Politechnika Wrocławska

Rozprawa Doktorska

METODA OCENY ODPORNOŚCI SYSTEMU AUTOMATYCZNEJ IDENTYFIKACJI DANYCH Z WYKORZYSTANIEM DRONÓW

Autor: mgr Arkadiusz Żurek

Promotor: dr hab. Agnieszka Tubis

Katedra Eksploatacji Systemów Technicznych

Wydział Mechaniczny

WROCŁAW 2025

SPIS TREŚCI …… 2

WSTĘP …… 5

I. ROZDZIAŁ 1 - ZASTOSOWANIE DRONÓW W SYSTEMACH ANTROPOTECHNICZNYCH ……. 9

1.1. Charakterystyka podstawowych rozwiązań UAV …… 9
1.1.1. Wielowirnikowe UAV (multirotor) …… 11
1.1.2. Stałopłatowe UAV (fixed-wing) ……... 15
1.1.3. Hybrydowe UAV (VTOL – Vertical Take-Off and Landing) …… 19
1.1.4. UAV napędzane energią słoneczną …….. 22
1.1.5. UAV o stałej bazie naziemnej (drony na uwięzi) ……. 24
1.1.6. UAV inspirowane biologicznie (ornithopters) ……. 27
1.1.7. Nano-UAV i Micro-UAV …… 29
1.1.8. UAV: zasilane ogniwami paliwowymi ……. 31
1.2. Obszary zastosowania współczesnych systemów UAV ……. 33
1.2.1. Logistyka i transport …… 33
1.2.2. Przemysł i inspekcje infrastrukturalne ……. 35
1.2.3. UAV w sektorze energetycznym …….. 37
1.2.4. Ratownictwo i zarządzanie kryzysowe ……. 43
1.2.5. Górnictwo, eksploatacja kopalin głębinowych i odkrywkowych, eksploracja jaskiń oraz poszukiwanie złóż surowców …… 44
1.2.6. Rolnictwo precyzyjne …… 46
1.2.7. Systemy militarno-obronne …… 47
1.2.8. Monitoring środowiska i zarządzanie zasobami naturalnymi …….. 49
1.2.9. Urbanistyka i planowanie przestrzenne ……. 50
1.2.10. Przemysł filmowy, media i transmisje na żywo ……. 51
1.2.11. Archeologia i badania historyczne …….. 53
1.2.12. Sektor ubezpieczeń i inspekcje szkód …….. 54
1.2.13. Służby mundurowe i egzekwowanie prawa …… 56

II. ROZDZIAŁ 2 - SYSTEMY UAV JAKO ELEMENT LOGISTYKI 4.0 W OPERACJACH MAGAZYNOWYCH …… 58

2.1. Automatyczna inwentaryzacja i zarządzanie zapasami …… 58
2.2. Monitorowanie przestrzeni magazynowej i optymalizacja układu składowania…… 60
2.3. Integracja UAV z systemami AI i IoT…… 61
2.4. Bezpieczeństwo i nadzór w magazynach …… 63
2.5. UAV w procesach załadunku i rozładunku …… 64
2.6. Drony jako wsparcie operacji w trudnych warunkach magazynowych …… 66
2.7. Wyzwania i przyszłość UAV w magazynach…… 68

III. ROZDZIAŁ 3 - KLUCZOWE TRENDY W BRANŻY UAV NA LATA 2025–2030 …… 71

3.1. Monitorowanie klęsk żywiołowych za pomocą UAV…… 71
3.2. Nowe technologie napędowe dla UAV (ze szczególnym uwzględnieniem systemów wodorowych) …… 72
3.3. Dynamiczny wzrost rynku dronów komercyjnych …… 75

3.4. Ewolucja dronów w kierunku coraz bardziej autonomicznych i zaawansowanych systemów 76
3.5. Sztuczna inteligencja i systemy sieciowe 77
3.6. Ewolucja przepisów i regulacji 78
3.7. Drony jako część krajowego systemu ruchu lotniczego 79
3.8. Zaawansowane systemy bezpieczeństwa UAV 80
3.9. Rozwój ciężkich dronów cargo 81
3.10. UAV w sektorze MRO (Maintenance, Repair & Overhaul) 82

IV. ROZDZIAŁ 4 - ODPORNOŚĆ SYSTEMÓW AUTOMATYCZNEJ IDENTYFIKACJI DANYCH Z WYKORZYSTANIEM DRONÓW W ŚWIETLE BADAŃ LITERATURY 85
4.1. Wprowadzenie i cel rozdziału 85
4.2. Koncepcje odporności – odporność funkcjonalna i strukturalna 86
4.3. 4.3. Modelowanie odporności w systemach antropotechnicznych 89

V. ROZDZIAŁ 5 - IDENTYFIKACJA LUKI BADAWCZEJ, CEL I ZAKRES PRACY 92
5.1. Tło badawcze 92
5.2. Identyfikacja luki badawczej 94
5.3. Cel pracy i zakres badań 95

VI. ROZDZIAŁ 6 - METODA OCENY ODPORNOŚCI DLA SYSTEMÓW UAV–AutoID PRACUJĄCYCH W ZMIENNYCH WARUNKACH EKSPLOATACYJNYCH (METODA M-UAV) ... 100
6.1. Założenia metody M-UAV 102
6.2. Procedura postępowania w metodzie oceny odporności (M-UAV) 104
6.2.1. Etap 1 – Identyfikacja elementów systemu UAV–AutoID 105
6.2.2. Etap 2 – Identyfikacja warunków eksploatacyjnych 107
6.2.3. Etap 3 – Rejestracja parametrów zrealizowanych misji 108
6.2.4. Etap 4: Ocena odporności systemu UAV-AutoID 112
6.2.5. Etap 5: Ewaluacja i przygotowanie rekomendacji 119

VII. ROZDZIAŁ 7 - IMPLEMENTACJA METODY M-UAV W RZECZYWISTYM ŚRODOWISKU MAGAZYNOWYM – PRZYKŁADY WDROŻEŃ 122
7.1. Charakterystyka przedsiębiorstwa NeuroSpace sp. z o.o. 122
7.2. Etap 1: Identyfikacja elementów systemu UAV–AutoID 124
7.3. Przypadek 1: Duże, nowoczesne centrum dystrybucyjne klasy A (studium przypadku) 127
7.3.1. Etap 2: Identyfikacja warunków eksploatacyjnych 127
7.3.2. Etap 3: Rejestracja parametrów wykonanych misji 128
7.3.3. Etap 4: Ocena odporności 130
7.3.4. Etap 4: Analiza ryzyka 132
7.3.5. ETAP 5: Rekomendacje 134

7.4. Przypadek 2: Magazyn (stary, nieco zdekapitalizowany) składowania blokowego klasy B (studium przypadku) 136
7.4.1. Etap 2: Identyfikacja warunków eksploatacyjnych 136
7.4.2. Etap 3: Rejestracja parametrów wykonanych misji 137
7.4.3. Etap 4: Ocena odporności 137
7.4.4. Etap 4: Analiza ryzyka 138
7.4.5. ETAP 5: Rekomendacje 140
7.5. Przypadek 3: Magazyn przyprodukcyjny (studium przypadku) 140
7.5.1. Etap 2: Identyfikacja warunków eksploatacyjnych 141
7.5.2. Etap 3: Rejestracja parametrów wykonanych misji 141
7.5.3. Etap 4: Ocena odporności 142
7.5.4. Etap 4: Analiza ryzyka 143
7.5.5. ETAP 5: Rekomendacje 145
7.6. Porównanie i podsumowanie wyników trzech studiów przypadku 146

ZAKOŃCZENIE 148
BIBLIOGRAFIA 152
SPIS TABEL 166
SPIS RYSUNKÓW 167

WSTĘP

Rozwój koncepcji Przemysłu 4.0 oraz związanych z nim technologii sprawia, że współczesne procesy logistyczne realizowane są przy wsparciu złożonych systemów cyber-fizycznych. Transformacja cyfrowa i automatyzacja widoczna jest przede wszystkim w ramach procesów logistyki wewnętrznej wspierającej obsługę systemów produkcyjnych. Szerokie badania dotyczące Logistyki 4.0, przedstawione w (Tubis, 2024), dowodzą, że wśród rozwiązań mobilnych wspierających operacje magazynowe wyróżnia się najczęściej systemy AGV (Automated Guided Vehicle) i UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Szczególnie rozwiązania wykorzystujące roje dronów charakteryzują się dużym potencjałem do implementacji w ramach logistyki wewnętrznej. Obecnie prowadzone badania i wdrożenia koncentrują się na możliwości zastosowania dronów w obszarze:

- monitorowania przestrzeni magazynowej (np. Villa i in., 2016);
- optymalizacji układu składowania (np. Nasir, Venkitasubramony, Jakhar, 2023);
- budowania inteligentnych systemów magazynowych poprzez integrację UAV z systemami Internetu Rzeczy (IoT) oraz sztucznej inteligencji (AI) (np. Perboli i in., 2021);
- monitorowaniu bezpieczeństwa w obiekcie i jego otoczeniu (np. Erdeli, Natalizio, 2016);
- wsparcia procesów załadunku i rozładunku (np. Bonkenburg, 2016);
- automatycznej inwentaryzacji i zarządzaniu zapasami (np. Wawrla, Maghazei, Netland, 2019).

Dwoma wiodącymi obszarami zastosowań systemów UAV w logistyce przemysłowej jest zdecydowanie monitorowanie bezpieczeństwa i przestrzeni magazynowej oraz automatyzacja procesu inwentaryzacji. W szczególności automatyzacja procesu inwentaryzacji produktów składowanych w magazynach budzi duże zainteresowanie biznesowe, ze względu na swój powtarzalnych charakter, wysokie koszty realizacji i podatność na błędy ludzkie, w przypadku wykonywania jej w systemie tradycyjnym (manualnym), jak również presję czasową, która towarzyszy temu procesowi, Inwentaryzacja jest bowiem procesem niedodającym wartości do produktu, jednak wymagania prawne (rozliczeniowe) oraz organizacyjne wymuszają jej przeprowadzanie – zazwyczaj w krótkim oknie czasowym. To powoduje, że przedsiębiorstwa poszukują wciąż rozwiązań, które pozwolą im zwiększyć efektywność i sprawność realizacji związanych z tym operacji. Oczekiwana efektywność ukierunkowana jest przy tym na ograniczenie czasu i kosztów realizacji tego procesu do minimum, przy jednoczesnym zwiększeniu dokładności pomiaru (eliminacja rejestrowanych pomyłek). Jest to duże wyzwanie, któremu mogą sprostać odpowiednio zaprojektowane systemy UAV-AutoID realizujące operacje zgodnie z procedurami zapewniającymi ciągłość działania.

Pod pojęciem systemu UAV-AutoID będziemy rozumieli w tej rozprawie zintegrowane rozwiązanie cyber-fizyczne, w którym bezzałogowy statek powietrzny (UAV) współpracuje z technologiami automatycznej identyfikacji danych (AutoID), takimi jak RFID, kody kreskowe, QR, systemy wizyjne – w celu realizacji zadań związanych z gromadzeniem, przetwarzaniem i przekazywaniem zidentyfikowanych danych. W kontekście inwentaryzacji magazynowej oznacza to integrację:

- systemu UAV – który pełni rolę mobilnej platformy skanującej, poruszającej się w ściśle określonej przestrzeni magazynowej;
- systemu AutoID – który odpowiada za identyfikację jednostek logistycznych (palety, kartony, produkty);
- systemu WMS/ERPP – w przypadku zapotrzebowania na automatyczną aktualizację stanów magazynowych.

Rozwój i coraz szersze stosowanie systemów UAV-AutoID w przemyśle rodzi coraz większe zapotrzebowanie na badania ukierunkowane na koncepcje związane z rozwojem systemów UAV-AutoID, jak i metodami związanymi z zarządzania ich eksploatacją. Wysokie oczekiwania dotyczące efektywności ich zastosowania, względem tradycyjnych metod inwentaryzacji magazynowej, powodują, iż krytycznym zagadnieniem badawczym staje się obecnie zwiększanie odporności systemów UAV-AutoID na zakłócenia, które mogą występować w związku z wykonywanymi pomiarami w magazynie. Z tego też względu również niniejsza rozprawa doktorska podejmuje tematykę eksploatacji systemów UAV-AutoID w zmiennym środowisku operacyjnym oraz badanie ryzyka związanego z automatyzacją procesu inwentaryzacji magazynowej. Głównym celem pracy jest opracowanie metody oceny odporności systemu UAV-AutoID w oparciu o podejście systemowe (obejmujące aspekty procesowe i inżynierskie) z uwzględnieniem zmiennych warunków eksploatacyjnych w trakcie realizacji misji. Tak sformułowany cel pracy jest odpowiedzią na zidentyfikowane luki badawcze, jakie obecnie występują w obszarze metod oceny odporności uwzględniających specyfikę funkcjonowania systemów UAV-AutoID.

Opracowana metoda oceny ma więc wypełnić obecne luki występujące w badaniach naukowych, ale również powinna być odpowiedzią na potrzeby zgłaszane przez przemysł w odniesieniu do automatyzacji procesów logistycznych. Z tego też względu wszystkie prace przemysłowe i rozwojowe realizowane były we współpracy z firmą NeuroSpace w ramach projektu ministerialnego „Doktorat wdrożeniowy". NeuroSpace to technologiczny star-up, który został utworzony w 2019 z siedzibą we Wrocławiu. Jego działalność jest silnie ukierunkowana na rozwijanie nowoczesnych technologii bezzałogowych statków powietrznych dla logistyki i innych systemów działających w oparciu o koncepcję Przemysłu 4.0. Od początku działalności firma koncentrowała się na opracowaniu autorskiego, własnego rozwiązania, zdolnego do pracy w przestrzeniach zamkniętych – takich jak magazyny dystrybucyjne, centra logistyczne, hale przemysłowe, magazyny surowców i komponentów do produkcji oraz magazyny przyprodukcyjne – gdzie dostęp do systemów satelitarnych (GPS/GNSS) jest bardzo ograniczony lub całkowicie niemożliwy. Z tego też względu sztandarowym projektem spółki stał się NeuroSpace Autonomous Drone Inventory, czyli system UAV zaprojektowany do autonomicznej inwentaryzacji przestrzeni magazynowych. W ramach planowanego wdrożenia przewidziano budowę floty kilkunastu dronów zdolnych do wykonywania misji w pełni automatycznie, bez udziału operatora.

W trakcie realizowanych prac rozwojowych inżynierowie i menedżerowie z zespołu NeroSpace stanęli przed krytycznym wyzwaniem. Zbudowany system UAV-AutoID, stworzony pierwotnie jako koncepcja produktu, w początkowej fazie życia musiał zostać zaoferowany na rynku w formie usługi, która świadczona jest w różnych magazynach. Realizacja usługi u różnych klientów oznacza pracę systemu każdorazowo w innych warunkach operacyjnych. Fakt ten w sposób istotny wpływa na pojawiające się ryzyko występowania wielu zdarzeń niepożądanych, których źródłem zagrożenia może być nie tylko system UAV-AutoID i organizacja procesu inwentaryzacji, ale również warunki otoczenia,

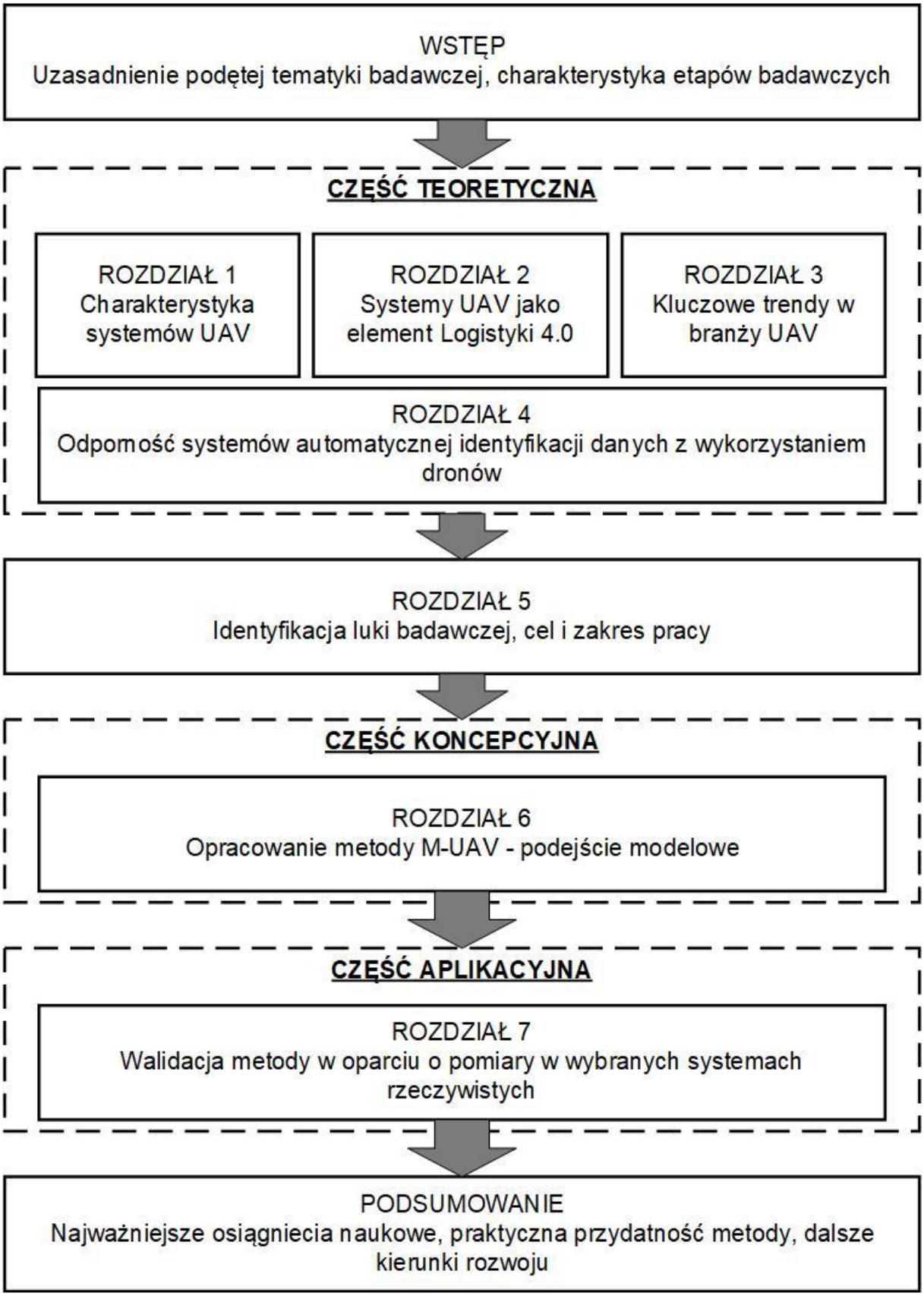
w których realizowane są misje. Ma to krytyczne znaczenie na budowanie odporności całego systemu, gdyż w procedurach planowania działań należy uwzględnić wpływ środowiska eksploatacyjnego, na które osoby realizujące proces inwentaryzacji mają bardzo ograniczony wpływ. Fakt ten stał się wyzwaniem biznesowym, który przerodził się w problem badawczy, którego rozwiązanie zostało opisane w niniejszej rozprawie.

Sformułowany problem badawczy wyznaczył kierunki planowanych badań teoretycznych, koncepcyjnych i aplikacyjnych. Przede wszystkim opracowana metoda M-UAV ma być odpowiedzią na ograniczenia, które zostały rozpoznane w ramach studiów literatury oraz zrealizowanych badań przemysłowych. Krytycznym założeniem jest więc podejście systemowe do analizy, które uwzględnia zarówno aspekty inżynieryjne (odporność systemów technicznych), procesowe (odporność operacji wykonywanych w trakcie misji) oraz wpływ otoczenia. Takie podejście systemowe gwarantuje nam kompleksowe spojrzenie na zakres analizy i pozwala uwzględnić w ocenie odporności zarówno parametry techniczne (uszkadzalność, dostępność), jak i zdolność do zarządzania współzależnościami między systemami ukierunkowane na minimalizowanie skutków efektów kaskadowych.

Drugim istotnym elementem jest uwzględnienie w przeprowadzanym postępowaniu specyfiki obiektów magazynowych. Systemy UAV-AutoID realizują zaplanowane misje w przestrzeniach zamkniętych, w których występują różnego rodzaju ograniczenia przestrzenne, świetlne, elektromagnetyczne, jak również mogą być zlokalizowane różnego rodzaju przeszkody fizyczne, które zakłócać mogą regularny lot drona. Na bazie analizy tego aspektu prowadzonych badań, sformułowana została też główna innowacja opracowanej metody, a mianowicie uwzględnienie w procesie oceny zmienności środowiska, która jest charakterystyczna dla procesów inwentaryzacji magazynowej oferowanych w formie usługi outsourcingowej.

Opracowanie założeń oraz procedury postępowania dla proponowanej metody oceny odporności systemów UAV-AutoID wymagało przeprowadzenia szczegółowych studiów literatury oraz badań przemysłowych, których rezultaty zostały wykorzystane na etapie prac rozwojowych. Całość rozprawy składa się w związku z tym z 7 rozdziałów pogrupowanych w trzy części odpowiadające chronologii prowadzonych prac badawczych: część teoretyczna, koncepcyjna i aplikacyjna. Szczegółowa struktura rozprawy, wraz z krótką charakterystyką każdego z rozdziałów została przedstawiona na rysunku 0.1.

Na koniec należy podkreślić, iż przedstawione w pracy rezultaty prac badawczych dotyczących odporności systemów UAV-AutoID wpisują się w nurt inżynierii mechanicznej, w szczególności inżynierii produkcji. Dotyczą one bowiem rozwoju i doskonalenia nowoczesnych systemów technicznych wspierających procesy logistyczne i magazynowe, będące integralną częścią systemów produkcyjnych. System UAV-AutoID traktowany jest tu jako złożony obiekt techniczny, którego niezawodność, podatność na zakłócenia i dostępność stanowią krytyczne parametry inżynieryjne. Ponadto, uwzględnienie specyfiki obiektów magazynowych, jako środowiska operacyjnego dla misji realizowanych przez system UAV-AutoID, wpisuje się w badania z zakresu eksploatacji systemów technicznych. Proponowane podejście odpowiada też na krytyczne wyzwania współczesnej inżynierii produkcji, takie jak automatyzacja i cyfryzacja procesów wspierających systemy produkcyjne, jak i uwzględnienie oceny ryzyka, również w aspekcie bezpieczeństwa, systemów technicznych wspomagających procesy produkcyjne i około-produkcyjne.



Rys. 0.1. Struktura rozprawy doktorskiej
Źródło: Opracowanie własne

ROZDZIAŁ 1

ZASTOSOWANIE DRONÓW W SYSTEMACH ANTROPOTECHNICZNYCH

1.1. Charakterystyka podstawowych rozwiązań UAV

Bezzałogowe statki powietrzne (UAV) stanowią obecnie kluczową technologię dla tworzonych rozwiązań dedykowanych systemom Logistyki 4.0, w których następuje integracja automatyzacji z interakcjami człowiek–maszyna (Szymańska, Cyplik, Adamczak, 2017). Dynamiczny rozwój tych systemów jest efektem postępu w dziedzinach nawigacji autonomicznej, sztucznej inteligencji, technologii czujników oraz systemów komunikacyjnych. W kontekście czwartej rewolucji przemysłowej (Industry 4.0) oraz koncepcji Logistyki 4.0, UAV odgrywają coraz istotniejszą rolę w automatyzacji procesów przemysłowych i logistycznych (Wang 2016). Oprócz zadań transportowych i magazynowych, drony znajdują szerokie zastosowanie w monitoringu infrastruktury krytycznej, rolnictwie precyzyjnym, ratownictwie i akcjach poszukiwawczo-ratowniczych, a także w działaniach militarnych, gdzie pełnią funkcje rozpoznawcze i operacyjne (Fernández-Caramés, Blanco-Novoa, Froiz-Míguez, Fraga-Lamas, 2019).

Dzięki stale rosnącej autonomii oraz możliwości integracji z systemami cyfrowymi, UAV przestają być jedynie wsparciem dla tradycyjnych metod wykonywania zadań ale coraz częściej stają się ich pełnoprawnym zamiennikiem. Do najważniejszych zalet należą: wysoka prędkość działania, precyzja w realizacji misji, dostęp do trudno osiągalnych obszarów oraz zdolność do pracy w warunkach ekstremalnych. Z tego względu UAV uznawane są za element o strategicznym znaczeniu dla nowoczesnych ekosystemów technologicznych i stanowią podstawę transformacji procesów w logistyce, przemyśle oraz administracji publicznej (Shakhatreh i in., 2019). W najbliższej dekadzie, do 2030 roku, rozwój UAV będzie koncentrował się na zwiększeniu poziomu autonomii lotów poprzez zastosowanie zaawansowanych algorytmów sztucznej inteligencji, metod uczenia maszynowego oraz rozwiązań bazujących na sieciach neuronowych. Dzięki temu możliwe będzie przejście od systemów wymagających ciągłego nadzoru operatora do pełnej automatyzacji operacji lotniczych, w tym w środowiskach zamkniętych, takich jak hale produkcyjne czy magazyny wysokiego składowania (Tubis, Ryczyński, Żurek, 2021). Równolegle rozwijane będą technologie napędowe, obejmujące zarówno systemy hybrydowe, jak i ogniwa paliwowe, które wydłużą czas lotu, zwiększą efektywność energetyczną i umożliwią realizację dłuższych misji bez konieczności częstego ładowania baterii.

Istotnym czynnikiem kształtującym przyszłość UAV będzie rozwój infrastruktury komunikacyjnej. Integracja dronów z technologią 5G oraz systemami komunikacji satelitarnej otworzy nowe możliwości współpracy w czasie rzeczywistym, a także włączenia ich do systemów inteligentnych miast (Smart Cities). Tego typu rozwiązania pozwolą na zdalne sterowanie flotą UAV, koordynację w ramach rojów oraz ścisłą integrację z systemami zarządzania ruchem powietrznym (ATM/UTM) (Hassanalian, Abdelkefi, 2017).

Dodatkowo, UAV będą coraz częściej wykorzystywane do inspekcji, konserwacji i monitoringu infrastruktury technicznej, eliminując konieczność wykonywania niebezpiecznych czynności przez ludzi, a jednocześnie zwiększając precyzję pomiarów i wiarygodność diagnostyki. W efekcie ich rozwój stanie się katalizatorem zmian w obszarze

bezpieczeństwa pracy oraz niezawodności procesów przemysłowych. Wzrost znaczenia UAV pociąga za sobą także konieczność dostosowania ram prawnych i regulacyjnych. Oczekuje się, że do 2030 roku systemy prawne w Europie i na świecie w coraz większym stopniu umożliwią integrację UAV z przestrzenią powietrzną, zarówno w środowiskach miejskich, jak i w trudno dostępnych obszarach naturalnych (Tubis, Poturaj, Dereń, Żurek, 2024). W ostatnich latach coraz wyraźniej dostrzegalne jest rosnące znaczenie systemów bezzałogowych statków powietrznych (UAV) w procesach techniczno-organizacyjnych. Stanowią one nie tylko przykład nowoczesnych narzędzi wspierających rozwój automatyzacji, lecz także integralny komponent systemów antropotechnicznych, w których interakcje człowieka z maszyną są stopniowo wypierane przez w pełni autonomiczne rozwiązania (Hassanalian, Abdelkefi, 2017). Intensywny rozwój UAV związany jest z postępem w dziedzinach nawigacji satelitarnej i inercyjnej, algorytmów sztucznej inteligencji, a także z miniaturyzacją oraz integracją czujników wielospektralnych, co umożliwia ich stosowanie w coraz bardziej złożonych warunkach eksploatacyjnych (Shakhatreh i in., 2019).

W kontekście transformacji przemysłowej określanej mianem Przemysłu 4.0, w szczególności dla tworzonych systemów Logistyki 4.0, UAV nabierają szczególnego znaczenia. Ich wdrożenie wspiera bowiem procesy związane z automatyzacją operacji magazynowych, transportowych i produkcyjnych. W literaturze wskazuje się, że są one narzędziem umożliwiającym zwiększenie przejrzystości łańcuchów dostaw, poprawę efektywności pracy oraz redukcję ryzyka błędów ludzkich (Fernández-Caramés, Blanco-Novoa, Froiz-Míguez, Fraga-Lamas, 2019). Potencjał UAV ujawnia się jednak również w wielu innych sektorach – od monitoringu infrastruktury krytycznej, przez rolnictwo precyzyjne i ochronę środowiska, aż po ratownictwo i działania militarne (Tubis, Ryczyński, Żurek, 2021).

Jak podkreślają Gonzales-Jorge i in. (2017) Bezzałogowe systemy powietrzne znajdują szerokie zastosowanie w inspekcji infrastruktury cywilnej co potwierdza potencjał wykorzystania UAV także w logistyce i procesach utrzymaniowych. Coraz większa autonomia tych systemów sprawia, że drony nie ograniczają się jedynie do funkcji wspierających, lecz w wielu przypadkach zastępują tradycyjne metody wykonywania zadań. Ich zalety – takie jak szybkość działania, precyzja, możliwość operowania w trudno dostępnych lokalizacjach czy zdolność do pracy w ekstremalnych warunkach – czynią je kluczowym elementem współczesnych ekosystemów technologicznych (Tubis, Poturaj, Dereń, Żurek, 2024). Równolegle rozwijane są także technologie napędowe. Szczególne nadzieje wiązane są z ogniwami paliwowymi, rozwiązaniami hybrydowymi oraz nowoczesnymi systemami zarządzania energią, które pozwolą znacząco wydłużyć czas lotu i poprawić efektywność eksploatacyjną (Boukoberine, Zhou, Benbouzid, 2019). Kluczowym czynnikiem umożliwiającym dalszą integrację UAV z systemami logistycznymi i przemysłowymi jest także infrastruktura komunikacyjna. Wdrożenie technologii 5G, rozwiązań opartych na chmurze obliczeniowej oraz systemów komunikacji satelitarnej otworzy nowe możliwości w zakresie koordynacji rojów dronów, zarządzania flotami oraz integracji z systemami zarządzania ruchem powietrznym w przestrzeni miejskiej i pozamiejskiej (Li, Fei, Zhang, 2019).

W ostatnich latach coraz wyraźniej dostrzegalne jest rosnące znaczenie UAV w procesach techniczno-organizacyjnych. Nie są one już jedynie przykładem nowoczesnych narzędzi wspierających automatyzację, ale stają się jednym z filarów transformacji systemów antropotechnicznych. Zamiast powielać schemat tradycyjnych interakcji człowiek–maszyna,

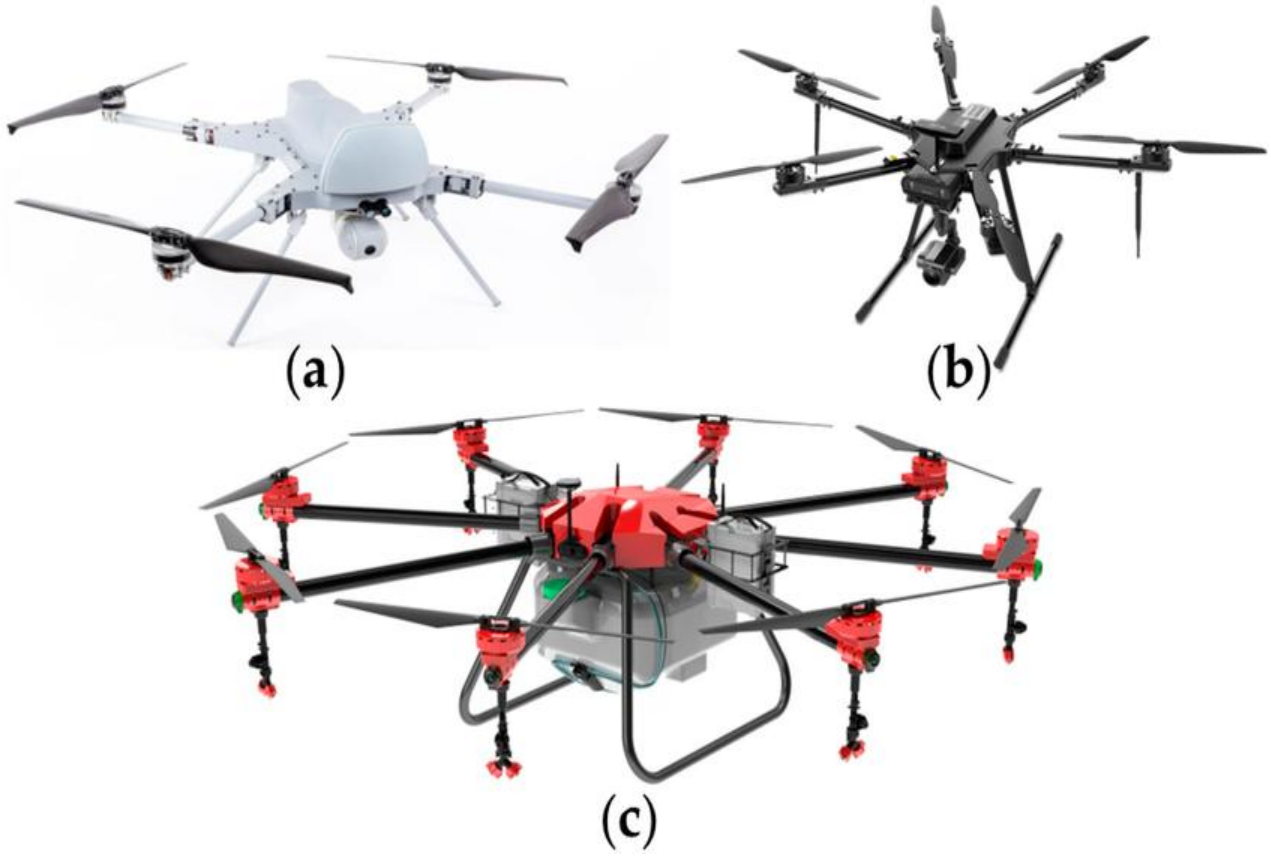
drony coraz częściej przejmują pełną odpowiedzialność za realizację zadań dzięki rozwojowi autonomii, integracji z systemami cyfrowymi i zdolności do działania w środowiskach o wysokim poziomie złożoności (Shakhatreh i in., 2019). W literaturze wskazuje się, że ich potencjał nie ogranicza się wyłącznie do obszarów magazynowania czy transportu – UAV są postrzegane jako technologia o charakterze horyzontalnym, oddziałująca na przemysł, logistykę, bezpieczeństwo, administrację publiczną oraz ochronę środowiska (Fernández-Caramés, Blanco-Novoa, Froiz-Míguez, Fraga-Lamas, 2019).

Prognozy rozwojowe do roku 2030 zakładają dalsze zwiększanie poziomu samodzielności operacyjnej, czemu sprzyjać będzie implementacja zaawansowanych metod sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego. Istotną rolę odegrają także nowoczesne technologie napędowe, takie jak ogniwa paliwowe czy hybrydowe systemy energetyczne, pozwalające na znaczące wydłużenie czasu lotu i poprawę efektywności eksploatacyjnej (Boukoberine, Zhou, Benbouzid, 2019). Równolegle rozwój infrastruktury komunikacyjnej – w tym 5G, systemów satelitarnych i rozwiązań chmurowych – umożliwi bezpieczną integrację UAV z przestrzenią powietrzną, zarówno w obszarach miejskich, jak i pozamiejskich (Li, Fei, Zhang, 2019). Ostatecznie, dostosowanie regulacji prawnych i operacyjnych przesądzi o tym, w jakim zakresie drony będą mogły stać się pełnoprawnym komponentem globalnej gospodarki i nieodłącznym elementem systemów antropotechnicznych przyszłości (Custers, 2016). Dlatego też, dalszy rozwój regulacji prawnych i standardów operacyjnych będzie niezbędny, aby UAV mogły stać się pełnoprawnym elementem infrastruktury transportowej i przemysłowej. Zgodnie z przewidywaniami, integracja dronów z przestrzenią powietrzną w najbliższych latach umożliwi ich wykorzystanie nie tylko w niszowych zastosowaniach, lecz również w globalnej gospodarce jako standardowego narzędzia wspierającego logistykę, inspekcję infrastruktury, ratownictwo oraz zarządzanie kryzysowe (Clothier, Greer, Greer, Mehta, 2015).

Stały rozwój systemów UAV sprawił, że obecnie na rynku dostępne są różnego rodzaju rozwiązania. Różnorodność konstrukcji wynika z konieczności dostosowania opracowywanych systemów do odmiennych zastosowań, ograniczeń technologicznych i regulacyjnych oraz kompromisów ekonomicznych. Nie istnieje jeden typ bezzałogowca, który mógłby w optymalny sposób realizować wszystkie zadania, a jednocześnie być rozwiązaniem konkurencyjnym cenowo. Ze względu na fakt, iż w opracowanej metodzie oceny odporności parametry systemu UAV odgrywają krytyczne znaczenie, poniżej przedstawiono charakterystykę najbardziej popularnych systemów UAV.

1.1.1. Wielowirnikowe UAV (multirotor)

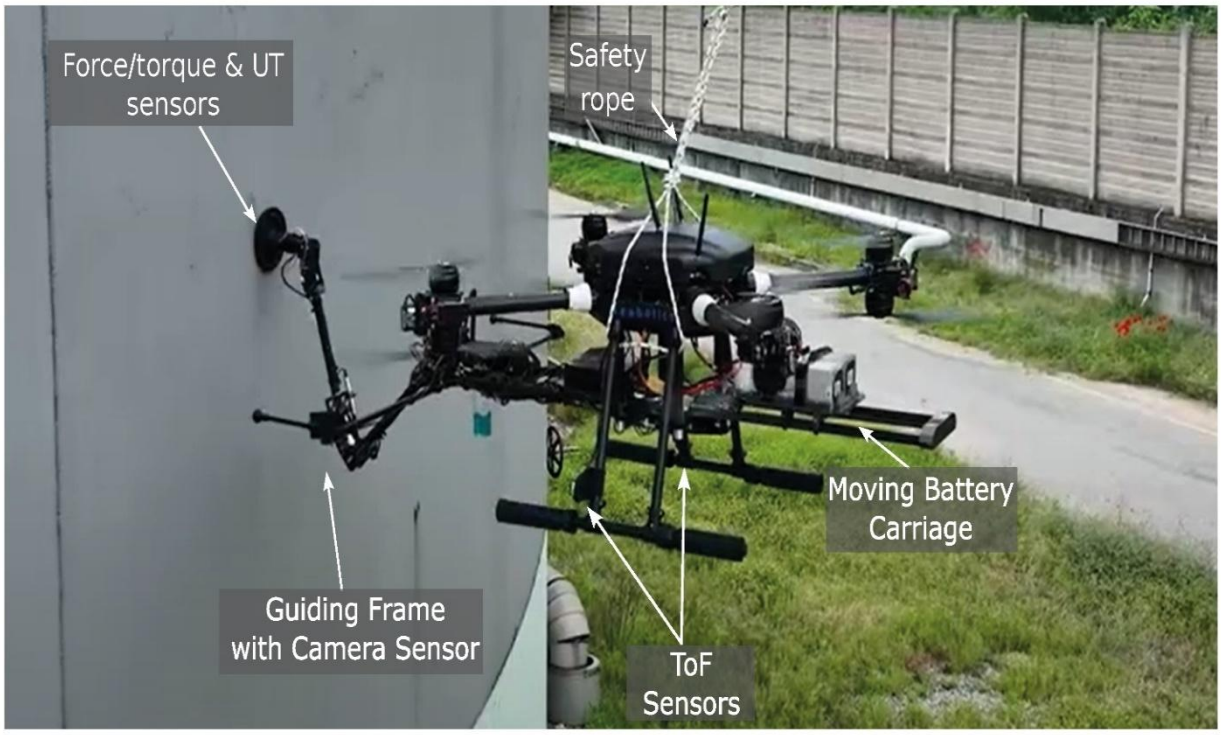
Wielowirnikowe bezzałogowe statki powietrzne (UAV), obejmujące konstrukcje takie jak quadcoptery, hexacoptery czy octocoptery, stanowią obecnie najbardziej rozpowszechnioną grupę dronów wykorzystywanych w zastosowaniach cywilnych i przemysłowych. Ich podstawową zaletą jest zdolność do stabilnego zawisu w powietrzu oraz wykonywania precyzyjnych manewrów w ograniczonej przestrzeni, co czyni je niezwykle przydatnymi w operacjach inspekcyjnych i magazynowych (Hassanalian, Abdelkefi, 2017). Dzięki modułowej budowie i stosunkowo prostemu systemowi sterowania, są one łatwo skalowalne i mogą być przystosowane zarówno do zadań amatorskich, jak i zaawansowanych misji przemysłowych.



Rys. 1.1. Podstawowe typy wielowirnikowych UAV – quadcopter, hexacopter i octocopter.

Źródło: Liang, H., Lee, S.-C., Bae, W., Kim, J., & Seo, S. (2023). Towards UAVs in construction: Advancements, challenges, and future directions for monitoring and inspection. Drones, 7(3), 202.

Integracja tych platform z systemami sztucznej inteligencji (AI) oraz Internetu Rzeczy (IoT) pozwala na wdrażanie autonomicznych rozwiązań monitorujących, optymalizujących procesy logistyczne i wspierających zarządzanie przepływem towarów w czasie rzeczywistym (Shakhatreh i in., 2019). Zastosowania w przemyśle obejmują m.in. inspekcje elementów infrastruktury technicznej oraz kadłubów statków powietrznych, gdzie UAV znacząco skracają czas wykrywania uszkodzeń i podnoszą bezpieczeństwo pracy techników (Boukoberine, Zhou, Benbouzid, 2019). W rolnictwie precyzyjnym drony wielowirnikowe umożliwiają monitorowanie kondycji upraw, zarządzanie nawodnieniem i nawożeniem, a także tworzenie map pól uprawnych na podstawie obrazowania wielospektralnego (Tubis, Ryczyński, Żurek, 2021). Warto zaznaczyć, że w ostatnich latach rośnie również znaczenie integracji UAV z systemami GIS (Geographic Information Systems), co dodatkowo zwiększa ich potencjał analityczny (Nex, Remondino, 2014).



Rys. 1.2. Zastosowanie quadcoptera w inspekcji infrastruktury przemysłowej.

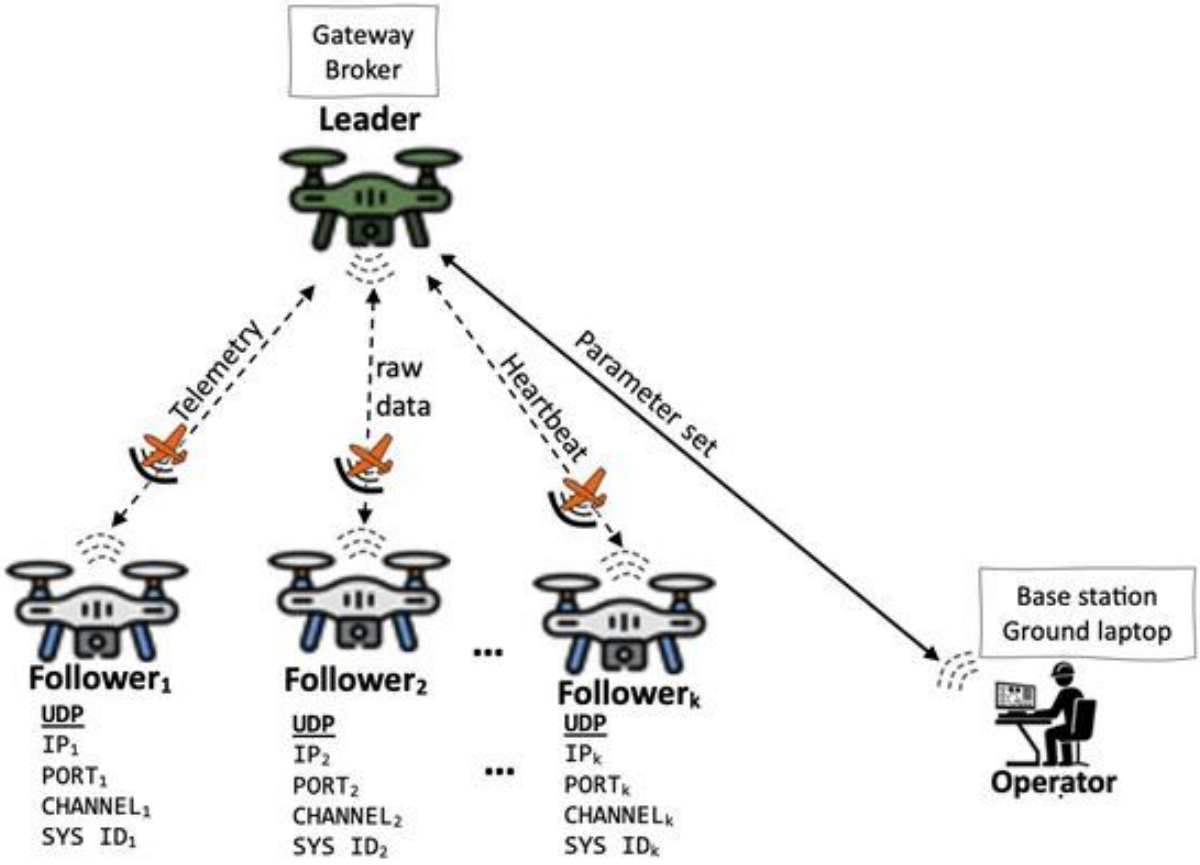
Źródło: D'Angelo, S., Marcellini, S., De Crescenzo, A., Marolla, M., Lippiello, V., & Siciliano, B. (2025). A semi-autonomous aerial platform enhancing non-destructive tests. Drones, 9(8), 516.

Znaczącą rolę odgrywają również w działaniach ratowniczych i misjach poszukiwawczo-ratowniczych. Wyposażone w kamery termowizyjne oraz czujniki wielospektralne umożliwiają lokalizację osób zaginionych, monitorowanie sytuacji kryzysowych i ocenę zagrożeń w trudno dostępnych obszarach (Fernández-Caramés, Blanco-Novoa, Froiz-Míguez, Fraga-Lamas, 2019). Dzięki wysokiej manewrowości mogą operować w gęstych lasach, terenach górskich czy obszarach miejskich objętych katastrofą. W logistyce miejskiej coraz częściej wykorzystuje się je do dostaw na krótkich dystansach, co pozwala ograniczyć wykorzystanie tradycyjnych środków transportu i zmniejszyć emisję spalin (Li, Fei, Zhang, 2019). W sektorze wojskowym natomiast pełnią funkcje rozpoznawcze i wspierają działania taktyczne poprzez obserwację ruchu przeciwnika w czasie rzeczywistym (Custers, 2016).

Rys. 1. 3. Zastosowanie UAV wielowirnikowych w akcjach ratowniczych i poszukiwawczych.

Źródło: FlytBase. Drones for Search and Rescue Operations. FlytBase: https://www.flytbase.com/blog/drones-for-search-rescue (dostęp 16 czerwca 2025).

Zgodnie z przeglądem literatury przedstawionym przez Tubis, Poturaj, Dereń i Żurka (2024), rozwój wielowirnikowych UAV koncentruje się obecnie na wydłużaniu czasu lotu, co w badaniach wskazuje się jako efekt wdrażania bardziej efektywnych systemów zarządzania energią oraz zastosowania napędów hybrydowych i ogniw wodorowych. W perspektywie do 2030 roku spodziewana jest integracja tych systemów z miejskimi rozwiązaniami zarządzania ruchem powietrznym (UTM), co umożliwi ich bezpieczne i skoordynowane wykorzystanie w przestrzeniach zurbanizowanych. Postęp w dziedzinie algorytmów sztucznej inteligencji dodatkowo pozwoli na rozwój autonomicznych funkcji unikania przeszkód oraz koordynacji działań w formacjach rojowych, otwierając drogę do realizacji złożonych operacji na dużą skalę (Hassanalian, Abdelkefi, 2017; Shakhatreh i in., 2019). Już teraz prowadzone są testy nad tzw. „swarm intelligence”, które pozwalają grupie UAV na samodzielne dzielenie zadań i adaptację do zmieniających się warunków misji.



Rys. 1.4. Koncepcja roju dronów wielowirnikowych w zastosowaniach cywilnych i wojskowych.

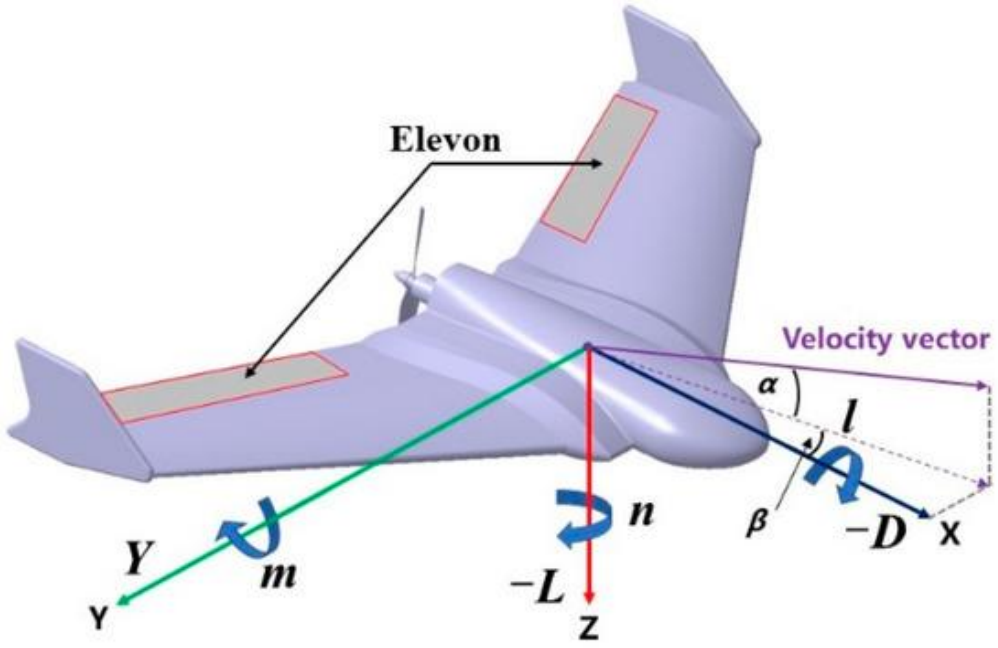
Źródło: Adoni, W. Y. H., Shaik Fareedh, J., Lorenz, S., Gloaguen, R., Madriz, Y., Singh, A., Kühne, T. D. (2024). Intelligent swarm: Concept, design and validation of self-organized UAVs based on leader–followers paradigm for autonomous mission planning. Drones, 8(10), 575.

Dzięki szerokiemu wachlarzowi zastosowań – od logistyki, przez rolnictwo i ratownictwo, aż po obronność – wielowirnikowe UAV są dziś jednym z kluczowych segmentów rynku dronów. W literaturze przedmiotu podkreśla się, że ich dalszy rozwój techniczny i organizacyjny sprawi, iż staną się one nieodzownym elementem nowoczesnej gospodarki oraz systemów bezpieczeństwa na poziomie krajowym i międzynarodowym (Ahmed, Mohanta, Keshari, Singh, 2022). Zwraca się również uwagę na ich potencjał w realizacji celów zrównoważonego rozwoju, w tym ograniczenia zużycia zasobów oraz minimalizacji ryzyka w działaniach prowadzonych w środowisku niebezpiecznym.

1.1.2. Stałopłatowe UAV (fixed-wing)

Stałopłatowe bezzałogowe statki powietrzne (UAV) charakteryzują się aerodynamiczną konstrukcją, która zapewnia wysoką efektywność energetyczną oraz zdolność do pokonywania dużych dystansów przy stosunkowo niskim zużyciu energii (Austin, 2011). Dzięki skrzydłom generującym siłę nośną w locie poziomym, drony tego typu mogą utrzymywać się w powietrzu przez wiele godzin, a ich zasięg i długotrwałość lotu przewyższają rozwiązania wielowirnikowe. Z tego powodu stałopłatowce są szczególnie

cenione w misjach wymagających długodystansowych przelotów, takich jak monitoring ekosystemów, inspekcje dużych obiektów infrastrukturalnych (np. rurociągów, linii przesyłowych) czy obserwacje przyrodnicze prowadzone w rozległych obszarach (Puri, Nayyar, Raja, 2017).



Rys. 1.5. Schemat budowy i profil aerodynamiczny UAV stałopłatowego.

Źródło: Wang, Y., Zhu, H., Zhao, Z., Zhang, C., & Lan, Y. (2021). Modeling, system measurements and controller investigation of a small battery-powered fixed-wing UAV. Machines, 9(12), 333.

W rolnictwie precyzyjnym UAV tego typu pozwalają na szybkie i efektywne mapowanie dużych terenów uprawnych. Wyposażone w multispektralne kamery, systemy hiperspektralne oraz czujniki termowizyjne, umożliwiają ocenę kondycji gleby, monitorowanie stanu zdrowia roślin, a także wczesne wykrywanie suszy czy chorób upraw (Hunt, Daughtry, 2018; Zhang, Kovacs, 2012). W porównaniu z wielowirnikowcami oferują one większą powierzchnię pokrycia terenu podczas pojedyńczego lotu, co znacząco zwiększa efektywność w rolnictwie wielkoobszarowym.

Rys. 1. 6. UAV stałopłatowy w misji mapowania terenów rolniczych.

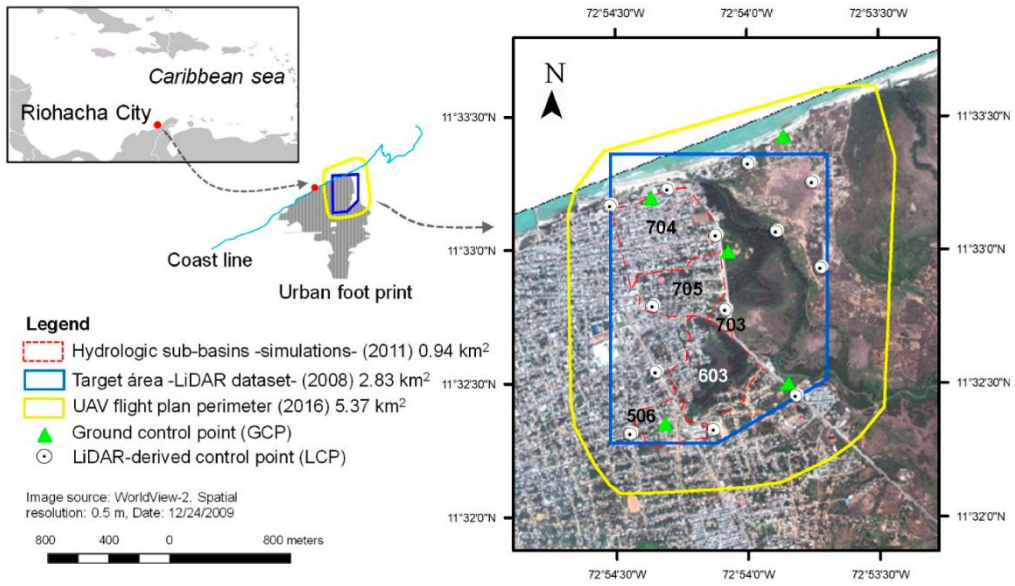
Źródło: Delair UX11-Ag. Delair unveils fixed-wing UAV for agricultural surveying. Unmanned Systems Technology: https://www.unmannedsystemstechnology.com/2018/11/delair-unveils-ux11-ag-fixed-wing-uav-for-agricultural-surveying/ (dostęp: 12 sierpnia 2025).

Zastosowania w sektorze bezpieczeństwa i obronności obejmują patrolowanie granic, monitorowanie obszarów nadmorskich, a także wykrywanie nielegalnych działań, np. przemytu czy nieautoryzowanego przekraczania granic. Dzięki zdolności do operowania na dużych wysokościach, drony stałopłatowe mogą prowadzić dyskretną obserwację rozległych obszarów z bezpiecznej odległości, minimalizując ryzyko wykrycia (Klauser, Pedrozo, 2015). W misjach ratowniczych umożliwiają szybkie rozpoznanie terenu katastrof naturalnych, takich jak powodzie, pożary lasów czy trzęsienia ziemi, co pozwala na lepszą koordynację działań służb ratunkowych (Erdelj, Król, Natalizio, 2017).

Rys. 1.7. Patrol graniczny realizowany przez UAV stałopłatowy.

Źródło: Rosman, J. New drone radar reveals border patrol “gotaways” in high numbers. KJZZ: https://www.kjzz.org/content/new-drone-radar-reveals-border-patrol-gotaways-high-numbers (dostęp: 8 lipca 2025).

Dynamiczny rozwój technologii zwiększa potencjał UAV stałopłatowych w geodezji i urbanistyce. Integracja z systemami LIDAR, fotogrametrią cyfrową oraz sztuczną inteligencją umożliwia tworzenie trójwymiarowych modeli terenu o wysokiej dokładności (Bechtsis, Tsolakis, Vlachos, Iakovou, 2018; Colomina, Molina, 2014; Hu, Minner, 2023). Dane pozyskiwane w ten sposób wspierają procesy planowania przestrzennego, zarządzania środowiskiem oraz inwentaryzacji obiektów. Równocześnie, zastosowanie komunikacji 5G oraz technologii chmurowych i edge pozwala na analizę dużych zbiorów danych w czasie rzeczywistym, co ma istotne znaczenie w kontekście rozwoju inteligentnych miast (Zeng, Zhang, Lim, 2016; Xia, Fattah, Babar, 2023; Xu, Cao, Du, Li, 2023).



Rys. 1.8. Przykład mapy 3D utworzonej przez UAV stałopłatowy z systemem LIDAR.

Źródło: Escobar Villanueva, J. R., Iglesias Martínez, L., & Pérez Montiel, J. I. (2019). DEM generation from fixed-wing UAV imaging and LiDAR-derived ground control points for flood estimations. Sensors, 19(14), 3205.

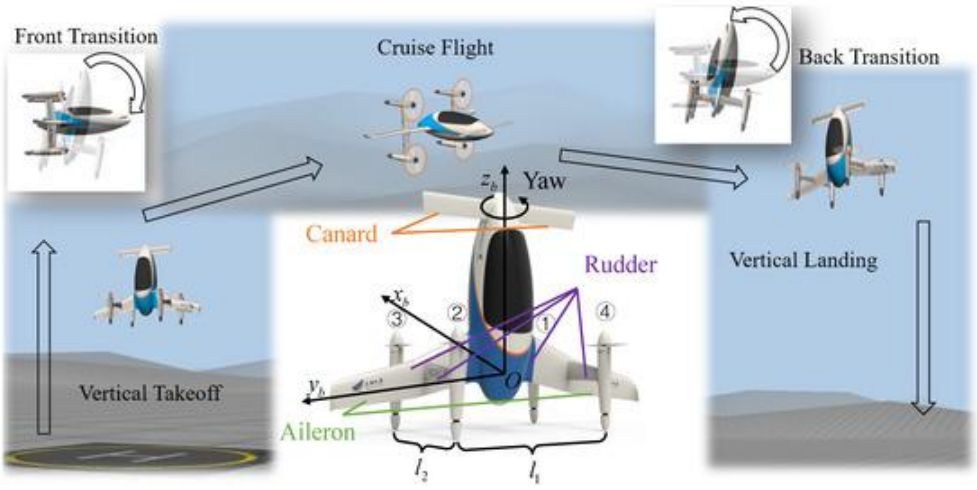
Przyszłość tego segmentu UAV koncentruje się na rozwoju alternatywnych napędów. Badania nad ogniwami paliwowymi, napędami hybrydowymi oraz nowoczesnymi systemami zarządzania energią wskazują, że do 2030 roku możliwe będzie dalsze wydłużenie czasu operacyjnego dronów stałopłatowych, nawet do kilkunastu godzin ciągłego lotu (Saravanakumar i in., 2023; Suewatanakul i in., 2022). Tego rodzaju postęp zwiększy ich użyteczność w logistyce długodystansowej, inspekcjach infrastruktury transkontynentalnej oraz w projektach związanych z ochroną środowiska, np. monitoringu obszarów polarnych czy oceanicznych.

Rys. 1.9. Koncepcja UAV stałopłatowego z napędem wodorowym.

Źródło: Tidey, A. Airbus unveils concepts for zero-emission planes powered by hydrogen. Euronews: https://www.euronews.com/my-europe/2020/09/21/airbus-unveils-concepts-for-zero-emission-planes-powered-by-hydrogen (dostęp: 22 lipca 2025).

1.1.3. Hybrydowe UAV (VTOL – Vertical Take-Off and Landing)

Bezzałogowe statki powietrzne pionowego startu i lądowania (VTOL) łączą w sobie cechy dronów wielowirnikowych i stałopłatowych, co pozwala na unikalną kombinację precyzyjnego zawisu, łatwego startu i lądowania oraz zdolności do wykonywania długodystansowych lotów (Ducard, Allenspach, 2021). Dzięki tej uniwersalności znajdują one coraz szersze zastosowanie w obszarach, gdzie tradycyjne konstrukcje UAV byłyby niewystarczające. W sektorze logistycznym hybrydowe drony wykorzystywane są m.in. do autonomicznych dostaw przesyłek medycznych, próbek laboratoryjnych czy komponentów przemysłowych w regionach o ograniczonej infrastrukturze transportowej. Szczególnie podczas pandemii COVID-19, tego typu rozwiązania okazały się kluczowe dla szybkiego transportu środków ochrony osobistej i leków (Restás, 2022; Munawar i in., 2021).



Rys. 1.10. UAV VTOL podczas pionowego startu.

Źródło: Hu, Y., Wen, G., Qiu, W., Xu, C., Fan, L., & He, Y. (2025). Blown yaw: A novel yaw control method for tail-sitter aircraft by deflected propeller wake during vertical take-off and landing. Drones, 9(9), 635.

W przemyśle energetycznym hybrydowe UAV VTOL pełnią rolę narzędzi do inspekcji farm wiatrowych, sieci przesyłowych, rafinerii oraz platform wiertniczych, gdzie ich długi czas lotu w połączeniu z możliwością zawisu umożliwia wykonywanie złożonych operacji diagnostycznych (Chatzargyros i in., 2024, Wang i in., 2023). Wyposażone w kamery termowizyjne, sensory ultradźwiękowe czy systemy LIDAR, pozwalają na identyfikację mikropęknięć, przegrzewających się elementów oraz potencjalnych źródeł awarii. Dzięki temu wspierają koncepcję predykcyjnego utrzymania ruchu, ograniczając koszty i czas przestojów (Ahmed, Mohanta, Keshari, 2024).

Rysunek 1.11. Hybrydowy UAV podczas inspekcji farmy wiatrowej.

Źródło: Unairtech. Offshore Wind Farm Monitoring Systems: https://unairtech.com/offshore-wind-farm-monitoring-systems/ (dostęp: 15 lipca 2025).

W sektorze obronnym drony VTOL są coraz częściej wdrażane do misji zwiadowczych, rozpoznawczych i wsparcia taktycznego. Ich zdolność do operowania w trudnym terenie, w tym startu i lądowania w gęsto zabudowanych obszarach miejskich, sprawia, że są nieocenione w działaniach specjalnych i operacjach wojskowych (Misra i in., 2022; Osman, Xia, Mahdi, Ahmed, 2025). Dzięki możliwości przenoszenia różnorodnych ładunków – od systemów optoelektronicznych po sensory wielospektralne i urządzenia zakłócające – mogą pełnić funkcję elastycznych platform dostosowywanych do zadań operacyjnych.

Rysunek 1.12. UAV VTOL w misji rozpoznawczej.

Źródło: Shadowfax UAS. Long-Endurance Hybrid Fixed-Wing VTOL UAS for ISR. Unmanned Systems Technology: https://www.unmannedsystemstechnology.com/company/shadowfax-uas/ (dostęp: 20 lipca 2025).

Dynamiczny rozwój hybrydowych układów napędowych i systemów zarządzania energią zwiększa perspektywy ich zastosowania w najbliższych latach. Zastosowanie ogniw paliwowych oraz rozwiązań hybrydowych (np. połączenia akumulatorów litowo-jonowych i generatorów wodorowych) pozwala na wydłużenie czasu operacyjnego oraz poprawę efektywności w porównaniu z klasycznymi systemami bateryjnymi (Liu, Yao, Wang, 2022). Prognozy wskazują, że do 2030 roku UAV VTOL zostaną w pełni zintegrowane z systemami zarządzania ruchem powietrznym (ATM/UTM), co umożliwi ich szerokie wykorzystanie w zurbanizowanych przestrzeniach powietrznych, a także w autonomicznych operacjach flotowych w ramach logistyki miejskiej (Hamissi, Dhraief, 2023).

Rysunek 1.13. Koncepcja UAV VTOL z napędem wodorowym.

Źródło: DesignBoom. VTOL hydrogen-electric: H3 Dynamics & Carbonix partner: https://www.designboom.com/technology/vtol-hydrogen-electric-h3-dynamics-carbonix-12-15-2022/(dostęp: 10 sierpnia 2025).

1.1.4. UAV napędzane energią słoneczną

Bezzałogowe statki powietrzne zasilane energią słoneczną stanowią jedną z najbardziej perspektywicznych kategorii UAV, szczególnie w kontekście długotrwałych misji obserwacyjnych i telekomunikacyjnych. Dzięki wykorzystaniu paneli fotowoltaicznych i ultralekkich materiałów kompozytowych są one w stanie pozostawać w powietrzu przez wiele dni, a w przypadku jednostek klasy High-Altitude Pseudo-Satellites (HAPS) – nawet tygodnie czy miesiące (Wu i in., 2023; Gao, Qiao, Pei, Bai, 2023). Takie rozwiązania pozwalają na redukcję kosztów w porównaniu z tradycyjnymi satelitami oraz oferują większą elastyczność w zakresie modernizacji i adaptacji do nowych zadań.

Rysunek 1.14. Przykład UAV napędzanego energią słoneczną typu HAPS (High-Altitude Pseudo Satellite).

Źródło: Maraala Aerospace. HAPS (High Altitude Platform Systems): https://maraalaerospace.com/haps/ (dostęp: 10 sierpnia 2025).

Znaczącą rolę odgrywają również w badaniach atmosferycznych. Dzięki długotrwałemu utrzymywaniu się w stratosferze, UAV tego typu umożliwiają prowadzenie obserwacji meteorologicznych, modelowanie dynamiki atmosfery oraz monitorowanie zanieczyszczeń powietrza. W literaturze wskazuje się, że rozwój tej technologii może wspierać globalne strategie w zakresie przeciwdziałania zmianom klimatycznym poprzez dostarczanie wysokiej jakości danych obserwacyjnych (de Boer i in., 2022; Bärfuss i in., 2022).

Rysunek 1.15. UAV solarny wykorzystywany w misjach humanitarnych i kryzysowych.

Źródło: AtlantikSolar: https://www.atlantiksolar.ethz.ch/post_931.html (dostęp: 11 sierpnia 2025).

Szerokie spektrum zastosowań UAV solarnych obejmuje zarówno monitoring klimatyczny, jak i tworzenie systemów komunikacyjnych w trudno dostępnych regionach. Dzięki zdolności do lotu na bardzo dużych pułapach – często powyżej 20 km – urządzenia te mogą pełnić funkcję latających nadajników internetowych, co czyni je szczególnie przydatnymi w działaniach humanitarnych, np. podczas katastrof naturalnych, gdy tradycyjna infrastruktura telekomunikacyjna ulega zniszczeniu (Mershad i in., 2021; Sornek i in., 2025).

Rysunek 1.16. UAV solarny w badaniach atmosferycznych i środowiskowych.

