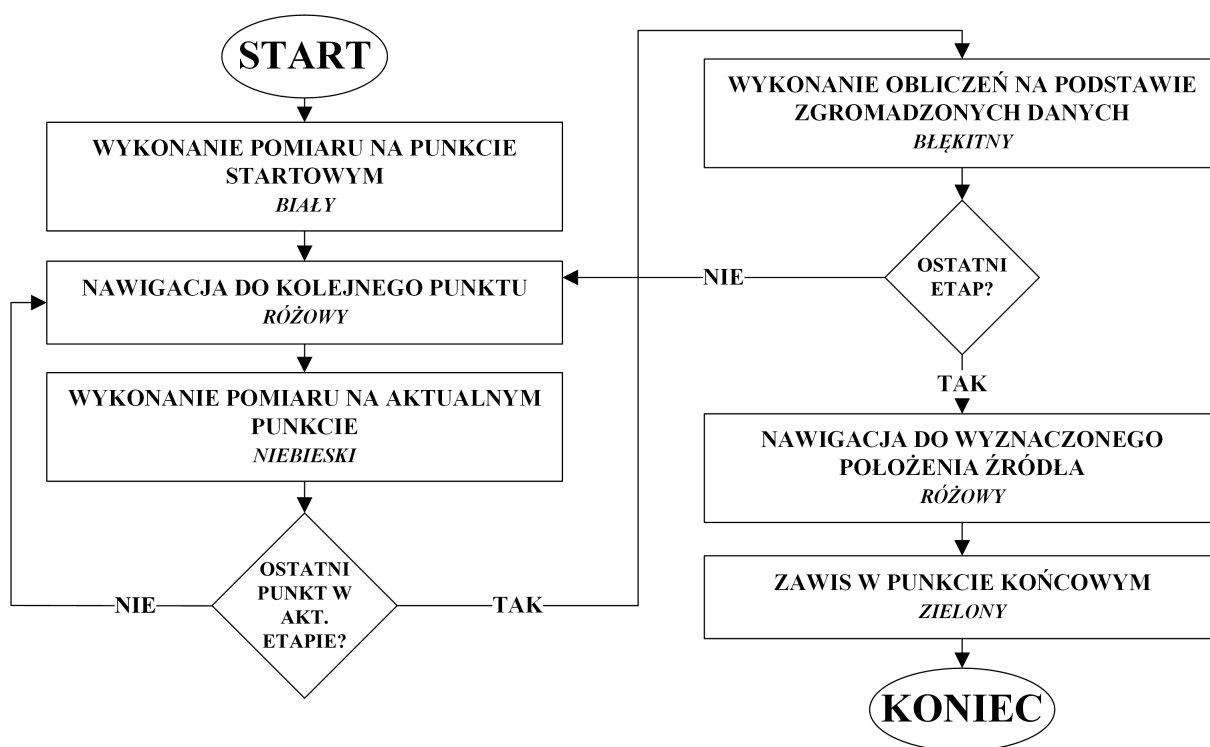
Przygotowano również dedykowane stanowisko hamowni, które pozwala na wykonywanie pomiarów siły ciągu, momentu obrotowego, prędkości obrotowej, napięcia zasilającego i prądu, przyspieszeń i temperatury podstawy silnika. Są to wszystkie kluczowe parametry zespołu napędowego. Zaprojektowana możliwość automatycznego prowadzenia pomiarów pozwoliła również na wykonanie pomiarów dla różnych wariantów silników, śmigieł oraz napięcia zasilającego, w celu porównania osiągnięć zespołów napędowych. Stanowisko umożliwiło przede wszystkim zweryfikowanie poprawności obliczeń przepływowych pola powietrza wokół robota oraz wyznaczenie charakterystyk zespołów napędowych robota. Oprócz charakterystyk siły ciągu i momentu obrotowego wyznaczono również charakterystyki mocy elektrycznej i mechanicznej. Na podstawie tych dwóch ostatnich wyznaczono charakterystyki sprawności. Wytypowane wirniki, które cechowały się największą generowaną siłą ciągu uzyskały sprawność przekraczającą 70% dla obrotów przekraczających 400 rad s^{-1} . Poniżej tychże prędkości obrotowej sprawność spadała szybko w okolice 35%. Powyżej zaś, zwiększała się nieznacznie osiągając dla mniejszego wirnika maksymalnie około 79%, dla większego około 88%.

6. Weryfikacja działania robota latającego w warunkach terenowych

Walidację robota latającego w warunkach terenowych [198, 199] wykonano w kilku etapach. Wstępne badania wykonano dla trzech grup pomiarów: lotów bez źródła zanieczyszczenia, lotów ze źródłem zanieczyszczenia i referencyjnych pomiarów bez źródła i bez pracujących wirników. W tym ostatnim przypadku robot podpierany był na pionowym wysięgniku, o wysokości podobnej do tej w czasie zawisu. Badania były wykonywane zarówno kiedy robot był w stanie zawisu, a także kiedy poruszał się po różnych trajektoriach. Dla warunków niepracujących wirników śledzenie trajektorii odbywało się ręcznie, poprzez przenoszenie robota podpartego na pionowym wysięgniku.

Testy w warunkach terenowych przeprowadzono na płaskim terenie wolnym od zabudowań, ruchu ulicznego, czy osób postronnych. Na tymże terenie zostały ustawione cztery markery. Wyznaczały one krawędzie przestrzeni o kwadratowej powierzchni o ustalonych wymiarach na której przeprowadzane były testy. Następnie wybrano lokalizację dla źródła zanieczyszczeń powietrza. Źródłem tym był niewielki grill gastronomiczny, którego położenie zostało określone przy pomocy taśmy pomiarowej względem punktu startowego. To położenie nie było znane dla systemu sterującego robota, a było ono wykorzystywane do celów oszacowania dokładności testowanych algorytmów. Źródło zanieczyszczeń powietrza znajdowało się na wysokości 0,5 m.

Podczas testów robot utrzymywał stałą wysokość około 4 m nad poziomem gruntu, a prędkość poruszania się robota w kierunku poziomym była ograniczona do $0,75 \text{ m s}^{-1}$. Ponadto, robot utrzymywał również stałą orientację, czyli nos (przód) w kierunku północnym. Utrzymywanie stałej orientacji zostało przygotowane w związku z planowanym przeprowadzeniem prób z wysięgnikiem. Robot został docelowo wyposażony w wysięgnik, który konstrukcyjnie ma stałą orientację względem robota. Kiedy cały robot utrzymuje stałą orientację, położenie czujnika będącego na końcu wysięgnika bardzo łatwo wyznacza się poprzez odjęcie/dodanie stałej wartości do aktualnego położenia robota.



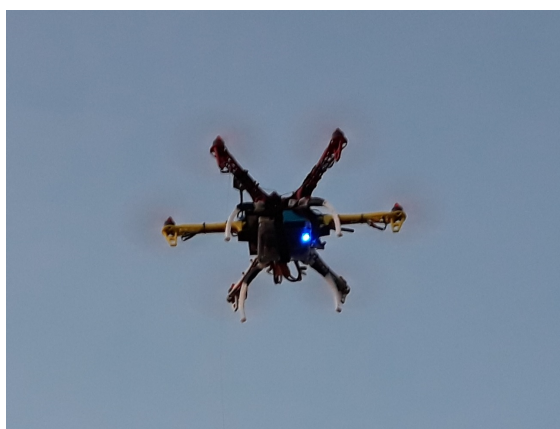
Rys. 6.1. Schemat blokowy zaimplementowanych algorytmów

Ze względów bezpieczeństwa tzw. „uzbrojenie” (rozumiane jako uruchomienie silników i przygotowanie do startu), start, jak i lądowanie robota wykonywany jest ręcznie przez operatora, aby sprawdzić poprawne działanie aparatury sterującej i trybów awaryjnych. Kiedy ten znajdzie się już w powietrzu na punkcie startowym zostaje włączony tryb utrzymania pozycji. Następnie po sprawdzeniu czy robot poprawnie reaguje na polecenia zostaje włączony tryb automatycznego poszukiwania. Od tego momentu robot realizuje wybrany przez operatora przy pomocy odpowiedniego położenia przełącznika na aparaturze sterującej algorytm poszukiwania, tak jak zostało to opisane w rozdziale 4. Ogólny schemat blokowy obrazujący sposób wykonywania algorytmów zaprezentowano na rysunku 6.1. Po uruchomieniu algorytmu poszukiwania:

- wygenerowane zostają punkty pomiarowe które należy sprawdzić,
- wykonany zostaje pomiar stężenia w punkcie startowym (poprzez wykonanie pomiaru rozumie się maksymalną zarejestrowaną stężenia PM_{10} na aktualnej pozycji robota w czasie 3 s),
- kontroler lotu zostaje przełączony na tryb prowadzony, i tym samym odbierana jest możliwość ręcznej zmiany pozycji robota przez operatora,
- robot rozpoczyna autonomiczne przeszukiwanie terenu.

Następnie robot nawiguje kolejno do wyznaczonych współrzędnych punktów i wykonuje pomiary. Po sprawdzeniu pierwszej partii punktów, w zależności od wybranego algorytmu generowane są kolejne zgodnie ze schematem działania wybranego algorytmu. Po sprawdzeniu wszystkich punktów zostaje ustalone położenie źródła (w przypadku prostych algorytmów jest to po prostu punkt, w którym zarejestrowano najwyższe stężenie). Robot przemieszcza się do tego punktu i po dotarciu do celu pozostaje w tym miejscu w trybie utrzymania pozycji. W ten sposób, w warunkach terenowych, z łatwością obserwowano które położenie robot uznał jako położenie źródła zanieczyszczenia. Każdy z etapów algorytmu jest kojarzony z odpowiadającym mu kolorem (tak jak pokazano na rys. 6.1) wielokolorowej diody LED, w którą wyposażony jest układ pomiarowy.

W każdej chwili operator może w dowolnym momencie przerwać automatyczną pracę robota i ponownie przejąć nad nim ręczną kontrolę. Inne środki bezpieczeństwa, takie jak awaryjne lądowanie na aktualnym położeniu lub tryb RTH (ang. *return to home*), czyli powrót do położenia startowego mogą być uruchomione z aparatury przez operatora w dowolnym momencie. Na rysunku 6.2, zaprezentowano robota w powietrzu od dołu, gdzie widoczna jest świecąca wielokolorowa dioda LED w którą wyposażono układ pomiarowy. Niebieski kolor (Rys. 6.2a) sygnalizuje stan wykonywania pomiaru w punkcie przez robota, fioletowy zaś (Rys. 6.2b) stan nawigacji do kolejnego punktu pomiarowego.



(a) podczas wykonywania pomiaru w punkcie



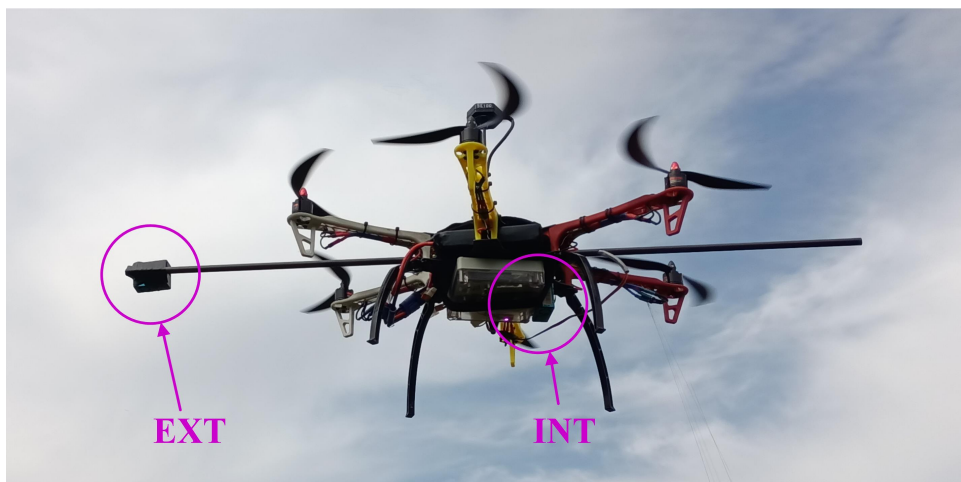
(b) podczas nawigacji do kolejnego punktu

Rys. 6.2. Robot z sześcioma wirnikami podczas lotu

6.1. Weryfikacja poprawności działania systemu pomiarowego

Robot typu hexacopter został wyposażony w symetryczny wysięgnik (rysunek 6.3). Długość wysięgnika względem środka robota wynosiła 0,5 m. Na wysięgniku przed robotem

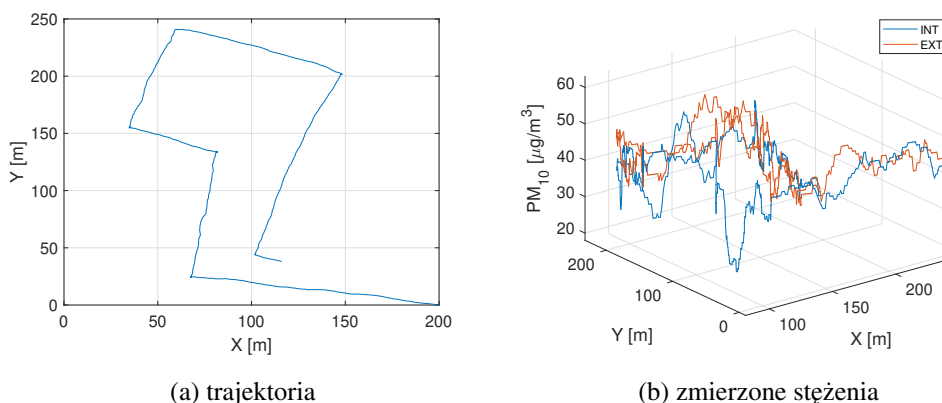
umieszczono takiego samego typu czujnik cząstek stałych, jaki ten zamontowany wewnątrz. Zdecydowano się na takie rozwiązanie w związku z tym że masa czujnika nie była duża, a bezpośredni montaż w ten sposób nie wpływał na jego własności pomiarowe.



Rys. 6.3. Robot sześciowirnikowy wyposażony w wysięgnik podczas lotu. Oznaczenia na rysunku: *INT* – czujnik wewnętrzny, *EXT* – zewnętrzny

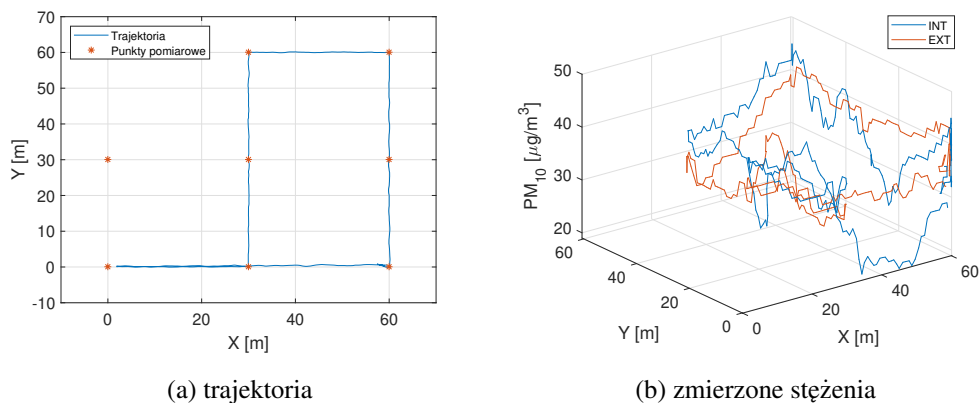
6.1.1. Wyniki badań wstępnych

Analizę rozpoczęto od wykonania prób systemu w warunkach terenowych. Na rysunku 6.4a zaprezentowano trajektorię podczas przenoszenia robota, na rysunku 6.4b zaś zmierzone stężenia dla obu czujników. Na wykresach uwzględniono że czujnik zewnętrzny jest umieszczony 0,5 m na północ względem położenia robota. Wyznaczenie położenia czujnika na wysięgniku było w ten sposób możliwe, gdyż robot podczas wykonywania pomiarów otrzymywał stałą orientację (przód w kierunku północy). Podczas przenoszenia, ta orientacja również była utrzymywana.

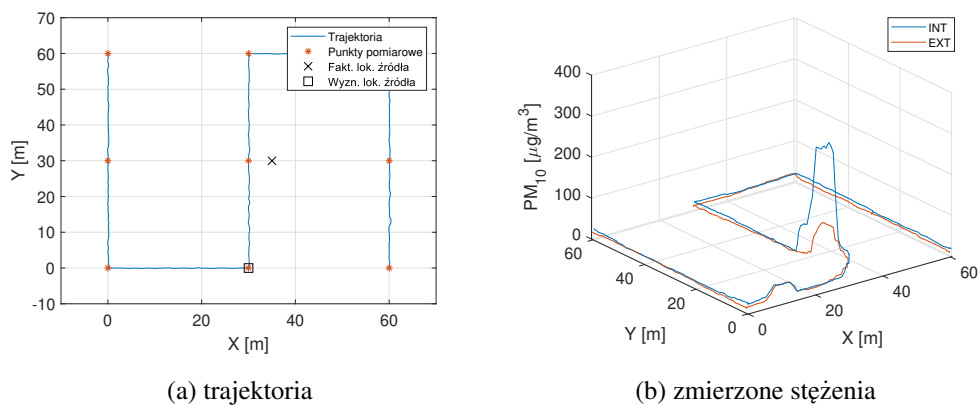


Rys. 6.4. Przykład 1 – referencyjny pomiar z wyłączonymi wirnikami

W dwóch kolejnych przykładach robot poruszał się po regularnej siatce punktów. Wykonano prosty przelot dla 9 punktów pomiarowych. Minimalna odległość między punktami wynosiła 30 m. Przykład 2 (Rys. 6.5) dotyczy przypadku, gdzie nie było źródła zanieczyszczenia. W trakcie przelotu do punktu 7 wyłączono automatyczny tryb pracy i włączono tryb powrotu do punktu startowego. Przykład 3 (Rys. 6.6) dotyczy przelotu ze źródłem zanieczyszczenia. W tych przypadkach, kiedy robot poruszał się automatycznie na rysunkach zaznaczono również punkty pomiarowe. Dla przykładów ze źródłem zanieczyszczenia zaznaczono również faktyczną i tą wskazaną przez robota lokalizację źródła.

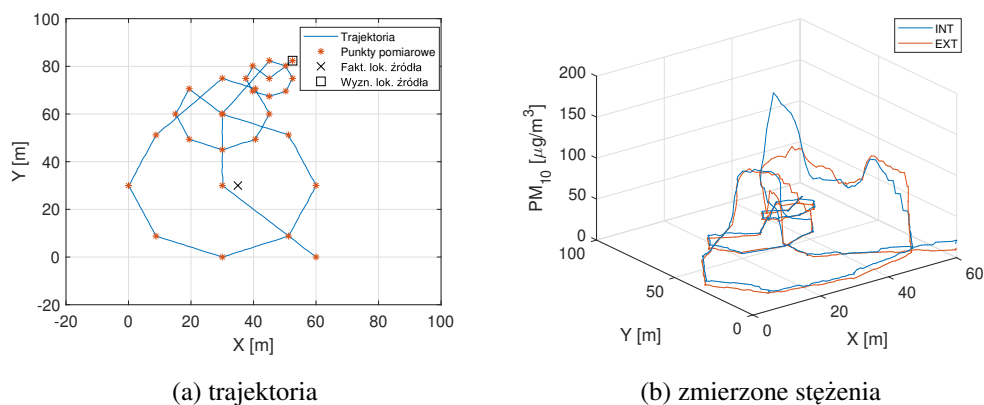


Rys. 6.5. Przykład 2 – lot bez źródła zanieczyszczenia – obszar 60 m × 60 m

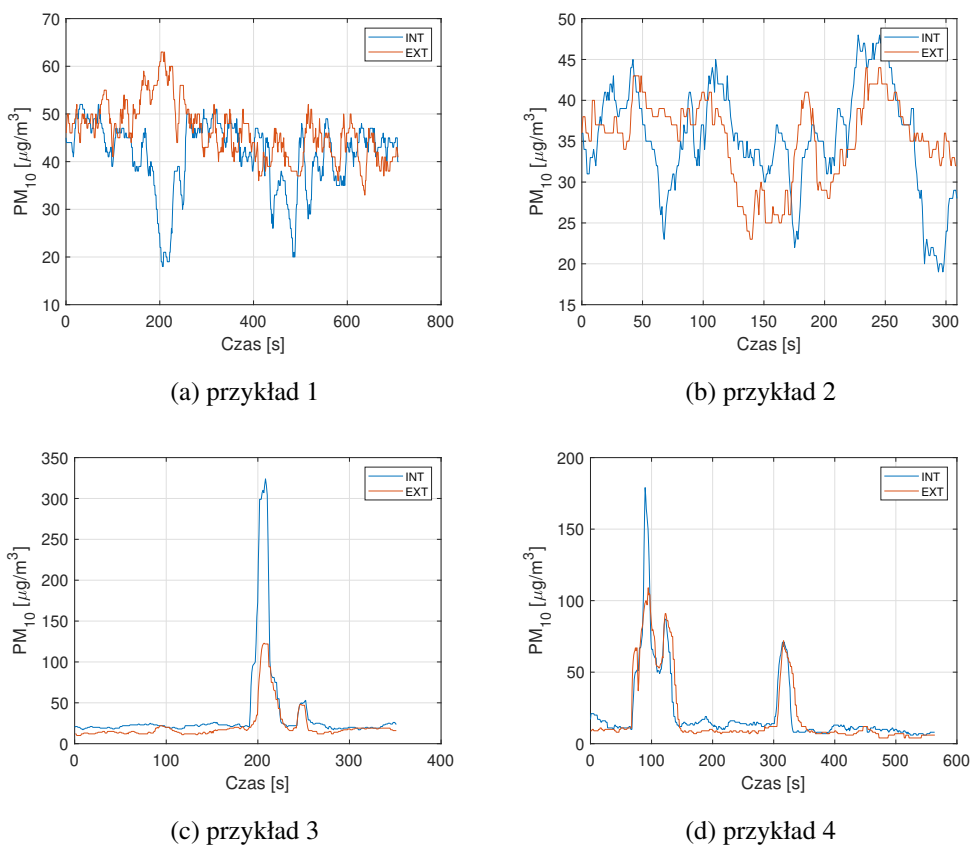


Rys. 6.6. Przykład 3 – lot ze źródłem zanieczyszczenia – obszar 60 m × 60 m

Na podstawie rysunku 6.6b należy stwierdzić że w tym przypadku wiatr miał kierunek południowo-zachodni. Należy zauważyć że zmierzone stężenia w przypadku czujnika pod robotem (*INT*) są zdecydowanie wyższe w porównaniu do tego na wysięgniku (*EXT*). Na ostatnim, przykładzie czwartym (rysunek 6.7) zaprezentowano przebieg dla algorytmu wyznaczania kierunku lotu na podstawie planu eksperymentu. W tym przykładzie najbardziej widoczna jest różnica pomiędzy pomiarami z czujników.



Rys. 6.7. Przykład 4 – lot ze źródłem zanieczyszczenia – obszar 60 m × 60 m



Rys. 6.8. Wskazania z dwóch czujników – zmierzone stężenia PM_{10} w funkcji czasu

Na dodatkowym rysunku 6.8 pokazano przebiegi zmierzonych stężeń PM_{10} w czasie. Z wykresów osunięto start i lądowanie, ponieważ w szczególności w suchych warunkach, robot podrywał różne zanieczyszczenia takie jak: liście, suchą trawę czy kurz. Te czynniki powodowały duże wskazania stężeń i zakłócały analizę.

W momentach kiedy robot znajdował się bliżej źródła zanieczyszczenia mierzone były również większe wartości, niż kiedy robot znajdował się dalej od niego. Kiedy robot znajdował się dalej (około 320 s na rysunku 6.8c) mierzone stężenia były podobne co do wartości. Może to być spowodowane tym że w większej odległości od źródła struga zanieczyszczenia jest szersza, niwelując różnicę odległości pomiędzy czujnikami. Analizując rysunek 6.8d w okolicy 150 s należy zaobserwować trzy wyraźne szczyty stężenia dla czujnika zewnętrznego. W przypadku czujnika wewnętrznego są to dwie wartości szczytowe, jedna istotnie większa. Dalej w okolicy 360 s zmierzono podobne wartości, natomiast w okolicy 500 s tylko dla czujnika zewnętrznego obserwuje się zwiększoną wartość stężenia (kolejny szczyt).