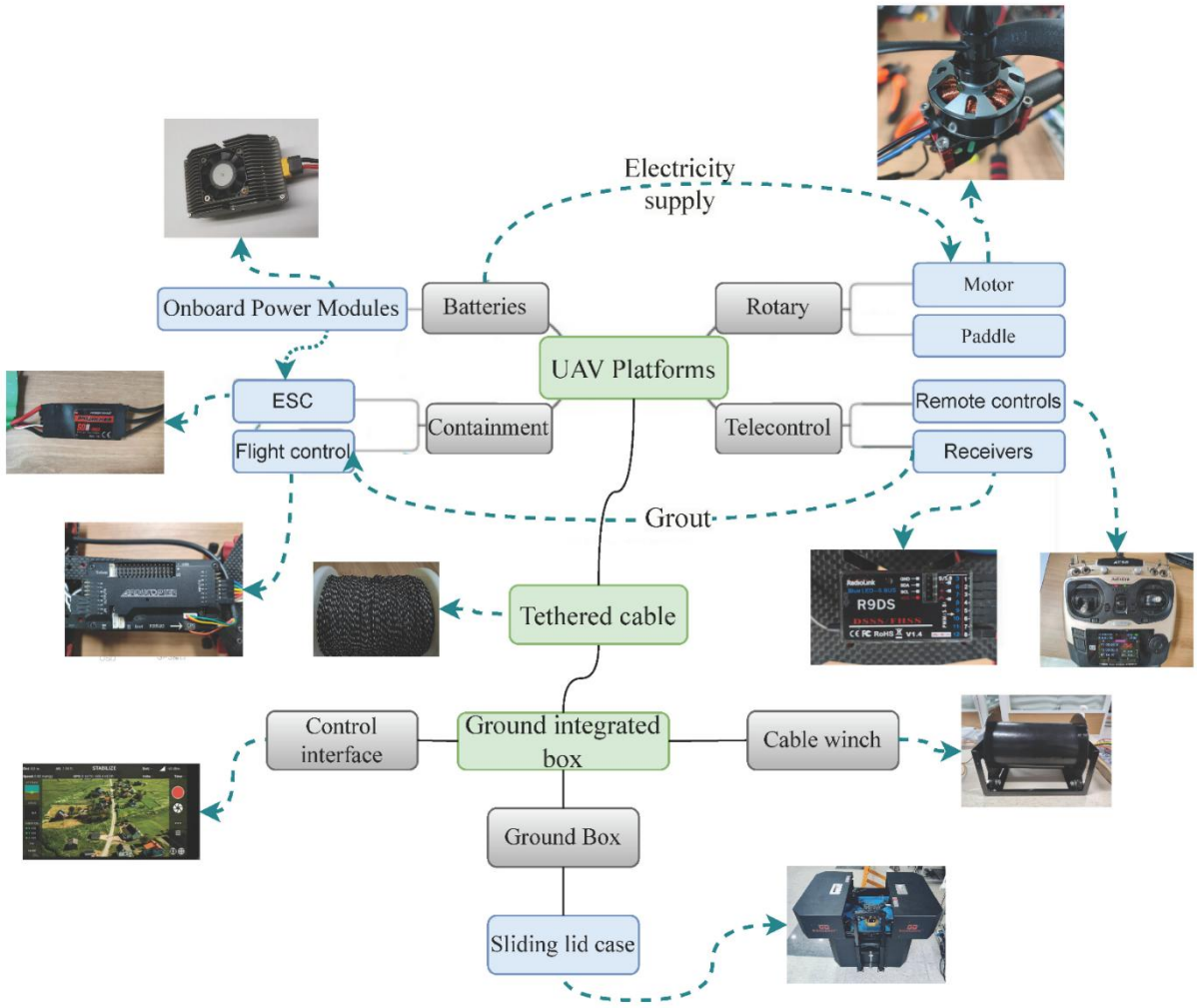
Źródło: New Scientist – „Zephyr solar-powered drone smashes record with 2-month long flight": https://www.newscientist.com/article/2333373-zephyr-solar-powered-drone-smashes-record-with-2-month-long-flight/(dostęp: 11 sierpnia 2025).

Kierunki Kierunki rozwoju UAV napędzanych energią słoneczną koncentrują się obecnie na zwiększeniu efektywności paneli fotowoltaicznych oraz wdrożeniu zaawansowanych systemów magazynowania energii. Szczególne znaczenie ma integracja technologii akumulatorów litowo-siarkowych oraz ogniw wodorowych, które umożliwią jeszcze dłuższe utrzymanie UAV w powietrzu i zapewnią większą niezawodność w zmiennych warunkach środowiskowych (Wu i in., 2023; Gao, Qiao, Pei, Bai, 2023; Sornek i in., 2025). W perspektywie do 2030 roku przewiduje się, że solarnie zasilane UAV będą odgrywać kluczową rolę w telekomunikacji, geoinformatyce, zarządzaniu kryzysowym oraz ochronie środowiska.

1.1.5. UAV o stałej bazie naziemnej (drony na uwięzi)

Bezzałogowe statki powietrzne na uwięzi (ang. tethered drones) stanowią specyficzną kategorię UAV, w której jednostka latająca jest połączona z bazą naziemną przewodem

zasilająco-komunikacyjnym. Rozwiązanie to zapewnia praktycznie nieograniczone źródło energii oraz ciągłą transmisję danych, co eliminuje kluczowe ograniczenia związane z pojemnością akumulatorów (Hartley, Henderson, Jackson, 2022; Tang i in., 2024). Dzięki temu drony tego typu mogą utrzymywać się w powietrzu przez wiele godzin, a nawet dni, bez konieczności przerwy na ładowanie, stając się niezastąpionym narzędziem w zadaniach wymagających ciągłego nadzoru.



Rysunek 1.17. Schemat budowy i działania drona na uwięzi wraz z elementami bazy naziemnej.
Źródło: Tang, Z., Liu, C., Jiang, H., Hou, F., & Wang, S. (2024). Analyzing the Effect of Tethered Cable on the Stability of Tethered UAVs Based on Lyapunov Exponents. Applied Sciences, 14(10), 4253.

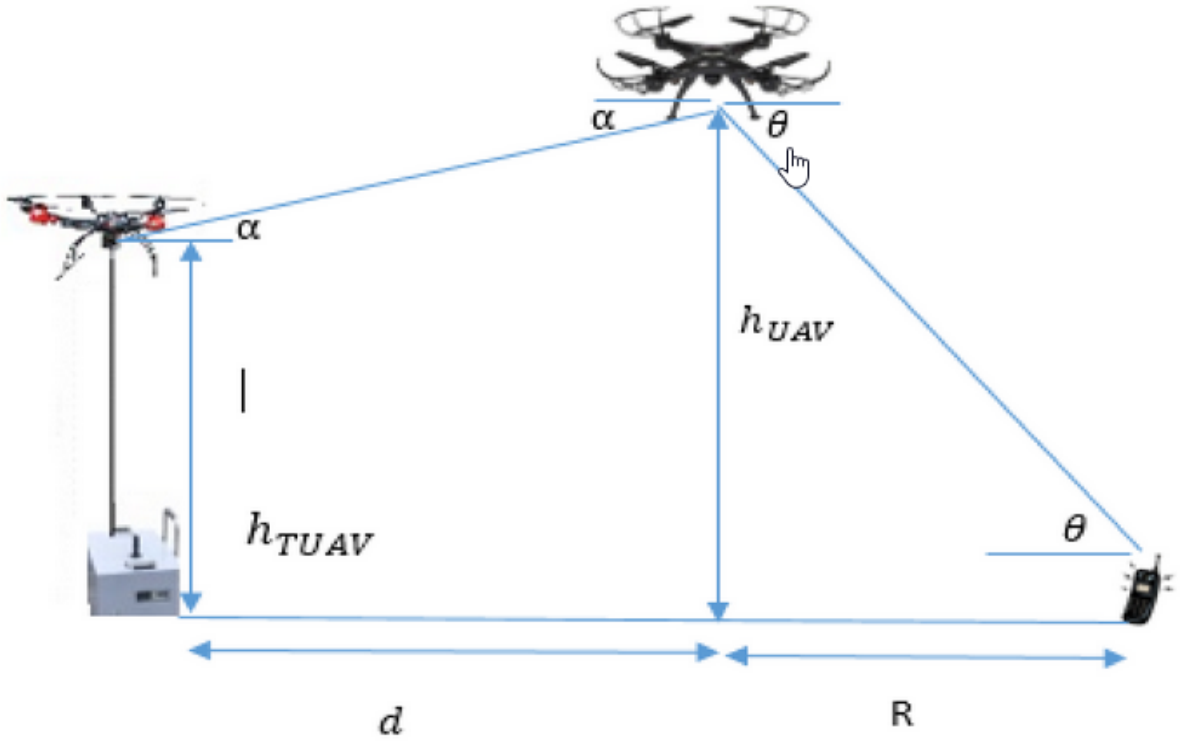
Szeroki wachlarz zastosowań obejmuje zarówno sektor cywilny, jak i wojskowy. W obronności i bezpieczeństwie publicznym pełnią one rolę mobilnych punktów obserwacyjnych, wspierając operacje wojskowe, działania antyterrorystyczne i kontrolę przestrzeni powietrznej (Shakhatreh i in., 2019). Mogą być rozmieszczane na granicach państw w celu prowadzenia długotrwałego monitoringu, a także integrowane z systemami dozoru infrastruktury krytycznej – np. elektrowni, portów morskich czy rurociągów energetycznych. W zastosowaniach cywilnych wykorzystuje się je podczas imprez

masowych do zapewnienia bezpieczeństwa uczestników, a także przez media w transmisjach na żywo. W obszarach dotkniętych katastrofami naturalnymi mogą natomiast wspierać służby ratownicze, dostarczając obraz w czasie rzeczywistym z trudno dostępnych miejsc (Fernández-Caramés, Blanco-Novoa, Froiz-Míguez, Fraga-Lamas, 2019).

Rysunek 1.18. Bezzałogowy statek powietrzny na uwięzi jako mobilny punkt obserwacyjny w misjach wojskowych.
Źródło: Mackenzie, W. (2024). Tethered Drones Deliver Real-Time Surveillance for C5ISR Networks. Unmanned Systems Technology:

https://www.unmannedsystemstechnology.com/feature/tethered-drones-deliver-real-time-surveillance-for-c5isr-networks/ (dostęp: 12 sierpnia 2025).

Jednym z najbardziej innowacyjnych kierunków rozwoju dronów na uwięzi jest ich integracja z sieciami 5G i satelitarnymi systemami komunikacji, dzięki czemu mogą pełnić funkcję latających stacji przekaźnikowych (Zhang, Liu, Ansari 2022; Abohashish, Rizk, Elsedimy, 2023). Pozwala to na wzmacnianie sygnału internetowego w trudno dostępnych regionach, a w warunkach kryzysowych – na przywrócenie podstawowej łączności w strefach, gdzie tradycyjna infrastruktura telekomunikacyjna została zniszczona.



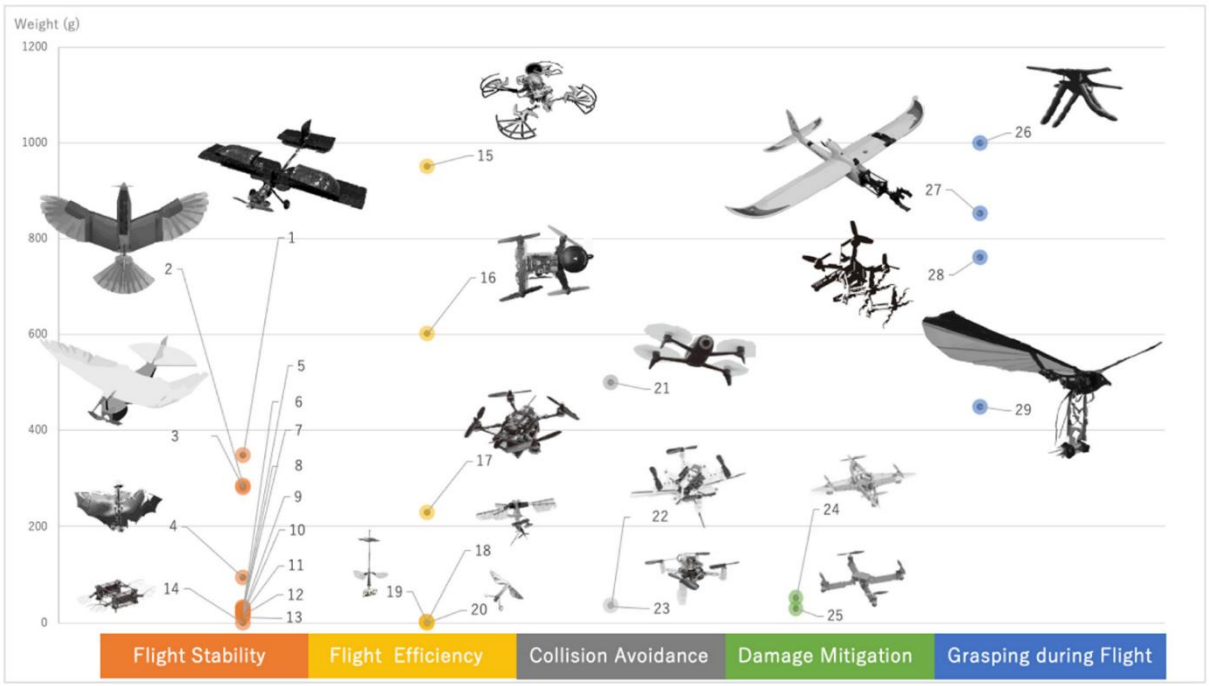
Rysunek 1.19. Dron na uwięzi jako powietrzna stacja przekaźnikowa 5G.

Źródło: Safwat, N. E.-D., Hafez, I. M., & Newagy, F. (2022). 3D Placement of a New Tethered UAV to UAV Relay System for Coverage Maximization. Electronics, 11(3), 385.

Aktualne badania koncentrują się na zwiększeniu długości i wytrzymałości przewodów zasilających, przy jednoczesnym ograniczeniu ich masy oraz podatności na warunki atmosferyczne. Zastosowanie nowoczesnych materiałów i rozwiązań w zakresie transmisji danych pozwala na zapewnienie wysokiej przepustowości przy minimalnych stratach sygnału (Fattori, Cocuzza, 2025). Równolegle rozwijane są systemy autonomicznego sterowania, umożliwiające precyzyjne pozycjonowanie UAV oraz dynamiczne dostosowanie jego położenia do zmian warunków środowiskowych, takich jak podmuchy wiatru czy zakłócenia elektromagnetyczne (Liang, Bai, Meng, 2025). Dzięki połączeniu długotrwałej pracy w powietrzu, stałego dostępu do zasilania i zaawansowanych technologii transmisji danych, dronz na uwięzi zajmują unikalną pozycję wśród systemów UAV. W literaturze podkreśla się ich znaczenie jako rozwiązań pomostowych pomiędzy klasycznymi dronami bateryjnymi, a bardziej złożonymi platformami satelitarnymi, zwłaszcza w kontekście bezpieczeństwa, logistyki i telekomunikacji (Yingst, Marojevic 2023).

1.1.6. UAV inspirowane biologicznie (ornithopters)

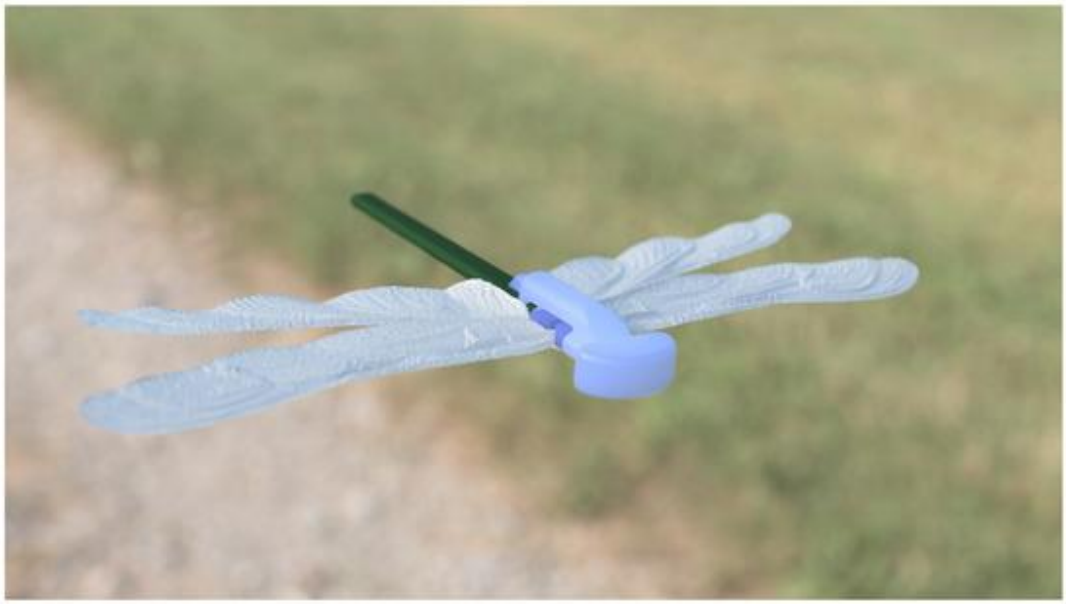
Bezzałogowe statki powietrzne inspirowane biologią, określane mianem ornithopters, charakteryzują się konstrukcją, która naśladuje ruch skrzydeł ptaków i owadów. Ich biomimetyczny charakter pozwala na osiąganie unikalnych zdolności manewrowych, niedostępnych dla tradycyjnych konstrukcji wirnikowych czy stałopłatowych (Keennon, Klingebiel, & Won, 2012).



Rysunek 1.20. Przykładowe konstrukcje UAV inspirowanych ptakami (ornithopters – widok laboratoryjny).

Źródło: Tanaka, S., Asignacion, A., Nakata, T., Suzuki, S., & Liu, H. (2022). Review of Biomimetic Approaches for Drones. Drones, 6(11), 320.

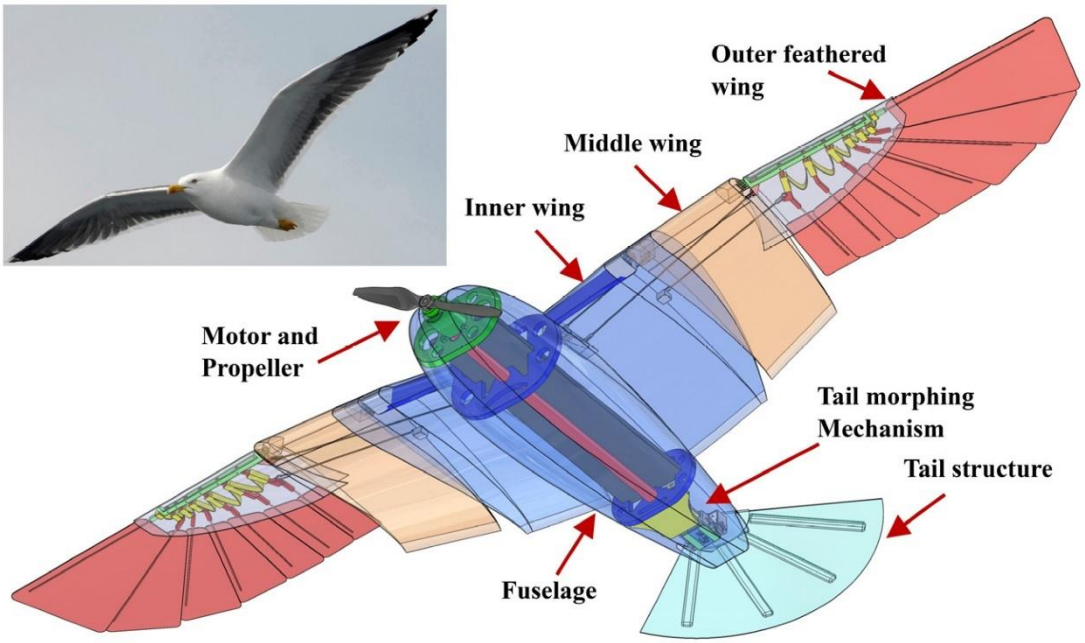
Dzięki odwzorowaniu naturalnych mechanizmów lotu ornithopters mogą poruszać się niemal bezgłośnie, co sprawia, że znajdują zastosowanie w operacjach wymagających skrytości – takich jak misje szpiegowskie, obserwacja przyrody czy monitorowanie gatunków bez ingerencji w ich naturalne środowisko (Floreano, Wood, 2015).



Rysunek 1.21. Biomimetyczny dron inspirowany owadami w locie w zamkniętej przestrzeni.

Źródło: Chahl, J., Chitsaz, N., McIvor, B., Ogunwa, T., Kok, J.-M., McIntyre, T., & Abdullah, E. (2021). Biomimetic drones inspired by dragonflies will require a systems based approach and insights from biology. Drones, 5(2), 24.

Ich wyjątkowa konstrukcja pozwala również na operowanie w trudnodostępnych obszarach, takich jak gęste lasy, jaskinie czy tunele, gdzie konwencjonalne UAV mają ograniczone możliwości manewrowania (Rodríguez-Gómez i in., 2023). W obszarze badań naukowych ornithopters są wykorzystywane do obserwacji zwierząt w warunkach naturalnych, minimalizując wpływ obserwatora na badany ekosystem (Zufferey i in., 2022).



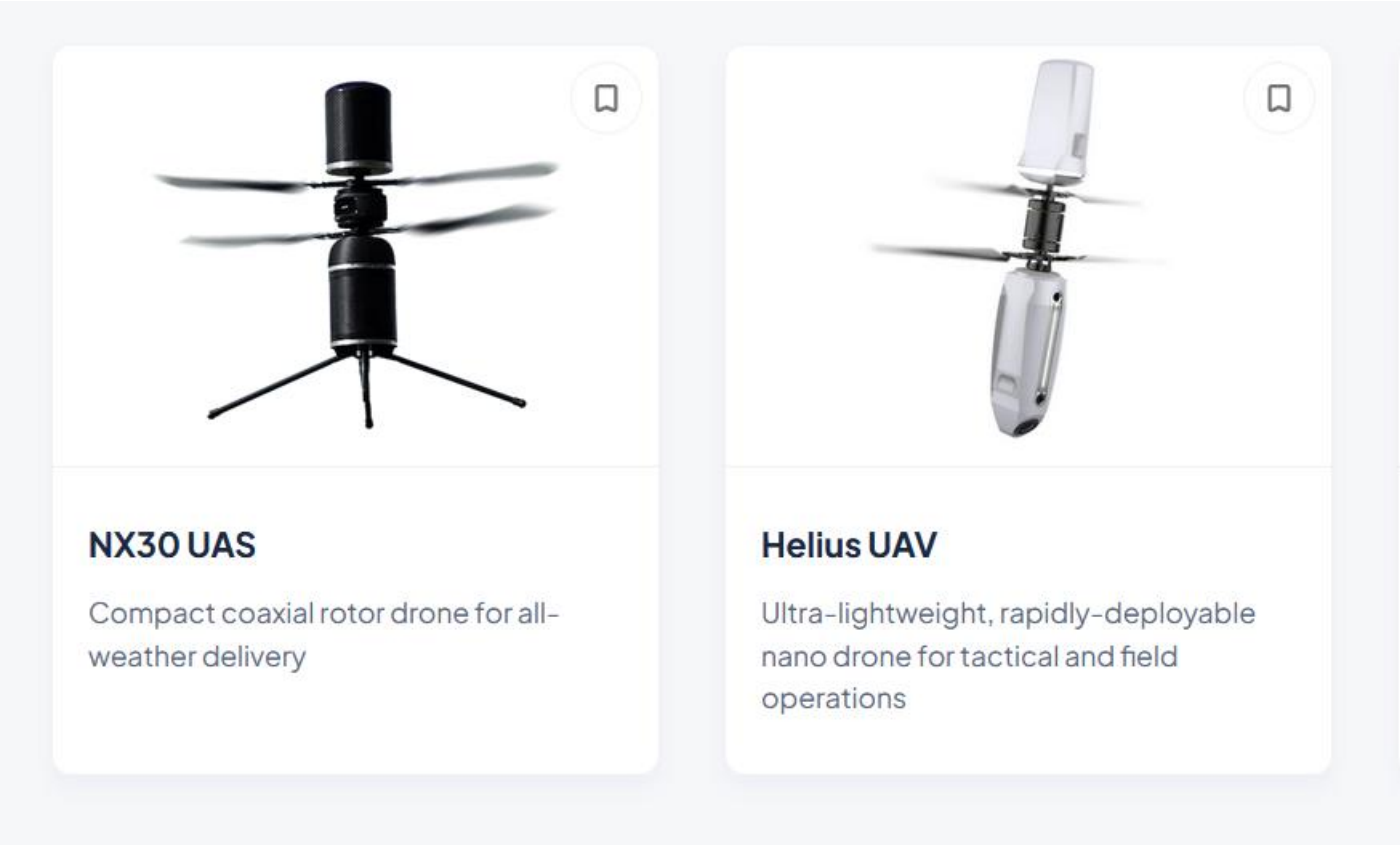
Rysunek 1.22. Schemat konstrukcji skrzydła biomimetycznego UAV z wykorzystaniem kompozytów i MEMS.

Źródło: Bishay, P. L., Rini, A., Brambila, M., Niednagel, P., Eghdamzamiri, J., Yousefi, H., Herrera, J., Saad, Y., Bertuch, E., Black, C., Hanna, D., & Rodriguez, I. (2024). CGull: A Non-Flapping Bioinspired Composite Morphing Drone. Biomimetics, 9(9), 527.

Dynamiczny rozwój technologii napędowych oraz wykorzystanie mikroelektromechanicznych systemów (MEMS) i ultralekkich materiałów kompozytowych otwierają nowe perspektywy dla tego typu rozwiązań. Prognozy wskazują, że w latach 2025–2030 ornithopters znajdą coraz szersze zastosowanie nie tylko w sektorze bezpieczeństwa i monitoringu środowiskowego, ale również w eksploracji przestrzeni kosmicznej, gdzie ich zdolność do elastycznego manewrowania w nietypowych warunkach może okazać się szczególnie przydatna (Chahl i in., 2021).

1.1.7. Nano-UAV i Micro-UAV

Nano- i micro-UAV to ultralekkie platformy bezzałogowe o masie mniejszej niż 250g, zaliczane do kategorii najmniejszych dronów operacyjnych. Dzięki kompaktowej konstrukcji oraz wysokiemu poziomowi manewrowości znajdują zastosowanie w działaniach wymagających operowania w ograniczonej przestrzeni – takich jak inspekcje instalacji przemysłowych, tunele, szyby wentylacyjne czy wnętrza zniszczonych budynków po katastrofach (Müller i in., 2023; López Peña i in., 2024).



Rysunek 1.23. Nano-UAV klasy <250 g wykorzystywany w inspekcjach przemysłowych.

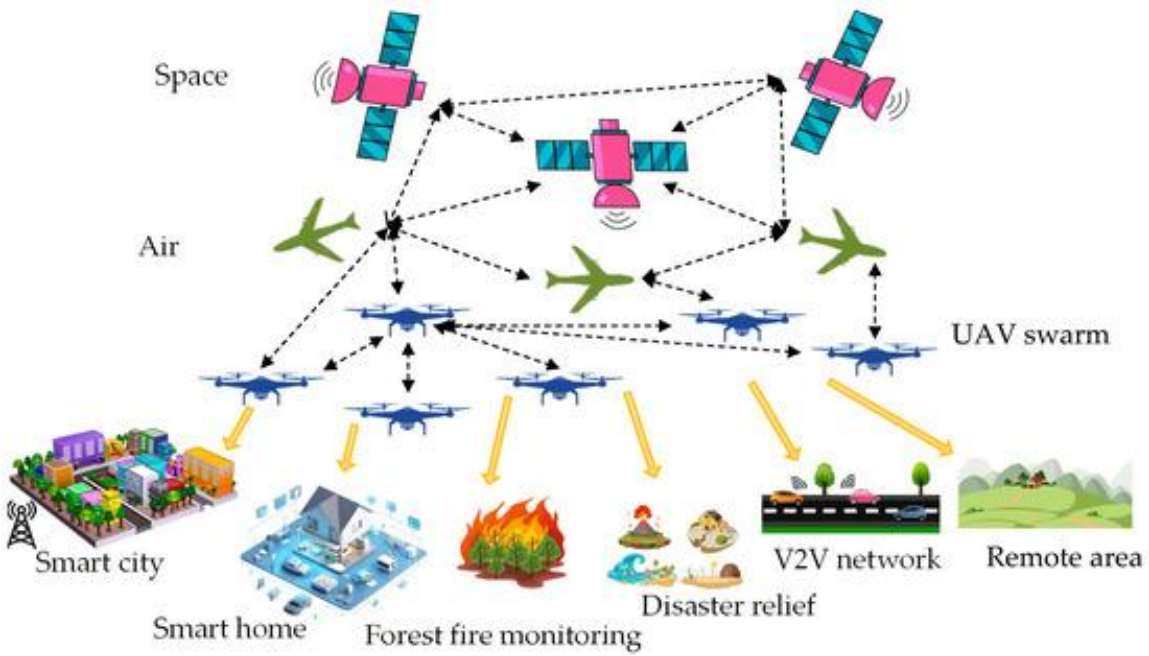
Źródło: Macey, J. Ascent AeroSystems Launches AI-Enabled Sub-250g Coaxial Nano UAV. Unmanned Systems Technology:

https://www.unmannedsystemstechnology.com/2025/03/ascent-aerosystems-launches-ai-enabled-sub-250g-coaxial-nano-uav/ (dostęp: 13 marca 2025).

W środowiskach zurbanizowanych micro-UAV pełnią rolę narzędzi rozpoznania, umożliwiając bezpieczne pozyskiwanie danych w czasie rzeczywistym. W sektorze wojskowym i wywiadowczym tego typu drony są szczególnie cenione za możliwość prowadzenia dyskretnego monitoringu oraz dokumentacji w trudno dostępnych lokalizacjach. Wyposażone w miniaturowe kamery HD, sensory wielospektralne i systemy transmisji danych, pozwalają na prowadzenie obserwacji praktycznie bez ryzyka wykrycia (Shakhatreh i in., 2019).

rola jest istotna także w infrastrukturze krytycznej. UAV (w tym mikro- i miniaturowe konstrukcje) mogą być wykorzystywane do inspekcji mostów, turbin wiatrowych czy rurociągów, gdzie istnieje potrzeba wykrywania mikrouszkodzeń niewidocznych dla ludzkiego oka. Takie rozwiązania zwiększają bezpieczeństwo eksploatacji i ograniczają koszty związane z konserwacją (Eschmann, Kuo, Kuo, Boller, 2013; Shafiee i in., 2021). W sektorze ratowniczym i medycznym ultralekkie drony wspierają działania w warunkach kryzysowych, np. dostarczając próbki biologiczne, leki lub sprzęt pierwszej pomocy do miejsc, do których dostęp tradycyjnymi środkami transportu jest niemożliwy. Dzięki możliwości szybkiego wdrożenia stanowią one ważny element systemów reagowania kryzysowego, zwiększając szanse na uratowanie życia (Floreano, Wood, 2015).

Perspektywy rozwoju obejmują pełną autonomię operacyjną nano- i micro-UAV, osiąganą dzięki integracji z algorytmami sztucznej inteligencji i technologiami rojów (swarm UAV). Oznacza to możliwość jednoczesnego wykorzystania wielu jednostek w misjach zbiorowych, takich jak mapowanie terenów katastrof czy monitorowanie obiektów infrastruktury na dużą skalę (Coppola, McGuire, De Wagter, de Croon, 2020). Równolegle postępuje miniaturyzacja podzespołów oraz rozwój napędów nowej generacji – w tym ogniw paliwowych (głównie wodór-PEM) – co pozwala na wydłużenie czasu lotu i zwiększenie funkcjonalności tej klasy UAV (Shen i in., 2024; Mariscal i in., 2024).



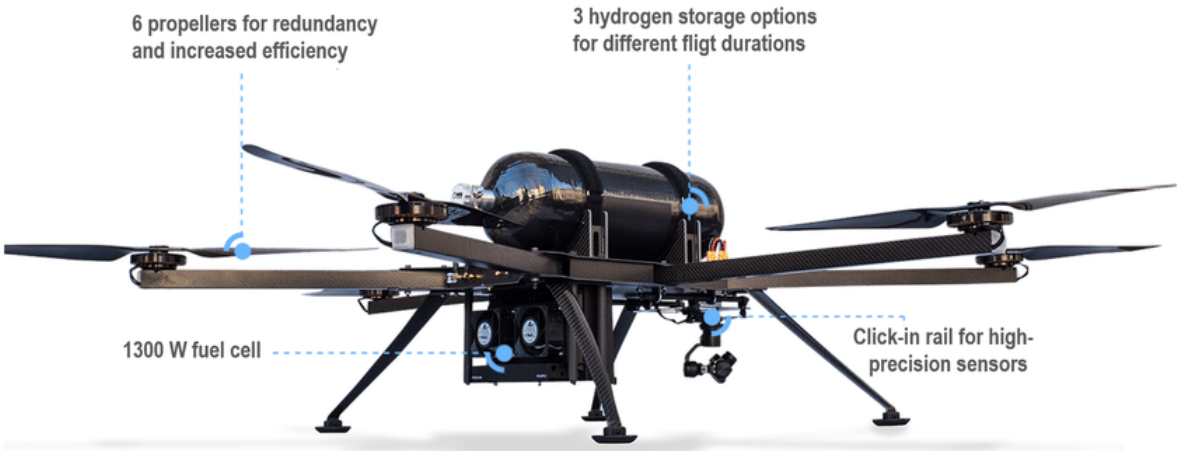
Rysunek 1.24. Koncepcja swarm UAV – nano-drony współpracujące przy mapowaniu terenu katastrofy.
Źródło:Trinh, M. L., Nguyen, D. T., Dinh, L. Q., Nguyen, M. D., Setiadi, D. R. I. M., & Nguyen, M. T. (2025). Unmanned Aerial Vehicles (UAV) networking algorithms: Communication, control, and AI-based approaches. Algorithms, 18(5), 244.

W latach 2025–2030 prognozuje się dynamiczny wzrost zastosowań nano- i micro-UAV, zarówno w obszarze bezpieczeństwa i obronności, jak i w logistyce miejskiej czy ochronie środowiska. Ich unikalne właściwości – miniaturyzacja, niska wykrywalność i zdolność do pracy w ekstremalnie trudnych warunkach – wskazują, że staną się one integralnym elementem nowoczesnych systemów antropotechnicznych.

1.1.8. UAV: zasilane ogniwami paliwowymi

Bezzałogowe statki powietrzne zasilane ogniwami paliwowymi stanowią jedną z najbardziej perspektywicznych gałęzi rozwoju technologii UAV, odpowiadając na wyzwania związane z ograniczoną pojemnością akumulatorów litowo-jonowych. Dzięki zastosowaniu ogniw PEM, platformy te mogą charakteryzować się znacznie wydłużonym czasem lotu — w wielu analizach wielokrotnie przewyższającym możliwości baterii — co otwiera nowe możliwości dla zastosowań w logistyce, inspekcji infrastruktury czy nadzorze środowiskowym (Shuhayeu, Martsinchyk, Martsinchyk, Milewski, 2024; Santos, Ferreira, Falcão, Pinto,

2022). Ogólny schemat tego typu rozwiązania dla UAV zasilanego wodorowym ogniwem paliwowym przedstawiono na rysunku 1.25.



Rysunek 1.25. Schemat UAV zasilanego ogniwem paliwowym.
Źródło: Boukoberine, M. N., Zhou, Z., & Benbouzid, M. (2019). A Critical Review on Unmanned Aerial Vehicles Power Supply and Energy Management: Solutions, Strategies, and Prospects. Applied Energy, 255, 113823.

Zaletą UAV zasilanych wodorem jest także redukcja emisji zanieczyszczeń, co wpisuje je w strategie globalnej dekarbonizacji transportu i przemysłu. Wysoka gęstość energetyczna wodoru w połączeniu z minimalną masą systemów ogniw paliwowych umożliwia realizację misji, które wcześniej wymagały użycia dużych i ciężkich platform. W literaturze podkreśla się, że tego typu drony stosuje się w długotrwałym monitoringu obszarów leśnych, rolniczych oraz w inspekcjach infrastruktury i przemysłu wydobywczego (Shen i in., 2024; Tian, Zhang, Zhou, Guo, 2025; Santos, Ferreira, Falcão, Pinto, 2022).

Kolejnym istotnym kierunkiem rozwoju jest integracja UAV zasilanych wodorem z systemami magazynowania energii i inteligentnym zarządzaniem mocą, co pozwala na stabilizację pracy drona w warunkach zmiennych obciążeń. Badania wskazują, że hybrydowe konfiguracje ogniw paliwowych i akumulatorów zwiększają niezawodność systemu oraz umożliwiają bardziej efektywne wykorzystanie dostępnej energii. Rozwiązania tego typu testuje się np. w systemach UAM, gdzie ogniwo paliwowe współpracuje z baterią i systemem zarządzania mocą (Yun, Im, Han, 2025).

W perspektywie najbliższej dekady UAV zasilane wodorem mogą odegrać kluczową rolę w sektorze transportu medycznego i ratowniczego, umożliwiając szybkie dostawy leków, organów do transplantacji czy sprzętu ratującego życie w trudno dostępne obszary. Zastosowanie lekkich materiałów kompozytowych oraz miniaturyzacja komponentów ogniw paliwowych umożliwi budowę bardziej kompaktowych i ekonomicznych platform. Ich potencjał w kontekście zrównoważonego rozwoju i bezpieczeństwa energetycznego jest rosnący (Shen i in., 2024; Taylor, Rivera, 2022).

Uzupełniając charakterystykę tej klasy platform, należy wspomnieć o UAV z napędem hybrydowym, łączących zalety silników spalinowych i elektrycznych. Tego typu konstrukcje, będące pomostem między tradycyjnymi systemami a platformami wodorowymi, umożliwiają wydłużenie czasu lotu, zwiększenie udźwigu oraz większą elastyczność operacyjną.

Hybrydowe UAV są szczególnie użyteczne w misjach o zmiennym profilu pracy — np. start i lądowanie w trybie elektrycznym (cichym i bezemisyjnym), a następnie lot przelotowy wspierany silnikiem spalinowym. W literaturze wskazuje się, że takie systemy hybrydowe, integrujące silnik spalinowy, elektryczny napęd i system zarządzania energią, będą stanowić fazę przejściową przed pełnym wdrożeniem UAV zasilanych wodorem (Tian, Zhang, Zhou, Guo, 2025).

1.2. Obszary zastosowania współczesnych systemów UAV

Bezzałogowe statki powietrzne (UAV) stanowią jedno z najbardziej dynamicznie rozwijających się narzędzi technologicznych, znajdując zastosowanie w szerokim zakresie sektorów gospodarki. Od logistyki, przez inspekcję infrastruktury, rolnictwo precyzyjne, aż po systemy militarno-obronne – drony rewolucjonizują sposób, w jaki realizowane są kluczowe operacje. Współczesne UAV, dzięki integracji z systemami sztucznej inteligencji (AI), czujnikami wielospektralnymi oraz technologiami autonomicznej nawigacji, pozwalają na optymalizację procesów, zwiększenie efektywności oraz redukcję kosztów operacyjnych. Poniżej przedstawiono najważniejsze obszary zastosowania dronów, które odgrywają coraz większą rolę w nowoczesnych systemach technologicznych.

1.2.1. Logistyka i transport

Drony odgrywają coraz większą rolę w logistyce, wspierając zarządzanie inwentarzem oraz procesy dostaw na różnych etapach łańcucha dostaw. Wdrożenie UAV w magazynach przyczynia się do optymalizacji wykorzystania przestrzeni oraz automatyzacji procesów załadunkowych, co skraca czas operacyjny i zwiększa wydajność prac magazynowych. Drony mogą prowadzić autonomiczne inwentaryzacje, monitorować ruch towarów w czasie rzeczywistym oraz analizować dane, co przekłada się na poprawę efektywności całego łańcucha dostaw. W szczególności, w dostawach ostatniej mili UAV mogą znacząco zwiększyć efektywność oraz zmniejszyć emisję CO_2 w porównaniu do tradycyjnych metod transportu, ograniczając liczbę pojazdów spalinowych w miastach (Mohamed, Mohamed, 2025; Tadić, Kovač, Čokorilo, 2021).

Jednym z najbardziej rozwiniętych obszarów wykorzystania dronów w logistyce są autonomiczne systemy dostaw wdrażane przez liderów rynku, takich jak Amazon Prime Air, UPS Flight Forward, Wing (Alphabet) czy JD.com. Systemy te umożliwiają dostawy paczek bezpośrednio do klientów, pomijając pośrednie punkty dystrybucyjne. Amazon intensywnie testuje rozwiązania do dostarczania paczek o masie do 2,5 kg w krótkim czasie, próbując skrócić czas dostawy do poniżej 30 minut. Współcześnie badania strategiczne zwracają uwagę na możliwość wdrażania takich modeli w e-commerce, integrując aspekty ekonomiczne i środowiskowe (Min, 2023). Modele matematyczne optymalizujące trasy dostaw UAV zwracają uwagę na znaczenie kosztów energii, opóźnień i elastyczności w scenariuszach on-demand (Li i in., 2025). W obszarach wiejskich proponuje się współpracę dronów z ciężarówkami, co pozwala na efektywne pokrycie ostatniej mili przy zrównoważonym zużyciu zasobów (Xiao i in., 2024; Dai, Cai, Wang, 2025).

Drony transportowe zyskują również na znaczeniu w transporcie medycznym, umożliwiając szybkie dostarczanie próbek biologicznych, leków czy krwi pomiędzy placówkami medycznymi. Dzięki zdolności do pokonywania trudnych terenów UAV mogą zapewnić dostawy do regionów odciętych od tradycyjnych sieci logistycznych, co znajduje

zastosowanie m.in. w Afryce, gdzie systemy dronowe wykorzystywane są do transportu szczepionek i leków ratujących życie a także w Azji, gdzie w Indiach przeprowadzono wdrożenia systemów dronowych w regionach górzystych i trudno dostępnych, pokazując ich efektywność oraz wyzwania operacyjne (Aggarwal i in., 2023). W Europie i Stanach Zjednoczonych testowane są również drony transportujące narządy do przeszczepów, co w przyszłości może znacząco zwiększyć szanse pacjentów na szybki dostęp do ratujących życie operacji.

Jednym z kluczowych aspektów rozwoju UAV w logistyce jest integracja sztucznej inteligencji (AI), która pozwala na pełną automatyzację procesów planowania, nawigacji oraz optymalizacji tras lotu. AI umożliwia dronom analizę danych w czasie rzeczywistym, podejmowanie decyzji operacyjnych oraz dynamiczną reakcję na zmieniające się warunki. Drony wyposażone w algorytmy AI mogą realizować zadania takie jak autonomiczna inwentaryzacja, śledzenie przepływu towarów czy wykrywanie anomalii w pracy systemów logistycznych, co przyczynia się do budowy inteligentnych i odpornych łańcuchów dostaw (Fernández-Caramés, Blanco-Novoa, Froiz-Míguez, Fraga-Lamas, 2019):

- Samodzielnie planować optymalne trasy lotów, minimalizując zużycie energii oraz czas dostawy,
- Unikać przeszkód, wykorzystując zaawansowane systemy przetwarzania obrazu i LIDAR,
- Automatycznie rozpoznawać towary i lokalizować paczki w magazynach, eliminując błędy ludzkie,
- Współpracować w roju (swarm UAV), umożliwiając skoordynowane dostawy dużej liczby przesyłek jednocześnie .

W szczególności, systemy zarządzania flotą UAV oparte na sztucznej inteligencji (AI) pozwalają na ciągłą analizę ruchu powietrznego i adaptacyjne dostosowywanie tras do zmieniających się warunków pogodowych czy obciążenia przestrzeni powietrznej. Badania wskazują, że hybrydowe strategie AI, łączące metody uczenia maszynowego i reguły eksperckie, znacząco poprawiają możliwości autonomicznej nawigacji dronów w złożonych środowiskach (San-Segundo, Angulo, Gil-Martín, Carramiñana, Bernardos, 2024). Oprócz lekkich UAV, które znajdują zastosowanie w dostawach ostatniej mili, na znaczeniu zyskują także ciężkie drony cargo, projektowane do transportu większych ładunków na średnich i długich dystansach. Firmy takie jak Volocopter, Elroy Air, Dronamics czy Airbus rozwijają autonomiczne pojazdy powietrzne o ładowności od 200 do 500 kg, co może zrewolucjonizować globalne łańcuchy dostaw (Hassanalian, Abdelkefi, 2017; Marintseva, Dixon, Yun, 2024).

- Dronamics Black Swan – UAV cargo zdolny do transportu ładunku o wadze 350 kg na dystansie 2500 km,
- Elroy Air Chaparral – hybrydowy dron VTOL do autonomicznych dostaw ładunków do trudno dostępnych miejsc,
- Airbus Skyways – system UAV przeznaczony do logistyki miejskiej i transportu lotniczego,
- AERO NEX HeavyLift – projektowany w Berlinie dron cargo o modułowej konstrukcji, umożliwiający transport ładunków o masie do 450 kg, przeznaczony zarówno do logistyki miejskiej, jak i operacji międzyregionalnych.

Ciężkie drony cargo znajdują zastosowanie w logistyce przemysłowej, gdzie mogą być wykorzystywane do transportu komponentów pomiędzy zakładami produkcyjnymi, eliminując konieczność angażowania tradycyjnych środków transportu naziemnego. W trudnodostępnych terenach UAV cargo mogą również dostarczać sprzęt i zaopatrzenie, np. na platformy wiertnicze, statki na pełnym morzu czy obszary dotknięte klęskami żywiołowymi.

W miastach integracja UAV z systemami Urban Air Mobility (UAM) otwiera nowe możliwości w zakresie redukcji korków i optymalizacji transportu towarowego. Drony będą mogły współpracować z autonomicznymi pojazdami naziemnymi i hubami logistycznymi, co pozwoli na pełną automatyzację dostaw miejskich. Dubaj, Singapur, Tokio i Los Angeles to przykłady miast, w których prowadzone są testy infrastruktury dla UAV, takich jak bezzałogowe centra przeładunkowe i vertiporty na dachach budynków, co potwierdzają prace takich autorów jak Lee i Cho (2025), którzy w badaniu „Optimal Location of Urban Air Mobility (UAM) Vertiport Using a Three-Stage Geospatial Analysis Framework" pokazują metodologię lokalizowania vertiportów w gęsto zabudowanych obszarach miejskich.

Pomimo dynamicznego rozwoju rynku UAV w logistyce, ich masowe wdrożenie napotyka na istotne bariery technologiczne i regulacyjne (Singh i in., 2025; Sadrani, Adamidis, Garrow, Antoniou, 2025; Wang i in., 2023; Al-Sabbagh i in., 2025):

- Ograniczona autonomia lotu – większość obecnych UAV nadal ma ograniczony czas pracy na jednym ładowaniu, co wpływa na ich efektywność operacyjną (Singh i in., 2025).
- Złożona integracja z przestrzenią powietrzną – rozwój systemów Unmanned Traffic Management (UTM) / U-space będzie kluczowy dla bezpiecznej integracji UAV z tradycyjnym ruchem lotniczym (Sadrani, Adamidis, Garrow, Antoniou, 2025).
- Kwestie bezpieczeństwa i cyberzagrożeń – systemy UAV są narażone na potencjalne ataki hakerskie i zakłócenia sygnału GPS, co stanowi poważne ryzyko operacyjne (Wang i in., 2023; Al-Sabbagh i in., 2025).
- Regulacje prawne i międzynarodowe różnice w przepisach – brak jednolitych ram prawnych nadal utrudnia rozwój globalnych operacji UAV (Sadrani, Adamidis, Garrow, Antoniou, 2025).

W perspektywie do 2030 roku przewiduje się rozwój dronów o napędzie wodorowym, wdrożenie autonomicznych hubów logistycznych oraz pełną integrację UAV z sieciami 5G i AI, co uczyni transport lotniczy bezzałogowy jeszcze bardziej efektywnym (Mohamed, Al-Jaroodi, Jawhar, Idries, Mohammed, 2020).

1.2.2. Przemysł i inspekcje infrastrukturalne

Nowoczesne UAV rewolucjonizują procesy inspekcyjne w wielu sektorach przemysłu, umożliwiając szybkie, bezpieczne i precyzyjne monitorowanie obiektów o krytycznym znaczeniu. Wyposażone w zaawansowane systemy wizyjne, LIDAR oraz algorytmy sztucznej inteligencji, drony są w stanie autonomicznie prowadzić inspekcje mostów, turbin wiatrowych, linii wysokiego napięcia, rurociągów czy zakładów przemysłowych. Zastosowanie UAV pozwala znacząco skrócić czas przeprowadzania inspekcji, redukując jednocześnie koszty operacyjne oraz eliminując konieczność narażania ludzi na ryzyko w trudno dostępnych i potencjalnie niebezpiecznych środowiskach (Nooralishahi i in., 2021).

W sektorze energetycznym drony inspekcyjne wykorzystywane są do monitorowania farm wiatrowych, paneli fotowoltaicznych oraz linii przesyłowych. Zastosowanie kamer termowizyjnych i czujników multispektralnych umożliwia wykrywanie mikropęknięć w łopatach turbin, przegrzewających się elementów sieci czy uszkodzonych modułów paneli słonecznych. Dzięki sztucznej inteligencji analiza danych odbywa się w czasie rzeczywistym, co skraca czas reakcji serwisowej i zmniejsza ryzyko poważniejszych awarii (Barraz, Sebari, Ait El Kadi, Ait Abdelmoula, 2025).

W przemyśle petrochemicznym i chemicznym UAV wykorzystywane są do monitorowania rurociągów, zbiorników magazynowych oraz zakładów produkcyjnych. Regularne naloty pozwalają na szybkie wykrycie wycieków substancji niebezpiecznych, oznak korozji czy mikrouszkodzeń strukturalnych. Dzięki integracji z czujnikami gazowymi i kamerami hiperspektralnymi możliwe jest również monitorowanie poziomu emisji związków szkodliwych, co wspiera działania w zakresie bezpieczeństwa i ochrony środowiska (Lenda, Borowiec, Marmol, 2023).

W budownictwie i inżynierii lądowej UAV wspierają zarówno bieżący nadzór nad inwestycjami, jak i kontrolę jakości wykonanych konstrukcji. Drony wyposażone w systemy LIDAR tworzą szczegółowe modele 3D mostów, tuneli czy wieżowców, co pozwala na dokładną ocenę stanu technicznego. Regularne loty inspekcyjne umożliwiają wczesne wykrycie defektów, takich jak mikropęknięcia czy deformacje, oraz ocenę zgodności postępu prac z planami projektowymi (Siebert, Teizer, 2014; Zhang, Elaksher, 2012).

Znaczący obszar wykorzystania UAV stanowi infrastruktura transportowa. Inspekcje mostów, wiaduktów, autostrad i linii kolejowych za pomocą dronów ograniczają potrzebę zamykania obiektów na czas kontroli technicznych, co minimalizuje zakłócenia w ruchu. Wysokiej rozdzielczości obrazy oraz algorytmy AI umożliwiają automatyczne wykrywanie ubytków, rys czy śladów korozji. Szczególnie rozwiniętym obszarem jest inspekcja torowisk i sieci trakcyjnych, gdzie UAV z LiDAR i kamerami termowizyjnymi wykrywają deformacje szyn, uszkodzenia izolatorów czy problemy w sieci trakcyjnej. W Europie i USA coraz więcej kolei narodowych wdraża systemy UAV do regularnego nadzoru, co poprawia bezpieczeństwo i obniża koszty utrzymania (Li i in., 2022; Villarino i in., 2025).

Istotnym kierunkiem rozwoju są inspekcje hydrotechniczne. UAV wykorzystywane są do monitorowania zapór, wałów przeciwpowodziowych i zbiorników retencyjnych. Regularne naloty umożliwiają ocenę stanu konstrukcji, wykrywanie erozji oraz pęknięć. Zastosowanie kamer RGB, LiDAR oraz kamer termowizyjnych pozwala na wczesne wykrywanie przesiąków, deformacji czy miejsc potencjalnego rozmycia korpusu, a algorytmy głębokiego uczenia automatyzują proces detekcji i klasyfikacji uszkodzeń, co znacząco zwiększa skuteczność działań prewencyjnych (Zhou, Almustafa, Nehdi, Su, 2024; Wang, Liang, Rongliang, 2024; Dong i in., 2024).

Nowym trendem jest wykorzystanie UAV w analizie predykcyjnej. Połączenie dronów z Big Data i uczeniem maszynowym umożliwia identyfikację wzorców awarii oraz prognozowanie potencjalnych uszkodzeń. Algorytmy analizujące dane historyczne i bieżące pozwalają wskazać elementy infrastruktury wymagające konserwacji jeszcze przed wystąpieniem faktycznej awarii. Takie podejście zmniejsza koszty utrzymania i zwiększa bezpieczeństwo użytkowania obiektów (Werbińska-Wojciechowska, Giel, Winiarska, 2024).

Przykłady wdrożeń UAV w inspekcjach przemysłowych pokazują rosnące znaczenie tej technologii w praktyce gospodarczej:

- Siemens i General Electric wykorzystują UAV do inspekcji turbin wiatrowych i linii energetycznych, podnosząc efektywność operacyjną i redukując koszty utrzymania (Svystun i in., 2025),
- Shell i BP stosują drony w przemyśle naftowym do monitorowania platform wiertniczych i rurociągów, co umożliwia szybsze wykrywanie nieszczelności (Panigati, 2025),
- Federal Aviation Administration (FAA) w USA wdraża UAV do inspekcji pasów startowych i lotnisk, skracając czas przestojów i zwiększając bezpieczeństwo (Zhang, Pakrashi, Murphy, Hao, 2024),
- Deutsche Bahn monitoruje linie kolejowe w Niemczech flotą dronów, wykrywając defekty z wyprzedzeniem i ograniczając ryzyko awarii infrastruktury (Villarino i in., 2025).

W perspektywie do 2030 roku przewiduje się dalszy rozwój autonomicznych systemów UAV, które będą jeszcze ściślej zintegrowane z infrastrukturą IoT i sieciami komunikacyjnymi nowej generacji. Zamiast ograniczać się do pojedynczych lotów inspekcyjnych, UAV będą działały w trybie ciągłym, tworząc sieci monitorujące w czasie rzeczywistym. Szczególne znaczenie będzie miało wydłużenie czasu operacyjnego dzięki rozwojowi alternatywnych systemów zasilania, takich jak magazyny energii nowej generacji czy lekkie ogniwa paliwowe, pozwalające na realizację długodystansowych misji bez konieczności częstego doładowywania (Sun i in., 2022). Coraz większą rolę odegrają również roje UAV (swarm), zdolne do równoczesnego monitorowania wielu obiektów infrastrukturalnych (Liu, Wang, Yin, 2025).

Podsumowanie. UAV stały się kluczowym narzędziem w inspekcjach przemysłowych, pozwalając na dokładniejsze, szybsze i bardziej efektywne zarządzanie infrastrukturą. Dzięki integracji z AI i systemami sensorycznymi zapewniają wczesne wykrywanie awarii, redukują koszty utrzymania i zwiększają niezawodność procesów w kluczowych sektorach gospodarki (Villarino i in., 2025; Mendu, Mbuli, 2025). W nadchodzących latach ich rola będzie rosła, a inspekcje oparte na UAV staną się standardem w energetyce, transporcie, budownictwie i przemyśle ciężkim, wypierając tradycyjne, czasochłonne metody kontroli.

1.2.3. UAV w sektorze energetycznym

Bezzałogowe statki powietrzne (UAV) odgrywają kluczową rolę w sektorze energetycznym, wspierając inspekcję i utrzymanie infrastruktury oraz zwiększając efektywność operacyjną. Ich zastosowanie znacząco poprawia bezpieczeństwo pracy, ogranicza koszty konserwacji i minimalizuje ryzyko nieplanowanych przestojów w produkcji energii. Współczesne UAV znajdują zastosowanie zarówno w odnawialnych źródłach energii (OZE), jak i w konwencjonalnych elektrowniach węglowych, gazowych czy jądrowych, oferując rozwiązania, które jeszcze dekadę temu wymagały angażowania ciężkiego sprzętu i zespołów techników (Zhang, Shu, 2024).

Jednym z najczęstszych i najbardziej rozwiniętych obszarów zastosowania UAV w energetyce jest monitorowanie i diagnostyka linii przesyłowych wysokiego napięcia oraz powiązanej infrastruktury elektroenergetycznej. Tradycyjne metody kontroli wymagają inspekcji wykonywanych ręcznie lub z wykorzystaniem pojazdów specjalistycznych, co wiąże się z wysokimi kosztami, ryzykiem wypadków i znacznymi ograniczeniami logistycznymi. Wprowadzenie UAV w znacznym stopniu usprawniło te procesy, umożliwiając szybkie

i precyzyjne wykrywanie usterek w czasie rzeczywistym oraz planowanie działań konserwacyjnych z wyprzedzeniem.

Drony wyposażone w nowoczesne systemy wizyjne oraz sensory termowizyjne i multispektralne są zdolne do:

- Bezkontaktowej diagnostyki – kamery wysokiej rozdzielczości rejestrują najmniejsze anomalie, a obrazowanie w podczerwieni identyfikuje punkty nadmiernego nagrzewania się przewodów i izolatorów, co często jest pierwszym sygnałem przeciążenia (Atencia Payares i in., 2023),
- Wczesnego wykrywania usterek – systemy AI analizują dane w locie, wskazując miejsca wymagające interwencji technicznej, zanim dojdzie do faktycznej awarii i zakłóceń w dostawie energii (Lu i in., 2024; Chatzargyros i in., 2024),
- Poprawy bezpieczeństwa pracy – UAV eliminują konieczność wspinania się pracowników na słupy i wieże przesyłowe, ograniczając ryzyko wypadków w trudnym i niebezpiecznym środowisku (Lu i in., 2024; Chatzargyros i in., 2024).

Jednym z najczęstszych i najbardziej rozwiniętych obszarów zastosowania UAV w energetyce jest monitorowanie i diagnostyka linii przesyłowych wysokiego napięcia oraz powiązanej infrastruktury elektroenergetycznej. Tradycyjne metody kontroli wymagają inspekcji wykonywanych ręcznie lub z wykorzystaniem pojazdów specjalistycznych, co wiąże się z wysokimi kosztami, ryzykiem wypadków i znacznymi ograniczeniami logistycznymi. Wprowadzenie UAV w znacznym stopniu usprawniło te procesy, umożliwiając szybkie i precyzyjne wykrywanie usterek w czasie rzeczywistym oraz planowanie działań konserwacyjnych z wyprzedzeniem.

W ostatnich latach szczególne znaczenie zyskało wykorzystanie UAV do monitorowania rozległych sieci przesyłowych w terenie górskim i trudno dostępnym, gdzie dostęp tradycyjnymi metodami jest ograniczony. Dzięki zastosowaniu technologii LIDAR i systemów pozycjonowania satelitarnego możliwe stało się tworzenie szczegółowych modeli 3D infrastruktury, które pozwalają na dokładniejsze planowanie prac związanych z utrzymaniem i ocenę wpływu warunków środowiskowych, takich jak oblodzenie przewodów czy oddziaływanie silnego wiatru.

Integracja UAV z platformami zarządzania danymi umożliwia tworzenie cyfrowych bliźniaków (digital twins) sieci elektroenergetycznych, co pozwala na długofalowe monitorowanie ich kondycji i symulowanie scenariuszy obciążeniowych. Tego typu rozwiązania zwiększają niezawodność dostaw energii i wspierają predykcyjną konserwację, co stanowi istotny krok w stronę inteligentnych systemów elektroenergetycznych (Chatzargyros i in., 2024).

Rysunek 1.26. UAV podczas inspekcji linii przesyłowych wysokiego napięcia.

Źródło: Li, Z., Zhang, Y., Wu, H., Suzuki, S., Namiki, A., & Wang, W. (2023). Design and application of a UAV autonomous inspection system for high-voltage power transmission lines. Remote Sensing, 15(3), 865.

W sektorze odnawialnych źródeł energii (OZE) UAV stają się obecnie standardowym narzędziem diagnostyki farm wiatrowych. Dotychczasowe procedury kontrolne wymagały zatrzymywania turbin w celu przeprowadzenia ręcznych inspekcji, co wiązało się z wysokimi kosztami oraz stratami produkcyjnymi wynikającymi z konieczności przestoju. Zastosowanie dronów pozwala na prowadzenie inspekcji w trybie ciągłym, bez potrzeby wyłączania turbiny z pracy, co przekłada się na wzrost efektywności operacyjnej i ograniczenie strat finansowych operatorów.

Nowoczesne UAV wyposażone w kamery wysokiej rozdzielczości, systemy termowizyjne oraz sensory multispektralne umożliwiają (Heo, Na, 2025):

- Szybkie przeglądy techniczne – kontrola łopat wirników i elementów konstrukcyjnych odbywa się w ciągu kilkunastu minut, bez ingerencji w pracę turbiny;
- Precyzyjne wykrywanie mikropęknięć – obrazowanie z wykorzystaniem fotogrametrii i kamer UV pozwala na identyfikację defektów niewidocznych gołym okiem, co zapobiega poważniejszym awariom;
- Analizę przepływu powietrza i ocenę efektywności pracy turbiny – drony mogą monitorować aerodynamikę wirnika, wspierając optymalizację ustawienia turbin względem kierunku wiatru.

Systemy inspekcyjne bazujące na UAV pozwalają nie tylko znacząco skrócić czas diagnostyki, ale także wydłużyć żywotność kluczowych elementów konstrukcyjnych, takich jak łopaty wirników czy przekładnie. Operatorzy farm zyskują narzędzie wspierające konserwację predykcyjną, w ramach której potencjalne uszkodzenia są identyfikowane i naprawiane zanim wpłyną na ciągłość produkcji energii. W dłuższej perspektywie przyczynia się to do redukcji kosztów eksploatacyjnych oraz zwiększenia niezawodności całego systemu wytwarzania energii odnawialnej (Zhang, Pakrashi, Murphy, Hao, 2024).

Rysunek 1.27. UAV w inspekcji łopat wirnika turbiny wiatrowej.
Źródło: Shafiee, M., Zhou, Z., Mei, L., Dinmohammadi, F., Karama, J., & Flynn, D. (2021). Unmanned aerial drones for inspection of offshore wind turbines: A mission-critical failure analysis. Robotics, 10(1), 26.

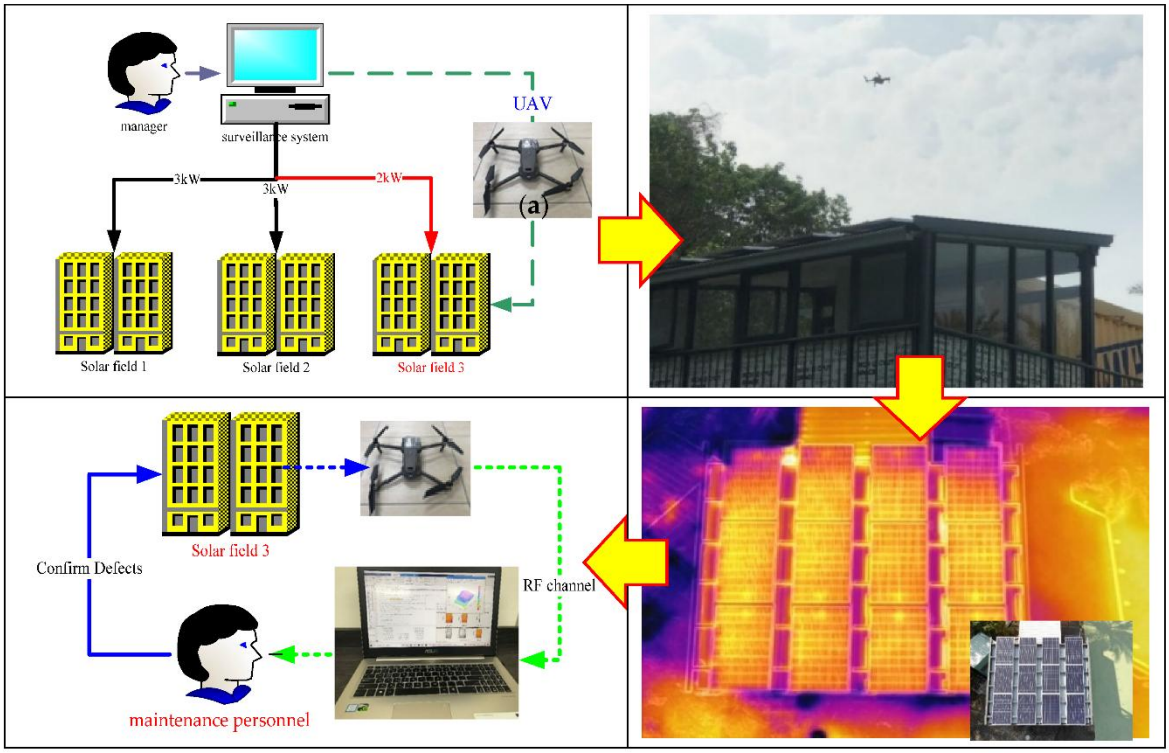
Drony wyposażone w kamery termowizyjne stanowią dziś jedno z podstawowych narzędzi diagnostycznych w farmach fotowoltaicznych. Analiza obrazów w podczerwieni pozwala nie tylko na szybką ocenę stanu instalacji, ale przede wszystkim na precyzyjne wskazanie obszarów wymagających interwencji serwisowej.

Do kluczowych możliwości UAV w tym zakresie należą (Díaz i in., 2020; de Oliveira, Aghaei, Rüther, 2022):

- Identyfikacja „hot spotów” – punkty przegrzania świadczące o uszkodzeniu modułów PV mogą prowadzić do ich dalszej degradacji lub nawet pożarów. Wczesne wykrycie takich anomalii umożliwia zapobieganie poważnym awariom;
- Mapowanie efektywności sekcji farmy – UAV pozwalają na tworzenie szczegółowych map obrazujących pracę poszczególnych ciągów paneli, co daje operatorom pełen obraz kondycji instalacji;
- Szybkie planowanie konserwacji – dane pozyskane w czasie rzeczywistym mogą być bezpośrednio wykorzystywane do planowania działań serwisowych i priorytetyzacji napraw.

W porównaniu z klasycznymi metodami diagnostycznymi UAV oferują nie tylko znaczne skrócenie czasu inspekcji, ale również redukcję kosztów pracy techników i minimalizację przestojów w produkcji energii. Drony mogą monitorować duże obszary farm PV w ciągu kilku godzin, podczas gdy tradycyjne inspekcje naziemne wymagałyby dni lub tygodni pracy

zespołu techników. Co więcej, integracja UAV z systemami sztucznej inteligencji umożliwia automatyczną klasyfikację usterek i ich priorytetyzację, co dodatkowo wspiera koncepcję konserwacji predykcyjnej (de Oliveira, Aghaei, Rüther, 2022).



Ryc. 1.28. UAV termowizyjny w diagnostyce farmy fotowoltaicznej.

Źródło: Liao, K.-C., Wu, H.-Y., & Wen, H.-T. (2022). Using drones for thermal imaging photography and building 3D images to analyze the defects of solar modules. Inventions, 7(3), 67.

Drony wykorzystywane są również w elektrowniach jądrowych oraz konwencjonalnych, gdzie kwestie bezpieczeństwa pracy i ochrony środowiska mają krytyczne znaczenie. Dzięki zdolności do wykonywania zadań w środowiskach wysokiego ryzyka UAV stają się nieocenionym wsparciem w codziennym monitoringu i działaniach awaryjnych.

Najczęstsze zastosowania obejmują (Barreiro, Seibold, Hilsmann, Eisert, 2021; Molnár, 2022):

- Inspekcję wież chłodniczych i kominów – UAV mogą badać powierzchnie konstrukcji pod kątem mikropęknięć, korozji czy oznak degradacji materiałów, co pozwala na planowanie prac konserwacyjnych zanim uszkodzenia osiągną krytyczny poziom;
- Pomiar poziomu promieniowania w strefach ograniczonego dostępu – wyposażone w specjalistyczne sensory drony dostarczają danych w czasie rzeczywistym, umożliwiając ocenę bezpieczeństwa bez konieczności narażania ludzi;
- Szybką ocenę sytuacji w przypadku awarii lub wycieku substancji radioaktywnych – UAV mogą natychmiast wlecieć w rejon zdarzenia, transmitując obraz i dane pomiarowe, co wspiera zespoły kryzysowe w podejmowaniu decyzji operacyjnych.

Takie zastosowania minimalizują ryzyko narażenia pracowników na kontakt z substancjami niebezpiecznymi, a jednocześnie pozwalają na bardziej precyzyjną ocenę stanu infrastruktury. W niektórych elektrowniach wdraża się już systemy autonomiczne, w których UAV regularnie patrolują obiekty i automatycznie raportują wszelkie wykryte anomalie. Co więcej, integracja dronów z systemami analizy predykcyjnej pozwala przewidywać potencjalne miejsca awarii i planować działania serwisowe z wyprzedzeniem.

W perspektywie kilku najbliższych lat spodziewane jest jeszcze szersze zastosowanie UAV w energetyce jądrowej, szczególnie w obszarze monitorowania emisji i ochrony środowiska (Ardiny, Beigzadeh, Mahani, 2024; Geelen i in., 2022). Zastosowanie dronów do zadań kontrolnych wpisuje się w globalne strategie zwiększania bezpieczeństwa obiektów krytycznych i ograniczania ryzyka dla ludzi.

Bezzałogowe systemy powietrzne znajdują coraz częściej zastosowanie w badaniach geologicznych oraz w analizie terenów pod inwestycje energetyczne. Dzięki integracji z nowoczesnymi technologiami, takimi jak LIDAR, kamery hiperspektralne oraz czujniki wielospektralne, UAV umożliwiają pozyskiwanie danych o wyjątkowo wysokiej dokładności (Wang, Liu, Li, Li, 2023).

Najczęstsze obszary ich wykorzystania obejmują:

- Analizę potencjału terenów pod farmy wiatrowe i fotowoltaiczne – drony pozwalają na ocenę warunków środowiskowych, takich jak nasłonecznienie, prędkość i kierunek wiatru czy nachylenie terenu, co stanowi podstawę do wyboru optymalnej lokalizacji inwestycji (Torres-Sánchez i in., 2015);
- Poszukiwanie złóż surowców energetycznych – UAV wspierają badania geologiczne, rejestrując obrazy w wielu zakresach widma, co umożliwia identyfikację anomalii geochemicznych i struktur geologicznych sugerujących obecność węgla, ropy czy gazu (Perikleous i in., 2025);
- Mapowanie ukształtowania terenu dla potrzeb projektowania elektrowni i sieci przesyłowych – dane zebrane przez drony pozwalają na tworzenie szczegółowych modeli 3D, które wspierają proces planowania inwestycji i minimalizują ryzyko błędów inżynieryjnych (Colomina, Molina, 2014).

Rozwiązania tego typu pozwalają na znaczną redukcję kosztów oraz skrócenie czasu przygotowania inwestycji energetycznych w porównaniu do tradycyjnych metod pomiarowych. Co istotne, UAV umożliwiają prowadzenie badań także w trudno dostępnych lub niebezpiecznych obszarach, gdzie klasyczne pomiary terenowe byłyby utrudnione bądź niemożliwe. Dane pozyskane w ten sposób wspierają zarówno proces decyzyjny przedsiębiorstw energetycznych, jak i działania administracji publicznej, odpowiadającej za planowanie przestrzenne i strategię rozwoju sektora energetycznego (Colomina, Molina, 2014; Shakhatreh i in., 2019).

Zastosowanie UAV w sektorze energetycznym stale rośnie, obejmując inspekcje, konserwację, monitoring środowiskowy i poszukiwania terenowe. Dzięki integracji z AI, IoT i zaawansowanymi czujnikami drony usprawniają procesy operacyjne, podnoszą poziom bezpieczeństwa i redukują koszty (Shakhatreh i in., 2019). W perspektywie do 2030 roku przewiduje się dalszy rozwój napędów alternatywnych, w tym wodorowych i hybrydowych, które mogą wydłużyć czas lotu i zwiększyć efektywność operacyjną UAV (Boukoberine, Zhou, Benbouzid, 2019). Równolegle trwają prace nad integracją UAV z sieciami 5G, co pozwoli im pełnić funkcję powietrznych stacji przekaźnikowych i jeszcze lepiej wpisywać się

w infrastrukturę energetyczną (Abubakar i in., 2023). Reasumując, w sektorze energetycznym UAV odgrywają i będą odgrywać coraz większą rolę, usprawniając inspekcje infrastruktury, monitorując produkcję energii oraz wspierając poszukiwanie nowych źródeł surowców. Ich zastosowanie przyczyni się zdecydowanie do zwiększenia efektywności operacyjnej, redukcji kosztów konserwacji oraz poprawy bezpieczeństwa pracowników. W przyszłości drony będą jeszcze lepiej zintegrowane z inteligentnymi systemami zarządzania energią, co pozwoli na większą automatyzację procesów oraz zwiększenie niezawodności sieci elektroenergetycznych.

1.2.4. Ratownictwo i zarządzanie kryzysowe

Zastosowanie UAV w sektorze ratownictwa i zarządzania kryzysowego stanowi naturalne rozwinięcie ich roli w monitorowaniu i utrzymaniu infrastruktury krytycznej. O ile w energetyce drony przyczyniają się do zwiększenia niezawodności systemów technicznych, o tyle w sytuacjach awaryjnych i klęskach żywiołowych stają się one narzędziem pierwszej reakcji, pozwalającym na szybkie i bezpieczne pozyskiwanie informacji z miejsc zdarzeń. Bezzałogowe statki powietrzne zapewniają precyzyjne dane w czasie rzeczywistym, co umożliwia służbom ratunkowym podejmowanie trafnych decyzji operacyjnych, przy jednoczesnym minimalizowaniu ryzyka dla ratowników (Alsamhi i in. 2022).

Drony znacząco wspierają misje SAR, zwłaszcza w trudnych i niebezpiecznych środowiskach, takich jak góry, tereny leśne, obszary zalane wodą czy regiony dotknięte lawinami. Dzięki kamerom termowizyjnym UAV mogą identyfikować ciepło ciała ludzkiego nawet w nocy, przy ograniczonej widoczności lub w warunkach atmosferycznych uniemożliwiających tradycyjne poszukiwania (Burke i in., 2019). Systemy AI pozwalają na automatyczne rozpoznawanie sylwetek ludzi i zwierząt w danych obrazowych, co skraca czas lokalizacji zaginionych i zwiększa skuteczność całych akcji ratunkowych. W Szwajcarii oraz Kanadzie wdrożenie UAV w misjach SAR przyczyniło się do wzrostu skuteczności odnajdywania osób o ponad 50% w porównaniu z metodami konwencjonalnymi. Na morzu drony wspierają lokalizowanie rozbitków, mogą zrzucać tratwy ratunkowe, a także służyć jako przekaźniki sygnałów alarmowych dla jednostek ratowniczych (Silvagni, Tonoli, Zenerino, Chiaberge, 2017).

UAV są powszechnie stosowane do oceny skutków powodzi, huraganów, pożarów lasów czy trzęsień ziemi. W przypadku powodzi drony wykonują szybkie mapowanie terenów zalanych, umożliwiając analizę skali strat i planowanie tras ewakuacyjnych. Po trzęsieniach ziemi UAV wyposażone w kamery wysokiej rozdzielczości i LIDAR umożliwiają tworzenie dokładnych modeli 3D zniszczonych obszarów, co wspiera zarówno akcje ratunkowe, jak i późniejszą odbudowę infrastruktury (Medić, Bakota, Jelaska, Škorput, 2024). Natomiast podczas pożarów UAV z kamerami termowizyjnymi i systemami AI są w stanie wykrywać ukryte źródła ognia, analizować dynamikę rozprzestrzeniania się płomieni i wspierać straż pożarną w alokacji zasobów gaśniczych. Badania wykazały, że wykorzystanie UAV pozwala skrócić czas reakcji na pożary, co znacząco zmniejsza rozmiar strat materialnych (de Alcantara Andrade i in., 2019).

Coraz częściej drony są wykorzystywane do transportu materiałów ratunkowych – żywności, leków, szczepionek czy krwi – do odciętych regionów. Firma Zipline z powodzeniem wykorzystuje UAV do dostaw medycznych w Afryce, m.in. w Rwandzie, Ghanie i Nigerii, redukując czas transportu z kilku godzin do kilkunastu minut (Chowdhury i in., 2017a). Podobne rozwiązania wdrażane są w Azji i Ameryce Południowej, gdzie UAV wspierają

międzynarodowe organizacje humanitarne. UAV są też intensywnie badane pod kątem zastosowań w operacjach ratunkowych i humanitarnych, w tym w transporcie materiałów pomocowych i optymalizacji tras dostaw w sytuacjach kryzysowych (Chowdhury i in., 2017b).

Coraz częściej drony są wykorzystywane do transportu materiałów ratunkowych — żywności, leków, szczepionek czy krwi — do regionów trudno dostępnych. Firma Zipline z powodzeniem stosuje UAV w dostawach medycznych w Afryce, m.in. w Rwandzie, Ghanie i Nigerii, skracając czas transportu z kilku godzin do kilkunastu minut (Truog i in., 2020). Podobne rozwiązania pojawiają się w Azji i Ameryce Południowej, gdzie bezzałogowce wspierają organizacje humanitarne. UAV są również przedmiotem badań w kontekście operacji ratunkowych i humanitarnych — w tym optymalizacji tras dostaw materiałów pomocowych — np. w eksperymentalnych sieciach logistycznych medycznych (Quintanilla García i in., 2021). Bezzałogowe systemy powietrzne stają się integralnym elementem systemów zarządzania kryzysowego, umożliwiając szybsze reagowanie, lepszą koordynację działań ratowniczych oraz zmniejszanie ryzyka dla ratowników.

Bezzałogowe statki powietrzne stanowią obecnie nieodzowne narzędzie w systemach zarządzania kryzysowego. Umożliwiają szybkie reagowanie, poprawiają koordynację działań ratowniczych oraz zmniejszają ryzyko narażenia ludzi na niebezpieczeństwo. W nadchodzących latach UAV będą coraz mocniej integrowane z systemami bezpieczeństwa publicznego i obrony cywilnej, a ich znaczenie w ograniczaniu strat ludzkich i materialnych będzie systematycznie rosło (Silvagni, Tonoli, Zenerino, Chiaberge, 2017).

1.2.5. Górnictwo, eksploatacja kopalin głębinowych i odkrywkowych, eksploracja jaskiń oraz poszukiwanie złóż surowców

Bezzałogowe statki powietrzne (UAV) odgrywają coraz większą rolę w górnictwie, eksploracji zasobów naturalnych oraz poszukiwaniu nowych złóż surowców. Ich zastosowanie w sektorze wydobywczym nie tylko usprawnia codzienne operacje, ale także zwiększa bezpieczeństwo pracowników i minimalizuje negatywny wpływ na środowisko. UAV mogą być stosowane zarówno w kopalniach odkrywkowych, głębinowych, jak i w eksploracji trudno dostępnych obszarów, takich jak jaskinie czy góry (Perikleous i in. (2025).

Dzięki wykorzystaniu zaawansowanych systemów czujników – takich jak wcześniej wymienione LiDAR, kamery multispektralne, magnetometry czy spektrometry hiperspektralne – UAV umożliwiają skuteczne mapowanie terenu, monitorowanie zagrożeń geologicznych, inspekcję infrastruktury oraz określanie zasobności złóż. Rozwiązania te zwiększają precyzję analiz i przyspieszają proces podejmowania decyzji inwestycyjnych w górnictwie (Shahmoradi, Talebi, Roghanchi, Hassanalian (2020). Drony rewolucjonizują proces poszukiwania nowych złóż surowców, pozwalając na szybkie skanowanie i analizę geologiczną obszarów trudno dostępnych. Tradycyjne metody wymagały wielomiesięcznych badań terenowych, które były kosztowne i ryzykowne. UAV znacząco przyspieszają ten proces, umożliwiając m.in. (Perikleous i in. 2025):

- Tworzenie precyzyjnych map geologicznych z użyciem technologii LiDAR i kamer hiperspektralnych, pozwalających wykrywać struktury sprzyjające obecności rud metali i minerałów.
- Identyfikację anomalii magnetycznych i radiometrycznych przy pomocy magnetometrów i spektrometrów gamma, wskazujących obecność rud metali, węglowodorów czy uranu.

- Pobieranie próbek pyłu i skał do badań chemicznych, umożliwiających określenie potencjalnej wartości eksploatacyjnej.
- Wspieranie badań nad złożami podmorskimi poprzez współpracę z autonomicznymi pojazdami podwodnymi.

W kopalniach odkrywkowych UAV odpowiadają za szybkie i precyzyjne mapowanie. Tymczasem kopalnie odkrywkowe należą do największych i najbardziej wymagających obiektów przemysłowych. UAV pozwalają na ich terenie m.in. na (Shahmoradi, Talebi, Roghanchi, Hassanalian, 2020):

- Tworzenie modeli 3D i ortofotomap umożliwiających optymalne planowanie wydobycia.
- Analizę różnic mineralogicznych dzięki obrazowaniu multispektralnemu i hiperspektralnemu.
- Monitorowanie stateczności zboczy, co minimalizuje ryzyko osuwisk i wypadków.
- Zarządzanie hałdami górniczymi, optymalizując transport i logistykę materiałów.

UAV w górnictwie głębinowym to przed wszystkim inspekcje w trudno dostępnych miejscach. Eksploatacja podziemna wiąże się z zagrożeniami, takimi jak zapadliska, wybuchy metanu czy zawalenia tuneli. UAV stanowią kluczowe narzędzie w diagnostyce i monitoringu bezpieczeństwa w kopalniach głębinowych. Ich zastosowania obejmują (Nooralishahi i in. 2021):

- Skanowanie tuneli i wyrobisk w celu wykrywania mikropęknięć oraz deformacji skał.
- Analizę jakości powietrza – UAV wyposażone w czujniki gazowe mierzą stężenie metanu i tlenku węgla.
- Mapowanie wewnętrznych struktur kopalni dla potrzeb planowania ewakuacji i optymalizacji tras transportowych.

W przypadku eksploracji jaskiń i trudno dostępnych miejsc UAV nadaje sie znakomicie, biorąc pod uwagę zwłaszcza współczynnik bezpieczeństwa dla ludzi pracujących w takim środowisku. Dotychczasowe, tradycyjne metody eksploracji jaskiń i tuneli lawowych niosą wysokie ryzyko dla ludzi. UAV wyposażone w systemy autonomicznej nawigacji, termowizję i sensory 3D mogą (Petráček i in., 2023):

- Mapować topografię jaskiń i ich strukturę geologiczną bez udziału człowieka.
- Wykrywać obecność wody i mikroorganizmów, co wspiera badania ekologiczne i astrobiologiczne.

Drony odgrywają ważną rolę w minimalizacji wpływu górnictwa na środowisko oraz w zwiększaniu bezpieczeństwa i efektywności działań rekultywacyjnych. Ich zastosowanie obejmuje szeroki zakres działań związanych z monitorowaniem i oceną procesów przyrodniczych w terenach pogórniczych. UAV mogą być wykorzystywane m.in. do (Padró i in., 2019):

- Precyzyjnego monitorowania postępów rekultywacji terenów pogórniczych poprzez obrazowanie multispektralne o wysokiej rozdzielczości,
- Tworzenia szczegółowych map pokrycia terenu i oceny sukcesji roślinnej w różnych etapach procesu rekultywacji,

- Dokumentowania zmian środowiskowych w ujęciu długoterminowym, co wspiera podejmowanie decyzji przez administrację publiczną i przedsiębiorstwa górnicze.

Wykorzystanie UAV w górnictwie i eksploracji zasobów naturalnych rewolucjonizuje procesy wydobywcze, zwiększając bezpieczeństwo pracy, precyzję analiz geologicznych i efektywność inwestycji. Dzięki integracji z zaawansowanymi sensorami, UAV wspierają nie tylko poszukiwanie złóż, ale również monitoring zagrożeń i minimalizację wpływu na środowisko. W perspektywie do 2030 roku ich rola w geologii i górnictwie będzie rosła, stając się jednym z fundamentów nowoczesnych metod eksploatacji surowców (Park, Choi, 2020).

1.2.6. Rolnictwo precyzyjne

Wykorzystanie bezzałogowych statków powietrznych (UAV) w rolnictwie precyzyjnym rewolucjonizuje sposób zarządzania uprawami, zwiększając wydajność produkcji, redukując zużycie zasobów i minimalizując negatywny wpływ na środowisko. Dzięki zaawansowanym technologiom UAV możliwe jest monitorowanie kondycji roślin, precyzyjne dawkowanie nawozów i środków ochrony roślin oraz efektywne zarządzanie wodą. Wprowadzenie sztucznej inteligencji (AI) i algorytmów analizy danych pozwala na automatyczne wykrywanie chorób, prognozowanie plonów i optymalizację procesów agrotechnicznych. (Xue, Su, 2017)

Drony wyposażone w kamery multispektralne i hiperspektralne umożliwiają ocenę upraw w czasie rzeczywistym, jednoczesne monitorowanie stanu upraw, jak i analizę danych. Zbierane dane pozwalają na analizę wilgotności gleby, stopnia stresu wodnego czy obecności chorób i szkodników. Dzięki wskaźnikowi NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) UAV są w stanie dokładnie ocenić kondycję roślin poprzez analizę odbicia światła w różnych zakresach spektralnych. Integracja tych danych z systemami AI umożliwia automatyczne rozpoznawanie anomalii i wskazywanie obszarów wymagających interwencji. (Colomina & Molina, 2014)

Jednym z kluczowych zastosowań UAV jest zautomatyzowane nawożenie i opryskiwanie. Drony opryskowe mogą precyzyjnie dozować środki ochrony roślin i nawozy, minimalizując ich straty oraz redukując negatywny wpływ na środowisko. W porównaniu z tradycyjnymi metodami stosowanie UAV pozwala ograniczyć zużycie chemikaliów nawet o 30–50%, co znacząco zmniejsza koszty i ryzyko skażenia gleb. Nowoczesne drony, jak DJI Agras T30 czy XAG P100, wykorzystują systemy mapowania pól i technologie adaptacyjne, które pozwalają na różnicowanie dawek w zależności od potrzeb roślin i warunków pogodowych. (Tsouros, Bibi, & Sarigiannidis, 2019)

W dobie zmian klimatzcynzch yarządzanie wodą i optymalizacja nawadniania jest ogromnie ważne. Dlatego też efektywne gospodarowanie wodą jest kluczowe dla zrównoważonego rolnictwa, szczególnie w rejonach o dużym deficycie opadów. UAV z kamerami termowizyjnymi i czujnikami wilgotności gleby pozwalają rolnikom określać, które fragmenty pól wymagają dodatkowego nawadniania. Mogą także wykrywać nieszczelności i awarie w systemach irygacyjnych, co prowadzi do oszczędności zasobów wodnych nawet o 25–40% (Sharma, Sidhu, Bhowmik, 2025). Dzięki takim rozwiązaniom UAV stają się ważnym narzędziem w walce ze skutkami suszy i zmian klimatycznych.

Zastosowanie UAV w zrównoważonym rolnictwie i ochronie środowiska to przyszłość. Bezzałogowe statki powietrzne wspierają transformację rolnictwa w kierunku zrównoważonego rozwoju. Precyzyjne monitorowanie stanu upraw umożliwia ograniczenie stosowania pestycydów i nawozów chemicznych, co pozytywnie wpływa na jakość gleby

i bioróżnorodność ekosystemów. UAV wspierają także działania kontrolne, takie jak wykrywanie erozji gleb, analizowanie zmian użytkowania gruntów czy monitorowanie skutków zmian klimatycznych w danym regionie (Medeiros, Moreira, de Carvalho, 2023).

W ciągu najbliższej dekady przewiduje się, że przyszłością dla systemów UAV w rolnictwie będzie dalsza automatyzacja procesów uprawowych poprzez pełną integrację UAV z systemami Internetu Rzeczy (IoT) oraz maszynami rolniczymi nowej generacji. Drony będą wspierać autonomiczne pojazdy rolnicze, przekazując im dane o stanie gleby, wilgotności czy zapotrzebowaniu na nawozy (Sankaran i in., 2015; Agrawal, Arafat, 2024). Rozwój technologii ogniw paliwowych i napędów wodorowych znacząco zwiększy ich czas lotu i niezawodność, umożliwiając skuteczniejsze wykorzystanie w dużych gospodarstwach (Shen i in. 2024).

Bezzałogowe statki powietrzne w rolnictwie precyzyjnym stanowią obecnie jedno z najbardziej obiecujących narzędzi wspierających optymalizację procesów agrotechnicznych. Pozwalają na zwiększenie wydajności upraw, obniżenie kosztów operacyjnych i minimalizację negatywnego wpływu na środowisko. Ich dynamiczny rozwój, wsparty integracją z AI, IoT i nowymi systemami napędowymi, sprawi, że UAV staną się nieodzownym elementem nowoczesnego rolnictwa w perspektywie najbliższej dekady (Tsouros, Bibi, Sarigiannidis, 2019).

1.2.7. Systemy militarno-obronne

Bezzałogowe statki powietrzne (UAV) odgrywają kluczową rolę we współczesnych operacjach wojskowych, znacząco zwiększając zdolności zwiadowcze, rozpoznawcze oraz taktyczne sił zbrojnych. Rozwój technologii UAV pozwolił na ich szerokie zastosowanie w różnych aspektach obronności – od monitoringu granic, przez działania bojowe, aż po cyberbezpieczeństwo i neutralizację zagrożeń ze strony innych dronów. Dzięki integracji sztucznej inteligencji (AI), systemów przetwarzania obrazu oraz autonomicznych algorytmów nawigacji, drony wojskowe stają się coraz bardziej skuteczne i samodzielne w operacjach (Hassanalian, Abdelkefi, 2017):

- Zwiad, nadzór i rozpoznanie (ISR – Intelligence, Surveillance, Reconnaissance). Drony wojskowe są szeroko wykorzystywane w operacjach zwiadowczych i rozpoznawczych, zapewniając stały monitoring wybranych obszarów. Dzięki zaawansowanym systemom elektrooptycznym, kamerom termowizyjnym oraz czujnikom multispektralnym UAV mogą zbierać dane w czasie rzeczywistym, dostarczając wojsku kluczowych informacji o ruchach przeciwnika czy zmianach w terenie (Shakhatreh i in., 2019). Przykładem takich rozwiązań są systemy klasy MALE, jak MQ-9 Reaper, wykorzystywany przez siły zbrojne USA, czy Bayraktar TB2, który sprawdził się w działaniach rozpoznawczych i uderzeniowych na Bliskim Wschodzie i w Europie Wschodniej. Z kolei nano- i micro-UAV, takie jak Black Hornet Nano, używane przez NATO, wspierają jednostki specjalne w środowiskach zurbanizowanych (Goodrich i in., 2010).
- Drony uderzeniowe i systemy ofensywne. Bezzałogowe statki powietrzne są coraz częściej stosowane jako platformy uderzeniowe, umożliwiające atakowanie wyznaczonych celów z dużą precyzją i minimalnym ryzykiem dla operatora. UAV bojowe mogą być wyposażone w pociski kierowane, ładunki wybuchowe czy efektory energetyczne, co czyni je skutecznymi w neutralizowaniu sił przeciwnika. W literaturze naukowej omawia się także konsekwencje integracji sztucznej

inteligencji i autonomii w systemach uzbrojenia, w tym wyzwania związane z kontrolą, odpowiedzialnością i bezpieczeństwem operacyjnym (Harwood, 2024).

- Do najbardziej rozpoznawalnych bojowych UAV należy Bayraktar TB2, który zyskał światowe uznanie dzięki swojej skuteczności w konfliktach zbrojnych. Coraz większe znaczenie w praktyce operacyjnej mają także tzw. drony-kamikadze (loitering munitions), takie jak Switchblade 600 (producent: AeroVironment, USA) czy Harop (producent: Israel Aerospace Industries, Izrael). Systemy te są zdolne do długotrwałego przebywania w przestrzeni powietrznej, autonomicznej identyfikacji celów i precyzyjnych ataków samobójczych, co znajduje odzwierciedlenie w systematycznych analizach technicznych dotyczących ich projektowania i efektywności bojowej (Voskuijl, 2022).
- Systemy walki elektronicznej i cyberbezpieczeństwa. Rosnące zagrożenie ze strony wrogich UAV wymusiło rozwój zaawansowanych systemów przeciwdronowych (Counter-UAS). Ich zadaniem jest wykrywanie, zakłócanie i neutralizacja nieautoryzowanych dronów poprzez zakłócacze sygnałów (jammers), broń mikrofalową czy systemy laserowe. Ważnym elementem jest zastosowanie algorytmów sztucznej inteligencji, które umożliwiają analizę sygnatur UAV i identyfikację potencjalnych zagrożeń w czasie rzeczywistym (Castrillo, Manco, Pascarella, Gigante, 2022). Przykładem takiego systemu jest Drone Dome, który łączy technologię radarową z optycznym śledzeniem i neutralizacją celów.
- Autonomiczne roje dronów i AI w operacjach wojskowych. Jednym z najnowszych kierunków rozwoju jest wykorzystanie tzw. rojów UAV, czyli grup autonomicznych jednostek działających w sposób skoordynowany. Dzięki integracji z AI roje dronów mogą dynamicznie dostosowywać swoje formacje, współpracować i prowadzić złożone operacje bojowe. Projekty realizowane przez DARPA, takie jak OFFSET (OFFensive Swarm-Enabled Tactics), pokazują, że w przyszłości roje UAV będą zdolne do prowadzenia działań nawet w warunkach ograniczonej łączności, co znacząco zwiększy ich elastyczność i skuteczność. Program ten miał na celu rozwój i testowanie taktyk dla dużych, heterogenicznych zespołów robotów w złożonych środowiskach miejskich, łącząc innowacje technologiczne z eksperymentami terenowymi (Chung, Daniel, 2023).

W ostatnich latach w literaturze podkreśla się rosnące znaczenie UAV w konfliktach zbrojnych oraz konkretne przykłady wdrożeń UAV w systemach militarnych, gdzie stały się one integralnym elementem systemów rozpoznania i walki. Systemy klasy MALE, takie jak MQ-9 Reaper i Bayraktar TB2, są wskazywane jako fundament współczesnych działań wojskowych (Hassanalian, Abdelkefi, 2017; Shakhatreh i in., 2019). Coraz większą rolę odgrywają loitering munitions, takie jak Switchblade 600 czy Harop, zdolne do precyzyjnej neutralizacji celów i długotrwałego utrzymania się w przestrzeni operacyjnej. Ich rozwój i wykorzystanie analizowane są w kontekście integracji sztucznej inteligencji z autonomicznymi systemami bojowymi (Harwood, 2024) oraz w badaniach nad aerodynamiką i niezawodnością platform ofensywnych nowej generacji (Voskuijl, 2022). Nano- i micro-UAV, reprezentowane przez Black Hornet Nano, umożliwiają prowadzenie rozpoznania w trudno dostępnych i niebezpiecznych środowiskach (Goodrich i in., 2010). Te przykłady wdrożeń wskazują na ogromny potencjał UAV w działaniach militarnych, łączący funkcje zwiadowcze, ofensywne i wsparcia operacyjnego.

Reasumując, do 2030 roku przewiduje się dalszy rozwój dronów wojskowych, które będą coraz bardziej autonomiczne, trudniejsze do wykrycia oraz wyposażone w nowe technologie

napędowe – w tym w ogniwa wodorowe i systemy hybrydowe. Kluczowym trendem jest również integracja UAV z systemami hipersonicznymi oraz rozwój platform bojowych opartych na sztucznej inteligencji i zdolnych do działań w formacjach rojowych. Zastosowania te – opisywane w literaturze dotyczącej swarm robotics – wskazują, że bezzałogowe statki powietrzne staną się nieodzownym elementem systemów obronnych XXI wieku, oferując większą skuteczność operacyjną, minimalizację strat ludzkich oraz zdolność do prowadzenia działań w zróżnicowanych i trudnych środowiskach (Chung i in., 2018).

1.2.8. Monitoring środowiska i zarządzanie zasobami naturalnymi

Bezzałogowe statki powietrzne (UAV) odgrywają coraz większą rolę w ochronie środowiska i zarządzaniu zasobami naturalnymi. Dzięki zaawansowanym technologiom czujnikowym, zdolności do lotów na dużych wysokościach oraz możliwości zbierania danych w czasie rzeczywistym, drony stały się kluczowym narzędziem w monitoringu ekosystemów i zmian klimatycznych. UAV umożliwiają szybsze i dokładniejsze pozyskiwanie danych niż tradycyjne metody, co wspiera zarówno badania naukowe, jak i praktyczne działania na rzecz ochrony środowiska.

Drony wyposażone w kamery multispektralne i hiperspektralne pozwalają na analizę zdrowia roślinności oraz identyfikację obszarów dotkniętych wylesianiem, pustynnieniem lub degradacją gleb. Systemy UAV stosowane są również w badaniach hydrologicznych, gdzie umożliwiają ocenę jakości wód powierzchniowych poprzez analizę biologiczną oraz wykrywanie zanieczyszczeń chemicznych i mikroplastików. Dzięki tym technologiom organizacje ekologiczne oraz instytucje rządowe mogą podejmować szybsze działania w celu ochrony zasobów naturalnych (Villa i in., 2016; Anderson, Gaston, 2013; Hodgson i in., 2016).

W ramach ochrony środowiska UAV są wykorzystywane m.in. do (Villa i in., 2016; Anderson, Gaston, 2013; Hodgson i in., 2016):

- Mapowania zmian ekosystemowych – drony monitorują zmiany w lasach, na mokradłach i terenach tundrowych, umożliwiając identyfikację obszarów zagrożonych degradacją;
- Wykrywania nielegalnych wycinek lasów – UAV rejestrują działalność kłusowniczą oraz nielegalne wyręby, wspierając ochronę rezerwatów i parków narodowych;
- Oceny jakości powietrza – drony z sensorami gazowymi pozwalają analizować poziom emisji CO_2, NOx oraz innych zanieczyszczeń w miastach i obszarach przemysłowych;
- Kontroli wycieków substancji szkodliwych – UAV umożliwiają szybkie mapowanie wycieków ropy czy chemikaliów w akwenach wodnych, ograniczając skutki ekologiczne;
- Monitorowania zmian klimatycznych – UAV są wykorzystywane do badania cofania się lodowców, wzrostu poziomu mórz oraz oceny intensywności zjawisk pogodowych, takich jak burze, huragany czy fale upałów.

W nadchodzących latach drony będą coraz częściej stosowane w globalnych inicjatywach na rzecz ochrony środowiska. Organizacje międzynarodowe, takie jak ONZ czy Europejska Agencja Środowiska, już teraz wykorzystują UAV do śledzenia zmian klimatycznych i wdrażania polityk mających na celu zrównoważone zarządzanie zasobami naturalnymi. Rozwój technologii sztucznej inteligencji pozwoli na jeszcze bardziej zaawansowane analizy

danych środowiskowych, co umożliwi podejmowanie skuteczniejszych działań na rzecz ochrony planety.

1.2.9. Urbanistyka i planowanie przestrzenne

W obecnych czasach bezzałogowe statki powietrzne (UAV) odgrywają coraz większą rolę w urbanistyce i planowaniu przestrzennym, rewolucjonizując sposób, w jaki projektowane i zarządzane są współczesne miasta. Wykorzystanie UAV umożliwia precyzyjne mapowanie terenów zurbanizowanych, ocenę stanu infrastruktury oraz analizę przestrzenną w czasie rzeczywistym. Dzięki nowoczesnym technologiom obrazowania i przetwarzania danych UAV pozwalają na szybkie i dokładne gromadzenie informacji niezbędnych do planowania urbanistycznego, co przyspiesza procesy decyzyjne i usprawnia zarządzanie przestrzenią miejską (Villa i in., 2016).

Bezzałogowe systemy powietrzne wyposażone w kamery wysokiej rozdzielczości, czujniki multispektralne oraz technologie LiDAR umożliwiają tworzenie szczegółowych modeli 3D miast. Modele te są wykorzystywane przez architektów i urbanistów do projektowania nowych osiedli, infrastruktury transportowej oraz terenów zielonych. Dzięki ich zastosowaniu możliwa jest analiza potencjału przestrzeni oraz ocena możliwości jej zagospodarowania w sposób efektywny i zrównoważony. UAV generują także ortofotomapy wysokiej rozdzielczości, które ułatwiają analizę terenów inwestycyjnych i śledzenie zmian urbanistycznych w czasie (Nex, Remondino, 2014):

1) Optymalizacja infrastruktury i analiza ruchu. Drony znajdują zastosowanie w monitorowaniu dynamiki ruchu ulicznego, co umożliwia optymalizację układu dróg, skrzyżowań oraz stref dla pieszych i rowerzystów. UAV rejestrują natężenie ruchu w różnych porach dnia, identyfikując tzw. wąskie gardła komunikacyjne i wspierając projektowanie nowych rozwiązań infrastrukturalnych. Analiza danych w czasie rzeczywistym pozwala na wdrażanie inteligentnych systemów zarządzania ruchem, redukujących korki i emisję spalin. UAV wspierają również monitoring stanu technicznego dróg, mostów czy torowisk tramwajowych i kolejowych, umożliwiając wczesne wykrycie usterek i zapobieganie awariom.
2) Monitoring inwestycji budowlanych i urbanistycznych. Drony są coraz częściej stosowane w nadzorze nad placami budowy oraz przy ocenie stopnia zaawansowania prac inwestycyjnych. Dane pozyskane przez UAV mogą być integrowane z systemami CAD i BIM (Building Information Modeling), co umożliwia lepszą koordynację działań budowlanych oraz weryfikację zgodności realizowanych prac z projektem. UAV wspierają także identyfikację zagrożeń związanych z bezpieczeństwem na budowie, pozwalając na ograniczenie ryzyka dla pracowników i redukcję kosztów wynikających z opóźnień.
3) Kontrola jakości powietrza i zanieczyszczeń. Bezzałogowe systemy wyposażone w sensory środowiskowe pozwalają na monitorowanie jakości powietrza oraz hałasu w różnych obszarach miasta. UAV mogą identyfikować źródła emisji smogu, monitorować wpływ dużych inwestycji na środowisko oraz wspierać wdrażanie strategii z zakresu Smart City. Dane gromadzone z wykorzystaniem UAV są podstawą do wdrażania stref niskoemisyjnych oraz ograniczania hałasu w przestrzeniach mieszkalnych, co bezpośrednio poprawia jakość życia mieszkańców.

4) Planowanie terenów zielonych i przestrzeni rekreacyjnych. Drony odgrywają istotną rolę w projektowaniu i monitorowaniu miejskiej zieleni. UAV umożliwiają ocenę stanu roślinności w parkach i skwerach, analizę retencji wody oraz badanie mikroklimatu miejskiego. Dzięki temu możliwe jest skuteczniejsze planowanie zieleni, które sprzyja redukcji efektu miejskiej wyspy ciepła i poprawie jakości życia w miastach.
5) Wspieranie rozwoju inteligentnych miast (Smart Cities). W koncepcji Smart City UAV stanowią ważne źródło danych do cyfrowych systemów zarządzania miastem. Drony wspierają monitorowanie bezpieczeństwa publicznego, ocenę skuteczności strategii mobilności oraz zarządzanie kryzysowe w sytuacjach zagrożeń takich jak powodzie czy pożary. Coraz częściej integruje się je z platformami IoT oraz systemami analitycznymi opartymi na AI, co zwiększa poziom automatyzacji w zarządzaniu miastem (Batty, 2018).

Drony w urbanistyce i planowaniu przestrzennym stają się kluczowym narzędziem umożliwiającym szybsze, bardziej precyzyjne i efektywne zarządzanie miastem. Ich rozwój wpisuje się w strategię zrównoważonego rozwoju oraz transformację w kierunku inteligentnych miast, w których dane przestrzenne i środowiskowe są podstawą skutecznego planowania. W nadchodzących latach UAV będą coraz bardziej zintegrowane z cyfrowymi systemami analitycznymi, stając się standardowym elementem procesu urbanistycznego i wspierając administrację oraz sektor prywatny w budowaniu bardziej przyjaznych, ekologicznych i odpornych na kryzysy metropolii.

1.2.10. Przemysł filmowy, media i transmisje na żywo

Bezzałogowe statki powietrzne (UAV) zrewolucjonizowały branżę filmową i media, oferując unikalne ujęcia z powietrza, które wcześniej były możliwe jedynie przy użyciu kosztownych helikopterów lub dźwigów filmowych. Dzięki nowoczesnym dronom z wysokiej klasy kamerami, produkcje filmowe, programy telewizyjne i transmisje na żywo zyskały zupełnie nową jakość obrazu, większą elastyczność realizacyjną oraz istotne oszczędności finansowe (Colomina, Molina, 2014):

1) Drony w przemyśle filmowym i telewizyjnym

UAV stały się standardowym narzędziem w produkcji filmów i seriali, zapewniając kinowej jakości ujęcia lotnicze. Dzięki nim możliwe jest (Nex, Remondino, 2014):

- nagrywanie dynamicznych scen akcji – drony pozwalają na płynne i szybkie śledzenie ruchu postaci, pojazdów i zwierząt, co daje niespotykaną dotąd perspektywę w filmach fabularnych i dokumentalnych,
- realizacja spektakularnych ujęć krajobrazowych – UAV umożliwiają rejestrację panoramicznych obrazów miast, gór, pustyń czy oceanów w rozdzielczości 4K i 8K, co wcześniej wiązało się z dużymi kosztami,
- tworzenie złożonych efektów specjalnych – dzięki integracji z technologiami CGI i postprodukcją, drony wspierają generowanie realistycznych efektów wizualnych.

Hollywood i czołowe studia filmowe, takie jak Warner Bros. czy Disney, wykorzystują UAV do nagrywania swoich produkcji. W filmach akcji, m.in. z serii Mission Impossible czy James Bond, drony pozwoliły na rejestrowanie widowiskowych pościgów i scen akrobatycznych z nowej, dynamicznej perspektywy.

2) Drony w relacjonowaniu wydarzeń sportowych i kulturalnych

UAV stały się integralnym elementem relacjonowania wydarzeń na żywo, dostarczając widzom unikalne ujęcia z powietrza podczas:

- meczów piłkarskich, wyścigów samochodowych i zawodów lekkoatletycznych, gdzie drony śledzą akcję w czasie rzeczywistym z nietypowych kątów,
- koncertów, festiwali muzycznych i wydarzeń plenerowych, gdzie UAV pozwalają na efektowne transmisje obejmujące duże przestrzenie i tłumy,
- sportów ekstremalnych, takich jak narciarstwo, surfing czy kolarstwo górskie, gdzie drony podążają za zawodnikami nawet w trudno dostępnych miejscach.
- Największe światowe stacje telewizyjne, takie jak BBC, CNN i ESPN, stosują UAV do rejestrowania wydarzeń sportowych i kulturalnych, co znacząco wzbogaca doświadczenie wizualne widzów.

3) Transmisje na żywo i dziennikarstwo dronowe

Drony są coraz częściej wykorzystywane w transmisjach telewizyjnych i reportażach, szczególnie w trudnych warunkach lub w miejscach, do których dostęp tradycyjnymi metodami jest ograniczony. UAV umożliwiają m.in.:

- relacjonowanie protestów, katastrof naturalnych i wydarzeń politycznych – pozwalając szybko uzyskać obraz z epicentrum zdarzenia,
- monitorowanie klęsk żywiołowych i sytuacji kryzysowych, np. powodzi, pożarów lasów czy trzęsień ziemi, co umożliwia mediom i organizacjom humanitarnym dostęp do dokładnych danych,
- transmisje z trudno dostępnych obszarów – takich jak górskie szlaki, regiony objęte konfliktami zbrojnymi czy odizolowane wyspy.

Dynamicznie rozwijające się dziennikarstwo dronowe czyni UAV cennym narzędziem w pracy reporterów, którzy mogą dostarczać materiały wizualne o wysokiej jakości z niemal każdego miejsca na świecie.

4) Wykorzystanie AI i automatycznych systemów śledzenia w UAV

Nowoczesne drony wykorzystywane w mediach i przemyśle filmowym coraz częściej są wyposażane w systemy sztucznej inteligencji (AI), które umożliwiają: zrodlo

- autonomiczne śledzenie ruchu obiektów (np. sportowców lub aktorów) bez konieczności ręcznego sterowania,
- automatyczną stabilizację obrazu, gwarantującą kinową jakość nagrań nawet przy silnym wietrze,
- algorytmy kadrowania, które samodzielnie dobierają najlepsze ujęcia i dostosowują ostrość.
- Integracja AI pozwala na coraz większą automatyzację nagrań, eliminując potrzebę angażowania kosztownych ekip filmowych i specjalistycznego sprzętu.

Podsumowując drony stały się nieodłącznym elementem przemysłu filmowego, medialnego i transmisji na żywo, oferując nowe możliwości rejestrowania obrazu i dostarczania widzom unikalnych perspektyw. Dzięki mobilności, precyzji i relatywnie niskim kosztom UAV

zastępują tradycyjne metody filmowania z powietrza, a ich rozwój w kierunku integracji z AI i technologiami autonomicznymi pozwoli w przyszłości na w pełni zautomatyzowane nagrania oraz transmisje w czasie rzeczywistym. Trend ten wskazuje, że UAV staną się standardowym narzędziem branży medialnej, kształtując nowoczesne standardy produkcji i emisji treści.

1.2.11. Archeologia i badania historyczne

Bezzałogowe statki powietrzne (UAV) rewolucjonizują dziedzinę archeologii i badań historycznych, oferując możliwości, które jeszcze dwie dekady temu wydawały się niedostępne. Dzięki nim procesy badawcze stają się szybsze, mniej inwazyjne i bardziej precyzyjne, co znacząco poszerza zakres analiz terenowych i zwiększa skuteczność ochrony dziedzictwa kulturowego. Tradycyjne metody archeologiczne, wymagające wieloletnich wykopalisk, kosztownych badań terenowych i żmudnej dokumentacji, są obecnie wspierane przez technologie UAV, pozwalające na analizę rozległych obszarów w krótkim czasie i przy minimalnej ingerencji w środowisko (Doneus, Briese, Fera, Janner, 2008).

1) Odkrywanie ukrytych stanowisk archeologicznych

Jednym z najważniejszych zastosowań UAV w archeologii jest identyfikacja nieznanych stanowisk archeologicznych, niewidocznych gołym okiem. Struktury takie jak starożytne drogi, osady czy cmentarzyska są często ukryte pod roślinnością lub warstwą gleby. Drony wyposażone w systemy LiDAR umożliwiają eliminację zakłóceń roślinnych, co pozwala na ujawnienie śladów dawnych budowli. Przykładem jest odkrycie nieznanych wcześniej miast Majów w dżunglach Ameryki Środkowej, gdzie UAV pozwoliły zmapować setki budowli bez konieczności karczowania lasów tropikalnych (Chase i in., 2011). Podobne rozwiązania znajdują zastosowanie również w Europie – np. do badania starożytnych rzymskich willi, średniowiecznych zamków i fortyfikacji, które wtopiły się w krajobraz i pozostają niewidoczne w klasycznych metodach kartograficznych.

2) Tworzenie precyzyjnych modeli 3D zabytków i ruin

Kolejnym obszarem zastosowania UAV jest fotogrametria i rekonstrukcja przestrzenna zabytków. Drony z kamerami wysokiej rozdzielczości umożliwiają generowanie cyfrowych modeli 3D, które mogą być używane do dokumentacji, analiz konstrukcyjnych oraz rekonstrukcji historycznych. Modele te pozwalają na:

- odwzorowanie szczegółów architektonicznych, takich jak świątynie, piramidy czy amfiteatry,
- monitorowanie stanu technicznego zabytków, w tym pęknięć, deformacji i osunięć,
- tworzenie cyfrowych archiwów, które w przypadku degradacji obiektów mogą służyć ich rekonstrukcji.

Przykłady obejmują Pompeje we Włoszech i Angkor Wat w Kambodży, gdzie UAV odegrały kluczową rolę w tworzeniu szczegółowych odwzorowań topograficznych oraz modeli ścian i struktur architektonicznych (Remondino, Del Pizzo, Kersten, Troisi, 2012).

3) Dokumentowanie wykopalisk i monitorowanie stanowisk archeologicznych

UAV pełnią istotną rolę w bieżącej dokumentacji prac wykopaliskowych. Wysokorozdzielcze zdjęcia i nagrania z dronów umożliwiają:

- systematyczne monitorowanie postępów wykopalisk,
- analizę zmian w strukturze terenu i ukształtowaniu krajobrazu,
- gromadzenie danych dla projektów cyfrowego odtwarzania dawnych układów urbanistycznych.

Dzięki UAV możliwe jest również szybkie identyfikowanie zagrożeń naturalnych i antropogenicznych, takich jak erozja, osunięcia gruntu czy nielegalne prace ziemne, które mogą uszkodzić stanowiska archeologiczne (Campana, 2017).

4) Zastosowanie UAV w ochronie dziedzictwa kulturowego

Ochrona zabytków i stanowisk archeologicznych to jeden z kluczowych obszarów wykorzystania dronów. UAV są używane do (Sona i in., 2014):

- monitorowania strat w obiektach na terenach dotkniętych konfliktami zbrojnymi – np. w Syrii czy Iraku,
- zapobiegania kradzieżom i nielegalnemu handlowi artefaktami poprzez regularne naloty kontrolne,
- analiz zagrożeń naturalnych, np. powodzi, trzęsień ziemi czy zmian klimatycznych, które prowadzą do degradacji zabytków.

Zdalne monitorowanie umożliwia podejmowanie szybkich działań konserwatorskich i minimalizowanie skutków zniszczeń, co wpisuje się w globalne inicjatywy ochrony dziedzictwa UNESCO.

Zastosowanie UAV w archeologii i badaniach historycznych otworzyło nową erę badań nad przeszłością. Dzięki wykorzystaniu LiDAR-u, fotogrametrii, czujników multispektralnych i hiperspektralnych, możliwe stało się odkrywanie ukrytych struktur, tworzenie cyfrowych rekonstrukcji oraz skuteczna ochrona stanowisk archeologicznych. UAV nie tylko przyspieszają i ułatwiają badania, ale także umożliwiają nieinwazyjne podejście do eksploracji przeszłości, co minimalizuje ingerencję w delikatne struktury historyczne. W przyszłości ich znaczenie będzie rosło, a integracja z systemami sztucznej inteligencji i analizą Big Data otworzy nowe możliwości w dziedzinie archeologii cyfrowej i ochrony światowego dziedzictwa kulturowego.

1.2.12. Sektor ubezpieczeń i inspekcje szkód

Firmy ubezpieczeniowe coraz częściej wdrażają bezzałogowe statki powietrzne (UAV) jako narzędzie wspierające procesy inspekcji szkód i oceny ryzyka. Drony wprowadzają nową jakość w branży ubezpieczeniowej, umożliwiając szybkie, obiektywne i precyzyjne pozyskiwanie danych. Zamiast kosztownych i czasochłonnych inspekcji wykonywanych przez pracowników terenowych, UAV mogą w krótkim czasie przeprowadzić szczegółową analizę szkód w miejscach trudno dostępnych lub niebezpiecznych. Dzięki transmisji danych w czasie rzeczywistym przyspieszają proces likwidacji szkód i umożliwiają szybszą wypłatę odszkodowań, co zwiększa satysfakcję klientów i efektywność działania firm (Benassi i in., 2017).

1) UAV w ocenie szkód po klęskach żywiołowych

W przypadku katastrof naturalnych, takich jak powodzie, huragany, trzęsienia ziemi, drony, a zwłaszcza w przypadku pożarów lasów oraz innychm, podobnych zagrożeń ekologicznych,

gdzie UAV umożliwiają szybkie i rzetelne określanie skali stratUAV umożliwiają (Akhloufi, Couturier, Castro, 2021):

- dokumentację terenów zalanych i zniszczonych, przy wykorzystaniu ortofotomap i modeli 3D, które pozwalają ocenić wpływ kataklizmów na nieruchomości, infrastrukturę i uprawy,
- monitorowanie skutków huraganów i tornad, dostarczając informacji o zniszczeniach budynków i sieci energetycznych,
- analizę skutków pożarów za pomocą kamer termowizyjnych, które mogą wykrywać jeszcze tlące się ogniska i oceniać stopień zniszczenia terenów leśnych.

Dane pozyskane przez UAV mogą być zestawiane z archiwalnymi materiałami satelitarnymi i geodezyjnymi, co pozwala na precyzyjne określenie różnic i strat.

2) UAV w ocenie stanu budynków i infrastruktury przed zawarciem polisy

Drony są coraz częściej używane do inspekcji nieruchomości przed podpisaniem umowy ubezpieczeniowej. Umożliwia to ubezpieczycielom dokładną ocenę ryzyka i dopasowanie warunków polisy. UAV znajdują zastosowanie m.in.:

- inspekcji dachów i elewacji w poszukiwaniu mikrouszkodzeń, pęknięć i korozji,
- ocenie stanu mostów, tam czy farm wiatrowych, pozwalając na wykrycie oznak degradacji materiałów,
- dokumentowaniu postępu budów, co umożliwia weryfikację zgodności z projektami i normami bezpieczeństwa.

Takie podejście ogranicza ryzyko błędnej wyceny nieruchomości, a także minimalizuje ryzyko nadużyć przy zgłaszaniu szkód. W badaniach Zhao, Kang, Li i Ma (2021) wykazano, że modele 3D zapór wodnych uzyskane z fotogrametrii UAV mogą osiągać wysoką dokładność, wystarczającą do monitoringu awaryjnego, przy jednoczesnym skróceniu czasu i kosztów inspekcji.

3) UAV w inspekcji upraw rolnych i ocenie szkód w rolnictwie

W sektorze rolniczym UAV wspierają monitorowanie kondycji upraw i szacowanie szkód wywołanych niekorzystnymi warunkami pogodowymi. Ich zastosowanie obejmuje:

- ocenę wpływu suszy na plony,
- analizę kondycji roślin przy użyciu wskaźników roślinności (np. NDVI) pozyskiwanych przez kamery multispektralne,
- monitorowanie strat po inwazjach szkodników i chorobach roślin,
- ocenę wilgotności gleby i warunków hydrologicznych (Sishodia, Ray, Singh, 2020).

Dzięki UAV firmy ubezpieczeniowe otrzymują obiektywne i trudne do podważenia dane o stanie upraw, co pozwala ograniczać ryzyko oszustw i przyspiesza proces likwidacji szkód rolniczych.

4) UAV w monitorowaniu szkód w przemyśle i energetyce

Drony odgrywają istotną rolę także w inspekcji infrastruktury przemysłowej i energetycznej, która w przypadku awarii lub katastrof generuje znaczne ryzyko finansowe. UAV umożliwiają m.in.:

- stanu turbin wiatrowych i paneli fotowoltaicznych poprzez wykrywanie mikropęknięć, wad materiałowych i uszkodzeń powierzchni (Heo, Na, 2025),
- zapór wodnych i tam przy użyciu modeli 3D, pozwalających na identyfikację erozji i zagrożeń konstrukcyjnych (Zhao, Kang, Li, Ma, 2021).
- dokumentację szkód po awariach przemysłowych czy eksplozjach w rafineriach i zakładach chemicznych, bez narażania życia inspektorów (Siebert, Teizer, 2014).

Zastosowanie UAV w sektorze ubezpieczeń otwiera nowy rozdział w procesach oceny ryzyka i likwidacji szkód. Drony przyspieszają gromadzenie danych, zwiększają ich wiarygodność i redukują koszty operacyjne. W najbliższych latach należy spodziewać się jeszcze szerszej integracji UAV z systemami sztucznej inteligencji i modelowania predykcyjnego, co umożliwi automatyzację procesów decyzyjnych i dalsze zwiększenie efektywności branży ubezpieczeniowej. UAV stają się standardowym narzędziem w ubezpieczeniach, wspierając dokładniejsze i szybsze działania w sytuacjach kryzysowych oraz codziennych procesach inspekcyjnych.

1.2.13. Służby mundurowe i egzekwowanie prawa

Bezzałogowe statki powietrzne (UAV) stały się nieodłącznym narzędziem wspierającym służby mundurowe oraz organy ścigania w wielu krajach na całym świecie. Ich zdolność do szybkiego monitorowania sytuacji w czasie rzeczywistym, prowadzenia operacji rozpoznawczych i analizy zagrożeń sprawia, że stanowią kluczowy element nowoczesnych systemów bezpieczeństwa publicznego. Dzięki połączeniu kamer wysokiej rozdzielczości, sensorów termowizyjnych, technologii multispektralnej i systemów analizy danych w chmurze, UAV umożliwiają znacznie bardziej efektywne planowanie działań i podejmowanie decyzji w sytuacjach kryzysowych. W efekcie minimalizują ryzyko dla funkcjonariuszy i zwiększają skuteczność działań operacyjnych (González-Jorge, Martínez-Sánchez, Bueno, Arias, 2017).

1) Monitorowanie zgromadzeń publicznych i działań prewencyjnych

UAV są powszechnie wykorzystywane do nadzoru nad dużymi zgromadzeniami, takimi jak protesty, mecze piłkarskie, festiwale czy koncerty. W czasie rzeczywistym pozwalają ocenić zagęszczenie tłumu, wykrywać potencjalne punkty zapalne i koordynować pracę jednostek interwencyjnych. Dzięki algorytmom wykrywania obiektów drony mogą automatycznie identyfikować osoby agresywne czy grupy tworzące zagrożenie dla porządku publicznego, co znacząco zwiększa szybkość reakcji.

2) Śledzenie przestępców i podejrzanych pojazdów

W działaniach operacyjnych UAV pozwalają na skuteczne śledzenie podejrzanych osób i pojazdów. W porównaniu do tradycyjnych śmigłowców są tańsze w eksploatacji, mniej widoczne i bardziej elastyczne. Mogą działać w terenie zurbanizowanym, rejestrować obraz w wysokiej jakości i przekazywać dane bezpośrednio do centrów dowodzenia. W praktyce oznacza to, że policja może prowadzić długotrwałą obserwację bez narażania funkcjonariuszy oraz z zachowaniem elementu zaskoczenia (Shakhatreh i in., 2019).

3) Wykrywanie przestępstw środowiskowych i narkotykowych

Coraz większe znaczenie zyskuje zastosowanie UAV w monitorowaniu przestępstw środowiskowych, takich jak nielegalne wysypiska odpadów, zrzuty chemikaliów do rzek czy nielegalna wycinka drzew. Drony wyposażone w kamery multispektralne mogą także

identyfikować nielegalne plantacje konopi indyjskich i innych upraw, które często ukrywane są w trudno dostępnych miejscach. Dane pozyskiwane przez UAV mogą być wykorzystywane jako materiał dowodowy w postępowaniach sądowych, zwiększając skuteczność organów ścigania w walce z tego typu przestępstwami.

4) Wsparcie operacji antyterrorystycznych i misji taktycznych

W przypadku działań jednostek specjalnych drony odgrywają kluczową rolę w rozpoznaniu terenu i przygotowaniu operacji. UAV mogą mapować wnętrza budynków przy użyciu systemów LiDAR, dostarczając informacji o potencjalnych miejscach ukrycia podejrzanych lub zakładników. Zastosowanie dronów roju pozwala na prowadzenie skoordynowanych akcji na dużą skalę, z jednoczesnym śledzeniem wielu punktów strategicznych. UAV mogą również zakłócać komunikację przeciwnika, wspierając neutralizację zagrożeń w czasie rzeczywistym (Zeng, Zhang, Lim, 2016).

5) Automatyzacja patrolowania terenów granicznych

Na granicach państw UAV wspierają działania związane z wykrywaniem przemytu, nielegalnej migracji i działalności zorganizowanych grup przestępczych. Zdolność do długotrwałego patrolowania obszarów górskich, leśnych czy pustynnych sprawia, że UAV stają się naturalnym uzupełnieniem tradycyjnych patroli. Drony stacjonarne na uwięzi pozwalają na nieprzerwaną obserwację newralgicznych odcinków granic, dostarczając danych do systemów analitycznych w czasie rzeczywistym. Rozwój łączności 5G oraz integracja z systemami analityki predykcyjnej umożliwi w przyszłości niemal całkowitą automatyzację monitoringu granic.

Podsumowując drony w służbach mundurowych i organach ścigania stały się fundamentem nowoczesnych systemów bezpieczeństwa. Wykorzystanie UAV zwiększa skuteczność działań prewencyjnych, operacyjnych i interwencyjnych, jednocześnie ograniczając ryzyko dla funkcjonariuszy. Ich rola będzie rosła wraz z dalszą integracją z systemami sztucznej inteligencji, technologiami predykcyjnymi i łącznością nowej generacji. W najbliższych latach UAV staną się podstawowym narzędziem nie tylko w monitorowaniu zgromadzeń czy śledzeniu przestępców, lecz także w skomplikowanych operacjach antyterrorystycznych i ochronie granic. Dzięki nim służby mundurowe będą w stanie szybciej reagować na zagrożenia i skuteczniej egzekwować prawo, co przełoży się na wyższy poziom bezpieczeństwa publicznego.

ROZDZIAŁ 2

SYSTEMY UAV JAKO ELEMENT LOGISTYKI 4.0 W OPERACJACH MAGAZYNOWYCH

Nowoczesne magazyny coraz częściej wdrażają technologie UAV do automatyzacji procesów logistycznych, co pozwala na zwiększenie efektywności operacyjnej oraz redukcję kosztów. Bezzałogowe systemy powietrzne znajdują zastosowanie w magazynach wysokiego składowania, centrach dystrybucyjnych oraz zakładach przemysłowych, gdzie umożliwiają szybsze i dokładniejsze zarządzanie zapasami. Drony wspomagają procesy inwentaryzacji, skanując kody kreskowe i tagi RFID, co eliminuje błędy ludzkie i przyspiesza przetwarzanie danych. Wykorzystanie UAV do monitorowania przestrzeni składowej pozwala na optymalizację układu magazynu oraz szybkie wykrywanie nieprawidłowości, takich jak błędne rozmieszczenie towarów czy nieautoryzowany dostęp. Ich zastosowanie zwiększa również bezpieczeństwo pracy, ograniczając konieczność wspinania się na wysokie regały czy operowania ciężkim sprzętem. Integracja UAV z systemami zarządzania magazynem (WMS) umożliwia pełną automatyzację logistyki wewnętrznej, zapewniając wyższą efektywność operacyjną.

2.1. Automatyczna inwentaryzacja i zarządzanie zapasami

Automatyzacja inwentaryzacji to jedno z kluczowych zastosowań UAV w magazynach i centrach logistycznych. Tradycyjne metody kontroli stanów magazynowych są czasochłonne, kosztowne i podatne na błędy ludzkie (Fernández-Caramés, Blanco-Novoa, Froiz-Míguez, Fraga-Lamas, 2019). Dzięki dronom wyposażonym w systemy wizyjne, technologię RFID oraz sztuczną inteligencję możliwe jest szybkie i precyzyjne skanowanie kodów kreskowych oraz identyfikacja produktów, co prowadzi do optymalizacji zarządzania zapasami. Zastosowanie UAV w tym obszarze zostało również opisane w kontekście oceny ryzyka oraz efektywności procesów magazynowych (Tubis, Ryczyński, Żurek 2021). Wprowadzenie dronów pozwala na stworzenie nowych, bardziej elastycznych i skalowalnych procedur operacyjnych w porównaniu z tradycyjnymi metodami manualnymi.

1) Skanowanie i identyfikacja towarów

Pierwsze koncepcje wykorzystania dronów do automatycznej inwentaryzacji magazynowej zostały opisane m.in. przez Larsa Wawrla z zespołem badawczym ETH Zurich w Applications of Drones in Warehouse Operations (2019), który opracował prototypowe rozwiązania wykorzystujące UAV do skanowania regałów wysokiego składowania i analizy przestrzeni magazynowej. Prace te zapoczątkowały rozwój autonomicznych systemów wspomagających kontrolę zapasów w czasie rzeczywistym.

W najnowszych badaniach naukowych zwraca się uwagę, że integracja technologii UAV z systemami wizyjnymi i modelowaniem trójwymiarowym umożliwia nie tylko precyzyjną lokalizację towarów, ale także tworzenie cyfrowych odwzorowań przestrzeni magazynowych (Hu, Minner, 2023). Z kolei wykorzystanie metod optymalizacji energetycznej i adaptacyjnego przydziału lokalizacji w wieloalejkowych magazynach pozwala zwiększyć efektywność wykorzystania przestrzeni oraz skrócić czas cykli inwentaryzacyjnych (Nasir, Venkitasubramony, Jakhar, 2023).

Włączenie takich rozwiązań w struktury zautomatyzowanego zarządzania łańcuchem dostaw stanowi kluczowy element transformacji logistyki w erze Przemysłu 4.0, co potwierdzają również analizy dotyczące wpływu systemów AGV i UAV na zrównoważone zarządzanie operacjami logistycznymi (Bechtsis, Tsolakis, Vlachos, Iakovou, 2017).

2) Integracja UAV z systemami zarządzania magazynem (WMS)

Bezzałogowe statki powietrzne (UAV) coraz częściej znajdują zastosowanie w logistyce magazynowej, wspierając automatyzację procesów związanych z kontrolą zapasów i zarządzaniem przestrzenią składowania. Drony mogą współpracować z systemami zarządzania magazynem (Warehouse Management System – WMS), umożliwiając automatyczne aktualizowanie danych o stanie zapasów w czasie rzeczywistym. Po przeprowadzeniu skanowania UAV przesyłają dane do centralnej bazy, gdzie algorytmy sztucznej inteligencji analizują wyniki i identyfikują potencjalne rozbieżności, takie jak braki, błędy lokalizacyjne lub nadwyżki magazynowe. Integracja UAV z WMS poprawia przejrzystość procesów logistycznych, wspiera podejmowanie decyzji opartych na danych i zwiększa poziom automatyzacji w magazynach wysokiego składowania. W badaniach Lin, Chang i Huang (2024) wykazano, że zastosowanie metod uczenia ze wzmocnieniem w nawigacji UAV znacząco podnosi efektywność przeszukiwania przestrzeni i dokładność identyfikacji obiektów, co czyni te systemy obiecującym kierunkiem rozwoju w magazynach przyszłości.

3) Redukcja błędów i optymalizacja pracy

Wprowadzenie UAV do inwentaryzacji znacząco redukuje ryzyko błędów wynikających z działania człowieka, takich jak błędne wprowadzenie danych, pomyłki w odczycie etykiet czy nieścisłości w lokalizacji towarów. Drony eliminują konieczność użycia podnośników i wózków widłowych do ręcznego sprawdzania stanów magazynowych na wysokich półkach, co zwiększa bezpieczeństwo pracy i poprawia ergonomię operacji (Pundit, Bhat, Belthur, 2025). Ponadto UAV wspierają zrównoważone zarządzanie przestrzenią, umożliwiając precyzyjną lokalizację produktów i automatyczne zliczanie zapasów w czasie rzeczywistym dzięki zastosowaniu wirtualnych znaczników i algorytmów pozycjonowania (Ekici, Seçkin, Özek, Karpuz, 2023).

4) Przykłady wdrożeń i przyszłe kierunki rozwoju

Na rynku istnieje wiele przykładów zastosowania UAV w inwentaryzacji. Amazon i Walmart testują systemy dronów zdolnych do samodzielnego skanowania towarów w magazynach o dużej powierzchni, co pozwala na znaczącą redukcję czasu i kosztów związanych z tradycyjną inwentaryzacją. Firmy logistyczne, takie jak DSV, DHL i UPS, wdrażają rozwiązania UAV do zarządzania łańcuchem dostaw i optymalizacji operacji magazynowych.

Przyszłość UAV w inwentaryzacji rysuje się obiecująco — dalszy rozwój technologii obejmie integrację z systemami Internetu Rzeczy (IoT), sztucznej inteligencji oraz platformami analitycznymi w chmurze, co umożliwi jeszcze szybsze podejmowanie decyzji operacyjnych. Coraz większe znaczenie zyskują także rozwiązania łączące drony powietrzne z mobilnymi robotami naziemnymi (UAV–UGV), które wspólnie realizują zadania skanowania, transportu i analizy danych w środowiskach magazynowych (Munasinghe, Perera, Deo, 2024).

W perspektywie najbliższych lat przewiduje się, że dzięki technologii 5G drony będą zdolne do pracy w pełni autonomicznej, bez stałego nadzoru operatora, tworząc zintegrowane systemy automatycznej inwentaryzacji w ramach inteligentnych magazynów.

2.2. Monitorowanie przestrzeni magazynowej i optymalizacja układu składowania

Zarządzanie przestrzenią magazynową stanowi jedno z największych wyzwań współczesnej logistyki, zwłaszcza w dużych centrach dystrybucyjnych i obiektach wysokiego składowania. W tradycyjnym podejściu kontrola układu magazynowego wymagała inspekcji manualnych oraz stosowania statycznych modeli rozmieszczenia towarów, co było czasochłonne i narażone na błędy. Wprowadzenie bezzałogowych statków powietrznych (UAV) umożliwia automatyzację monitorowania przestrzeni, integrację z cyfrowymi systemami zarządzania oraz dynamiczne dostosowywanie układu składowania do zmieniających się warunków rynkowych i operacyjnych. UAV stają się niezastąpionym elementem logistyki 4.0, wspierając operatorów w efektywnym wykorzystaniu dostępnej powierzchni i minimalizacji ryzyka operacyjnego (Malang, Charoenkwan,Wudhikarn, 2023):

1) UAV w monitorowaniu układu magazynowego w czasie rzeczywistym

Drony mogą autonomicznie skanować przestrzeń magazynową, dostarczając dane w czasie rzeczywistym do systemów zarządzania (WMS – Warehouse Management System). Dzięki temu możliwe jest bieżące śledzenie lokalizacji towarów, weryfikacja zgodności między zadeklarowaną a rzeczywistą pozycją oraz szybka identyfikacja potencjalnych zagrożeń, np. blokad korytarzy transportowych czy nieuprawnionego dostępu do stref magazynowych. UAV mogą integrować się z systemami IoT, przesyłając dane do chmury obliczeniowej, gdzie algorytmy sztucznej inteligencji przeprowadzają analizy predykcyjne, np. dotyczące przyszłego zapotrzebowania na przestrzeń składową. Dzięki temu możliwe staje się wdrażanie dynamicznych strategii rozmieszczania towarów, uwzględniających zarówno częstotliwość ich pobierania, jak i sezonowość popytu (Lin, Chang, Huang, 2024).

2) Tworzenie dynamicznych map przestrzeni magazynowej

Zastosowanie UAV umożliwia szybkie i dokładne tworzenie interaktywnych map magazynowych, które są na bieżąco aktualizowane. Dzięki technologii LiDAR, kamerom 3D i fotogrametrii UAV generują trójwymiarowe wizualizacje układu składowania. Pozwala to na optymalizację tras transportowych wewnątrz magazynu, minimalizację pustych przebiegów wózków widłowych oraz zwiększenie wydajności procesów kompletacji zamówień (pick-and-pack). Dynamiczne mapy wspierają również planowanie rozbudowy obiektów oraz reorganizację istniejących przestrzeni, dostarczając aktualnych danych przestrzennych dla menedżerów logistyki. Integracja UAV z technologiami BIM, IoT i sztucznej inteligencji umożliwia tworzenie cyfrowych bliźniaków (Digital Twin), które pozwalają symulować różne scenariusze rozmieszczenia towarów i zarządzania przestrzenią w czasie rzeczywistym (Ma i in., 2025).