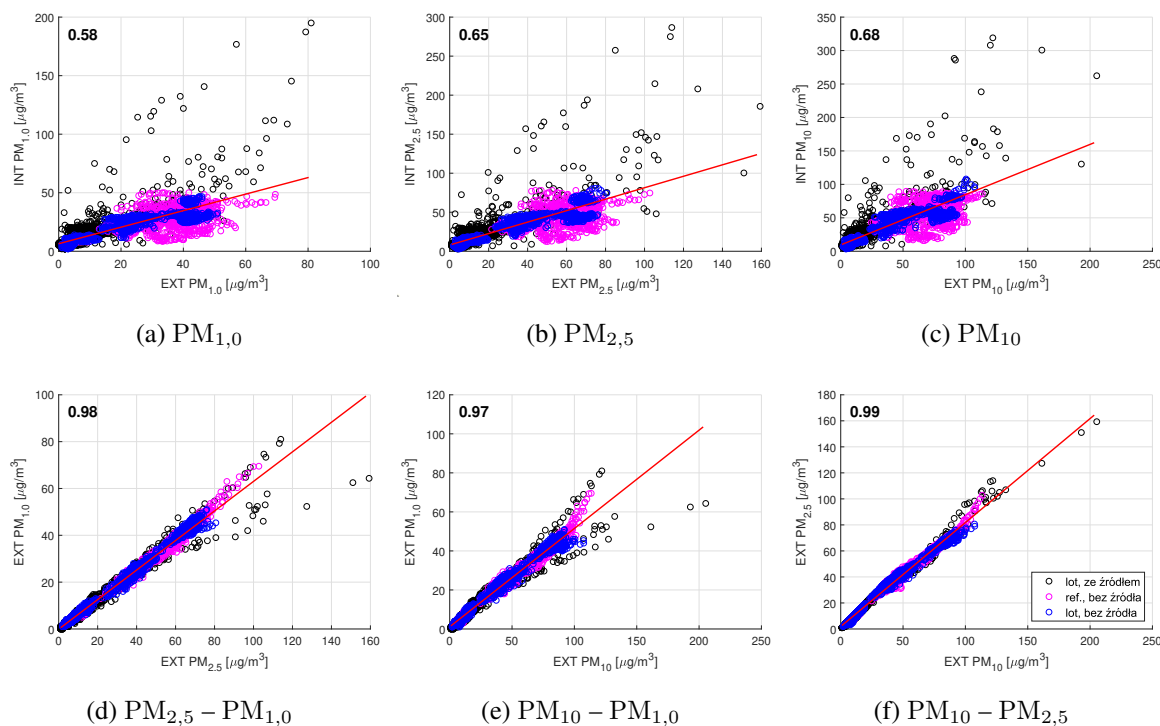
Tabela 6.1. Porównanie zmierzonych stężeń dla analizowanych przypadków

Nr przykładowy	Wirniki	Źródło zanieczyszczeń	Czujnik	Zmierzone stężenia PM ₁₀ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
				Maks.	Min.	Średnie
1	WYŁ	BRAK	INT	52	18	41,35
			EXT	63	33	46,33
2	WŁ	BRAK	INT	48	19	35,35
			EXT	44	23	35,25
3	WŁ	OBECNE	INT	324	17	35,54
			EXT	123	10	21,68
4	WŁ	OBECNE	INT	179	6	20,66
			EXT	109	4	18,75

Dodatkowo w tabeli 6.1 zestawiono wartości maksymalne, minimalne i średnie dla przytoczonych przykładów. Podsumowując przytoczone przykłady z prób z wysięgnikiem, zaobserwowano że mierzone wartości dla czujnika na wysięgniku były zdecydowanie niższe dla lotów ze źródłem zanieczyszczenia. W przypadkach bez źródła wskazania są podobne, co najłatwiej zaobserwować po wyznaczonych wartościach średnich, które są dla tych warunków bardzo zbliżone. Tendencja do wyższych wskazań dla czujnika pod robotem nie wynika z samych własności pomiarowych czujnika, gdyż dla przypadku pierwszego tendencja jest odwrotna. Na tej podstawie wnioskowano że zachodzi ona tylko dla warunków kiedy obecne było źródło zanieczyszczenia. W przykładzie drugim wartości średnie są praktycznie jednakowe. Jest to najprawdopodobniej spowodowane dodatkowym mieszanym powietrzem dla warunków pracujących wirników z wyłącznie tłem pomiarowym.

6.1.2. Analiza korelacji wyników pomiarów stężeń cząstek stałych

Wcześniejsze analizy pozwoliły wskazać właściwy sposób przetwarzania danych pomiarowych. Mając tę wiedzę, wykonano szereg pomiarów w warunkach terenowych, dla różnych warunków atmosferycznych i różnego średniego stężenia cząstek stałych tła. Dane podobnie zakwalifikowano w trzy zasadnicze grupy. Dwie najbardziej istotne grupy, to te zgromadzone podczas lotów, przy obecnym (zbiór czarny) bądź braku (zbiór niebieski) źródła zanieczyszczenia. Ponadto, zgromadzono dane w warunkach bez źródła zanieczyszczenia przy wyłączonych wirnikach (zbiór różowy), kiedy robot został zamontowany na pionowym wysięgniku o podobnej wysokości do tej w czasie zawisu. Na rysunku 6.9 zaprezentowano wybrane wykresy rozrzutu z wyznaczonymi współczynnikami determinacji R^2 . Komplet zebranych danych, w postaci wykresów rozrzutu, histogramów i współczynników determinacji, zbiorczo dla wszystkich grup i dla każdej z osobna, zamieszczono w załączniku 7.2.



Rys. 6.9. 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)

Najważniejszym aspektem tych analiz było sprawdzenie występowania silnych korelacji liniowych, niezależnych od warunków zewnętrznych czy trajektorii poruszania się robota. Przedstawione na rysunku 6.9 współczynniki determinacji pozwalają potwierdzić występowanie takiej zależności. Wysoka korelacja wewnętrzna czujników wynika z zawierania pomiarów cząstek o mniejszej średnicy w pomiarach cząstek o średnicach większych

(rysunki 6.9d–f). Punkty dla grupy lotów z obecnym źródłem zanieczyszczenia rozdzielają się na dwie osobne grupy. Widoczne jest to najbardziej dla wykresu rozrzutu cząstek $PM_{1,0}$ i PM_{10} (rysunek 6.9e). Takie same zależności występują dla drugiego z czujników, a wynikają one z różnego składu (rodzaju) zanieczyszczenia, a konkretnie etapu procesu spalania. Pozwala to w przyszłości, na rozpoznawanie rodzaju spalanych elementów. Co więcej, dla tej grupy widać wyraźnie więcej wartości na wąskim poziomie stężeń, w porównaniu do wartości ekstremalnych. Są to stężenia tła, wartości ekstremalne występowały podczas kontaktu robota ze strugą zanieczyszczenia. Podsumowanie danych, z rozróżnieniem na poszczególne grupy, w postaci numerycznej zestawiono w tabeli 6.2. W tabeli zestawiono całkowity czas pomiarów, współczynniki liniowej zależności $PM_{10,int} = a_1 \cdot PM_{10,ext} + a_0$ oraz współczynniki korelacji r -Pearsona i determinacji R^2 .

Tabela 6.2. Podsumowanie danych zebranych w warunkach terenowych

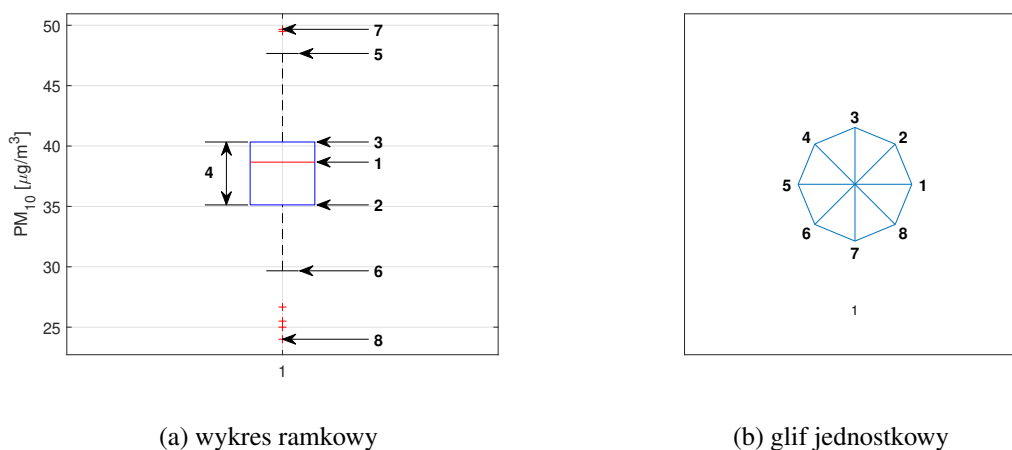
Wirniki	Źródło zanieczyszczeń	Całkowity czas	Wsp. zależności liniowej		Wsp. kor. r -Pearsona	Wsp. det. R^2
			a_1	a_0		
WYŁ	BRAK	57 min 30 s	0,5970	14,3742	0,74	0,55
WŁ	BRAK	72 min 54 s	0,7362	8,5585	0,93	0,87
	OBECNE	90 min 45 s	1,1984	4,9370	0,84	0,70
RAZEM		221 min 09 s	0,7513	9,5049	0,82	0,68

Należy zauważyć że współczynnik determinacji jest największy dla warunków pracujących wirników, podczas lotu. W szczególności dla lotów bez źródła zanieczyszczenia osiąga on największą wartość 0,87. Wynika stąd, iż różnica pomiędzy czujnikami, a konkretnie liniowa zależność zwiększa się po włączeniu śmigieł. Omawiana zależność staje się tym silniejsza w warunkach pracujących wirników oraz kiedy obecne jest źródło zanieczyszczenia. Wynika to z faktu, że zarówno prędkość przepływu powietrza wraz z zawartymi w nim zanieczyszczeniami spowodowana ruchem wirników jest dominująca w stosunku do prędkości powietrza opływającego drona.

Zarówno występowanie i dowiedziona słuszność takiej liniowej zależności świadczy o tym, że na podstawie pomiaru z jednego z czujników możliwe jest oszacowanie wartości na drugim z nich. W przypadku stężenia PM_{10} obejmującego całość mierzonych cząstek, dla lotów z obecnym źródłem zanieczyszczenia, stężenia na czujniku pod robotem są zawyżane w stosunku do tego na wysięgniku. Jako że mierzone stężenia, kiedy robot znajduje się daleko od źródła, są niewiele większe od stężenia tła należy wnioskować że do poszukiwań źródła zanieczyszczenia bardziej właściwy jest czujnik pod robotem.

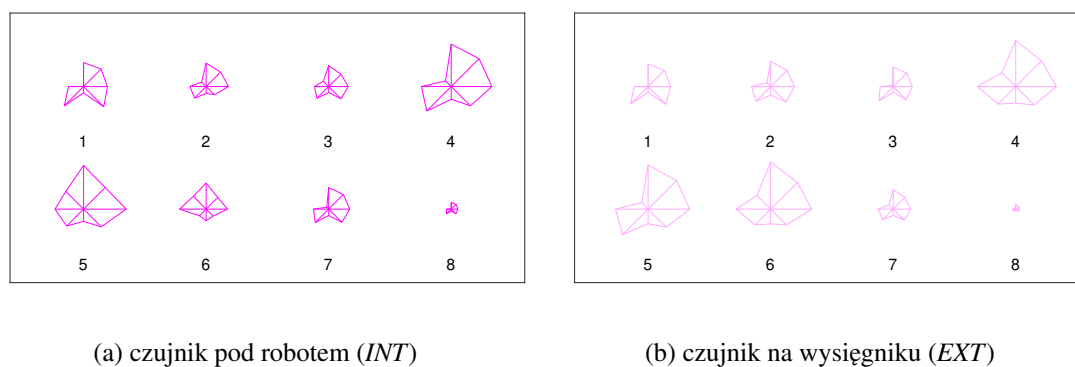
6.1.3. Redukcja wielowymiarowych danych i klasyfikacja pomiarów

Dalszą analizę przeprowadzono z wykorzystaniem wielokątów, tzw. glifów. W tym celu dla każdego z pomiarów z osobna wyznaczono wykres ramkowy, tak jak na przykładzie na rysunku 5.8. Wzięto pod uwagę następujących 8 cech statystycznych: (1) medianę, kwantyle 25% i 75% (2 i 3), przedział między-kwantylowy (4), wartości minimalne i maksymalne pomiarów z odrzuconymi wartościami odstającymi (5 i 6) oraz te same wartości skrajne bez odrzucania (7 i 8). Wartości te oznaczono na rysunku 6.10a. Następnie wykonano normalizację wszystkich danych do zakresu $< 0, 1 >$. Wartość cechy stanowi odległość od środka glifu do konkretnego wierzchołka, a znakowanie ramion odbywa się przeciwnie do wskazówek zegara (rys. 6.10b).

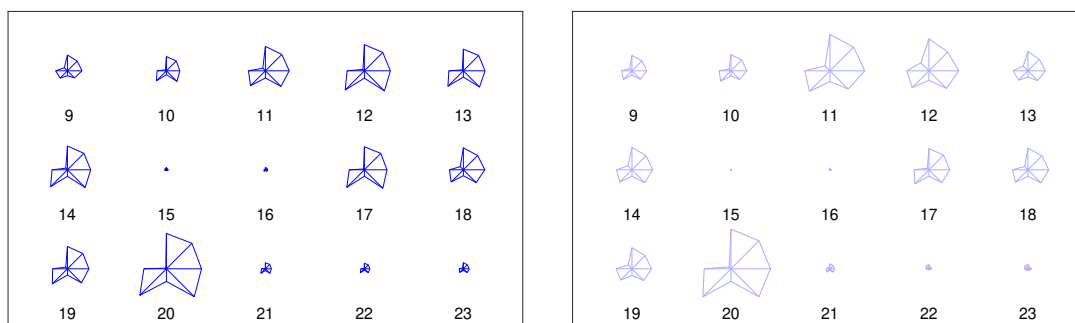
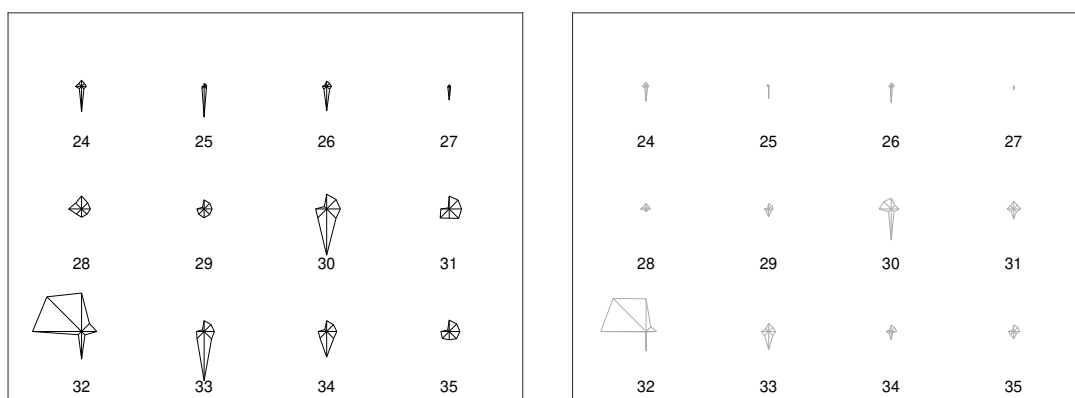


Rys. 6.10. Konstrukcja glifu

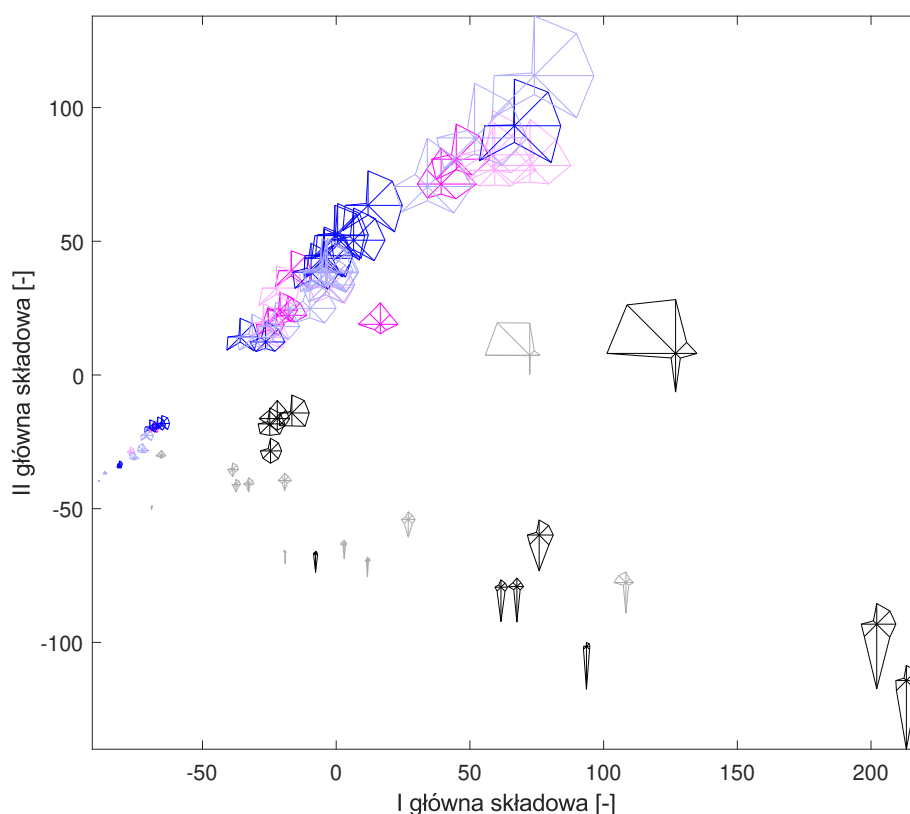
Na rysunkach 6.11 – 6.13 zaprezentowano glify dla wszystkich analizowanych grup. Poszczególne pomiary oznaczone są przy pomocy liczby porządkowej pod glifem.



Rys. 6.11. Glify dla referencyjnych pomiarów bez źródła zanieczyszczenia

(a) czujnik pod robotem (*INT*)(b) czujnik na wysięgniku (*EXT*)**Rys. 6.12.** Glify dla lotów bez źródła zanieczyszczenia(a) czujnik pod robotem (*INT*)(b) czujnik na wysięgniku (*EXT*)**Rys. 6.13.** Glify dla lotów ze źródłem zanieczyszczenia

Już na tym etapie należy zauważyć że postać glifów dla pomiarów bez źródła zanieczyszczenia (1–23) występuje znaczne podobieństwo. W przypadku pomiarów ze źródłem (24–35) cecha nr 7, czyli wartość maksymalna jest szczególnie duża. Kolejnym aspektem analizy było wykonanie analizy głównych składowych PCA (ang. *principal component analysis*) [95]. W przypadku tej analizy wielowymiarowe dane zostają zrzutowane na mniejszą liczbę wymiarów (tutaj płaszczyznę 2D). W wyniku analizy PCA zostaje utracona informacja o wymiarze fizycznym osi, jednakże w wyniku transformacji konstruowana jest nowa przestrzeń, w której najwięcej zmienności wyjaśniają początkowe składowe (osie). Na rysunku 6.14 zaprezentowano wszystkie utworzone glify, gdzie położenie każdego z nich określono przy pomocy analizy PCA.



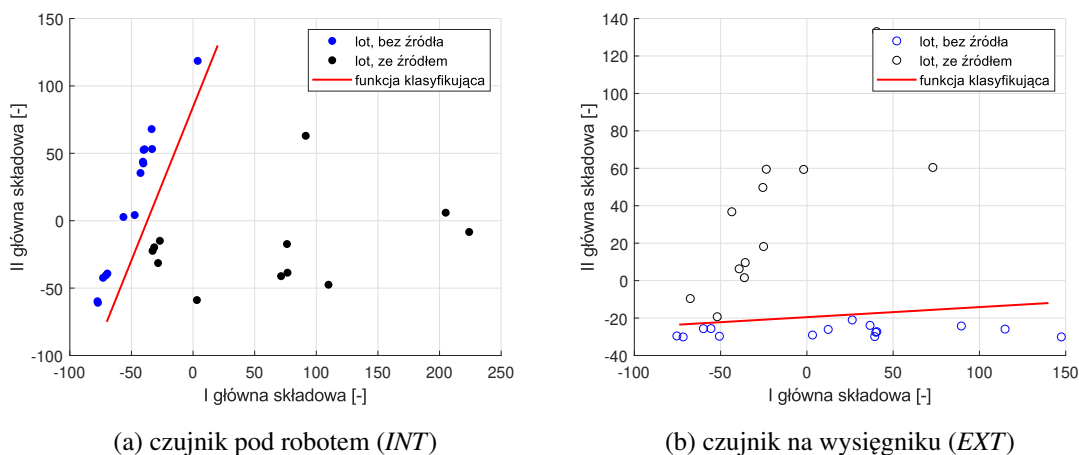
Rys. 6.14. Glify rozmieszczone na przestrzeni 2D przy pomocy analizy głównych składowych

Obserwacje z lotów ze źródłem zanieczyszczenia wyraźnie grupują się w prawym dolnym rogu rysunku 6.14. Pozostałe grupy zaś, zostały ułożone na linii na lewym górnym rogu. Fakt lokowania się tychże we wspólnym obszarze potwierdza podobieństwo tych grup, którym jest brak źródła zanieczyszczenia. Co więcej, na podstawie rysunku należy stwierdzić że obie grupy (bez i ze źródłem) można rozdzielić z wykorzystaniem liniowej funkcji klasyfikującej. Wyznaczono również odległości w tej przestrzeni pomiędzy obserwacjami w warunkach lotu osobno dla każdego z czujników. Na podstawie tychże określono odległości minimalne, maksymalne i średnie, a wyniki zebrano w tabeli 6.3.

Tabela 6.3. Odległości pomiędzy obserwacjami dla analizy PCA z rysunku 6.14

Czujnik	Odległość [-]		
	Maks.	Min.	Średnia
INT	305,21	1,00	112,99
EXT	222,56	0,63	88,27

Na podstawie tabeli 6.3 należy stwierdzić przede wszystkim że wartość średnia i minimalna pomiędzy obserwacjami dla czujnika pod robotem *INT* jest większa niż dla drugiego z nich. Oznacza to, że łatwiej jest zbudować klasyfikację dla tego czujnika, ponieważ odległości obserwacji do linii prostej oddzielającej grupy będzie większa. W celu wyznaczenia tejże liniowej funkcji klasyfikującej, przeprowadzono osobno analizę już wyłącznie dla lotów z i bez źródła, osobno dla każdego z czujników. Wyniki zaprezentowano na rysunku 6.15.



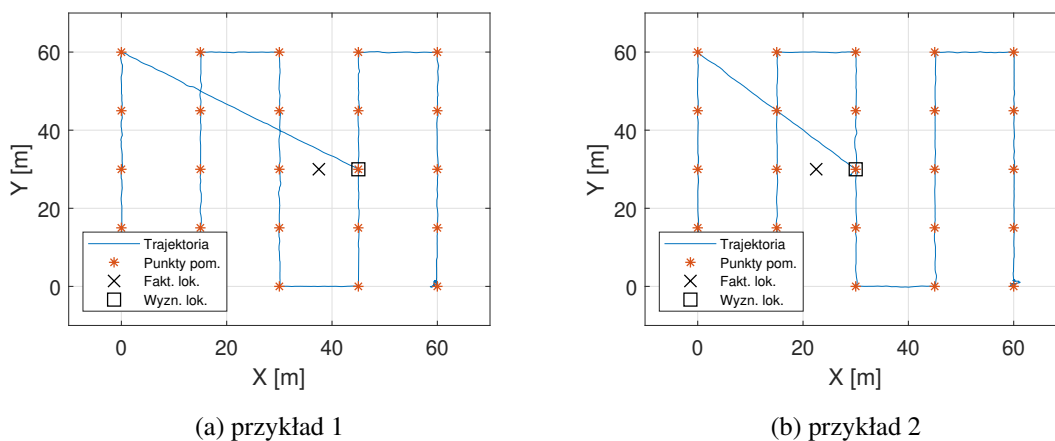
Rys. 6.15. Wyniki osobnych analiz PCA dla obserwacji z obu czujników

Równanie funkcji klasyfikującej z rysunku 6.15a to $PC2 = 2,28 \cdot PC1 + 84,44$, z rysunku 6.15b to $PC2 = 0,05 \cdot PC1 - 19,52$. Oznaczenia $PC1$ i $PC2$ oznaczają odpowiednio I i II główne składowe. Równania prostych określono ręcznie, aby utworzona linia rozdzielała grupy, a odległości obserwacji do funkcji były jak największe. Najbardziej istotną właściwością tak utworzonego kryterium jest to, że pozwala ono wykryć obecność źródła zanieczyszczenia niezależnie od stężenia tła. Odległości obserwacji do funkcji klasyfikującej są większe dla czujnika zlokalizowanego pod robotem, czego należało również oczekiwać po danych z tabeli 6.3. Reasumując, wewnętrzny czujnik zlokalizowany pod robotem należy uznać za właściwy, na podstawie którego wskazań powinien kierować się robot poszukujący źródła zanieczyszczenia.

6.2. Weryfikacja algorytmów poszukiwania

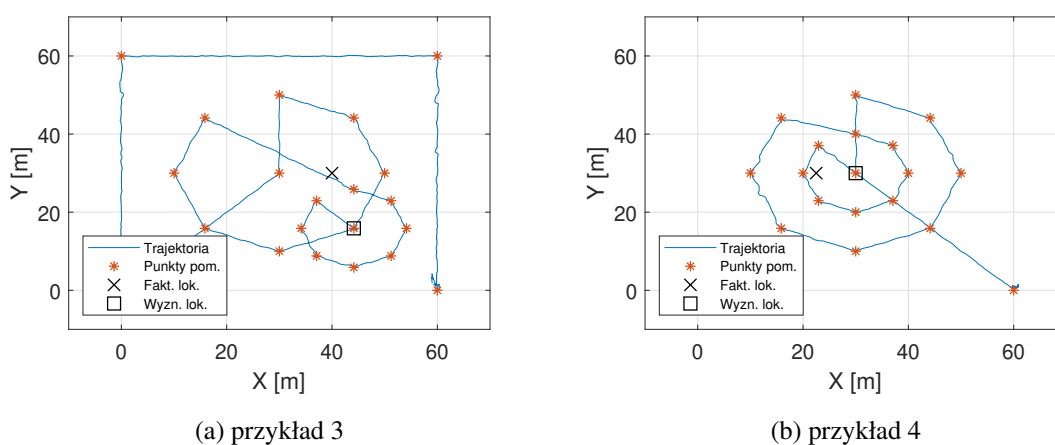
W celu sprawdzenia funkcjonowania analizowanych algorytmów w rzeczywistych warunkach, wykonano testy praktyczne. Na rysunkach 6.16 - 6.20 zaprezentowano kilka wybranych przykładów z przeprowadzonych pomiarów z zaznaczoną prawdziwą lokalizacją źródła zanieczyszczenia. Zaprezentowano tutaj wyniki dotyczące algorytmów przeszukania na regularnej siatce punktów, oraz wyznaczania kierunku lotu na podstawie wartości maksymalnej i planu eksperymentu. Dla każdego z pokazanych przykładów, dodatkowo wyznaczono

i zebrano w tabeli następujące wartości: odległość między faktycznym położeniem źródła, a tym wskazanym przez robota, całkowity czas lotu oraz zmierzone wartości stężeń cząstek stałych PM_{10} .



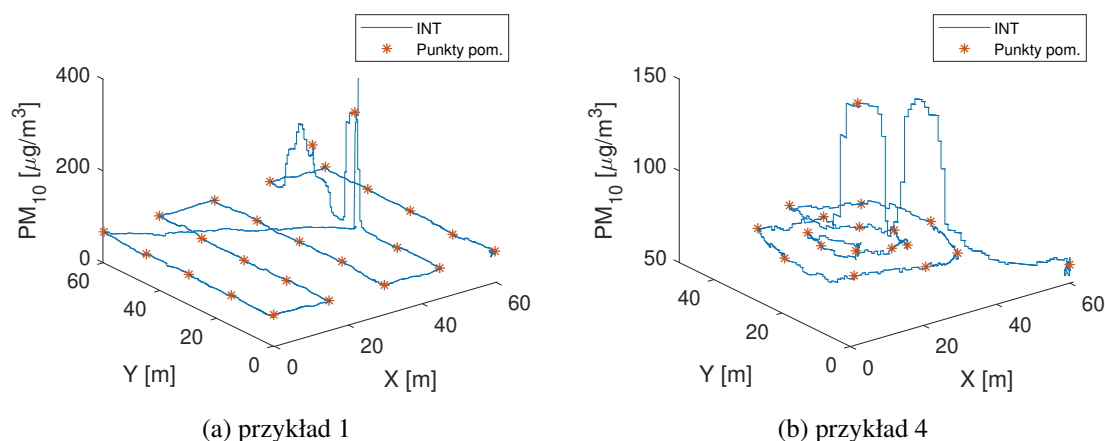
Rys. 6.16. Algorytm przeszukania na regularnej siatce punktów – obszar $60\text{ m} \times 60\text{ m}$ – trajektorie

Dla wybranych przykładów przygotowano dwa rodzaje wykresów. Na rysunkach 6.16, 6.17 i 6.19 (2D) pokazano: trajektorię robota (linia niebieska), punkty pomiarowe (znaczniki pomarańczowe), prawdziwą lokalizację źródła zanieczyszczenia (znacznik czarny krzyż) oraz lokalizację źródła wskazaną przez robota (znacznik czarny kwadrat). Na rysunkach 6.18 i 6.20 (3D) zaś, zaprezentowano pomiar ciągły (linia niebieska) i punktowy (znaczniki pomarańczowe) stężenia zanieczyszczenia. Przez pomiar punktowy rozumie się maksymalne zaobserwowane stężenie cząstek stałych PM_{10} w ciągu 3 s w wyznaczonej lokalizacji.



Rys. 6.17. Algorytm wyznaczania kierunku lotu na podstawie wartości maksymalnej – obszar $60\text{ m} \times 60\text{ m}$ – trajektorie

Podczas prowadzenia prób, obserwowano że na otrzymywane wyniki miały wpływ: prędkość i kierunek wiatru oraz natężenie źródła zanieczyszczenia. Parametry te oczywiście były zmienne nawet w czasie wykonywania algorytmu przez robota. Ich wpływ najłatwiej zaobserwować na zaprezentowanych przebiegach pomiaru ciągłego zanieczyszczenia (Rys. 6.18 i 6.20). Losowy wpływ tych wszystkich czynników miał również na celu zweryfikowanie działania algorytmu w praktycznych zastosowaniach. Efektywność lokalizacji źródła zanieczyszczenia była różna, ale obserwowano, że robot zmierza w kierunku prawdziwej lokalizacji źródła zanieczyszczenia.

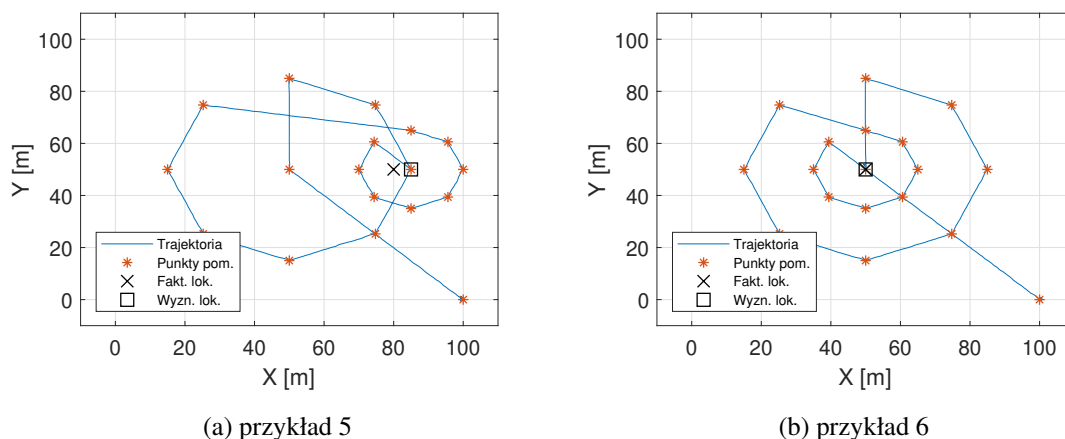


Rys. 6.18. Algorytmy wyznaczania kierunku lotu na podstawie wartości maksymalnej i przeszukania na regularnej siatce punktów – obszar $60\text{ m} \times 60\text{ m}$ – zmierzone stężenia

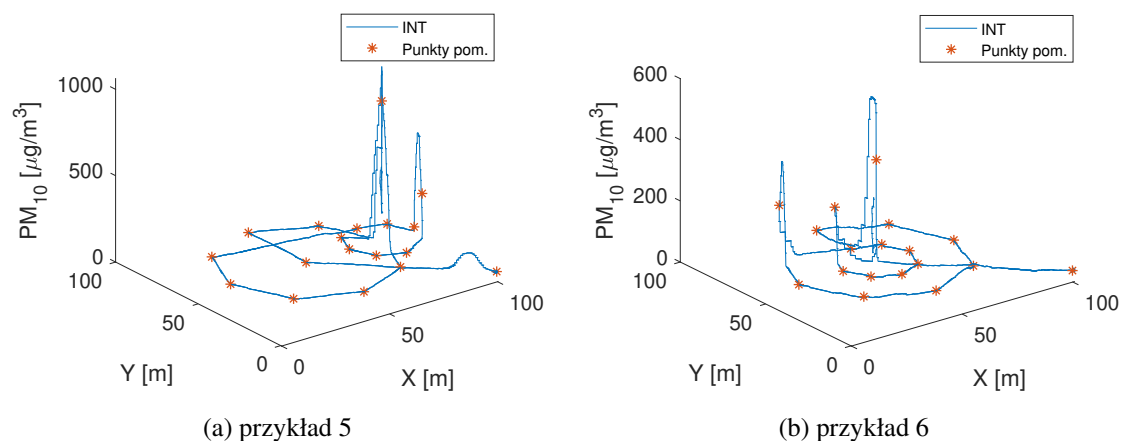
Algorytmy przetestowano najpierw na obszarze $60\text{ m} \times 60\text{ m}$. Rysunek 6.16 pokazuje trajektorie dla algorytmu przeszukiwania na regularnej siatce punktów. Parametry algorytmu były w tych przypadkach następujące: $A = 60\text{ m}$ oraz $N = 5$. W obu przypadkach różnica pomiędzy wskazanym a faktycznym położeniem źródła wyniosła $7,5\text{ m}$. Czas lotu robota w obu przypadkach wynosił odpowiednio $10\text{ min } 39\text{ s}$ i $10\text{ min } 22\text{ s}$.

Na rysunku 6.17 zaprezentowano ścieżki dla obu wariantów algorytmu wyznaczania kierunku lotu na podstawie wartości maksymalnej. W pierwszym wariacie (a) robot wykonuje wstępny oblot wokół granic, w drugim (b) kieruje się od razu na środek terenu na którym prowadzone są poszukiwania źródła. W obu przypadkach parametry algorytmu były następujące: $A = 60\text{ m}$, $N = 8$, $R_1 = 20\text{ m}$ i $R_2 = 10\text{ m}$. Parametry w każdym przypadku dobrano tak aby pokryć możliwie całkowicie teren bez wychodzenia poza wyznaczone granice. Położenie źródła wyznaczono z dokładnością odpowiednio $14,73\text{ m}$ i $7,5\text{ m}$, natomiast czas lotu wynosił odpowiednio $11\text{ min } 14\text{ s}$ i $6\text{ min } 31\text{ s}$. Krótszy czas w drugim wariacie wynikał bezpośrednio z ominięcia wstępnego oblotu wokół granic terenu. Podczas interpretacji wyników należy mieć również na uwadze że prawdziwa lokalizacja źródła zanieczyszczenia została określona ręcznie, przy pomocy taśmy pomiarowej. Dlatego też dokładne wyznaczenie

tego położenia z dokładnością do centymetrów było kłopotliwe na dużym terenie. Pomiary ciągłe zanieczyszczenia dla tych dwóch algorytmów przedstawiono na rysunku 6.18. Na podstawie tychże możliwa jest obserwacja rozprzestrzeniania się strugi zanieczyszczenia pod wpływem wiatru.



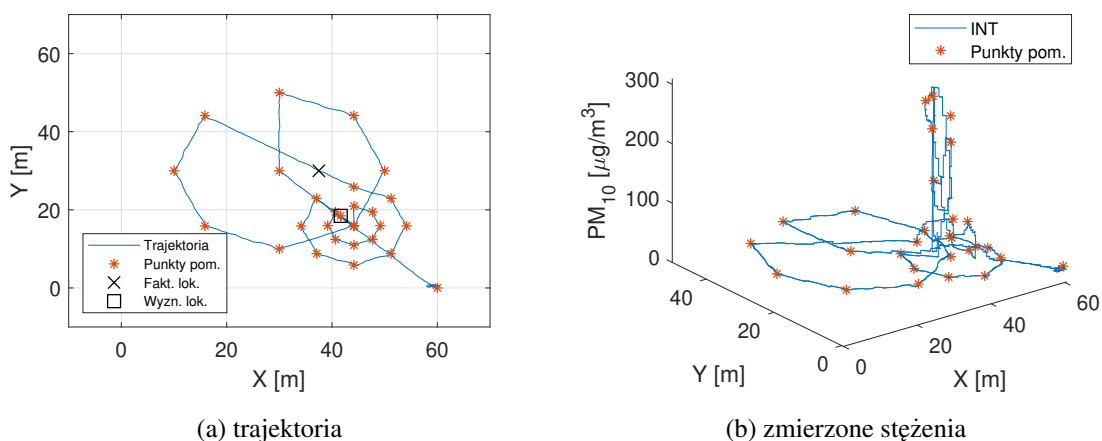
Rys. 6.19. Algorytm wyznaczania kierunku lotu na podstawie wartości maksymalnej – obszar $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ – trajektorie



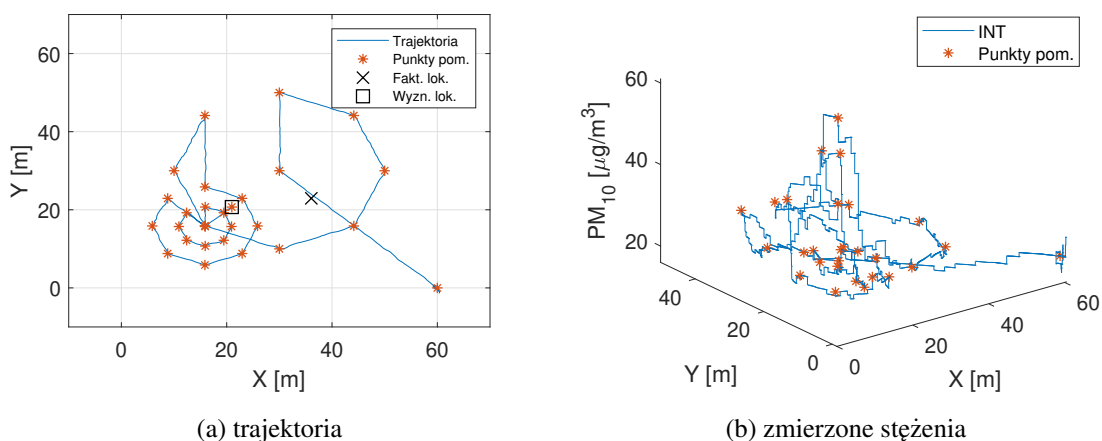
Rys. 6.20. Algorytm wyznaczania kierunku lotu na podstawie wartości maksymalnej – obszar $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ – zmierzone stężenia

Na rysunku 6.19 pokazano przykładowe ścieżki dla algorytmu wyznaczania kierunku lotu na podstawie wartości maksymalnej przeprowadzone na większym terenie ($100\text{ m} \times 100\text{ m}$). Parametry w tym przypadku były następujące: $A = 100\text{ m}$, $N = 8$, $R_1 = 35\text{ m}$ i $R_2 = 15\text{ m}$. Dla przykładu piątego (Rys. 6.19a, Rys. 6.20a), położenie źródła wyznaczone z dokładnością do 5 m , w czasie $11\text{ min } 7\text{ s}$. W przykładzie szóstym (Rys. 6.19b), źródło zanieczyszczenia zostało umieszczone na środku terenu. W tym przypadku różnica pomiędzy faktycznym,

a wskazanym położeniem źródła zanieczyszczenia wynosiła 0 m. Rozprzestrzenianie się strugi zanieczyszczenia zaobserwowano na przebiegach pomiaru ciągłego (Rys. 6.20b). Na podstawie tego, jak i poprzednich przykładów zaobserwowano spadek mierzonych wartości stężeń cząstek stałych PM_{10} wraz z rosnącą odległością robota do źródła zanieczyszczenia. Jest to oczywiście zgodne z fizycznym zjawiskiem rozprzestrzeniania się strugi zanieczyszczenia w powietrzu. Czas lotu dla przykładu szóstego wynosił 10 min 19 s.



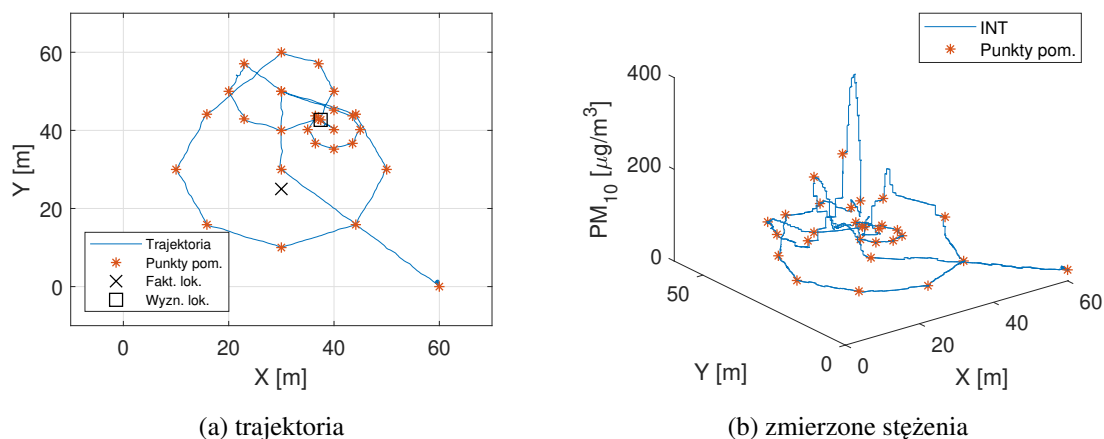
Rys. 6.21. Algorytm wyznaczania kierunku lotu na podstawie planu eksperymentu – obszar $60\text{ m} \times 60\text{ m}$ – przykład 7



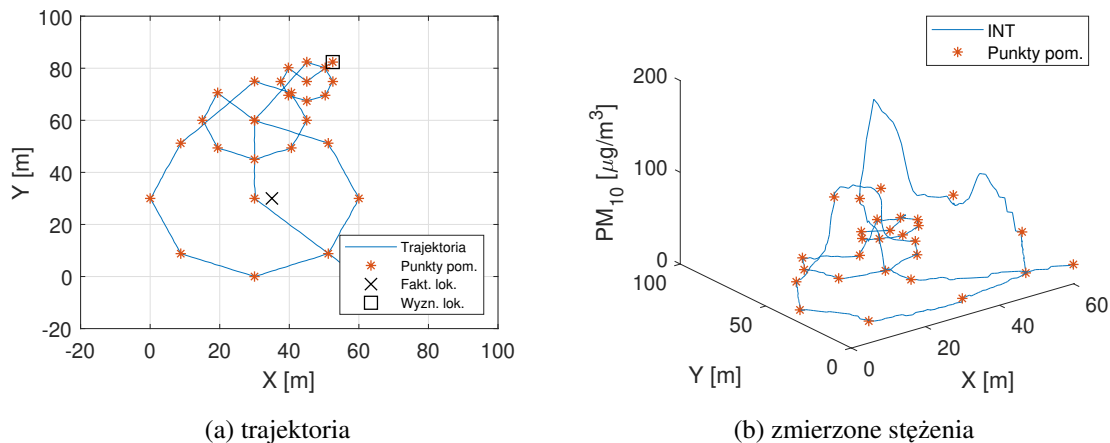
Rys. 6.22. Algorytm wyznaczania kierunku lotu na podstawie planu eksperymentu – obszar $60\text{ m} \times 60\text{ m}$ – przykład 8

Następnie wykonano kilka prób dla algorytmu wyznaczania kierunku lotu na podstawie planu eksperymentu. Próby przeprowadzono na terenie o wymiarach $60\text{ m} \times 60\text{ m}$, oraz zdecydowano się wykonać trzy kroki dla algorytmu. Dla przykładów 7 – 9 (rys. 6.21 - 6.23) parametry były następujące: $A = 60\text{ m}$, $N = 8$, $R_1 = 20\text{ m}$, $R_2 = 10\text{ m}$ i $R_3 = 5\text{ m}$.

W przypadku przykładu 10 (Rys. 6.24) było to: $A = 60$ m, $N = 8$, $R_1 = 30$ m, $R_2 = 15$ m i $R_3 = 7,5$ m. Dla tej próby zwiększono również prędkość przemieszczania się robota na 1 m s^{-1} z pierwotnej wartości $0,75 \text{ m s}^{-1}$. W tym przypadku robot opuścił teren na którym poszukiwane było źródło.



Rys. 6.23. Algorytm wyznaczania kierunku lotu na podstawie planu eksperymentu – obszar $60 \text{ m} \times 60 \text{ m}$ – przykład 9



Rys. 6.24. Algorytm wyznaczania kierunku lotu na podstawie planu eksperymentu – obszar $60 \text{ m} \times 60 \text{ m}$ – przykład 10

W tych przypadkach liczba punktów (wliczając położenie końcowe) była większa nawet od algorytmu przeszukiwania na regularnej siatce punktów, gdyż wynosi 29. Jednakże czas lotu był mniejszy niż w przypadku tegoż, ponieważ trasa którą do przebycia miał robot była krótsza. Dla przykładu 10 ten czas również był krótszy niż dla przykładów 1 i 2, jednakże w tym przypadku wynikało to z zwiększonej nieznacznie prędkości poruszania się robota. We wszystkich przypadkach zwiększone wartości stężeń, w porównaniu do poziomu tła,

obserwowane były tylko w punktach pomiarowych najbliższej źródła (Rys. 6.18 i 6.20). Jeśli to natężenie źródła nie będzie wystarczające, tak że nie zostaną zarejestrowane podwyższone wartości stężeń w wyznaczonych punktach pomiarowych, to nie zostanie ono wykryte. Taka sama sytuacja może mieć miejsce dla warunków silnego wiatru, kiedy chmura zanieczyszczenia będzie formować się w bardzo wąską strugę. W takich przypadkach należy wykorzystać dane z pomiaru ciągłego, a nie wyłącznie dane w punktach pomiarowych.

Tabela 6.4. Podsumowanie zaprezentowanych przykładów – wszystkie algorytmy

Nr prz.	Ozn. alg.	Obszar	Liczba pkt	Czas lotu	Błąd bez. lok. [m]	PM ₁₀ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
						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

Tabela 6.5. Podsumowanie zaprezentowanych przykładów - algorytm wyznaczania kierunku lotu na podstawie planu eksperymentu

Nr prz.	Całkowita przebyta droga [m]	Błąd bezwzględny lokalizacji [m]			Poprawność lokalizacji
		Etap 1	Etap 2	Etap 3	
7	307,13	15,62	15,62	12,27	TAK
8	295,04	21,41	21,41	15,26	TAK
9	300,70	25,00	18,03	19,20	TAK
10	445,49	30,41	46,01	55,22	NIE

Wartości liczbowe dla wszystkich przytoczonych przykładów zebrano w tabeli 6.4. Dla każdego z przypadków wyznaczono następujące dane: typ algorytmu (oznaczony liczbą), rozmiar obszaru, liczbę punktów pomiarowych, czas wykonania algorytmu (czas lotu), błąd bezwzględny lokalizacji (odległość pomiędzy faktycznym, a wskazanym położeniem źródła)

oraz wartości maksymalne, minimalne i średnie zmierzonych wartości stężeń PM_{10} dla wszystkich punktów pomiarowych. Na podstawie tychże wnioskowano, że gdy stosunek maksymalnego zmierzonego stężenia do stężenia tła (za które uznaje się tutaj wartość średnią) jest mały, to uzyskiwana dokładność jest najgorsza (przypadek 3). Na przykładzie obszaru $60\text{ m} \times 60\text{ m}$, najkrótszy czas poszukiwania został osiągnięty dla algorytmu 2 (przypadek 4). W porównaniu do algorytmu przeszukiwania na regularnej siatce punktów (przypadek 2) był on krótszy o około 37,1%. W przypadku algorytmu wyznaczania kierunku lotu na podstawie planu eksperymentu osiągnięto podobne rezultaty jak w przypadku wyznaczania kierunku lotu na podstawie wartości maksymalnej. Pomiarów te wykonywane były w okresie wiosennym kiedy prędkość wiatru dochodziła do 11 km/h. Ponadto, w przypadku tego algorytmu poszczególne etapy były niezależne od siebie. W przypadku algorytmu wyznaczania kierunku lotu na podstawie wartości maksymalnej, gdzie wybierana była wartość maksymalna z wykonanych pomiarów, była ona wybierana z wszystkich etapów. W tym przypadku, podczas ruchu robota, kiedy zmieniały się warunki zewnętrzne (prędkość i kierunek wiatru), działanie nie było przerywane, gdyż algorytm był ustawiony na stałą liczbę kroków do wykonania. Dlatego też należy wyciągnąć wniosek że potrzebne jest dodanie dodatkowych warunków, gdy stężenia na kolejnych etapach wykonywania są niższe niż na etapach poprzedzających. W takiej sytuacji należało by przyjąć iż robot stracił kontakt ze strugą zanieczyszczenia.

Przyjmując kryterium maksymalnego dopuszczalnego błędu bezwzględnego lokalizacji źródła zanieczyszczenia równy 20 m należy stwierdzić że zbudowany system działa poprawnie (przypadki 1–9). Dla tych przypadków stwierdzono poprawność lokalizacji źródła zanieczyszczenia, gdyż podczas kolejnych etapów odległość do źródła zanieczyszczenia zmniejszała się (Tab. 6.5). W dodatkowej tabeli zestawiono odległości do źródła, po każdym z etapów. W przykładzie 9 robot na ostatnim etapie oddalił się on nieznacznie, i wartość odległości wzrosła nieco ponad 1 m. W przypadku 10 podwyższone wartości stężeń obserwowane były tylko na pierwszym etapie, gdyż w tym przypadku źródło zanieczyszczenia zostało wyłączone (wygasło) w czasie pracy robota. Dlatego robot utracił kontakt ze strugą i zaczął się oddalać. Stąd skuteczność opracowanego systemu można oszacować na 90%.

6.3. Podsumowanie

W rozdziale szóstym wykonano weryfikację systemu pomiarowego i algorytmów poszukiwania. Pracę rozpoczęto od wykonania prób wstępnych, które zakwalifikowano w zasadnicze grupy: nieruchome wirniki bez źródła zanieczyszczenia, loty bez źródła zanieczyszczenia oraz loty z źródłem zanieczyszczenia. Badania te przeprowadzono dla różnych wartości stężeń tła oraz różnych warunków atmosferycznych, a sam robot poruszał się po różnych trajektoriach. Najważniejszym aspektem tej części było sprawdzenie występowania silnych korelacji pomiędzy wskazaniem z obu czujników, niezależnych od warunków zewnętrznych czy trajektorii poruszania się robota. Przedstawione dane pozwoliły dowieść występowania takiej znaczącej zależności. Wyniki dowiodły również poprawności wniosków wyciągniętych na podstawie wyników analizy modelu. Jeśli chodzi o poszukiwanie źródeł zanieczyszczenia, a nie zmierzenie dokładne jakie jest stężenie pyłów, to teoria zaczerpnięta z literatury, aby umieścić wlot układu pomiarowego nad robotem została jednoznacznie uznana jako nieprawidłowa. Ponadto, lokalizacja wlotu nad robotem uniemożliwia bezpośrednio wykonywanie pomiarów nad źródłem. Określone autorskie kryterium wskazało dwie możliwe lokalizacje położenia wlotu układu pomiarowego, z którego zostało wybrane ostatecznie to, które zostało wytypowane na podstawie badań eksperymentalnych. Wykonane badania terenowe potwierdziły przyjęte kryterium.

Wykonana analiza głównych składowych PCA, pozwoliła na utworzenie funkcji klasyfikującej, która rozdziela grupy lotów z i bez źródła zanieczyszczenia. Najbardziej istotną właściwością tak utworzonego kryterium jest to, że pozwala ono wykryć obecność źródła zanieczyszczenia niezależne od stężenia tła. Co więcej, odległości obserwacji do funkcji klasyfikującej były większe dla czujnika zlokalizowanego pod robotem. Dlatego też, wewnętrzny czujnik zlokalizowany pod robotem należy uznać za właściwy, na podstawie którego wskazań powinien kierować się robot poszukujący źródła zanieczyszczenia. W przypadkach kiedy obecne było źródło, czujnik ten również zawyżał wskazania w porównaniu do czujnika zamontowanego na wysięgniku. Dowiedziona słuszność zależności pomiędzy wskazaniem czujników świadczy o tym, że na podstawie pomiaru z jednego czujnika możliwe jest oszacowanie wartości na drugim z nich. Ostatecznie, jako że korelacja wskazań czujników w przypadku występowania źródła zanieczyszczenia rozdzielała się na dwie osobne grupy, to na tej podstawie w przyszłości możliwe jest rozpoznawanie rodzaju spalanych elementów. Jest to kierunek dalszych badań.