3) Identyfikacja nieefektywnego rozmieszczenia towarów i optymalizacja układu

Tradycyjne inspekcje układu magazynowego bazują na ręcznych analizach i raportach, co znacząco ogranicza możliwość dynamicznych zmian. UAV, wykorzystując dane wizyjne i algorytmy analityczne, umożliwiają bieżącą identyfikację problemów związanych z nieefektywnym rozmieszczeniem towarów. Analizowane są m.in. wskaźniki rotacji produktów, co pozwala na reorganizację stref zgodnie z zasadą ABC – towary o największej rotacji mogą być lokowane bliżej stref kompletacji, co znacząco skraca czas operacji. UAV identyfikują również niewykorzystane przestrzenie, np. półki o niskim zapełnieniu, umożliwiając zwiększenie pojemności magazynu bez konieczności rozbudowy. W ten

sposób UAV wspierają procesy ciągłego doskonalenia w logistyce wewnętrznej i redukują powstawanie „wąskich gardeł” (Malang, Charoenkwan, Wudhikarn, 2023).

4) Zastosowanie UAV w magazynach wysokiego składowania

Magazyny wysokiego składowania stanowią szczególnie wymagające środowisko pracy ze względu na skalę obiektu i ryzyka związane z inspekcjami manualnymi. UAV pozwalają na szybki i bezpieczny monitoring regałów na wysokości kilkunastu metrów, eliminując konieczność korzystania z podnośników czy pracy na wysokościach. Dzięki temu minimalizowane jest ryzyko wypadków, a kontrola jakości składowanych produktów staje się bardziej precyzyjna – drony mogą np. wykrywać uszkodzenia opakowań lub niewłaściwe oznaczenia. Wdrożenie UAV w magazynach wysokiego składowania pozwala także na integrację z robotami transportowymi i systemami AGV, co umożliwia tworzenie w pełni zautomatyzowanych procesów logistycznych. Tego rodzaju rozwiązania nie tylko zwiększają efektywność operacyjną, ale również wspierają koncepcję Przemysłu 4.0 i inteligentnej logistyki (Fernández-Caramés, Blanco-Novoa, Froiz-Míguez, Fraga-Lamas, 2019).

Reasumując, monitorowanie przestrzeni magazynowej i optymalizacja układu składowania przy użyciu UAV stanowią fundament nowoczesnej logistyki 4.0. Drony umożliwiają automatyczne gromadzenie danych przestrzennych, tworzenie dynamicznych map oraz integrację z systemami zarządzania, co znacząco zwiększa efektywność i bezpieczeństwo operacyjne. Wysoka precyzja pomiarów, możliwość pracy w czasie rzeczywistym oraz wsparcie w analizach predykcyjnych czynią UAV narzędziem kluczowym dla przyszłości magazynów wysokiego składowania. W kolejnych latach ich rola będzie jeszcze bardziej rosła dzięki rozwojowi technologii 5G, sztucznej inteligencji i Internetu Rzeczy, co uczyni z UAV centralny element cyfrowej transformacji procesów logistycznych (Tubis, Poturaj, Dereń, Żurek, 2024).

2.3. Integracja UAV z systemami AI i IoT

Integracja bezzałogowych statków powietrznych (UAV) z systemami sztucznej inteligencji (AI) i Internetu rzeczy (IoT) otwiera nowe możliwości w zarządzaniu logistyką magazynową i stanowi kluczowy element transformacji w kierunku logistyki 4.0. Współczesne centra dystrybucyjne coraz częściej wdrażają cyfrowe bliźniaki (digital twins) i rozwiązania oparte na chmurze obliczeniowej, w których drony pełnią funkcję inteligentnych sensorów mobilnych. UAV w połączeniu z systemami zarządzania magazynem (WMS), autonomicznymi robotami mobilnymi (AMR/AGV) oraz zaawansowanymi algorytmami AI umożliwiają monitorowanie zapasów, analizę danych w czasie rzeczywistym oraz optymalizację tras logistycznych. Tego typu rozwiązania redukują koszty operacyjne, minimalizują ryzyko błędów i zwiększają skalowalność systemów intralogistycznych (Malang, Charoenkwan, Wudhikarn, 2023).

1) Drony jako element inteligentnej logistyki magazynowej

Bezzałogowe statki powietrzne w logistyce magazynowej przestają być narzędziem wyłącznie inwentaryzacyjnym – ich funkcje ewoluują w kierunku predykcji i integracji procesowej. UAV umożliwiają automatyczne monitorowanie przepływu towarów w czasie rzeczywistym, wykrywanie anomalii w składowaniu i generowanie ostrzeżeń o zagrożeniach. Co istotne, drony współpracują z autonomicznymi pojazdami transportowymi i robotami kompletacyjnymi, tworząc spójny ekosystem danych. Dzięki temu możliwa jest synchronizacja operacji magazynowych w oparciu o bieżące zapotrzebowanie rynkowe. UAV zintegrowane z IoT przekazują dane nie tylko do WMS, ale również do systemów ERP i TMS

(Transportation Management System), co pozwala na płynne zarządzanie całym łańcuchem dostaw (Malang, Charoenkwan, Wudhikarn, 2023).

2) Automatyczna analiza danych w czasie rzeczywistym

Drony wyposażone w algorytmy sztucznej inteligencji (AI) mogą autonomicznie przetwarzać dane pozyskane podczas lotów w magazynie. Wykorzystanie uczenia maszynowego (machine learning) i technik rozpoznawania obrazu umożliwia UAV identyfikację kodów kreskowych, tagów RFID oraz ocenę stanu towarów w czasie rzeczywistym. UAV są zdolne do wykrywania braków magazynowych i automatycznego raportowania ich w systemach WMS, co skraca czas reakcji i ogranicza ryzyko przestojów w produkcji. Dzięki integracji z IoT dane są natychmiast przesyłane do chmury, gdzie są analizowane przez systemy predykcyjne wspierające planowanie zakupów i uzupełnianie zapasów (replenishment). Zastosowanie dronów w tym obszarze prowadzi do redukcji kosztów operacyjnych oraz zwiększa precyzję prognozowania popytu i optymalizacji cykli rotacji zapasów (Alajami, Moreno, Pous, 2022).

3) Połączenie UAV z robotami mobilnymi i autonomicznymi systemami transportu wewnętrznego

W ramach koncepcji Przemysł 4.0 rośnie znaczenie zintegrowanych systemów logistycznych, w których UAV współpracują z autonomicznymi robotami transportowymi (AGV, AMR). Tego typu integracja umożliwia automatyczne przekazywanie danych o lokalizacji produktów do systemów transportowych, co znacząco przyspiesza procesy kompletacji i konsolidacji zamówień. UAV mogą współdziałać z systemami automatycznych regałów wysokiego składowania oraz wind magazynowych, zapewniając ich pełną synchronizację z przepływem materiałów. W perspektywie kilku lat takie rozwiązania będą kluczowe dla dużych centrów logistycznych obsługujących e-commerce, gdzie szybkość realizacji zamówień ma decydujące znaczenie dla przewagi konkurencyjnej (Malang, Charoenkwan, Wudhikarn, 2023).

4) Wykorzystanie sztucznej inteligencji do planowania tras przelotów dronów w magazynie

Efektywne działanie UAV w przestrzeniach magazynowych wymaga zaawansowanego planowania tras przelotów. AI umożliwia optymalizację tras na podstawie danych przestrzennych i aktualnego układu regałów, a także dynamiczne dostosowanie parametrów lotu do zmieniających się warunków pracy – np. obecności wózków widłowych, operatorów czy przeszkód tymczasowych. Zastosowanie analizy predykcyjnej pozwala UAV na identyfikację najbardziej efektywnych ścieżek inwentaryzacyjnych i eliminację zbędnych przelotów. Dzięki temu minimalizowany jest czas operacji i zużycie energii, a efektywność pracy wzrasta nawet o kilkanaście procent. Co więcej, integracja z siecią 5G umożliwia przesyłanie danych w czasie rzeczywistym z minimalnym opóźnieniem, co jest szczególnie ważne w magazynach o wysokiej rotacji i dużej dynamice procesów (Lin, Chang, Huang, 2024).

Podsumowując, integracja UAV z systemami AI i IoT jest fundamentem rozwoju inteligentnej logistyki magazynowej. Drony stają się nie tylko narzędziem inwentaryzacyjnym, lecz elementem ekosystemu predykcyjnego i integracyjnego, wspierającego dynamiczne zarządzanie zapasami, planowanie tras oraz współpracę z systemami AGV/AMR. Dzięki zastosowaniu sztucznej inteligencji UAV są w stanie przewidywać potrzeby operacyjne, a IoT zapewnia im pełną synchronizację z innymi systemami w czasie rzeczywistym. W efekcie

magazyny stają się bardziej efektywne, elastyczne i zorientowane na redukcję kosztów, a UAV zajmują centralne miejsce w transformacji cyfrowej intralogistyki (Tubis, Poturaj, Dereń, Żurek, 2024).

2.4. Bezpieczeństwo i nadzór w magazynach

Współczesne magazyny i centra logistyczne stają się coraz bardziej złożonymi obiektami, które wymagają zaawansowanych systemów bezpieczeństwa i monitoringu. Rosnąca skala operacji, wysokie tempo rotacji towarów oraz rosnące zagrożenia związane z kradzieżami, nieautoryzowanym dostępem czy wypadkami powodują, że tradycyjne formy ochrony przestają być wystarczające. W tym kontekście bezzałogowe statki powietrzne (UAV) stają się istotnym elementem systemów zabezpieczeń, łącząc funkcje mobilnego monitoringu, analizy danych w czasie rzeczywistym i predykcji zdarzeń niepożądanych. Wdrożenie UAV pozwala nie tylko zwiększyć skuteczność ochrony, lecz także podnieść poziom bezpieczeństwa operacyjnego całego magazynu (Tubis, Ryczyński, Żurek, 2021).

1) UAV w monitoringu obiektów logistycznych i zabezpieczeniu przed kradzieżami

Drony wyposażone w kamery wysokiej rozdzielczości, systemy termowizyjne oraz czujniki ruchu mogą skutecznie patrolować rozległe przestrzenie magazynowe, zarówno wewnątrz obiektów, jak i na terenach zewnętrznych. W odróżnieniu od statycznych systemów monitoringu wizyjnego UAV mogą przemieszczać się w dowolne miejsce, co zapewnia dynamiczne i pełniejsze pokrycie obszaru nadzoru. Tego typu rozwiązania pozwalają wykrywać intruzów w czasie rzeczywistym, a zaawansowane systemy rozpoznawania obrazu umożliwiają automatyczną identyfikację nieautoryzowanych osób oraz pojazdów. UAV są szczególnie przydatne w monitorowaniu stref wysokiego ryzyka, np. w pobliżu składów materiałów niebezpiecznych czy w obszarach składowania cennych produktów. W praktyce przekłada się to na znaczną redukcję strat finansowych oraz wzrost poczucia bezpieczeństwa wśród pracowników (Ekici, Seçkin, Özek, Karpuz, 2023).

2) Nadzór nad ruchem pracowników i pojazdów w magazynie

Kwestie bezpieczeństwa operacyjnego w magazynach nie ograniczają się wyłącznie do zagrożeń zewnętrznych. W wielu obiektach logistycznych to intensywny ruch wózków widłowych i pracowników stanowi jedno z głównych źródeł wypadków. Wykorzystanie UAV w tym obszarze wprowadza nową jakość nadzoru nad ruchem wewnętrznym. Drony mogą śledzić trajektorie poruszania się operatorów i pojazdów, identyfikować punkty kolizyjne oraz strefy o nadmiernym natężeniu ruchu. Analiza tych danych umożliwia dynamiczne projektowanie stref bezpieczeństwa oraz wdrażanie działań organizacyjnych zmniejszających ryzyko wypadków.

Dzięki integracji z systemami Internetu Rzeczy (IoT) i analizą danych w czasie rzeczywistym, UAV dostarczają informacji o potencjalnych zagrożeniach, które mogą być automatycznie przetwarzane przez algorytmy sztucznej inteligencji i przekazywane do systemów zarządzania bezpieczeństwem. Takie podejście zostało przedstawione w badaniach nad koncepcją autonomicznego magazynu Industry 4.0, w którym drony stanowią kluczowy element cyfrowego nadzoru nad przepływem ludzi i materiałów (Fernández-Caramés, Blanco-Novoa, Froiz-Míguez, Fraga-Lamas, 2019).

3) Zastosowanie UAV do kontroli dostępu i wykrywania nieautoryzowanych działań

Nowoczesne systemy kontroli dostępu coraz częściej wykorzystują UAV jako mobilne jednostki weryfikacyjne. Drony mogą monitorować wejścia i wyjścia, skanować identyfikatory RFID czy też wspierać systemy biometryczne, np. rozpoznawanie twarzy. Dzięki temu możliwe jest bieżące sprawdzanie, czy do kluczowych stref magazynu dostęp mają wyłącznie osoby upoważnione. UAV wspierają także wykrywanie nietypowych zachowań, takich jak przebywanie w miejscach niedozwolonych, poruszanie się w godzinach nocnych czy próby wynoszenia towarów poza teren magazynu. Połączenie UAV z systemami zarządzania magazynem (WMS) dodatkowo umożliwia automatyczne porównywanie lokalizacji przesyłek z danymi w systemie i wykrywanie prób nieautoryzowanego przemieszczenia ładunków. Tego typu rozwiązania znacząco ograniczają ryzyko nadużyć i oszustw wewnętrznych, które w praktyce są jednymi z najtrudniejszych do wykrycia zagrożeń w logistyce (Tubis, Ryczyński, Żurek, 2021).

4) Analiza danych z UAV i optymalizacja systemów ochrony magazynu

Największą wartością UAV w systemach bezpieczeństwa jest możliwość integracji funkcji monitorowania z analizą danych i prognozowaniem zagrożeń. Drony mogą tworzyć mapy ryzyka, które wskazują miejsca wymagające szczególnej uwagi, a zaawansowane algorytmy uczenia maszynowego umożliwiają identyfikację schematów zachowań prowadzących do incydentów. Analiza dużych zbiorów danych (big data) z UAV pozwala także optymalizować rozmieszczenie personelu ochrony, rozmieszczenie kamer statycznych oraz planować patrole w sposób bardziej efektywny niż tradycyjnie. W przyszłości rosnąca integracja UAV z systemami AI i siecią 5G sprawi, że drony będą mogły funkcjonować jako autonomiczne jednostki reagujące na zagrożenia w czasie rzeczywistym, a ich rola stanie się kluczowa w budowie inteligentnych systemów bezpieczeństwa magazynowego (Zhou, Almustafa, Nehdi, Su, 2024).

Drony to swego rodzaju rewolucja w szeroko rozumianej logistyce. UAV stanowią przełom w podejściu do bezpieczeństwa i nadzoru w magazynach. Wykorzystanie ich w ochronie obiektów logistycznych łączy funkcje mobilnego monitoringu, kontroli dostępu, predykcji zagrożeń oraz analizy danych w czasie rzeczywistym. Dzięki integracji z systemami AI i IoT UAV nie tylko poprawiają wykrywalność kradzieży i nieautoryzowanego dostępu, lecz także znacząco podnoszą poziom bezpieczeństwa pracy, identyfikując ryzyka związane z ruchem pracowników i pojazdów. Ich rola w nowoczesnych centrach logistycznych będzie stale rosła, a w pełni autonomiczne systemy dronowe staną się podstawą inteligentnych rozwiązań bezpieczeństwa przyszłości.

2.5. UAV w procesach załadunku i rozładunku

Współczesne magazyny i centra dystrybucyjne coraz częściej wdrażają drony do wspierania procesów logistycznych, w tym również załadunku i rozładunku towarów. Zastosowanie UAV w tych obszarach wpisuje się w szerszy trend digitalizacji i automatyzacji operacji magazynowych, który stanowi fundament koncepcji Przemysłu 4.0 i Logistyki 4.0. Drony wyposażone w zaawansowane systemy identyfikacji, analizy obrazu oraz integracji z innymi technologiami magazynowymi pozwalają nie tylko zwiększyć efektywność operacyjną, lecz także ograniczyć ryzyko błędów ludzkich, skrócić czas realizacji procesów oraz podnieść ogólny poziom bezpieczeństwa przepływu materiałów (Hofmann, Rüsch, 2017; Barreto, Amaral, Pereira, 2017; Tubis, Poturaj, Dereń, Żurek, 2024):

1) Automatyczne skanowanie i identyfikacja towarów podczas przyjęcia i wysyłki

W procesach przyjęcia i wydania towaru UAV stają się mobilnymi narzędziami automatycznej identyfikacji danych. Dzięki zastosowaniu technologii RFID oraz systemów rozpoznawania kodów kreskowych i kodów 2D, drony mogą w pełni autonomicznie przeprowadzać kontrolę poprawności oznaczeń na jednostkach ładunkowych i paletach. Pozwala to na natychmiastowe wykrycie niezgodności pomiędzy dokumentacją przewozową a stanem faktycznym, co znacząco przyspiesza proces decyzyjny w magazynie (Ma i in., 2025). Zastosowanie UAV w tym obszarze umożliwia m.in.:

- szybszą identyfikację towarów, bez konieczności ręcznego przeszukiwania dokumentacji czy angażowania dodatkowych pracowników (Ekici, Seçkin, Özek, Karpuz, 2023),
- redukcję błędów związanych z niewłaściwym oznakowaniem i kompletacją, co minimalizuje ryzyko kosztownych pomyłek w wysyłkach (Malang, Charoenkwan, Wudhikarn, 2023),
- usprawnienie pracy w warunkach zwiększonego obciążenia operacyjnego, np. podczas okresów szczytowych w handlu elektronicznym.

Co istotne, UAV nie działają w oderwaniu od systemów zarządzania magazynem, lecz są z nimi zintegrowane. Dzięki temu dane pozyskane z etapu przyjęcia lub wysyłki są natychmiast przesyłane do systemów WMS i weryfikowane pod kątem zgodności z harmonogramem oraz dokumentacją przewozową.

2) Integracja UAV z systemami robotyki magazynowej i autonomicznymi wózkami widłowymi

Kolejnym etapem rozwoju technologii UAV w logistyce magazynowej jest ich integracja z innymi autonomicznymi rozwiązaniami, takimi jak systemy robotyki przemysłowej czy pojazdy AGV. UAV pełnią rolę mobilnych sensorów i węzłów edge, które zbierają dane procesowe i wspierają koordynację zadań AGV/robotów, co umożliwia precyzyjne planowanie i wykonywanie zadań w czasie zbliżonym do rzeczywistego (Lin, Chang, Huang, 2024). Możliwości UAV w tym kontekście obejmują m.in.:

- wskazywanie lokalizacji jednostek ładunkowych i przesyłanie tych danych w czasie rzeczywistym do AGV (Ekici, Seçkin, Özek, Karpuz, 2023),
- dynamiczną analizę układu przestrzeni magazynowej, co pozwala na planowanie bezkolizyjnych tras dla pojazdów transportowych (Fernández-Caramés, Blanco-Novoa, Froiz-Míguez, Fraga-Lamas, 2019),
- wspieranie nawigacji w złożonych środowiskach poprzez komunikację z systemami wizyjnymi oraz sieciami sensorów stacjonarnych.

Tego rodzaju integracja oznacza przejście od automatyzacji wybranych operacji do stworzenia spójnego ekosystemu cyfrowego, w którym UAV są kluczowym ogniwem komunikacyjnym. Rozwiązanie to jest zgodne z założeniami logistyki 4.0 i koncepcji cyfrowych bliźniaków procesów logistycznych (Hofmann, Rüsch, 2017; Barreto, Amaral, Pereira, 2017).

3) Możliwości UAV w poprawie efektywności przeładunku w centrach dystrybucyjnych

W dużych centrach dystrybucyjnych UAV mogą pełnić funkcję wsparcia dla operatorów załadunku i rozładunku poprzez monitoring kluczowych stref operacyjnych. Drony wyposażone w systemy wizyjne i algorytmy sztucznej inteligencji analizują w czasie rzeczywistym natężenie ruchu, tempo realizacji zadań oraz wykorzystanie zasobów technicznych. Dzięki temu możliwe jest optymalizowanie harmonogramów przeładunku

i redukcja czasu przestoju pojazdów ciężarowych oczekujących na obsługę (Malang, Charoenkwan, Wudhikarn, 2023).

UAV wspomagają również koordynację pracy ludzkich operatorów. Mogą przekazywać obrazy i dane do systemów zarządzania, sygnalizując miejsca, w których dochodzi do zatorów operacyjnych lub opóźnień. Pozwala to kierownikom zmieniać alokację zasobów w czasie rzeczywistym, a tym samym utrzymywać płynność całego procesu logistycznego (Ekici, Seçkin, Özek, Karpuz, 2023).

Rozwój metod sztucznej inteligencji pozwala dodatkowo na integrowanie UAV z systemami predykcyjnymi, które przewidują przyszłe zapotrzebowanie na zasoby przeładunkowe. W efekcie możliwe jest tworzenie adaptacyjnych harmonogramów, minimalizujących ryzyko opóźnień i zwiększających efektywność operacyjną (Tubis, Poturaj, Dereń, Żurek, 2024).

4) Zapobieganie kradzieżom i przypadkowym uszkodzeniom towaru

Kwestia bezpieczeństwa w strefach przeładunkowych ma strategiczne znaczenie, szczególnie w przypadku towarów wysokiej wartości, takich jak elektronika, farmaceutyki czy produkty luksusowe. UAV mogą działać jako mobilne systemy monitoringu, które uzupełniają tradycyjne instalacje CCTV. Regularne patrole powietrzne ograniczają ryzyko kradzieży, nieautoryzowanego dostępu do stref operacyjnych oraz umożliwiają szybszą reakcję w przypadku wykrycia nieprawidłowości (Patriarca i in., 2020).

Drony pełnią również funkcję kontrolną w zakresie analizy ruchu jednostek ładunkowych. Dzięki systemom wizyjnym i analizie trajektorii mogą sprawdzać, czy towary przemieszczają się zgodnie z obowiązującymi procedurami i czy nie występują odchylenia od zaplanowanych ścieżek transportowych (Woods, 2015). W przypadku wykrycia uszkodzeń opakowań lub widocznych defektów, UAV są w stanie automatycznie generować raporty i przekazywać je do systemów jakościowych, co skraca czas reakcji i minimalizuje ryzyko reklamacji (Tubis, Poturaj, Dereń, Żurek, 2024).

W perspektywie dalszego rozwoju technologicznego UAV mogą stać się integralną częścią inteligentnych systemów zabezpieczeń, współpracujących z platformami ERP oraz zewnętrznymi bazami danych służącymi do monitorowania transportów wysokiego ryzyka. Koncepcja systemowego podejścia do bezpieczeństwa, szeroko opisana przez Nancy Leveson w książce Engineering a Safer World (MIT Press), zakłada, że skuteczność ochrony wynika nie tylko z niezawodności pojedynczych komponentów, lecz przede wszystkim z ich zdolności do współdziałania w ramach złożonego ekosystemu techniczno-informacyjnego.

2.6. Drony jako wsparcie operacji w trudnych warunkach magazynowych

Systemy magazynowe w obecnych czasach funkcjonują w coraz bardziej zróżnicowanych i wymagających środowiskach, co rodzi potrzebę stosowania rozwiązań innowacyjnych i odpornych na zakłócenia. Jak wskazuje Patriarca i in. (2020) rozwój inżynierii odporności wymaga systematycznego ujęcia ramowego, które pozwala łączyć badania teoretyczne z praktyką analizy ryzyka. Trudne warunki pracy, takie jak skrajne temperatury w chłodniach, ograniczona przestrzeń w magazynach wielopoziomowych czy brak dostępu do sygnału satelitarnego w podziemnych centrach logistycznych, stają się realnym wyzwaniem dla operatorów i menedżerów logistyki. Bezzałogowe statki powietrzne (UAV) stanowią w tym kontekście narzędzie pozwalające nie tylko na zwiększenie bezpieczeństwa, ale również na

osiągnięcie wyższej efektywności operacyjnej. Dzięki zastosowaniu technologii wizyjnych, systemów SLAM, czujników środowiskowych i integracji z systemami zarządzania magazynem UAV pełnią rolę mobilnych sensorów oraz autonomicznych jednostek wspierających procesy decyzyjne (Tubis, Poturaj, Dereń, Żurek, 2024).

1) Wykorzystanie UAV w chłodniach i magazynach o ekstremalnych temperaturach

Jednym z najbardziej wymagających środowisk eksploatacyjnych są chłodnie i mroźnie, w których temperatura może sięgać nawet -30°C. Praca w takich warunkach stanowi istotne obciążenie zarówno dla ludzi, jak i dla tradycyjnych urządzeń logistycznych. Drony dostosowane do działania w niskich temperaturach mogą skutecznie przejmować część zadań związanych z inwentaryzacją, monitorowaniem stanu technicznego i kontrolą temperatury. Dzięki temu minimalizowane jest ryzyko narażenia pracowników na ekstremalne warunki, a czas potrzebny na realizację operacji ulega skróceniu (Ekici, Seçkin, Özek, Karpuz, 2023).

UAV mogą wykonywać automatyczną inwentaryzację, skanując kody kreskowe i tagi RFID, co redukuje konieczność ręcznych kontroli. W dodatku drony wyposażone w czujniki termiczne są zdolne do bieżącego monitorowania temperatury w różnych strefach chłodni i wykrywania obszarów, w których mogą występować awarie systemów chłodzenia. Takie podejście nie tylko poprawia bezpieczeństwo operacyjne, lecz także wspiera efektywność energetyczną obiektu, ponieważ dane pozyskane przez UAV mogą być wykorzystywane do optymalizacji pracy agregatów chłodniczych (Pamula, Ramachandran, 2025).

Drony działające w ekstremalnych warunkach wymagają specjalnych systemów zarządzania energią, odpornych na spadki wydajności baterii w niskich temperaturach. Zastosowanie rozwiązań hybrydowych, takich jak mikroturbiny lub zasilanie wodorowe, dodatkowo zwiększa niezawodność działania UAV w takich środowiskach.

2) UAV w zarządzaniu przestrzenią w magazynach wielopoziomowych i podziemnych

Rosnące zapotrzebowanie na optymalizację wykorzystania powierzchni sprawia, że coraz częściej stosowane są magazyny wielopoziomowe oraz podziemne centra logistyczne. Tego rodzaju obiekty wymagają precyzyjnego monitorowania i elastycznego zarządzania przestrzenią. UAV wnoszą w tym kontekście wartość dodaną, ponieważ mogą swobodnie przemieszczać się pomiędzy poziomami, skanować lokalizacje towarów i tworzyć trójwymiarowe mapy przestrzeni, identyfikując obszary niewykorzystane lub zagrożone przeciążeniem (Malang, Charoenkwan, Wudhikarn, 2023).

W takich środowiskach tradycyjne systemy nawigacji satelitarnej często zawodzą, dlatego UAV wykorzystują alternatywne metody lokalizacji, takie jak SLAM, LiDAR czy systemy beaconowe. Dzięki temu mogą poruszać się precyzyjnie w przestrzeniach pozbawionych sygnału GPS, zachowując wysoką dokładność w raportowaniu danych. Integracja UAV z systemami transportu wewnętrznego, w tym z autonomicznymi wózkami widłowymi, umożliwia optymalizację tras przejazdu oraz dynamiczne zarządzanie przepływem materiałów (Lin, Chang, Huang, 2024).

Drony w podziemnych centrach logistycznych mogą również monitorować warunki środowiskowe – jakość powietrza, wilgotność czy poziom pyłu – co ma kluczowe znaczenie

w procesach związanych z przechowywaniem produktów wymagających kontrolowanego mikroklimatu (Kanellakis, Nikolakopoulos, 2017).

3) Rola UAV w operacjach magazynowych na dużą skalę, np. w centrach logistycznych e-commerce

Dynamiczny rozwój handlu elektronicznego sprawia, że centra dystrybucyjne muszą sprostać ogromnym wolumenom zamówień i coraz krótszym terminom realizacji. Drony stanowią w tym kontekście wsparcie zarówno w monitorowaniu stanów magazynowych, jak i w procesach kompletacji zamówień. UAV mogą autonomicznie patrolować hale magazynowe, identyfikując lokalizacje produktów oraz przesyłając dane do systemów WMS i ERP. Dzięki temu zapewniają bieżącą synchronizację informacji między poziomem operacyjnym a systemami zarządzania strategicznego (Fernández-Caramés, Blanco-Novoa, Froiz-Míguez, Fraga-Lamas, 2019).

W dużych centrach e-commerce UAV wspierają także proces kompletacji zamówień, wskazując lokalizacje produktów i ułatwiając robotom mobilnym ich precyzyjne pobieranie. Zastosowanie UAV umożliwia skrócenie czasu realizacji zamówień, redukcję liczby błędów w procesie kompletacji oraz optymalizację wykorzystania zasobów ludzkich. Drony mogą także wykrywać błędy logistyczne, np. nieprawidłowe rozmieszczenie towarów lub brak zgodności pomiędzy systemem a stanem rzeczywistym, co pozwala na szybką reakcję operatorów i unikanie strat finansowych (Fatorachian, Kazemi, 2021).

Zintegrowanie UAV z robotami magazynowymi oraz autonomicznymi pojazdami transportowymi tworzy podstawę do budowy inteligentnych ekosystemów logistycznych. Takie rozwiązania wpisują się w koncepcję cyfrowych bliźniaków, gdzie wszystkie elementy systemu – od dronów, przez AGV, po systemy informatyczne – współdziałają w ramach jednego środowiska zarządzania procesami magazynowymi (Woods, 2015).

2.7. Wyzwania i przyszłość UAV w magazynach

Wykorzystanie dronów w logistyce magazynowej otwiera nowe możliwości w zakresie automatyzacji, monitorowania i zarządzania przestrzenią składową. Ich potencjał rozwojowy jest jednak nierozerwalnie związany z wyzwaniami technologicznymi, organizacyjnymi i prawnymi. Z jednej strony UAV przyczyniają się do wzrostu efektywności i bezpieczeństwa procesów, z drugiej – wymagają odpowiednich regulacji, inwestycji oraz dostosowania kompetencji personelu. Zagadnienia te są kluczowe w kontekście transformacji cyfrowej logistyki i stanowią fundament dyskusji nad przyszłą rolą UAV w inteligentnych systemach magazynowych. W niniejszym podrozdziale przedstawiono kluczowe bariery oraz kierunki zmian, które zdecydują o tym, czy drony staną się standardowym elementem nowoczesnych centrów logistycznych i hubów dystrybucyjnych.

1) Regulacje prawne dotyczące UAV w logistyce magazynowej

Jednym z najważniejszych wyzwań stojących przed wdrożeniem UAV w środowisku magazynowym są regulacje prawne i normy bezpieczeństwa. Choć drony działające wewnątrz obiektów nie podlegają tak restrykcyjnym przepisom jak UAV operujące w przestrzeni otwartej, wymagane jest ich dostosowanie do zasad dotyczących ochrony danych, niezawodności systemów sterowania oraz kompatybilności z infrastrukturą

magazynową. Badania wykazały, że opracowanie formalnych ram bezpieczeństwa, opartych na systematycznej ocenie ryzyka, stanowi fundament skutecznej implementacji dronów w złożonych środowiskach przemysłowych (Clothier, Williams, Fulton, 2015). W kontekście europejskim coraz większe znaczenie zyskują wytyczne opracowywane przez European Union Aviation Safety Agency (EASA), obejmujące certyfikację operatorów, standardy integracji UAV z systemami logistycznymi oraz kryteria oceny niezawodności. W przyszłości można spodziewać się dalszej harmonizacji przepisów w skali międzynarodowej, co ułatwi przedsiębiorstwom wdrażanie dronów w globalnych łańcuchach dostaw i zwiększy przewidywalność regulacyjną.

2) Wyzwania etyczne i społeczne

Kolejnym istotnym obszarem są kwestie etyczne i społeczne związane z użytkowaniem UAV. W literaturze podkreśla się, że dynamiczny rozwój technologii dronowych wiąże się z wyzwaniami w zakresie ochrony prywatności, danych osobowych oraz akceptacji społecznej nowych rozwiązań (Wang, Mutzner, Blanchet, 2023). W kontekście środowiska magazynowego oznacza to konieczność zachowania równowagi między korzyściami płynącymi z monitorowania procesów a obawami dotyczącymi inwigilacji i nadmiernej kontroli pracowników.

Zgodnie z podejściem etyki technologicznej wdrażanie UAV powinno opierać się na zasadach transparentności, minimalizacji zbieranych danych oraz zapewnieniu, że informacje pozyskiwane przez drony są wykorzystywane wyłącznie do celów operacyjnych. W przeciwnym razie brak zaufania i opór pracowników mogą stać się barierą w upowszechnieniu UAV w logistyce magazynowej.

3) Bariery wdrożeniowe i inwestycyjne

Wdrożenie UAV w magazynach wiąże się także z barierami natury ekonomicznej i organizacyjnej. Poza kosztami zakupu urządzeń, konieczne są nakłady na rozwój infrastruktury towarzyszącej: systemów ładowania, stacji dokujących, oprogramowania sterującego, a także sieci czujników umożliwiających integrację dronów z systemami klasy WMS czy ERP. Dodatkowym wyzwaniem jest zapewnienie cyberbezpieczeństwa, gdyż UAV generują i przesyłają duże ilości danych, które muszą być chronione zgodnie z regulacjami prawnymi. Bariery te mają szczególne znaczenie dla małych i średnich przedsiębiorstw, które często nie dysponują budżetami porównywalnymi do globalnych operatorów logistycznych. Wyzwania te nie ograniczają się wyłącznie do finansów – równie istotne jest przygotowanie kadry. Obsługa UAV wymaga nowych kompetencji, takich jak nadzorowanie lotów, interpretacja danych z czujników oraz integracja tych danych z innymi systemami zarządzania. Oznacza to konieczność opracowania programów szkoleniowych, które umożliwią adaptację pracowników do nowych technologii (Kamat i in., 2022).

4) Przyszłość UAV w magazynach: integracja technologii cyfrowych

Perspektywy rozwoju UAV w logistyce magazynowej są nierozerwalnie związane z integracją nowoczesnych technologii cyfrowych. Badania nad blockchainem wskazują, że technologia ta może zwiększyć przejrzystość i bezpieczeństwo wymiany danych w procesach logistycznych oraz ułatwić integrację UAV z istniejącymi systemami (Kouhizadeh, Saberi,

Sarkis, 2021). W połączeniu z rozwiązaniami opartymi na sztucznej inteligencji i Internecie Rzeczy drony będą mogły w przyszłości działać w pełni autonomicznie, podejmując decyzje w zakresie tras przelotów, monitorowania zapasów czy zarządzania przepływem materiałów. Rozwój sieci 5G zapewni natomiast warunki techniczne do transmisji dużych ilości danych w czasie rzeczywistym, co dodatkowo zwiększy efektywność i skalowalność UAV. Dzięki temu drony staną się elementem cyber-fizycznych systemów magazynowych, które łączą urządzenia, czujniki i systemy analityczne w jeden ekosystem zarządzania.

Podsumowanie

Podsumowując rozwój UAV w magazynach wiąże się zarówno z obietnicą znaczących korzyści, jak i z koniecznością przezwyciężenia szeregu wyzwań. Regulacje prawne i etyczne muszą nadążać za postępem technologicznym, a bariery inwestycyjne i szkoleniowe wymagają systemowych rozwiązań. Jednocześnie integracja UAV z technologiami cyfrowymi, takimi jak blockchain, IoT i 5G, otwiera drogę do pełnej automatyzacji procesów logistycznych. W perspektywie najbliższej dekady drony mogą stać się nieodłącznym elementem inteligentnych magazynów, redefiniując sposób organizacji i zarządzania operacjami wewnętrznymi. Ich zdolność do autonomicznego działania, uczenia się na podstawie danych oraz adaptacji do dynamicznych warunków przesądzi o tym, że UAV będą nie tylko wsparciem, lecz także kluczowym filarem logistyki przyszłości.

ROZDZIAŁ 3

KLUCZOWE TRENDY W BRANŻY UAV NA LATA 2025–2030

W nadchodzących latach technologia UAV będzie jednym z głównych motorów transformacji w logistyce, transporcie, zarządzaniu kryzysowym oraz inteligentnych systemach miejskich. Coraz wyraźniej widać, że drony przestają być traktowane jako eksperymentalne narzędzia do zadań specjalnych, a stają się elementem kompleksowych ekosystemów cyfrowych. Integracja komponentów UAV–AutoID z procesami logistycznymi wymaga nie tylko rozwiązań technologicznych, lecz także odpowiednich kompetencji pracowników, które warunkują efektywność wdrożenia nowych narzędzi (Jahani i in., 2024). Wspierane przez sztuczną inteligencję, łączność 5G oraz integrację z Internetem Rzeczy, UAV wchodzą w etap dojrzałości technologicznej, w którym kluczowe znaczenie zyskują nie tylko ich możliwości operacyjne, lecz także kwestie regulacyjne, bezpieczeństwo danych i akceptacja społeczna.

Prognozy rynkowe wskazują, że skala zastosowań dronów w latach 2025–2030 będzie rosła wykładniczo, a ich rola w globalnych łańcuchach dostaw i w zarządzaniu infrastrukturą krytyczną stanie się niepodważalna (Drone Industry Insights, 2025). Rozwój ten będzie przebiegał równolegle z intensywnymi pracami badawczymi nad nowymi technologiami napędowymi, autonomią systemów oraz integracją UAV z narodowymi systemami ruchu lotniczego. W tym kontekście można oczekiwać, że drony staną się jednym z kluczowych filarów czwartej i piątej rewolucji przemysłowej, redefiniując procesy logistyczne, ratownicze i transportowe w skali globalnej.

3.1. Monitorowanie klęsk żywiołowych za pomocą UAV

Jednym z najbardziej perspektywicznych obszarów badań nad UAV jest ich wykorzystanie w reagowaniu na katastrofy naturalne i inne sytuacje kryzysowe. Literatura wskazuje, że drony mogą znacząco zwiększyć skuteczność działań ratowniczych, umożliwiając szybkie mapowanie obszarów dotkniętych katastrofą, lokalizację osób wymagających pomocy oraz ocenę skali zniszczeń (Restas, 2015; Erdelj, Król, Natalizio, 2017). W przeciwieństwie do tradycyjnych metod pozyskiwania danych, UAV pozwalają na tworzenie aktualnych map w czasie rzeczywistym, co usprawnia planowanie ewakuacji i dostarczanie pomocy humanitarnej:

Szczególne znaczenie ma rozwój rojów UAV (swarm drones), które dzięki algorytmom koordynacji mogą prowadzić szeroko zakrojone inspekcje i dynamicznie aktualizować mapy zagrożeń. Badania wskazują, że takie rozwiązania zwiększają odporność całych systemów zarządzania kryzysowego i pozwalają na optymalizację tras ewakuacyjnych w czasie rzeczywistym (Meyer, Schorer, Żurek, Hinz, 2025).

Aktualne prognozy rynkowe potwierdzają rosnące znaczenie UAV w obszarze bezpieczeństwa i reagowania kryzysowego. Zgodnie z raportem Drone Industry Insights (2025), sektor bezpieczeństwa publicznego i zarządzania katastrofami pozostanie jednym z najszybciej rozwijających się segmentów rynku UAV, ze wzrostem napędzanym przez integrację dronów z systemami predykcyjnymi i sztuczną inteligencją . Równolegle FAA Aerospace Forecast (2024) przewiduje dalsze zwiększanie liczby zarejestrowanych

systemów UAV w USA do celów specjalistycznych, w tym ratowniczych, co wskazuje na trwałe włączenie dronów w strukturę systemów bezpieczeństwa narodowego.

W perspektywie do 2030 roku można spodziewać się, że UAV będą nie tylko wsparciem dla służb ratowniczych, ale również integralnym elementem systemów zarządzania kryzysowego. Integracja dronów z platformami predykcyjnymi, wykorzystującymi dane satelitarne i modele klimatyczne, pozwoli na wcześniejsze wykrywanie zagrożeń i przygotowanie scenariuszy działań. W efekcie UAV będą mogły nie tylko reagować na klęski żywiołowe, lecz także wspierać systemy wczesnego ostrzegania, stając się narzędziem zwiększającym odporność społeczno-gospodarczą na skutki katastrof naturalnych.

3.2. Nowe technologie napędowe dla UAV (ze szczególnym uwzględnieniem systemów wodorowych)

Rozwój nowych technologii napędowych stanowi jeden z najważniejszych kierunków badań i wdrożeń w obszarze UAV. Ograniczenia tradycyjnych akumulatorów litowo-jonowych – krótki czas lotu, ograniczony zasięg i konieczność częstego ładowania – sprawiają, że badacze i producenci koncentrują się na poszukiwaniu alternatywnych źródeł energii. W literaturze i raportach branżowych wskazuje się trzy główne nurty innowacji takie jak akumulatory nowej generacji, systemy hybrydowe oraz ogniwa paliwowe oparte na wodorze:

1) Akumulatory nowej generacji i systemy hybrydowe

Równolegle do rozwoju wodoru prowadzone są badania nad akumulatorami półprzewodnikowymi (solid-state), które charakteryzują się wyższą gęstością energii, większym bezpieczeństwem eksploatacyjnym i możliwością wydłużenia autonomii lotu w zastosowaniach takich jak logistyka miejska, inspekcje sieci przesyłowych czy rolnictwo precyzyjne. Badania koncentrują się również na wpływie ekstremalnych temperatur na stabilność źródeł energii, co ma kluczowe znaczenie dla UAV operujących w chłodniach, strefach polarnych i obszarach pustynnych.

W przypadku systemów hybrydowych, łączących ogniwa paliwowe i akumulatory litowo-jonowe, celem jest osiągnięcie kompromisu pomiędzy wydajnością energetyczną a masą całego układu. Najnowsze modele konfiguracyjne wskazują, że hybrydy pozwalają na bardziej elastyczne zarządzanie zasobami energetycznymi w czasie lotu, zwiększając niezawodność misji (Yun, Im, Han, 2025).

2) Wodorowe systemy napędowe UAV

Największe nadzieje wiązane są z technologiami wodorowymi, które oferują znacząco wyższą gęstość energii w porównaniu z bateriami litowo-jonowymi, co umożliwia kilkukrotne wydłużenie czasu lotu i zwiększenie ładowności UAV. Wodór znajduje zastosowanie przede wszystkim w misjach wymagających niezawodności i długotrwałej autonomii – np. w transporcie medycznym, inspekcjach infrastruktury krytycznej czy operacjach wojskowych. Badania dowodzą, że w misjach o zapotrzebowaniu energetycznym powyżej 2,8 kWh ogniwa paliwowe przewyższają baterie litowo-jonowe pod względem sprawności i niezawodności (Arsalis, Papanastasiou, Georghiou, 2022).

3) Dynamika rynku i prognozy rozwoju

Rynek UAV napędzanych wodorem znajduje się w fazie dynamicznego wzrostu. Według prognoz Grand View Research (2024) i Global Market Insights (2025) segment dronów zasilanych ogniwami paliwowymi miał wartość ok. 1,7–1,8 mld USD w 2024 roku i będzie rósł w tempie 14–17% rocznie, osiągając powyżej 3 mld USD do 2030 roku. Dataintelo (2024) oraz Global Industry Analysts (2025) przewidują, że rynek UAV na wodór przekroczy 2 mld USD już w pierwszej połowie lat 30. Drone Industry Insights (2025) klasyfikuje UAV wodorowe jako „high-growth niche", rozwijającą się szybciej niż średnia całego sektora UAV.

4) Regulacje i certyfikacja

Rozwój technologii wodorowych w lotnictwie bezzałogowym jest wspierany przez inicjatywy regulacyjne na poziomie międzynarodowym. European Union Aviation Safety Agency (EASA) w 2024 roku opublikowała dokument pt. Certification Roadmap on Hydrogen, obejmujący wymagania dotyczące projektowania, certyfikacji i eksploatacji bezzałogowych statków powietrznych (UAV) napędzanych wodorem. Z kolei Federal Aviation Administration (FAA) w Stanach Zjednoczonych opublikowała w tym samym roku raport Hydrogen-Fueled Aircraft Safety & Certification Roadmap, który podkreśla konieczność standaryzacji zasad w zakresie magazynowania wodoru, bezpieczeństwa eksploatacji oraz odporności systemów napędowych na awarie. Równolegle Hydrogen Council w raporcie Hydrogen Insights 2023/2024 oraz International Energy Agency (IEA) w dokumencie Global Hydrogen Review 2023 wskazują, że rozwój lotnictwa bezzałogowego wykorzystującego wodór jest ściśle powiązany z budową szerokiego łańcucha wartości H_2 – od produkcji, przez magazynowanie, po infrastrukturę tankowania.

5) Wodorowe UAV: zalety, wyzwania technologiczne i przykłady wdrożeń rynkowych

Do zalet wodorowych UAV zalicza się: długotrwałą autonomię, stabilność dostarczania mocy w czasie oraz brak emisji CO_2. Wyzwania obejmują natomiast konieczność rozwoju lekkich i wytrzymałych zbiorników kompozytowych, optymalizację zarządzania termiką i wodą w stosach ogniw oraz wysokie koszty zielonego wodoru. W ostatnich latach można zaobserwować jednak dynamiczny rozwój projektów i inicjatyw związanych z zastosowaniem wodoru w lotnictwie bezzałogowym. Doosan Mobility Innovation wdraża drony zasilane ogniwami paliwowymi w misjach dostaw medycznych w Azji i Ameryce Północnej, gdzie kluczowe znaczenie ma niezawodność i długi czas lotu. HES Energy Systems (obecnie Hylium) rozwija lekkie samoloty oraz systemy UAV oparte na wodorze, kładąc nacisk na redukcję masy konstrukcji i wydajność energetyczną. W Europie istotną rolę odgrywa Nex Aero z Berlina, koncentrujące się na wodorowych eVTOL w ramach koncepcji urban air mobility, a także czeska firma Zuri, rozwijająca hybrydowe eVTOL łączące technologie bateryjne i wodorowe. Z kolei izraelskie HevenDrones opracowuje ciężkie UAV cargo, przeznaczone do transportu w misjach wojskowych i humanitarnych. Na rynku brytyjskim Intelligent Energy dostarcza lekkie i hybrydowe systemy PEM, które zostały zastosowane m.in. w demonstracjach Aurora Flight Sciences (Boeing) z wykorzystaniem platformy SKIRON-XLE. Z kolei w Australii firma AMSL Aero rozwija projekt Vertiia – innowacyjny eVTOL napędzany ciekłym wodorem.

Choć przykłady te pokazują, że wodór staje się realną alternatywą dla tradycyjnych źródeł energii w UAV, nadal istnieją poważne wyzwania infrastrukturalne. Brak gęstej sieci stacji tankowania, wysokie koszty zielonego wodoru oraz brak standaryzacji systemów refuellingu sprawiają, że obecne wdrożenia mają charakter punktowy i wymagają dalszego wsparcia technologicznego oraz regulacyjnego.

6) Infrastruktura i wyzwania

Największym ograniczeniem pozostaje infrastruktura tankowania. Brak gęstej sieci stacji, wysokie koszty zielonego wodoru i brak standaryzacji refuellingu sprawiają, że wdrożenia mają charakter punktowy. Raport Jamesa Manyika już w 2017 podkreślał konieczność rozwoju lokalnych, mobilnych stacji tankowania dedykowanych UAV. Wodór w UAV nie jest rozwiązaniem uniwersalnym dla wszystkich scenariuszy, ale w misjach długotrwałych i wymagających dużej niezawodności stanowi wyraźną przewagę operacyjną. W perspektywie do 2030 roku można oczekiwać intensywnej ekspansji tego segmentu, szczególnie w energetyce, logistyce, rolnictwie precyzyjnym i obronności. Połączenie technologii wodorowych z AI, 5G i edge computing stworzy nową klasę platform bezzałogowych, które zdefiniują przyszłość lotnictwa bezzałogowego.

Rozwój nowych technologii napędowych stanowi jeden z najważniejszych kierunków badań i wdrożeń w obszarze UAV. Wyzwania związane z ograniczonym czasem lotu, niewielkim zasięgiem oraz koniecznością częstego ładowania akumulatorów sprawiają, że badacze i producenci koncentrują się na poszukiwaniu alternatywnych źródeł energii. Największe nadzieje wiąże się z ogniwami paliwowymi opartymi na wodorze, które umożliwiają znaczące wydłużenie czasu lotu i zwiększenie zasięgu dronów, a jednocześnie pozwalają na redukcję emisji gazów cieplarnianych.

W praktyce UAV napędzane wodorem znajdują zastosowanie tam, gdzie wymagana jest wysoka niezawodność i autonomia – w transporcie medycznym, inspekcjach infrastruktury krytycznej czy w operacjach wojskowych. W literaturze wskazuje się, że połączenie technologii wodorowych z zaawansowanymi systemami zarządzania energią umożliwia osiąganie wielogodzinnych czasów lotu przy zachowaniu stabilności operacyjnej: Badania nad hybrydowymi systemami zasilania, łączącymi np. ogniwa paliwowe i akumulatory litowe, koncentrują się na uzyskaniu optymalnego kompromisu między wydajnością energetyczną, a masą całego układu.

Równolegle rozwijane są akumulatory nowej generacji, takie jak baterie półprzewodnikowe (solid-state), charakteryzujące się wyższą gęstością energii i lepszym bezpieczeństwem eksploatacyjnym. Ulepszenia w tym obszarze mogą doprowadzić do istotnego zwiększenia autonomii dronów stosowanych w logistyce miejskiej, inspekcjach sieci przesyłowych czy rolnictwie precyzyjnym: Badania obejmują także wpływ ekstremalnych temperatur na stabilność źródeł energii, co jest szczególnie istotne w przypadku UAV operujących w chłodniach, strefach polarnych czy obszarach pustynnych.

Z perspektywy rynkowej rosnąca liczba testów i wdrożeń potwierdza, że wodorowe systemy napędowe wchodzą w fazę komercjalizacji. Według raportu Drone Industry Insights (2025), technologie wodorowe stanowią obecnie jeden z kluczowych trendów w rozwoju UAV, a inwestycje w tym obszarze wzrosły o ponad 30% w porównaniu z 2023 rokiem. Z kolei prognozy Precedence Research (2025) dla rynku Urban Air Mobility i UAV wskazują, że technologie alternatywne – wodór, hybrydy i baterie nowej generacji – będą stanowić podstawę systemów transportowych nowej generacji, obejmujących zarówno drony cargo, jak i eVTOL .

Równocześnie amerykańska Federal Aviation Administration (FAA) w raporcie FAA Aerospace Forecast: Fiscal Years 2024 to 2044 podkreśla znaczenie badań nad napędami wodorowymi i hybrydowymi dla przyszłości dronów operujących w przestrzeni publicznej, w tym w logistyce miejskiej i transporcie długodystansowym. Prognozy te wskazują, że rozwój technologii napędowych przestaje być domeną laboratoriów i staje się elementem

polityki regulacyjnej oraz inwestycji publicznych i prywatnych. Przykładem jest studium „A hybrid-electric propulsion system for an unmanned aerial vehicle based on proton exchange membrane fuel cell, battery, and electric motor" autorstwa Farajollahi, Rostami i Marefati (2022), prezentujące modele konfiguracji napędów hybrydowych z wykorzystaniem ogniw paliwowych. Jednocześnie inne opracowania, takie jak „Recent Advances in Artificial Intelligence and Computer Vision for Unmanned Aerial Vehicles" (Carrillo, Borda, 2021), podkreślają znaczenie integracji napędów hybrydowych z algorytmami sztucznej inteligencji w celu poprawy efektywności i autonomii lotu UAV.

Konkludując, rozwój nowych technologii napędowych pozwoli UAV wejść w nową erę długotrwałych i energooszczędnych misji. Połączenie badań nad wodorowymi ogniwami paliwowymi, akumulatorami nowej generacji i systemami hybrydowymi z rosnącymi inwestycjami globalnych graczy sprawia, że w latach 2025–2030 możemy spodziewać się przełomu w zakresie autonomii i zrównoważonego charakteru lotów UAV. To właśnie te innowacje zdecydują o ich szerokim zastosowaniu w logistyce, energetyce, transporcie i obronności.

3.3. Dynamiczny wzrost rynku dronów komercyjnych

Rynek dronów komercyjnych w latach 2025–2030 będzie jednym z najszybciej rozwijających się segmentów technologii lotniczych i cyfrowych. Zastosowania UAV w logistyce, transporcie, energetyce, rolnictwie i bezpieczeństwie publicznym poszerzają się z roku na rok, co znajduje potwierdzenie zarówno w analizach naukowych, jak i prognozach branżowych. Badania wskazują, że rozwój rynku UAV jest konsekwencją nie tylko postępu technologicznego, lecz także rosnących oczekiwań gospodarki wobec automatyzacji procesów i zwiększenia odporności łańcuchów dostaw (Kellermann, Biehle, Fischer, 2020).

W literaturze naukowej podkreśla się, że sektor logistyki i transportu będzie odgrywał kluczową rolę w procesie komercjalizacji UAV. Drony umożliwiają skrócenie czasu dostaw, zmniejszenie kosztów operacyjnych oraz zwiększenie elastyczności usług, co czyni je istotnym narzędziem wspierającym rozwój nowoczesnych łańcuchów dostaw. Na znaczenie tego trendu zwracają uwagę również analizy branżowe – James Manyika, pełniący wówczas funkcję dyrektora McKinsey Global Institute, w raporcie z 2017 roku podkreślał, że automatyzacja procesów logistycznych i transportowych, w tym wykorzystanie flot dronów, stanie się jednym z kluczowych kierunków rozwoju gospodarki. Równolegle rozwijają się zastosowania UAV w sektorze energetyki, obejmujące m.in. inspekcję farm wiatrowych, sieci przesyłowych czy instalacji fotowoltaicznych, co zwiększa zapotrzebowanie na jednostki o dużej autonomii i odporności na trudne warunki środowiskowe. Z kolei w rolnictwie drony wspierają koncepcję rolnictwa precyzyjnego, umożliwiając monitorowanie upraw, optymalizację nawożenia oraz redukcję kosztów, co przekłada się na wyższą efektywność i stabilność produkcji.

Prognozy rynkowe potwierdzają, że sektor UAV przechodzi w fazę dynamicznej ekspansji. Według Drone Industry Insights (2025), globalny rynek dronów komercyjnych będzie rósł średniorocznie w tempie kilkunastu procent, a do końca dekady jego wartość osiągnie ponad 50 miliardów USD. Z kolei PwC Drone Powered Solutions (2024) wskazuje, że liczba operacji komercyjnych UAV w Europie i na świecie podwoi się do 2029 roku, a roczny wolumen lotów w logistyce, monitoringu i dostawach wzrośnie do poziomu kilkudziesięciu milionów .

Szczególnie dynamiczny rozwój przewiduje się w segmencie dostaw e-commerce. Firma McKinsey (2024) szacuje, że liczba płatnych dostaw zrealizowanych za pomocą dronów przekroczyła już 800 tysięcy w 2023 roku, a w nadchodzących latach wzrost ten będzie wykładniczy. Potwierdzają to także dane z raportu PwC (2025), według którego globalny rynek dostaw dronowych wzrośnie z 0,25 mld USD w 2024 roku do ponad 65 mld USD w 2034 roku. Trend ten jasno wskazuje, że UAV stają się realną alternatywą dla tradycyjnych metod dostaw w sektorze detalicznym i logistycznym.

Dynamiczny wzrost dotyczy również Urban Air Mobility i dronów cargo. Raport Global Market Insights (2025) prognozuje średnioroczną złożoną stopę wzrostu (CAGR) na poziomie około 20,6 % dla segmentu Advanced Air Mobility (AAM) w latach 2025–2034, obejmującego drony transportowe i eVTOL, które będą wykorzystywane do przewozu pasażerów i ładunków w aglomeracjach. Równolegle Precedence Research (2025) wskazuje, że w perspektywie do 2030 roku rynek UAM osiągnie wartość kilkudziesięciu miliardów USD, a technologie UAV staną się integralną częścią inteligentnych systemów transportowych .

Podsumowując, rynek dronów komercyjnych w latach 2025–2030 będzie charakteryzował się szybkim wzrostem, silną dywersyfikacją sektorową i rosnącą rolą integracji z systemami cyfrowymi. Drony staną się podstawowym narzędziem w logistyce miejskiej, monitoringu infrastruktury, energetyce, rolnictwie i bezpieczeństwie publicznym. Kluczowe znaczenie będą miały nie tylko postęp technologiczny i obniżenie kosztów produkcji UAV, lecz także rozwój otoczenia regulacyjnego i akceptacja społeczna. Wszystko to sprawi, że UAV przejdą drogę od innowacji niszowej do powszechnie stosowanego rozwiązania, które w znacznym stopniu ukształtuje globalną gospodarkę cyfrową.

3.4. Ewolucja dronów w kierunku coraz bardziej autonomicznych i zaawansowanych systemów

Kierunki rozwoju UAV w latach 2025–2030 jednoznacznie wskazują na przejście od rozwiązań częściowo sterowanych przez operatorów do systemów o rosnącym stopniu autonomii. Dynamiczny rozwój algorytmów sztucznej inteligencji, uczenia maszynowego i technologii wizyjnych sprawia, że drony coraz częściej potrafią podejmować decyzje w czasie rzeczywistym, działając w złożonych środowiskach. Jak zauważa Woods (2015), autonomia systemów technicznych stanowi kluczowy czynnik budowania ich odporności i zdolności adaptacyjnych, co ma szczególne znaczenie w przypadku UAV funkcjonujących w zmiennych warunkach operacyjnych.

Jednym z najbardziej dynamicznie rozwijających się obszarów zastosowań bezzałogowych statków powietrznych jest Urban Air Mobility (UAM), obejmujący m.in. rozwój elektrycznych pionowzlotów (eVTOL). Jak zauważa prof. John M. Horack, pełniący funkcję Neil Armstrong Chair in Aerospace Policy at The Ohio State University oraz były menedżer programów naukowych National Aeronautics and Space Administration (NASA) rozwój koncepcji Advanced Air Mobility (AAM) wymaga nie tylko przełomowych innowacji technologicznych, lecz także skoordynowanych działań regulacyjnych i politycznych, które umożliwią bezpieczną integrację nowych statków powietrznych z istniejącą infrastrukturą transportową. UAM wpisuje się w koncepcję inteligentnych miast, dostarczając nowych rozwiązań w zakresie mobilności mieszkańców i ograniczania zatłoczenia drogowego. W raporcie opracowanym przez NASA we współpracy z partnerami branżowymi podkreślono, że systemy eVTOL mają realny potencjał do bezpiecznego współistnienia z tradycyjnym ruchem

lotniczym, co stanowi istotny krok w kierunku pełnej integracji UAV z infrastrukturą powietrzną i transportową.

Ewolucja dronów dotyczy także sektorów gospodarki opartych na krytycznej infrastrukturze. W energetyce UAV umożliwiają automatyczne inspekcje sieci przesyłowych, farm wiatrowych i instalacji fotowoltaicznych, co znacząco skraca czas przeglądów i pozwala minimalizować ryzyko awarii. W rolnictwie natomiast bezzałogowe statki powietrzne wyposażone w kamery multispektralne i systemy analizy danych wspierają koncepcję rolnictwa precyzyjnego, umożliwiając ocenę stanu upraw, optymalizację nawadniania i kontrolę nawożenia (Colomina, Molina, 2014).

Podsumowując, ewolucja UAV w kierunku pełnej autonomii oznacza nie tylko ich rosnące znaczenie w mobilności miejskiej, energetyce i rolnictwie, lecz także rozwój otoczenia regulacyjnego i bezpieczeństwa. Do 2030 roku drony będą funkcjonowały jako samodzielne jednostki zdolne do podejmowania decyzji w ramach złożonych systemów cyber-fizycznych, stając się jednym z fundamentów transformacji technologicznej inteligentnych miast i nowoczesnej infrastruktury.

3.5. Sztuczna inteligencja i systemy sieciowe

Autonomizacja systemów UAV jest silnie uzależniona od wdrażanych rozwiązań wykorzystujących sztuczną inteligencję (AI). Wielu badaczy podkreśla, że rozwój AI i systemów autonomicznych stanowi fundament przyszłości UAV. Algorytmy uczenia maszynowego umożliwiają dronom nie tylko wykonywanie wcześniej zaprogramowanych zadań, lecz także dynamiczne dostosowywanie się do zmiennych warunków otoczenia. Badania pokazują, że AI znacząco podnosi zdolność UAV do podejmowania decyzji w czasie rzeczywistym, co pozwala na skuteczniejsze wykrywanie przeszkód, optymalizację tras lotów oraz realizację zadań inspekcyjnych i logistycznych z niespotykaną dotąd precyzją (Wood, 2015).

Coraz większą rolę odgrywa integracja UAV z systemami sieciowymi, takimi jak 5G czy chmura obliczeniowa. Dzięki temu możliwe jest przesyłanie ogromnych zbiorów danych w czasie rzeczywistym i ich natychmiastowa analiza. Drony wyposażone w AI mogą współdziałać z innymi elementami systemów cyber-fizycznych, np. autonomicznymi wózkami AGV, robotami mobilnymi czy sensorami IoT, co prowadzi do tworzenia w pełni zintegrowanych ekosystemów logistycznych i przemysłowych (Duangsuwan, Prapruetdee, 2024).

Prognozy branżowe potwierdzają, że AI stanie się jednym z kluczowych motorów rozwoju UAV. Według Drone Industry Insights (2025) integracja sztucznej inteligencji z dronami jest wymieniana jako główny czynnik wzrostu w nadchodzącej dekadzie, a rynek rozwiązań UAV opartych na AI będzie charakteryzował się dwucyfrowym tempem wzrostu. Z kolei McKinsey (2024) wskazuje, że rosnąca skala dostaw dronowych wymusi zastosowanie autonomicznych algorytmów zarządzania flotą i trasami, co pozwoli na obsługę milionów zamówień bez konieczności angażowania dodatkowych operatorów.

Również regulatorzy dostrzegają znaczenie AI w rozwoju UAV. Wspomniany już wcześniej raport FAA Aerospace Forecast (2024) zwraca uwagę na konieczność opracowania ram prawnych dla autonomicznych systemów, które w kolejnych latach będą wykonywały loty w przestrzeni powietrznej równolegle z tradycyjnym lotnictwem. AI w dronach nie będzie ograniczać się jedynie do optymalizacji lotu – coraz częściej będzie odpowiadać za

bezpieczeństwo całej misji, w tym wykrywanie cyberzagrożeń i wdrażanie procedur obronnych.

W perspektywie do 2030 roku drony zintegrowane z technologią sztucznej inteligencji (AI) będą zdolne do pełnej autonomii – począwszy od startu i lądowania, przez unikanie kolizji, aż po planowanie misji na podstawie analiz predykcyjnych. Badania sugerują, że UAV będą mogły współdziałać w dużych, skoordynowanych flotach, realizujących jednocześnie różne zadania w logistyce, transporcie czy bezpieczeństwie publicznym (Chung i in., 2018). Ostatecznie to właśnie AI przekształci UAV z narzędzia wspierającego operatora w niezależny podmiot funkcjonujący w złożonym ekosystemie cyber-fizycznym.

3.6. Ewolucja przepisów i regulacji

Rozwój technologii UAV w ostatnich latach znacznie wyprzedził tempo dostosowywania regulacji prawnych, co sprawia, że jednym z kluczowych wyzwań nadchodzącej dekady będzie ustanowienie spójnych i przewidywalnych ram prawnych dla operacji bezzałogowych statków powietrznych. Szczególne znaczenie mają loty poza zasięgiem wzroku operatora (BVLOS), które stanowią podstawę komercjalizacji usług dronowych w logistyce, transporcie i monitoringu infrastruktury. Jak wskazuje Vincent H. Kuo w raporcie NASA Unmanned Aircraft Systems Integration Roadmap (2024), rozwój takich operacji wymaga wprowadzenia ujednoliconych standardów bezpieczeństwa oraz procedur certyfikacyjnych, które umożliwią ich bezpieczne stosowanie w przestrzeni publicznej. Hartley, Henderson i Jackson (2022) zwracają natomiast uwagę na praktyczne wyzwania BVLOS w środowiskach leśnych, akcentując potrzebę dokładnych ram technicznych i regulacyjnych. Ponadto tacy autorzy jak Politi, Varlamis, Tserpes, Larsen i Dimitrakopoulos (2022) podkreślają, że kluczowe dla skalowalności operacji BVLOS są rozwiązania typu cloud-edge computing, które pozwalają na szybkie przetwarzanie danych, obniżenie opóźnień i rozwój nowych usług dronowych.

Brak jednolitych zasad na poziomie międzynarodowym sprawia, że przedsiębiorstwa wdrażające UAV muszą dostosowywać swoje procedury do wielu, często rozbieżnych regulacji, co spowalnia tempo innowacji. W Europie wiodącą rolę pełni EASA, która stopniowo wdraża przepisy dotyczące kategorii operacyjnych UAV, certyfikacji operatorów oraz systemów cyfrowej identyfikacji. Szczególną uwagę zwraca się na rozwój ram dla operacji w tzw. kategorii „specjalnej", obejmującej loty o podwyższonym ryzyku, w tym w przestrzeni miejskiej i w pobliżu infrastruktury krytycznej. Z kolei w Stanach Zjednoczonych FAA Aerospace Forecast (2024) prognozuje szybki wzrost liczby komercyjnych UAV, co wymusza dalszy rozwój systemów certyfikacji oraz integracji dronów z kontrolą ruchu lotniczego (ATM).

Prognozy rynkowe podkreślają, że ewolucja regulacji będzie miała bezpośredni wpływ na tempo rozwoju rynku. Według PwC Drone Powered Solutions (2024) harmonizacja zasad BVLOS i standaryzacja procedur bezpieczeństwa mogą przyczynić się do podwojenia liczby komercyjnych operacji UAV w Europie do końca dekady. Równolegle Drone Industry Insights (2025) wskazuje, że brak spójnych regulacji stanowi jedną z największych barier w globalnej ekspansji UAV, a przyspieszenie prac legislacyjnych będzie warunkiem dalszego wzrostu tego sektora.

W perspektywie do 2030 roku oczekuje się pełnej integracji UAV z systemami zarządzania ruchem lotniczym (UTM – Unmanned Traffic Management). Systemy UTM umożliwią koordynację lotów w czasie rzeczywistym, rejestrację operacji oraz bezpieczną współpracę

dronów z załogowymi statkami powietrznymi. Ich wdrożenie wymaga jednak nie tylko rozwoju technologii, lecz także ścisłej współpracy regulatorów, przemysłu i środowiska naukowego. Ewolucja regulacji UAV powinna być zatem postrzegana nie wyłącznie jako wymóg formalny, ale także jako narzędzie wspierające innowacje i wzmacniające odporność gospodarki na dynamiczne zmiany w obszarze logistyki i transportu.

3.7. Drony jako część krajowego systemu ruchu lotniczego

Jednym z najważniejszych kierunków rozwoju bezzałogowych statków powietrznych (UAV) w perspektywie lat 2025–2030 będzie ich pełna integracja z krajowymi i międzynarodowymi systemami zarządzania przestrzenią powietrzną. Współczesne systemy lotnictwa cywilnego, projektowane pierwotnie z myślą o statkach załogowych, nie są przystosowane do obsługi rosnącej liczby operacji dronowych, które charakteryzują się dużą zmiennością trajektorii, krótkimi cyklami misji i zróżnicowanymi poziomami autonomii. Dynamiczny rozwój sektora UAV wymusza zatem opracowanie nowych narzędzi i architektur zarządzania ruchem powietrznym, które będą w stanie zapewnić bezpieczeństwo, interoperacyjność i płynność operacji w przestrzeni wspólnej.

Naważniejszą rolę w tym procesie odgrywa koncepcja UTM (Unmanned Traffic Management), stanowiąca odpowiednik systemu ATM (Air Traffic Management) dla załogowych statków powietrznych. UTM umożliwia koordynację lotów dronów w czasie rzeczywistym, zapewnia ich identyfikację, monitorowanie oraz bezpieczną integrację z klasycznym ruchem lotniczym. Systemy tego typu opierają się na zaawansowanych algorytmach predykcyjnych, analizie danych przestrzennych i komunikacji o niskim opóźnieniu, co pozwala na dynamiczne reagowanie na zmieniające się warunki lotu.