Ze względu na stosunkowo szybki czas reakcji czujnika cząstek stałych, robot nie musi utrzymywać się w żądanej lokalizacji stosunkowo długo (3 s). Kiedy robot zbliża się do źródła, to dochodzi do powstania bardzo gwałtownego zaburzenia naturalnego ruchu powietrza, które powoduje to szybkie dotarcie zanieczyszczeń do czujnika. Dotyczy to oczywiście sytuacji

kiedy robot porusza się stosunkowo wolno, z prędkościami ($0,75 \text{ m s}^{-1}$ i $1,0 \text{ m s}^{-1}$). Czas reakcji czujnika to przeciętnie 0,8 s, tym samym pozwala to na pomiar odpowiednio co 0,6 m i 0,8 m. System pomiarowy można rozbudować w przyszłości, montując oba czujniki pod robotem, i stosując samą rurkę jako punkt poboru powietrza. Wtedy jednak występowało by pewne opóźnienie transportowe, które należało by uwzględnić. Innym możliwym rozwiązaniem mogło by być zamontowanie czterech jednakowych czujników na wysięgniku w postaci krzyża. Dostępne w ten sposób dane można by od razu wykorzystać w przypadku algorytmu gradientowego. Przedstawioną analizę PCA, którą zastosowano obecnie dla dwóch czujników można zastosować dla większej ich liczby. System pomiarowy ma taką możliwość, a stosując parametry względne, takie jak różnice wskazań można ulepszyć klasyfikację. Należy również sprawdzić możliwość podziału danych, z wykorzystaniem np. średniej kroczącej w celu zastosowania klasyfikacji podczas lotu na bieżąco.

Następnie na terenie ustawiono źródło zanieczyszczenia, które robot miał lokalizować. Zaprezentowane wyniki potwierdziły prawidłowe funkcjonowanie systemu. Na podstawie zaprezentowanych przykładów skuteczność opracowanego systemu można oszacować na 90%. Algorytm lokalizacji źródła zanieczyszczeń, oparty na pomiarze stężenia pyłu zawieszonego, może być wykorzystany w praktycznych zastosowaniach. Wniosek ten należy uzasadnić tym, że stężenia bliższe źródła były znacznie wyższe niż poziom otoczenia (tła). Największym problemem napotkanym podczas poszukiwania źródła zanieczyszczenia była niestałość rozkładu pola zanieczyszczenia. Pole to zmieniało się nawet w czasie poruszania się robota, a najbardziej istotnymi czynnikami zakłócającymi była prędkość i kierunek wiatru, a także zmienne natężenie samego źródła zanieczyszczenia. Parametry związane z wiatrem są teoretycznie możliwe do oceny poprzez robota, na podstawie tego jak robot opiera się tymże utrzymując zadaną pozycję w trybie zawisu. Dane o zdecydowanie większej dokładności można by otrzymać z dedykowanej mobilnej stacji pogodowej, która rozgłaszała by komunikaty radiowe o warunkach atmosferycznych. Jednakże warunki pogodowe podawane ze stacji (naziemnej) mogły by być zgoła inne niż te, które są w powietrzu.

Przetestowane algorytmy mają niskie wymagania co do mocy obliczeniowej i dlatego mogą stanowić część wbudowanego oprogramowania systemu sterująco-pomiarowego robota. W przypadku wyznaczania kierunku lotu na podstawie planu eksperymentu celem było również sprawdzenie, czy ta metoda skieruje robota do miejsc, gdzie zwiększone wartości stężeń mierzone były w sąsiednich punktach, i tym samym są to obszary gdzie najprawdopodobniej znajduje się źródło zanieczyszczenia. Uzyskiwana dokładność zależała od wzajemnej relacji punktów pomiarowych i położenia źródła zanieczyszczenia. Kolejnym etapem prac jest implementacja bardziej złożonych algorytmów, takich jak infotaksji czy gradientowego, które będą stanowić etap dokładniejszej lokalizacji źródła, po etapie przeszukania wstępnego terenu przy pomocy prostego algorytmu. Dla prostych algorytmów, bez stosowania

klasyfikacji, konieczne jest wprowadzenie dodatkowych warunków progowych. Wtedy, po pierwszym oblocie można stwierdzić bądź wykluczyć obecność źródła zanieczyszczeń. Jednym z możliwych rozwiązań jest wprowadzenie kryterium określanego dynamicznie, przykładowo na podstawie przekroczenia średniej (np. 30%) po pierwszym oblocie. W docelowym rozwiązaniu należy zastosować wprowadzone kryterium na podstawie wprowadzonej funkcji klasyfikującej. Dodatkowo, w przypadku algorytmów o wielu etapach, jeżeli maksymalne stężenie zmierzone na obecnym etapie nie przekracza znacząco średniego stężenia na tym etapie, należy założyć, że robot utracił kontakt ze strugą zanieczyszczenia. W takich okolicznościach ostateczna pozycja powinna być taka, jaka została ustalona w poprzednim kroku. Kiedy jest to pierwszy krok, podczas fazy przeszukania wstępnego, należałoby uznać, że na obszarze testowym nie ma źródła zanieczyszczenia. Należy również przeprowadzić większą liczbę testów w warunkach eksploatacyjnych, aby możliwa była bardziej rozbudowana ocena skuteczności opracowanego systemu.

7. Podsumowanie

Podsumowując, zaprojektowano, zbudowano i przetestowano w warunkach eksploatacyjnych wielowirnikowy inspekcyjny robot latający, dedykowany do poszukiwania źródeł zanieczyszczenia powietrza cząstkami stałymi. Efektem prac jest autonomiczny robot pomiarowy, złożony z uniwersalnego dronu latającego i autorskiego systemu nawigacyjno-pomiarowego, wyznaczającego trajektorię lotu w czasie rzeczywistym podczas pracy urządzenia. Opracowanie efektywnie działającego systemu możliwe było m.in. dzięki przeprowadzonym badaniom numerycznym pola przepływu. Model pola przepływu został wyznaczony przy użyciu metody objętości skończonych zaimplementowanej w oprogramowaniu *ANSYS Fluent*. Skonstruowane urządzenie pozwala automatycznie prowadzić poszukiwania najsilniejszego źródła zanieczyszczenia powietrza cząstkami stałymi. Cząstki stałe nie tylko wykazują szczególnie negatywny wpływ na życie i zdrowie człowieka, ale także zmniejszają korzyści z aktywności fizycznej na świeżym powietrzu. Na podstawie przeprowadzonych badań potwierdzono poprawne działanie zaprojektowanego systemu, co pozwala stwierdzić, że cel pracy został osiągnięty.

Pracę rozpoczęto od wykonania przeglądu literatury dotyczącej robotów wielowirnikowych. Przegląd dotyczył nie tylko zastosowania robotów latających do szeroko rozumianych celów ochrony środowiska, ale również metod modelowania i poszukiwania źródeł zanieczyszczeń powietrza. Wynikiem tej części pracy było wskazanie luk badawczych, z których wybrana część została rozwiązana w rozprawie. Na podstawie aktualnego stanu wiedzy stwierdzono, że do celów lokalizowania źródeł zanieczyszczenia może służyć dedykowany robot latający. Budowa takiego robota wymagała jednak rozwiązania całego szeregu problemów cząstkowych, z których wiele miało w całości bądź w części charakter oryginalny. Co najistotniejsze, należało przeprowadzić proces syntezy algorytmu sterowania, który umożliwi dotarcie robota do ekstremum zagrożenia środowiskowego. Algorytm sterowania robota w kontekście niniejszej pracy rozumie się szerzej. Jest to złożony algorytm, który składa się z kilku istotnych elementów, takich jak: planowanie trasy przelotu z wykorzystaniem algorytmu poszukiwania, generowanie trajektorii lotu i sterowanie ruchem robota, a także algorytmy przetwarzania danych z czujników.

Aby robot mógł poruszać się po dowolnych trajektoriach, system sterowania należy albo przygotować od podstaw, albo wykorzystać bądź zmodyfikować istniejące rozwiązanie. W rozdziale drugim opisano proces doboru algorytmu sterowania ruchem robota latającego, który umożliwi śledzenie trajektorii wyznaczonej przez podsystem wyszukujący źródła zanieczyszczenia. Najpierw zaprezentowano model matematyczny trzech analizowanych konfiguracji robotów latających: o czterech, sześciu (w układzie prostym) i ośmiu (w układzie redundantnym) wirnikach. Analizowane konfiguracje wirników mają największe znaczenie praktyczne, ze względu na najprostszą konstrukcję kadłuba. Następnie opisano podział wyodrębnionych podsystemów składowych robota latającego na źródło zasilania, zespoły napędowe, podsystem sterujący lotem robota i autorski podsystem poszukujący źródeł zanieczyszczenia. Na tej podstawie dobrano właściwe komponenty oraz opracowano algorytm sterowania ruchem robota latającego. W tym rozdziale również zaprezentowano szczegółową strukturę zastosowanego układu sterowania. Przeanalizowano wybrane algorytmy sterowania ruchem robota, m.in. proste algorytmy PID, regulator liniowo-kwadratowy LQR (ang. *Linear-quadratic regulator*) czy sterowanie predykcyjne MPC (ang. *Model Predictive Control*). Każdy z tych algorytmów ma swoje zalety i wady. Ostatecznie jednak, w układzie regulacji w zastosowanym kontrolerze lotu wykorzystano algorytmy PID, ze względu na minimalny wymagany nakład obliczeniowy. Ta cecha algorytmu ma szczególnie istotne znaczenie ponieważ do prawidłowej pracy robota latającego wymagane są duże częstotliwości próbkowania w pętli sterowania. Algorytmy LQR i MPC cechują się znacznie większym wymaganym nakładem obliczeniowym dla nieliniowych obiektów, gdzie zadania optymalizacji muszą być rozwiązywane w każdym kroku próbkowania. Dobór wstępnych wartości parametrów regulatorów PID wykonano na podstawie modelu matematycznego i metody planowania eksperymentu. Opisana procedura doboru parametrów pozwoliła na oszacowanie pierwszych przybliżonych wartości nastaw oraz sprawdzenie ich istotności w układzie regulacji. Na tej podstawie wykonano ostateczny dobór nastaw rzeczywistego układu.

Obracające się wirniki robota wielowirnikowego podczas pracy wprowadzają istotne zakłócenia naturalnego pola przepływu, tym samym zakłócając proces pomiaru zanieczyszczeń. Dlatego też, w rozdziale trzecim, oszacowano zaburzenia naturalnego pola przepływu spowodowane przez wirniki robota latającego. Przeprowadzone badania umożliwiły prawidłowe zaprojektowanie układu pomiarowego cząstek stałych do efektywnego poszukiwania źródła zanieczyszczenia. Przedmiotem analizy były układy wirników bezpośrednio związane z trzema analizowanymi typami robotów latających. Dla każdego rozpatrywanego układu wirników opracowano model i przeprowadzono analizę numeryczną pola przepływu z wykorzystaniem metody objętości skończonych. Badania rozpoczęto od układu z jednym wirnikiem, którego weryfikację wykonano na podstawie danych eksperymentalnych uzyskanych na zbudowanym w tym celu stanowisku hamowni. Uzyskane

rozbieżności pomiędzy modelem komputerowym a eksperymentem uznano za pomijalne. Po weryfikacji otrzymanych danych, możliwe było rozbudowanie analizy o układy z większą liczbą wirników. Wykonane obliczenia pozwoliły na określenie trudnych do wyznaczenia na drodze eksperymentalnej rozkładów pól prędkości, ciśnień czy natężenia turbulencji. Na podstawie otrzymanych rozkładów możliwe było porównanie różnych konfiguracji wirników oraz dobór lokalizacji układu pomiarowego. Wykazano tym samym, że odpowiednie umieszczenie czujnika istotnie wpływa na wyniki pomiaru. Na podstawie przeprowadzonych badań numerycznych sformułowano kryterium, które umożliwiło dobór właściwej lokalizacji wlotu układu pomiarowego. Przeprowadzone analizy umożliwiły określenie i przyjęcie kryterium na podstawie natężenia turbulencji, dzięki czemu wskazano właściwą lokalizację układu pomiarowego robota. Sformułowano również szczegółowy schemat postępowania dla tego typu badań, który pozwala przeprowadzić analizę dla dowolnego układu wirników. Podsumowując, uzyskane wyniki pozwoliły na wybór odpowiedniego układu wirników i dobór lokalizacji wlotu układu pomiarowego, czyli ulepszenie konstrukcyjne systemu pomiarowego robota pozwalające na równoczesne ulepszenie sterowania, co umożliwia dokładniejszą i szybszą lokalizację źródła zanieczyszczeń.

W rozdziale czwartym przedstawiono analizę wybranych algorytmów poszukiwania, których zadaniem jest wyznaczenie odpowiedniej trajektorii robota w celu dotarcia do źródła zanieczyszczenia. Przeanalizowano kilka wybranych algorytmów, poczynając od wyznaczania: regularnej siatki punktów pomiarowych, kierunku lotu na podstawie wartości maksymalnej, planowania eksperymentu, gradientu i finalnie infotaksji. Ten ostatni algorytm, w cytowanych pracach i dostępnych implementacjach, cechował się niepraktycznym kryterium zakończenia poszukiwań wymagającym znajomości położenia źródła, które jest poszukiwane. Dlatego zaproponowano oryginalne kryterium, które wyeliminowało problem i pozwala na praktyczną implementację. Wykonano szereg badań symulacyjnych, dzięki czemu możliwe było porównanie algorytmów dla jednakowych warunków, tj. rozkładów pola zanieczyszczenia. Następnie, na podstawie zaprezentowanych wyników ustalono kryterium doboru algorytmów. Był to warunek minimalnego czasu lotu, wybrany jako najbardziej istotny parametr w przypadku wykorzystania robota latającego. W tym rozdziale przedstawiono również koncepcyjne rozważania w zakresie rozszerzenia poszukiwań na wiele źródeł zanieczyszczenia. Przeprowadzono dodatkowe symulacje z wykorzystaniem algorytmu poszukiwania na regularnej siatce punktów i algorytmu gradientowego. W ten sposób wykazano, że nadal przy stosunkowo niskim zapotrzebowaniu na moc obliczeniową możliwe jest wyszukiwanie wielu źródeł zanieczyszczenia jednocześnie. Reasumując, rezultatem tej części pracy był wybór sposobów przeszukiwania przestrzeni, które następnie implementowano w części pracy dotyczącej badań eksperymentalnych.

W kolejnym rozdziale, piątym, opisano proces budowy prototypu robota latającego. Istotnym podukładem robota jest autorska jednostka pomiarowo-sterująca, na której zaimplementowano algorytmy poszukiwania źródła zanieczyszczenia. Opisanie w pracy oprogramowanie układowe przygotowano na najniższym poziomie poszczególnych rejestrów procesora. Oprogramowanie przygotowano w pełni samodzielnie w językach C i C++. Tak samo samodzielnie przygotowano wykorzystywane w pracy skrypty w języku Matlab, które wykorzystywano podczas symulacji, przetwarzania i wizualizacji zgromadzonych danych. Od tej reguły były nieliczne wyjątki, gdzie wykorzystano dostępne biblioteki programistyczne. Podobnie jak w przypadku oprogramowania, moduły elektroniczne wykonano w pełni samodzielnie. Moduły elektroniczne zaprojektowano i wykonano w większości w formie dwuwarstwowych obwodów drukowanych. Następnie przeprowadzono analizę własności pomiarowych zastosowanych czujników cząstek stałych, co umożliwiło dobór parametrów systemu pomiarowego. Przygotowano również dedykowane automatyczne stanowisko hamowni, które można uznać za rozwiązanie oryginalne. Stanowisko umożliwiło zweryfikowanie poprawności obliczeń przepływowych pola powietrza wokół robota oraz wyznaczenie nieznanych charakterystyk zespołów napędowych robota. W tej części pracy również zaproponowano właściwy sposób przetwarzania danych pomiarowych oraz zdefiniowano wytyczne metodyki badań terenowych. W kolejnym etapie prac zbudowano prototyp i zaplanowano serię eksperymentów weryfikacyjnych. Badania były przeprowadzane najpierw w pomieszczeniu o stałym stężeniu zanieczyszczeń cząstkami stałymi, a następnie na zewnątrz dla różnego poziomu stężenia tła.

W rozdziale szóstym 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 oraz różnych warunków atmosferycznych, a także dla różnych trajektorii ruchu robota. Celem omawianego etapu badań było wykazanie istnienia korelacji pomiędzy wskazaniami z obu czujników, niezależnie od warunków zewnętrznych czy trajektorii poruszania się robota. Przeprowadzone badania pozwoliły dowieść występowania takiej znaczącej zależności.

Wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych dowiodły poprawności wniosków wyciągniętych na podstawie analizy numerycznej modelu. W przypadku poszukiwania źródeł zanieczyszczenia, bez konieczności dokonania dokładnego pomiaru stężenia pyłów zawieszonych, to teoria zaczerpnięta z literatury która zaleca aby umieścić wlot układu pomiarowego nad robotem została jednoznacznie uznana za nieprawidłową. Ponadto, lokalizacja wlotu nad robotem uniemożliwia bezpośrednio wykonywanie pomiarów bezpośrednio nad źródłem. Sformułowane autorskie kryterium umożliwiło wyznaczenie dwóch

możliwych lokalizacji położenia wlotu układu pomiarowego, z których finalnie wybrane zostało 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. Wynika to przede wszystkim z faktu że czujnik ten zawyżał wskazania w porównaniu do czujnika zamontowanego na wysięgniku. Ponadto, dowiedziona zależność pomiędzy wskazaniami czujników zamontowanych w różnych miejscach świadczy o tym, że na podstawie pomiaru jednego czujnika można oszacować wartość na drugim z nich. Ostatecznie, jako że korelacja wskazań czujników w przypadku występowania źródła zanieczyszczenia rozdziela się na dwie osobne grupy, to na tej podstawie w przyszłości możliwe jest rozpoznawanie rodzaju spalanych substancji.

Następnie w obszarze pracy robota ustawiono źródło zanieczyszczenia, które robot miał lokalizować. Uzyskane wyniki potwierdziły prawidłowe funkcjonowanie systemu. Na podstawie zaprezentowanych przykładów skuteczność opracowanego systemu oszacowano na 90%. Największym problemem napotkanym podczas poszukiwania źródła zanieczyszczenia była zmienność rozkładu pola zanieczyszczenia. Pole to zmieniało się nawet w czasie poruszania się robota, a najbardziej istotnymi czynnikami zakłócającymi była prędkość i kierunek wiatru, a także zmienne natężenie samego źródła zanieczyszczenia. Parametry związane z wiatrem są teoretycznie możliwe do oceny poprzez robota, na podstawie warunków pracy układu sterowania tego jak robot opiera się tymże utrzymując zadaną pozycję w trybie zawisu. Dane o znacznie większej dokładności można otrzymywać z dedykowanej mobilnej stacji pogodowej. Jednakże warunki pogodowe mierzone za pomocą stacji naziemnej na ogół znacznie różnią się od tych, które są w powietrzu.

Użytkowanie różnego rodzaju robotów latających jest utrudnione w niekorzystnych warunkach pogodowych, w szczególności podczas występowania opadów bądź przy dużych prędkościach wiatru. Niestety, wtedy też najczęściej spotkać można się z praktyką zwiększonej emisji zanieczyszczeń. Aktualne trendy i wyniki badań dotyczące zastosowań i rozwoju rynku i robotów latających potwierdzają zapotrzebowanie na specjalizowane autonomiczne roboty latające, zaprogramowane do automatycznej kontroli obszaru ze stałym lub zmiennym interwałem czasowym. Jednym z wielu potencjalnych zastosowań tego typu robota jest lokalizowanie położenia pojazdów wojskowych na podstawie emitowanych przez nie zanieczyszczeń.

7.1. Oryginalne rozwiązania w pracy

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

- Wykorzystanie modeli ruchu robota, pola przepływu oraz zanieczyszczenia do budowy i syntezy algorytmów sterowania wyspecjalizowanego wielowirnikowego robota latającego dedykowanego do lokalizacji źródeł zanieczyszczeń powietrza cząstkami stałymi.
- Badania symulacyjne algorytmów poszukiwania źródeł zanieczyszczeń w celu wyznaczenia właściwego sposobu przeszukiwania przestrzeni i opracowanie autorskiego kryterium w infotaksji.
- Opracowanie autorskiego kryterium bazującego na prędkości przepływu i natężeniu turbulencji wyznaczonym z modelu pola przepływu, na podstawie którego dobrano lokalizację wlotu układu pomiarowego robota.
- Projekt i budowa dedykowanego automatycznego stanowiska hamowni zespołów napędowych robotów wielowirnikowych, umożliwiające jednoczesne wykonywanie pomiarów wielu parametrów układów napędowych.
- Zaplanowanie i przeprowadzenie testów robota w warunkach eksploatacyjnych oraz weryfikacja zaimplementowanych algorytmów poszukiwania źródeł zanieczyszczeń. Pomiary stężenia cząstek stałych przeprowadzono dla różnych poziomów tła pomiarowego, dla trzech scenariuszy: lotów w obszarze bez źródła zanieczyszczenia, lotów w obszarze ze źródłem emisji zanieczyszczeń oraz referencyjnych pomiarów bez źródła zanieczyszczenia i bez pracujących wirników robota latającego.
- Wizualizacja wyników analizy statystycznej bazująca na glifach i metodzie redukcji wymiarowości PCA. Opracowanie klasyfikatora pomiarów na pomiary „czyste” oraz ze źródłem zanieczyszczeń, niezależnie od tła pomiarowego.

7.2. Kierunki dalszych badań

Istotnym kierunkiem dalszych badań jest rozbudowanie komputerowego modelu pola przepływu. Należałoby przeprowadzić analizy dla większej domeny obliczeniowej, a także rozbudować model o bryłę robota. Kolejny, bardziej złożony model powinien zawierać również cząstki stałe w polu przepływu. Należy również wykonać analizy czasowe sliding-mesh, które cechują się dużą dokładnością dla dużych prędkości przepływu. Jednakże są to zagadnienia zwiększające zapotrzebowanie na moc obliczeniową w sposób wykładniczy. Interesujące byłoby również porównanie wyników obliczeń dla innych metod, takich jak np. single-reference-frame dla układów z jednym wirnikiem, albo frozen-rotor, nie wymagające zastosowania tzw. interfejsów. Rozważyć należy również rozbudowanie stanowiska hamowni, w celu umożliwienia badania układów z dwoma wirnikami jednocześnie. Do celów analizy i wizualizacji ogromnej ilości zgromadzonych wielowymiarowych danych, poza metodą PCA, można zastosować zaawansowane metody redukcji wymiarowości, takie jak tSNE czy UMAP. Klasyfikację przypadków pomiarów, czyli wyznaczenie funkcji klasyfikującej, należałoby również wykonać nie ręcznie, a przy zastosowaniu innych metod takich jak maszyna wektorów nośnych SVM. Klasyfikację należałoby również zastosować dla wycinków czasowych pomiarów, tak, aby możliwa była ona do zastosowania na bieżąco, podczas lotu. Badania dla całych pomiarów trzeba potraktować jako wstępny etap prac. Konieczne jest również uzupełnienie danych z brakujących zakresów stężeń, gdyż obecne badania były wykonywane w okresach wiosny, lata i jesieni, a nie zimy. Wtedy też stężenia cząstek są zazwyczaj największe. Należy również zaplanować serię dodatkowych testów, w których robot będzie nawigował z wykorzystaniem czujnika ulokowanego na wysięgniku. W ten sposób porównano by wyniki dla wykorzystanych algorytmów poszukiwania źródła zanieczyszczeń, a następnie można by ilościowo oszacować efektywność energetyczną proponowanego rozwiązania wynikającą z wyższej czułości zaprojektowanego układu pomiarowego zanieczyszczeń.

Kierunki nowych badań dotyczyłyby m.in. wykorzystania kamery termowizyjnej, którą można by wykorzystać do wspomagania poszukiwań. System pomiarowy można uzupełnić o dodatkowe czujniki gazów, albo w środki neutralizacji zanieczyszczeń. Robota można wyposażyć również w system wstępnego wizyjnego rozpoznawania emitenta i szacowania odległości od niego. Pozwoliłoby to na wstępnym etapie poszukiwań dodatkowo ocenić, przy takim samym poziomie zanieczyszczeń, czy robot znajduje się blisko słabego, czy daleko od silnego źródła. W celu zwiększenia skuteczności wyznaczania lokalizacji źródła zanieczyszczenia, do wyznaczania kierunku wiatru należałoby zastosować sieci neuronowe. Opisywane obecnie w literaturze mało dokładne metody wykorzystują analizę przechyłu robota w trybie utrzymywania stałej pozycji. Zastosowanie algorytmów uczenia maszynowego, które korzystałaby na bieżąco z danych z systemu sterowania (układu regulacji) robota,

pozwalaloby na estymacje kierunku i prędkosci wiatru rowniez podczas lotu. Kolejna mozliwoscia jest rowniez wykorzystanie metod planowania eksperymentu w celu doboru parametrów algorytmów poszukiwania na podstawie przeprowadzonych symulacji dla losowego polozenia i parametrów źródła zanieczyszczenia. W kolejnych pracach zaplanowano rowniez wykorzystanie algorytmów o najkrótszej wymaganej do przebycia trasie, a nie cechujace się najkrótszym czasem lotu. Wymaga to jednak zastosowania jednostki pomiarowo-sterujacej o wiekszej mocy obliczeniowej. Uzupełnienie układu w dodatkowe czujniki gazów, pozwoliloby wykrywac problemy z izolacja urządzeń elektroenergetycznych i wycieki w urządzeniach przemysłowych. Robot moze być rowniez wyposażony w środki neutralizacji zanieczyszczeń. Na dalszym etapie prac nalezy rowniez wykonać weryfikacje działania robota dla źródeł o innych parametrach, z rozszerzeniem na poszukiwanie wielu źródeł. Ponadto, w przyszłych pracach planowane jest uzyskanie pełnej autonomicznosci robota. Kolejnym kierunkiem jest rowniez redukcja masy konstrukcji nośnej robota, co pozwoliloby wydłużyc czas lotu. Przyszłe badania powinny takze obejmowac optymalizacje kształtu płata śmigła, w celu zwiększenia sprawności wirników.

Zastosowanie tego typu robotów w przyszłości upatrywac można w przesyłaniu i gromadzeniu informacji dotyczacych wykrywania wypadków i awarii. W ten sposob mozliwe byloby wykrywanie substancji niewykrywalnych innymi metodami, a będucych symptomami awarii. Taki robot można rowniez zastosowac do lokalizacji baz i pojedynczych pojazdów wojskowych. Można oceniać prawdziwość obiektów wykrytych innymi metodami, gdyż makiety pojazdów zazwyczaj nie są wyposażone w układ symulujace generowanie odpowiedniej ilosci zanieczyszczeń. W obecnie stosowanych metodach detekcji obiektów, czy to wizyjnych, czy w podczerwieni, nie są obecnie stosowane kryteria dotyczace zanieczyszczeń.

Bibliografia

- [1] M. Abarca i in. „*Design and development of an hexacopter for air quality monitoring at high altitudes*”. W: *2017 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. Sierp. 2017, s. 1457–1462. DOI: [10.1109/COASE.2017.8256309](https://doi.org/10.1109/COASE.2017.8256309).
- [2] E. Ackerman i E. Strickland. „*Medical delivery drones take flight in east africa*”. W: *IEEE Spectrum* 55.1 (sty. 2018), s. 34–35. ISSN: 1939-9340. DOI: [10.1109/MSPEC.2018.8241731](https://doi.org/10.1109/MSPEC.2018.8241731).
- [3] M. Adamski. „*Testowanie bezzałogowych statków powietrznych do monitorowania zanieczyszczeń w środowisku*”. W: *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY* 1 (sierp. 2018), s. 16–19. DOI: [10.15199/48.2018.09.03](https://doi.org/10.15199/48.2018.09.03).
- [4] B. Alfano i in. „*A Review of Low-Cost Particulate Matter Sensors from the Developers' Perspectives*”. W: *Sensors* 20.23 (2020). ISSN: 1424-8220. DOI: [10.3390/s20236819](https://doi.org/10.3390/s20236819).
- [5] Mi. Alvarado i in. „*A Methodology to Monitor Airborne PM 10 Dust Particles Using a Small Unmanned Aerial Vehicle*”. W: *Sensors* 17 (mar. 2017). DOI: [10.3390/s17020343](https://doi.org/10.3390/s17020343).
- [6] S. S. Amaral i in. „*An Overview of Particulate Matter Measurement Instruments*”. W: *Atmosphere* 6.9 (2015), s. 1327–1345. ISSN: 2073-4433. DOI: [10.3390/atmos6091327](https://doi.org/10.3390/atmos6091327).
- [7] L. Ambroziak i Z. Gosiewski. „*Projektowanie praw sterowania lotem grupowym bezzałogowych aparatów latających*”. W: *Scientific Letters of Rzeszow University of Technology - Mechanics* 31 (sty. 2014), s. 17–26. DOI: [10.7862/rm.2014.2](https://doi.org/10.7862/rm.2014.2).
- [8] „*Analiza powietrza - oferta - Polskie Centrum Dronów PCD24*”. URL: <http://pcd24.pl/oferta/analiza-powietrza> (term. wiz. 2019-11-25).
- [9] V. Andaluz i in. „*Autonomous Monitoring of Air Quality Through an Unmanned Aerial Vehicle*”. W: czer. 2019, s. 146–157. ISBN: 978-3-030-22998-6. DOI: [10.1007/978-3-030-22999-3_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22999-3_14).
- [10] T. Andersen i in. „*A UAV-based active AirCore system for measurements of greenhouse gases*”. W: *Atmospheric Measurement Techniques* 11.5 (2018), s. 2683–2699. DOI: [10.5194/amt-11-2683-2018](https://doi.org/10.5194/amt-11-2683-2018).

- [11] „*Ansys Fluent Theory Guide. Release 2020 R1*”. Ansoft Inc. 2020.
- [12] S. Asadi i A. Lilienthal. „*Approaches to time-dependent gas distribution modelling*”. W: *2015 European Conference on Mobile Robots (ECMR)*. Wrz. 2015, s. 1–6. DOI: [10.1109/ECMR.2015.7324215](https://doi.org/10.1109/ECMR.2015.7324215).
- [13] M. Asenov i in. „*Active Localization of Gas Leaks Using Fluid Simulation*”. W: *IEEE Robotics and Automation Letters* 4.2 (kw. 2019), s. 1776–1783. ISSN: 2377-3766. DOI: [10.1109/LRA.2019.2895820](https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2895820).
- [14] J. Aurell i in. „*Field determination of multipollutant, open area combustion source emission factors with a hexacopter unmanned aerial vehicle*”. W: *Atmospheric Environment* 166 (2017), s. 433–440. ISSN: 1352-2310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.07.046>.
- [15] J. Aurell i in. „*Wildland fire emission sampling at Fishlake National Forest, Utah using an unmanned aircraft system*”. W: *Atmospheric Environment* 247 (2021), s. 118193. ISSN: 1352-2310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118193>.
- [16] M. Avvenuti i in. „*Detection and Mapping of a Toxic Cloud Using UAVs and Emergent Techniques: 6th International Conference, MIKE 2018, Cluj-Napoca, Romania, December 20–22, 2018, Proceedings*”. W: grud. 2018, s. 215–224. ISBN: 978-3-030-05917-0. DOI: [10.1007/978-3-030-05918-7_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05918-7_19).
- [17] P. Bao i in. „*Multi-uav gas concentration map fusion using the image repair algorithm based on clustered directed diffusion model*”. W: *2019 IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose (ISOEN)*. Maj 2019, s. 1–4. DOI: [10.1109/ISOEN.2019.8823369](https://doi.org/10.1109/ISOEN.2019.8823369).
- [18] G. K. Batchelor. „*An Introduction to Fluid Dynamics*”. W: *Cambridge Univ. Press. Cambridge, England* (1967).
- [19] B. Bayat i in. „*Environmental monitoring using autonomous vehicles: a survey of recent searching techniques*”. W: *Current Opinion in Biotechnology* 45 (2017), s. 76–84. ISSN: 0958-1669. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2017.01.009>.
- [20] R. Beniak i O. Gudzenko. „*Control Methods Design for a Model of Asymmetrical Quadrocopter*”. W: *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems* 10 (czer. 2016), s. 40–49. DOI: [10.14313/JAMRIS_2-2016/14](https://doi.org/10.14313/JAMRIS_2-2016/14).
- [21] V. H. Bennetts i in. „*Mobile Robots for Localizing Gas Emission Sources on Landfill Sites Is Bio-Inspiration the Way to Go?*” W: *Frontiers in Neuroengineering* 4 (2012), s. 20. ISSN: 1662-6443. DOI: [10.3389/fneng.2011.00020](https://doi.org/10.3389/fneng.2011.00020).

- [22] V. H. Bennetts i in. „*Probabilistic Air Flow Modelling Using Turbulent and Laminar Characteristics for Ground and Aerial Robots*”. W: *IEEE Robotics and Automation Letters* 2.2 (kw. 2017), s. 1117–1123. ISSN: 2377-3766. DOI: 10.1109/LRA.2017.2661803.
- [23] B. Berner i J. Chojnacki. „*Monitorowanie zanieczyszczeń środowiska za pomocą dronów*”. W: *Autobusy Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe* (sty. 2017).
- [24] P. Bieber i in. „*A Drone-Based Bioaerosol Sampling System to Monitor Ice Nucleation Particles in the Lower Atmosphere*”. W: *Remote Sensing* 12.3 (2020). ISSN: 2072-4292. DOI: 10.3390/rs12030552.
- [25] L. Bing i in. „*Three-dimensional gas distribution mapping with a micro-drone*”. W: *2015 34th Chinese Control Conference (CCC)*. Lip. 2015, s. 6011–6015. DOI: 10.1109/ChiCC.2015.7260580.
- [26] J. L. Blanco i in. „*A Kalman Filter Based Approach to Probabilistic Gas Distribution Mapping*”. W: *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Applied Computing*. SAC '13. Coimbra, Portugal: Association for Computing Machinery, 2013, s. 217–222. ISBN: 9781450316569. DOI: 10.1145/2480362.2480409.
- [27] 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.
- [28] G. M. Bolla i in. „*ARIA: Air Pollutants Monitoring Using UAVs*”. W: *2018 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*. Czer. 2018, s. 225–229. DOI: 10.1109/MetroAeroSpace.2018.8453584.
- [29] A. Bonisławski, M. Juchniewicz i R. Piotrowski. „*Projekt techniczny i budowa platformy latającej typu quadrocopter*”. W: *Pomiary Automatyka Robotyka* 18.203 (sty. 2014), s. 91–97. DOI: 10.14313/PAR_203/91.
- [30] J. M. Brady i in. „*Characterization of a Quadrotor Unmanned Aircraft System for Aerosol-Particle-Concentration Measurements*”. W: *Environmental Science & Technology* 50.3 (2016). PMID: 26730457, s. 1376–1383. DOI: 10.1021/acs.est.5b05320. eprint: <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05320>.
- [31] L. Bretschneider i in. „*MesSBAR — Multicopter and Instrumentation for Air Quality Research*”. W: *Atmosphere* 13.4 (2022). ISSN: 2073-4433. DOI: 10.3390/atmos13040629.
- [32] J. Brzózka. „*Regulatory i układy automatyki*”. Wydawnictwo MIKOM, 2004. ISBN: 8372793808.

- [33] Z. Bubnicki. „*Teoria i algorytmy sterowania*”. Wydawnictwo Naukowe PWN SA, 2005. ISBN: 8301144149.
- [34] F. M. J. Bulot i in. „*Laboratory Comparison of Low-Cost Particulate Matter Sensors to Measure Transient Events of Pollution*”. W: *Sensors* 20.8 (2020). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s20082219.
- [35] T. Buratowski, T. Uhl i G. Chmaj. „*The Project of an Autonomous Robot Capable to Cooperate in a Group*”. W: t. 360. Czer. 2009, s. 391–399. ISBN: 978-1-84628-973-6. DOI: 10.1007/978-1-84628-974-3_36.
- [36] J. Burgués i in. „*Smelling Nano Aerial Vehicle for Gas Source Localization and Mapping*”. W: *Sensors* 19.3 (sty. 2019), s. 478. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s19030478.
- [37] E. F. Camacho i C. Bordons. „*Model predictive control in the process industry*”. Springer, 1995. ISBN: 3540199241.
- [38] A. M. Cárdenas i in. „*Short Communication: Pollution-and-greenhouse gases measurement system*”. W: *Measurement* 129 (2018), s. 565–568. ISSN: 0263-2241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.039>.
- [39] M. Carpentiero i in. „*A swarm of wheeled and aerial robots for environmental monitoring*”. W: *2017 IEEE 14th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*. Maj 2017, s. 90–95. DOI: 10.1109/ICNSC.2017.8000073.
- [40] M. Carrozzo i in. „*UAV Intelligent Chemical Multisensor Payload for Networked and Impromptu Gas Monitoring Tasks*”. W: *2018 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*. Czer. 2018, s. 112–116. DOI: 10.1109/MetroAeroSpace.2018.8453543.
- [41] A. Castro i in. „*Odor Source Localization on a Nano Quadcopter*”. W: *2018 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)*. Paź. 2018, s. 1–4. DOI: 10.1109/BIOCAS.2018.8584769.
- [42] „*CFD Online Wiki*”. Szacowanie wysokości pierwszej warstwy przyściennej. URL: https://www.cfd-online.com/Wiki/Y_plus_wall_distance_estimation (term. wiz. 2020-12-30).
- [43] 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. ISSN: 0048-9697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157978>.

- [44] J. Chen i in. „*On the use of multicopters for sampling and analysis of volatile organic compounds in the air by adsorption/thermal desorption GC-MS*”. W: *Air Quality, Atmosphere & Health* 11 (czer. 2018). DOI: [10.1007/s11869-018-0588-y](https://doi.org/10.1007/s11869-018-0588-y).
- [45] W. Cheng i in. „*Application of a Telescoping Microextraction Needle Trap Sampling Device on a Drone to Extract Airborne Organic Vapors*”. W: *Aerosol and Air Quality Research* 19.7 (2019), s. 1593–1601. DOI: [10.4209/aaqr.2019.04.0183](https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.04.0183).
- [46] W. Cheng i in. „*Vertical profiling of black carbon and ozone using a multicopter unmanned aerial vehicle (UAV) in urban Shenzhen of South China*”. W: *Science of The Total Environment* 801 (2021), s. 149689. ISSN: 0048-9697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149689>.
- [47] Y. Chiang i in. „*Mobile Measurement of Particulate Matter Concentrations on Urban Streets: System Development and Field Verification*”. W: *IEEE Access* 8 (2020), s. 197617–197629.
- [48] T. Chiba i in. „*Measuring Regional Atmospheric CO₂ Concentrations in the Lower Troposphere with a Non-Dispersive Infrared Analyzer Mounted on a UAV, Ogata Village, Akita, Japan*”. W: *Atmosphere* 10.9 (sierp. 2019), s. 487. ISSN: 2073-4433. DOI: [10.3390/atmos10090487](https://doi.org/10.3390/atmos10090487).
- [49] C. Chih-Chung i in. „*An optimized multicopter UAV sounding technique (MUST) for probing comprehensive atmospheric variables*”. W: *Chemosphere* 254 (2020), s. 126867. ISSN: 0045-6535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126867>.
- [50] S. Chunithipaisan i in. „*Particulate Matter Monitoring Using Inexpensive Sensors and Internet GIS: A Case Study in Nan, Thailand*”. W: *Engineering Journal* 22 (mar. 2018), s. 25–37. DOI: [10.4186/ej.2018.22.2.25](https://doi.org/10.4186/ej.2018.22.2.25).
- [51] W. Ciesielka i G. Suchanek. „*Modelling and simulation tests of a quadrocopter flying robot*”. W: *New Trends in Production Engineering* 2 (paź. 2019), s. 486–495. DOI: [10.2478/ntpe-2019-0052](https://doi.org/10.2478/ntpe-2019-0052).
- [52] W. Ciesielka i G. Suchanek. „*Project of flying robot type quadrocopter*”. W: *Polish Journal of Environmental Studies* 26(5A) (2017), s. 20–26.
- [53] A. Cozma i in. „*Autonomous Multi-Rotor Aerial Platform for Air Pollution Monitoring*”. W: *Sensors* 22.3 (2022). ISSN: 1424-8220. DOI: [10.3390/s22030860](https://doi.org/10.3390/s22030860).

- [54] B. Cybulski, A. Wegierska i G. Granosik. „*Accuracy comparison of navigation local planners on ROS-based mobile robot*”. W: *2019 12th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo)*. 2019, s. 104–111. DOI: [10.1109/RoMoCo.2019.8787346](https://doi.org/10.1109/RoMoCo.2019.8787346).
- [55] I. Czajka i A. Gołaś. „*Inżynierskie metody analizy numerycznej i planowanie eksperymentu*”. SU1744. Wydawnictwa AGH, 2017. ISBN: 978-83-7464-992-6.
- [56] S. Czmił. „*Sterowanie i konstrukcje bezszczotkowych silników prądu stałego*”. W: *Scientific Journals of Rzeszów University of Technology, Series: Electrotechnics* (sty. 2020), s. 19–32. DOI: [10.7862/re.2020.2](https://doi.org/10.7862/re.2020.2).
- [57] „*Dedykowane oprogramowanie BLHeli sterowników silników BLDC do robotów wielowirnikowych*”. URL: <https://github.com/bitdump/BLHeli> (term. wiz. 2020-12-30).
- [58] „*Dedykowane oprogramowanie SimonK sterowników silników BLDC do robotów wielowirnikowych*”. URL: <https://github.com/sim-/tgy> (term. wiz. 2020-12-30).
- [59] V. T. Dieu Hien i in. „*An overview of the development of vertical sampling technologies for ambient volatile organic compounds (VOCs)*”. W: *Journal of Environmental Management* 247 (2019), s. 401–412. ISSN: 0301-4797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.090>.
- [60] D. Domingos, G. Camargo i F. Gomide. „*Autonomous Fuzzy Control and Navigation of Quadcopters*”. W: *IFAC-PapersOnLine* 49.5 (2016). 4th IFAC Conference on Intelligent Control and Automation Sciences/ICONS 2016, s. 73–78. ISSN: 2405-8963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.092>.
- [61] L. Dunnington i M. Nakagawa. „*Fast and safe gas detection from underground coal fire by drone fly over*”. W: *Environmental Pollution* 229 (2017), s. 139–145. ISSN: 0269-7491. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.05.063>.
- [62] K. S. Eu, K. M. Yap i W. C. Tan. „*A Simulation Study of Micro-Drone Chemical Plume Tracking Performance in Tree Farm Environments*”. W: *Advances in Visual Informatics*. Red. Halimah Badioze Zaman i in. Cham: Springer International Publishing, 2017, s. 260–269. ISBN: 978-3-319-70010-6.
- [63] S. Fan i in. „*A Study of Modified Infotaxis Algorithms in 2D and 3D Turbulent Environments*”. W: *Computational intelligence and Neuroscience 2020* (2020), s. 4159241. ISSN: 1687-5265. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/4159241>.

- [64] M. Farrell i in. „*Error-State LQR Control of a Multirotor UAV*”. W: *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. 2019, s. 704–711. DOI: [10.1109/ICUAS.2019.8798359](https://doi.org/10.1109/ICUAS.2019.8798359).
- [65] A. Fellner, A. Mańka i I. Mańka. „*Analiza zagrożeń wynikających z użytkowania bezzałogowych statków powietrznych (dronów)*”. W: *TTS Technika Transportu Szybowego R. 22, nr 12 (2015)*, s. 489–491. ISSN: 1232-3829.
- [66] A. Fellner, B. Mańka i A. Mańka. „*Analiza aktualnych metod detekcji bezzałogowych statków powietrznych (dronów)*”. W: *TTS Technika Transportu Szybowego R. 22, nr 12 (2015)*, s. 484–488. ISSN: 1232-3829.
- [67] L. Feng i Q. Fangchao. „*Research on the Hardware Structure Characteristics and EKF Filtering Algorithm of the Autopilot PIXHAWK*”. W: *2016 Sixth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC)*. 2016, s. 228–231. DOI: [10.1109/IMCCC.2016.128](https://doi.org/10.1109/IMCCC.2016.128).
- [68] P. Fiorentin i in. „*MINLU: An Instrumental Suite for Monitoring Light Pollution from Drones or Airballoons*”. W: *2018 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*. Czer. 2018, s. 274–278. DOI: [10.1109/MetroAeroSpace.2018.8453573](https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace.2018.8453573).
- [69] M. B. Frish i in. „*Low-cost lightweight airborne laser-based sensors for pipeline leak detection and reporting*”. W: *Next-Generation Spectroscopic Technologies VI*. Red. Mark A. Druy i Richard A. Crocombe. T. 8726. International Society for Optics i Photonics. SPIE, 2013, s. 56–64. DOI: [10.1117/12.2015813](https://doi.org/10.1117/12.2015813).
- [70] Z. Fu i in. „*Pollution Source Localization Based on Multi-UAV Cooperative Communication*”. W: *IEEE Access* 7 (mar. 2019), s. 1–1. DOI: [10.1109/ACCESS.2019.2900475](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2900475).
- [71] G. Gaigals i E. Vavilina. „*Simulation of compressed sensing based passive radar for drone detection*”. W: *2017 5th IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)*. List. 2017, s. 1–5. DOI: [10.1109/AIEEE.2017.8270552](https://doi.org/10.1109/AIEEE.2017.8270552).
- [72] V. Gallego, M. Rossi i D. Brunelli. „*Unmanned aerial gas leakage localization and mapping using microdrones*”. W: *2015 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*. Kw. 2015, s. 1–6. DOI: [10.1109/SAS.2015.7133629](https://doi.org/10.1109/SAS.2015.7133629).

- [73] 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.
- [74] J. Garus i M. Giergiel. „*Motion Control of Small Autonomous Underwater Vehicle in Presence of Parameters Uncertainties*”. W: *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing* 14 (grud. 2020), s. 888–902. DOI: 10.46300/9106.2020.14.115.
- [75] N. Gatsonis, M. Demetriou i T. Egorova. „*Real-time prediction of gas contaminant concentration from a ground intruder using a UAV*”. W: *2015 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security*. Kw. 2015, s. 1–6. DOI: 10.1109/THS.2015.7225276.
- [76] N. Gerhardt, R. Clothier i G. Wild. „*Investigating the practicality of hazardous material detection using Unmanned Aerial Systems*”. W: maj 2014, s. 133–137. ISBN: 978-1-4799-2069-3. DOI: 10.1109/MetroAeroSpace.2014.6865908.
- [77] M. Ghanavati, A. Chakravarthy i P. P. Menon. „*PDE-based Swarm Control for Contaminant Tracking Applications*”. W: *2018 Annual American Control Conference (ACC)*. Czer. 2018, s. 937–942. DOI: 10.23919/ACC.2018.8431659.
- [78] M. Giergiel i in. „*The Construction of a Biomimetic Mobile Underwater Robot*”. W: *Solid State Phenomena* 210 (paź. 2013), s. 309–319. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.210.309.
- [79] W. Giernacki. „*Roboty latające. Laboratorium*”. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, czer. 2017. ISBN: 978-83-7775-467-2.
- [80] H. Glauert. „*Airplane Propellers*”. W: *Aerodynamic Theory: A General Review of Progress Under a Grant of the Guggenheim Fund for the Promotion of Aeronautics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1935, s. 169–360. ISBN: 978-3-642-91487-4. DOI: 10.1007/978-3-642-91487-4_3.
- [81] T. Glinka. „*Maszyny elektryczne wzbudzane magnesami trwałymi*”. Wydawnictwo Naukowe PWN SA, 2018. ISBN: 9788301197933.
- [82] Z. Goryca. „*Bezszcotkowe silniki prądu stałego – konstrukcje i sterowanie*”. W: *AUTOMATYKA, ELEKTRYKA, ZAKŁÓCENIA* 3 (sty. 2013), s. 56–63.
- [83] Z. Gosiewski i K. Kwaśniewski. „*Time Minimization of Rescue Action Realized by an Autonomous Vehicle*”. W: *Electronics* 9 (grud. 2020), s. 2099. DOI: 10.3390/electronics9122099.

- [84] K. Góra i in. „*Machine Learning in Creating Energy Consumption Model for UAV*”. W: *Energies* 15 (wrz. 2022), s. 6810. DOI: [10.3390/en15186810](https://doi.org/10.3390/en15186810).
- [85] E. Grøtli i T. Johansen. „*Motion and Communication Planning of Unmanned Aerial Vehicles in Delay Tolerant Network using Mixed-Integer Linear Programming*”. W: *Modeling, Identification and Control: A Norwegian Research Bulletin* 37 (sty. 2013). DOI: [10.4173/mic.2016.2.1](https://doi.org/10.4173/mic.2016.2.1).
- [86] M. Grzes, M. Slowik i Z. Gosiewski. „*Multirotor UAV sensor fusion for precision landing*”. W: *Aircraft Engineering and Aerospace Technology* 91 (wrz. 2018). DOI: [10.1108/AEAT-01-2018-0070](https://doi.org/10.1108/AEAT-01-2018-0070).
- [87] Q. Gu, D. Michanowicz i C. Jia. „*Developing a Modular Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Platform for Air Pollution Profiling*”. W: *Sensors* 18 (grud. 2018), s. 4363. DOI: [10.3390/s18124363](https://doi.org/10.3390/s18124363).
- [88] Y. Haiwen i in. „*Target Detection, Positioning and Tracking Using New UAV Gas Sensor Systems: Simulation and Analysis*”. W: *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 94 (czer. 2019), s. 1–12. DOI: [10.1007/s10846-018-0909-2](https://doi.org/10.1007/s10846-018-0909-2).
- [89] X. He i in. „*Autonomous Chemical-Sensing Aerial Robot for Urban/Suburban Environmental Monitoring*”. W: *IEEE Systems Journal* 13.3 (wrz. 2019), s. 3524–3535. ISSN: 1937-9234. DOI: [10.1109/JSYST.2019.2905807](https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2905807).
- [90] Hayden A. Hedworth i in. „*The effectiveness of drones in measuring particulate matter*”. W: *Journal of Aerosol Science* 152 (2021), s. 105702. ISSN: 0021-8502. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2020.105702>.
- [91] Y. Huang, Y. Chen i J. Chang. „*Design and Implementation of an Ambient Data Collection Mechanism Based on a Quadcopter*”. W: *2018 1st International Cognitive Cities Conference (IC3)*. Sierp. 2018, s. 32–36. DOI: [10.1109/IC3.2018.00017](https://doi.org/10.1109/IC3.2018.00017).
- [92] M. Hutchinson, C. Liu i W. Chen. „*Source term estimation of a hazardous airborne release using an unmanned aerial vehicle*”. W: *Journal of Field Robotics* 36.4 (2019), s. 797–817. DOI: <https://doi.org/10.1002/rob.21844>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/rob.21844>.
- [93] Moad Idrissi, Mohammad Salami i Fawaz Annaz. „*A Review of Quadrotor Unmanned Aerial Vehicles: Applications, Architectural Design and Control Algorithms*”. W: *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 104.2 (sty. 2022), s. 22. ISSN: 1573-0409. DOI: [10.1007/s10846-021-01527-7](https://doi.org/10.1007/s10846-021-01527-7).