Badania wskazują, że rozwój UTM wymaga łączenia metod sztucznej inteligencji, komunikacji 5G oraz uczenia maszynowego do prognozowania trajektorii lotów i zapobiegania kolizjom. Modele te umożliwiają tworzenie adaptacyjnych strategii zarządzania ruchem, które dostosowują się do natężenia operacji w przestrzeni powietrznej i warunków środowiskowych. Jak podkreślają Ruseno i Lin (2025), wykorzystanie uczenia maszynowego w systemach UTM pozwala na znaczącą poprawę dokładności prognoz trajektorii UAV oraz redukcję ryzyka incydentów poprzez ciągłe uczenie się systemu na podstawie rzeczywistych danych z operacji lotniczych. Integracja UAV z krajowym systemem zarządzania ruchem lotniczym stanowi więc kluczowy etap w budowie spójnego ekosystemu mobilności powietrznej. W dłuższej perspektywie umożliwi to rozwój usług takich jak transport medyczny, monitorowanie infrastruktury czy dostawy w modelu last mile, przy jednoczesnym zachowaniu wysokich standardów bezpieczeństwa i zgodności regulacyjnej.

W badaniach podkreśla się, że rozwój UTM wymaga zarówno postępu technologicznego, jak i ram prawnych gwarantujących bezpieczeństwo operacji. UAV muszą być zdolne do cyfrowej identyfikacji, komunikacji z innymi uczestnikami przestrzeni powietrznej oraz autonomicznego unikania kolizji. Rozwiązania te coraz częściej opierają się na wykorzystaniu sztucznej inteligencji i sieci 5G, co pozwala na dynamiczną optymalizację tras lotów i szybką reakcję w przypadku nieprzewidzianych zdarzeń. W tym zakresie istotne są również analizy wskazujące na wyzwania technologiczne i regulacyjne związane z przyszłością autonomicznych systemów lotniczych (Wood, 2015).

W Europie EASA już wdraża regulacje dotyczące kategorii operacyjnych UAV i współpracy z systemami zarządzania ruchem lotniczym. Organizacja wskazuje, że do końca dekady

drony będą mogły funkcjonować w ramach zintegrowanych struktur ATM (Air Traffic Management), co pozwoli na ich bezpieczne współistnienie z lotnictwem załogowym. W Stanach Zjednoczonych FAA Aerospace Forecast (2024) przewiduje, że liczba komercyjnych UAV będzie rosła tak dynamicznie, iż opracowanie i wdrożenie UTM stanie się koniecznością w perspektywie kilku lat. Równolegle Drone Industry Insights (2025) zwraca uwagę, że brak jednolitego, globalnego systemu zarządzania ruchem dronów jest obecnie jedną z największych barier w dalszym rozwoju rynku UAV. Raport wskazuje, że bez wprowadzenia zharmonizowanych procedur i technologii interoperacyjnych skala operacji komercyjnych będzie ograniczona, a potencjał UAV nie zostanie w pełni wykorzystany.

W perspektywie do 2030 roku drony staną się integralnym elementem krajowych systemów zarządzania przestrzenią powietrzną. Umożliwi to nie tylko bezpieczne wykonywanie lotów w miastach i nad infrastrukturą krytyczną, lecz także rozwój nowych usług, takich jak transport towarów na duże odległości czy przewozy pasażerskie w ramach Urban Air Mobility. Integracja UAV z ATM i UTM stanie się fundamentem dalszej ekspansji tej technologii, a jej powodzenie będzie zależało od współpracy regulatorów, przemysłu i środowiska naukowego.

3.8. Zaawansowane systemy bezpieczeństwa UAV

Wraz ze wzrostem liczby operacji UAV, zagadnienia związane z bezpieczeństwem nabierają strategicznego znaczenia. Drony są szczególnie narażone na różnego rodzaju zagrożenia, począwszy od awarii technicznych, przez błędy operatorów, aż po celowe ataki cybernetyczne. W literaturze podkreśla się, że systemy bezzałogowe mogą być podatne na przejęcie kontroli, zakłócenia sygnałów GPS czy manipulacje danymi, co w przypadku lotów nad obszarami miejskimi lub infrastrukturą krytyczną stanowi istotne ryzyko dla bezpieczeństwa publicznego (Islam, Mahmoud, Sheltami, 2025; Tsao, Girdler, assilakis, 2022).

Szczególne znaczenie zyskują obecnie rozwiązania wykorzystujące sztuczną inteligencję do wykrywania i zapobiegania cyberatakom. Systemy klasy AI-Enhanced Intrusion Detection Systems (AI-IDS) analizują w czasie rzeczywistym wzorce ruchu sieciowego, dane z czujników oraz komunikację pomiędzy jednostkami UAV, identyfikując anomalie mogące świadczyć o próbie włamania lub przejęcia kontroli. Zastosowanie metod uczenia głębokiego (np. CNN, LSTM czy autoenkoderów) umożliwia znaczące zwiększenie dokładności detekcji przy jednoczesnym ograniczeniu liczby fałszywych alarmów. Coraz większe znaczenie zyskują również zdecentralizowane architektury bezpieczeństwa oparte na uczeniu federacyjnym, które pozwalają na analizę danych bez konieczności ich przesyłania do chmury, co zwiększa prywatność i odporność systemów UAV na cyberzagrożenia.

Oprócz tego prowadzone są intensywne prace nad opracowaniem zintegrowanych mechanizmów ochronnych dla tzw. flying ad-hoc networks (FANETs), w których drony współdziałają w sieciach o dynamicznej topologii. Wymaga to opracowania standardów komunikacji zapewniających integralność, poufność i autentyczność przesyłanych danych. Badania wskazują, że najbardziej efektywne strategie ochrony oparte są na podejściu wielowarstwowym, łączącym klasyczne zabezpieczenia kryptograficzne z adaptacyjnymi systemami AI analizującymi zachowania UAV w czasie rzeczywistym. Integracja tych rozwiązań stanowi kluczowy kierunek rozwoju nowoczesnych systemów bezpieczeństwa UAV, zwiększając ich odporność operacyjną oraz poziom zaufania użytkowników.

Aby ograniczyć te zagrożenia, rozwijane są coraz bardziej zaawansowane rozwiązania technologiczne. Obejmują one szyfrowanie transmisji danych, tworzenie wielowarstwowych systemów autoryzacji, a także algorytmy sztucznej inteligencji zdolne do wykrywania anomalii w czasie rzeczywistym. Wykorzystanie technologii blockchain umożliwia natomiast bezpieczne przechowywanie i weryfikację danych z lotów UAV, zwiększając ich odporność na manipulacje i nieautoryzowane zmiany. Badania wskazują, że takie zintegrowane podejście może znacząco poprawić bezpieczeństwo operacyjne dronów, zmniejszając ryzyko związane z ich eksploatacją w warunkach wysokiego ryzyka (Kumar i in., 2022).

W perspektywie rynkowej bezpieczeństwo UAV staje się również kluczowym elementem otoczenia biznesowego. Według raportu Allied Market Research (2024) globalny rynek ubezpieczeń dronów, obejmujący zarówno ryzyko operacyjne, jak i cybernetyczne, rośnie w tempie dwucyfrowym i do 2030 roku osiągnie wartość kilku miliardów USD. Z kolei analiza Drone Industry Insights (2025) wskazuje, że rozwój systemów przeciwdronowych (Counter-UAS) oraz zabezpieczeń cybernetycznych będzie jednym z najważniejszych motorów inwestycji w sektor UAV w nadchodzącej dekadzie .

Systemy Counter-UAS, bazujące na radarach, czujnikach optycznych i sztucznej inteligencji, stają się nieodłącznym elementem ochrony przestrzeni powietrznej. Ich rola jest szczególnie istotna w sektorach krytycznych, takich jak energetyka, lotniska czy obiekty wojskowe, gdzie obecność nieautoryzowanych UAV mogłaby spowodować poważne zakłócenia. Wdrażane są również technologie zakłócające, m.in. systemy RF jamming, broń mikrofalowa czy drony przechwytujące. Wszystko to pokazuje, że bezpieczeństwo w obszarze UAV ewoluuje w kierunku kompleksowych systemów obronnych, łączących aspekty techniczne, organizacyjne i regulacyjne.

W nadchodzących latach oczekuje się, że standardy międzynarodowe w zakresie cyberbezpieczeństwa i ochrony dronów zostaną ujednolicone. Będzie to konieczne, aby zapewnić interoperacyjność rozwiązań stosowanych w różnych krajach i zwiększyć odporność globalnej przestrzeni powietrznej. W perspektywie do 2030 roku UAV będą nie tylko chronione indywidualnie, lecz także włączane w systemy bezpieczeństwa narodowego i miejskiego, co sprawi, że staną się elementem kompleksowych architektur bezpieczeństwa publicznego.

3.9. Rozwój ciężkich dronów cargo

Rozwój ciężkich dronów cargo stanowi jeden z najbardziej perspektywicznych kierunków rozwoju UAV w nadchodzącej dekadzie. Coraz większe zapotrzebowanie na szybki, elastyczny i zrównoważony transport sprawia, że technologie bezzałogowe są coraz częściej postrzegane jako alternatywa dla tradycyjnych środków logistycznych. W badaniach podkreśla się, że wykorzystanie UAV cargo pozwala na redukcję kosztów operacyjnych, skrócenie czasu dostaw i zwiększenie odporności łańcuchów dostaw w sytuacjach kryzysowych (Zrelli i in., 2024).

Ciężkie drony transportowe, zdolne do przewozu ładunków ważących kilkaset kilogramów, mogą znaleźć zastosowanie w różnych sektorach – od e-commerce, przez energetykę, aż po operacje humanitarne i wojskowe. W literaturze zwraca się uwagę, że w regionach trudno dostępnych lub pozbawionych rozwiniętej infrastruktury drogowej UAV mogą stać się kluczowym elementem zapewniającym ciągłość dostaw krytycznych towarów, takich jak leki czy żywność (Colomina, Molina, 2014). W tym kontekście drony cargo nie tylko zwiększają

elastyczność operacyjną, ale również przyczyniają się do poprawy bezpieczeństwa i redukcji ryzyka w sytuacjach awaryjnych.

Aktualne prognozy branżowe wskazują na dynamiczny rozwój tego segmentu. Według Drone Industry Insights (2025) rynek UAV cargo będzie jednym z najszybciej rosnących sektorów dronowych, napędzanym potrzebami e-commerce i globalnej logistyki . McKinsey (2024) szacuje, że wraz ze wzrostem liczby dostaw dronowych w segmencie konsumenckim pojawi się silny impuls do rozwoju większych jednostek zdolnych do obsługi transportu hurtowego, co umożliwi dalsze skalowanie modeli biznesowych . Równolegle Global Market Insights (2024) oraz Precedence Research (2025) prognozują kilkudziesięcioprocentowe tempo wzrostu dla segmentu Advanced Air Mobility, obejmującego zarówno eVTOL, jak i ciężkie drony cargo, które do 2030 roku osiągną wartość rynkową liczonych w dziesiątkach miliardów USD .

Rozwój ciężkich UAV cargo wiąże się z koniecznością pokonania szeregu wyzwań technologicznych, z których najważniejsze dotyczą opracowania wydajnych systemów napędowych zapewniających odpowiedni udźwig, zasięg i bezpieczeństwo operacji. Coraz większe znaczenie zyskują w tym obszarze napędy hybrydowe oraz ogniwa paliwowe oparte na wodorze, wskazywane jako perspektywiczna alternatywa dla tradycyjnych akumulatorów litowo-jonowych. Badania eksperymentalne potwierdzają, że technologie te mogą znacząco wydłużyć czas lotu i zwiększyć masę możliwego do przeniesienia ładunku (Cardone, Gargiulo, Fornaro, 2021). Równocześnie raport Global Market Insights (2025) prognozuje dynamiczny rozwój segmentu UAV zasilanych ogniwami paliwowymi w latach 2025–2034, wskazując na rosnący popyt na transport bezzałogowy i potrzebę zwiększenia autonomii systemów. Podobne wnioski przedstawia raport firmy Oliver Wyman (2024) – Global Fleet and MRO Market Forecast 2024–2034, który podkreśla, że alternatywne źródła napędu staną się jednym z kluczowych czynników umożliwiających rozwój ciężkich dronów transportowych w perspektywie nadchodzącej dekady.

Równie ważne są wyzwania regulacyjne. FAA Aerospace Forecast w swoim najnowszym raporcie z 2025 wskazuje, że rozwój ciężkich UAV cargo będzie wymagał opracowania nowych standardów certyfikacji oraz dopuszczenia do operacji BVLOS w przestrzeni powietrznej, co stanowi warunek niezbędny dla komercyjnego wdrożenia na dużą skalę. Podobnie EASA zwraca uwagę na potrzebę stworzenia ram prawnych umożliwiających współistnienie ciężkich UAV z tradycyjnym lotnictwem w obszarze transportu regionalnego i miejskiego .

Podsumowując, ciężkie drony cargo mają potencjał, by zrewolucjonizować globalny rynek transportowy, skracając czas dostaw i zwiększając elastyczność logistyczną w skali, której nie mogą zapewnić konwencjonalne systemy. Kluczowe dla ich sukcesu będzie jednak połączenie postępu technologicznego w obszarze napędów alternatywnych, rozwoju regulacji dopuszczających do operacji BVLOS oraz dalszej integracji z systemami UTM i logistycznymi platformami cyfrowymi. W perspektywie do 2030 roku UAV cargo mogą stać się jednym z filarów inteligentnej logistyki i globalnych łańcuchów dostaw, redefiniując sposób przemieszczania towarów na świecie.

3.10. UAV w sektorze MRO (Maintenance, Repair & Overhaul)

Branża Maintenance, Repair & Overhaul (MRO) odgrywa fundamentalną rolę w globalnym lotnictwie cywilnym i wojskowym, zapewniając ciągłość eksploatacji floty i bezpieczeństwo

operacji. Jej znaczenie stale rośnie wraz ze wzrostem liczby statków powietrznych i intensywnością ruchu lotniczego. Każda godzina uziemienia samolotu (AOG – Aircraft on Ground) generuje dla linii lotniczych koszt sięgający nawet 150 000 USD (Team Worldwide, 2021; IAG Cargo, 2021), co czyni szybkość i efektywność procesów serwisowych jednym z kluczowych czynników konkurencyjności rynku.

Skala rynku MRO dowodzi, że jest to obszar o ogromnym potencjale wdrożeń technologicznych. Według danych Grand View Research (2024) globalny rynek MRO osiągnął wartość 90,85 mld USD i do 2030 roku wzrośnie do 120,96 mld USD, przy średniorocznym tempie wzrostu CAGR na poziomie 4,75%. Oliver Wyman – renomowana międzynarodowa firma doradcza specjalizująca się w analizach strategicznych i sektorowych – prognozuje, że globalny rynek obsługi technicznej i remontów (MRO) w lotnictwie osiągnie wartość 124 mld USD do 2034 roku, przy czym głównym czynnikiem wzrostu będzie rosnąca flota komercyjna, która w tym okresie ma się powiększyć do około 36 400 statków powietrznych (Oliver Wyman, 2024). Prognozy te wskazują jednoznacznie na systematyczny wzrost zapotrzebowania na usługi serwisowe w lotnictwie cywilnym. W tym kontekście innowacyjne technologie – w szczególności wykorzystanie bezzałogowych statków powietrznych (UAV) w procesach inspekcji i utrzymania – staną się kluczowym narzędziem umożliwiającym zwiększenie efektywności, redukcję kosztów oraz podniesienie poziomu bezpieczeństwa.

Presję ekonomiczną i organizacyjną branży MRO potwierdzają również wypowiedzi liderów sektora, publikowane w mediach branżowych. Thomas Böttger, wiceprezes ds. zakupów korporacyjnych w Lufthansa Technik, w rozmowie z Aviation Business News podkreślał, że zakłócenia w globalnych łańcuchach dostaw wymusiły zwiększanie stanów magazynowych jako bufora wobec wydłużonych czasów realizacji zamówień (Aviation Business News, 2023). Podobny problem sygnalizowała Anne Brachet, EVP Air France Industries KLM Engineering & Maintenance, która w Aviation Week zwracała uwagę, że ograniczona dostępność części zamiennych wymusza rozwój zdolności naprawczych, aby utrzymać ciągłość obsługi floty (Aviation Week, 2025). Z kolei Robert Isom, CEO American Airlines, w wywiadzie dla Live and Let's Fly przyznał, że przewoźnik został zmuszony do dodawania buforów czasowych do rozkładów lotów („schedule padding"), aby ograniczyć skutki opóźnień i niestabilności operacyjnej (Live and Let's Fly, 2024). Wypowiedzi te jednoznacznie wskazują, że tradycyjne modele inspekcji i serwisu nie odpowiadają na skalę wyzwań, a branża potrzebuje innowacyjnych rozwiązań opartych na automatyzacji i cyfryzacji procesów. Głosy te jasno pokazują, że tradycyjne modele inspekcji i serwisu nie są wystarczające, a branża potrzebuje innowacyjnych rozwiązań, które skrócą czas obsługi i zredukują ryzyko błędów.

Bezzałogowe statki powietrzne (UAV) stanowią odpowiedź na te wyzwania. Wyposażone w kamery wysokiej rozdzielczości, czujniki multispektralne i algorytmy sztucznej inteligencji, drony mogą przeprowadzać szybkie i precyzyjne inspekcje poszycia, skrzydeł czy usterzeń konstrukcyjnych. Pozwala to na ograniczenie czasu potrzebnego na przeglądy, zwiększenie obiektywności inspekcji oraz redukcję ryzyka wynikającego z czynnika ludzkiego (Ali i in., 2025; Shafi, Khan, Mahmood i in., 2023). Dane zbierane w ten sposób mogą być automatycznie przesyłane do systemów zarządzania utrzymaniem floty (Maintenance Information Systems), co umożliwia wdrożenie koncepcji predictive maintenance (Plastropoulos, Zolotas, Avdelidis (2024).

Co istotne, dynamicznie rozwija się również sam segment UAV w obszarze MRO. Według Market Research Future rynek inspekcji lotniczych realizowanych przez drony osiągnął

wartość 2,27 mld USD w 2023 roku, a do 2032 roku ma wzrosnąć do 5,8 mld USD, co oznacza bardzo wysokie tempo rozwoju w porównaniu z ogólnym rynkiem MRO. Z kolei Drone Industry Insights (2025) wskazuje, że inspekcje dronowe i cyfryzacja procesów serwisowych będą jednymi z najważniejszych czynników transformacji MRO w nadchodzącej dekadzie. Wynika to z coraz szerszego zastosowania algorytmów głębokiego uczenia oraz rozwiązań opartych na analizie obrazów i danych w czasie rzeczywistym, co znajduje potwierdzenie w badaniach nad automatycznym wykrywaniem defektów w lotnictwie (Lyu, Zhang, Sun, Zhao, 2025).

Biorąc to pod uwagę, UAV w sektorze MRO nie są już wyłącznie perspektywą badawczą, lecz stają się kluczowym trendem rynkowym i technologicznym. Rosnące koszty przestojów, presja regulacyjna oraz braki kadrowe w branży sprawiają, że automatyzacja inspekcji i cyfryzacja procesów utrzymania stają się niezbędne. Do 2030 roku drony mogą stać się standardowym narzędziem warsztatów serwisowych i centrów MRO, umożliwiając przejście od manualnych przeglądów do zintegrowanego modelu predictive maintenance, co przełoży się na większe bezpieczeństwo, niższe koszty i wyższą efektywność globalnego lotnictwa.

Podsumowanie

Analiza trendów w branży UAV jednoznacznie wskazuje, że w perspektywie lat 2025–2030 bezzałogowe statki powietrzne staną się technologią powszechną, obecną w niemal każdym aspekcie naszego życia społecznego i gospodarczego. Ich zastosowania nie będą ograniczać się jedynie do sektorów specjalistycznych, takich jak logistyka, rolnictwo precyzyjne czy bezpieczeństwo publiczne, lecz obejmą także codzienne aktywności związane z transportem, dostawami czy inspekcjami infrastruktury. Z jednej strony sprzyja temu nieustanny rozwój technologii, a z drugiej – systematyczny spadek kosztów produkcji i eksploatacji UAV. Wraz z rosnącą skalą produkcji oraz dojrzewaniem globalnych łańcuchów dostaw ceny dronów i usług opartych na ich wykorzystaniu będą sukcesywnie maleć, czyniąc je rozwiązaniem dostępnym dla szerokiego grona użytkowników (Ali i in., 2025; Shafi, Khan, Mahmood i in., 2023).

W rezultacie UAV przestaną być postrzegane jako nowinka technologiczna, a staną się nieodzownym narzędziem w gospodarce cyfrowej i zrównoważonej przyszłości. Ich dalszy rozwój będzie napędzany przez sztuczną inteligencję, gospodarkę wodorową i automatyzację procesów serwisowych (Plastropoulos, Zolotas, Avdelidis 2024; Lyu, Zhang, Sun, Zhao, 2025). W tym kontekście UAV stanowią jedno z najważniejszych ogniw transformacji przemysłowej i środowiskowej, wspierając realizację celów zrównoważonego rozwoju w sektorach transportu, logistyki i lotnictwa.

ROZDZIAŁ 4

ODPORNOŚĆ SYSTEMÓW AUTOMATYCZNEJ IDENTYFIKACJI DANYCH Z WYKORZYSTANIEM DRONÓW W ŚWIETLE BADAŃ LITERATURY

4.1. Wprowadzenie i cel rozdziału

Opracowanie innowacyjnego podejścia do oceny odporności systemów UAV_AutoID wymaga przeprowadzenia badań nie tylko w zakresie rozwoju systemów UAV ale również samej koncepcji odporności systemów technicznych. Z tego też względu celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie koncepcji odporności systemów automatycznej identyfikacji danych (Auto-ID) z wykorzystaniem dronów w ujęciu teoretycznym, ze szczególnym uwzględnieniem przeglądu literatury. Analiza dostępnych badań pozwala na określenie podstawowych definicji, klasyfikacji oraz modeli odporności, które stanowią fundament dla późniejszych

rozważań dotyczących budowy i oceny systemów UAV–AutoID.

Odporność (resilience) systemów technicznych coraz częściej postrzegana jest w literaturze jako pojęcie nadrzędne względem tradycyjnych kategorii niezawodności i bezpieczeństwa. Podczas gdy klasyczne podejście do niezawodności koncentruje się na unikaniu awarii i zapewnieniu ciągłości działania, koncepcja odporności wykracza poza te ramy, obejmując zdolność systemu do zachowania podstawowej funkcjonalności w obliczu zakłóceń oraz do adaptacji w dynamicznie zmieniającym się otoczeniu (Hollnagel, Pariès, Woods, Wreathall, 2011; Leveson, 2011). Szczególnie podkreśla się tutaj rolę czterech fundamentalnych zdolności systemu: reagowania, monitorowania, przewidywania i uczenia się, które stanowią fundament resilience engineering (Hollnagel, Woods, Leveson, 2006).

W odniesieniu do systemów UAV–AutoID pojęcie odporności nabiera wyjątkowego znaczenia. Wynika to z faktu, że bezzałogowe statki powietrzne stosowane w procesach automatycznej identyfikacji funkcjonują w środowiskach magazynowych i przemysłowych, które charakteryzują się dużą dynamiką, zmiennością warunków eksploatacyjnych oraz obecnością zakłóceń o charakterze zarówno deterministycznym, jak i stochastycznym. Zakłócenia te mogą obejmować interferencje elektromagnetyczne, ograniczoną przestrzeń manewrową, zmienne warunki oświetleniowe, obecność przeszkód fizycznych oraz obecność ludzi i innych urządzeń w strefie pracy. W takich warunkach tradycyjne podejście oparte wyłącznie na analizie niezawodności poszczególnych komponentów okazuje się niewystarczające, a potrzebne jest ujęcie systemowe, pozwalające na integrację czynników technicznych, organizacyjnych i środowiskowych.

W dotychczasowej literaturze dotyczącej systemów logistycznych i przemysłowych podkreśla się, że odporność stanowi element komplementarny wobec klasycznych pojęć niezawodności i bezpieczeństwa. Badania prowadzone przez Nowakowskiego, Tubis i Werbińską-Wojciechowską (2016) wskazują, że analiza odporności musi uwzględniać zarówno podatność systemu (vulnerability), jak i jego zdolność do regeneracji i adaptacji w obliczu zakłóceń. Autorzy ci wykazali, że odporność w systemach logistycznych nie może być rozpatrywana wyłącznie w wymiarze technicznym, lecz musi obejmować także aspekty organizacyjne i procesowe. Wnioski te znajdują bezpośrednie zastosowanie w kontekście

UAV–AutoID, które funkcjonują jako elementy większych systemów logistycznych i cyber-fizycznych.

Jednym z istotnych kierunków badań nad odpornością systemów technicznych jest koncepcja przedstawiona przez Woodsa (2015), w której wyróżniono cztery archetypy odporności: reakcję, monitorowanie, uczenie się i adaptację. W podejściu tym szczególną uwagę zwraca się na zdolność systemu do tzw. graceful extensibility – czyli rozszerzania swoich granic operacyjnych w sytuacjach kryzysowych – oraz sustained adaptability, rozumianą jako długofalową zdolność do dostosowywania się do zmieniających się warunków. Dla systemów UAV–AutoID oznacza to konieczność nie tylko bieżącego reagowania na zakłócenia, ale także wdrażania mechanizmów uczenia się i długoterminowej adaptacji na podstawie wcześniejszych doświadczeń.

Natomiast badania Wielanda i Duracha (2021) wskazują, że odporność systemów logistycznych należy postrzegać w dwóch wymiarach: zdolności do przetrwania zakłóceń oraz zdolności do adaptacji i transformacji. Perspektywa ta jest szczególnie cenna dla systemów UAV–AutoID, które nie tylko muszą wykazywać odporność operacyjną w czasie rzeczywistym, ale także podlegać ciągłemu doskonaleniu i ewolucji w odpowiedzi na nowe warunki środowiskowe i technologiczne.

Struktura niniejszego rozdziału została zaplanowana tak, aby zapewnić logiczną progresję od ogólnych koncepcji odporności do ich zastosowania w kontekście UAV–AutoID. Najpierw przedstawione zostaną podstawowe definicje i ujęcia odporności w literaturze, ze szczególnym uwzględnieniem podziału na odporność funkcjonalną i strukturalną, a także na podejścia oparte na inżynierii odporności. Następnie zaprezentowane zostaną modele odporności w systemach antropotechnicznych, w których UAV stanowią element większych układów człowiek–technologia. Analiza ta uwzględniać będzie nie tylko aspekty techniczne, ale również organizacyjne i ludzkie, zgodnie z założeniami Resilience Engineering (Hollnagel, Pariès, Woods, Wreathall, 2011). Podrozdziały te stworzą podstawę do dalszej analizy, w której szczególną rolę odegra ocena ryzyka – traktowana jako mechanizm kształtowania odporności poprzez identyfikację zagrożeń, przewidywanie scenariuszy awarii oraz przygotowanie strategii reakcji i adaptacji.

Podsumowując, niniejsze wprowadzenie stanowi uzasadnienie dla wyboru podejścia odpornościowego jako ramy teoretycznej pracy. Koncepcje rozwinięte przez Hollnagela, Leveson, Woodsa i Nowakowskiego, a także nowsze ujęcia z literatury logistycznej i inżynierii systemów, pozwalają na przyjęcie szerokiej perspektywy, w której odporność systemów UAV–AutoID rozumiana jest nie tylko jako cecha techniczna, ale jako właściwość emergentna całego systemu, wynikająca ze współdziałania komponentów technicznych, organizacyjnych i ludzkich (Nowakowski, Tubis, Werbińska-Wojciechowska, 2016; Woods, 2015; Wieland, Durach, 2021).

4.2. Koncepcje odporności – odporność funkcjonalna i strukturalna

W literaturze dotyczącej systemów technicznych i organizacyjnych odporność definiowana jest na wiele sposobów, co odzwierciedla złożoność tego pojęcia. Madni i Jackson (2009) określają odporność jako zdolność systemu do absorpcji zakłóceń, adaptacji do zmiennych warunków i utrzymania podstawowych funkcji w obliczu zdarzeń niepożądanych. Definicja ta dobrze oddaje istotę badań nad systemami UAV–AutoID, w których zakłócenia mogą występować zarówno na poziomie technicznym (np. awarie UAV, sensory, komunikacja), jak

i procesowym (procedury inwentaryzacyjne). Z kolei Hollnagel, Pariès, Woods, Wreathall (2011) podkreślą, że odporność to wewnętrzna zdolność systemu do przygotowania się, przetrwania i odtworzenia funkcji w warunkach niepewności – co w pełni koresponduje z kontekstem pracy doktorskiej, gdzie system UAV–AutoID działa w zmiennym i często nieprzewidywalnym środowisku magazynowym. Patriarca, Bergström, Di Gravio, Costantino (2018) idą o krok dalej, wskazując na dynamiczny charakter odporności, rozumianej jako właściwość systemu pozwalająca przewidywać potencjalne zagrożenia i proaktywnie dostosowywać sposób działania. To podejście znajduje bezpośrednie odzwierciedlenie w proponowanej metodzie M-UAV, która zakłada aktywne zarządzanie ryzykiem i uczenie się na podstawie wcześniejszych doświadczeń, a nie jedynie bierną reakcję na awarie.

Punktem wyjścia dla prowadzonych badań jest odporność systemów technicznych, która jest pojęciem wielowymiarowym, obejmującym szereg kluczowych cech i zdolności. W literaturze przedmiotu wskazuje się na następujące podstawowe aspekty odporności systemów technicznych:

- **Zdolność do absorpcji zakłóceń.** Odporność oznacza zdolność systemu technicznego do pochłaniania zakłóceń i kontynuowania działania. Obejmuje to zarówno odporność na zdarzenia mogące powodować uszkodzenia, jak i umiejętność odzyskiwania funkcji po wystąpieniu awarii (Woods, 2015).
- **Odzyskiwanie i adaptacja.** Odporność nie sprowadza się wyłącznie do przetrwania zakłóceń, lecz obejmuje także zdolność do odtwarzania funkcjonowania oraz adaptacji do zmieniających się warunków. Oznacza to, że po zakłóceniu system może powrócić do normalnego lub akceptowalnego poziomu operacyjnego (Fraccascia, Giannoccaro, Albino, 2018).
- **Niezawodność, podatność na utrzymanie i dostępność.** Parametry te stanowią istotne kryteria oceny odporności systemów technicznych. *Niezawodność* odnosi się do zdolności systemu do działania bez awarii, *podatność na utrzymanie* – do łatwości przeprowadzania napraw i przywracania sprawności, natomiast *dostępność* – do stopnia, w jakim system pozostaje operacyjny i dostępny w momencie zapotrzebowania (Sagharidooz i in., 2024).
- **Funkcjonowanie systemu w warunkach obciążenia.** Odporność obejmuje również efektywność działania systemu podczas i po wystąpieniu potencjalnie niebezpiecznych lub zakłócających zdarzeń. Oznacza to konieczność utrzymania kluczowych funkcji i usług nawet w sytuacji częściowej utraty sprawności poszczególnych elementów (Hollnagel, Pariès, Woods, Wreathall, 2011).
- **Współzależności i integracja systemów.** Odporność systemów technicznych wymaga uwzględniania i zarządzania współzależnościami pomiędzy różnymi infrastrukturami, takimi jak systemy wodociągowe, energetyczne, telekomunikacyjne czy transportowe. Skuteczne strategie odpornościowe powinny obejmować planowanie tych powiązań i zapobieganie kaskadowym skutkom zakłóceń w jednym systemie na pozostałe (Rinaldi, Peerenboom, Kelly, 2001).
- **Miary ilościowe i jakościowe.** W literaturze proponowane są różnorodne metody i ramy oceny odporności. Obejmują one zarówno klasyczne wskaźniki, takie jak *średni czas między awariami* (MTBF) czy *średni czas naprawy* (MTTR), jak i bardziej złożone modele, które uwzględniają dynamiczny i probabilistyczny charakter

działania systemu w warunkach scenariuszy wielozagrożeniowych (Francis, Bekera, 2014).

- **Projektowanie i zarządzanie systemami.** Budowanie odporności wymaga integracji procesów technicznych i zarządczych. Obejmuje to projektowanie systemów zdolnych do adaptacji i odbudowy po zakłóceniach, a także wdrażanie skutecznych strategii zarządzania ryzykiem i utrzymania technicznego (Hollnagel, Pariès, Woods, Wreathall, 2011).

W literaturze coraz częściej wskazuje się także na konieczność różnicowania odporności na wymiary strukturalne i funkcjonalne. Odporność strukturalna odnosi się do konstrukcji systemu i jego architektury technicznej – obejmuje takie elementy, jak redundancja komponentów, modularność, separacja funkcjonalna podsystemów, czy możliwość szybkiej wymiany uszkodzonych części. W kontekście UAV–AutoID oznacza to m.in. redundancję zasilania, wielotorowe systemy komunikacji czy modułowe układy sensoryczne, które zwiększają szansę utrzymania stabilności działania w przypadku awarii jednego z podsystemów (Leveson, 2011; Nowakowski, Tubis, Werbińska-Wojciechowska, 2016).

Z kolei odporność funkcjonalna dotyczy zdolności systemu do podtrzymania kluczowych procesów operacyjnych mimo wystąpienia zakłóceń. W praktyce UAV–AutoID oznacza to np. przełączanie pomiędzy różnymi algorytmami identyfikacji danych, reorganizację misji w przypadku utraty sygnału GPS czy adaptację parametrów lotu przy zmiennych warunkach oświetleniowych. Ten wymiar odporności zakłada nie tylko stosowanie procedur awaryjnych, ale również aktywne wykorzystanie inteligentnych mechanizmów reagowania i uczenia się (Hollnagel, Pariès, Woods, Wreathall, 2011; Woods, 2015).

W systemach UAV–AutoID oba podejścia – strukturalne i funkcjonalne – muszą być analizowane łącznie, aby uchwycić pełną złożoność tych systemów. Nawet najbardziej redundandny system techniczny nie zapewni stabilności, jeśli oprogramowanie nie będzie zdolne do dynamicznej rekonfiguracji misji. Z kolei zdolności adaptacyjne wymagają solidnych fundamentów technicznych, które umożliwiają ich realizację. Jak wskazują Patriarca, Bergström, Di Gravio, Costantino (2018) oraz Tubis, Poturaj, Dereń, Żurek (2024), skuteczne zarządzanie odpornością musi obejmować jednocześnie projektowanie techniczne, rozwój algorytmów sterowania i integrację z procedurami organizacyjnymi.

Przykłady z sektora lotniczego dobrze ilustrują potrzebę łączenia obu wymiarów: redundancja systemów sterowania i nawigacji (odporność strukturalna) uzupełniana jest symulacjami i procedurami testów w warunkach zakłóceń (odporność funkcjonalna). Podobne rozwiązania można przenieść na grunt UAV–AutoID, gdzie redundancja systemu wizyjnego powinna iść w parze z adaptacyjnymi algorytmami analizy obrazu. Badania nad systemami krytycznymi, takimi jak infrastruktura transportowa czy energetyczna, wskazują, że efektywna odporność jest zawsze wynikiem synergii obu wymiarów, a nie ich niezależnego rozwoju (Wieland, Durach, 2021; Hollnagel, Pariès, Woods, Wreathall, 2011).

Podsumowując, zestawienie odporności funkcjonalnej i strukturalnej prowadzi do wniosku, że krytycznym warunkiem zapewnienia stabilności działania systemów UAV–AutoID jest skuteczna identyfikacja zagrożeń, przewidywanie scenariuszy awarii i wdrażanie strategii reakcji. Integracja obu wymiarów w praktyce oznacza połączenie perspektywy technicznej (projektowanie i redundancja) z organizacyjną (adaptacja i zarządzanie procesami). Coraz częściej w literaturze podkreśla się, że odporność powinna być traktowana jako rozszerzenie klasycznego zarządzania ryzykiem, obejmujące zarówno twarde aspekty konstrukcyjne, jak i miękkie elementy procesowe oraz kompetencje ludzkie (Nowakowski, Tubis, Werbińska-

Wojciechowska (2016); Tubis, Poturaj, Dereń, Żurek (2024). W związku z powyższym w prowadzonych rozważaniach i prezentowanych wynikach przyjęto następującą definicję odporności.

Odporność systemu UAV–AutoID to jego zdolność do utrzymania ciągłości działania i podstawowych funkcji identyfikacyjnych w warunkach zakłóceń technicznych, procesowych i środowiskowych poprzez integrację wymiaru strukturalnego (architektura i redundancja techniczna) oraz funkcjonalnego (adaptacja, rekonfiguracja i uczenie się), a także powiązanie tych działań z organizacyjnymi procedurami zarządzania ryzykiem.

4.3. Modelowanie odporności w systemach antropotechnicznych

W literaturze dotyczącej systemów technicznych i organizacyjnych podkreśla się konieczność różnicowania odporności na wymiary strukturalne i funkcjonalne. Odporność strukturalna odnosi się do architektury technicznej systemu i rozwiązań projektowych, takich jak redundancja komponentów, modularność czy separacja funkcjonalna podsystemów, które zwiększają trwałość i zdolność do przetrwania zakłóceń (Leveson, 2011; Nowakowski, Tubis, Werbińska-Wojciechowska, 2016). Z kolei odporność funkcjonalna dotyczy utrzymania procesów operacyjnych mimo wystąpienia zaburzeń – oznacza zdolność adaptacji, rekonfiguracji i uczenia się w dynamicznie zmieniającym się środowisku (Hollnagel, Pariès, Woods, Wreathall, 2011; Woods, 2015).

Systemy UAV–AutoID należy traktować jako układy cyber-socjo-techniczne, w których komponenty technologiczne (platforma UAV, sensory, moduły komunikacyjne) ściśle współdziałają z człowiekiem i procedurami organizacyjnymi. Takie konfiguracje cechuje wysoka złożoność oraz podatność na dynamiczne zakłócenia, których skutki trudno przewidzieć za pomocą klasycznych metod niezawodnościowych (Roe, Schulman, 2008; Francis, Bekera, 2014). W praktyce oznacza to, że redundancja sprzętowa (odporność strukturalna) musi być powiązana z elastycznymi procedurami operacyjnymi i inteligentnym oprogramowaniem (odporność funkcjonalna), a całość wspierana przez kulturę bezpieczeństwa i zarządzanie ryzykiem.

W systemach UAV–AutoID integracja obu wymiarów odporności – strukturalnego i funkcjonalnego – jest kluczowa, ponieważ pozwala uchwycić pełną złożoność interakcji człowiek–technologia–organizacja. Tylko takie podejście umożliwia tworzenie modeli odporności, które odpowiadają rzeczywistym warunkom przemysłowym. W niniejszej rozprawie odporność systemów UAV–AutoID rozumiana jest zatem jako zdolność cyber-socjo-technicznego systemu do utrzymania ciągłości działania mimo wystąpienia zakłóceń technicznych, procesowych i środowiskowych, poprzez połączenie architektury technicznej, adaptacyjnych algorytmów oraz procedur organizacyjnych (Patriarca, Bergström, Di Gravio, Costantino (2018); Tubis, Poturaj, Dereń, Żurek, 2024).

W ujęciu cyber-socjo-technicznym odporność systemu nie jest prostą sumą cech jego elementów, lecz właściwością emergentną, wynikającą ze współdziałania operatorów, algorytmów sterujących, infrastruktury technicznej oraz warunków środowiskowych. Oznacza to, że analiza ograniczona do pojedynczego komponentu nie oddaje faktycznego poziomu odporności – konieczne jest badanie relacji między nimi, a także ocena zdolności całego układu do adaptacji w warunkach zakłóceń. W literaturze akcentuje się potrzebę uwzględniania odporności organizacyjnej, rozumianej jako zdolność procedur i struktur

zarządzania do wspierania operatorów w radzeniu sobie z nieprzewidywalnymi sytuacjami (Haimes, 2009; Madni, Jackson, 2009).

Jednym z kluczowych nurtów w analizie systemów cyber-socjo-technicznych jest inżynieria odporności (Resilience Engineering). Koncepcja ta zakłada, że efektywność systemu zależy od jego zdolności do elastycznego reagowania, uczenia się na podstawie doświadczeń oraz prognozowania nowych zagrożeń na podstawie dostępnych danych. Woods (2015) wyróżnił cztery podstawowe zdolności systemu: reakcję, monitorowanie, prognozowanie i uczenie się. W przypadku UAV–AutoID przekłada się to m.in. na zdolność drona do zmiany trajektorii w razie pojawienia się przeszkody, ciągłe monitorowanie jakości sygnału transmisyjnego, przewidywanie przeciążeń w ruchu magazynowym oraz modyfikację algorytmów identyfikacji danych na podstawie wcześniejszych błędów.

Rozszerzając tę perspektywę, badacze wskazują, że adaptacyjność musi być rozpatrywana nie tylko w odniesieniu do samych platform technicznych, lecz także w kontekście procedur i działań operatorów, którzy wspólnie z technologią tworzą układ cyber-socjo-techniczny zdolny do odzyskiwania sprawności i zapewnienia ciągłości działania (Boin, Van Eeten, 2013; Hosseini, Barker, Ramirez-Marquez 2016).

Kolejnym istotnym narzędziem modelowania odporności antropotechnicznych jest Functional Resonance Analysis Method (FRAM) opracowana przez Hollnagela (2012). FRAM bazuje na założeniu, że systemy złożone funkcjonują dzięki współdziałaniu wielu powiązanych funkcji, a ich rzeczywista praca często odbiega od modelu nominalnego. Metoda ta pozwala zidentyfikować miejsca, w których drobne odchylenia mogą prowadzić do efektu rezonansu funkcjonalnego, czyli do nieproporcjonalnego wzrostu zakłóceń w całym systemie. W odniesieniu do UAV–AutoID oznacza to analizę, w jaki sposób zakłócenie w pracy modułu skanera, opóźnienie w komunikacji lub błąd operatora mogą rozprzestrzenić się na inne obszary, prowadząc do zaburzenia całego procesu identyfikacji. Zaletą FRAM jest możliwość wizualizacji i modelowania tych powiązań, co wspiera projektowanie systemów bardziej odpornych na błędy i awarie (Hollnagel, 2012; Patriarca, Bergström, Di Gravio, Costantino, 2018).

Przykłady badań empirycznych wskazują, że łączenie Resilience Engineering z metodą FRAM umożliwia tworzenie realistycznych modeli systemów złożonych, które uwzględniają zarówno czynniki techniczne, jak i ludzkie (Hollnagel, Woods, Leveson, 2006). W kontekście UAV oznacza to możliwość modelowania nie tylko zachowania samego drona, ale także interakcji z operatorem i otoczeniem, co znacząco zwiększa wartość predykcyjną analizy. Takie podejście pozwala zidentyfikować tzw. punkty krytyczne – funkcje lub zależności, które w największym stopniu determinują zdolność systemu do utrzymania działania w warunkach zakłóceń (Hosseini, Barker, Ramirez-Marquez, 2016).

Zintegrowane zastosowanie FRAM i Resilience Engineering znajduje praktyczne zastosowanie w analizie systemów krytycznych, takich jak infrastruktura energetyczna, systemy medyczne czy transport lotniczy. W obszarze UAV coraz częściej wykorzystuje się je do badania operacji wielodronowych, zautomatyzowanej logistyki magazynowej oraz monitorowania przestrzeni powietrznej, co jest zgodne z koncepcją projektowania systemów odpornych poprzez adaptację (Fiksel, 2015). Wyniki tych badań wskazują, że narzędzia wywodzące się z analizy ryzyka i niezawodności można skutecznie zaadaptować do potrzeb UAV–AutoID, gdzie integracja człowieka i technologii generuje nowe typy zakłóceń, trudne do uchwycenia przy użyciu tradycyjnych metod oceny.

Uzupełnieniem podejścia Resilience Engineering jest model odporności opracowany przez Yossiego Sheffiego w pracy The Resilient Enterprise: Overcoming Vulnerability for Competitive Advantage (2007). Autor, analizując złożone łańcuchy dostaw, wyróżnił cztery etapy zarządzania odpornością: gotowość, reakcję, odnowę i adaptację. Choć model ten powstał w kontekście logistyki, jego struktura znajduje bezpośrednie zastosowanie w systemach UAV–AutoID. Gotowość odpowiada projektowaniu architektury systemu i planowaniu misji, reakcja obejmuje działania awaryjne podczas zakłóceń, odnowa oznacza przywrócenie ciągłości procesu identyfikacji, natomiast adaptacja wiąże się z długofalowym uczeniem się systemu i jego użytkowników.

Włączenie modelu Sheffiego do analizy UAV–AutoID podkreśla, że odporność tych systemów należy traktować jako proces ciągły, obejmujący zarówno wymiar techniczny, jak i organizacyjny. Takie podejście jest spójne z koncepcją Resilience Engineering i metodyką FRAM, które akcentują konieczność ciągłego monitorowania, reagowania i doskonalenia w dynamicznie zmieniającym się środowisku operacyjnym.

Podsumowując, modelowanie odporności w układach antropotechnicznych pozwala spojrzeć na UAV–AutoID jako na system, którego stabilność działania wynika z interakcji pomiędzy komponentami technicznymi, organizacyjnymi i ludzkimi. Odporność jawi się tutaj jako efekt emergentny, niemożliwy do pełnego uchwycenia przy zastosowaniu klasycznych modeli niezawodności. Integracja podejść takich jak Resilience Engineering i FRAM z analizą ryzyka tworzy podstawę do opracowania narzędzi umożliwiających nie tylko opis systemu, lecz także jego usprawnianie i adaptację w odpowiedzi na nowe zagrożenia.

ROZDZIAŁ 5

IDENTYFIKACJA LUKI BADAWCZEJ, CEL I ZAKRES PRACY

5.1. Tło badawcze

W literaturze wskazuje się na liczne źródła zaburzeń wpływających na działanie UAV w przestrzeniach zamkniętych, takie jak zakłócenia sygnału GPS, interferencje elektromagnetyczne, ograniczenia w widoczności znaczników, refleksy świetlne, zmienne warunki oświetleniowe, turbulencje powietrza czy błędy transmisji danych. Systemy bezzałogowe w takich środowiskach są szczególnie podatne na zakłócenia deterministyczne i stochastyczne, które mogą skutkować destabilizacją trajektorii, błędną akwizycją danych lub całkowitą utratą zdolności operacyjnej. W kontekście UAV–AutoID problemy te mają bezpośrednie przełożenie na jakość i ciągłość procesów identyfikacji zasobów w czasie rzeczywistym (Tubis, Poturaj, Dereń i Żurek, 2024).

Systemy UAV–AutoID wymagają zatem projektowania komponentów odpornych na dynamicznie zmieniające się warunki eksploatacyjne. Szczególne znaczenie mają rozwiązania w zakresie stabilizacji lotu, redundancji sensorycznej oraz wielokanałowej transmisji danych, które umożliwiają utrzymanie spójności procesów Auto-ID nawet w warunkach wieloczynnikowych zakłóceń. W literaturze wskazuje się, że jednym z największych wyzwań pozostaje integracja modułów sterowania, lokalizacji i przetwarzania danych w czasie rzeczywistym w sposób zapewniający niezawodność i bezpieczeństwo systemu (D'Andrea, 2012; Madni, Jackson, 2009).

Tubis, Poturaj, Dereń i Żurek (2024) dokonali klasyfikacji typów ryzyk oraz problemów eksploatacyjnych charakterystycznych dla środowisk przemysłowych, w których wdrażane są autonomiczne drony. Ich analiza wskazuje, że odporność systemu musi obejmować nie tylko aspekt techniczny, ale również organizacyjny i procesowy, a kluczowym czynnikiem jest identyfikacja scenariuszy krytycznych. Tego typu podejście pozostaje w zgodzie z nurtem system safety engineering, gdzie odporność (resilience) traktowana jest jako kategoria nadrzędna wobec klasycznej niezawodności, obejmująca interakcje pomiędzy komponentami i emergentne właściwości systemów złożonych (Haimes, 2009; Hollnagel, Pariès, Woods, Wreathall, 2011; Leveson, 2011).

Badania Amukele i in. (2017) nad transportem próbek medycznych z użyciem dronów podkreślają wagę precyzyjnej kalibracji sensorów, redundancji kanałów komunikacyjnych i predykcji błędów środowiskowych. Wnioski te mają bezpośrednie zastosowanie w UAV–AutoID, gdzie warunki hal magazynowych – ograniczona przestrzeń, obecność przeszkód, zakłócenia akustyczne i elektromagnetyczne, zdywersyfikowane oświetlenie – tworzą złożone środowisko eksploatacyjne. Podobnie inni badacze (Akram, Kocabas, Dagdeviren 2025) wykazują, że w logistyce i produkcji systemy UAV muszą wykazywać odporność operacyjną na czynniki dynamiczne, w tym zmienność oświetlenia i obecność ludzi w strefie pracy.

Rosnące znaczenie UAV–AutoID w logistyce magazynowej, obsłudze technicznej statków powietrznych (MRO), inspekcji infrastruktury krytycznej czy monitoringu sieci przemysłowych

dowodzi, że wymagania w zakresie niezawodności i odporności są obecnie kluczowe. Każdy błąd w procesie identyfikacji zasobów lub infrastruktury może prowadzić do kosztownych opóźnień, przestojów czy nieprawidłowości w raportowaniu danych (Francis, Bekera, 2014). W gospodarce opartej na Przemyśle 4.0, gdzie liczy się szybkość i dokładność, odporne rozwiązania UAV–AutoID decydują o przewadze konkurencyjnej przedsiębiorstw (Lasi i in., 2014).

Z perspektywy metodologicznej należy zauważyć, że dotychczasowe badania koncentrowały się głównie na pojedynczych komponentach – platformie UAV, sensorach Auto-ID czy układach komunikacyjnych – pomijając ich systemową interakcję. Jak wykazano (Cao i in., 2025), analizowanie odporności wyłącznie na poziomie modułów nie pozwala uchwycić zdolności całego systemu do adaptacji i rekonfiguracji w obliczu nieprzewidywalnych zakłóceń. Zdiagnozowany na podstawie przeglądu literatury, brak podejścia całościowego powoduje, że nie istnieje obecnie narzędzie pozwalające na kompleksową ocenę odporności UAV–AutoID stosowanych w inwentaryzacji produktów w rzeczywistych warunkach przemysłowych.

Oczywiście w literaturze odnaleźć moż;na publikacje dotyczące ogólnej oceny odporności systemów, jak chociażby wyróżnienie cztery archetypów odporności: reakcję, monitorowanie, uczenie się i adaptację (Woods, 2015). Ich praktyczne znaczenie polega na konieczności nie tylko eliminowania skutków zakłóceń, ale również budowania zdolności do ich przewidywania i uczenia się na podstawie wcześniejszych doświadczeń. W przypadku systemów UAV zagadnienia te mają szczególne znaczenie w kontekście pracy w środowiskach przemysłowych, gdzie wymagana jest stabilność lotu, niezawodność identyfikacji zasobów oraz odporność na zmienne warunki eksploatacyjne. Podobnie istotne jest podreślenie konieczności wzmacniania odporności systemów inżynieryjnych poprzez podejście holistyczne (de Almeida, Crespo Márquez, 2024), obejmujące zarówno aspekty techniczne, jak i organizacyjne, co znajduje bezpośrednie odniesienie do wyzwań stojących przed UAV–AutoID.

Podejście to rozwijają Ordoukhanian i Madni (2019), proponując model inżynierii odporności dla systemów multi-UAV, bazujący na dynamicznej alokacji zasobów i rekonfiguracji misji. Koncepcje te powstały w odniesieniu do systemów transportowych i misji realizowanych przez UAV w przestrzeni otwartej, jednak znajdują swoje bezpośrednie przełożenie na UAV-AutoID, które muszą działać w środowiskach podatnych na zakłócenia wielowymiarowe. Przeniesienie tych koncepcji na grunt UAV-AutoID wymaga jednak odpowiedniego dostosowania założeń oceny do specyfiki magazynów mieszczących się w obiektach zamkniętych.

W literaturze wskazuje się, że UAV stosowane w logistyce i magazynowaniu wymagają szczególnej odporności na ograniczoną przestrzeń, przeszkody oraz zmienne warunki środowiskowe, co bezpośrednio determinuje ich zdolność do realizacji procesów Auto-ID w praktyce (Motlagh, Taleb, Arouk, 2016; Motlagh, Bagaa, Taleb, 2017)

Podsumowując, wyzwania związane z budowaniem odporności dla UAV–AutoID obejmują aspekty projektowe (dobór komponentów, redundancja, architektura systemu), operacyjne (reakcja na zakłócenia, procedury awaryjne, adaptacja do warunków otoczenia) oraz organizacyjne (integracja z procesami logistycznymi, kultura bezpieczeństwa, zarządzanie ryzykiem). Wskazuje to jednoznacznie na potrzebę opracowania metody, która pozwoli ocenić odporność tych systemów w sposób całościowy i mierzalny, uwzględniając nie tylko ich parametry techniczne, ale także procesowe i środowiskowe uwarunkowania.

5.2. Identyfikacja luki badawczej

Współczesne systemy identyfikacji danych (Auto-ID), stanowiące fundament cyfrowej transformacji w logistyce i przemyśle, są coraz częściej integrowane z autonomicznymi platformami mobilnymi, w tym z bezzałogowymi statkami powietrznymi (UAV). Dynamiczny rozwój tych technologii otwiera nowe możliwości automatyzacji procesów inwentaryzacji, monitorowania zasobów czy inspekcji trudno dostępnych obszarów, przy jednoczesnym zwiększeniu efektywności i obniżeniu kosztów operacyjnych. Jak wskazano w analizach systematycznych, kluczowym kierunkiem badań staje się wykorzystanie UAV w środowiskach magazynowych i przemysłowych, w których tradycyjne metody automatycznej identyfikacji napotykają na liczne ograniczenia techniczne i organizacyjne (Malang, Charoenkwan, Wudhikarn, 2023).

Odporność łańcuchów dostaw i zintegrowanych systemów logistycznych wynika z ich zdolności do adaptacji w warunkach zakłóceń i rekonfiguracji sieci procesów (Ma, Zhang, You, Tian, 2025). Pomimo rosnącej liczby publikacji i wdrożeń opisujących zalety UAV w zastosowaniach logistycznych, nadal brakuje spójnych i kompleksowych modeli oceny odporności tych systemów. Analiza rezultatów publikowanych w artykułach naukowych wskazuje, iż większość opisywanych podejść ma charakter fragmentaryczny – przeprowadzana ocena dotyczy zwykle wybranych aspektów funkcjonowania systemu UAV. Brakuje jednak ujęcia systemowego, które pozwalałoby ocenić odporność jako efekt interakcji komponentów technicznych, organizacyjnych i środowiskowych. Patriarca, Bergström, Di Gravio i Costantino w Resilience engineering: Current status of the research and future challenges. Safety Science, 102, 79–100. (2018) podkreślają, że analiza odporności w systemach złożonych wymaga uwzględnienia nieliniowych współzależności i zjawisk emergentnych, które często decydują o faktycznej stabilności działania. Z tego też względu w prowadzonych badaniach przyjęto perspektywę systemową.

Drugim istotnym ograniczeniem publikowanych rezultatów jest fakt, iż prowadzone badania dotyczące odporności koncentrują się na rozwiązaniach implementowanych głównie w odniesieniu do infrastruktury krytycznej, takiej jak energetyka, transport i telekomunikacja (Hosseini, Barker, Ramirez-Marquez 2016). Nie uwzględniają one specyfiki obiektów magazynowych, które są obiektami zamkniętymi, o różnej charakterystyce, w których realizowane są określone operacje obsługowe, niejednokrotnie współtowarzyszące wykonywanym misjom inwentaryzacyjnym. Te cechy operacyjne mogą być przyczyną występowania różnego rodzaju zdarzeń niepożądanych, jak również mogą zakłócać prawidłowe funkcjonowanie systemu UAV-AutoID.

Kolejnym obszarem wymagającym uwzględnienia przy ocenie odporności jest kwestia zmienności środowiska eksploatacyjnego. Prowadzone w ramach doktoratu badania dotyczyły systemów UAV–AutoID, które funkcjonują w obiektach o zróżnicowanej infrastrukturze – od nowoczesnych, wysokich hal magazynowych wyposażonych w systemy klimatyzacji i sterowanego oświetlenia, po starsze zakłady produkcyjne, w których panują trudne warunki: duże zakłócenia elektromagnetyczne, zapylenie, hałas i ograniczona przestrzeń manewrowa. Różnice te przekładają się bezpośrednio na charakter zakłóceń i typ wyzwań, z jakimi musi zmierzyć się system. Do najczęściej wymienianych należą: zmienne warunki oświetleniowe, refleksy świetlne, ograniczona widoczność etykiet, przeszkody fizyczne, obecność ludzi i maszyn generujących zakłócenia akustyczne oraz lokalne źródła pól elektromagnetycznych. Nieuwzględnienie takiej zmienności prowadzi do systematycznego niedoszacowania ryzyka i w konsekwencji do błędów w ocenie stabilności

systemów cyber-fizycznych (Alderson, Brown, Carlyle, 2015) wskazują Jest to więc element krytyczny w odniesieniu do usługi inwentaryzacyjnej, która każdorazowo może być realizowana w innym magazynie.

Dodatkowym ograniczeniem istniejących metod jest brak narzędzi umożliwiających porównywanie odporności różnych rozwiązań UAV–AutoID. W praktyce wdrożenia często odbywają się metodą prób i błędów, co wiąże się z ryzykiem powstawania kosztownych przestojów, utraty danych i nieefektywnego wykorzystania zasobów. Brak obiektywnych wskaźników utrudnia również procesy decyzyjne na poziomie strategicznym, np. wybór technologii czy planowanie inwestycji. Kwantyfikacja odporności jest warunkiem jej praktycznego zastosowania (Boin, Van Eeten 2013), dlatego bez mierzalnych kryteriów trudno mówić o realnym wsparciu procesów zarządzania ryzykiem.

W związku z powyższym należy stwierdzić, iż w obszarze metod oceny odporności systemów UAV-AutoID występuje obecnie luka badawcza zdefiniowana poniżej.

Luka badawcza:
Istnieje obecnie luka badawczo polegająca na braku kompleksowej metody oceny odporności dla systemów UAV-AutoID uwzględniającej:

- Podejście systemowe obejmujące aspekty inżynierskie (odporność systemów technicznych), procesowe (odporność procesów operacyjnych) oraz wpływ otoczenia.
- Specyfikę obiektów magazynowych, a więc realizację misji w przestrzeniach zamkniętych o określonych parametrach operacyjnych.
- Zmienność środowiska operacyjnego, która jest charakterystyczna dla procesów inwentaryzacyjnych realizowanych w formie usługi outsourcingowej.

System UAV–AutoID jest przykładem złożonego systemu cyber-fizycznego, którego właściwości emergentne wynikają z dynamicznych interakcji pomiędzy platformą UAV, sensorami, modułami komunikacyjnymi i procedurami organizacyjnymi. Brak metody oceny odporności całego systemu oznacza ograniczone możliwości rozwoju algorytmów sterowania, planowania redundancji oraz projektowania architektury systemowej. Francis i Bekera (2014) zwracają uwagę, że skuteczne modelowanie odporności musi łączyć perspektywę techniczną z procesową i środowiskową, aby odzwierciedlać realne uwarunkowania pracy systemów w Przemyśle 4.0. i na to wyzwanie ma odpowiedzieć opracowana metoda M-UAV.

5.3. Cel pracy i zakres badań

Opisane dotychczas badania prowadzące do przygotowania rozprawy doktorskiej mają przede wszystkim charakter teoretyczny. Należy jednak pamiętać, że przygotowywana rozprawa jest realizowana w ramach programu ministerialnego „Doktorat wdrożeniowy”, co nakłada na nią dodatkowe wymagania dotyczące implementacyjnego charakteru uzyskanych rezultatów. W związku z tym zdefiniowane cele badawcze muszą odnosić się nie tylko do wypełnienia luki badawczej zidentyfikowanej w rozdziale 4.2, ale również do wymagań

przemysłowych i celów biznesowych definiowanych przez badane przedsiębiorstwo. Z tego też względu:

Główny cel pracy określono jako:

Opracowanie metody oceny odporności systemu UAV-AutoID w oparciu o podejście systemowe (obejmujące aspekty procesowe i inżynierskie) i uwzględniającej zmienne warunki eksploatacyjne w trakcie realizacji misji.

Celem utylitarnym pracy będzie:

Podniesienie skuteczności i bezpieczeństwa procesów inwentaryzacji w magazynach zamkniętych poprzez wdrożenie metody oceny odporności systemu UAV-AutoID, co pozwoli na: (1) ograniczenie ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych, (2) zwiększenie niezawodności i dostępności systemu podczas misji, oraz (3) optymalizację kosztów i czasu realizacji inwentaryzacji.

Tak zdefiniowany cel naukowy i utylitarny pozwolą na opracowanie metody oceny odporności, będącej odpowiedzią na zidentyfikowaną obecnie lukę badawczą, ale również umożliwią opracowanie podejścia do zarządzania procesem inwentaryzacji, które wspierać będzie inżynierów i menedżerów w ocenie odporności systemu UAV-AutoID, umożliwiającego podejmowanie trafniejszych decyzji dotyczących planowania misji, utrzymania systemu oraz minimalizacji ryzyka zakłóceń i zdarzeń niepożądanych w realizacji inwentaryzacji. Aby osiągnąć taki rezultat, konieczne jest sformułowanie celów szczegółowych, definiujących kolejne etapy prac, niezbędnych do realizacji celu głównego.

Cele szczegółowe obejmują tym samym:

- *Identyfikację elementów systemu* UAV-AutoID *istotnych z punktu widzenia odporności technicznej i procesowej.*
- *Identyfikację warunków eksploatacyjnych oraz ocenę ich wpływu na zakłócenia występujące w procesie inwentaryzacji realizowanej przez UAV-AutoID*
- Określenie kryteriów i wskaźników oceny odporności*, uwzględniających dostępność i zdolność systemu do absorpcji zakłóceń i adaptacji do zmiennych warunków misji.*
- Identyfikację obszarów oceny ryzyka zdarzeń niepożądanych *wpływających na realizację inwentaryzacji w magazynach zamkniętych.*
- Integracja podejścia inżynierskiego i procesowego *w ramach spójnego modelu systemowego oceny odporności UAV-AutoID.*
- *Walidację opracowanej metody w warunkach eksperymentalnych i rzeczywistych. Testy obejmą zarówno próby w kontrolowanych środowiskach badawczych, jak i studia przypadków w zakładach przemysłowych.*
- Ocena praktycznej przydatności metody *poprzez analizę wpływu uzyskanych wyników na poprawę efektywności procesu inwentaryzacji*.

W niniejszej rozprawie, zgodnie z praktyką badań technicznych, zamiast formułowania hipotez badawczych przyjęto zestaw pytań badawczych, które stanowią punkt wyjścia do dalszych analiz i eksperymentów. Takie podejście jest szczególnie uzasadnione w badaniach inżynierskich, gdzie celem nie jest wyłącznie weryfikacja hipotez teoretycznych,

lecz stworzenie narzędzia o charakterze aplikacyjnym, możliwego do praktycznego wykorzystania w środowiskach przemysłowych. W przeciwieństwie do hipotez, które mają charakter statyczny i często ograniczają się do prostych zależności przyczynowo-skutkowych, pytania badawcze pozwalają na elastyczne kierowanie procesem badawczym i stopniowe dostosowywanie metod do zmieniających się uwarunkowań technicznych i organizacyjnych (Bhamra, Dani, Burnard, 2011).

W kontekście doktoratu wdrożeniowego ma to szczególne znaczenie, gdyż pytania badawcze są ściśle powiązane z realnymi problemami występującymi w praktyce przemysłowej. Odpowiedzi na nie muszą prowadzić do rozwiązań nadających się do implementacji, a nie jedynie do opracowania koncepcji teoretycznych. Pytania badawcze nie są więc jedynie formalnym elementem rozprawy, ale stanowią logiczną kontynuację analizy luki badawczej i określenia celów pracy. Każde z nich ma prowadzić do pozyskania wiedzy pozwalającej na konstrukcję metody M-UAV i jej praktyczne zastosowanie, co nadaje pracy jednoznacznie aplikacyjny charakter.

W ramach rozprawy postawiono cztery **pytania badawcze**:

RQ1: *Jakie czynniki wpływają na odporność systemów UAV–AutoID w środowiskach przemysłowych?*

Pytanie to umożliwia identyfikację podstawowych determinantów stabilności i niezawodności systemu. Czynniki te mogą mieć charakter techniczny (np. parametry UAV, konfiguracja sensorów, stabilność systemów komunikacyjnych), organizacyjny (np. procedury eksploatacyjne, kompetencje operatorów) oraz środowiskowy (np. zakłócenia elektromagnetyczne, warunki oświetleniowe). Precyzyjna identyfikacja tych czynników pozwala na wskazanie obszarów najbardziej podatnych na zakłócenia i jest fundamentem dla budowy narzędzi oceny odporności.

RQ2: *Jak można sklasyfikować zakłócenia występujące w procesach Auto-ID z wykorzystaniem UAV oraz jakie są ich potencjalne skutki dla stabilności systemu?*

Pytanie to dotyczy opracowania typologii zakłóceń, w której każde zaburzenie zostanie opisane pod kątem źródła, charakteru oraz wpływu na funkcjonowanie systemu. Klasyfikacja ta pozwala powiązać zakłócenia z ich konsekwencjami praktycznymi – np. spadkiem jakości odczytu etykiet, utratą stabilności lotu, błędną synchronizacją danych. W praktyce oznacza to stworzenie bazy wiedzy pozwalającej na kategoryzację ryzyk i ich kwantyfikację, co umożliwia porównania pomiędzy różnymi scenariuszami eksploatacyjnymi. Klasyfikacja zdarzeń niepożądanych jest również punktem wyjścia dla formułowania rekomendowanych zmian, które powinny precyzyjnie odnosić się do poszczególnych składowych systemu technicznego, procedur lub warunków środowiskowych.

RQ3: *W jaki sposób opracować system pomiaru odporności umożliwiający skutecznie i efektywnie oceniać jej poziom?*

Rozwinięcie tego pytania obejmuje identyfikację zestawu wskaźników wskaźników i mierników, które pozwolą w sposób mierzalny i obiektywny ocenić zdolność systemu do zachowania funkcjonalności w warunkach zakłóceń. Szczególną wagę przykłada się do tego, aby narzędzia te mogły być stosowane w praktyce przemysłowej i dawały wyniki łatwe do interpretacji przez inżynierów odpowiedzialnych za eksploatację systemu. Kryteria muszą być skalowalne, porównywalne i uwzględniać różne scenariusze pracy w środowiskach

zakłóceniowych. Krytycznym aspektem jest też opracowanie dla tworzonego systemu pomiaru wartości referencyjnych opisujących poszczególne poziomy odporności.

RQ4: *W jaki sposób opracowana metoda może być zastosowana w praktyce przemysłowej – w szczególności w procesach inwentaryzacji produktów – z uwzględnieniem zmiennego środowiska eksploatacyjnego, obejmującego m.in. różnorodność warunków infrastrukturalnych, organizacyjnych oraz technologicznych, w jakich funkcjonują systemy UAV–AutoID?*

Odpowiedź na to pytanie pozwoli ocenić nie tylko teoretyczną poprawność metody, ale także jej użyteczność i adaptacyjność w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Wdrożenie systemów UAV–AutoID w procesach inwentaryzacji magazynowej wymaga bowiem oceny ich zdolności do pracy w skrajnie odmiennych środowiskach – od nowoczesnych hal wysokiego składowania po starsze zakłady o ograniczonej infrastrukturze. Elastyczność i praktyczność metody oceny odporności stają się więc jej najważniejszymi walorami.

Tak sformułowane pytania badawcze tworzą spójny zestaw, który obejmuje zarówno warstwę analityczną (identyfikacja czynników i zakłóceń), jak i projektową (opracowanie kryteriów i narzędzi) oraz aplikacyjną (wdrożenie metody w praktyce). Ich konstrukcja odpowiada logice badań inżynierskich – od diagnozy problemu, poprzez budowę rozwiązania, aż po jego praktyczną weryfikację. Dzięki temu całość procesu badawczego zyskuje przejrzystość i pełną spójność z celami pracy doktorskiej, a opracowana metoda może stać się narzędziem realnie wspierającym decyzje w przemyśle.