- [94] Md S. Islam, I. Husain i R. Mikail. „Slotless lightweight motor for drone applications”. W: *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. Paź. 2017, s. 5041–5048. DOI: [10.1109/ECCE.2017.8096851](https://doi.org/10.1109/ECCE.2017.8096851).
- [95] I. T. Jolliffe i J. Cadima. „Principal component analysis: a review and recent developments”. W: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 374.2065 (kw. 2016), s. 20150202. DOI: [10.1098/rsta.2015.0202](https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202).
- [96] J. Jońca i in. „Drone-Assisted Monitoring of Atmospheric Pollution: A Comprehensive Review”. W: *Sustainability* 14.18 (2022). ISSN: 2071-1050. DOI: [10.3390/su141811516](https://doi.org/10.3390/su141811516).
- [97] J. Kabziński. „Teoria sterowania. Projektowanie układów regulacji”. PWN, 2021. ISBN: 978-83-01-21532-3.
- [98] T. Kaczorek. „Teoria układów regulacji automatycznej”. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1977.
- [99] K. Kaliński i C. Buchholz. „Error minimisation in orientation and localization by correction velocities for three-wheeled mobile platform at time changeable energy performance index”. W: *2011 16th International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics*. 2011, s. 330–335. DOI: [10.1109/MMAR.2011.6031368](https://doi.org/10.1109/MMAR.2011.6031368).
- [100] K. Kaliński i C. Buchholz. „HILS for the Design of Three-Wheeled Mobile Platform Motion Surveillance System with a Use of Energy Performance Index”. W: *Mechatronic Systems and Materials IV*. T. 198. Solid State Phenomena. Trans Tech Publications Ltd, maj 2013, s. 90–95. DOI: [10.4028/www.scientific.net/SSP.198.90](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.198.90).
- [101] K. Kaliński, M. Galewski i M. Mazur. „A Surveillance Of Dynamic Processes on Selected Mechatronic Systems”. W: *Archive of Mechanical Engineering* 60 (wrz. 2013), s. 347–367. DOI: [10.2478/meceng-2013-0023](https://doi.org/10.2478/meceng-2013-0023).
- [102] K. J. Kaliński i M. Mazur. „Optimal control at energy performance index of the mobile robots following dynamically created trajectories”. W: *Mechatronics* 37 (2016). THEORETICAL AND APPLIED ASPECTS OF MODERN MECHATRONICS, s. 79–88. ISSN: 0957-4158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2016.01.006>.
- [103] K. J. Kaliński i M. Mazur. „Optimal control of 2-wheeled mobile robot at energy performance index”. W: *Mechanical Systems and Signal Processing* 70 (paź. 2015). DOI: [10.1016/j.ymsp.2015.09.047](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2015.09.047).

- [104] M. Kaliszewski i in. „*Comparison of Low-Cost Particulate Matter Sensors for Indoor Air Monitoring during COVID-19 Lockdown*”. W: *Sensors* 20.24 (2020). ISSN: 1424-8220. DOI: [10.3390/s20247290](https://doi.org/10.3390/s20247290).
- [105] O. Kaszowska, P. Gruchlik i W. Mika. „*Industrial chimney monitoring - contemporary methods*”. W: *E3S Web of Conferences* 36 (sty. 2018), s. 01005. DOI: [10.1051/e3sconf/20183601005](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183601005).
- [106] M. Katariya i in. „*Drone inflight mixing of biochemical samples*”. W: *Analytical Biochemistry* 545 (2018), s. 1–3. ISSN: 0003-2697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ab.2018.01.004>.
- [107] H. Kinjo i in. „*Infrastructure (transmission line) check autonomous flight drone (1)*”. W: *2017 International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences (ICIIBMS)*. List. 2017, s. 206–209. DOI: [10.1109/ICIIBMS.2017.8279694](https://doi.org/10.1109/ICIIBMS.2017.8279694).
- [108] L. N. Kobziar i in. „*Accessing the Life in Smoke: A New Application of Unmanned Aircraft Systems (UAS) to Sample Wildland Fire Bioaerosol Emissions and Their Environment*”. W: *Fire* 2.4 (2019). ISSN: 2571-6255. DOI: [10.3390/fire2040056](https://doi.org/10.3390/fire2040056).
- [109] A. Komorek, R. Bieńczak i R. Kowalik. „*Matematyczny opis dynamiki ruchu bezzałogowego statku powietrznego*”. W: *TTS Technika Transportu Szybowego* R. 22, nr 12 (2015), s. 157–162, CD. ISSN: 1232-3829.
- [110] „*Kontroler lotu mRo Pixhawk 1*”. URL: https://docs.px4.io/v1.9.0/en/flight_controller/mro_pixhawk.html (term. wiz. 2022-12-30).
- [111] „*Kontroler lotu Pixhawk*”. URL: <https://pixhawk.org/> (term. wiz. 2020-12-30).
- [112] Y. Kostyukevich i in. „*Remote detection of explosives using field asymmetric ion mobility spectrometer installed on multicopter*”. W: *Journal of Mass Spectrometry* 52.11 (2017), s. 777–782. DOI: <https://doi.org/10.1002/jms.3980>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/jms.3980>.
- [113] A. Koval, E. Irigoyen i T. Koval. „*AR.Drone as a platform for measurements*”. W: *2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)* (2017), s. 424–427.
- [114] Y. Koziar, V. Levchuk i A. Koval. „*Quadrotor Design for Outdoor Air Quality Monitoring*”. W: *2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. Kw. 2019, s. 736–739. DOI: [10.1109/ELNANO.2019.8783909](https://doi.org/10.1109/ELNANO.2019.8783909).

- [115] M. Kraft i in. „*Autonomous, Onboard Vision-Based Trash and Litter Detection in Low Altitude Aerial Images Collected by an Unmanned Aerial Vehicle*”. W: *Remote Sensing* 13(5) (mar. 2021), s. 965. DOI: 10.3390/rs13050965.
- [116] R. Kristiansen, E. Oland i D. Narayanachar. „*Operational concepts in UAV formation monitoring of industrial emissions*”. W: grud. 2012. DOI: 10.1109/CogInfoCom.2012.6422003.
- [117] E. Kuantama i in. „*The Design and Experimental Development of Air Scanning Using a Sniffer Quadcopter*”. W: *Sensors* 19 (wrz. 2019), s. 3849. DOI: 10.3390/s19183849.
- [118] M. Kubat, P. Smyczyński i G. Granosik. „*Unmanned Air Vehicle selection criteria for inspection and transport tasks*”. W: *Pomiary Automatyka Robotyka* 22 (wrz. 2018), s. 23–32. DOI: 10.14313/PAR_229/23.
- [119] T. Kuciński i in. „*Deployable Manipulator Technology with Application for UAVs*”. W: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 24 (lut. 2015), s. 93–103. DOI: 10.1007/978-3-319-13853-4_9.
- [120] K. Kurotsuchi, M. Tai i H. Takahashi. „*Vision-based autonomous micro-air-vehicle control for odor source localization*”. W: *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal* 2.3 (2017), s. 1152–1158. DOI: 10.25046/aj0203145.
- [121] A. Kusalewicz, K. Armiński i T. Zubowicz. „*Użytkowy model matematyczny quadcoptera do celów sterowania*”. W: *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* Nr 51 (2016), s. 103–106. ISSN: 1425-5766.
- [122] T. Kuszniir i J. Smoczek. „*Fuzzy-Lyapunov based controller for a quadcopter*”. W: *Journal of KONES* Vol. 24, No. 4 (2017), s. 125–132. ISSN: 1231-4005.
- [123] H. Kuuluvainen i in. „*Vertical profiles of lung deposited surface area concentration of particulate matter measured with a drone in a street canyon*”. W: *Environmental Pollution* 241 (2018), s. 96–105. ISSN: 0269-7491. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.100>.
- [124] T. Landolsi i in. „*Pollution Monitoring System using Position-Aware Drones with 802.11 Ad-Hoc Networks*”. W: *2018 IEEE Conference on Wireless Sensors (ICWiSe)*. List. 2018, s. 40–43. DOI: 10.1109/ICWISE.2018.8633285.
- [125] H. Lee i in. „*Long-Term Evaluation and Calibration of Low-Cost Particulate Matter (PM) Sensor*”. W: *Sensors* 20.13 (2020). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s20133617.

- [126] S. H. Lee i K. H. Kwak. „Assessing 3-D Spatial Extent of Near-Road Air Pollution around a Signalized Intersection Using Drone Monitoring and WRF-CFD Modeling”. W: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17.18 (2020). ISSN: 1660-4601. DOI: [10.3390/ijerph17186915](https://doi.org/10.3390/ijerph17186915).
- [127] G. Leśnik i in. „Analiza przenośnych systemów do przechwytywania miniaturowych bezzałogowych statków powietrznych”. W: *Problemy Techniki Uzbrojenia* R. 46, z. 142 (2017), s. 87–101. ISSN: 1230-3801.
- [128] B. Letheren i in. „Design and flight testing of a bio-inspired plume tracking algorithm for unmanned aerial vehicles”. W: *Proceedings of the 2016 IEEE Aerospace Conference*. Red. R Mattingly. United States of America: IEEE, 2016, s. 1211–1219. DOI: [10.1109/AERO.2016.7500614](https://doi.org/10.1109/AERO.2016.7500614).
- [129] B. Li i in. „Impacts of wind fields on the distribution patterns of traffic emitted particles in urban residential areas”. W: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 68 (2019). Urbanization, Transportation and Air Quality in Developing Countries, s. 122–136. ISSN: 1361-9209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.01.030>.
- [130] X. B. Li i in. „Evaluation of unmanned aerial system in measuring lower tropospheric ozone and fine aerosol particles using portable monitors”. W: *Atmospheric Environment* 222 (2020), s. 117134. ISSN: 1352-2310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117134>.
- [131] X. B. Li i in. „Investigating vertical distribution patterns of lower tropospheric PM_{2.5} using unmanned aerial vehicle measurements”. W: *Atmospheric Environment* 173 (2018), s. 62–71. ISSN: 1352-2310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.11.009>.
- [132] A. Lilienthal, F. Streichert i A. Zell. „Model-based Shape Analysis of Gas Concentration Gridmaps for Improved Gas Source Localisation”. W: *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2005, s. 3575–3580. DOI: [10.1109/ROBOT.2005.1570662](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570662).
- [133] A. J. Lilienthal i in. „A statistical approach to gas distribution modelling with mobile robots - The Kernel DM+V algorithm”. W: *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Paź. 2009, s. 570–576. DOI: [10.1109/IROS.2009.5354304](https://doi.org/10.1109/IROS.2009.5354304).

- [134] M. Lu i in. „*Wireless Charging Techniques for UAVs: A Review, Reconceptualization, and Extension*”. W: *IEEE Access* 6 (2018), s. 29865–29884. ISSN: 2169-3536. DOI: [10.1109/ACCESS.2018.2841376](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2841376).
- [135] Q. Lu i in. „*A Finite-Time Motion Control Strategy for Odor Source Localization*”. W: *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 61 (paź. 2014), s. 5419–5430. DOI: [10.1109/TIE.2014.2301751](https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2301751).
- [136] B. Luo i in. „*A Flying Odor Compass to Autonomously Locate the Gas Source*”. W: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 67.1 (sty. 2018), s. 137–149. ISSN: 1557-9662. DOI: [10.1109/TIM.2017.2759378](https://doi.org/10.1109/TIM.2017.2759378).
- [137] B. Luo i in. „*A numerical model to simulate the aerodynamic olfactory effect of the gas-sensitive UAV*”. W: *2016 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*. Czer. 2016, s. 3295–3300. DOI: [10.1109/WCICA.2016.7578639](https://doi.org/10.1109/WCICA.2016.7578639).
- [138] T. Luukkonen. „*Modelling and control of quadcopter*”. Independent research project in applied mathematics. Aalto University. 2011. URL: https://sal.aalto.fi/publications/pdf-files/eluull_public.pdf (term. wiz. 2019-11-25).
- [139] Y. Ma, Y. Jiang i L. Li. „*Numerical Simulation of PM2.5 Distribution in Indoor Air*”. W: *Procedia Engineering* 121 (2015). The 9th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC) joint with the 3rd International Conference on Building Energy and Environment (COBEE), 12-15 July 2015, Tianjin, China, s. 1939–1947. ISSN: 1877-7058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.183>.
- [140] M.Y.A. Madjid i in. „*Drones in carbonate geology: Opportunities and challenges, and application in diagenetic dolomite geobody mapping*”. W: *Marine and Petroleum Geology* 91 (2018), s. 723–734. ISSN: 0264-8172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.02.002>.
- [141] H. Madokoro i in. „*Development of Drone-Mounted Multiple Sensing System with Advanced Mobility for In Situ Atmospheric Measurement: A Case Study Focusing on PM2.5 Local Distribution*”. W: *Sensors* 21.14 (2021). ISSN: 1424-8220. DOI: [10.3390/s21144881](https://doi.org/10.3390/s21144881).
- [142] M. K. Mahanteshiaiah i in. „*Environmental pollution control using artificial intelligence drone*”. W: *AIP Conference Proceedings* 2311.1 (2020), s. 030031. DOI: [10.1063/5.0034004](https://doi.org/10.1063/5.0034004).
- [143] G. P. Mayuga i in. „*Airborne Particulate Matter Monitoring Using UAVs for Smart Cities and Urban Areas*”. W: *TENCON 2018 - 2018 IEEE Region 10 Conference*. Paź. 2018, s. 1398–1402. DOI: [10.1109/TENCON.2018.8650293](https://doi.org/10.1109/TENCON.2018.8650293).

- [144] H. Mazeh, M. Saied i F. Clovis. „Development of a Multirotor-Based System for Air Quality Monitoring”. W: *Third International Conference on Electrical and Biomedical Engineering, Clean Energy and Green Computing (EBECEGC2018)*. Kw. 2018, s. 23–28. DOI: [10.1109/EBECEGC.2018.8357127](https://doi.org/10.1109/EBECEGC.2018.8357127).
- [145] L. Meier. „MAVLink - Micro Air Vehicle Message Marshalling Library”. <https://github.com/mavlink/mavlink>. 2009.
- [146] F. Menter, M. Kuntz i R. Langtry. „Ten years of industrial experience with the SST turbulence model”. W: t. 4. Sty. 2003, s. 625–632.
- [147] F. R. Menter. „Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications”. W: *AIAA Journal* 32 (8 1994), s. 1598–1605. ISSN: 00011452. DOI: [10.2514/3.12149](https://doi.org/10.2514/3.12149).
- [148] J. Modares i in. „UB-ANC planner: Energy efficient coverage path planning with multiple drones”. W: *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Maj 2017, s. 6182–6189. DOI: [10.1109/ICRA.2017.7989732](https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989732).
- [149] A. Molnár. „A Multi-Rotor System for the Collection and Analysis of Measurements to Evaluate and Spatially Demonstrate the Pollutants in the Air”. W: *International Journal of Advanced Robotic Systems* 12.12 (2015), s. 187. DOI: [10.5772/61229](https://doi.org/10.5772/61229). eprint: <https://doi.org/10.5772/61229>.
- [150] J. Monroy i in. „GADEN: A 3D Gas Dispersion Simulator for Mobile Robot Olfaction in Realistic Environments”. W: *Sensors* 17 (czer. 2017), s. 1479. DOI: [10.3390/s17071479](https://doi.org/10.3390/s17071479).
- [151] D. Moskal i in. „ALGORYTMY STEROWANIA QUADROTORA”. Raport akademicki. Politechnika Wrocławska. 2013. URL: http://www.kcir.pwr.edu.pl/~jjakubia/ProjektPrzejsciwowy/docs/projprze_quadrotor_algorytmy.pdf (term. wiz. 2019-11-25).
- [152] 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. ISSN: 0140-6736. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30752-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30752-2).
- [153] S. R. Nadarajan Assari Syamala, J. Varghese i G. Chandra. „Drones take-off towards legal regime in the United Arab Emirates”. W: *2017 International Conference on Infocom Technologies and Unmanned Systems (Trends and Future Directions) (ICTUS)*. Grud. 2017, s. 689–693. DOI: [10.1109/ICTUS.2017.8286095](https://doi.org/10.1109/ICTUS.2017.8286095).
- [154] A. Nagy i I. Jahn. „Advanced Data Acquisition System for Wind Energy Applications”. W: *Periodica Polytechnica Transportation Engineering* 47.2 (sty. 2018), s. 124–130. DOI: [10.3311/pptr.11515](https://doi.org/10.3311/pptr.11515).

- [155] „Narzędzie internetowe GPS Visualizer”. URL: <https://www.gpsvisualizer.com/> (term. wiz. 2020-12-30).
- [156] P. Neumann i in. „Aerial-based gas tomography – from single beams to complex gas distributions”. W: *European Journal of Remote Sensing* 52 (lip. 2019), s. 1–15. DOI: 10.1080/22797254.2019.1640078.
- [157] P. Neumann i in. „Autonomous Gas-Sensitive Microdrone: Wind Vector Estimation and Gas Distribution Mapping”. W: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 19 (lut. 2012), s. 50–61. DOI: 10.1109/MRA.2012.2184671.
- [158] P. Neumann i in. „Bringing Mobile Robot Olfaction to the next dimension — UAV-based remote sensing of gas clouds and source localization”. W: *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Maj 2017, s. 3910–3916. DOI: 10.1109/ICRA.2017.7989450.
- [159] P. Neumann i in. „Gas Source Localization with a Micro-Drone using Bio-Inspired and Particle Filter-based Algorithms”. W: *Advanced Robotics* 27 (czer. 2013), s. 725–738. DOI: 10.1080/01691864.2013.779052.
- [160] P. Neumann i in. „Gas Tomography Up in the Air!” W: *2018 IEEE SENSORS*. Paź. 2018, s. 1–4. DOI: 10.1109/ICSENS.2018.8630293.
- [161] P. P. Neumann, D. Lazik i M. Bartholmai. „Tomographic Reconstruction of Soil Gas Distribution From Multiple Gas Sources Based on Sparse Sampling”. W: *IEEE Sensors Journal* 16.11 (czer. 2016), s. 4501–4508. ISSN: 1558-1748. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2545103.
- [162] P. P. Neumann i in. „From Insects to Micro Air Vehicles—A Comparison of Reactive Plume Tracking Strategies”. W: *Intelligent Autonomous Systems 13*. Red. E. Menegatti i in. Cham: Springer International Publishing, 2016, s. 1533–1548. ISBN: 978-3-319-08338-4.
- [163] N. T. Nguyen i in. „Reliable nonlinear control for quadcopter trajectory tracking through differential flatness”. W: *IFAC-PapersOnLine* 50.1 (2017). 20th IFAC World Congress, s. 6971–6976. ISSN: 2405-8963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1338>.
- [164] J. Ni i in. „Development of an Unmanned Aerial Vehicle-Borne Crop-Growth Monitoring System”. W: *Sensors* 17 (mar. 2017), s. 502. DOI: 10.3390/s17030502.
- [165] „Otwarte oprogramowanie OpenFOAM do obliczeń CFD”. URL: <https://www.openfoam.com/> (term. wiz. 2020-12-30).

- [166] R. Pang. „A 2-D implementation of the Infotaxis algorithm in Python”. <https://github.com/rkp8000/infotaxis>. 2017.
- [167] J. Park i in. „A comparison of convolutional object detectors for real-time drone tracking using a PTZ camera”. W: *2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*. Paź. 2017, s. 696–699. DOI: 10.23919/ICCAS.2017.8204318.
- [168] M. Pawełczyk i M. Wojtyra. „Real World Object Detection Dataset for Quadcopter Unmanned Aerial Vehicle Detection”. W: *IEEE Access* 8 (paź. 2020), s. 174394–174409. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3026192.
- [169] L. Peng, D. Lipinski i K. Mohseni. „Dynamic Data Driven Application System for Plume Estimation Using UAVs”. W: *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 74 (kw. 2014). DOI: 10.1007/s10846-013-9964-x.
- [170] A. Plioutsias, N. Karanikas i M. M. Chatzimihailidou. „Hazard Analysis and Safety Requirements for Small Drone Operations: To What Extent Do Popular Drones Embed Safety?” W: *Risk Analysis* 38.3 (2018), s. 562–584. DOI: <https://doi.org/10.1111/risa.12867>. eprint: <https://www.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/risa.12867>.
- [171] S. Pochwała i in. „Developing of Low-Cost Air Pollution Sensor—Measurements with the Unmanned Aerial Vehicles in Poland”. W: *Sensors* 20.12 (2020). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s20123582.
- [172] S. Pochwała i in. „Optimization of air pollution measurements with unmanned aerial vehicle low-cost sensor based on an inductive knowledge management method”. W: *Optimization and Engineering* 22.3 (wrz. 2021), s. 1783–1805. ISSN: 1573-2924. DOI: 10.1007/s11081-021-09668-2.
- [173] „Polski detektor Nosacz 2 firmy Flytronic S.A. dedykowany do montażu na robotach wielowirnikowych firmy DJI”. URL: <http://uslugi.flytronic.pl/oferta/nosacz-2> (term. wiz. 2020-12-30).
- [174] „Portal o jakości powietrza – Główny Inspektorat Ochrony Środowiska”. URL: <https://powietrze.gios.gov.pl> (term. wiz. 2023-01-31).
- [175] S. Qiu i in. „Estimating contaminant source in chemical industry park using UAV-based monitoring platform, artificial neural network and atmospheric dispersion simulation”. W: *RSC Adv.* 7 (63 2017), s. 39726–39738. DOI: 10.1039/C7RA05637K.
- [176] J. Roldán i in. „Heterogeneous Multi-Robot System for Mapping Environmental Variables of Greenhouses”. W: *Sensors* 16.7 (lip. 2016), s. 1018. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s16071018.

- [177] S. Romaniuk i Z. Gosiewski. „*Kalman Filter Realization for Orientation and Position Estimation on Dedicated Processor*”. W: *Acta Mechanica et Automatica* 8.2 (2014), s. 88–94. DOI: [doi:10.2478/ama-2014-0016](https://doi.org/10.2478/ama-2014-0016).
- [178] J. Rüdiger i in. „*Implementation of electrochemical, optical and denuder-based sensors and sampling techniques on UAV for volcanic gas measurements: examples from Masaya, Turrialba and Stromboli volcanoes*”. W: *Atmospheric Measurement Techniques* 11.4 (2018), s. 2441–2457. DOI: [10.5194/amt-11-2441-2018](https://doi.org/10.5194/amt-11-2441-2018).
- [179] M. Rutkauskas i in. „*Autonomous multi-species environmental gas sensing using drone-based Fourier-transform infrared spectroscopy*”. W: *Opt. Express* 27.7 (kw. 2019), s. 9578–9587. DOI: [10.1364/OE.27.009578](https://doi.org/10.1364/OE.27.009578).
- [180] K. Sasaki i in. „*In Situ, Rotor-Based Drone Measurement of Wind Vector and Aerosol Concentration in Volcanic Areas*”. W: *Atmosphere* 12.3 (2021). ISSN: 2073-4433. DOI: [10.3390/atmos12030376](https://doi.org/10.3390/atmos12030376).
- [181] C. Seiber i in. „*Tracking Hazardous Aerial Plumes Using IoT-Enabled Drone Swarms*”. W: *2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. Lut. 2018, s. 377–382. DOI: [10.1109/WF-IoT.2018.8355118](https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2018.8355118).
- [182] H. Seliem i in. „*Delay Analysis for Drone-Based Vehicular Ad-Hoc Networks*”. W: *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. Paź. 2017, s. 1–7. DOI: [10.1109/PIMRC.2017.8292241](https://doi.org/10.1109/PIMRC.2017.8292241).
- [183] S. N. Shah i X. Xiong. „*Balluino: High Altitude Balloon/Drone Based Air Pollution and PM 2.5 Monitoring System*”. W: *2019 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference (LISAT)*. 2019, s. 1–5. DOI: [10.1109/LISAT.2019.8817337](https://doi.org/10.1109/LISAT.2019.8817337).
- [184] F. Shams, G. Bacci i L. Sanguinetti. „*Energy-Efficient Power Control for Drone Communications*”. W: *European Wireless 2018; 24th European Wireless Conference*. Maj 2018, s. 1–6.
- [185] M. Slowik, Z. Gosiewski i D. Oldziej. „*HIL investigations of extended UAV on-board controller*”. W: *Control and cybernetics* 45 (sty. 2017), s. 329–337.
- [186] B. Smith i in. „*Applicability of unmanned aerial systems for leak detection*”. W: *2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. Czer. 2016, s. 1220–1227. DOI: [10.1109/ICUAS.2016.7502635](https://doi.org/10.1109/ICUAS.2016.7502635).
- [187] P. Smoczyński, Ł. Starzec i G. Granosik. „*Autonomous drone control system for object tracking: Flexible system design with implementation example*”. W: *2017 22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*. Sierp. 2017, s. 734–738. DOI: [10.1109/MMAR.2017.8046919](https://doi.org/10.1109/MMAR.2017.8046919).

- [188] B. Song i in. „*Effect of high-level fine particulate matter and its interaction with meteorological factors on AECOPD in Shijiazhuang, China*”. W: *Scientific Reports* 12.1 (maj 2022), s. 8711. ISSN: 2045-2322. DOI: [10.1038/s41598-022-12791-4](https://doi.org/10.1038/s41598-022-12791-4).
- [189] C. Stachniss, C. Plagemann i A. J. Lilienthal. „*Learning Gas Distribution Models Using Sparse Gaussian Process Mixtures*”. W: *Auton. Robots* 26.2–3 (kw. 2009), s. 187–202. ISSN: 0929-5593. DOI: [10.1007/s10514-009-9111-5](https://doi.org/10.1007/s10514-009-9111-5).
- [190] I. Stavroulas i in. „*Field Evaluation of Low-Cost PM Sensors (Purple Air PA-II) Under Variable Urban Air Quality Conditions, in Greece*”. W: *Atmosphere* 11.9 (2020). ISSN: 2073-4433. DOI: [10.3390/atmos11090926](https://doi.org/10.3390/atmos11090926).
- [191] J. Stix i in. „*Using Drones and Miniaturized Instrumentation to Study Degassing at Turrialba and Masaya Volcanoes, Central America*”. W: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 123.8 (2018), s. 6501–6520. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018JB015655>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2018JB015655>.
- [192] D. Stojcsics, Z. Domozi i M. Andras. „*Air Pollution Localisation Based on UAV Survey*”. W: *SMC 2018 : 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. Paź. 2018, s. 2546–2551. DOI: [10.1109/SMC.2018.00436](https://doi.org/10.1109/SMC.2018.00436).
- [193] P. Strzelczyk i K. Macek-Kamińska. „*Kontroler lotu dla bezzałogowych obiektów latających*”. W: *Pomiary Automatyka Robotyka* 19.218 (kw. 2015), s. 69–73. DOI: [10.14313/PAR_218/69](https://doi.org/10.14313/PAR_218/69).
- [194] 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 (list. 2022), s. 012010. DOI: [10.1088/1742-6596/2367/1/012010](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2367/1/012010).
- [195] G. Suchanek. „*Wielowirnikowy robot latający*”. Praca magisterska. Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, 2017.
- [196] G. Suchanek i W. Ciesielka. „*Design and experimental research of a quadcopter flying robot*”. W: t. 46. 00012. 2018, s. 1–8.
- [197] 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 (wrz. 2022), s. 86–104. DOI: [10.35784/acs-2022-23](https://doi.org/10.35784/acs-2022-23).