Aby odpowiedzieć na tak postawione pytania badawcze oraz osiągnąć zdefiniowane cele pracy sformułowano kolejne etapy badawcze. Przyjęta koncepcja badawcza zakłada połączenie analizy literatury, badań empirycznych oraz modelowania teoretycznego, prowadzących do opracowania metody M-UAV. W tabeli 5.1 przedstawiono schemat logiczny procesu badawczego obejmującego sześć kluczowych etapów. Każdy z nich został powiązany z konkretnym rezultatem, który stanowi podstawę do realizacji kolejnych kroków. Dzięki temu możliwe jest zobrazowanie nie tylko przebiegu badań, ale także wartości dodanej generowanej na każdym etapie – od diagnozy problemu, przez konstruowanie narzędzia, po jego empiryczną weryfikację.

Tab. 5.1. Etapy procesu badawczego

Etap badawczy	**Rezultat**
Analiza literatury i przegląd istniejących teorii	Zidentyfikowane ograniczenia metod i potencjalne obszary luki badawczej
Identyfikacja problemów badawczych i luk na podstawie badań literatury	Klasyfikacja czynników ryzyka, zidentyfikowanie problematyki dotyczącej budowania odporności, zidentyfikowana luka badawcza
Definiowanie celów pracy i pytań badawczych	Sformułowane cele główne, utylitarne i szczegółowe oraz pytania badawcze wyznaczające kierunek prac
Opracowanie autorskiej metody oceny odporności M-UAV	Modelowe podejście do oceny odporności systemów UAV-AutoID w zmiennym środowisku eksploatacyjnym
Zastosowanie metody M-UAV w rzeczywistym środowisku przemysłowym	Wyniki testów i studium przypadków weryfikujące przyjęte założenia i potwierdzające użyteczność metody w warunkach rzeczywistych

Rekomendacje i wnioski z badań	Propozycje działań doskonalących, zidentyfikowane kierunki rozwoju metody oraz dalszych badań

Źródło: Opracowanie własne

Tabela 5.1 przedstawia sekwencję sześciu etapów procesu badawczego wraz z przypisanymi do nich rezultatami, które tworzą spójną logikę metody M-UAV. Zestawienie ukazuje, że każdy etap generuje mierzalny wynik – od identyfikacji ograniczeń istniejących metod, poprzez klasyfikację czynników ryzyka i formułowanie celów, aż po opracowanie macierzy odporności oraz jej praktyczną weryfikację w środowiskach przemysłowych. Takie podejście zapewnia przejrzystość całego procesu badawczego oraz podkreśla jego iteracyjny i aplikacyjny charakter, w którym kolejne etapy wzajemnie się uzupełniają i tworzą podstawę do rekomendacji wdrożeniowych oraz dalszych kierunków badań.

Tak zaprojektowana koncepcja badań pozwala na stopniowe budowanie i weryfikowanie metody M-UAV, przy jednoczesnym zapewnieniu jej praktycznej użyteczności. Każdy etap generuje określony rezultat, który jest zarówno punktem wyjścia dla kolejnego kroku, jak i samodzielną wartością poznawczą lub aplikacyjną. Zgodnie z literaturą z zakresu system safety, takie iteracyjne podejście zwiększa wiarygodność wyników i minimalizuje ryzyko błędnej interpretacji (Righi, Saurin, Wachs, 2015).

Dodatkowym atutem przyjętej struktury jest możliwość jej łatwej adaptacji do badań nad innymi systemami cyber-fizycznymi. Metodyka M-UAV nie jest ograniczona wyłącznie do UAV–AutoID, ale może stanowić punkt wyjścia do oceny odporności podobnych rozwiązań, wykorzystywanych w robotyce mobilnej, autonomicznych pojazdach naziemnych czy systemach inspekcji infrastruktury krytycznej. Elastyczność i skalowalność tej metody czynią ją narzędziem o potencjale wykraczającym poza wąski obszar logistyki przemysłowej.

ROZDZIAŁ 6

METODA OCENY ODPORNOŚCI DLA SYSTEMÓW UAV–AutoID PRACUJĄCYCH W ZMIENNYCH WARUNKACH EKSPLOATACYJNYCH (METODA M-UAV)

Sformułowane w rozdziale 4 cele szczegółowe oraz postawione pytania badawcze wytyczyły kierunek prowadzonych badań, których zwieńczeniem jest opracowanie nowej metody oceny odporności dla systemów UAV-AutoID. Metoda ta ma być odpowiedzią na występującą lukę badawczą oraz potrzeby biznesowe zgłaszane przez środowisko przemysłowe, w tym przede wszystkim przedsiębiorstwo NeuroSpace Sp. z o.o. Nie wszystkie uzyskane rezultaty badań zostały przedstawione w tej rozprawie, jednak zostały one opisane w innych opracowaniach naukowych Doktoranta i stanowią podwaliny pod opracowaną metodę M-UAV.

W celu udzielenia odpowiedzi na postawione pytania badawcze, zaplanowano i zrealizowano kilkuletnie, kompleksowe studia literatury oraz testy empiryczne w rzeczywistych środowiskach eksploatacyjnych. W przeglądzie literatury (Tubis, Poturaj, Dereń, Żurek, 2024), opracowano uporządkowany katalog zagrożeń związanych z UAV, który pozwolił określić potencjalny zbiór zdarzeń niepożądanych oraz wyznaczył ramy dalszych analiz dotyczących budowania odporności poprzez mitygację występującego ryzyka. W pracy Tubis i Żurek (2022) udowodniono możliwość praktycznego wdrożenia UAV do obsługi procesów logistycznych wewnątrz przedsiębiorstwa, co stworzyło punkt wyjścia do dalszych badań nad odpornością tych rozwiązań. Przeprowadzona ocen ryzyka występującego we wczesnej fazie wdrażania usługi inwentaryzacyjnej opartej o UAV-AutoID pozwoliła zidentyfikować potencjał do doskonalenia badanego systemu z uwzględnieniem zmiennego środowiska eksploatacyjnego (Tubis, Ryczyński, Żurek, 2021). W kolejnym kroku Dereń i Żurek (2023) przeprowadzili porównanie ryzyk w tradycyjnych metodach inwentaryzacji i w procesach wspieranych UAV–AutoID. Analiza ta pokazała, że drony nie tylko ograniczają liczbę błędów ludzkich i zwiększają spójność danych, lecz także generują nowe kategorie ryzyk technicznych, co przesunęło punkt ciężkości badań na ocenę ex post. Wreszcie, w pracy Meyer, Schorer, Żurek, Hinz (2024), mimo że osadzonej w kontekście misji UAV podczas powodzi, wykazano uniwersalność podejścia Respond–Recover–Adapt, potwierdzając, że ocena reakcji, procesu powrotu do stanu równowagi i adaptacji systemu może stanowić fundament oceny odporności także w logistyce i magazynowaniu. Wszystkie te uzyskane rezultaty cząstkowe zostały wykorzystane podczas opracowywania założeń do metody M-UAV

Opracowana metoda M-UAV została zaprojektowana z myślą o ocenie odporności systemów wykorzystywanych w magazynowych obiektach zamkniętych, których zadaniem jest wspomaganie procesów inwentaryzacji składowanych produktów. Rozpoznana luka badawcza wskazuje na potrzebę stworzenia procedury umożliwiającej kompleksową ocenę odporności systemów UAV–AutoID, uwzględniającą wykorzystywany system techniczny oraz zmienności warunków eksploatacji. Metoda ta powinna być ukierunkowana nie tylko na doskonalenie komponentów technicznych, lecz także na usprawnienie procedur organizacyjnych, przy jednoczesnym uwzględnieniu zróżnicowanego środowiska eksploatacyjnego, w którym realizowane są misje. Pod pojęciem systemu UAV–AutoID

w niniejszej pracy rozumie się zintegrowaną platformę technologiczną, w której bezzałogowy statek powietrzny pełni rolę nośnika dla systemów automatycznej identyfikacji danych (m.in. kamer, sensorów, technologii RFID). Jest to rozwiązanie łączące komponenty sprzętowe, oprogramowanie oraz procedury eksploatacyjne w jednolity układ funkcjonalny, umożliwiający realizację procesów inwentaryzacyjnych w rzeczywistych warunkach magazynowych. Krytyczne znaczenie ma tu przyjęcie perspektywy ex post, w której analiza odporności opiera się na obserwacji i interpretacji rzeczywistych zdarzeń po zakończeniu misji. Takie podejście pozwala uchwycić faktyczne reakcje systemu na zakłócenia oraz sformułować wnioski prowadzące zarówno do modyfikacji konstrukcji UAV, jak i do doskonalenia procedur operacyjnych. W praktyce metoda M-UAV pełni zatem trzy uzupełniające się funkcje:

- diagnostyczną, polegającą na identyfikacji źródeł zakłóceń i ocenie ich wpływu na przebieg misji;
- rozwojową, ukierunkowaną na wskazywanie obszarów wymagających doskonalenia w kolejnych wdrożeniach i przygotowaniach operacyjnych;
- prognostyczną, pozwalającą przewidywać potencjalne zdarzenia niepożądane w przyszłych misjach.

W ten sposób wyniki oceny służą trzem równoległym celom. Z jednej strony wspierają proces udoskonalania systemu UAV–AutoID, ograniczając liczbę zdarzeń związanych z funkcjonowaniem urządzeń UAV oraz wspierających ich systemów. Z drugiej – umożliwiają tworzenie skuteczniejszych procedur przygotowania misji, co pozwala redukować ryzyko wynikające z czynników zewnętrznych. Po trzecie – umożliwia opracowanie scenariuszy awaryjnych oraz rekomendowanych reakcji systemu na występujące zakłócenia. Rezultatem przeprowadzonego postępowania oceniającego jest więc identyfikacja poziomu odporności badanego systemu UAV-AutoID, analiza ryzyka występującego w trakcie procesu inwentaryzacji oraz sformułowanie rekomendowanych zmian ukierunkowanych na zwiększenie odporności procesowo-systemowej. Aby taki rezultat był wartościowy, konieczne jest zdefiniowanie wymagań środowiska eksploatacyjnego i czynników wpływających na niezawodność realizacji misji, a także jednoznaczne określenie, czym jest prawidłowe i skuteczne wykonanie zadania w kontekście UAV–AutoID. Niezbędne jest również wyznaczenie wartości referencyjnych dla szacowanych wskaźników odporności i ich walidacja na podstawie danych empirycznych.

Całość dorobku badawczego, obejmującego zarówno przegląd literatury, jak i ponad 20 kampanii testowych przeprowadzonych w Polsce, Czechach i Francji w latach 2020-2024, dowodzi, że metoda M-UAV jest wynikiem holistycznego podejścia do procesu rozwojowego, łączącego teorię z praktyką. Badaia te objęły szerokie spektrum środowisk magazynowych i przemysłowych: wysokoregałowe centra logistyczne klasy A, magazyny blokowego składowania (big-bagi, beczki, skrzynie, materiały sypkie), standardowe obiekty paletowe z częściami automotive i aerospace, magazyny produktów spożywczych, chemii gospodarczej, tektury i opakowań, zakłady przyprodukcyjne pracujące w trybie 24/7, a także tradycyjne obiekty manualne, z trudnym oświetleniem i przestarzałą infrastrukturą. Wszystkie lokalizacje miały charakter rzeczywistych środowisk eksploatacyjnych, w których podczas testów UAV–AutoID i realizowanych inwentaryzacji trwały normalne operacje logistyczne – prowadzono ruch transportowy, obsługę regałów, kompletację zamówień oraz zadania produkcyjne. Dzięki temu każdy test dostarczał danych w warunkach pełnego obciążenia systemu, co znacząco odróżnia przeprowadzone badania od symulacji laboratoryjnych czy

eksperymentów kontrolowanych. Oparta na badaniach empirycznych i weryfikacji naukowej, stanowi pierwsze tak spójne narzędzie do oceny odporności systemów UAV–AutoID w zmiennych warunkach eksploatacyjnych.

6.1. Założenia metody M-UAV

Metoda M-UAV powstała jako odpowiedź na brak narzędzi umożliwiających kompleksową ocenę odporności systemów UAV–AutoID w realnych, zmiennych warunkach operacyjnych. Oprócz walorów naukowych ma za zadanie wspierać inżynierów i menedżerów w ocenie odporności systemu UAV-AutoID oraz doskonaleniu procesu decyzyjnego dotyczącego planowania misji, utrzymania systemu UAV i systemów wspomagających, jak również minimalizacji ryzyka występującego w procesie inwentaryzacji. Z tego też względu punktem wyjścia dla przeprowadzanego procesu oceny jest zdefiniowanie parametrów skutecznie zrealizowanej misji przez system UAV-AutoID w ramach usługi inwentaryzacji magazynowej.

Skutecznie i efektywnie zrealizowana misja systemu UAV-AutoID w ramach usługi inwentaryzacji magazynowej powinna

- dostarczyć prawidłowy (jednoznaczny) odczyt wszystkich etykiet umieszczonych na obiektach zaplanowanych do inwentaryzacji;
- dostarczyć odczyty umożliwiające prawidłowe wypełnienie danymi wszystkich rekordów zdefiniowanych w wykorzystywanej bazie danych;
- być zrealizowana według obowiązującej procedury postępowania, uwzględniającej specyfikę warunków eksploatacyjnych;
- być wykonana w zaplanowanym przedziale czasu i po zaplanowanych kosztach.

W dotychczasowej literaturze można wyróżnić dwa dominujące nurty badawcze. Pierwszy z nich koncentrował się na analizie niezawodności wybranych komponentów dronów, takich jak systemy napędowe, sensory czy moduły komunikacyjne. Drugi natomiast obejmował ogólne modele oceny ryzyka operacyjnego w logistyce, stosowane bez uwzględnienia specyfiki technologii UAV. Oba te podejścia były wartościowe, lecz rozpatrywały problem fragmentarycznie. Brakowało spójnej koncepcji, która łączyłaby oba poziomy analizy i odnosiła je bezpośrednio do zróżnicowanych środowisk eksploatacyjnych, w jakich faktycznie działają systemy UAV–AutoID.

Proponowana metoda M-UAV wypełnia tę lukę, wprowadzając podejście kompleksowe, oparte na kilku kluczowych założeniach:

Założenie nr 1. Procedura obejmuje pięć etapów ukierunkowanych na identyfikację składowych systemu UAV–AutoID oraz warunków środowiska eksploatacyjnego, w których realizowane są misje, a następnie na ocenę odporności w oparciu o system wskaźników analizowanych w układzie macierzowym oraz przygotowanie rekomendowanych zmian. Dzięki takiej strukturze metoda zachowuje przejrzystość i umożliwia systematyczne przechodzenie od danych empirycznych do rekomendacji praktycznych, co czyni ją użytecznym narzędziem zarówno dla badaczy, jak i użytkowników przemysłowych.

Założenie nr 2. Charakterystyka warunków eksploatacyjnych ma istotne znaczenie dla przebiegu misji inwentaryzacyjnych, co wymusza ich uwzględnienie zarówno w planowaniu, jak i w realizacji działań operacyjnych. Środowisko realizacji misji stanowi bowiem podstawowe źródło występujących zakłóceń i bezpośrednio wpływa na częstotliwość oraz skutki identyfikowanego ryzyka operacyjnego. Uwzględnienie tej zmienności od samego początku sprawia, że proponowana metoda jest odporna na uproszczenia i odzwierciedla realne uwarunkowania, z jakimi spotykają się systemy UAV–AutoID w praktyce.

Założenie nr 3. Elementy składowe systemu UAV–AutoID w sposób bezpośredni i istotny determinują reakcję systemu na pojawiające się zakłócenia w trakcie realizacji misji. To właśnie konfiguracja platformy dronowej, zestaw zastosowanych sensorów, moduły komunikacyjne oraz oprogramowanie decydują o tym, czy system będzie w stanie skutecznie absorbować zakłócenia i adaptować się do zmiennych warunków środowiskowych. Z tego względu ich szczegółowa charakterystyka musi stanowić punkt wyjścia do przeprowadzanej oceny odporności, ponieważ pozwala wskazać obszary największej podatności systemu.

Założenie nr 4. Ocena odporności opiera się na pomiarze wybranych parametrów realizacji misji, kalkulacji bieżących wartości wskaźników i mierników pogrupowanych według czterech filarów odporności oraz na odniesieniu ich do wartości referencyjnych, wyznaczonych dla zdefiniowanych poziomów odporności. Takie podejście zapewnia spójność pomiarów i umożliwia nie tylko porównywanie wyników między różnymi misjami, lecz również obserwację dynamiki zmian odporności systemu w dłuższym horyzoncie czasowym. Dzięki temu metoda pozwala uchwycić nie tylko pojedyncze incydenty, ale także ogólne tendencje w zachowaniu systemu UAV–AutoID.

Założenie nr 5. Postępowanie oceniające realizowane jest w trybie ex post, co oznacza, że system UAV–AutoID nie jest oceniany na podstawie założeń teoretycznych czy symulacji, lecz poprzez analizę faktycznych danych pochodzących z zakończonych misji. Dzięki temu uzyskane wyniki pełnią rolę diagnostyczną, ale mogą być też wykorzystywane w celach rozwojowych oraz prognostycznych. Przeprowadzana analiza wykorzystuje dane empiryczne z wykonanych misji, dzięki czemu dostarcza wniosków odnoszących się do rzeczywistych warunków pracy systemu. Taki tryb postępowania pozwala zarówno zidentyfikować źródła zakłóceń i ich konsekwencje, jak i zaprojektować rozwiązania techniczne i organizacyjne zmniejszające podatność systemu na przyszłe zdarzenia niepożądane. Dane rejestrowane ex post stanowią więc nie tylko rezultat pomiaru, lecz także podstawę do uczenia się i doskonalenia systemów UAV–AutoID.

Przyjęte założenia są zgodne z wynikami badań przeprowadzonych w różnych typach magazynów, obejmujących szerokie spektrum kategorii produktów. Wykazały one, że środowisko eksploatacyjne systemu UAV ma kluczowe znaczenie dla niezawodności realizowanych inwentaryzacji. Oznacza to, że ta sama konfiguracja sprzętowa może cechować się wysoką odpornością w jednym środowisku, a niską w innym – na przykład w zależności od oświetlenia, rozmieszczenia regałów, natężenia ruchu wewnątrz magazynu czy stosowanych etykiet towarowych. M-UAV wprost uwzględnia zmienność środowisk eksploatacyjnych – od nowoczesnych, w pełni zautomatyzowanych centrów dystrybucyjnych klasy A, po tradycyjne, niskie magazyny manualne z przestarzałą infrastrukturą. W praktyce metoda zakłada, że odporność systemu nie jest kategorią abstrakcyjną, lecz wynikiem interakcji pomiędzy komponentami technicznymi UAV–AutoID a otoczeniem, w którym dron realizuje zadania. W związku z tym można stwierdzić, że:

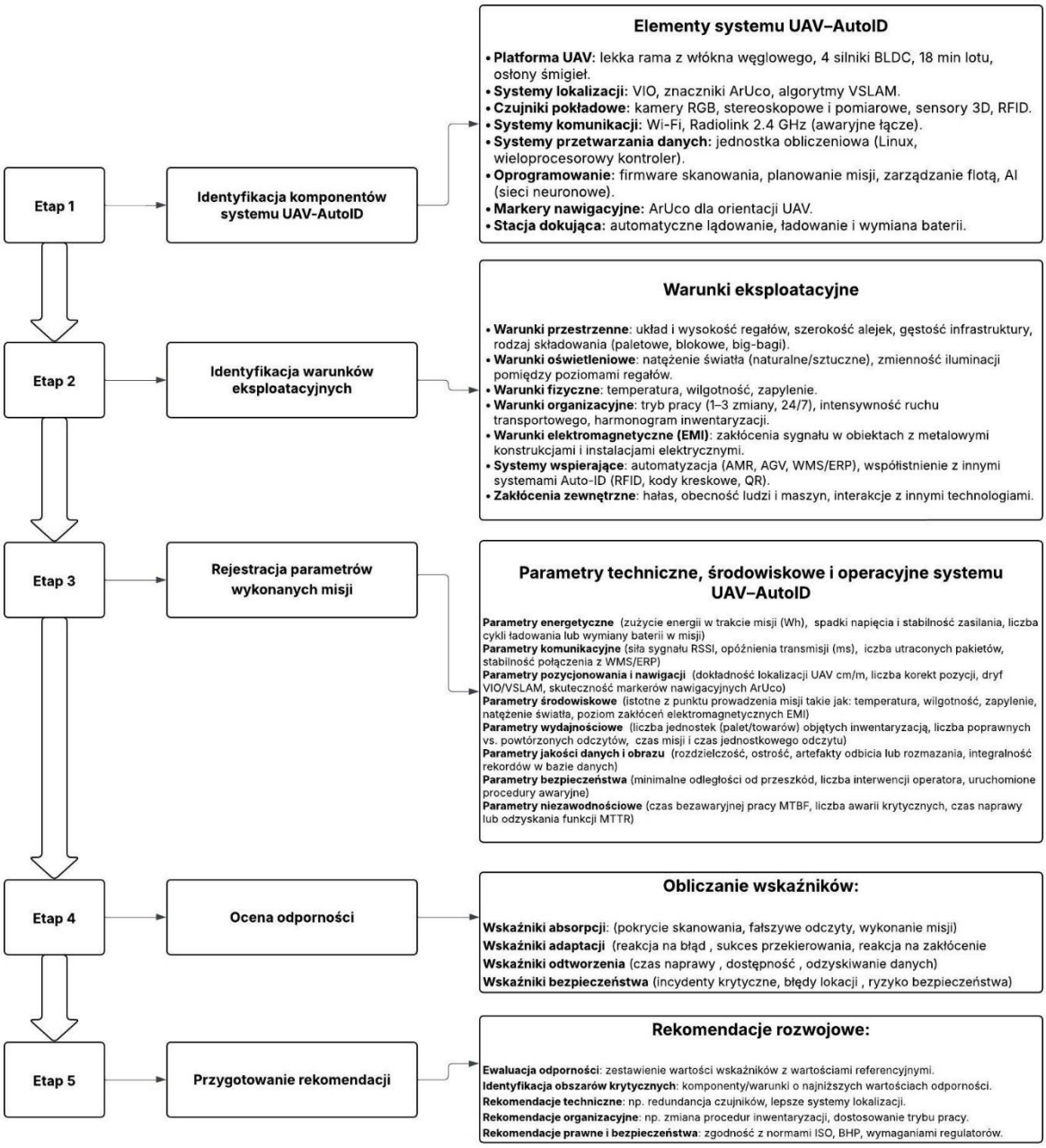
Opracowana metoda M-UAV:

- uwzględnia dwuwymiarową przestrzeń analityczną, opisaną przez charakterystykę systemu UAV–AutoID oraz charakterystykę środowiska eksploatacyjnego;
- jej celem jest kompleksowa ocena odporności systemu UAV–AutoID w ujęciu procesowo–inżynierskim oraz przygotowanie rekomendacji służących dalszemu doskonaleniu systemu.

6.2 Procedura postępowania w metodzie oceny odporności (M-UAV)

Opracowana procedura M-UAV została zaprojektowana jako sekwencja pięciu etapów, które odzwierciedlają cykl oceny odporności systemu UAV–AutoID w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Jej struktura wyrasta bezpośrednio z doświadczeń empirycznych, gdyż wszystkie oceniane misje odbywały się w aktywnych obiektach, gdzie równolegle prowadzono codzienne operacje logistyczne (przyjęcia, wydania, kompletacje, transport wewnętrzny). Dzięki temu zebrane dane oddają pełną złożoność środowiska eksploatacyjnego, obejmując różne układy regałowe, warunki oświetleniowe, zróżnicowaną infrastrukturę i odmienne kultury organizacyjne. Jej fundamentem jest analiza ex post. Dzięki temu system nie jest oceniany hipotetycznie, lecz na podstawie faktycznych zdarzeń misji i zarejestrowanych danych. Takie podejście zapewnia pełną wiarygodność wyników i odzwierciedla rzeczywisty poziom odporności systemu w konkretnym środowisku pracy.

Na rysunku 6.1. przedstawiono etapy postępowania w ramach metody M-UAV, które następnie zostały scharakteryzowane w kolejnych podrozdziałach.



Rys. 6.1. Etapy metody M-UAV w ocenie ex post odporności systemów UAV–AutoID
Źródło: Opracowanie własne.

6.2.1. Etap 1 – Identyfikacja elementów systemu UAV–AutoID

Pierwszym krokiem metody M-UAV jest identyfikacja elementów składowych systemu UAV–AutoID, która stanowi fundament całego procesu oceny odporności. Celem tego etapu jest określenie zarówno komponentów technicznych, jak i funkcjonalnych systemu, a także wskazanie ich potencjalnych podatności na zakłócenia w trakcie realizacji misji.

Na podstawie przeprowadzonych badań terenowych (Tubis, Żurek, 2022; Dereń, Żurek, 2023) oraz analiz literaturowych (Tubis, Poturaj, Dereń, Żurek, 2024), wyróżniono kilka podstawowych grup elementów systemu UAV–AutoID:

- Platforma UAV – obejmuje konstrukcję nośną, układ napędowy, zasilanie (baterie, potencjalnie ogniwa paliwowe) oraz system stabilizacji lotu. Jej niezawodność i odporność determinują zdolność systemu do wykonywania misji w zróżnicowanych środowiskach magazynowych. Badania przeprowadzone m.in. podczas konferencji ESREL w Irlandii pokazały, że wąskie alejki i wysoka rotacja ruchu transportowego stanowią szczególne obciążenie dla platform UAV, ujawniając ograniczenia w zakresie czasu lotu oraz stabilności sterowania.
- Systemy sensoryczne – kamery RGB, kamery 3D, czujniki LiDAR, systemy RFID, a także sensory wspomagające (np. termowizja). To one odpowiadają za pozyskiwanie danych i stanowią podstawowe źródło informacji w procesie inwentaryzacji. W badaniach zaprezentowanych na konferencji ESREL (Francja 2021) wykazano, że kombinacja czujników optycznych i RFID pozwala na zmniejszenie liczby błędów identyfikacyjnych nawet w środowiskach o ograniczonej widoczności, co stanowi istotny element zwiększający odporność systemu.
- Systemy komunikacji – moduły Wi-Fi, LTE lub inne rozwiązania bezprzewodowe umożliwiające wymianę danych między UAV a systemami zarządzania magazynem (WMS/ERP). Stabilność transmisji jest tu kluczowym czynnikiem odporności. Wyniki badań opublikowanych po konferencji w Bojnicach (Słowacja 2022) pokazały, że problemy z komunikacją występujące w starszych obiektach magazynowych, wyposażonych w metalowe konstrukcje regałowe, były jedną z głównych przyczyn przerywania misji.
- Oprogramowanie i algorytmy sterujące – obejmują systemy nawigacji, przetwarzania obrazu, rozpoznawania etykiet oraz logikę sterowania misją. W badaniach (Meyer, Schorer, Żurek, Hinz, 2024) wskazano, że jakość algorytmów ma istotny wpływ na zdolność systemu do adaptacji i odzyskiwania sprawności po zakłóceniu. W publikacjach z ESREL (Irlandia 2022 i Francja 2021) podkreślano, że implementacja uczenia maszynowego w modułach sterowania może zwiększyć odporność systemu na dynamiczne zmiany środowiskowe.
- System przetwarzania danych – serwery i moduły obliczeniowe (on-board i off-board), które odpowiadają za analizę i integrację informacji w czasie rzeczywistym. Dane zebrane podczas testów we Francji (2024) wykazały, że systemy obliczeniowe muszą charakteryzować się wysoką odpornością na opóźnienia i brak synchronizacji, ponieważ każdy błąd tego typu prowadził do eskalacji kolejnych incydentów.

Wyodrębnienie poszczególnych elementów technicznych oraz funkcjonalnych systemu UAV-AutoID, które w sposób bezpośredni mogą wpływać na jego odporność w trakcie realizacji misji inwentaryzacyjnych, jest niezbędne w celu zdefiniowania zakresu przeprowadzanej oceny, opracowania wskaźników pomiarowych oraz wskazania potencjalnych źródeł występujących zakłóceń i ryzyk. Należy w związku z tym podkreślić, iż przedstawione powyżej grupy elementów (platforma UAV, systemy sensoryczne, komunikacja, oprogramowanie, przetwarzanie danych, infrastruktura magazynowa) mają charakter przykładowy i wynikają z przeprowadzonych badań terenowych oraz analiz literaturowych. W praktyce, dla innych systemów UAV–AutoID, możliwe jest rozszerzenie lub modyfikacja tego katalogu w zależności od specyfiki środowiska eksploatacyjnego oraz zastosowanej konfiguracji technicznej.

6.2.2. Etap 2 – Identyfikacja warunków eksploatacyjnych

Drugim krokiem metody M-UAV jest identyfikacja warunków eksploatacyjnych, czyli szczegółowe określenie środowiska, w którym realizowana jest misja UAV–AutoID. Etap ten jest niezwykle istotny, ponieważ to właśnie otoczenie stanowi główne źródło zakłóceń oraz w sposób bezpośredni wpływa na niezawodność i efektywność misji inwentaryzacyjnych.

Doświadczenia z badań terenowych pokazują, że nawet identyczna konfiguracja sprzętowa UAV–AutoID może uzyskiwać diametralnie różne wyniki w zależności od warunków eksploatacyjnych. W nowoczesnych obiektach logistycznych systemy UAV cechowały się wysoką skutecznością, natomiast w starszych magazynach manualnych – z ograniczonym oświetleniem, niestandaryzowanymi etykietami i dużym udziałem czynnika ludzkiego – często obserwowano spadek jakości odczytów i niezawodności systemu.

Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów i analiz wyróżniono główne kategorie czynników środowiskowych, które muszą być ujęte w Etapie 2:

1) Warunki przestrzenne – układ i wysokość regałów, szerokość alejek, gęstość zabudowy infrastruktury. Wąskie alejki i złożone układy regałowe ograniczają zasięg systemów lokalizacji i sprzyjają utratom sygnału.
2) Warunki oświetleniowe – natężenie światła oraz jego zmienność (naturalne vs. sztuczne, różnice pomiędzy poziomami regałów). Zmienna iluminacja bezpośrednio wpływa na skuteczność systemów wizyjnych UAV.
3) Warunki fizyczne środowiska – zapylenie, obecność pyłu i wilgotności, a także wahania temperatury. Czynniki te utrudniają poprawne odczyty i obniżają skuteczność sensorów optycznych.
4) Warunki organizacyjne – sposób organizacji pracy, intensywność ruchu transportowego, harmonogramy inwentaryzacji, tryb pracy ciągłej (24/7). To elementy, które zwiększają ryzyko przeciążeń systemu, awarii zasilania i incydentów bezpieczeństwa.
5) Warunki elektromagnetyczne (EMI) – zakłócenia sygnału radiowego spowodowane obecnością metalowych konstrukcji, instalacji elektrycznych i innych urządzeń komunikacyjnych. To krytyczny czynnik destabilizujący działanie UAV w gęsto zabudowanych przestrzeniach.
6) Systemy wspierające – w praktyce UAV–AutoID działa w środowisku współistniejącym z innymi technologiami. Należy tu wymienić:
    - robotyzację procesów magazynowych, obejmującą systemy AMR i AGV, które współdzielą przestrzeń operacyjną z UAV i generują dodatkowe źródła zakłóceń,
    - digitalizację procesów logistycznych, czyli systemy klasy WMS/ERP, których harmonogramy i reguły działania determinują przebieg misji UAV–AutoID,
    - inne systemy automatycznej identyfikacji danych (Auto-ID), takie jak RFID, kody kreskowe czy kody QR, które mogą współdziałać z UAV, ale jednocześnie wprowadzać zróżnicowanie w jakości danych, w zależności od standardu i stanu etykiet.

Wszystkie te kategorie należy zidentyfikować i opisać na wczesnym etapie analizy, ponieważ dopiero ich zestawienie z komponentami UAV–AutoID (Etap 1) pozwala zrozumieć źródła zakłóceń oraz podatności systemu na ich występowanie, jak również przewidywać możliwe konsekwencje zidentyfikowanych zdarzeń niepożądanych.

Podkreślić należy, że katalog warunków eksploatacyjnych nie jest zamknięty – w zależności od charakteru obiektu mogą pojawić się dodatkowe czynniki, takie jak współpraca z autonomicznymi robotami transportowymi, szczególne wymagania regulacyjne dotyczące bezpieczeństwa pracy czy integracja z procesami produkcyjnymi. Niemniej, doświadczenia terenowe jednoznacznie dowodzą, że to właśnie przestrzeń, oświetlenie, warunki organizacyjne, środowisko elektromagnetyczne, a także stopień robotyzacji i digitalizacji, najczęściej determinują poziom odporności systemu UAV–AutoID w praktyce.

Podsumowując, Etap 2 metody M-UAV skupia się na precyzyjnym opisie środowiska misji i jego krytycznych parametrów, które stanowią fundament do dalszej oceny odporności. Analiza warunków eksploatacyjnych jest kluczem do tego, aby zrozumieć realny kontekst działania systemu UAV–AutoID – zarówno w odniesieniu do techniki, jak i organizacji pracy – i właściwie przygotować grunt pod dalsze etapy procedury M-UAV.

6.2.3. Etap 3 – Rejestracja parametrów zrealizowanych misji

Krytycznym elementem pomiaru odporności ex post jest kompleksowe zebranie danych niezbędnych do oceny skuteczności zrealizowanych misji. Z tego względu w ramach Etapu 3 procedury konieczne jest zdefiniowanie zakresu bazy wiedzy, do której raportowane będą dane z realizacji misji wykonywanych w ramach procesów inwentaryzacyjnych. Baza ta stanowi fundament obliczeń wskaźników odporności (Etap 4) oraz podstawę do formułowania rekomendacji (Etap 5).

Zakres rejestrowanych danych obejmuje zarówno parametry ilościowe (czas, liczba, procenty), jak i jakościowe (opis incydentów, obserwacje operatorów). Dzięki temu możliwe jest pełne uchwycenie zarówno wymiaru technicznego, jak i organizacyjnego misji UAV–AutoID. Najważniejsze parametry zostały przedstawione w tabeli 6.1.

Tab. 6.1. Baza wiedzy na potrzeby badania odporności systemu UAV-AutoID

Zakres rejestrowanych danych	Sposób pomiaru	Obszar wykorzystania
Czas operacji – czas trwania misji, czas lotu, czas skanowania jednej lokalizacji	Automatyczne logi UAV, zegary systemowe, pomiary ręczne w przypadku przerw	Ocena dostępności (Availability), porównanie wydajności różnych środowisk
Jakość odczytów – liczba poprawnych odczytów etykiet, liczba błędów odczytu, procent braków	Analiza logów UAV, weryfikacja danych z systemem WMS/ERP	Ocena niezawodności (Reliability) i bezpieczeństwa (Safety)
Stabilność komunikacji – liczba utrat sygnału, czas braku łączności, liczba ponownych połączeń	Rejestr logów komunikacyjnych UAV, monitoring sieci Wi-Fi/LTE	Ocena dostępności i odporności na zakłócenia (Robustness)
Incydenty bezpieczeństwa – kolizje, loty awaryjne, błędne lokalizacje	Raporty operatorów, automatyczne logi awarii, nagrania wideo	Ocena bezpieczeństwa (Safety)

Reakcja systemu na zakłócenia – czas reakcji na błąd, czas odzyskiwania funkcjonalności (Time To Recover)	Analiza logów UAV, pomiary czasu między zdarzeniem a odzyskaniem funkcji	Ocena odporności (Resilience)
Warunki środowiskowe – oświetlenie (lux), poziom hałasu, zapylenie, zakłócenia elektromagnetyczne	Czujniki środowiskowe, obserwacje operatorów, dane z BMS (Building Management Systems)	Powiązanie zdarzeń z warunkami eksploatacyjnymi (Etap 2)
Interakcje z innymi systemami – RFID, roboty AMR/AGV, integracja z systemami cyfrowymi	Logi systemowe, obserwacje współdziałania technologii	Analiza wpływu robotyzacji i digitalizacji na odporność UAV–AutoID
Parametry energetyczne – stan i zużycie energii, spadki napięcia, cykle ładowania, czas pracy baterii, temperatura ogniw	Logi UAV i BMS, statystyki ładowań, pomiary temperatury ogniw	Planowanie misji/rotacji, dostępność energetyczna, wpływ temperatury na odporność
Parametry pozycjonujące – dryf VIO, błąd lokalizacji względem znaczników ArUco i layoutu, liczba korekt trajektorii	Logi VIO/VSLAM, porównanie z mapą referencyjną, analiza znaczników ArUco	Bezpieczeństwo lotu, wiarygodność lokalizacji, wskaźniki odporności (W_WM, W_BL)
Parametry niezawodnościowe – MTBF/MTTR, liczba awarii krytycznych, restartów, wymian komponentów	Logi awarii UAV, dzienniki serwisowe, analiza czasów napraw (T_TR)	Ocena długoterminowej niezawodności i odporności, filar odtworzenia systemu
Jakość obrazu – ostrość, kontrast, SNR, refleksy świetlne, zasłonięcia etykiet	Analiza próbek obrazów, metryki jakości obrazu, obserwacje operatorów	Diagnoza przyczyn błędów, doskonalenie algorytmów i warunków środowiskowych

Źródło: Opracowanie własne

Komentarze do Tabeli 6.1.:

1) Czas operacji. Parametry czasu – całkowity czas misji, czas lotu oraz czas skanowania jednej lokalizacji – stanowią podstawowy miernik sprawności systemu UAV–AutoID. W literaturze (Dereń, Żurek, 2023) wskazywano, że różnice w długości cyklu inwentaryzacyjnego są jednym z głównych argumentów biznesowych za wdrażaniem BSP. Dodatkowo dekomponacja czasu na fazy (start, tranzyt, akwizycja, powrót) oraz stosowanie miar percentylowych (P50/P90) ułatwiają wykrycie wąskich gardeł. Wartości te są łatwo rejestrowalne i pozwalają nie tylko porównać system UAV z metodami tradycyjnymi, ale także ocenić, w jakim stopniu zakłócenia

środowiskowe i organizacyjne wydłużają poszczególne etapy misji oraz wpływają na spełnienie SLA.

2) Jakość odczytów. Liczba poprawnych i błędnych odczytów etykiet oraz procent braków bezpośrednio odzwierciedlają zdolność systemu UAV do realizacji głównego celu misji – akwizycji danych. W publikacjach z Bojnic i Pragi wskazano, że niestandardowe etykiety, odbicia światła i częściowe zasłonięcia to najczęstsze przyczyny błędów. Uzupełniająco warto raportować metryki typu precision/recall oraz F1 na próbkach z weryfikacją wobec bazy WMS (ground truth), co zwiększa wiarygodność oceny. Dlatego pomiar jakości odczytów należy traktować jako kluczowy element oceny niezawodności i bezpieczeństwa systemu, gdyż ma on wymierne przełożenie na jakość bazy danych logistycznych i skuteczność procesów downstream.

3) Jakość obrazu. Parametry wizualne, takie jak ostrość, kontrast, poziom szumu (SNR) czy refleksy na folii ochronnej, wpływają na czytelność etykiet i wydajność algorytmów przetwarzania obrazu. Jak pokazano w badaniach terenowych (Meyer, Schorer, Żurek, Hinz 2025), degradacja jakości obrazu może być równie istotnym źródłem błędów jak sam proces odczytu. W praktyce pomocne jest stosowanie wskaźników jakości klatki (np. miar ostrości) oraz adnotacji operatorów. Oddzielenie jakości obrazu od jakości odczytów pozwala na precyzyjniejsze diagnozowanie przyczyn zakłóceń i lepsze planowanie działań korygujących (ekspozycja, optyka, osłony).

4) Stabilność komunikacji. Parametry związane z liczbą utrat sygnału, czasem braku łączności i koniecznością ponownych połączeń są wskaźnikami krytycznymi dla dostępności i odporności na zakłócenia. Testy opisywane na ESREL (Irlandia) pokazały, że nawet krótkie zakłócenia wywołują luki w odczytach i obniżają spójność bazy. Warto uzupełniać pomiary o RSSI, jitter i opóźnienia (QoS), a także rejestrować przełączenia kanałów/redundancję łącza. Rejestracja logów komunikacyjnych umożliwia późniejszą korelację z warunkami środowiskowymi (EMI, przesłonięcia regałowe) i topologią sieci.

5) Incydenty bezpieczeństwa. Rejestrowanie kolizji, lotów awaryjnych i błędnych lokalizacji stanowi wskaźnik bezpieczeństwa, który z jednej strony obrazuje ryzyko dla UAV, z drugiej – potencjalne zagrożenia dla otoczenia (operatorów, infrastruktury). W publikacjach (Tubis, Ryczyński, Żurek, 2021) wykazano, że w magazynach o gorszej infrastrukturze (nierówne posadzki, oświetlenie punktowe) częstość incydentów rośnie. Włączanie zapisów „near miss", checklist przedstartowych i czasów reakcji operatora pozwala budować profil ryzyka zgodny z zasadą ALARP i uwiarygadnia analizę ex post.

6) Reakcja systemu na zakłócenia. Czas reakcji na błąd i czas odzyskania funkcjonalności po zakłóceniu (T_TR) są bezpośrednio powiązane z odpornością (resilience). Badania we Francji (Meyer, Schorer, Żurek, Hinz 2025) pokazały, że algorytmy korekcji obrazu, tryby degradacji (degraded modes) i redundancja komunikacyjna skracają T_TR oraz poprawiają kontynuację misji. Warto rejestrować także MTTD (Mean Time To Detect), liczbę udanych restartów oraz skuteczność samoczynnego przeplanowania trajektorii – to metryki różnicujące systemy odporne od jedynie niezawodnych.

7) Warunki środowiskowe. Pomiar oświetlenia (lux), zapylenia, hałasu i zakłóceń elektromagnetycznych pozwala powiązać zdarzenia z konkretnym kontekstem eksploatacyjnym. W pracach (Tubis, Poturaj, Dereń, Żurek, 2024) podkreślono, że nieuwzględnienie środowiska prowadzi do błędnych wniosków – ten sam komponent może uzyskać odmienne wskaźniki w różnych lokalizacjach. Użyteczne jest tworzenie „profili środowiskowych" stref magazynu oraz łączenie ich z mapą jakości obrazu/odczytu, co stanowi drugi wymiar analizy odporności metody M-UAV.

8) Interakcje z innymi systemami. Integracja z RFID, AGV/AMR oraz systemami cyfrowymi (WMS/ERP, hurtownie danych) wprowadza nowe źródła zakłóceń, nierzadko emergentnych – powstających na styku technologii. Badania z Pragi wskazują, że latencja API, zatory w kolejkach komunikatów oraz „wyścigi" procesów mogą degradować jakość danych. Systematyczny monitoring tych interfejsów (czasów odpowiedzi, błędów integracyjnych) jest zatem obowiązkowy w Etapie 3, aby prawidłowo przypisać przyczyny odchyleń.

9) Parametry energetyczne. Dane o stanie naładowania (SoC), głębokości rozładowania (DoD), spadkach napięcia pod obciążeniem, temperaturze ogniw i cyklach ładowania są kluczowe dla gotowości operacyjnej UAV. W niskich temperaturach istotnie skraca się czas lotu, co bezpośrednio wpływa na dostępność i planowanie rotacji floty. Warto stosować licznik ładunku (coulomb counting) i profilować zużycie względem faz misji, aby minimalizować ryzyko przerwania zadań i lepiej prognozować T_SOAR (state of available range).

10) Parametry pozycjonujące. Dokładność pozycjonowania, dryf VIO oraz liczba korekt trajektorii odzwierciedlają jakość lokalizacji i mapowania w środowisku bez GPS. Istotne są gęstość i rozmieszczenie znaczników ArUco, jakość mapy layoutu oraz widoczność punktów charakterystycznych. Rejestracja utrat śledzenia, rekonfiguracji filtra (np. Kalman) i resekcji pozwala ocenić wpływ geometrii regałów oraz przesłonięć na bezpieczeństwo lotu i wiarygodność lokacji jednostek ładunkowych.

11) Parametry niezawodnościowe. MTBF/MTTR, liczba awarii krytycznych, restartów i wymian komponentów opisują trwałość systemu w horyzoncie długookresowym. Kluczowe jest rozróżnienie awarii sprzętowych i programowych (taksonomia usterek) oraz prowadzenie trendów w czasie (run charts), co wspiera decyzje o prewencji i doskonaleniu. Dane te zasilają wskaźniki odtworzeniowe (T_TR, W_D) i są fundamentem oceny odporności w filarze niezawodności.

Podsumowanie w tabeli obejmuje komplet danych niezbędnych do rzetelnej oceny odporności UAV–AutoID, łącząc wymiar techniczny (czas misji, jakość odczytów, jakość obrazu, energia, pozycjonowanie, komunikacja) z wymiarem środowiskowym i organizacyjnym (bezpieczeństwo, interakcje z systemami). Dzięki temu możliwe jest nie tylko uchwycenie bezpośrednich efektów zakłóceń, ale też identyfikacja ich kontekstu i źródeł. W badaniach terenowych i literaturze wielokrotnie wykazywano, że pominięcia w tych obszarach prowadzą do błędnych wniosków: na ESREL (Irlandia) utrata Wi-Fi obniżała dostępność; w Bojnicach potwierdzono wpływ jakości etykiet i oświetlenia na błędy odczytu; w Pradze zwrócono uwagę na krytyczne znaczenie integracji UAV z RFID i AMR; natomiast w pracy (Dereń, Żurek, 2023) podkreślono, że parametry czasu, odczytów i niezawodności muszą być rejestrowane systematycznie jako podstawa analizy ex post. Ustalenia (Tubis, Poturaj, Dereń, Żurek, 2024) pokazały, że włączenie metryk środowiskowych (zapylenie, hałas, oświetlenie) zwiększa wartość interpretacyjną metody.

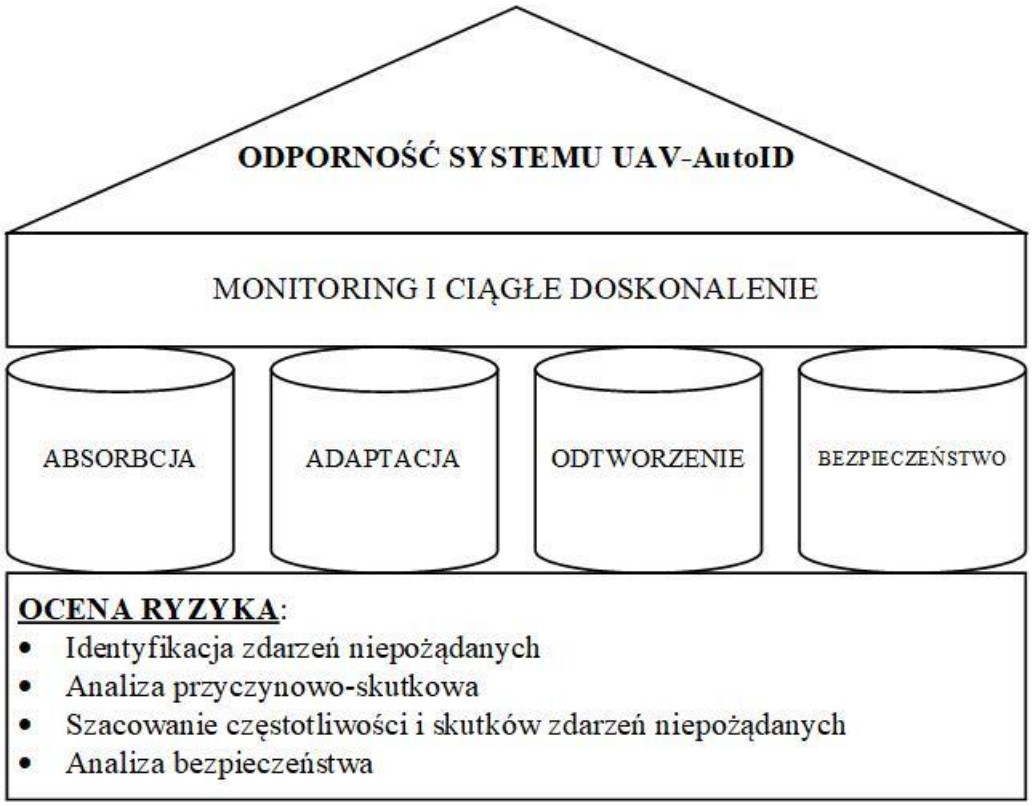
Rejestracja pełnego zestawu w Etapie 3 spina zdarzenia misji z obliczeniami wskaźników odporności i stanowi pomost między obserwacją a rekomendacją doskonalącą system UAV–AutoID – co przesądza o wiarygodności i praktycznej użyteczności metody.

6.2.4. Etap 4: Ocena odporności systemu UAV-AutoID

Ocena odporności systemu, zgodnie z przyjętymi założeniami, następuje po zakończeniu inwentaryzacji (ocena *ex post*), na podstawie danych zgromadzonych w ramach Etapu 3. Ocena ta wykorzystuje zdefiniowany system wskaźników i mierników, zbudowany na bazie czterech filarów tworzących dom odporności dla procesu inwentaryzacji z wykorzystaniem systemu UAV. Zdefiniowane filary odporności odwołują się do faz reakcji systemu na występujące zakłócenie, gdzie:

- ABSORBCJA odnosi się do utrzymania przez system jakości odczytów w chwili pojawienia się zakłócenia oraz zapewnienia skuteczności realizowanych misji.
- ADAPTACJA odnosi się do reakcji systemu na występujące zakłócenia, a w szczególności do dostosowania się systemu do skutków zakłócenia.
- ODTWORZENIE odnosi się do powrotu systemu do oczekiwanego poziomu po wystąpieniu zakłócenia.
- BEZPIECZEŃSTWO odnosi się do pomiaru poziomu bezpieczeństwa funkcjonowania systemu (generowania sytuacji niebezpiecznych).

Schemat domu odporności został przedstawiony na rysunku 6.2.



Rys. 6.2. Dom odporności systemu UA-AutoID
Źródło: Opracowanie własne

Bazą dla budowania odporności systemów UAV-AutoID jest prawidłowo przeprowadzona ocen ryzyka, która powinna być stale aktualizowana na podstawie danych pochodzących z monitoringu, który rejestruje dane zdefiniowane przez decydentów. Odporność budowana jest w oparciu o rekomendowane modyfikacja i uzupełnienia będące podstawą dla ciągłego doskonalenia procesu realizacji.

Każdy z filarów wskazanych w domu odporności obejmuje grupę wskaźników i mierników pozwalających ocenić faktyczną realizację misji wykonywanych przez system UAV-AutoID oraz skuteczność uzyskanych rezultatów. Szczegółowa charakterystyka zdefiniowanych wskaźników została przedstawiona w tabeli 6.2.

Tab. 6.2. Zbiór wskaźników i mierników opisujących filary odporności systemu UAV-AutoID

Nazwa wskaźnika	Sposób obliczenia	Legenda
WSKAŹNIKI ABSORBCJI		
Wskaźnik pokrycia skanowania (W_PK)	$\frac{N_{odczyt}}{N_{plan}} \times 100\%$	N_{odczyt}- liczba odczytanych etykiet N_{plan} – liczba zaplanowanych obiektów do inwentaryzacji
Wskaźnik fałszywych odczytów (W_FO)	$\frac{N_{błędne}}{N_{plan}} \times 100\%$	N_{odczyt}- liczba błędnych odczytów N_{plan} – liczba zaplanowanych obiektów do inwentaryzacji
Wskaźnik wykonania misji (W_WM)	$\frac{N_{full_odczyt}}{N_{plan}} \times 100\%$	N_{odczyt}- liczba skanów z pełnym odczytem N_{plan} – liczba zaplanowanych obiektów do inwentaryzacji
WSKAŹNIKI ADAPTACJI		
Czas reakcji na błędny pomiar (T_RBP)	$\Delta T_{rescan} = t_{sukces} - t_{błąd}$	$t_{błąd}$– czas wykrycia nieudanego odczytu t_{sukces} – czas skutecznego powtórzenia skanowania
Wskaźnik sukcesu przekierowania (W_SP)	$\frac{N_{SZ}}{N_{Zator}} \times 100\%$	N_{SZ}- liczba skutecznie ominiętych zatorów bez przerwania misji N_{Zator} – łączna liczba zarejestrowanych zatorów
Czas reakcji na zakłócenie (T_RZ)	$\Delta T_{reakcji} = t_{działanie} - t_{alert}$	$t_{działanie}$– czas podjęcia działania przez operatora t_{alert} – czas zgłoszenia alertu
WSKAŹNIKI ODTWORZENIA		
Czas naprawy	$\Delta T_{repair} = t_{ready} - t_{failur}$	t_{ready}– czas przywrócenia

(T_TR)		gotowości do pracy t_{failur} – czas wystąpienia uszkodzenia
Wskaźnik dostępności (W_D)	$\frac{MTBF}{MTBF + MT_TR}$	$MTBF$ – średni czas dostępności operacyjnej MT_TR – średni czas naprawy
Czas odzyskiwania danych inwentaryzacyjnych (T_ODI)	$\mathrm{MT_{UB}} + \mathrm{MT_{UR}}$	$\mathrm{MT_{UB}}$– średni czas usuwania błędnych danych $\mathrm{MT_{UR}}$ – średni czas uzupełnienia brakujących rekordów / lokacji po zakończeniu misji
WSKAŹNIKI BEZPIECZEŃSTWA		
Wskaźnik niebezpiecznych incydentów (W_NI)	$\frac{N_{incydent}}{N_{misja}}$	$N_{incydent}$- liczba incydentów z udziałem drona N_{misja} – liczba misji zrealizowanych przez drona
Wskaźnik błędu lokacji (W_BL)	$\frac{N_{lokal}}{N_{misja}}$	N_{lokal}- liczba zarejestrowanych błędnych lokalizacji dla drona N_{misja} – liczba misji zrealizowanych przez drona

Źródło: Opracowanie własne

Wskaźniki i mierniki opisane w tabeli 6.2 zostały zdefiniowane na podstawie wywiadów z ekspertami (menedżerowie zarządzający procesami inwentaryzacyjnymi w różnych środowiskach eksploatacyjnych oraz inżynierowie tworzący i obsługujący systemy UAV-AutoID). Stanowią one bazę wskaźników, które powinny być przedmiotem oceny odporności dla badanych systemów. Zbiór ten jednak nie ma charakteru zmiennego i decydenci, w zależności od zgłaszanych potrzeb, mogą ten zbiór uzupełniać lub odpowiednio modyfikować. Należy jednak wskazać, że zakres pomiarów wskazany w tabeli 6.2 został w całości zaakceptowany przez decydentów firmy Neurospace i na jego podstawie realizowana była kompleksowa ocena odporności w ramach weryfikacji metody M-UAV.

Jednocześnie należy podkreślić, iż w tabeli 6.2 w przypadku mierników odnoszących się do czasów, przedstawiono sposoby pomiaru pojedynczych zdarzeń niepożądanych. Jednak dla celów analitycznych stosuje się zazwyczaj średnie czasu rejestrowane w trakcie realizacji wszystkich misji wykonywanych w ramach realizowanego procesu inwentaryzacji.

Dla zdefiniowanego zbioru wskaźników i mierników budowana jest macierz oceny odporności systemu UAV_AutoID. Macierz ta budowana jest na 4-poziomowym modelu ocen odporności w oparciu o przyjęte wartości referencyjne dla każdego dokonywanego pomiaru przypisanego do każdego z czterech filarów. Poziomu modelu oceny odporności zostały przedstawione w tabeli 6.3.

Tab. 6.3. Charakterystyka poziomów oceny odporności

Nazwa poziomu	**Charakterystyka poziomu odporności**
Poziom 1: Podstawowy	System działa w sposób ad hoc, bez jasno zdefiniowanych procedur ani mechanizmów kontroli jakości danych. Odporność na zakłócenia jest minimalna – każde zakłócenie powoduje przerwanie misji lub poważne błędy odczytu. System nie posiada narzędzi do szybkiego przywracania integralności danych po incydencie.
Poziom 2: Rozwojowy	System posiada podstawowe procedury obsługi błędów i pierwsze mechanizmy redundancji. Zakłócenia mogą nadal istotnie obniżać skuteczność misji, ale istnieją już proste procedury ponawiania odczytów i ręcznego uzupełniania danych. Integracja funkcji adaptacyjnych jest w toku, a system jest rekomendowany do dalszego doskonalenia.
Poziom 3: Odporny	System jest w stanie samodzielnie absorbować i adaptować się do większości zakłóceń dzięki wbudowanym algorytmom korekcji, automatycznemu dostrajaniu parametrów oraz planowaniu alternatywnych tras. Dane inwentaryzacyjne pozostają spójne, a czas potrzebny na odzyskanie pełnej funkcjonalności po incydencie jest krótki. Misje realizowane są z wysoką skutecznością i ograniczoną liczbą błędów
Poziom 4: Pożądany	System nie tylko adaptuje się do zakłóceń, ale także uczy się na podstawie incydentów i wprowadza mechanizmy ciągłego doskonalenia. Odporność obejmuje zarówno poziom techniczny (drony, sensory, łączność), jak i procesowy (integracja z systemem WMS/ERP). Inwentaryzacja realizowana jest w sposób w pełni niezawodny i zoptymalizowany, przy minimalnym udziale operatora.

Źródło: Opracowanie własne

Wartości referencyjne powinny być ustalane przez decydentów względem ocenianego systemu UAV_AutoID i zidentyfikowanego środowiska jego eksploatacji. Z tego też względu macierz referencyjna przedstawiona na rysunku 6.3 stanowi jedynie schemat poglądowy, prezentujący reguły tworzenia macierzy.

		POZIOMY ODPORNOŚCI - WARTOŚCI REFERENCYJNE (WR)			
		POZIOM 1	POZIOM 2	POZIOM 3	POZIOM 4
WSKAŹNIKI ABSORBCJI	Wskaźnik pokrycia skanowania (W_PK)	WR_P1 dla W_PK	WR_P2 dla W_PK	WR_P3 dla W_PK	WR_P4 dla W_PK
	Wskaźnik fałszywych odczytów (W_FO)	WR_P1 dla W_FO	WR_P2 dla W_FO	WR_P3 dla W_FO	WR_P4 dla W_FO
	Wskaźnik wykonania misji (W_WM)	WR_P1 dla W_WM	WR_P2 dla W_WM	WR_P3 dla W_WM	WR_P4 dla W_WM
	Wskaźnik integralności danych (W_ID)	WR_P1 dla W_ID	WR_P2 dla W_ID	WR_P3 dla W_ID	WR_P4 dla W_ID
WSKAŹNIKI ADAPTACJI	Czas reakcji na błędny pomiar (T_RBP)	WR_P1 dla T_RBP	WR_P2 dla T_RBP	WR_P3 dla T_RBP	WR_P4 dla T_RBP
	Wskaźnik sukcesu przekierowania (W_SP)	WR_P1 dla W_SP	WR_P2 dla W_SP	WR_P3 dla W_SP	WR_P4 dla W_SP
	Czas reakcji na zakłócenie (T_RZ)	WR_P1 dla T_RZ	WR_P2 dla T_RZ	WR_P3 dla T_RZ	WR_P4 dla T_RZ
WSKAŹNIKI ODTWORZENIA	Czas naprawy (T_TR)	WR_P1 dla T_TR	WR_P2 dla T_TR	WR_P3 dla T_TR	WR_P4 dla T_TR
	Wskaźnik dostępności (W_D)	WR_P1 dla W_D	WR_P2 dla W_D	WR_P3 dla W_D	WR_P4 dla W_D
	Czas odzyskiwania danych inwentaryzacyjnych (T_ODI)	WR_P1 dla T_ODI	WR_P2 dla T_ODI	WR_P3 dla T_ODI	WR_P4 dla T_ODI
WSKAŹNIKI BEZPIECZEŃSTWA	Wskaźnik niebezpiecznych incydentów (W_NI)	WR_P1 dla W_NI	WR_P2 dla W_NI	WR_P3 dla W_NI	WR_P4 dla W_NI
	Wskaźnik błędu lokacji (W_BL)	WR_P1 dla W_BL	WR_P2 dla W_BL	WR_P3 dla W_BL	WR_P4 dla W_BL

Rys. 6.3. Schemat macierzy referencyjnej
Źródło: Opracowanie własne

Macierz referencyjna jest podstawą dla oceny odporności w proponowanej metodzie M-UAV, gdyż na jej podstawie następuje przypisanie bieżących wartości analizowanych wskaźników i mierników do odpowiedniego poziomu odporności. Bieżąca wartość wskaźnika odnoszona jest do wartości referencyjnych zdefiniowanych w macierzy i na tej podstawie zostaje przypisany jeden z czterech poziomów odporności. Proponowany schemat analiz danych i ich prezentacji został przedstawiony na rysunku 6.4.

		MACIERZ OCENY	
		Wartość bieżąca (WB)	Przypisany poziom odporności wg WR
WSKAŹNIKI ABSORBCJI	Wskaźnik pokrycia skanowania (W_PK)	WB dla W_PK	P_3 wg WR
	Wskaźnik fałszywych odczytów (W_FO)	WB dla W_FO	P_3 wg WR
	Wskaźnik wykonania misji (W_WM)	WB dla W_WM	P_2 wg WR
	Wskaźnik integralności danych (W_ID)	WB dla W_ID	P_1 wg WR
WSKAŹNIKI ADAPTACJI	Czas reakcji na błędny pomiar (T_RBP)	WB dla T_RBP	P_3 wg WR
	Wskaźnik sukcesu przekierowania (W_SP)	WB dla W_SP	P_4 wg WR
	Czas reakcji na zakłócenie (T_RZ)	WB dla T_RZ	P_1 wg WR
WSKAŹNIKI ODTWORZENIA	Czas naprawy (T_TR)	WB dla T_TR	P_2 wg WR
	Wskaźnik dostępności (W_D)	WB dla W_D	P_2 wg WR
	Czas odzyskiwania danych inwentaryzacyjnych (T_ODI)	WB dla T_ODI	P_1 wg WR
WSKAŹNIKI BEZPIECZEŃSTWA	Wskaźnik niebezpiecznych incydentów (W_NI)	WB dla W_NI	P_3 wg WR
	Wskaźnik błędu lokacji (W_BL)	WB dla W_BL	P_2 wg WR

Rys. 6.4. Schemat macierzy oceny
Źródło: Opracowanie własne

Ostatnim elementem Etapu 4 jest ocena ryzyka realizowana w systemie ex-post. Celem przeprowadzanej oceny jest identyfikacja wszystkich zdarzeń niepożądanych, które wystąpiły w trakcie realizacji inwentaryzacji oraz analiza przyczyn i skutków ich występowania. Na podstawie uzyskanych rezultatów możliwe jest oszacowanie wskaźników ryzyka (RPN) dla zarejestrowanych zdarzeń, który kalkulowany będzie zgodnie z wzorem (1).

$$RPN_i = CZN_i \times SZN_i \qquad (1)$$

Gdzie:

RPN_i – wskaźnik ryzyka wystąpienia zdarzenia *i*

CZN_i – miara częstotliwości występowania zdarzenia *i*

SZN_i – miara skutków wystąpienia zdarzenia *i*

Do opisania częstotliwości i skutków występowania zdarzeń niepożądanych rekomenduje się wykorzystanie zmiennych lingwistycznych zgodnie ze schematem przedstawionym w tabeli 6.4. Wartości przypisane poszczególnym zmiennych lingwistycznym zostały zdefiniowane na podstawie badań własnych w analizowanym systemie UAV-AutoID. Zakres szacowanych wartości można jednak dostosować do ocenianego systemu i wymagań decydentów.

Tab. 6.4. Zmienne lingwistyczne i przypisane im wartości dla oceny częstotliwości i skutków występujących zdarzeń niepożądanych

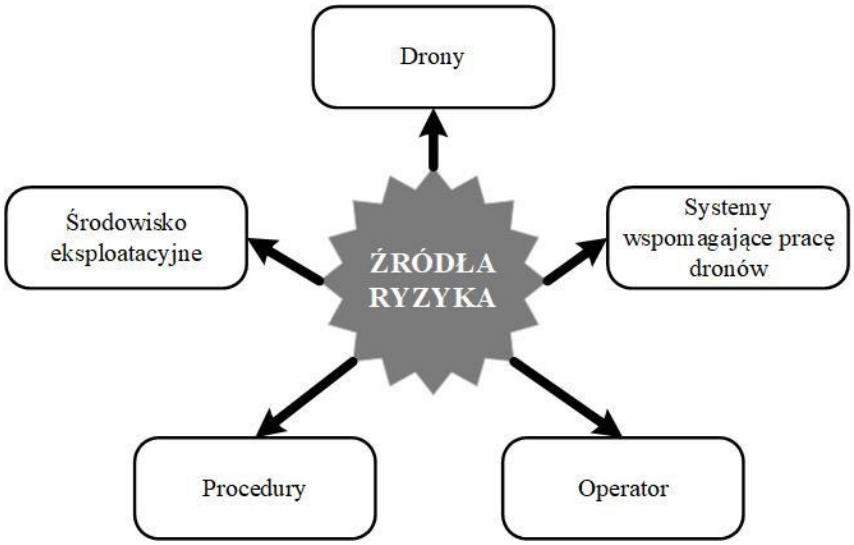
Wartość lingwistyczna	**Nadana wartość liczbowa**	**Opis semantyczny**
Zmienna lingwistyczna – częstotliwość występowania zdarzenia niepożądanego		
Sporadycznie	1	1 raz na 51 lub więcej wykonanych misji
Okazjonalnie	2	1 raz na 11 – 50 misji
Czasami	3	1 raz na 6 – 10 misji
Często	4	1 raz na 2 – 5 misji
Nagminnie	5	Przynajmniej 1 raz na misję
Zmienna lingwistyczna – skutki występowania zdarzenia niepożądanego		
Nieistotne	1	Niewielki wpływu na wyniki misji
Niewysokie	2	Zakłócenia powodujące opóźnienie w realizacji usługi lub brak oczekiwanych efektów misji (pod względem jakości i kompletności wykonanych pomiarów)
Znaczące	3	Brak możliwości rozpoczęcia misji, konieczność przesunięcia realizacji usługi na późniejszy termin. Konieczność przerwania misji. Konieczność powtórzenia misji.
Wysokie	4	Brak kompletnej realizacji misji, rozbicie lub trwałe uszkodzenie dronu
Katastroficzne	5	Brak kompletnej realizacji misji, uszkodzenie majątku klienta, utrata zlecenia / klienta

Źródło: Opracowanie własne

Przy tak określonych miarach częstotliwości i skutków występowania zdarzeń niepożądanych maksymalna wartość wskaźnika RPN wynosi 25, natomiast minimalna = 1.

Analiza przyczynowo-skutkowa powinna uwzględniać zarówno podejście inżynierskie, jak i procesowe. Z tego też względu przyczyny występujących zdarzeń niepożądanych powinny

być identyfikowane według pięciu źródeł generujących zagrożenie dla skuteczności realizowanych misji inwentaryzacyjnych. Proponowana klasyfikacja jest zgodna z podejściem cyber-socjo-technicznym przedstawionym przez Tubis (2024). Źródła dla identyfikowanych zdarzeń niepożądanych zostały przedstawione na rysunku 6.5.



Rys. 6.5. Źródła generujące ryzyko
Źródło: Opracowanie własne

Podsumowując należy stwierdzić, iż wyniki analizy przyczynowo-skutkowej pozwalają na przygotowanie rekomendacji dotyczących wymaganych zmian ukierunkowanych na budowanie odporności ocenianego systemu (Etap 5 metody M-UAV). Natomiast wskaźniki RPN umożliwiają nadanie priorytetów dla ich implementacji w wykorzystywanym systemie UAV oraz obowiązujących procedurach realizacji misji inwentaryzacyjnych.

6.2.5. Etap 5: Ewaluacja i przygotowanie rekomendacji

Na podstawie kalkulacji wskaźników odporności i przypisanemu im poziomowi odporności, decydenci mogą wskazać obszary wymagające wprowadzenia zmian ukierunkowanych na zwiększanie odporności systemu. Nie zawsze jednak jest możliwe wprowadzanie równolegle zmian we wszystkich elementach funkcjonowania procesu. Dlatego też przed przygotowaniem rekomendacji do zmian konieczne jest nadanie priorytetów w budowaniu odporności dla wyróżnionych czterech filarów. Na przykład decydenci mogą uznać, że wyższy priorytet należy nadać bezpieczeństwu niż adaptacji.

Decyzje w tym obszarze mogą być wspierane przez wyniki oceny ryzyka, które wskazują źródło ryzyka, ale również wskaźniki RPN dla występujących zdarzeń niepożądanych. Źródło występującego ryzyka wpływa na:

- skuteczność oddziaływania na źródło (np. jeżeli źródłem jest otoczenie to poziom kontroli jest ograniczony, jeżeli źródłem jest procedura to mamy możliwości pełnego oddziaływania na nią);
- koszty wdrażanych zmian (np. modyfikacja procedury może być bezkosztowa, a zakup nowych dronów może stanowić istotne obciążenie kosztowe);

- złożoność wprowadzanych modyfikacji (np. jeżeli źródłem są systemy wspomagające to może to oznaczyć konieczność przeprojektowania krytycznych elementów systemu);
- czas reakcji systemu na wprowadzone zmiany (np. efekt szkolenia operatora może być przesunięty w czasie, gdyż musi on nabyć doświadczenie w stosowaniu nowych umiejętności).

Wskaźniki RPN występujących zdarzeń niepożądanych nakładają natomiast priorytety dla definiowanych rekomendacji, wskazujące na kolejność ich wprowadzania oraz graniczne terminy implementacji. Do ich analizy może być wykorzystana klasyczna macierz ryzyka przedstawiona na rysunku 6.6. Macierz ta pozwala określić poziom akceptowalnej wartości wskaźników RPN oraz priorytety dla działań ukierunkowanych na mitygację ryzyka.

			SKUTKI				
			Nieistotne	Niewysokie	Znaczące	Wysokie	Katastroficzne
			1	2	3	4	5
CZĘSTOTLIWOŚĆ	Nagminnie	5					
	Często	4					
	Czasami	3					
	Okazjonalnie	2					
	Sporadycznie	1					
	LEGENDA:		ryzyko akceptowalne	niskie ryzyko	średnie ryzyko	wysokie ryzyko	

Rys. 6.6. Macierz oceny ryzyka
Źródło: Opracowanie własne

Rekomendowane zmiany, ukierunkowane na budowanie odporności we wszystkich 4 filarach (absorbcja, adaptacja, odtworzenie, bezpieczeństwo), powinny się odnosić do:

- poszczególnych elementów tworzących system UAV-AutoID (drony + systemy wspomagające ich pracę),
- procedur (w tym przede wszystkim tworzenia procedur awaryjnych na wypadek wystąpienia zakłócenia);
- załogi i decydentów zaangażowanych w proces inwentaryzacji.

Podsumowując należy wskazać, iż rezultatem etapu 5 metody M-UAV jest lista rekomendowanych zmian ukierunkowanych na budowanie odporności, z nadanymi priorytetami wdrażania uwzględniającymi efektywność implementacji oraz zakres oddziaływania na proces inwentaryzacji.

Podsumowanie

Rozdział szósty stanowi część koncepcyjną prowadzonych badań, których rezultatem jest modelowy opis metody oceny odporności M-UAV. Zdefiniowano tu pełny, pięcioetapowy tryb oceny ex post, oparty na identyfikacji elementów systemu UAV–AutoID, charakterystyce środowiska eksploatacyjnego, rejestracji danych z misji, obliczaniu wskaźników oraz formułowaniu rekomendacji. Trzonem metody jest dom odporności z czterema filarami: absorpcja, adaptacja, odtworzenie, bezpieczeństwo. Każdy filar otrzymał zestaw mierników i jednoznaczne reguły kalkulacji.

Wprowadzono macierz referencyjną 4-poziomowej oceny, która pozwala przypisywać bieżące wyniki do poziomów dojrzałości odporności – od podstawowego po pożądany. Uzupełnia ją analiza ryzyka ex post z wykorzystaniem wskaźnika RPN i zmiennych lingwistycznych, co nadaje priorytety działaniom korygującym. Metoda integruje wymiar techniczny (platforma UAV, sensory, łączność, oprogramowanie), organizacyjny (procedury, obsada, harmonogramy) i środowiskowy (oświetlenie, EMI, układ regałów), dzięki czemu diagnozuje nie tylko incydenty, ale i ich przyczyny. Zdefiniowana baza wiedzy pomiarowej obejmuje czas operacji, jakość odczytów, stabilność komunikacji, incydenty bezpieczeństwa, reakcję na zakłócenia, parametry środowiskowe oraz interakcje z innymi systemami (RFID, AMR/AGV, WMS/ERP). Ta struktura danych gwarantuje porównywalność misji między lokalizacjami i pozwala śledzić trend odporności w czasie.

ROZDZIAŁ 7

IMPLEMENTACJA METODY M-UAV W RZECZYWISTYM ŚRODOWISKU MAGAZYNOWYM – PRZYKŁADY WDROŻEŃ

7.1. Charakterystyka przedsiębiorstwa NeuroSpace sp. z o.o.

Firma NeuroSpace sp. z o.o., powstała w 2019 roku we Wrocławiu jako spin-off przedsiębiorstwa Neurosoft, specjalizuje się w opracowywaniu i wdrażaniu autonomicznych systemów bezzałogowych statków powietrznych przeznaczonych do zastosowań w logistyce i przemyśle 4.0. Od początku swojej działalności spółka rozwijała kompleksowe, autorskie rozwiązanie UAV–AutoID obejmujące zarówno konstrukcję sprzętową dronów, jak i dedykowane oprogramowanie sterujące i analityczne.

Własne laboratorium badawczo-rozwojowe we Wrocławiu umożliwiało projektowanie i produkcję komponentów z wykorzystaniem technologii addytywnych (druk 3D), montaż autorskiego hardware'u, a także implementację specjalistycznego oprogramowania. W ramach prac rozwojowych opracowano system NeuroSpace Autonomous Drone Indoor Inventory 2.0, dedykowany autonomicznej inwentaryzacji w przestrzeniach zamkniętych, w tym w centrach dystrybucyjnych, halach przemysłowych, magazynach wysokiego składowania i obiektach przyprodukcyjnych.

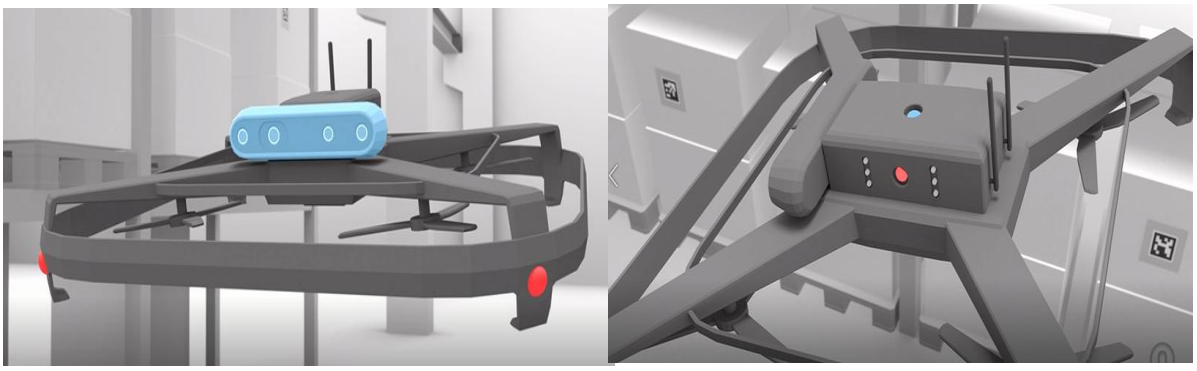
System integruje elementy sprzętowe i programowe w jeden spójny ekosystem UAV–AutoID. Każdy z dronów wyposażony został w cztery kamery oraz zestaw sensorów (m.in. stereoskopowych i 3D, RFID), co pozwala na jednoczesną identyfikację jednostek ładunkowych i orientację przestrzenną. Oprogramowanie, rozwijane w oparciu o samoorganizujące się sieci neuronowe, odpowiada za planowanie misji, zarządzanie flotą UAV oraz analizę danych, zapewniając pełną autonomię w realizacji misji inwentaryzacyjnych. Centralnie umieszczona jednostka obliczeniowa umożliwia przetwarzanie sygnałów z wielu czujników w czasie rzeczywistym, co gwarantuje wysoką precyzję i powtarzalność procesu.

W ramach działalności spółki przeprowadzono ponad 20 testów systemu w warunkach rzeczywistych, zarówno w Polsce, jak i za granicą (Czechy, Francja). Przełomowym wydarzeniem było zrealizowanie w 2020 roku w Radomiu pierwszej w Europie komercyjnej inwentaryzacji dronem w magazynie wysokiego składowania. Wydarzenie to spotkało się z szerokim uznaniem branży logistycznej i stało się punktem wyjścia do dalszych prac badawczo-rozwojowych.

Za swoje osiągnięcia NeuroSpace otrzymał prestiżowe wyróżnienia, w tym Dolnośląską Nagrodę Jakości (NOT) oraz nagrodę „Produkt Innowacyjny dla Logistyki, Transportu i Produkcji" (Eurologistics 2021). Dodatkowym efektem działalności innowacyjnej spółki było powołanie klastra „Dolnośląska Dolina Autonomicznych Dronów" zainicjowanego wspólnie z Politechniką Wrocławską i Gminą Wrocław, którego celem jest prowadzenie prac badawczo-rozwojowych nad wykorzystaniem dronów w logistyce i przemyśle oraz budowa środowiska wspierającego rozwój technologii UAV.

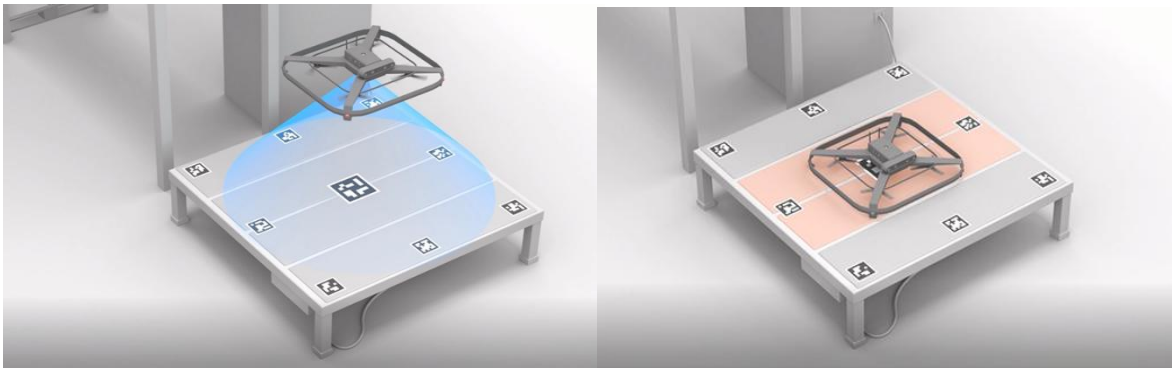
W zakres systemu NeuroSpace wchodzi flota autonomicznych dronów bezzałogowych, z których każdy został wyposażony w cztery kamery oraz zestaw czujników umożliwiających realizację automatycznych i powtarzalnych misji inwentaryzacyjnych. Pojedynczy dron na

jednym ładowaniu może wykonywać misję przez około 18 minut. Przy średniej prędkości lotu wynoszącej 2 m/s daje to dystans przelotu rzędu 2160 m. Dzięki zastosowaniu dwóch kamer skierowanych w przeciwnych kierunkach możliwe jest równoczesne skanowanie obydwu stron alejki magazynowej. Wysokość skanowania wynosi 1,5 m, co w połączeniu z długością przelotu pozwala na zeskanowanie około 3240 m² powierzchni regałowych w trakcie jednej misji.



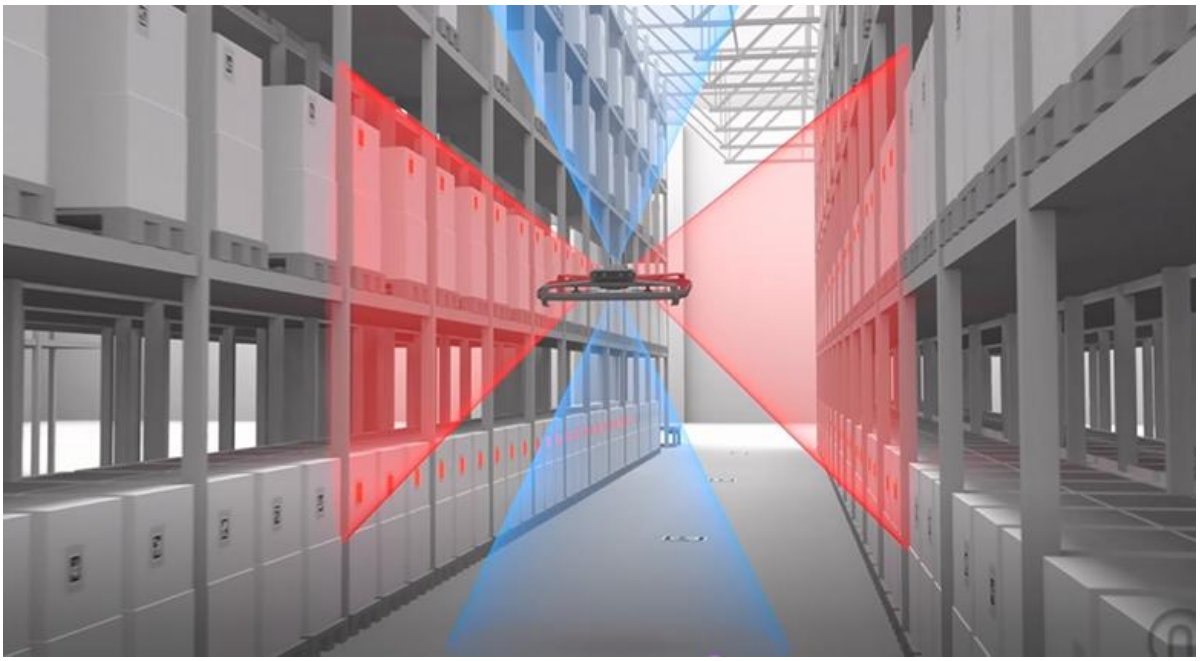
Rys. 7.1. Kamery zamontowane na dronie
Źródło: materiały wewnętrzne NeuroSpace

Dla każdego drona przewidziana jest stacja ładowania i lądowisko jako integralna część systemu. Ten element systemu UAV został przedstawiony na rysunku .



Rys. 7.2. Lądowisko dla drona
Źródło: materiały wewnętrzne NeuroSpace

Istotnym elementem systemowym rozwiązania NeuroSpace jest preinstalowany na dronie specjalistyczny firmware (oprogramowanie) do skanowania etykiet na półkach w magazynie. Moduł detekcji wideo przetwarza sygnały z 4 (czterech) kamer. Dwie z nich służą do skanowania półek, a pozostałe dwie do skanowania znaczników lokalizacyjnych, które są niezbędne do prawidłowej nawigacji.



Rys. 7.3. Dron wykonujący misję skanowania produktów składowanych w magazynie
Źródło: Materiały wewnętrzne NeuroSpace

System NeuroSpace Autonomous Drone Indoor Inventory 2.0 stanowi zatem w pełni zintegrowane rozwiązanie sprzętowo-programowe, które umożliwia prowadzenie autonomicznych misji inwentaryzacyjnych w magazynach wysokiego składowania. Zebrane dane są automatycznie przetwarzane i raportowane w formatach zgodnych ze standardami branżowymi, co pozwala na ich bezpośrednią integrację z systemami klasy ERP/WMS stosowanymi przez klientów. Rozwiązanie może być instalowane na stałe w infrastrukturze magazynowej przedsiębiorstwa lub wykorzystywane w formie usługi „Inventory as a Service", w której flota dronów wraz z oprogramowaniem jest udostępniana klientowi okresowo, w zależności od potrzeb. Dzięki temu system NeuroSpace zapewnia elastyczność wdrożenia, wysoką efektywność operacyjną oraz istotne obniżenie kosztów procesów inwentaryzacyjnych, stanowiąc jednocześnie innowacyjne narzędzie wspierające cyfryzację i automatyzację logistyki w duchu Przemysłu 4.0.

Na potrzeby realizacji niniejszej rozprawy doktoranckiej współpraca z NeuroSpace została sformalizowana poprzez podpisanie trójstronnej umowy (Politechnika Wrocławska – NeuroSpace – doktorant). Na jej podstawie wszystkie badania prowadzone w strukturach spółki zostały wykorzystane jako materiał empiryczny do opracowania i walidacji metody M-UAV. Potwierdza to wdrożeniowy charakter rozprawy oraz bezpośrednie powiązanie wyników badań z praktyką przemysłową i rozwojem innowacyjnych technologii UAV–AutoID.

7.2. Etap 1: Identyfikacja elementów systemu UAV–AutoID

Pierwszym krokiem w procesie walidacji metody M-UAV było szczegółowe rozpoznanie elementów składających się na system UAV–AutoID. Takie podejście pozwala wskazać potencjalne źródła zdarzeń niepożądanych oraz ustalić, w jaki sposób poszczególne komponenty wpływają na odporność całego układu. Obiektem badań jest system UAV-AutoID, będący sztandarowym projektem spółki NeuroSpace. Projekt ten pod nazwą NeuroSpace Autonomous Drone Inventory ma na celu opracowanie systemu UAV, który dedykowany będzie do realizacji usługi polegającej na autonomicznej inwentaryzacji

produktów w przestrzeni magazynowej. W ramach wdrożenia przewiduje się budowę floty kilkunastu dronów zdolnych do wykonywania misji w pełni autonomicznie (bez udziału operatora). Krytyczną cechą tworzonego rozwiązania jest autonomiczność wykorzystująca możliwość samoorientacji w nieznanym otoczeniu dzięki wykorzystaniu hybrydowej odometrii wideo oraz algorytmów VSLAM (Visual Simultaneous Localization and Mapping).

System został wyposażony w zestaw czujników i modułów identyfikacyjnych obejmujących kamery wizyjne wysokiej rozdzielczości, kamery stereoskopowe do nawigacji wewnętrznej, sensory 3D oraz moduły RFID. Integracja tych elementów pozwala na jednoczesne prowadzenie lokalizacji przestrzennej UAV, identyfikacji jednostek ładunkowych oraz rejestracji danych niezbędnych do analizy i porównania z systemami klasy ERP/WMS. Dzięki temu UAV–AutoID stanowi spójny układ sprzętowo-programowy zdolny do realizacji autonomicznych misji inwentaryzacyjnych w środowisku przemysłowym.

Od strony konstrukcyjnej drony NeuroSpace charakteryzują się lekką, wytrzymałą ramą z włókna węglowego, zaprojektowaną w geometrii chroniącej śmigła przed przypadkowymi uszkodzeniami. Wszystkie egzemplarze powstały we własnym laboratorium firmy we Wrocławiu, z wykorzystaniem technologii addytywnej (druk 3D). Równolegle opracowano także autorskie, własne oprogramowanie sterujące i analityczne, tworzone w ramach projektu NeuroSpace Autonomous Drone Indoor Inventory 2.0. Rozwiązanie to obejmuje algorytmy planowania misji, zarządzania flotą dronów oraz moduły sztucznej inteligencji wykorzystującej sieci neuronowe do przetwarzania obrazu i analizy danych, co pozwala na pełną integrację sprzętu i software'u w jeden spójny system UAV–AutoID. Centralnie umieszczony, wieloprocesorowy kontroler lotu o wysokiej mocy obliczeniowej pozwala na równoległe przetwarzanie danych z wielu kamer w czasie rzeczywistym, co zapewnia wysoką precyzję i powtarzalność procesów inwentaryzacyjnych.

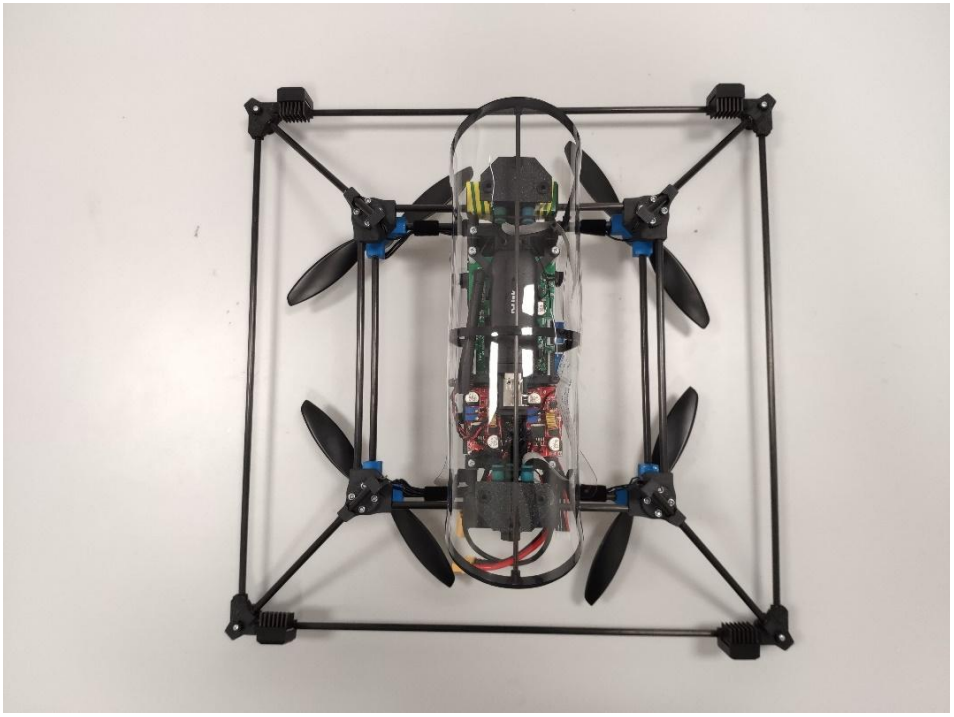
W tabeli 7.1 przedstawiono specyfikację techniczną drona wchodzącego w skład systemu NeuroSpace Autonomous Drone Indoor Inventory 2.0, natomiast na rysunku 7.1 przedstawiono jego zdjęcie.

Tab. 7.1. Specyfikacja techniczna drona

l.p.	Nazwa	Opis
1	Cel	autonomiczna inwentaryzacja przestrzeni wewnątrz budynków bez dostępu do systemów nawigacji satelitarnej
2	Wymiary	400x400x150 mm
3	Waga	1,5 kg
4	Rodzaj silnika	Elektryczny BLDC x 4
5	Maksymalny czas lotu	18 minut
6	Czas ładowania od 0 do 100%	1:30 h
8	Prędkość wznoszenia/opadania	1 m/s
9	Prędkość lotu	2 m/s

10	Temperatura otoczenia	0°C do 40°C
11	Wilgotność otoczenia	maks. 90%
12	Odporność na wiatr	maks. 5 m/s
13	Maks. wys. Lotu	200 m
14	Ładowanie	zintegrowane (platforma do lądowania)
15	Bezpieczeństwo	Konstrukcja zabezpieczająca kolizję śmigła z przeszkodą

Źródło: Materiały wewnętrzne NeuroSpace



Rys. 7.4. Dron NeuroSpace
Źródło: Materiały własne Barłomiej Kasiewicz

Platforma UAV jest głównym, jednak nie jedyny elementem systemu, który powinien być scharakteryzowany w ramach oceny odporności systemu. W związku z tym w tabeli 7.2 przedstawiono charakterystykę pozostałych elementów składowych wyróżnionych w ramach opisu w podrozdziale 6.2.1.

Tab. 7.2. Pozostałe elementy systemu UAV-AutoID

Nazwa komponentu		Opis
Systemy sensoryczne	kamera nawigacyjna	Skalibrowana kamera skierowana w dół (do celu ustalenia relacji przestrzennej dron – ArUco marker)
	kamery skanujące	2 kamery o rozdzielczości 12 Mpix wykorzystywane do określania pozycji UAV w stosunku do etykiet logistycznych
	kamery pomiarowe	2 kamery pracujące w spektrum widzialnym
Systemy komunikacji		WiFi oraz Radiolink (jednokierunkowy link radiowy 2.4 GHz jako komunikacja awaryjna)
Centralna jednostka sterująca		Komputer z systemem LINUX i autorskim oprogramowaniem (sterowanie misją i przekazywanie danych)
Markery nawigacyne		Znaczniki ArUco marker
Stacja dokująca		Lądowisko techniczne do wymiany baterii i/lub ładowania

Źródło: Materiały wewnętrzne NeuroSpace

Opisany powyżej system UAV-AutoID był podstawowym obiektem prowadzonych badań ukierunkowanych na walidację metody. Z tego też względu Etap 1 polegający na identyfikacji elementów systemu jest wspólny dla wszystkich opisanych w tym rozdziale studium przypadku. W związku z tym przedstawiona charakterystyka systemu UAV-AutoID jest obowiązująca we wszystkich opisywanych misjach i nie będzie powielana przy analizie każdego z ocenianych przypadków.

7.3. Przypadek 1: Duże, nowoczesne centrum dystrybucyjne klasy A (studium przypadku)

Walidacja metody M-UAV została przeprowadzona w dużym obiekcie logistycznym, który stanowił jedno z kluczowych środowisk testowych wykorzystanych w badaniach wdrożeniowych. Magazyn ten reprezentuje typowe warunki dużego centrum dystrybucyjnego, a jednocześnie cechuje się szeregiem czynników mogących negatywnie wpływać na realizację autonomicznych misji UAV–AutoID.

Obiekt o powierzchni operacyjnej około 8000 m² funkcjonuje jako magazyn wysokiego składowania. Jego układ przestrzenny obejmuje 20 alejek roboczych, z dostępem dwustronnym, co odpowiada 40 frontom regałowym. Regały posiadają 5 poziomów składowania, a łączna liczba lokalizacji przeznaczonych do odczytu w ramach misji testowych wyniosła N_plan = 5580 lokalizacji.

7.3.1. Etap 2: Identyfikacja warunków eksploatacyjnych

Drugi etap metody M-UAV obejmował systematyczną identyfikację warunków eksploatacyjnych, w których realizowano misje UAV–AutoID. Celem tej fazy było wskazanie głównych grup czynników mogących ograniczać skuteczność odczytów, powodować

zakłócenia w transmisji danych lub wpływać na niezawodność całego systemu. Analiza ta stanowiła podstawę do interpretacji wyników uzyskanych w kolejnych etapach walidacji.

Magazyn przechowuje przede wszystkim komponenty i wyroby gotowe. Towary były w większości ułożone na paletach homogenicznych, przy czym część etykiet znajdowała się na zewnątrz opakowań, a część była częściowo zasłonięta folią stretch. Dodatkowym utrudnieniem dla systemu UAV–AutoID były zmienne warunki oświetleniowe, w tym lokalne refleksy świetlne na wyższych poziomach regałów, oraz zakłócenia elektromagnetyczne generowane przez pracujące urządzenia transportu bliskiego. Charakterystyczną cechą środowiska operacyjnego były także okresowe przeszkody dynamiczne (ruch wózków widłowych, obecność operatorów), które stanowiły istotne źródło potencjalnych zakłóceń.

Na podstawie obserwacji środowiska pracy i dokumentacji operacyjnej wyodrębniono pięć zasadniczych kategorii warunków:

1) Fizyczne – geometria i układ przestrzenny hali (wysokość regałów, wąskie alejki, obecność słupów i instalacji), ograniczające pole manewru UAV.
2) Świetlne – zmienne natężenie światła sztucznego i dziennego oraz refleksy świetlne na powierzchniach etykiet, szczególnie na górnych poziomach regałów.
3) Elektromagnetyczne – obecność metalowych konstrukcji i urządzeń transportu bliskiego zakłócających łączność Wi-Fi.
4) Organizacyjne – równoległa realizacja procesów logistycznych (kompletacja, transport, przeładunki), powodująca dynamiczne przeszkody.
5) Informacyjne – różnorodność i jakość etykiet, część zasłoniętych folią stretch, wymagających powtarzania odczytów.

Identyfikacja warunków potwierdziła, że środowisko magazynu charakteryzuje się wysoką zmiennością i wieloma naturalnymi zakłóceniami typowymi dla eksploatacji przemysłowej. Stanowiło to doskonały poligon doświadczalny dla walidacji metody M-UAV.

7.3.2. Etap 3: Rejestracja parametrów wykonanych misji

Trzeci etap metody M-UAV obejmował rejestrację parametrów technicznych, środowiskowych i operacyjnych uzyskanych podczas prób inwentaryzacyjnych przeprowadzonych w magazynie. Celem tego etapu było przełożenie obserwacji terenowych na mierzalne wskaźniki odporności oraz identyfikacja wpływu warunków eksploatacyjnych na skuteczność systemu UAV–AutoID.

Pierwszą grupę stanowiły parametry energetyczne, obejmujące tempo zużycia akumulatorów, ich wydajność w niskich temperaturach oraz stabilność pracy przy długotrwałym obciążeniu. Szczególną uwagę zwracano na spadki wydajności ogniw w warunkach zbliżonych do 0 °C oraz na konieczność zapewnienia odpowiedniej liczby w pełni naładowanych baterii i stacji ładowania podczas testów obejmujących równoczesną pracę wielu dronów. Analizowano także cykle ładowania i spadki napięcia, które mają bezpośredni wpływ na przewidywany czas bezpiecznej misji.

Kolejną grupę stanowiły parametry komunikacyjne. Obejmowały one stabilność łączności radiowej między dronem a stacją bazową, a także liczbę utraconych pakietów i przerwy w transmisji danych. Do zakłóceń komunikacji dochodziło niekiedy wskutek niespodziewanych zdarzeń w hali magazynowej, takich jak ruch wózków widłowych wzdłuż

alei. Dodatkowym elementem była ocena procesu transferu dużych plików danych, który z uwagi na objętość materiałów obrazowych realizowano przewodowo (Ethernet) podczas wymiany akumulatora. W praktyce oznaczało to krótką przerwę w transmisji, jednak dzięki zastosowaniu rotacji floty UAV proces inwentaryzacyjny mógł być kontynuowany w trybie ciągłym.

Następne były parametry pozycjonujące, związane z dokładnością określania pozycji UAV w przestrzeni magazynowej. Podstawą prawidłowego działania systemu było rozmieszczenie znaczników ArUco, wcześniejsze przygotowanie mapy obiektu (layoutu regałów) oraz sposób organizacji przestrzeni (drogi wewnętrzne, ustawienie palet). Analizowano zjawiska takie jak dryf układu VIO (Visual-Inertial Odometry) oraz konieczność wprowadzania korekt trajektorii w trakcie lotu. Zależności te miały istotny wpływ na stabilność misji i jakość pozyskiwanych danych.

Czwartą grupę stanowiły parametry środowiskowe, które obejmowały temperaturę, wilgotność, zapylenie oraz natężenie oświetlenia. W nowoczesnych obiektach klasy A ich wpływ na działanie systemu ograniczał się głównie do efektów refleksów świetlnych na wyższych poziomach regałów. W starszych magazynach czynniki środowiskowe były jednak znacznie bardziej zróżnicowane i częściej stawały się źródłem zakłóceń – np. przez gorsze oświetlenie, większe zapylenie czy brak standaryzacji etykiet.

Kolejną kategorią były parametry wydajnościowe, które obejmowały liczbę jednostek ładunkowych zarejestrowanych podczas jednej misji oraz liczbę powtórzeń pomiarów wymaganych do uzyskania pełnych danych. Wskaźniki te miały silny związek ze specyfiką konkretnego magazynu – jego wielkością, gęstością składowania oraz rodzajem stosowanych etykiet.

Szczególną uwagę poświęcono także parametrom jakości obrazu i danych, które miały decydujący wpływ na skuteczność procesu identyfikacji. Analizowano ostrość i rozdzielczość obrazów oraz możliwość poprawnego odczytu różnych rodzajów kodów (EAN, QR, DataMatrix). Weryfikowano wpływ takich czynników jak wielkość etykiet, ich umiejscowienie, stopień uszkodzenia czy zasłonięcie folią stretch.

Kolejną kategorię stanowiły parametry bezpieczeństwa. Oceniano minimalne odległości od przeszkód, konieczność ingerencji operatora oraz sytuacje awaryjne wymagające zatrzymania misji. W celu zagwarantowania maksymalnego bezpieczeństwa dla pracowników przebywających w hali, każdy UAV został wyposażony w dodatkowy radiolink umożliwiający natychmiastowe przejęcie kontroli i zdalne wyłączenie drona przez operatora w dowolnym momencie.

Ostatnią grupą były parametry niezawodnościowe, w ramach których analizowano czas bezawaryjnej pracy (MTBF), liczbę awarii krytycznych oraz rejestrowano wszelkie zdarzenia niepożądane, takie jak przerwania misji czy konieczność wymiany komponentów. Parametry te miały istotne znaczenie dla oceny odporności systemu na długotrwałą eksploatację i powtarzalność działań.

Dodatkowo każdorazowo dokumentowano wszystkie zakłócenia i zdarzenia niepożądane, które mogły wystąpić podczas misji. Pozwoliło to na pełniejsze zrozumienie zależności między warunkami środowiskowymi, konfiguracją systemu a skutecznością inwentaryzacji, co w konsekwencji umożliwiło precyzyjniejszą ocenę odporności systemu UAV–AutoID.

Jak widać, zakres gromadzonych danych w trakcie realizacji misji jest bardzo szeroki. Większość przedstawionych powyżej parametrów rejestrowanych jest w sposób

automatyczny, niektóre parametry były rejestrowane manualnie w dokumentacji przygotowywanej na potrzeby testów. Nie wszystkie z rejestrowanych parametrów były wykorzystywane w ocenie odporności systemu UAV-AutoID. Część z nich była analizowana w ramach pomiarów technicznych pracy systemu. Ze względu na obszerny zakres gromadzonych danych, na potrzeby rozprawy w etapie 3 przedstawione będą tylko wybrane parametry, które uznano za istotne z punktu widzenia przeprowadzanej w kolejnym etapie oceny odporności.

W odniesieniu do parametrów zarejestrowanych w procesie inwentaryzacji dotyczącym przypadku 1, przede wszystkim należy wskazać:

- Przeprowadzenie 52 misji UAV (w tym dwie testowe) obejmujących łącznie N_plan = 5580 lokalizacji.
- Zidentyfikowanie łącznie N_odczyt = 5156 etykiet, przy czym N_błędne = 156 odczytów wynikało głównie z refleksów świetlnych oraz chwilowych zakłóceń komunikacyjnych.
- Średni czas reakcji na błędny pomiar wyniósł 6 minut, a czas odzyskiwania danych inwentaryzacyjnych – 30 minut.
- Czas naprawy usterek sprzętowych kształtował się na poziomie 30 minut, natomiast średni czas bezawaryjnej pracy (MTBF) wyniósł 8 godzin.
- Misje realizowano w trybie ciągłym – w przypadku wyczerpania baterii UAV korzystał ze stacji dokującej, co pozwalało na nieprzerwaną kontynuację procesu inwentaryzacji.

7.3.3. Etap 4: Ocena odporności

Na potrzeby oceny odporności opracowano macierz wartości referencyjnych dla wskaźników należących do czterech zdefiniowanych obszarów, którą przedstawiono w tabeli 7.3. W opracowaniu macierzy brali udział eksperci ze strony NeuroSpace, zarówno z grona inżynierów odpowiedzialnych za projektowanie i obsługę systemu UAV-AutoID, jak i menedżerów odpowiedzialnych za obsługę klienta i organizację procesu inwentaryzacji. Przedstawione wartości referencyjne są określone dla badanego systemu UAV-AutoID i są obowiązujące dla wszystkich prowadzonych testów, które zostały przedstawione w tym rozdziale. Należy jednak podkreślić, iż wartości te mogą być modyfikowane w zależności od wykorzystywanego systemu UAV oraz oczekiwań klientów i decydentów odpowiedzialnych za rozwój systemu UAV-AutoID. Również ciągły proces doskonalenia procedur oraz usprawniania systemu UAV-AutoID może się przełożyć na zmianę zdefiniowanych wartości referencyjnych. Taka zmiana byłaby wyrazem wzrostu oczekiwań decydentów względem wymaganego poziomu odporności ocenianego systemu.

Tab. 7.3. Macierz wartości referencyjnych

	POZIOMY ODPORNOŚCI - WARTOŚCI REFERENCYJNE (WR)			
	POZIOM 1	**POZIOM 2**	**POZIOM 3**	**POZIOM 4**
Wskaźnik pokrycia skanowania (W_PK)	<50%	>=50%,ale <70%	71- 96%	97-100%
Wskaźnik fałszywych odczytów (W_FO)	<10%	<5%	<3%	<1%
Wskaźnik wykonania misji (W_WM)	>90%	90-95%	96-98%	99-100%
Czas reakcji na błędny pomiar (T_RBP)	>24 ha	<8 ha	<10 min	<60 sek
Wskaźnik sukcesu przekierowania (W_SP)	>90%	>95%	>98%	100%
Czas reakcji na zakłócenie (T_RZ)	<10 min	<5 min	<2 min	<60 sek
Czas naprawy (T_TR)	5 dni	<2ha	<10 min	<60 sek
Wskaźnik dostępności (W_D)	<90%	90-94%	95-98%	99%-100%
Czas odzyskiwania danych inwentaryzacyjnych (T_ODI)	>5 dni	>1 dzień	>8 ha	<2 min
Wskaźnik niebezpiecznych incydentów (W_NI)	>90%	>10%	>5%	>2%
Wskaźnik błędu lokacji (W_BL)	>80%	>15%	>5%	>4%

Źródło: Opracowanie własne

Opracowanie macierzy referencyjnej stanowi podstawę dla przypisania poziomu odporności dla wartości wskaźników wynikających z przeprowadzonych pomiarów. Rezultaty oceny zostały zestawione w Tabela 7.4.

Tab. 7.4. Bieżąca wartość wskaźników i ich kwalifikacja do wyróżnionych poziomów odporności

		MACIERZ OCENY	
		Wartość bieżąca (WB)	Przypisany poziom odporności wg WR
WSKAŹNIKI ABSORBCJI	Wskaźnik pokrycia skanowania (W_PK)	92,43% (= 5156 / 5580 × 100%)	Poziom 3 (71–96%)
	Wskaźnik fałszywych odczytów (W_FO)	2,80% (= 156 / 5580 × 100%)	Poziom 3 (<3%)
	Wskaźnik wykonania misji (W_WM)	95,50%	Poziom 2 (91–95% | wartość na granicy P2/P3)
WSKAŹNIKI ADAPTACJI	Czas reakcji na błędny pomiar (T_RBP)	6 min	Poziom 3 (<10 min)
	Wskaźnik sukcesu przekierowania (W_SP)	97,50% (= 78 / 80 × 100%)	Poziom 2 (>95%, ale ≤98%)
	Czas reakcji na zakłócenie (T_RZ)	90 sek	Poziom 3 (<2 min; do P4 brakuje ≤60 sek)
WSKAŹNIKI ODTWORZENIA	Czas naprawy (T_TR)	30 min	Poziom 2 (<2 h; do P3 brakuje ≤10 min)
	Wskaźnik dostępności (W_D)	96,77% (= 15 / 15,5 × 100%)	Poziom 3 (95–98%)
	Czas odzyskiwania danych inwentaryzacyjnych (T_ODI)	30 min	Poziom 3 (≤8 h; P4 to ≤2 min)
WSKAŹNIKI BEZPIECZEŃSTWA	Wskaźnik niebezpiecznych incydentów (W_NI)	2,00% (= 1 / 50 × 100%)	Poziom 4
	Wskaźnik błędu lokacji (W_BL)	2,00% (= 1 / 50 × 100%)	Poziom 4

* Interpretacja progów WR dla bezpieczeństwa została ujednolicona: mniej zdarzeń = wyższy poziom.

Źródło: Opracowanie własne

7.3.4. Etap 4: Analiza ryzyka

W trakcie testów odnotowano następujące zdarzenia (50 misji referencyjnych), które stanowiły podstawę do późniejszej analizy ryzyka:

1) P1-ZN1: Zaniki łączności Wi-Fi (>5 s) – wystąpiły 6 epizodów, z czego każdy powodował krótkotrwałe opóźnienia w transmisji danych między UAV a centralną

jednostką sterującą. Zakłócenia te były szczególnie widoczne w strefach o dużym zagęszczeniu metalowych regałów oraz w pobliżu aktywnych urządzeń transportu bliskiego. Choć system awaryjny Radiolink zapewniał minimalny poziom łączności, to jednak konieczność ponawiania części operacji skutkowała wydłużeniem czasu misji i zwiększonym zużyciem energii.

2) P1-ZN2: Refleksy na etykietach logistycznych – zidentyfikowano 12 błędnych odczytów, które wymagały powtórzenia procesu skanowania. Zjawisko to było szczególnie nasilone na górnych poziomach regałów, gdzie światło sztuczne padało pod kątem powodującym odbicia. W praktyce problem ten prowadził do lokalnych spadków wskaźnika pokrycia skanowania (W_PK) oraz fałszywych alarmów błędów integralności danych.
3) P1-ZN3: Zatory w alejkach (operatorzy, wózki widłowe) – w trakcie misji odnotowano 10 sytuacji, w których trajektoria drona została zakłócona przez obecność człowieka lub pojazdu w strefie roboczej. W większości przypadków system wykonał skuteczne przekierowanie, jednak w dwóch przypadkach konieczne było przerwanie i restart misji. Takie zdarzenia generowały dodatkowe obciążenie organizacyjne, gdyż wymagały interwencji operatora nadzorującego proces.
4) P1-ZN4: Dryf systemu VIO (Visual-Inertial Odometry) – w 3 przypadkach stwierdzono istotne odchylenia pozycji UAV względem planowanej trajektorii. W każdym z nich konieczne było przeprowadzenie korekty trasy, co zostało zrealizowane dzięki algorytmom resekcji. Choć dryf nie doprowadził do utraty danych, to jego pojawienie się zwiększało ryzyko błędnego odwzorowania lokalizacji etykiet.
5) P1-ZN5: Alerty bliskości przeszkody (<0,5 m) – w 2 zdarzeniach system bezpieczeństwa uruchomił procedurę awaryjną polegającą na automatycznym spowolnieniu i wycofaniu UAV. Oba przypadki miały miejsce w alejkach o zwiększonym natężeniu ruchu, gdzie dodatkowe przeszkody chwilowo znalazły się na trasie drona. Brak kolizji potwierdza skuteczność algorytmów antykolizyjnych, jednak sam fakt ich uruchomienia wskazuje na istnienie realnych zagrożeń w środowisku eksploatacyjnym.

Łącznie odnotowane zakłócenia potwierdziły hipotezę o wysokiej zmienności i nieprzewidywalności środowiska magazynowego. Każde ze zdarzeń, nawet jeśli miało ograniczone skutki techniczne, zwiększało obciążenie systemu i mogło przyczyniać się do wydłużenia całkowitego czasu misji.

Na podstawie tabeli 6.4 oszacowano wskaźniki RPN zgodnie ze wzorem (1), które zostały przedstawione w tabeli 7.5. Następnie oszacowane parametry ryzyka poddano ewaluacji za pomocą macierzy ryzyka i przedstawiono na rysunku 7.5

Tab. 7.5. Oszacowane parametry ryzyka wraz z kalkulacją RPN dla przypadku 1

Zidentyfikowane zdarzenia niepożądane	Oszacowana częstotliwość	Oszacowane skutki	Wskaźnik ryzyka RPN
P1-ZN1	Czasami (3)	Znaczące (3)	9
P1-ZN2	Często (4)	Niewysokie (2)	8
P1-ZN3	Często (4)	Znaczące (3)	12

P1-ZN4	Okazjonalnie (2)	Wysokie (4)	8
P1-ZN5	Okazjonalnie (2)	Wysokie (4)	8

Źródło: Opracowanie własne

			SKUTKI				
			Nieistotne	Niewysokie	Znaczące	Wysokie	Katastroficzne
			1	2	3	4	5
CZĘSTOTLIWOŚĆ	Nagminnie	5					
	Często	4		P1-ZN2	P1-ZN3		
	Czasami	3			P1-ZN1		
	Okazjonalnie	2				P1-ZN4 P1-ZN5	
	Sporadycznie	1					

Rys. 7.5. Macierz ryzyka dla zdarzeń niepożądanych zarejestrowanych w przypadku 1
Źródło: Opracowanie własne

Analiza pozwoliła na wyróżnienie dwóch grup zdarzeń:

1) Zdarzenia o wysokich skutkach – obejmujące dryf VIO oraz alerty bliskości przeszkód. Choć występowały one rzadziej, ich potencjalne skutki były poważniejsze, ponieważ mogły prowadzić do utraty integralności danych inwentaryzacyjnych, a w krajnym przypadku – do kolizji UAV z elementami infrastruktury. To właśnie ta kategoria ryzyka ma największe znaczenie dla bezpieczeństwa i wiarygodności całego systemu UAV–AutoID.

2) Zdarzenia o wysokiej częstotliowści – obejmujące refleksy świetlne, zatory w alejkach oraz zaniki łączności Wi-Fi. Występowały one częściej, jednak skutki ich pojawienia się były mniej dotkliwe, sprowadzając się głównie do konieczności powtarzania pomiarów lub opóźnień w transmisji danych. Częstość ich występowania wskazuje jednak na potrzebę opracowania systemowych rozwiązań, np. lepszej kalibracji oświetlenia, integracji UAV z harmonogramami pracy wózków widłowych czy redundantnych kanałów komunikacyjnych.

Wnioski płynące z analizy ryzyka wskazują jednoznacznie, że priorytet działań doskonalących należy nadać obszarom związanym z lokalizacją i bezpieczeństwem lotu. W drugiej kolejności powinny być podejmowane działania związane z poprawą jakości odczytu i stabilnością transmisji danych. Takie uporządkowanie priorytetów odpowiada logice wdrażania systemu w warunkach operacyjnych – najpierw należy wyeliminować zagrożenia krytyczne, a dopiero później optymalizować parametry zwiększające efektywność.

7.3.5. ETAP 5: Rekomendacje

System UAV–AutoID wdrożony w dużym centrum dystrybucyjnym osiągnął Poziom 3 (odporny) dla większości ocenianych wskaźników, co potwierdza jego zdolność do adaptacji w środowisku pełnym zakłóceń. Szczególnie pozytywnie należy ocenić wysoki wskaźnik dostępności (W_D) oraz bardzo niski poziom incydentów bezpieczeństwa (Poziom 4), co dowodzi stabilności i dojrzałości testowanego rozwiązania.

Jednocześnie analiza wskaźnikowa ujawniła obszary wymagające dalszych usprawnień. Wskaźnik wykonania misji (W_WM = 95,5%) pozostaje na granicy między Poziomem 2 i 3, co świadczy o tym, że wciąż dochodzi do niepełnego pokrycia powierzchni inwentaryzacyjnej. Podobnie czas naprawy (T_TR = 30 min), zaklasyfikowany do Poziomu 2, pokazuje, że konieczne jest dalsze skracanie procedur serwisowych – np. przez wprowadzenie modułowych komponentów i automatycznych stacji wymiany baterii.

Analiza ryzyka pozwoliła wskazać krytyczne źródła zakłóceń: refleksy świetlne, zakłócenia komunikacyjne oraz dynamiczne przeszkody organizacyjne. To one w największym stopniu wpływały na skuteczność systemu. Zdarzenia o najwyższym wskaźniku ryzyka (RPN=9) – dryf VIO i alerty bliskości przeszkód – potwierdzają, że stabilność systemu lokalizacji i algorytmów antykolizyjnych musi być traktowana priorytetowo. Zdarzenia częstsze, ale mniej dotkliwe (RPN=8), takie jak refleksy świetlne, zatory czy zaniki łączności, wskazują natomiast na potrzebę usprawnienia środowiska pracy UAV oraz jego integracji z procesami logistycznymi.

Na tej podstawie w Etapie 5 – jako rekomendacje ex post zaproponowano następujące kierunki zmian:

- W obszarze technicznym – dalsze rozwijanie algorytmów VIO z wykorzystaniem sensorów inercyjnych i markerów referencyjnych, implementacja szybszych procedur serwisowych (redukcja T_TR), zastosowanie redundantnych kanałów komunikacyjnych (Wi-Fi + Radiolink).
- W obszarze organizacyjnym – koordynacja misji UAV z harmonogramami pracy wózków widłowych i procesami kompletacji, wprowadzenie okien inwentaryzacyjnych minimalizujących ryzyko zatorów.
- W obszarze środowiskowym – poprawa warunków oświetlenia w górnych poziomach regałów, redukcja refleksów świetlnych poprzez zastosowanie dyfuzorów lub zmiany w rozmieszczeniu lamp.
- W obszarze bezpieczeństwa – utrzymanie wysokiego poziomu skuteczności algorytmów antykolizyjnych, ale z dodatkowym buforem bezpieczeństwa (<0,7 m zamiast <0,5 m), co ograniczy liczbę awaryjnych wycofań UAV.

Podsumowując, walidacja w dużym centrum dystrybucyjnym potwierdziła użyteczność metody M-UAV jako narzędzia oceny odporności systemów UAV–AutoID w warunkach rzeczywistych. Wyniki te pokazują, że system jest już wystarczająco dojrzały do komercyjnych wdrożeń, ale wymaga ukierunkowanych działań doskonalących. Rekomendacje wynikające z Etapu 5 obejmują zarówno rozwiązania niskokosztowe (np. procedury organizacyjne, zmiany w oświetleniu), jak i wymagające inwestycji technologicznych (redundantne kanały komunikacyjne, modułowe stacje serwisowe). To zróżnicowanie pozwala na stopniowe podnoszenie odporności systemu zgodnie z priorytetami wskazanymi przez wskaźniki RPN oraz oczekiwaniami użytkowników końcowych.

7.4. Przypadek 2: Magazyn (stary, nieco zdekapitalizowany) składowania blokowego klasy B (studium przypadku)

Drugim środowiskiem, w którym przeprowadzono walidację metody M-UAV, był magazyn blokowy o powierzchni operacyjnej około 4800 m², stanowiący część zaplecza produkcyjnego. Obiekt przeznaczony był do przechowywania big-bagów z surowcami wykorzystywanymi w procesach produkcyjnych. Zamiast regałów wysokiego składowania zastosowano tu blokowe piętrzenie ładunków paletowych na maksymalnie dwóch poziomach, co generowało odmienną specyfikę misji UAV–AutoID.

Łączna liczba lokalizacji przeznaczonych do odczytu w ramach misji testowych wyniosła N_plan = 2400. Celem było zidentyfikowanie wszystkich big-bagów oraz przypisanych im etykiet logistycznych (część w standardzie GS1, część w formatach niestandardowych).

7.4.1. Etap 2: Identyfikacja warunków eksploatacyjnych

W odróżnieniu od klasycznego centrum dystrybucyjnego, magazyn blokowy charakteryzował się następującymi czynnikami:

1) Fizyczne – blokowe ułożenie big-bagów na maksymalnie dwóch piętrach (ok. 3,2 m wysokości), brak klasycznych alejek roboczych oraz ograniczone punkty odniesienia dla systemów wizyjnych. Śliska i zabrudzona posadzka powodowała dodatkowe zagrożenia przy starcie i lądowaniu UAV.
2) Świetlne – oświetlenie sztuczne było nierównomierne i niewystarczające, szczególnie w centralnych strefach hali. Często otwierana brama wjazdowa powodowała gwałtowne zmiany natężenia światła i kontrasty, utrudniając odczyt etykiet.
3) Środowiskowe – otwieranie bramy skutkowało także silnymi powiewami wiatru wewnątrz hali, które destabilizowały lot dronów, a w kilku przypadkach prowadziły do zdmuchiwania etykiet, jeśli nie były one trwale przymocowane do big-bagów.
4) Elektromagnetyczne – oddziaływania zakłóceniowe były marginalne, ograniczone do sporadycznych interferencji od wózków widłowych.
5) Organizacyjne – ruch w magazynie był relatywnie mniejszy niż w dużych centrach logistycznych, co zmniejszało ryzyko kolizji z operatorami i pojazdami. Niemniej jednak odnotowano sytuacje chwilowych blokad przestrzeni roboczej.
6) Informacyjne – etykiety były podatne na zabrudzenia, refleksy świetlne i deformacje. Część z nich była luźno przymocowana, co w połączeniu z powiewami wiatru prowadziło do utraty danych identyfikacyjnych. Uproszczeniem zadania była stosunkowo niewielka liczba indeksów asortymentowych – jedynie 18 SKU. Ograniczało to różnorodność danych wejściowych, dzięki czemu proces rozpoznawania był mniej obciążony niż w bardziej złożonych środowiskach.

Środowisko pracy UAV w magazynie blokowym należy uznać za wymagające głównie z uwagi na czynniki fizyczne i środowiskowe, które znacząco wpływały na stabilność lotu i jakość odczytów.

7.4.2. Etap 3: Rejestracja parametrów wykonanych misji

W ramach kampanii przeprowadzono 40 misji UAV, podczas których zidentyfikowano łącznie N_odczyt = 2212 etykiet z 2400 zaplanowanych lokalizacji. Odnotowano także N_błędne = 132 odczyty, głównie wynikające z refleksów i zabrudzeń etykiet.

Średni czas reakcji na błędny pomiar wyniósł 4 min, a czas odzyskiwania danych inwentaryzacyjnych 45 min. Czas naprawy usterek sprzętowych utrzymywał się na poziomie 25 min, co było wynikiem lepszym niż w przypadku centrum dystrybucyjnego.

Podobnie jak w poprzednim studium przypadku, realizowano ciągłe skanowanie – w momencie, gdy jeden dron kończył cykl baterii, natychmiast następował swap baterii lub podmiana UAV na drugi egzemplarz. Dzięki temu proces inwentaryzacji przebiegał w trybie ciągłym, bez przerw między misjami, co wiernie odzwierciedlało realne warunki operacyjne.

7.4.3. Etap 4: Ocena odporności

Do przypisania poziomów odporności wykorzystano macierz wartości referencyjnych przedstawionych w tabeli 7.3. Na podstawie danych zgromadzonych w ramach etapu 3, obliczono wskaźniki odporności zgodnie z wytycznymi z rozdziału 6. Uzyskane wartości przedstawiono w tabeli 7.5.

Tab. 7.6. Bieżąca wartość wskaźników i kwalifikacja do poziomów odporności (Przypadek 2)

		MACIERZ OCENY	
		Wartość bieżąca (WB)	Przypisany poziom odporności wg WR
WSKAŹNIKI ABSORBCJI	Wskaźnik pokrycia skanowania (W_PK)	92,16% (=2212/2400)	Poziom 3
	Wskaźnik fałszywych odczytów (W_FO)	5,5%	Poziom 2
	Wskaźnik wykonania misji (W_WM)	94,5%	Poziom 2
WSKAŹNIKI ADAPTACJI	Czas reakcji na błędny pomiar (T_RBP)	4 min	Poziom 3
	Wskaźnik sukcesu przekierowania (W_SP)	96,8% (61/63)	Poziom 2
	Czas reakcji na zakłócenie (T_RZ)	100 sek	Poziom 3
WSKAŹNIKI ODTWORZENIA	Czas naprawy (T_TR)	25 min	Poziom 2 ale na granicy Poziom 3
	Wskaźnik dostępności (W_D)	97%	Poziom 3
	Czas odzyskiwania danych inwentaryzacyjnych (T_ODI)	45 min	Poziom 3

WSKAŹNIKI BEZPIECZEŃSTWA	Wskaźnik niebezpiecznych incydentów (W_NI)	2,5% (1/40)	Poziom 4*
	Wskaźnik błędu lokacji (W_BL)	5% (2/40)	Poziom 3

* Interpretacja jak poprzednio: im mniej incydentów, tym wyższy poziom.

Źródło: Opracowanie własne

7.4.4. Etap 4: Analiza ryzyka

Podczas 40 misji odnotowano następujące zdarzenia:

1) P2-ZN1: Powiewy wiatru po otwarciu bramy – 5 przypadków destabilizacji UAV, w tym 2 przerwania misji. Były to sytuacje trudne do przewidzenia, ponieważ powstawały w wyniku nagłego otwarcia bramy wjazdowej dla wózków transportowych. W dwóch przypadkach podmuchy były na tyle silne, że doprowadziły do utraty stabilności UAV i konieczności restartu misji. Epizody te pokazały, że nawet w środowisku zamkniętym czynniki atmosferyczne mogą odgrywać istotną rolę.
2) P2-ZN2: Zdmuchnięte etykiety – 7 sytuacji utraty danych identyfikacyjnych. Etykiety mocowane niestandardowo (taśmą klejącą lub w kieszonkach foliowych) były zrywane przez powietrze, co powodowało całkowitą utratę możliwości identyfikacji niektórych big-bagów. To zdarzenie było szczególnie problematyczne, gdyż uniemożliwiało pełną realizację inwentaryzacji i wymagało ręcznej interwencji operatorów w celu ponownego oznakowania.
3) P2-ZN3: Problemy z oświetleniem – 9 zdarzeń związanych z kontrastami świetlnymi. Nierównomierne oświetlenie hali skutkowało zbyt jasnymi lub zbyt ciemnymi obszarami, w których systemy wizyjne miały trudności z odczytem kodów. Sytuacja ta wymagała wielokrotnych powtórek skanowania, co wydłużało czas misji. Problemy nasilały się w strefie bramy, gdzie kontrast światła dziennego i sztucznego był największy.
4) P2-ZN4: Śliska posadzka – 2 przypadki nieudanego lądowania UAV. W obu sytuacjach UAV podczas lądowania osunął się na bok, co nie doprowadziło do uszkodzeń, ale wymagało interwencji operatora. To z pozoru błahe zdarzenie ujawniło, że podłoże w strefie startowej i lądowiskowej ma krytyczne znaczenie dla stabilności operacji UAV.
5) P2-ZN5: Nieczytelne etykiety – 14 powtarzanych odczytów, w tym 6 zakończonych błędem. Przyczyną były zabrudzenia pyłowe oraz zagniecenia folii ochronnej. W niektórych przypadkach etykiety były w takim stopniu zniszczone, że UAV nie był w stanie ich prawidłowo zidentyfikować. Wymagało to interwencji manualnej, co znacząco obniżało wskaźnik efektywności misji.
6) P2-ZN6: Refleksy na folii big-bagów – 8 błędnych skanów. Folia zabezpieczająca powodowała odbicia światła, szczególnie pod ostrym kątem, co prowadziło do rejestrowania niepełnych lub zniekształconych kodów. Efekt ten był powtarzalny i wymagał powtórek skanowania w innym kącie.

7) P2-ZN7: Zanieczyszczenia pyłowe – 7 błędów odczytu kodów. W niektórych strefach pył produkcyjny osiadał na etykietach, zmniejszając kontrast i uniemożliwiając poprawny odczyt. Występowanie tego zjawiska wskazuje na konieczność systematycznego monitorowania i czyszczenia etykiet, jeśli UAV mają działać w sposób w pełni autonomiczny.
8) P2-ZN8: Alerty antykolizyjne – 2 sytuacje przy niestabilnych stosach worków. UAV wykrywał nieoczekiwane przemieszczenia lub niestabilne ułożenie big-bagów i automatycznie spowalniał lot bądź wycofywał się. Algorytmy antykolizyjne zadziałały prawidłowo, jednak fakt ich aktywacji dowodzi, że zagrożenia fizyczne były realne i wymagały szczególnej uwagi.
9) P2-ZN9: Zatory organizacyjne – 3 misje przerwane przez ruch wózków. Chociaż natężenie ruchu było mniejsze niż w dużych centrach logistycznych, sytuacje te pokazują, że nawet przy umiarkowanej eksploatacji konieczne jest zsynchronizowanie lotów UAV z cyklami pracy wózków widłowych.

Tab. 7.7. Oszacowane parametry ryzyka wraz z kalkulacją RPN dla przypadku 2

Zidentyfikowane zdarzenia niepożądane	Oszacowana częstotliwość	Oszacowane skutki	Wskaźnik ryzyka RPN
P2-ZN1	Czasami (3)	Znaczące (3)	9
P2-ZN2	Czasami (3)	Znaczące (3)	9
P2-ZN3	Często (4)	Niewysokie (2)	8
P2-ZN4	Okazjonalnie (2)	Wysokie (4)	8
P2-ZN5	Często (4)	Znaczące (3)	12
P2-ZN6	Często (4)	Niewysokie (2)	8
P2-ZN7	Czasami (3)	Niewysokie (2)	6
P2-ZN8	Okazjonalnie (2)	Wysokie (4)	8
P2-ZN9	Okazjonalnie (2)	Wysokie (4)	8

Źródło: Opracowanie własne

			SKUTKI				
			Nieistotne	Niewysokie	Znaczące	Wysokie	Katastroficzne
			1	2	3	4	5
CZĘSTOTLIWOŚĆ	Nagminnie	5					
	Często	4		P2-ZN3 P2-ZN6	P2-ZN5		
	Czasami	3		P2-ZN7	P2-ZN1 P2-ZN2		
	Okazjonalnie	2				P2-ZN4, P2-ZN8, P2-ZN9	
	Sporadycznie	1					

Rys. 7.6. Macierz ryzyka dla zdarzeń niepożądanych zarejestrowanych w przypadku 2
Źródło: Opracowanie własne

Większość zakłóceń w magazynie blokowym miała charakter środowiskowy (wiatr, oświetlenie, śliska posadzka) oraz informacyjny (luźne etykiety, zabrudzenia, refleksy). Podkreśla to fakt, że odporność systemu UAV–AutoID w takich obiektach zależy nie tyle od samej platformy latającej, co od jakości infrastruktury i przygotowania przestrzeni.

Analiza ryzyka wykazała, że kluczowe źródła zakłóceń miały charakter powtarzalny i możliwy do mitygacji. Największym zagrożeniem były etykiety niestabilnie mocowane – czynnik pozornie trywialny, lecz w praktyce krytyczny dla całej inwentaryzacji.

7.4.5. ETAP 5: Rekomendacje

System UAV–AutoID w magazynie blokowym wykazał wysoką odporność w obszarach adaptacji i odtworzenia, jednak podatność na czynniki środowiskowe i informacyjne ograniczała jego pełną skuteczność.

Rekomendacje ex post:

1) Techniczne – zastosowanie osłon etykiet i kieszeni ochronnych, które eliminują ryzyko zdmuchiwania. Dodatkowo – rozwój algorytmów stabilizacji UAV w warunkach przeciągów oraz testy alternatywnych sensorów (np. IR/UV), które lepiej radzą sobie w trudnych warunkach oświetleniowych.
2) Organizacyjne – planowanie misji w oknach czasowych, gdy brama wjazdowa pozostaje zamknięta, a ruch wózków minimalny. Zmniejsza to ryzyko zarówno powiewów wiatru, jak i zatorów organizacyjnych.
3) Środowiskowe – poprawa oświetlenia (jednolite natężenie, redukcja kontrastów), przygotowanie wyznaczonych stref startu i lądowania z matami antypoślizgowymi, które stabilizują UAV przy operacjach naziemnych.
4) Informacyjne – pełna standaryzacja oznakowania big-bagów, stosowanie mocniejszych mocowań (opaski, koszulki etykietowe). Zapewni to powtarzalność odczytu i odporność na podmuchy powietrza.

Studium przypadku 2 pokazało, że metoda M-UAV jest przydatna również w obiektach o mniej uporządkowanej strukturze niż magazyny regałowe. Największym wyzwaniem okazała się stabilność etykiet i wpływ środowiska fizycznego (wiatr, oświetlenie, podłoże). Z kolei ograniczona liczba indeksów (18 SKU) sprawiła, że system był mniej obciążony różnorodnością danych, a kluczowe ograniczenia wynikały z infrastruktury, a nie złożoności procesów logistycznych.

7.5. Przypadek 3: Magazyn przyprodukcyjny (studium przypadku)

Walidacja metody M-UAV została przeprowadzona również w magazynie przyprodukcyjnym o powierzchni operacyjnej ok. 1800 m², wyposażonym w 6 alejek z 12 regałami wysokiego składowania klasy A. Choć infrastruktura magazynu reprezentowała najwyższy standard techniczny (nowa hala, gładka posadzka, dobre oświetlenie, instalacje zabezpieczające), środowisko operacyjne cechowało się szczególną złożonością organizacyjną. Magazyn funkcjonował jako zaplecze dla fabryki pracującej w trybie 3-zmianowym, co oznaczało bardzo intensywny ruch ludzi i wózków transportowych, a także konieczność dynamicznej obsługi dostaw do produkcji.

Łączna liczba lokalizacji do odczytu podczas misji testowych wyniosła N_plan = 4200, przy czym aż 80% palet miało charakter mieszany – zawierały różne grupy asortymentowe w ramach jednej jednostki ładunkowej. Asortyment obejmował 180 indeksów SKU, jednakże o bardzo zbliżonej charakterystyce fizycznej. W wielu przypadkach różnicę stanowił wyłącznie numer partii i liczba komponentów w opakowaniu, co powodowało, że prawidłowe odczytanie etykiety było absolutnie krytyczne dla poprawności całego procesu. Wyzwania dodatkowo potęgowało to, że na jednej palecie mogło znajdować się nawet 6 różnych etykiet logistycznych, umieszczonych w różnych miejscach i często dodatkowo zabezpieczonych folią ochronną.

7.5.1. Etap 2: Identyfikacja warunków eksploatacyjnych

Analiza środowiska pracy pozwoliła na wyróżnienie następujących kategorii warunków:

1) Fizyczne – obiekt klasy A zapewniał wysoką jakość infrastruktury (równa posadzka, stabilne regały, dobre oświetlenie). Wysokość regałów wynosiła do 6 poziomów składowania, co oznaczało zwiększone ryzyko błędów w lokalizacji UAV na najwyższych piętrach. Jednocześnie zarejestrowano istotne zakłócenia komunikacyjne – jeden z UAV zawiesił się na 6. piętrze wskutek przerwania łączności i konieczne było przerwanie misji.
2) Świetlne – warunki oświetleniowe były dobre, jednak część etykiet zabezpieczonych folią ochronną powodowała refleksy i artefakty świetlne, co negatywnie wpływało na skuteczność odczytów kodów.
3) Elektromagnetyczne – w środowisku odnotowano interferencje związane z dużą liczbą urządzeń elektronicznych i systemów sterowania liniami produkcyjnymi. Powodowały one chwilowe zakłócenia transmisji danych, szczególnie na wyższych kondygnacjach regałów.
4) Organizacyjne – bardzo duży ruch wynikający z trybu 3-zmianowego. Wózki widłowe dostarczające komponenty na linie produkcyjne miały priorytet przed UAV, co często prowadziło do przerwania lub opóźnienia misji. Ruch pieszy pracowników dodatkowo zwiększał liczbę dynamicznych przeszkód.
5) Informacyjne – krytyczny obszar w tym studium przypadku. Etykiety często były błędnie rozmieszczane przez pracowników, co prowadziło do nieprawidłowej lokalizacji palet w systemie. Dodatkowo etykiety zabezpieczone folią były trudniejsze w odczycie, a ich liczba na jednostkę ładunkową (do 6 na jednej palecie) komplikowała proces skanowania. Kluczowe znaczenie miało odczytanie numeru partii, który był jedynym wyróżnikiem komponentów o bardzo podobnym wyglądzie.

7.5.2. Etap 3: Rejestracja parametrów wykonanych misji

W ramach kampanii przeprowadzono 60 misji UAV, co pozwoliło na zebranie danych zróżnicowanych pod względem pory dnia i natężenia ruchu. Zidentyfikowano łącznie N_odczyt = 3825 etykiet z 4200 zaplanowanych lokalizacji, przy czym N_błędne = 248 odczytów wynikało głównie z problemów z etykietami zabezpieczonymi folią i błędów w ich rozmieszczeniu.