- [198] 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). ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en16072959.
- [199] G. Suchanek, J. Wołoszyn i A. Gołaś. „*Evaluation of Selected Algorithms for Air Pollution Source Localisation Using Drones*”. W: *Sustainability* 14.5 (2022). ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su14053049.
- [200] A. Sun i in. „*Drone privacy shield: A WiFi based defense*”. W: *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. Paź. 2017, s. 1–5. DOI: 10.1109/PIMRC.2017.8292780.
- [201] S. Szczesny i in. „*Robot typu quadcopter sterowany mikrokontrolerami o niewielkiej mocy obliczeniowej*”. W: *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* Nr 46 (2015), s. 93–96. ISSN: 1425-5766.
- [202] M. Szruba. „*Przyszłość dronów w budownictwie*”. W: *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne* Nr 1 (2017), s. 30–33. ISSN: 1734-6681.
- [203] Y. Takei i in. „*Development of 3D gas source localization using multi-copter with gas sensor array*”. W: *2019 IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose (ISOEN)*. Maj 2019, s. 1–4. DOI: 10.1109/ISOEN.2019.8823396.
- [204] S. Tanaka i in. „*An experimental study of 3D odor plume tracking using multicopter with gas sensor array*”. W: *2015 IEEE SENSORS*. List. 2015, s. 1–4. DOI: 10.1109/ICSENS.2015.7370581.
- [205] K. M. Thu i A. I. Gavrillov. „*Designing and Modeling of Quadcopter Control System Using LI Adaptive Control*”. W: *Procedia Computer Science* 103 (2017). XII International Symposium Intelligent Systems 2016, INTELS 2016, 5-7 October 2016, Moscow, Russia, s. 528–535. ISSN: 1877-0509. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.01.046>.
- [206] D. Tobór, J. Barcik i P. Czech. „*LEGAL ASPECTS OF AIR TRANSPORT SAFETY AND THE USE OF DRONES*”. W: *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport* 97 (grud. 2017), s. 167–179. DOI: 10.20858/sjsutst.2017.97.15.
- [207] M. Trujillo i in. „*Novel Aerial Manipulator for Accurate and Robust Industrial NDT Contact Inspection: A New Tool for the Oil and Gas Inspection Industry*”. W: *Sensors* 19.6 (mar. 2019), s. 1305. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s19061305.

- [208] F. Ustolin i R. Taccani. „*Fuel cells for airborne usage: Energy storage comparison*”. W: *International Journal of Hydrogen Energy* 43.26 (2018). HYdrogen POwer THEoretical and Engineering Solutions –International Symposium (Hypothesis XII), s. 11853–11861. ISSN: 0360-3199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.017>.
- [209] Y. Velan i Música. „*Cost Effective Design and Development of Manned Drone*”. W: *2017 First International Conference on Recent Advances in Aerospace Engineering (ICRAAE)* (2017), s. 1–5.
- [210] M. Vergassola, E. Villiermaux i B. Shraiman. „*‘Infotaxis’ as a strategy for searching without gradients*”. W: *Nature* 445 (2007), s. 406–409. ISSN: 1476-4687. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature05464>.
- [211] T. Villa i in. „*Development and Validation of a UAV Based System for Air Pollution Measurements*”. W: *Sensors* 16.12 (grud. 2016), s. 2202. ISSN: 1424-8220. DOI: [10.3390/s16122202](https://doi.org/10.3390/s16122202).
- [212] T. F. Villa i in. „*Characterization of the particle emission from a ship operating at sea using an unmanned aerial vehicle*”. W: *Atmospheric Measurement Techniques* 12.1 (2019), s. 691–702. DOI: [10.5194/amt-12-691-2019](https://doi.org/10.5194/amt-12-691-2019).
- [213] W. Walendziuk i in. „*MAVLink-based communication for air pollution measurement system*”. W: *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*. Paź. 2018, s. 45. DOI: [10.1117/12.2501380](https://doi.org/10.1117/12.2501380).
- [214] W. Walendziuk i in. „*Unmanned aerial vehicle as a measurement tool in engineering and environmental protection*”. W: *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*. SPIE, 2018, s. 1749–1757. DOI: [10.1117/12.2501378](https://doi.org/10.1117/12.2501378).
- [215] D. Wang, Z. Wang i Z. Peng. „*Using unmanned aerial vehicle to investigate the vertical distribution of fine particulate matter*”. W: *International Journal of Environmental Science and Technology* 17 (lip. 2019). DOI: [10.1007/s13762-019-02449-6](https://doi.org/10.1007/s13762-019-02449-6).
- [216] Q. Wang. „*REAL-TIME ATMOSPHERIC MONITORING OF URBAN AIR POLLUTION USING UNMANNED AERIAL VEHICLES*”. W: *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. Wrz. 2019, s. 79–88. DOI: [10.2495/AIR190081](https://doi.org/10.2495/AIR190081).
- [217] R. Wang i in. „*Data assimilation in air contaminant dispersion using a particle filter and expectation-maximization algorithm*”. W: *Atmosphere* 8 (wrz. 2017). DOI: [10.3390/atmos8090170](https://doi.org/10.3390/atmos8090170).

- [218] T. Wiedemann i in. „*Bayesian gas source localization and exploration with a multi-robot system using partial differential equation based modeling*”. W: *2017 ISOCS/IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose (ISOEN)*. Maj 2017, s. 1–3. DOI: [10.1109/ISOEN.2017.7968884](https://doi.org/10.1109/ISOEN.2017.7968884).
- [219] T. Wiedemann i in. „*Probabilistic modeling of gas diffusion with partial differential equations for multi-robot exploration and gas source localization*”. W: *2017 European Conference on Mobile Robots (ECMR)*. IEEE, wrz. 2017. DOI: [10.1109/ecmr.2017.8098707](https://doi.org/10.1109/ecmr.2017.8098707).
- [220] D. C. Wilcox. „*Turbulence Modeling for CFD (Third Edition)*”. D C W Industries, 2006. ISBN: 1928729088.
- [221] N. Ya’acob i in. „*UAV environment monitoring system*”. W: *2017 International Conference on Electrical, Electronics and System Engineering (ICEESE)*. List. 2017, s. 105–109. DOI: [10.1109/ICEESE.2017.8298395](https://doi.org/10.1109/ICEESE.2017.8298395).
- [222] S. Yamaguchi i in. „*Autonomous position control of multi-unmanned aerial vehicle network designed for long range wireless data transmission*”. W: grud. 2017, s. 127–132. DOI: [10.1109/SII.2017.8279200](https://doi.org/10.1109/SII.2017.8279200).
- [223] S. Yang i in. „*Natural Gas Fugitive Leak Detection Using an Unmanned Aerial Vehicle: Measurement System Description and Mass Balance Approach*”. W: *Atmosphere 9* (paź. 2018), s. 383. DOI: [10.3390/atmos9100383](https://doi.org/10.3390/atmos9100383).
- [224] T. Yang, K. Zhou i T. Ding. „*Air pollution impacts on public health: Evidence from 110 cities in Yangtze River Economic Belt of China*”. W: *Science of The Total Environment* 851 (2022), s. 158125. ISSN: 0048-9697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158125>.
- [225] Y. Yang i in. „*Quadrotor helicopters trajectory tracking with stochastic model predictive control*”. W: *2017 Australian and New Zealand Control Conference (ANZCC)*. Grud. 2017, s. 166–171. DOI: [10.1109/ANZCC.2017.8298505](https://doi.org/10.1109/ANZCC.2017.8298505).
- [226] Ş. Yıldırım, N. Çabuk i V. Bakırcıoğlu. „*Design and trajectory control of universal drone system*”. W: *Measurement* 147 (2019), s. 106834. ISSN: 0263-2241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.07.062>.
- [227] T. Yoshida i in. „*Determination of gas source existence in a specified area by active airflow generator robots*”. W: *IEEE Sensors 2015*. List. 2015, s. 1–4. DOI: [10.1109/ICSENS.2015.7370339](https://doi.org/10.1109/ICSENS.2015.7370339).

- [228] Q. Yu i in. „*Gas Plume Tracking of Micro-aerial Vehicle in Tunnel Environment*”. W: *Innovative Techniques and Applications of Modelling, Identification and Control: Selected and Expanded Reports from ICMIC’17*. Red. Quanmin Zhu, Jing Na i Xing Wu. Singapore: Springer Singapore, 2018, s. 31–51. ISBN: 978-981-10-7212-3. DOI: 10.1007/978-981-10-7212-3_3.
- [229] Q. Yu i in. „*Research on Multiple Unmanned Aerial Vehicles Area Coverage for Gas Distribution Mapping*”. W: *2018 10th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*. Lip. 2018, s. 1–5. DOI: 10.1109/ICMIC.2018.8529963.
- [230] N. Yungaicela i in. „*UAV-Based Air Pollutant Source Localization Using Combined Metaheuristic and Probabilistic Methods*”. W: *Applied Sciences* 9 (wrz. 2019), s. 1–18. DOI: 10.3390/app9183712.
- [231] N. Yungaicela i in. „*UAV-based Air Pollutant Source Localization Using Gradient and Probabilistic Methods*”. W: *2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. Czer. 2018, s. 702–707.
- [232] S. Zhao i in. „*Nonlinear Model Predictive Control for the Stabilization of a Wheeled Unmanned Aerial Vehicle on a Pipe*”. W: *IEEE Robotics and Automation Letters* 4.4 (paź. 2019), s. 4314–4321. ISSN: 2377-3766. DOI: 10.1109/LRA.2019.2931821.
- [233] Y. Zhou. „*Dokumentacja techniczna czujnika cząstek stałych PMS5003 firmy Plantower*”. http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/resources-page/plantower-pms5003-manual_v2-3.pdf. 2016.
- [234] C. Zieliński. „*Robotics: Techniques, Functions, Social Role Part 2. Current Capabilities of Robots*”. W: *Pomiary Automatyka Robotyka* 27 (lut. 2023), s. 5–18. DOI: 10.14313/PAR_247/5.
- [235] I. Zubrycki i G. Granosik. „*Introducing modern robotics with ROS and Arduino*”. W: *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems* 8.1 (sty. 2014), s. 69–75. DOI: 10.14313/JAMRIS_1-2014/9.

Załącznik A. Analityczne oszacowanie parametru

y^+

Z definicji, parametr y^+ określony jest równaniem:

$$y^+ = \frac{u_* \cdot y}{\nu} \quad (1)$$

gdzie: u_* - prędkość tarcia w okolicach ścianki, y - wysokość pierwszej warstwy przyściennej, ν - lepkość kinematyczna płynu (tutaj powietrza). Szacowanie niezbędnej wysokości pierwszej warstwy przyściennej wykonano na podstawie [42]. Przyjmując następujące założenia:

- prędkość obrotowa śmigła $\omega = 421.96 \frac{1}{s}$,
- średnica śmigła $d = 10 \text{ cali} = 0.254 \text{ m}$,
- gęstość powietrza $\rho = 1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$,
- lepkość powietrza $\mu = 1.7894 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$,
- pożądaną wartość parametru $y^+ = 1$.

Takie wartości odpowiadały warunkom stanu zawisu robota quadcopter, wyposażonego w sam kontroler lotu bez układu pomiarowego. Oszacowano najpierw prędkość przepływu U_∞ , czyli w tym przypadku prędkość liniową końca łopaty śmigła:

$$U_\infty = \omega \frac{d}{2} = 53.59 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (2)$$

Znając prędkość przepływu, obliczono liczbę Reynoldsa R_x :

$$R_x = \frac{\rho \cdot U_\infty \cdot d}{\mu} = 931831.48 [-] \quad (3)$$

Na podstawie dużej otrzymanej wartości (znacznie przekraczającej orientacyjny próg 3000) można stwierdzić że przepływ ma charakter turbulentny. Współczynnik tarcia warstwy przyściennej C_f dla $R_x < 10^9$ na podstawie równania Schlichting'a [42] można oszacować jako:

$$C_f = (2 \log_{10} R_x - 0.65)^{-2.3} = 0.00379246 [-] \quad (4)$$

Przyścienne napężenie ścinające τ_w można określić na podstawie definicji oporu C_f . Przekształcając, jest:

$$\tau_w = \frac{C_f \cdot \rho \cdot U_\infty^2}{2} = 6.6708 \left[\frac{kg}{m \cdot s^2} \right] \quad (5)$$

Prędkość tarcia u_* dana jest natomiast zależnością:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = 2.3336 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (6)$$

Ostatecznie, wysokość pierwszej warstwy przyściennej y jest równa:

$$y = \frac{y^+ \cdot \mu}{u_* \cdot \rho} = 6.26 \cdot 10^{-6} [m] \quad (7)$$

Podsumowując, na podstawie szacunkowych obliczeń analitycznych przyjęto wysokość pierwszej warstwy przyściennej y na wartość około 0.006 mm.

Załącznik B. Wyniki badań symulacyjnych z wykorzystaniem analizowanych algorytmów poszukiwania źródeł zanieczyszczenia

W tym załączniku zamieszczono kompletne wyniki badań symulacyjnych z wykorzystaniem analizowanych algorytmów poszukiwania źródeł zanieczyszczenia.

Tabela B.1. Wyniki dla algorytmu 1 (poszukiwanie na regularnej siatce punktów) dla analizowanych przypadków

Obszar	Położenie źródła	Odl. w linii pros. do źr. [m]	Całk. przeb. droga [m]	Całk. czas lotu [s]	Udział pomiarów [%]	Błąd bezwzględny lokalizacji [m]	Czas obliczeń [s]	Zmierzone stężenia [—]	
								Maks.	Średnie
30 m × 30 m, start w pozycji (30 m, 0 m)	(3,75 m, 26,25 m)	37,12	180	255	29	5,30	0,009	10,97	3,51
	(18,75 m, 15,00 m)	18,75	180	255	29	3,75	0,009	24,56	2,24
	(26,25 m, 26,25 m)	26,52	180	255	29	5,30	0,009	10,97	0,93
60 m × 60 m, start w pozycji (60 m, 0 m)	(7,5 m, 52,5 m)	74,25	360	435	17	23,72	0,009	5,72	1,62
	(37,5 m, 30,0 m)	37,50	360	435	17	7,50	0,009	17,57	1,22
	(52,5 m, 52,5 m)	53,03	360	435	17	10,61	0,009	4,06	0,32
100 m × 100 m, start w pozycji (100 m, 0 m)	(12,5 m, 87,5 m)	123,74	600	675	11	39,53	0,009	2,98	0,80
	(62,5 m, 50,0 m)	62,50	600	675	11	12,50	0,009	13,51	0,85
	(87,5 m, 87,5 m)	88,93	600	675	11	17,68	0,009	1,30	0,10
200 m × 200 m, start w pozycji (200 m, 0 m)	(25 m, 175 m)	247,49	1200	1275	6	127,48	0,009	0,97	0,22
	(125 m, 100 m)	125,00	1200	1275	6	25,00	0,009	9,18	0,54
	(175 m, 175 m)	176,7	1200	1275	6	—	0,009	0,10	0,01

Tabela B.2. Wyniki dla algorytmu 2a (wyznaczanie kierunku lotu na podstawie wartości maksymalnej, wariant a) dla analizowanych przypadków

Obszar	Położenie źródła	Odl. w linii pros. do źr. [m]	Całk. przeb. droga [m]	Całk. czas lotu [s]	Udział pomiarów [%]	Błąd bezwzględny lokalizacji [m]	Czas obliczeń [s]	Zmierzone stężenia [—]	
								Maks.	Średnie
30 m × 30 m, start w pozycji (30 m, 0 m)	(3,75 m, 26,25 m)	37,12	137	215	36	4,51	0,015	22,27	10,06
	(18,75 m, 15,00 m)	18,75	144	222	35	1,25	0,015	39,75	10,57
	(26,25 m, 26,25 m)	26,52	85	115	26	—	0,015	0,29	0,04
60 m × 60 m, start w pozycji (60 m, 0 m)	(7,5 m, 52,5 m)	74,25	275	353	22	9,02	0,015	15,63	5,87
	(37,5 m, 30,0 m)	37,50	288	366	21	2,50	0,015	29,54	5,46
	(52,5 m, 52,5 m)	53,03	170	200	15	—	0,015	0,00	0,00
100 m × 100 m, start w pozycji (100 m, 0 m)	(12,5 m, 87,5 m)	123,74	458	536	15	15,04	0,015	11,75	3,70
	(62,5 m, 50,0 m)	62,50	480	558	14	4,17	0,015	23,38	3,25
	(87,5 m, 87,5 m)	88,93	283	313	10	—	0,015	0,00	0,00
200 m × 200 m, start w pozycji (200 m, 0 m)	(25 m, 175 m)	247,49	916	994	8	30,08	0,015	7,57	1,78
	(125 m, 100 m)	125,00	960	1038	8	8,33	0,015	16,67	1,70
	(175 m, 175 m)	176,7	565	595	5	—	0,015	0,00	0,00

Tabela B.3. Wyniki dla algorytmu 2a (wyznaczenie kierunku lotu na podstawie wartości maksymalnej, wariant a) dla analizowanych przypadków, przy $R_1 = A/2$

Obszar	Położenie źródła	Odl. w linii pros. do źr. [m]	Całk. przeb. droga [m]	Całk. czas lotu [s]	Udział pomiarów [%]	Błąd bezwzględny lokalizacji [m]	Czas obliczeń [s]	Zmierzone stężenia [—]		
								Maks.	Min. Średnie	
30 m × 30 m, start w pozycji (30 m, 0 m)	(3,75 m, 26,25 m) (18,75 m, 15,00 m) (26,25 m, 26,25 m)	37,12 18,75 26,52	190 205 205	268 283 283	29 28 28	0,91 0,00 3,17	0,015 0,015 0,015	39,56 113,52 25,73	0,00 0,00 0,00	6,72 11,64 4,74
60 m × 60 m, start w pozycji (60 m, 0 m)	(7,5 m, 52,5 m) (37,5 m, 30,0 m) (52,5 m, 52,5 m)	74,25 37,50 53,03	380 411 424	458 489 502	17 16 16	1,82 0,00 6,35	0,015 0,015 0,015	26,74 113,52 18,02	0,00 0,00 0,00	3,50 8,02 3,69
100 m × 100 m, start w pozycji (100 m, 0 m)	(12,5 m, 87,5 m) (62,5 m, 50,0 m) (87,5 m, 87,5 m)	123,74 62,50 88,93	633 684 707	711 762 785	11 10 10	3,03 0,00 10,58	0,015 0,015 0,015	18,44 113,52 13,42	0,00 0,00 0,00	2,14 6,46 2,19
200 m × 200 m, start w pozycji (200 m, 0 m)	(25 m, 175 m) (125 m, 100 m) (175 m, 175 m)	247,49 125,00 176,7	1266 1369 777	1344 1447 807	6 5 4	6,07 0,00 —	0,015 0,015 0,015	9,20 113,52 0,25	0,00 0,00 0,00	1,03 5,37 0,03

Tabela B.4. Wyniki dla algorytmu 2a (wyznaczenie kierunku lotu na podstawie wartości maksymalnej, wariant a) dla analizowanych przypadków, przy $R_1 = \sqrt{2}A/2$

Obszar	Położenie źródła	Odl. w linii pros. do źr. [m]	Całk. przeb. droga [m]	Całk. czas lotu [s]	Udział pomiarów [%]	Błąd bezwzględny lokalizacji [m]	Czas obliczeń [s]	Zmierzone stężenia [—]		
								Maks.	Min.	
30 m × 30 m, start w pozycji (30 m, 0 m)	(3,75 m, 26,25 m)	37,12	277	355	22	11,89	0,015	12,87	0,00	5,14
	(18,75 m, 15,00 m)	18,75	282	360	22	1,55	0,015	36,31	0,00	6,75
	(26,25 m, 26,25 m)	26,52	281	359	22	0,00	0,015	113,52	0,00	8,08
60 m × 60 m, start w pozycji (60 m, 0 m)	(7,5 m, 52,5 m)	74,25	554	632	12	23,79	0,015	9,45	0,00	2,61
	(37,5 m, 30,0 m)	37,50	563	641	12	3,11	0,015	26,78	0,00	3,59
	(52,5 m, 52,5 m)	53,03	582	660	12	15,00	0,015	12,25	0,00	2,77
100 m × 100 m, start w pozycji (100 m, 0 m)	(12,5 m, 87,5 m)	123,74	923	1001	8	39,64	0,015	6,90	0,00	1,49
	(62,5 m, 50,0 m)	62,50	939	1017	8	5,18	0,015	21,08	0,00	2,23
	(87,5 m, 87,5 m)	88,93	971	1049	7	35,36	0,015	7,43	0,00	1,23
200 m × 200 m, start w pozycji (200 m, 0 m)	(25 m, 175 m)	247,49	1041	1071	3	—	0,015	0,91	0,00	0,09
	(125 m, 100 m)	125,00	1877	1955	4	10,36	0,015	14,91	0,00	1,23
	(175 m, 175 m)	176,7	1041	1071	3	—	0,015	0,10	0,00	0,01

Tabela B.5. Wyniki dla algorytmu 2b (wyznaczanie kierunku lotu na podstawie wartości maksymalnej, wariant b) dla analizowanych przypadków

Obszar	Położenie źródła	Odl. w linii pros. do źr. [m]	Całk. przeb. droga [m]	Całk. czas lotu [s]	Udział pomiarów [%]	Błąd bezwzględny lokalizacji [m]	Czas obliczeń [s]	Zmierzone stężenia [—]	
								Maks.	Średnie
30 m × 30 m, start w pozycji (30 m, 0 m)	(3,75 m, 26,25 m)	37,12	227	314	28	4,51	0,02	22,27	9,31
	(18,75 m, 15,00 m)	18,75	234	321	27	1,25	0,02	39,75	9,49
	(26,25 m, 26,25 m)	26,52	245	332	26	0,30	0,02	66,29	8,56
60 m × 60 m, start w pozycji (60 m, 0 m)	(7,5 m, 52,5 m)	74,25	455	542	16	9,02	0,02	15,63	5,42
	(37,5 m, 30,0 m)	37,50	468	555	16	2,50	0,02	29,54	4,90
	(52,5 m, 52,5 m)	53,03	490	571	15	0,61	0,02	49,55	4,83
100 m × 100 m, start w pozycji (100 m, 0 m)	(12,5 m, 87,5 m)	123,74	758	845	10	15,04	0,02	11,75	3,41
	(62,5 m, 50,0 m)	62,50	780	867	10	4,17	0,02	23,38	2,92
	(87,5 m, 87,5 m)	88,93	817	904	10	1,01	0,02	38,62	3,18
200 m × 200 m, start w pozycji (200 m, 0 m)	(25 m, 175 m)	247,49	1516	1603	5	30,08	0,02	7,57	1,63
	(125 m, 100 m)	125,00	1560	1647	5	8,33	0,02	16,67	1,52
	(175 m, 175 m)	176,7	1634	1721	5	2,02	0,02	25,51	1,78

Tabela B.6. Wyniki dla algorytmu 3 (infotaksja) dla analizowanych przypadków

Obszar	Położenie źródła	Odl. w linii pros. do źr. [m]	Całk. przeb. droga [m]	Całk. czas lotu [s]	Udział pomiarów [%]	Błąd bezwzględny lokalizacji [m]	Czas obliczeń [s]	Zmierzone stężenia [—]	
								Maks.	Min.
30 m × 30 m, start w pozycji (30 m, 0 m)	(3,75 m, 26,25 m)	37,12	109	374	71	3,02	12,30	59,24	0,08
	(18,75 m, 15,00 m)	18,75	81	275	70	2,60	9,36	72,11	0,05
	(26,25 m, 26,25 m)	26,52	78	274	72	1,30	8,77	46,35	0,00
60 m × 60 m, start w pozycji (60 m, 0 m)	(7,5 m, 52,5 m)	74,25	150	520	71	1,61	63,30	46,15	0,00
	(37,5 m, 30,0 m)	37,50	151	524	71	1,50	65,61	56,65	0,01
	(52,5 m, 52,5 m)	53,03	148	529	72	2,65	60,22	46,15	0,00
100 m × 100 m, start w pozycji (100 m, 0 m)	(12,5 m, 87,5 m)	123,74	236	851	72	1,94	256,28	46,15	0,00
	(62,5 m, 50,0 m)	62,50	160	555	71	2,18	177,44	56,65	0,00
	(87,5 m, 87,5 m)	88,93	140	526	73	1,00	145,39	40,57	0,00
200 m × 200 m, start w pozycji (200 m, 0 m)	(25 m, 175 m)	247,49	434	1548	72	1,96	1795,85	113,52	0,00
	(125 m, 100 m)	125,00	272	966	72	0,94	1100,45	90,18	0,00
	(175 m, 175 m)	176,7	258	976	74	1,55	1023,17	113,52	0,00

Tabela B.7. Wyniki dla algorytmu 4a (wyznaczanie kierunku lotu na podstawie planu eksperymentu, wariant a) dla analizowanych przypadków

Obszar	Położenie źródła	Odl. w linii pros. do źr. [m]	Całk. przeb. droga [m]	Całk. czas lotu [s]	Udział pomiarów [%]	Błąd bezwzględny lokalizacji [m]	Czas obliczeń [s]	Zmierzone stężenia [—]	
								Maks.	Średnie
30 m × 30 m, start w pozycji (30 m, 0 m)	(3,75 m, 26,25 m)	37,12	149	233	36	3,95	0,05	22,27	10,06
	(18,75 m, 15,00 m)	18,75	155	239	35	1,25	0,05	39,75	11,92
	(26,25 m, 26,25 m)	26,52	85	115	26	—	0,015	0,29	0,04
60 m × 60 m, start w pozycji (60 m, 0 m)	(7,5 m, 52,5 m)	74,25	297	381	22	7,91	0,05	15,63	6,21
	(37,5 m, 30,0 m)	37,50	311	395	21	2,50	0,05	29,54	6,61
	(52,5 m, 52,5 m)	53,03	170	200	15	—	0,015	0,00	0,00
100 m × 100 m, start w pozycji (100 m, 0 m)	(12,5 m, 87,5 m)	123,74	496	580	14	13,18	0,05	11,75	3,97
	(62,5 m, 50,0 m)	62,50	518	602	14	4,17	0,05	23,38	4,22
	(87,5 m, 87,5 m)	88,93	283	313	10	—	0,015	0,00	0,00
200 m × 200 m, start w pozycji (200 m, 0 m)	(25 m, 175 m)	247,49	991	1075	8	26,35	0,05	7,57	1,95
	(125 m, 100 m)	125,00	1035	1119	8	8,33	0,05	16,67	2,41
	(175 m, 175 m)	176,7	565	595	5	—	0,015	0,00	0,00

Tabela B.8. Wyniki dla algorytmu 4b (wyznaczanie kierunku lotu na podstawie planu eksperymentu, wariant b) dla analizowanych przypadków

Obszar	Położenie źródła	Odl. w linii pros. do źr. [m]	Całk. przeb. droga [m]	Całk. czas lotu [s]	Udział pomiarów [%]	Błąd bezwzględny lokalizacji [m]	Czas obliczeń [s]	Zmierzone stężenia [—]	
								Maks.	Średnie
30 m × 30 m, start w pozycji (30 m, 0 m)	(3,75 m, 26,25 m)	37,12	150	234	36	3,95	0,05	22,20	10,50
	(18,75 m, 15,00 m)	18,75	155	239	35	1,25	0,05	39,75	11,92
	(26,25 m, 26,25 m)	26,52	85	115	26	—	0,015	0,29	0,04
60 m × 60 m, start w pozycji (60 m, 0 m)	(7,5 m, 52,5 m)	74,25	300	384	22	7,91	0,05	15,59	6,22
	(37,5 m, 30,0 m)	37,50	311	395	21	2,50	0,05	29,54	6,61
	(52,5 m, 52,5 m)	53,03	170	200	15	—	0,015	0,00	0,00
100 m × 100 m, start w pozycji (100 m, 0 m)	(12,5 m, 87,5 m)	123,74	501	585	14	13,18	0,05	11,72	3,97
	(62,5 m, 50,0 m)	62,50	518	602	14	4,17	0,05	23,38	4,22
	(87,5 m, 87,5 m)	88,93	283	313	10	—	0,015	0,00	0,00
200 m × 200 m, start w pozycji (200 m, 0 m)	(25 m, 175 m)	247,49	991	1075	8	26,35	0,05	7,57	1,95
	(125 m, 100 m)	125,00	1035	1119	8	8,33	0,05	16,67	2,41
	(175 m, 175 m)	176,7	565	595	5	—	0,015	0,00	0,00

Tabela B.9. Wyniki dla algorytmu 4c (wyznaczanie kierunku lotu na podstawie planu eksperymentu, wariant c) dla analizowanych przypadków

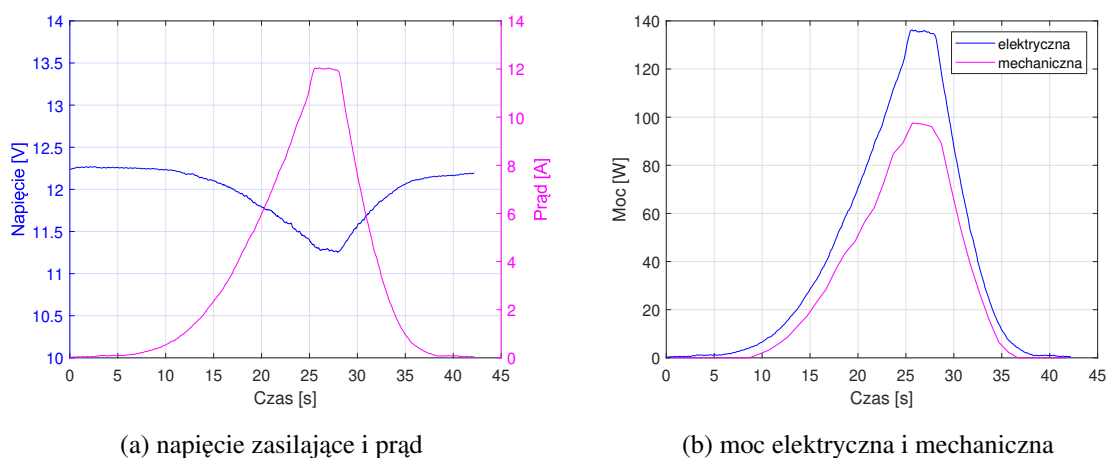
Obszar	Położenie źródła	Odl. w linii pros. do źr. [m]	Całk. przeb. droga [m]	Całk. czas lotu [s]	Udział pomiarów [%]	Błąd bezwzględny lokalizacji [m]	Czas obliczeń [s]	Zmierzone stężenia [—]	
								Maks.	Średnie
30 m × 30 m, start w pozycji (30 m, 0 m)	(3,75 m, 26,25 m)	37,12	150	234	36	3,95	0,05	22,20	10,50
	(18,75 m, 15,00 m)	18,75	155	239	35	1,25	0,05	39,75	11,92
	(26,25 m, 26,25 m)	26,52	85	115	26	—	0,015	0,29	0,04
60 m × 60 m, start w pozycji (60 m, 0 m)	(7,5 m, 52,5 m)	74,25	300	384	22	7,91	0,05	15,59	6,22
	(37,5 m, 30,0 m)	37,50	311	395	21	2,5	0,05	29,54	6,61
	(52,5 m, 52,5 m)	53,03	170	200	15	—	0,015	0,00	0,00
100 m × 100 m, start w pozycji (100 m, 0 m)	(12,5 m, 87,5 m)	123,74	501	585	14	13,18	0,05	11,72	3,97
	(62,5 m, 50,0 m)	62,50	518	602	14	4,17	0,05	23,38	4,22
	(87,5 m, 87,5 m)	88,93	283	313	10	—	0,015	0,00	0,00
200 m × 200 m, start w pozycji (200 m, 0 m)	(25 m, 175 m)	247,49	991	1075	8	26,35	0,05	7,57	1,95
	(125 m, 100 m)	125,00	1035	1119	8	8,33	0,05	16,67	2,41
	(175 m, 175 m)	176,7	565	595	5	—	0,015	0,00	0,00

Tabela B.10. Wyniki dla algorytmu 5 (wyznaczenie kierunku lotu na podstawie gradientu) dla analizowanych przypadków

Obszar	Położenie źródła	Odl. w linii pros. do źr. [m]	Całk. przeb. droga [m]	Całk. czas lotu [s]	Udział pomiarów [%]	Błąd bezwzględny lokalizacji [m]	Czas obliczeń [s]	Zmierzone stężenia [—]		
								Maks.	Min.	Średnie
30 m × 30 m, start w pozycji (30 m, 0 m)	(3,75 m, 26,25 m)	37,12	184	355	46	1,34	0,06	33,21	0,04	11,87
	(18,75 m, 15,00 m)	18,75	85	166	47	0,98	0,05	48,86	0,31	11,35
	(26,25 m, 26,25 m)	26,52	97	156	39	1,77	0,06	34,08	0,00	11,58
60 m × 60 m, start w pozycji (60 m, 0 m)	(7,5 m, 52,5 m)	74,25	271	458	39	1,29	0,06	38,72	0,00	10,45
	(37,5 m, 30,0 m)	37,50	71	117	40	1,50	0,06	36,85	0,01	16,80
	(52,5 m, 52,5 m)	53,03	347	469	28	1,58	0,07	34,87	0,00	8,45
100 m × 100 m, start w pozycji (100 m, 0 m)	(12,5 m, 87,5 m)	123,74	499	897	42	1,00	0,06	41,27	0,00	8,53
	(62,5 m, 50,0 m)	62,50	398	507	22	0,50	0,06	56,65	0,00	12,76
	(87,5 m, 87,5 m)	88,93	342	510	33	0,71	0,06	45,11	0,00	10,23
200 m × 200 m, start w pozycji (200 m, 0 m)	(25 m, 175 m)	247,49	2912	3882	25	1,41	0,08	31,22	0,00	5,14
	(125 m, 100 m)	125,00	867	1147	28	1,00	0,07	43,50	0,00	10,00
	(175 m, 175 m)	176,7	2866	3288	13	1,41	0,07	31,22	0,00	5,63

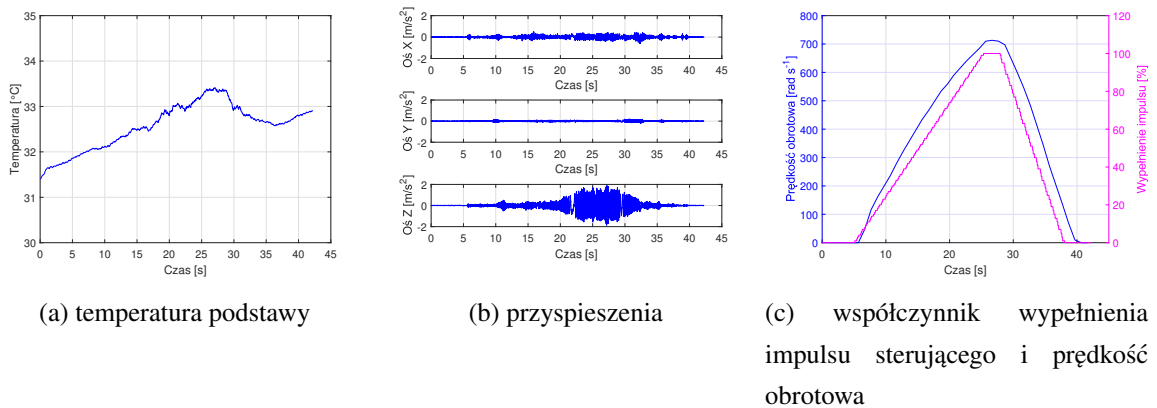
Załącznik C. Pomiary parametrów zespołów napędowych na stanowisku hamowni

Na rysunkach C.1 i C.2 zaprezentowano pozostałe mierzone i wyznaczone parametry na przykładzie zestawu w którego skład wchodził silnik MT2213, sterownik silnika i śmigło typu 1045 firmy Gefman z ABS.



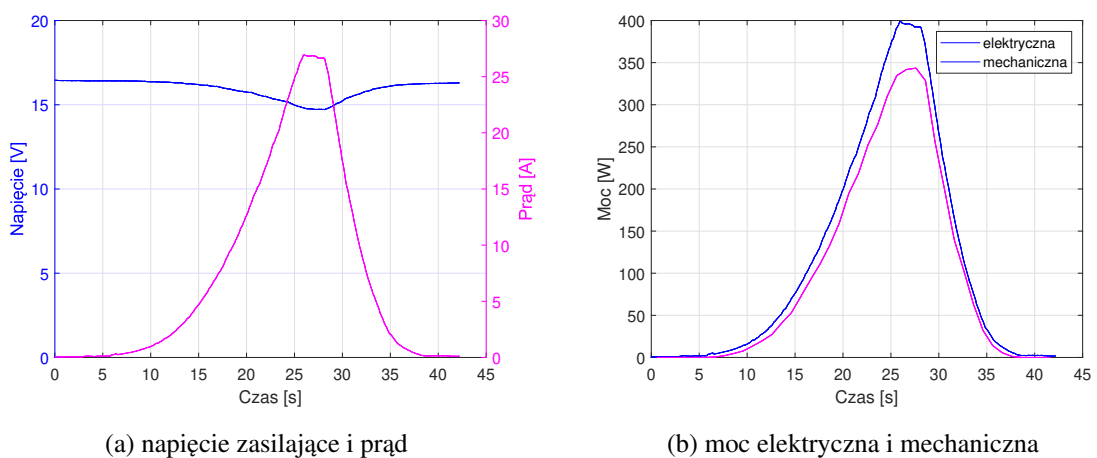
Rys. C.1. Napięcie zasilające, prąd oraz wyznaczone moce – silnik MT2213 i śmigło 1045

Na rysunku C.1a zaprezentowano zmierzone wartości skuteczne prądu i napięcia na zasilaniu sterownika silnika. Natomiast rysunek C.1b przedstawia wyznaczone moce. Moc elektryczna określona jest jako iloczyn prądu i napięcia. Moc mechaniczna jest zaś iloczynem momentu obrotowego i prędkości obrotowej wirnika. Na rysunku C.2 zaprezentowano temperaturę podstawy silnika, przyspieszenia podczas pracy wirnika oraz mierzoną prędkość obrotową wraz z współczynnikiem wypełnienia impulsu sterującego.

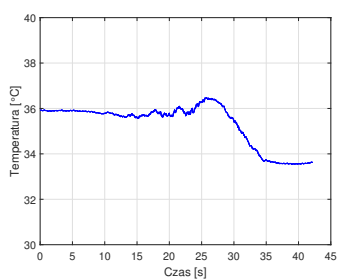


Rys. C.2. Pozostałe parametry – silnik MT2213 i śmigło 1045

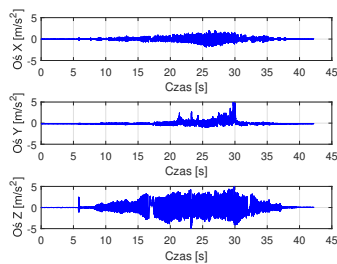
Na rysunkach C.3 i C.4 zaprezentowano pozostałe mierzone i wyznaczone parametry na przykładzie zestawu w którego skład wchodził silnik MT2814, sterownik silnika i śmigło typu 1238 firmy Gefman z ABS. Na rysunku C.3a zaprezentowano zmierzone wartości skuteczne prądu i napięcia na zasilaniu sterownika silnika. Rysunek C.3b przedstawia wyznaczone moce, analogicznie jak dla poprzednio omawianego napędu. Na rysunku C.4 zaprezentowano temperaturę podstawy silnika, przyspieszenia podczas pracy wirnika oraz prędkość obrotową wraz z współczynnikiem wypełnienia impulsu sterującego.



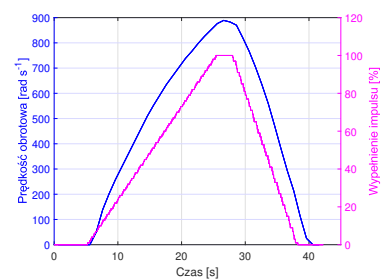
Rys. C.3. Napięcie zasilające, prąd oraz wyznaczone moce – silnik MT2814 i śmigło 1238



(a) temperatura podstawy



(b) przyspieszenia

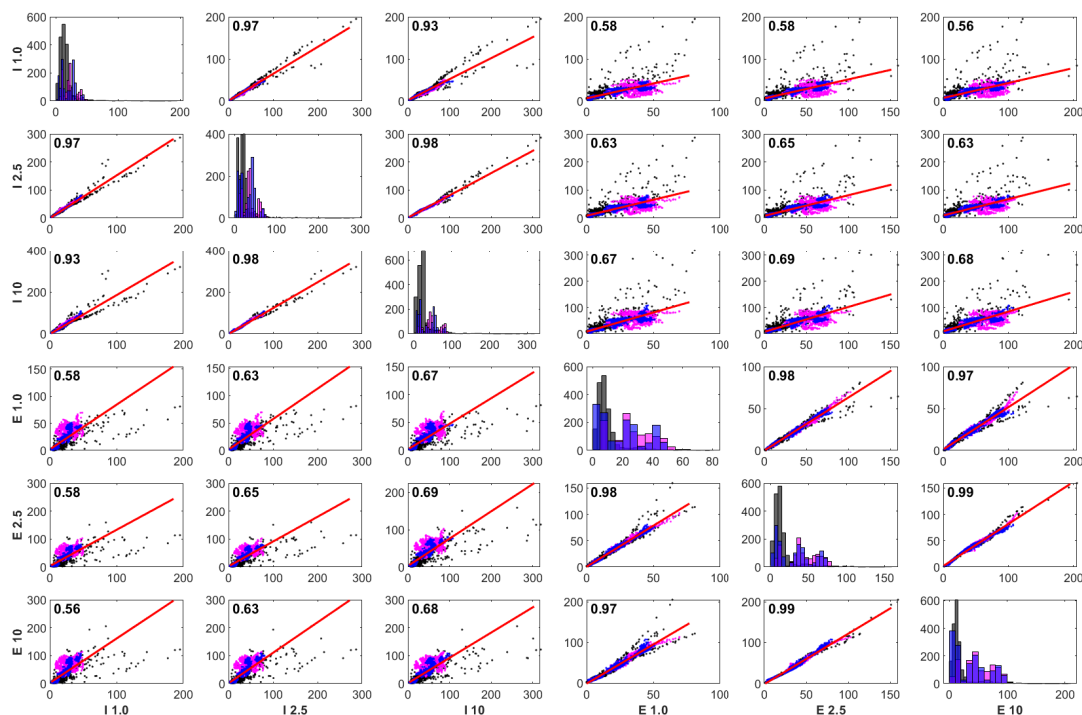


(c) współczynnik wypełnienia impulsu sterującego i prędkość obrotowa

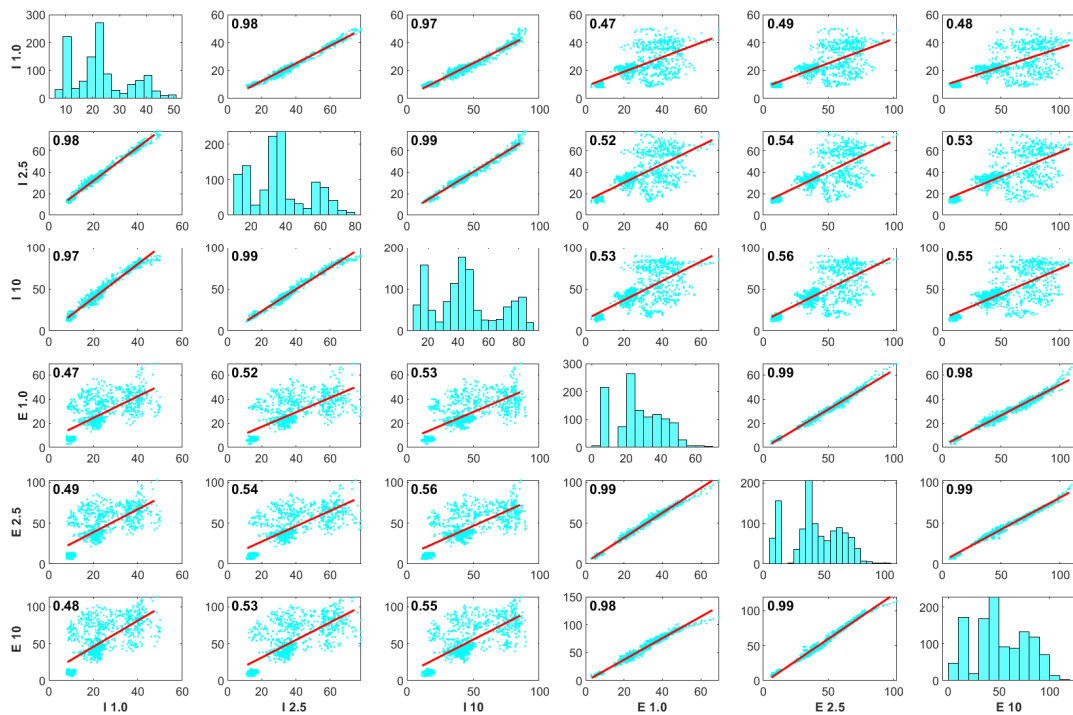
Rys. C.4. Pozostałe parametry – silnik MT2814 i śmigło 1238

Załącznik D. Wyniki analiz korelacji Pearsona stężeń cząstek stałych

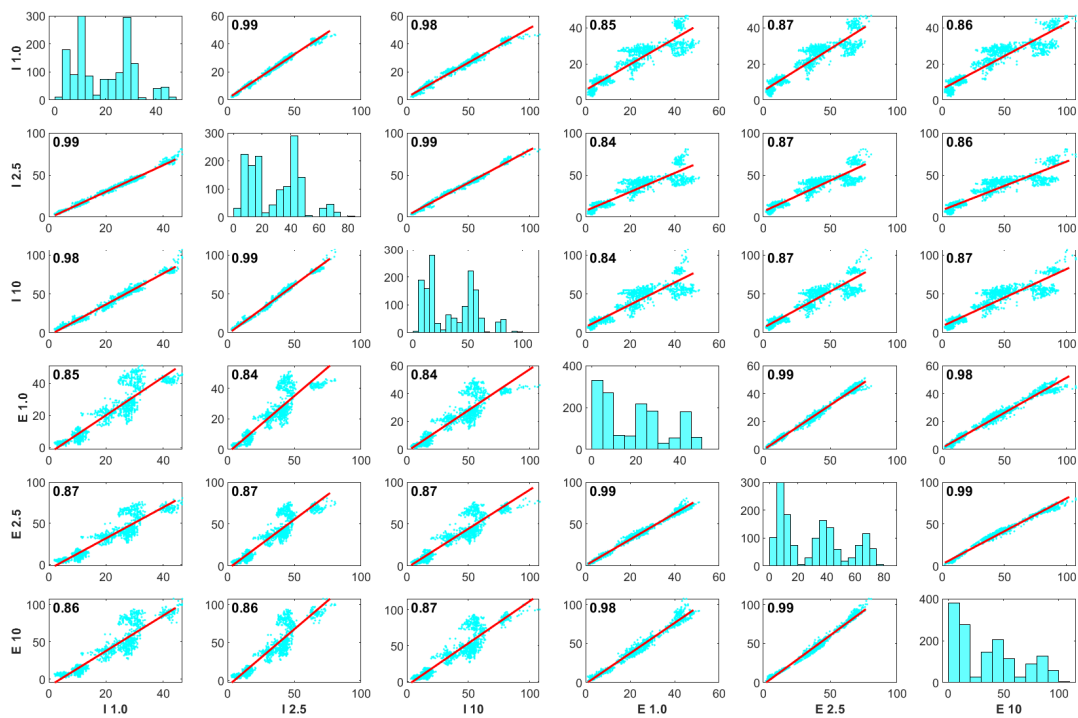
Na rysunku D.1 zaprezentowano wykres zbiorczy zebranych danych, w postaci histogramów oraz wykresów rozrzutu z wyznaczonymi współczynnikami korelacji Pearsona. Na rysunkach D.2 – D.4 zaprezentowano zaś te same wykresy, jednakże osobno dla każdej z grupy. Zastosowane następujące oznaczenia na rysunkach: *I 1.0*, *I 2.5* i *I 10* – odpowiednio stężenia $PM_{1,0}$, $PM_{2,5}$ i PM_{10} dla czujnika pod robotem, *E 1.0*, *E 2.5* i *E 10* – te same dla czujnika na wysięgniku



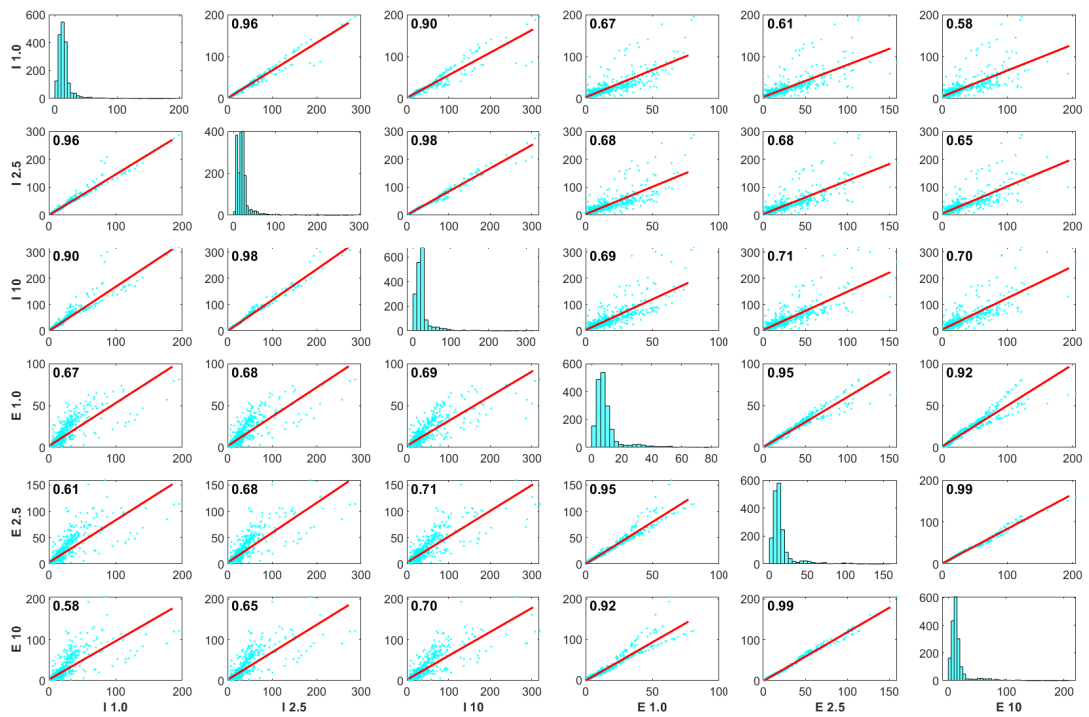
Rys. D.1. Histogramy, wykresy rozrzutu i wyznaczone współczynniki determinacji R^2 dla: lotów bez źródła zanieczyszczenia (zbiór niebieski), lotów ze źródłem zanieczyszczenia (zbiór czarny) i referencyjnych pomiarów bez źródła i bez pracujących wirników (zbiór różowy)



Rys. D.2. Histogramy, wykresy rozrzutu i wyznaczone współczynniki determinacji R^2 dla referencyjnych pomiarów bez źródła i bez pracujących wirników



Rys. D.3. Histogramy, wykresy rozrzutu i wyznaczone współczynniki determinacji R^2 dla lotów bez źródła zanieczyszczenia



Rys. D.4. Histogramy, wykresy rozrzutu i wyznaczone współczynniki determinacji R^2 dla lotów ze źródłem zanieczyszczenia