Średni czas reakcji na błędny pomiar wyniósł 5 min, a czas odzyskiwania danych inwentaryzacyjnych – 60 min. Czas naprawy usterek sprzętowych kształtował się na poziomie 35 min, a średni czas bezawaryjnej pracy (MTBF) wyniósł 14,5 h.

Misje miały charakter ciągły – w przypadku wyczerpania baterii następował natychmiastowy start kolejnego UAV, dzięki czemu proces inwentaryzacji nie był przerywany.

7.5.3. Etap 4: Ocena odporności

Również w tym przypadku do przypisania poziomów odporności wykorzystano macierz wartości referencyjnych przedstawionych w tabeli 7.3. Następnie na podstawie zgromadzonych danych dotyczących parametrów realizacji misji, wyznaczono wartość dla poszczególnych wskaźników odporności. Uzyskane wyniki wraz z przypisaniem odpowiedniego poziomu odporności przedstawiono w tabeli 7.6.

Tab. 7.8. Bieżąca wartość wskaźników i ich kwalifikacja do poziomów odporności

		MACIERZ OCENY	
		Wartość bieżąca (WB)	Przypisany poziom odporności wg WR
WSKAŹNIKI ABSORBCJI	Wskaźnik pokrycia skanowania (W_PK)	91,07% (=3825/4200×100%)	Poziom 3 (71–96%)
	Wskaźnik fałszywych odczytów (W_FO)	5,90% (=248/4200×100%)	Poziom 2 (<5% → P2/P3 granica)
	Wskaźnik wykonania misji (W_WM)	94,5%	Poziom 2 (91–95%)
WSKAŹNIKI ADAPTACJI	Czas reakcji na błędny pomiar (T_RBP)	5 min	Poziom 3 (<10 min)
	Wskaźnik sukcesu przekierowania (W_SP)	96,3%	Poziom 2 (>95%)
	Czas reakcji na zakłócenie (T_RZ)	120 sek	Poziom 2 (<5 min)
WSKAŹNIKI ODTWORZENIA	Czas naprawy (T_TR)	35 min	Poziom 2 (<2 h)
	Wskaźnik dostępności (W_D)	6,7% (=14,5/15h×100%)	Poziom 3 (95–98%)
	Czas odzyskiwania danych inwentaryzacyjnych (T_ODI)	60 min	Poziom 3 (<8 h)
WSKAŹNIKI BEZPIECZEŃSTWA	Wskaźnik niebezpiecznych incydentów (W_NI)	3,3% (=2/60)	Poziom 3 (>2%, ale <5%)

	Wskaźnik błędu lokacji (W_BL)	1,7% (=1/60)	Poziom 4 (najwyższy)

Źródło: Opracowanie własne

System osiągnął wysoki poziom odporności w zakresie bezpieczeństwa (poza jednym brak poważnych incydentów, skuteczna ochrona antykolizyjna), natomiast obszar informacyjny (etykiety) i komunikacyjny pozostaje kluczowym ograniczeniem.

7.5.4. Etap 4: Analiza ryzyka

W trakcie 60 misji odnotowano m.in.:

1) P3-ZN1: Odnotowano 1 przypadek zawieszenia UAV na 6. piętrze regału z powodu zakłóceń komunikacyjnych – konieczne przerwanie misji i interwencja manualna. To zdarzenie pokazało granicę odporności systemu w warunkach intensywnych interferencji elektromagnetycznych. Choć infrastruktura magazynu była nowa, duża liczba systemów automatyki i sterowania produkcją generowała zakłócenia w transmisji danych. Konieczność ręcznego przejęcia kontroli nad UAV i jego bezpiecznego sprowadzenia potwierdziła, że niezawodność łączności jest krytycznym elementem całego systemu.
2) P3-ZN2: Bardzo wiele bo, 17 przypadków błędnego rozmieszczenia etykiet na paletach przez pracowników, co prowadziło do mylnych odczytów i opóźnień. To najczęściej rejestrowane zakłócenie w tej lokalizacji. Błędy ludzkie powodowały, że UAV–AutoID odczytywał dane niezgodnie z faktycznym rozmieszczeniem komponentów. W praktyce skutkowało to nie tylko opóźnieniami, ale też ryzykiem przesunięć w dostawach do linii produkcyjnej. Problem ujawnia fundamentalne znaczenie procesów organizacyjnych i standaryzacji oznaczeń dla skuteczności pracy UAV.
3) P3-ZN3: Jeszcze więcej bo 22 zdarzenia błędów odczytu numerów partii przez refleksy świetlne w folii ochronnej. Choć warunki oświetleniowe w magazynie były dobre, to folia zabezpieczająca etykiety generowała silne odbicia. Refleksy powodowały zakłócenia w działaniu systemu OCR i wymagały powtórek skanowania, co zwiększało czas realizacji misji. To potwierdza, że nawet przy wysokim standardzie infrastruktury, detale takie jak rodzaj i sposób zabezpieczania etykiet mogą decydować o jakości całego procesu.
4) P3-ZN4: Ponad 15 sytuacji przerwania trajektorii UAV przez ruch wózków widłowych (priorytet dostaw na linie produkcyjne). Intensywność ruchu była bardzo wysoka, co wynikało z trybu pracy fabryki na 3 zmiany. UAV, choć wyposażone w algorytmy omijania przeszkód, w wielu przypadkach musiały ustępować pierwszeństwa wózkom, co prowadziło do przerwania lub restartu misji. To zdarzenie pokazuje ograniczenia autonomii UAV w środowisku, gdzie obowiązuje hierarchia priorytetów procesów logistycznych.
5) P3-ZN5: Oprócz tego 2 alerty antykolizyjne w wyniku nagłego wejścia pracownika w przestrzeń lotu UAV. Choć zdarzenia te zakończyły się jedynie aktywacją procedury bezpieczeństwa i wycofaniem UAV, potwierdzają one realność ryzyka kolizji w środowisku o dużym natężeniu ruchu pieszych. Pokazuje to konieczność

dalszego doskonalenia algorytmów wykrywania przeszkód dynamicznych oraz zwiększenia bufora bezpieczeństwa wokół UAV.

Zakłócenia miały głównie charakter organizacyjno-informacyjny, co potwierdza specyfikę magazynu przyprodukcyjnego. Największe ograniczenia wynikały nie z samej infrastruktury, lecz z jakości procesów (rozmieszczanie etykiet, priorytet dostaw) i błędów ludzkich, które są trudniejsze do eliminacji niż typowe problemy techniczne.

Tab. 7.9. Oszacowane parametry ryzyka wraz z kalkulacją RPN dla przypadku 3

Zidentyfikowane zdarzenia niepożądane	Oszacowana częstotliwość	Oszacowane skutki	Wskaźnik ryzyka RPN
P3-ZN1	Sporadycznie (1)	Wysokie (4)	4
P3-ZN2	Często (4)	Znaczące (3)	12
P3-ZN3	Często (4)	Niewysokie (2)	8
P3-ZN4	Często (4)	Znaczące (3)	12
P3-ZN5	Okazjonalnie (2)	Wysokie (4)	8

Źródło: Opracowanie własne

			SKUTKI				
			Nieistotne	Niewysokie	Znaczące	Wysokie	Katastroficzne
			1	2	3	4	5
CZĘSTOTLIWOŚĆ	Nagminnie	5					
	Często	4		P3-ZN3	P3-ZN2 P3-ZN4		
	Czasami	3					
	Okazjonalnie	2				P3-ZN5	
	Sporadycznie	1				P3-ZN1	

Rys. 7.7. Macierz ryzyka dla zdarzeń niepożądanych zarejestrowanych w przypadku 3
Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie opisanych zdarzeń przygotowano analizę ryzyka:

- Błędne rozmieszczenie etykiet – krytyczne źródło ryzyka. Jego skutkiem były błędne dane o lokalizacji komponentów, co prowadziło do realnych zagrożeń dla ciągłości produkcji. Priorytet mitygacyjny powinien obejmować eliminację błędów ludzkich poprzez standaryzację i dodatkowe kontrole jakości.
- Zakłócenia komunikacyjne – pojedyncze, ale bardzo groźne zdarzenia. Mogą skutkować zawieszeniem UAV w trudno dostępnej lokalizacji i wymagają interwencji manualnych. Niezawodność transmisji danych musi być traktowana jako element krytyczny bezpieczeństwa operacyjnego.
- Problemy z odczytem numerów partii – istotne, ponieważ różnice między komponentami były minimalne, a jedynym wyróżnikiem był numer partii. Błędny

odczyt oznaczałby ryzyko dostarczenia nieodpowiednich surowców na linię produkcyjną.

- Ruch wózków widłowych – częste i powtarzalne zakłócenia. Wpływają przede wszystkim na efektywność i płynność realizacji misji, ale ich skala potwierdza konieczność koordynacji harmonogramów UAV i transportu wewnętrznego.
- Refleksy w folii ochronnej – problem powtarzalny, choć mniej groźny niż błędy etykiet. Może być stosunkowo łatwo zredukowany poprzez zmianę standardu zabezpieczania etykiet.

Analiza ryzyka wykazała, że najbardziej krytyczne dla odporności UAV–AutoID są czynniki informacyjne i organizacyjne, a nie środowiskowe. To potwierdza, że w magazynach przyprodukcyjnych odporność systemu buduje się nie tylko przez doskonalenie technologii, ale również przez współpracę z pracownikami i standaryzację procesów.

7.5.5. ETAP 5: Rekomendacje

System UAV–AutoID w magazynie przyprodukcyjnym klasy A potwierdził zdolność adaptacji do bardzo trudnych warunków operacyjnych. Osiągnięte wyniki wskazują jednak, że kluczowym ograniczeniem pozostaje obsługa etykiet – zarówno pod względem jakości odczytu, jak i błędów ludzkich przy ich rozmieszczeniu.

Rekomendacje ex post:

1) Techniczne – wdrożenie algorytmów OCR zoptymalizowanych do numerów partii, które są jedynym wyróżnikiem wielu komponentów. Dodatkowo sugeruje się zastosowanie kamer multispektralnych (IR/UV) do eliminacji problemów z refleksami oraz integrację systemu RFID jako redundantnego źródła danych. Rozważenie lokalnych repeaterów Wi-Fi/Radiolink na wyższych kondygnacjach zredukuje ryzyko zakłóceń komunikacyjnych.
2) Organizacyjne – konieczne jest wprowadzenie ścisłych procedur przyjęcia towarów i rozmieszczania etykiet na paletach. Regularne kontrole jakości etykiet powinny być elementem procesu logistycznego. Ważnym usprawnieniem będzie synchronizacja misji UAV z cyklem pracy wózków widłowych, aby unikać częstych restartów.
3) Środowiskowe – choć infrastruktura hali jest nowa i spełnia wysokie standardy, rekomenduje się poprawę lokalnej infrastruktury komunikacyjnej (punkty wzmacniające sygnał) oraz wyznaczenie dodatkowych bezpiecznych stref dla UAV, gdzie ich trajektorie nie będą krzyżować się z trasami dostaw.
4) Informacyjne – kluczowe działanie to eliminacja wieloetykietowych palet. Jeśli to niemożliwe, należy wprowadzić etykiety zbiorcze, które będą zawierać pełne informacje o zawartości palety, w tym numery partii. Takie rozwiązanie ograniczy liczbę błędów i uprości proces identyfikacji.

Studium przypadku 3 wykazało, że nawet w magazynach o najwyższym standardzie technicznym, największe wyzwania dla systemu UAV–AutoID mają charakter procesowy i informacyjny, a nie infrastrukturalny. To fundamentalna obserwacja: technologia UAV jest wystarczająco dojrzała, aby działać w trudnych warunkach, jednak jej pełna odporność zależy od jakości procesów towarzyszących. Wdrożenie rekomendowanych zmian pozwoli

nie tylko zwiększyć niezawodność systemu, ale również realnie wesprzeć produkcję, gdzie błędy identyfikacyjne mogą wstrzymać cały ciąg technologiczny.

7.6. Porównanie i podsumowanie wyników trzech studiów przypadku

Przeprowadzona walidacja metody M-UAV w trzech wybranych (z ponad 20 innych lokalizacji) zróżnicowanych środowiskach eksploatacyjnych pozwoliła na pełną ocenę odporności systemu UAV–AutoID w warunkach rzeczywistych. Każde z tych środowisk charakteryzowało się innym zestawem czynników ograniczających, co umożliwiło wieloaspektowe przetestowanie zarówno komponentów technicznych systemu, jak i jego interakcji z otoczeniem.

W centrum dystrybucyjnym (przypadek 1) kluczowym wyzwaniem okazała się skala operacji – ponad 5500 lokalizacji i ponad 500 SKU – co generowało wysoką złożoność procesu inwentaryzacyjnego. System UAV wykazał dużą skuteczność w zakresie dostępności i bezpieczeństwa, jednak krytyczne były czynniki środowiskowe: refleksy świetlne, zakłócenia łączności oraz dynamiczne przeszkody (wózki, operatorzy). Analiza ryzyka wskazała tu na potrzebę dalszej optymalizacji algorytmów VIO oraz stabilizacji komunikacji.

W magazynie blokowym (przypadek 2) skala była mniejsza (2400 lokalizacji, tylko 18 SKU), co znacząco ułatwiało interpretację danych, ale jednocześnie ujawniły się trudne warunki środowiskowe: powiewy wiatru po otwarciu bram, śliska i zabrudzona posadzka, zanieczyszczenia pyłowe oraz nieczytelne etykiety. Najpoważniejszym ryzykiem były zdmuchiwane oznaczenia big-bagów, które prowadziły do trwałej utraty danych. Odporność systemu była tu ograniczana głównie przez jakość informacji i warunki fizyczne hali, a nie przez złożoność procesów.

W magazynie przyprodukcyjnym (przypadek 3) o najwyższym standardzie technicznym (1800 m², 6 pięter składowania, 180 SKU) kluczowym problemem nie była infrastruktura, lecz czynniki organizacyjno-informacyjne. Wysoka podobieństwo asortymentu (różnice widoczne jedynie w numerach partii) oraz błędne rozmieszczanie etykiet przez pracowników prowadziły do krytycznych ryzyk (RPN=10). Intensywny ruch wózków i pracowników dodatkowo komplikował realizację misji. Wyniki pokazały, że w takim środowisku technologia UAV musi być wsparta ścisłą standaryzacją procesów i kontroli jakości oznaczeń, aby jej potencjał mógł być w pełni wykorzystany.

Wśród najważniejszych wniosków sformułowanych na podstawie przeprowadzonych badań terenowych należy wskazać:

- Pozytywnie zweryfikowano założenia dla Metody M-UAV, które zostały przyjęte w ramach systemowego podejścia do oceny odporności systemu UAV-AutoID.
- Potwierdzono istotny wpływ warunków środowiska operacyjnych na rejestrowany poziom odporności systemu UAV-AutoID oraz efektywność realizowanych przez niego misji.
- Potwierdzono wpływ warunków środowiska operacyjnego na występujące zdarzenia niepożądane wpływające na przebieg misji realizowanych przez system UAV-AutoID.
- Potwierdzono wpływ czynników organizacyjno-informacyjnych na odporność systemu UAV-AutoID oraz efektywność realizowanych przez niego misji.

- Potwierdzono uniwersalny charakter metody M-UAV, predysponujący ją do pomiarów odporności dla różnych systemów UAV-AutoID w różnych typach obiektów magazynowych.

Przedstawione w rozdziale 7 przypadki zostały wybrane w celu pokazania wyników implementacji opracowanego podejścia do oceny odporności w różnych systemach magazynowych, charakteryzujących się równymi warunkami eksploatacyjnymi. Przeprowadzone na ich podstawie pomiary i obserwacje oraz sformułowane wnioski zostały jednak potwierdzone również w pozostałych 17 testach realizowanych w innych obiektach magazynowych. Pozwala to stwierdzić, iż rezultaty przeprowadzonych testów potwierdziły poprawność metodyczną procedury postępowania oceniającego odporność systemu UAV-AutoID, jak również użyteczność przemysłową odpowiadającą na rzeczywiste potrzeby rynku.

ZAKOŃCZENIE

Transformacja cyfrowa i automatyzacja procesów produkcyjnych i logistycznych generuje zapotrzebowanie rynkowe na rozwój nowoczesnych systemów cyber-fizycznych, ale również opracowywanie procedur ich implementacji, które pozwolą im realizować powierzone zadania w sposób skuteczny, efektywny i terminowy. Osiągnięciu tego celu sprzyja budowanie odporności systemowej i procesowej na potencjalne zakłócenia występujące w trakcie operacji realizowanych przez systemy cyber-fizyczne. Zagadnienie to ma niezwykle ważne znaczenie dla współczesnej logistyki i Przemysłu 4.0, w których niezawodność i stabilność procesów realizowanych w zmiennym środowisku eksploatacyjnym stanowi podstawę zachowania ciągłości działania.

Ze względu na fakt, iż doktorat ma charakter wdrożeniowy, rezultaty opisane w rozprawie miały za zadanie wypełnić zidentyfikowaną lukę badawczą, ale również stanowić odpowiedź na oczekiwania biznesowe zgłaszane przez rynek. W związku z tym prowadzone badania ukierunkowane były na realizację celu główne, który dotyczył *opracowanie metody oceny odporności systemu UAV-AutoID w oparciu o podejście systemowe (obejmujące aspekty procesowe i inżynierskie) i uwzględniającej zmienne warunki eksploatacyjne w trakcie realizacji misji*, ale również celu utylitarnego skoncentrowanego na *podniesieniu skuteczności i bezpieczeństwa procesów inwentaryzacji w magazynach zamkniętych poprzez wdrożenie metody oceny odporności systemu UAV-AutoID, co pozwoli na: (1) ograniczenie ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych, (2) zwiększenie niezawodności i dostępności systemu podczas misji, oraz (3) optymalizację kosztów i czasu realizacji inwentaryzacji.*

Dzięki tak zdefiniowanym celom prowadzonych prac badawczych, opracowana metoda oceny systemów UAV-AutoID odpowiada na zidentyfikowaną w literaturze i praktyce inżynierskiej lukę badawczą, oferując kompleksowe podejście do oceny odporności oparte na podejściu systemowych uwzgledniającym aspekty procesowe i inżynieryjne. Jej struktura, oparta na czterech filarach odporności – absorpcji, adaptacji, odtworzenia i bezpieczeństwa – pozwala na przeniesienie analiz z poziomu opisowego na poziom mierzalny i praktycznie użyteczny. Dzięki temu powstało rozwiązanie, które łączy perspektywę naukową z potrzebami praktyki gospodarczej.

W wymiarze naukowym rozprawa przyczyniła się więc do wypełnienia istotnej luki badawczej i dostarczyła oryginalnego podejścia do oceny odporności systemów autonomicznych. Przeprowadzono kompleksowy przegląd ponad 300 źródeł literatury dotyczących oceny ryzyka i budowania odporności systemów UAV. W badaniach przemysłowych poddano analizie wpływ warunków środowiska operacyjnego na zakłócenia występujące w procesie inwentaryzacji. Na podstawie uzyskanych rezultatów opracowano modelową procedurę postępowania dla oceny odporności systemu UAV-AutoID z uwzględnieniem zmienności środowiska eksploatacyjnego. Wyniki badań zostały upowszechnione w siedmiu publikacjach naukowych w latach 2021–2024, w tym w czasopiśmie Sensors oraz w materiałach prestiżowych konferencji ESREL i CLC. Ponadto prezentacje wyników na konferencjach w Angers, Dublinie, Montrealu, Odense, Las Vegas, Pradze i Stavanger potwierdziły znaczenie problematyki na forum międzynarodowym i jej interdyscyplinarny charakter.

W aspekcie praktycznym opracowana metoda ma charakter wdrożeniowy i została bezpośrednio zweryfikowana w trakcie testów w wybranych systemach rzeczywistych.

Walidacja odbywała się w różnorodnych obiektach logistycznych i magazynowych, obejmujących zarówno nowoczesne centra klasy A, jak i starsze, zdekapitalizowane hale. Badania dotyczyły magazynów wysokiego składowania, blokowych, obiektów częściowo zautomatyzowanych, jak i w pełni manualnych. Dodatkowym utrudnieniem, a zarazem wartością, było zróżnicowanie przechowywanych towarów oraz specyfiki procesów – od produktów przemysłowych po artykuły konsumpcyjne. W każdym przypadku badania były prowadzone w aktywnie funkcjonujących magazynach, które równolegle realizowały swoje codzienne operacje logistyczne. To oznaczało zmienność warunków, różne układy przestrzenne, specyficzne kultury organizacyjne i systemy WMS. Taka różnorodność przeprowadzonych badań terenowych dowodzi nie tylko uniwersalności metody, ale także jej elastyczności i praktycznej przydatności. Należy też podkreślić, że uzyskane wyniki zostały zaimplementowane w praktyce przemysłowej firmy NeuroSpace, co znacząco zwiększa ich wartość i potwierdza charakter niniejszej pracy jako doktoratu wdrożeniowego.

W związku z powyższym, najważniejszymi **osiągnięciami naukowymi** niniejszej pracy są:

- Przegląd literatury przedmiotu w zakresie istniejących systemów UAV oraz ich zastosowania zarówno w przemyśle, jak i badaniach naukowych, w szczególności w systemach magazynowych.
- Przegląd literatury przedmiotu w zakresie ryzyka związanego z funkcjonowaniem systemów UAV.
- Przegląd literatury i raportów branżowych identyfikujący krytyczne trendy dotyczące rozwoju systemów UAV w kolejnych pięciu latach.
- Opracowanie metody M-UAV w oparciu o podejście systemowe, uwzględniające aspekty procesowe i inżynieryjne, oceniającej odporność systemów UAV-AutoID pracujących w zmiennych warunkach środowiskowych.
- Weryfikacja przyjętych założeń w metodzie M-UAV na podstawie testów realizowanych w licznych obiektach magazynowych obsługujących przepływy towarowe w Europie.

Za kluczowe **osiągnięcia utylitarne** uznano opracowanie:

- Algorytmu postępowania oceniającego odporność systemów UAV-AutoID w postaci 5-etapowej procedury postępowania.
- Systemu wskaźników i mierników oceniających odporność systemu UAV-AutoID na występujące zakłócenia.
- Założeń dla przygotowywanej macierzy wartości referencyjnych, pozwalającej zakwalifikować uzyskane wartości pomiaru do odpowiedniego poziomu odporności.

Opracowana metoda M-UAV pozwala ocenić poziom odporności systemu UAV-AutoID na zakłócenia oraz stanowi wsparcie dla inżynierów i menedżerów w procesach decyzyjnych dotyczących:

- doskonalenia systemu UAV-AutoID,
- zwiększenia efektywności procesu planowania i realizacji misji inwentaryzacyjnych;
- dostosowywania procedur awaryjnych uwzględniających zmienne warunki środowiska operacyjnego;

- mitygacji ryzyka związanego z występowanie zdarzeń niepożądanych w trakcie realizacji misji.

Do najważniejszych zalet metody M-UAV należy kompleksowy charakter przygotowywanej oceny przy równoczesnym braku złożoności obliczeniowej – co sprzyja łatwości jej implementacji w środowisku biznesowym. Wyniki oceny są obiektywne, powtarzalne i możliwe do porównania pomiędzy różnymi obiektami. Jednocześnie uzyskiwane rezultaty pomiaru są łatwe w interpretacji zarówno dla inżynierów odpowiedzialnych za system UAV-AutoID, jak i dla menedżerów odpowiedzialnych za planowanie i organizację całego procesu inwentaryzacji magazynowej. Metoda charakteryzuje się wysoką skalowalnością i adaptacyjnością, co pozwala dostosować ją do warunków różnych środowisk operacyjnych. Jej integracja z systemami cyfrowymi (GIS, WMS, ERP) otwiera też dodatkowe perspektywy jej możliwego rozwoju.

Podczas badań zidentyfikowano również pewne ograniczenia. Obejmują one konieczność dalszej kalibracji wskaźników w nietypowych środowiskach, podatność UAV na zakłócenia środowiskowe – takie jak interferencje elektromagnetyczne, refleksy świetlne czy turbulencje w przestrzeniach zamkniętych – oraz brak pełnej standaryzacji wybranych rozwiązań technicznych. Ograniczenia te nie podważają wartości opracowanej metody, lecz stanowią krytyczny punkt wyjścia do dalszego jej rozwoju i doskonalenia.

Zidentyfikowane ograniczenia stanowią również impuls dla dalszego rozwoju opracowanej koncepcji. Kierunki przyszłych badań bazujących na rezultatach opisanych w niniejszej rozprawie dotyczyć będą:

- Rozszerzenia metody w kierunku integracji z modelami predykcyjnymi, które pozwolą na przewidywanie zdarzeń niepożądanych z określonym poziomem pewności. Umożliwi to przesunięcie punktu ciężkości z oceny ex post na bardziej proaktywną analizę ex ante, co zwiększy wartość narzędzia dla praktyki gospodarczej.
- Opracowania nowych wskaźników odporności wykorzystujących algorytmy analityczne wspomagane przez systemy AI lub uczenie maszynowe, co pozwoli na bardziej precyzyjne monitorowanie zachowania systemów autonomicznych w czasie rzeczywistym.
- Rozwoju badań nad zasilaniem systemów UAV z wykorzystaniem ogniw wodorowych, co może mieć krytyczne znaczenie dla wydłużenia czasu misji, zwiększenia niezależności energetycznej i ograniczenia wpływu czynników środowiskowych na skuteczność działania. W tym kontekście badania będą obejmować zarówno aspekty technologiczne, jak i organizacyjne, gdyż wprowadzenie nowych źródeł energii wymaga również dostosowania procedur bezpieczeństwa i metod zarządzania misją.
- Połączenie metody M-UAV z rozwiązaniami umożliwiającymi tworzenie ekosystemów inteligentnych, w których systemy UAV, pojazdy naziemne oraz infrastruktura stacjonarna będą ze sobą współdziałać. Takie podejście umożliwi nie tylko poprawę bezpieczeństwa i stabilności procesów, ale także optymalizację wykorzystania zasobów oraz zwiększenie odporności całych łańcuchów dostaw.

Równocześnie zakłada się dalszą integrację metody z praktyką gospodarczą, zwłaszcza w obszarze MRO i automatyzacji inspekcji infrastruktury. Przyszłe badania będą dążyć do pełnej automatyzacji procesu oceny odporności, co pozwoli znacząco przyspieszyć procesy decyzyjne i ułatwi wdrożenie w skali przemysłowej. Dodatkowym atutem będzie możliwość

kalibracji metody do lokalnych warunków i specyfiki danego przedsiębiorstwa, co zwiększy jej użyteczność i elastyczność.

Podsumowując osiągnięte rezultaty należy podkreślić, iż wyniki przedstawione w niniejszej rozprawie odpowiadają na wszystkie pytania sformułowane na początku realizacji badań, które zostały przedstawione w rozdziale 5. Przede wszystkim zidentyfikowano czynniki o charakterze technicznym, organizacyjnym i środowiskowym wpływające na odporność systemów UAV-AutoID. Na podstawie przeprowadzonych testów terenowych udało się zidentyfikować różne grupy zdarzeń niepożądanych, których występowanie ogranicza efektywności i skuteczność realizowanych misji inwentaryzacyjnych. Część z tych zdarzeń została opisana w części aplikacyjnej rozprawy. Zbudowano system pomiaru odporności oparty o zbiór wskaźników i mierników oraz macierz wartości referencyjnych, który stał się rdzeniem zbudowanej metody M-UAV. Opracowana procedura postępowania oceniającego została zwalidowana na przykładzie 20 obiektów magazynowych, co umożliwiło zdefiniowanie wymogów do jej implementacji w praktyce przemysłowej. Tym samym można stwierdzić, iż cel główny oraz cele szczegółowe, sformułowane w rozdziale 5 rozprawy doktorskiej, zostały osiągnięte.

BIBLIOGRAFIA

1. Abohashish, S. M. M., Rizk, R. Y., & Elsedimy, E. I. (2023). Trajectory optimization for UAV-assisted relay over 5G networks based on reinforcement learning framework. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2023(1), 33.
2. Abubakar, A. I., Ahmad, I., Omeke, K. G., Ozturk, M., Ozturk, C., Abdel-Salam, A. M., Mollel, M. S., Abbasi, Q. H., Hussain, S., & Imran, M. A. (2023). A survey on energy optimization techniques in UAV-based cellular networks: From conventional to machine learning approaches. Drones, 7(3), 214.
3. Adoni, W. Y. H., Shaik Fareedh, J., Lorenz, S., Gloaguen, R., Madriz, Y., Singh, A., & Kühne, T. D. (2024). Intelligent swarm: Concept, design and validation of self-organized UAVs based on leader–followers paradigm for autonomous mission planning. Drones, 8(10), 575.
4. Aggarwal, S., Gupta, P., Mahajan, N., Balaji, S., Singh, K. J., Bhargava, B., & Panda, S. (2023). Implementation of drone-based delivery of medical supplies in North-East India: Experiences, challenges and adopted strategies. Frontiers in Public Health, 11, 1128886.
5. Agrawal, J., & Arafat, M. Y. (2024). Transforming farming: A review of AI-powered UAV technologies in precision agriculture. Drones, 8(11), 664.
6. Ahmed, F., Mohanta, J. C., & Keshari, A. (2024). Power transmission line inspections: Methods, challenges, current status and usage of unmanned aerial systems. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 110, Article 54.
7. Ahmed, F., Mohanta, J., Keshari, A., & Yadav, P. S. (2022). Recent advances in unmanned aerial vehicles: A review. Arabian Journal for Science and Engineering, 47, 7963-7984.
8. Akhloufi, M. A., Castro, N. A., & Couturier, A. (2021). Unmanned aerial systems for wildland and forest fires. Drones, 5(1), 15.
9. Akram, M. U., Kocabas, I., & Dagdeviren, M. (2025). A resilience assessment framework for unmanned aerial vehicle operations in industrial environments. Drones, 9(3), 165.
10. Alajami, A. A., Moreno, G., & Pous, R. (2022). Design of a UAV for autonomous RFID-based dynamic inventories using stigmergy for mapless indoor environments. Drones, 6(8), 208.
11. Alderson, D. L., Brown, G. G., & Carlyle, W. M. (2015). Operational models of infrastructure resilience. Risk Analysis, 35(4), 562–586.
12. Ali, M. A. H., Zulkifle, M. Z. A., Nik Ghazali, N. N., Ismail, A., Shukor, N. A. A., & Hassan, M. (2025). AI-driven UAV with image processing algorithm for automatic visual inspection of aircraft external surface. Scientific Reports, 15, 19581.
13. Al-Sabbagh, A., El-Bokhary, A., El-Koussa, S., Jaber, A., & Elkhodr, M. (2025). Enhancing UAV security against GPS spoofing attacks through a genetic algorithm-driven deep learning framework. Information, 16(2), 115.
14. Alsamhi, S. H., Shvetsov, A. V., Kumar, S., Shvetsova, S. V., Alhartomi, M. A., Hawbani, A., Rajput, N. S., Srivastava, S., Saif, A., & Nyangaresi, V. O. (2022). Computing in the sky: A survey on intelligent ubiquitous computing for UAV-assisted 6G networks and Industry 4.0/5.0. Drones, 6(7), 177.
15. Amukele, T. K., Ness, P. M., Tobian, A. A. R., Boyd, J., Street, J., & drone delivery team. (2017). Drone transportation of blood products. Transfusion, 57(3), 582–588.
16. Anderson, K., & Gaston, K. J. (2013). Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. Frontiers in Ecology and the Environment, 11(3), 138–146.
17. Ardiny, H., Beigzadeh, A., & Mahani, H. (2024). Applications of unmanned aerial vehicles in radiological monitoring: A review. Nuclear Engineering and Design, 422, 113110.

18. Arsalis, A., Papanastasiou, P., & Georghiou, G. E. (2022). A comparative review of lithium-ion battery and regenerative hydrogen fuel cell technologies for integration with photovoltaic applications. Renewable Energy, 191, 943–960.
19. Atencia Payares, L. K., Tarquis, A. M., Hermoso Peralo, R., Cano, J., Cámara, J., Nowack, J., & Gómez del Campo, M. (2023). Multispectral and thermal sensors onboard UAVs for heterogeneity in Merlot vineyard detection: Contribution to zoning maps. Remote Sensing, 15(16), 4024.
20. Austin, R. (2011). Unmanned aircraft systems: UAV design, development and deployment. Chichester, UK: John Wiley & Sons.
21. Bärfuss, K., et al. (2022). Drone-Based Atmospheric Soundings Up to an Altitude of 10 km: Technical Approach towards Operations. MDPI Aerospace, 6(12), 404.
22. Barraz, Z., Sebari, I., Ait El Kadi, K., & Ait Abdelmoula, I. (2025). „Towards a Holistic Approach for UAV-Based Large-Scale Photovoltaic Inspection: A Review on Deep Learning and Image Processing Techniques." Technologies, 13(3), 117.
23. Barreiro, A. C., Seibold, C., Hilsmann, A., & Eisert, P. (2021). Automated damage inspection of power transmission towers from UAV images
24. Barreto, L., Amaral, A., & Pereira, T. (2017). Industry 4.0 implications in logistics: An overview. Procedia Manufacturing, 13, 1245–1252.
25. Batty, M. (2018). Inventing future cities. Cambridge, MA: MIT Press.
26. Bechtsis, D., Tsolakis, N., Vlachos, D., & Iakovou, E. (2018). Sustainable supply chain management in the digitalisation era: The impact of Automated Guided Vehicles and smart logistics systems. Sustainability, 10(11), 3764.
27. Benassi, F., Dall'Asta, E., Diotri, F., Forlani, G., Morra di Cella, U., Roncella, R., & Santise, M. (2017). Testing accuracy and repeatability of UAV blocks oriented with GNSS-supported aerial triangulation. Remote Sensing, 9(2), 172.
28. Bhamra, R., Dani, S., & Burnard, K. (2011). Resilience: The concept, a literature review and future directions. International Journal of Production Research, 49(18), 5375–5393.
29. Bishay, P. L., Rini, A., Brambila, M., Niednagel, P., Eghdamzamiri, J., Yousefi, H., Herrera, J., Saad, Y., Bertuch, E., Black, C., Hanna, D., & Rodriguez, I. (2024). CGull: A Non-Flapping Bioinspired Composite Morphing Drone. Biomimetics, 9(9), 527.
30. Boin, A., & Van Eeten, M. J. G. (2013). The resilient organization: A critical appraisal. Public Management Review, 15(3), 429–445.
31. Bonkenburg, T. (2016). Robotics in logistics: A DPDHL perspective on implications and use cases for the logistics industry. DHL Customer Solutions & Innovation: Bonn, Germany.
32. Boukoberine, M. N., Zhou, Z., & Benbouzid, M. (2019). A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management systems: Solutions, strategies and prospects. Applied Energy, 255, 113823.
33. Burke, C., McWhirter, P. R., Veitch-Michaelis, J., McAree, O., Pointon, H. A. G., Wich, S., & Longmore, S. (2019). Requirements and limitations of thermal drones for effective search and rescue in marine and coastal areas. Drones, 3(4), 78.
34. Campana, S. (2017). Drones in archaeology: State-of-the-art and future perspectives. Archaeological Prospection, 24(4), 275–296.
35. Cao, Z., Zhao, H., Wang, Y., He, C., Zhou, D., & Han, X. (2025). A resilience quantitative assessment framework for cyber–physical systems: Mathematical modeling and simulation. Applied Sciences, 15(15), 8285.
36. Cardone, M., Gargiulo, B., & Fornaro, E. (2021). Modelling and experimental validation of a hybrid electric propulsion system for light aircraft and unmanned aerial vehicles. Energies, 14(13), 3969.
37. Carrillo, J., & Borda, K. (2021). Recent advances in artificial intelligence and computer vision for unmanned aerial vehicles. Proceedings of the 2021 IEEE International

Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 11–16 July 2021, Brussels, Belgium. IEEE.
38. Castrillo, V. U., Manco, A., Pascarella, D., & Gigante, G. (2022). A review of Counter-UAS technologies for cooperative defensive teams of drones. Drones, 6(3), 65.
39. Chahl, J., Chitsaz, N., McIvor, B., Ogunwa, T., Kok, J.-M., McIntyre, T., & Abdullah, E. (2021). Biomimetic drones inspired by dragonflies will require a systems based approach and insights from biology. Drones, 5(2), 24.
40. Chase, A. F., Chase, D. Z., Weishampel, J. F., Drake, J. B., Shrestha, R. L., Slatton, K. C., Awe, J. J., & Carter, W. E. (2011). Airborne LiDAR, archaeology, and the ancient Maya landscape at Caracol, Belize. Journal of Archaeological Science, 38(2), 387–398.
41. Chatzargyros, G., Papakonstantinou, A., Kotoula, V., Stimoniaris, D., & Tsiamitros, D. (2024). UAV Inspections of Power Transmission Networks with AI Technology: A Case Study of Lesvos Island in Greece. Energies, 17(14), 3518.
42. Chowdhury, S., Emelogu, A., Marufuzzaman, M., Nurre, S. G., & Bian, L. (2017a). Drones for medical supply chain distribution in the developing world: A case study of Rwanda. International Journal of Production Economics, 188, 150–161
43. Chowdhury, S., Emelogu, A., Marufuzzaman, M., Nurre, S. G., & Bian, L. (2017b). Drones for disaster response and relief operations: A continuous approximation model. International Journal of Production Economics, 188, 167–184.
44. Chung, S.-J., Paranjape, A. A., Dames, P., Shen, S., & Kumar, V. (2018). A survey on aerial swarm robotics. IEEE Transactions on Robotics, 34(4), 837–855.
45. Chung, T. H., & Daniel, R. (2023). DARPA OFFSET: A vision for advanced swarm systems through agile technology development and experimentation. Field Robotics, 3, 97–124.
46. Clothier, R. A., Greer, D. A., Greer, D. G., & Mehta, A. M. (2015). Risk perception and the public acceptance of drones. Risk Analysis, 35(6), 1167–1183.
47. Clothier, R. A., Williams, B. P., & Fulton, N. L. (2015). Structuring the safety case for unmanned aircraft system operations in non-segregated airspace. Safety Science, 79, 213–228.
48. Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92, 79–97.
49. Coppola, M., McGuire, K. N., De Wagter, C., & de Croon, G. C. H. E. (2020). A Survey on Swarming With Micro Air Vehicles: Fundamental Challenges and Constraints. Frontiers in Robotics and AI, 7, Article 18.
50. Custers, B. (Ed.). (2016). The future of drone use: Opportunities and threats from ethical and legal perspectives. The Hague, Netherlands: T.M.C. Asser Press.
51. D'Andrea, R. (2012). Guest editorial: A revolution in the warehouse – A retrospective on Kiva Systems and the grand challenges ahead. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 9(4), 638–639.
52. D'Angelo, S., Marcellini, S., De Crescenzo, A., Marolla, M., Lippiello, V., & Siciliano, B. (2025). A semi-autonomous aerial platform enhancing non-destructive tests. Drones, 9(8), 516.
53. Dai, D., Cai, H., & Wang, S. (2025). Optimization of a cooperative truck–drone delivery system in rural China: A sustainable logistics approach for diverse terrain conditions. Sustainability, 17(14), 6390.
54. de Alcantara Andrade, F. A., Hovenburg, A. R., Netto de Lima, L., Dahlin Rodin, C., Johansen, T. A., Storvold, R., Moraes Correia, C. A., & Barreto Haddad, D. (2019). Autonomous unmanned aerial vehicles in search and rescue missions using real-time cooperative model predictive control. Sensors, 19(19), 4067.

55. de Almeida, N. M., & Crespo Márquez, A. (2024). Sustainability and resilience of engineering assets. Applied Sciences, 14(1), 391.
56. de Boer, G., Calmer, R., Jozef, G., Cassano, J. J., Hamilton, J., Lawrence, D., Borenstein, S., Doddi, A., Cox, C., Schmale, J., Preußer, A., Argrow, B. (2022). Observing the Central Arctic Atmosphere and Surface with University of Colorado uncrewed aircraft systems. Scientific Data, 9, Article 439.
57. de Oliveira, A. K. V., Aghaei, M., & Rüther, R. (2022). Automatic inspection of photovoltaic power plants using aerial infrared thermography: A review. Energies, 15(6), 2055.
58. Dereń, K., & Żurek, A. (2024). Comparative analysis of risks in traditional inventory methods and UAV-assisted inventory processes. In Proceedings of the Carpathian Logistics Congress (CLC 2023) (pp. 99–105). Tanger Ltd.
59. Doneus, M., Briese, C., Fera, M., & Janner, M. (2008). Archaeological prospection of forested areas using full-waveform airborne laser scanning. Journal of Archaeological Science, 35(4), 882–893.
60. Dong, H., Wang, N., Fu, D., Wei, F., Liu, G., & Liu, B. (2024). Precision and efficiency in dam crack inspection: A lightweight object detection method based on joint distillation for unmanned aerial vehicles (UAVs). Drones, 8(11), 692.
61. Duangsuwan, S., & Prapruetdee, P. (2024). Drone-enabled AI edge computing and 5G communication network for real-time coastal litter detection. Drones, 8(12), 750.
62. Ducard, G. J. J., & Allenspach, M. (2021). Review of designs and flight control techniques of hybrid and convertible VTOL UAVs. Aerospace Science and Technology, 118, Article 107035.
63. Ekici, B., Seçkin, A. Ç., Özek, B., & Karpuz, C. (2023). Warehouse drone: Indoor positioning and product counter with virtual fiducial markers. Drones, 7(1), 3.
64. Erdelj, M., & Natalizio, E. (2016). UAV-assisted disaster management: Applications and open issues. In 2016 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC) (pp. 1–5). IEEE.
65. Erdelj, M., Król, M., & Natalizio, E. (2017). Wireless sensor networks and multi-UAV systems for natural disaster management. Computer Networks, 124, 72–86.
66. Eschmann, C., Kuo, C.-M., Kuo, C.-H., & Boller, C. (2013). High-resolution multisensor infrastructure inspection with unmanned aircraft systems. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-1/W2, 125–129.
67. Escobar Villanueva, J. R., Iglesias Martínez, L., & Pérez Montiel, J. I. (2019). DEM generation from fixed-wing UAV imaging and LiDAR-derived ground control points for flood estimations. Sensors, 19(14), 3205.
68. Farajollahi, A. H., Rostami, M., & Marefati, M. (2022). A hybrid-electric propulsion system for an unmanned aerial vehicle based on proton exchange membrane fuel cell, battery, and electric motor. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 44(1), 934–950.
69. Fatorachian, H., & Kazemi, H. (2021). Impact of Industry 4.0 on supply chain performance. Production Planning & Control, 32(1), 63–81.
70. Fattori, F., & Cocuzza, S. (2025). Tethered drones — A comprehensive review of technologies, challenges, and applications. Drones, 9(6), 425.
71. Fernández-Caramés, T. M., Blanco-Novoa, O., Froiz-Míguez, I., & Fraga-Lamas, P. (2019). Towards an Autonomous Industry 4.0 Warehouse: A UAV and Blockchain-Based System for Inventory and Traceability Applications in Big Data-Driven Supply Chain Management. Sensors, 19(10), 2394.
72. Fiksel, J. (2015). Resilient by Design: Creating Businesses That Adapt and Flourish in a Changing World. Island Press.

73. Floreano, D., & Wood, R. J. (2015). Science, technology and the future of small autonomous drones. Nature, 521(7553), 460-466.
74. Fraccascia, L., Giannoccaro, I., & Albino, V. (2018). Resilience of complex systems: State of the art and directions for future research. Complexity, 2018, Article 3421529.
75. Francis, R., & Bekera, B. (2014). A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems. Reliability Engineering & System Safety, 121, 90–103.
76. Gao, Y., Qiao, Z., Pei, X., Wu, G., & Bai, Y. (2023). Design of energy-management strategy for solar-powered UAV. Sustainability, 15(20), 14972.
77. Geelen, S., Camps, J., Olyslaegers, G., Ilegems, G., Schroeyers, W. (2022). Radiological Surveillance Using a Fixed-Wing UAV Platform. Remote Sensing, 14(16), 3908.
78. González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J., Bueno, M., & Arias, A. P. (2017). Unmanned aerial systems for civil applications: A review. Drones, 1(1), 2.
79. Goodrich, M. A., Morse, B. S., Gerhardt, D., Cooper, J. L., Quigley, M., Adams, J. A., & Humphrey, C. (2010). Supporting wilderness search and rescue using a camera-equipped mini UAV. Journal of Field Robotics, 25(1-2), 89–110.
80. Haimes, Y. Y. (2009). On the definition of resilience in systems. Risk Analysis, 29(4), 498–501.
81. Hamissi, A., & Dhraief, A. (2023). A survey on the Unmanned Aircraft System Traffic Management (UTM). ACM Computing Surveys, 56(3), 1–37.
82. Hartley, R. J. a. L., Henderson, I. L., & Jackson, C. L. (2022). BVLOS Unmanned Aircraft Operations in Forest Environments. Drones, 6(7), 167.
83. Harwood, S. (2024). A cybersystemic view of autonomous weapon systems (AWS). Technological Forecasting and Social Change, 205, 123514.
84. Hassanalian, M., & Abdelkefi, A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. Progress in Aerospace Sciences, 91, 99–131.
85. Heo, S.-J., & Na, J. (2025). Review of drone-based technologies for wind turbine blade inspection. Electronics, 14(2), 227.
86. Hodgson, J. C., Baylis, S. M., Mott, R., Herrod, A., & Clarke, R. H. (2016). Precision wildlife monitoring using unmanned aerial vehicles. Scientific Reports, 6, 22574.
87. Hofmann, E., & Rüsch, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. Computers in Industry, 89, 23–34.
88. Hollnagel, E. (2012). FRAM: The Functional Resonance Analysis Method – Modelling complex socio-technical systems. CRC Press / Taylor & Francis Group.
89. Hollnagel, E., Woods, D. D., & Leveson, N. (Eds.). (2006). Resilience engineering: Concepts and precepts. CRC Press / Taylor & Francis Group.
90. Hosseini, S., Barker, K., & Ramirez-Marquez, J. E. (2016). A review of definitions and measures of system resilience. Reliability Engineering & System Safety, 145, 47–61.
91. Hu, D., & Minner, J. (2023). UAVs and 3D City Modeling to Aid Urban Planning and Historic Preservation: A Systematic Review. Remote Sensing, 15(23), 5507.
92. Hu, Y., Wen, G., Qiu, W., Xu, C., Fan, L., & He, Y. (2025). Blown yaw: A novel yaw control method for tail-sitter aircraft by deflected propeller wake during vertical take-off and landing. Drones, 9(9), 635.
93. Hunt, E. R., & Daughtry, C. S. T. (2018). What good are unmanned aircraft systems for agricultural remote sensing and precision agriculture? International Journal of Remote Sensing, 39(15–16), 5345–5376.
94. Islam, M. S., Mahmoud, A. S., & Sheltami, T. R. (2025). AI-Enhanced intrusion detection for UAV systems: A taxonomy and comparative review. Drones, 9(10), 682.

95. Jahani, H., Khosravi, Y., Kargar, B., Ong, K.-L., & Arisian, S. (2024). Exploring the role of drones and UAVs in logistics and supply chain management: A novel text-based literature review. International Journal of Production Research, 62(19), 1873–1897.
96. Kamat, A., Shanker, S., Barve, A., Muduli, K., Mangla, S. K., & Luthra, S. (2022). Uncovering interrelationships between barriers to unmanned aerial vehicles in humanitarian logistics. Operations Management Research, 15(3), 1134–1160.
97. Kanellakis, C., & Nikolakopoulos, G. (2017). Survey on computer vision for UAVs: Current developments and trends. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 87(1), 141–168.
98. Keennon, M., Klingebiel, K., & Won, H. (2012). Development of the Nano Hummingbird: A tailless flapping wing micro air vehicle. 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 9–12 January 2012, Nashville, Tennessee.
99. Kellermann, R., Biehle, T., & Fischer, L. (2020). Drones for parcel and passenger transportation: A literature review. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 4, 100088.
100. Klauser, F., & Pedrozo, S. (2015). Power and space in the drone age: A multidisciplinary study of the rise of drones. Geographica Helvetica, 70(4), 285–293.
101. Kouhizadeh, M., Saberi, S., & Sarkis, J. (2021). Blockchain technology and the sustainable supply chain: Theoretically exploring adoption barriers. International Journal of Production Economics, 231, 107831.
102. Kumar, R., Aljuhani, A., Kumar, P., Kumar, A., Franklin, A., & Jolfaei, A. (2022). Blockchain-enabled secure communication for unmanned aerial vehicle (UAV) networks. In Proceedings of the 5th International ACM MobiCom Workshop on Drone Assisted Wireless Communications for 5G and Beyond (DroneCom '22) (pp. 37–42). Association for Computing Machinery.
103. Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. Business & Information Systems Engineering, 6(4), 239–242.
104. Lee, S., & Cho, N. (2025). Optimal location of urban air mobility (UAM) vertiport using a three-stage geospatial analysis framework. Future Transportation, 5(2), 58.
105. Lenda, G., Borowiec, N., & Marmol, U. (2023). Study of the Precise Determination of Pipeline Geometries Using UAV Scanning Compared to Terrestrial Scanning, Aerial Scanning and UAV Photogrammetry. Sensors, 23(19), 8257.
106. Leveson, N. G. (2012). Engineering a safer world: Systems thinking applied to safety. MIT Press.
107. Li, B., Fei, Z., & Zhang, Y. (2019). UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends. IEEE Internet of Things Journal, 6(2), 2241–2263.
108. Li, J., Zhou, W., Gong, W., Lu, Z., Yan, H., Wei, W., Wang, Z., Shen, C., & Pang, J. (2022). LiDAR-assisted UAV stereo vision detection in railway freight transport measurement. Drones, 6(11), 367.
109. Li, S., Liao, T., Wu, G., Wang, Y., & Suganthan, P. N. (2025). Drone on-demand delivery routing problem considering order splitting and battery swapping. Computers & Industrial Engineering, 208, 111388.
110. Li, Z., Zhang, Y., Wu, H., Suzuki, S., Namiki, A., & Wang, W. (2023). Design and Application of a UAV Autonomous Inspection System for High-Voltage Power Transmission Lines. Remote Sensing, 15(3), 865.
111. Liang, H., Lee, S.-C., Bae, W., Kim, J., & Seo, S. (2023). Towards UAVs in construction: Advancements, challenges, and future directions for monitoring and inspection. Drones, 7(3), 202.
112. Liang, N., Bai, J., & Meng, Z. (2025). HHO-based cable tension control of tethered UAV with unknown input time delay. Drones, 9(9), 617.

113. Liao, K.-C., Wu, H.-Y., & Wen, H.-T. (2022). Using drones for thermal imaging photography and building 3D images to analyze the defects of solar modules. Inventions, 7(3), 67.
114. Lin, H.-Y., Chang, K.-L., & Huang, H.-Y. (2024). Development of unmanned aerial vehicle navigation and warehouse inventory system based on reinforcement learning. Drones, 8(6), 220.
115. Liu, H., Yao, Y., Wang, J., Yang, T., & Li, T. (2022). Energy management and system design for fuel cell hybrid unmanned aerial vehicles. Energy Science & Engineering, 10(10), 3987–4006.
116. Liu, X., Wang, S., & Yin, C. (2025). Virtual force-based swarm trajectory design for unmanned aerial vehicle-assisted data collection Internet of Things networks. Drones, 9(1), 28.
117. López Peña, F., Balseiro-Romero, M., Fernández, E., Deibe, Á., & Pita, I. (2024). An UAV system for visual inspection and wall thickness measurements in ship surveys. Measurement, 238, 115262.
118. Lyu, C., Zhang, D., Sun, M., & Zhao, Q. (2025). UAV-based deep learning applications for automated inspection of civil infrastructure: A review. Automation in Construction, 163, 105182.
119. Ma, C., Zhang, L., You, L., & Tian, W. (2025). A review of supply chain resilience: A network modeling perspective. Applied Sciences, 15(1), 265.
120. Madni, A. M., & Jackson, S. (2009). Towards a conceptual framework for resilience engineering. IEEE Systems Journal, 3(2), 181–191.
121. Malang, C., Charoenkwan, P., & Wudhikarn, R. (2023). Implementation and critical factors of unmanned aerial vehicle (UAV) in warehouse management: A systematic literature review. Drones, 7(2), 80.
122. Marintseva, K., Dixon, S., & Yun, T. (2024). The concept of creating a UAV cargo delivery centre on the South Coast of England. Transportation Research Procedia, 81, 44–57.
123. Mariscal, G., Depcik, C., Chao, H., Wu, G., & Li, X. (2024). Technical and economic feasibility of applying fuel cells as the power source of unmanned aerial vehicles. Energy Conversion and Management, 301, 118005.
124. Medeiros, H., Moreira, A., & de Carvalho, P. (2023). UAV-based remote sensing for sustainable agriculture: Challenges and opportunities. Sustainability, 15(2), 1201.
125. Medić, D., Bakota, M., Jelaska, I., & Škorput, P. (2024). Low contrast challenge and limitations of thermal drones in maritime search and rescue—Pilot study. Drones, 8(3), 76.
126. Mendu, B., & Mbuli, N. (2025). State-of-the-Art Review on the Application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Power Line Inspections: Current Innovations, Trends, and Future Prospects. Drones, 9(4), 265.
127. Mershad, K., Dahrouj, H., Sarieddeen, H., Shihada, B., Al-Naffouri, T., & Alouini, M.-S. (2021). Cloud-enabled high-altitude platform systems: Challenges and opportunities. Frontiers in Communications and Networks, 2, 716265.
128. Meyer, M., Schorer, S., Żurek, A., & Hinz, M. (2025). UAV swarm coordination for flood area coverage in populated regions using reinforcement learning. In E. B. Abrahamsen, T. Aven, F. Bouder, R. Flage, & M. Ylönen (Eds.), Proceedings of the 35th European Safety and Reliability & the 33rd Society for Risk Analysis Europe Conference (ESREL SRA-E 2025) (pp. 1–8). Research Publishing.
129. Min, H. (2023). Leveraging drone technology for last-mile deliveries in the e-tailing ecosystem. Sustainability, 15(15), 11588.
130. Misra, A., Jayachandran, S., Kenche, S., Katoch, A., Suresh, A., Gundabattini, E., Selvaraj, S. K., & Legesse, A. A. (2022). A review on vertical take-off and landing (VTOL)

tilt-rotor and tilt wing unmanned aerial vehicles (UAVs). Journal of Engineering, 2022, 1–24.

131. Mohamed, A., & Mohamed, M. (2025). Unmanned Aerial Vehicles in Last-Mile Parcel Delivery. Drones, 9(6), 413.

132. Mohamed, N., Al-Jaroodi, J., Jawhar, I., Idries, A., & Mohammed, F. (2020). Unmanned aerial vehicles applications in future smart cities. Technological Forecasting and Social Change, 153, 119293.

133. Molnár, A. (2022). Gamma radiation dose measurement using an energy-selective method with the help of a drone. Sensors, 22(23), 9062.

134. Motlagh, N. H., Bagaa, M., & Taleb, T. (2017). UAV-based IoT platform: A crowd surveillance use case. IEEE Communications Magazine, 55(2), 128–134.

135. Motlagh, N. H., Taleb, T., & Arouk, O. (2016). Low-altitude unmanned aerial vehicles-based Internet of Things services: Comprehensive survey and future perspectives. IEEE Internet of Things Journal, 3(6), 899–922.

136. Müller, H., Zimmerman, N., Polonelli, T., Magno, M., Behley, J., Stachniss, C., & Benini, L. (2023, April). Fully on-board low-power localization with multizone time-of-flight sensors on nano-UAVs. In Proceedings of the 2023 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE) (pp. 1–6).

137. Munasinghe, I., Perera, A., & Deo, R. C. (2024). A Comprehensive Review of UAV-UGV Collaboration: Advancements and Challenges. Journal of Sensor and Actuator Networks, 13(6), 81.

138. Munawar, H. S., Inam, H., Ullah, F., Qayyum, S., Kouzani, A. Z., & Mahmud, M. A. P. (2021). Towards smart healthcare: UAV-based optimized path planning for delivering COVID-19 self-testing kits using cutting edge technologies. Sustainability, 13(18), 10426.

139. Nasir, D., Venkitasubramony, R., & Jakhar, S. K. (2023). Energy-based storage assignment in a multi-aisle warehouse. OPSEARCH, 60(4), 1287–1316.

140. Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. Applied Geomatics, 6(1), 1–15.

141. Nooralishahi, P., Ibarra-Castanedo, C., Deane, S., López, F., Pant, S., Genest, M., Avdelidis, N. P., & Maldague, X. P. V. (2021). Drone-Based Non-Destructive Inspection of Industrial Sites: A Review and Case Studies. Drones, 5(4), 106.

142. Nowakowski, T., Tubis, A., & Werbińska-Wojciechowska, S. (2016), Vulnerability assessment of passenger transport system – case study. In L. Walls, M. Revie, & T. Bedford (Eds.), Risk, reliability and safety: Innovating theory and practice (pp. 2254–2259).

143. Ordoukhanian, E., & Madni, A. M. (2019). Model-based approach to engineering resilience in multi-UAV systems. Systems, 7(1), 11.

144. Osman, M., Xia, Y., Mahdi, M., & Ahmed, A. (2025). Hybrid VTOL UAV technologies: Efficiency, customization, and sector-specific applications. Alexandria Engineering Journal, 120, 13–49.

145. Padró, J.-C., Carabassa, V., Balagué, J., Brotons, L., Alcañiz, J. M., & Pons, X. (2019). Monitoring opencast mine restorations using Unmanned Aerial System (UAS) imagery. Science of The Total Environment, 657, 1602–1614.

146. Pamula, Ramachandran (2025). Thermal Management for Unmanned Aerial Vehicle Payloads: Mechanisms, Systems and Applications. Drones, 9(5), 350.

147. Panigati, T. (2025). Drone-based bridge inspections: Current practices and future directions. Automation in Construction, 157, 104371.

148. Pariès, J., Wreathall, J., Woods, D. D., & Hollnagel, E. (2011). Resilience engineering in practice: A guidebook. CRC Press / Taylor & Francis Group.

149. Park, S., & Choi, Y. (2020). Applications of unmanned aerial vehicles in mining from exploration to reclamation: A review. Minerals, 10(8), 663.

150. Patriarca, R., Bergström, J., Di Gravio, G., & Costantino, F. (2018). Resilience engineering: Current status of the research and future challenges. Safety Science, 102, 79–100.
151. Patriarca, R., Di Gravio, G., Woltjer, R., Costantino, F., Praetorius, G., Ferreira, P., & Hollnagel, E. (2020). Framing the FRAM: A literature review on the functional resonance analysis method. Safety Science, 129, 104827.
152. Perboli, G., L. Brotcorne, M. E. Bruni, & M. Rosano. (2021). A new Model for Last-Mile Delivery and Satellite Depots Management: The Impact of the on-Demand Economy. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 145, 102184.
153. Perikleous, D., Margariti, K., Velanas, P., Sáez Blázquez, C., Carrasco García, P., & González-Aguilera, D. (2025). Application of magnetometer-equipped drone for mineral exploration in mining operations. Drones, 9(1), 24.
154. Petráček, P., Krátký, V., Petrlík, M., Bača, T., Kratochvíl, R., & Saska, M. (2023). Large-scale exploration of cave environments by unmanned aerial vehicles.
155. Plastropoulos, A., Zolotas, A., & Avdelidis, N. P. (2024). Aircraft skin machine learning-based defect detection. Machines, 12(9), 158.
156. Politi, E., Varlamis, I., Tserpes, K., Larsen, M., & Dimitrakopoulos, G. (2022). The future of safe BVLOS drone operations with respect to system and service engineering. In Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Service-Oriented System Engineering (SOSE) (pp. 1–7). IEEE.
157. Pundit, S. M., Bhat, S., & Belthur, S. G. (2025). Efficient warehouse management with autonomous drones. AIJR Proceedings, 7(4), 73–79.
158. Puri, V., Nayyar, A., & Raja, L. (2017). Agriculture drones: A modern breakthrough in precision agriculture. Journal of Statistics and Management Systems, 20(4), 507–518.
159. Quintanilla García, I., Vera Vélez, N., Alcaraz Martínez, P., Vidal Ull, J., & Fernández Gallo, B. (2021). A Quickly Deployed and UAS-Based Logistics Network for Delivery of Critical Medical Goods during Healthcare System Stress Periods: A Real Use Case in Valencia (Spain). Drones, 5(1), 13.
160. Remondino, F., Del Pizzo, S., Kersten, T. P., & Troisi, S. (2012). Low-cost and open-source solutions for automated image orientation – A critical overview. In M. Ioannides, D. Fritsch, J. Leissner, R. Davies, F. Remondino, & R. Caffo (Eds.), Progress in Cultural Heritage Preservation (EuroMed 2012) (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7616, pp. 40–54). Springer.
161. Restas, Á. (2015). Drone applications for supporting disaster management. World Journal of Engineering and Technology, 3(3), 316–321.
162. Restás, Á. (2022). Drone applications fighting COVID-19 pandemic — Towards good practices. Drones, 6(1), 15.
163. Righi, A. W., Saurin, T. A., & Wachs, P. (2015). A systematic literature review of resilience engineering: Research areas and a research agenda proposal. Reliability Engineering & System Safety, 141, 142–152.
164. Rinaldi, S. M., Peerenboom, J. P., & Kelly, T. K. (2001). Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. IEEE Control Systems Magazine, 21(6), 11–25.
165. Rodríguez-Gómez, J. P., Tapia, R., Guzmán, M. M., Martínez-de Dios, J. R., & Ollero, A. (2023). Free as a bird: Event-based dynamic sense-and-avoid for ornithopter robot flight. arXiv.
166. Roe, E., & Schulman, P. R. (2008). High reliability management: Operating on the edge. Stanford Business Books.

167. Ruseno, N., & Lin, C.-Y. (2025). Real-Time UAV Trajectory Prediction for UTM Surveillance Using Machine Learning. Journal of Unmanned Aerial Systems, World Scientific Publishing.
168. Sadrani, M., Adamidis, F., Garrow, L. A., & Antoniou, C. (2025). Challenges in urban air mobility implementation: A comparative analysis of barriers in Germany and the United States. Journal of Air Transport Management, 126, 102780.
169. Safwat, N. E.-D., Hafez, I. M., & Newagy, F. (2022). 3D Placement of a New Tethered UAV to UAV Relay System for Coverage Maximization. Electronics, 11(3), 385.
170. Sagharidooz, M., Soltanali, H., Farinha, J. T., Raposo, H. D. N., & de-Almeida-e-Pais, J. E. (2024). Reliability, availability, and maintainability assessment-based sustainability-informed maintenance optimization in power transmission networks. Sustainability, 16(15), 6489.
171. San-Segundo, R., Angulo, L., Gil-Martín, M., Carramiñana, D., & Bernardos, A. M. (2024). Hybrid artificial intelligence strategies for drone navigation. AI, 5(4), 2104–2126.
172. Santos, D. F. M., Ferreira, R. B., Falcão, D. S., & Pinto, A. M. F. R. (2022). Evaluation of a fuel cell system designed for unmanned aerial vehicles. Energy, 253, 124099.
173. Saravanakumar, Y. N., Krishnan, R., Saravanakumar, R., Gopinath, K., & Khan, M. J. (2023). Power sources for unmanned aerial vehicles: A state-of-the-art review. Applied Sciences, 13(21), 11932.
174. Shafi, I., Khan, M. N., & Mahmood, T. (2023). Deep learning-based real-time defect detection for aircraft. Drones, 7(1), 31.
175. Shafiee, M., Zhou, Z., Mei, L., Dinmohammadi, F., Karama, J., & Flynn, D. (2021). Unmanned aerial drones for inspection of offshore wind turbines: A mission-critical failure analysis. Robotics, 10(1), 26.
176. Shahmoradi, J., Talebi, E., Roghanchi, P., & Hassanalian, M. (2020). A comprehensive review of applications of drone technology in the mining industry. Drones, 4(3), 34.
177. Shakhatreh, H., Sawalmeh, A. H., Al-Fuqaha, A., Dou, Z., Almaita, E., Khalil, I., Othman, N. S., Khreishah, A., & Guizani, M. (2019). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges. IEEE Access, 7, 48572-48634.
178. Sharma, H., Sidhu, H., & Bhowmik, A. (2025). Remote sensing using unmanned aerial vehicles for water stress detection: A review focusing on specialty crops. Drones, 9(4), 241.
179. Sheffi, Y. (2007). The Resilient Enterprise: Overcoming Vulnerability for Competitive Advantage. MIT Press.
180. Shen, Z., Liu, S., Zhu, W., Ren, D., Xu, Q., & Feng, Y. (2024). A review on key technologies and developments of hydrogen fuel cell multi-rotor drones. Energies, 17(16), Article 4193.
181. Shuhayeu, P., Martsinchyk, A., Martsinchyk, K., & Milewski, J. (2024). Investigating PEM Fuel Cells as an Alternative Power Source for Electric UAVs: Modeling, Optimization, and Performance Analysis. Energies, 17(17), 4427.
182. Siebert, S., & Teizer, J. (2014). Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system. Automation in Construction, 41, 1–14.
183. Silvagni, S., Tonoli, A., Zenerino, E., & Chiaberge, M. (2017). Multipurpose UAV for search and rescue operations in mountain rescue. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 8(1), 18-33.
184. Singh, A. K., Mohandes, S. R., Muhodir, S. H., Zhang, W., Antwi-Afari, M. F., & Shakor, P. (2025). Exploring barriers to unmanned aerial vehicle (UAV) technology for construction safety management using mixed-methods approach. Buildings, 15(12), 2092.

185. Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. Remote Sensing, 12(19), 3136.
186. Sona, G., Pinto, L., Pagliari, D., Passoni, D., & Gini, R. (2014). Experimental analysis of different software packages for orientation and digital surface modelling from UAV images. Earth Science Informatics, 7(2), 97–107.
187. Sornek, K., Augustyn-Nadzieja, J., Rosikoń, I., Łopusiewicz, R., & Łopusiewicz, M. (2025). Status and Development Prospects of Solar-Powered Unmanned Aerial Vehicles — A Literature Review. Energies, 18(8), 1924.
188. Suewatanakul, S., Porcarelli, A., Olsson, A., Grimler, H., Chiche, A., Mariani, R., & Lindbergh, G. (2022). Conceptual Design of a Hybrid Hydrogen Fuel Cell/Battery Blended-Wing-Body Unmanned Aerial Vehicle — An Overview. Aerospace, 9(5), 275.
189. Sun, Y., Fesenko, H., Kharchenko, V., Zhong, L., Kliushnikov, I., Illiashenko, O., Morozova, O., & Sachenko, A. (2022). UAV and IoT-based systems for the monitoring of industrial facilities using digital twins: Methodology, reliability models, and application. Sensors, 22(17), 6444.
190. Svystun, S., Scislo, L., Pawlik, M., Melnychenko, O., Radiuk, P., Savenko, O., & Sachenko, A. (2025). DyTAM: Accelerating wind turbine inspections with dynamic UAV trajectory adaptation. Energies, 18(7), 1823.
191. Szymańska, O., Cyplik, P., & Adamczak, M. (2017). Logistics 4.0: A new paradigm or a set of solutions. Research in Logistics & Production, 7(4), 299–310.
192. Tadić, S., Kovač, M., & Čokorilo, O. (2021). The Application of Drones in City Logistics Concepts. Promet – Traffic & Transportation, 33(3), 451–462.
193. Tanaka, S., Asignacion, A., Nakata, T., Suzuki, S., & Liu, H. (2022). Review of Biomimetic Approaches for Drones. Drones, 6(11), 320.
194. Tang, Z., Liu, C., Jiang, H., Hou, F., & Wang, S. (2024). Analyzing the Effect of Tethered Cable on the Stability of Tethered UAVs Based on Lyapunov Exponents. Applied Sciences, 14(10), 4253.
195. Taylor, E., & Rivera, J. J. (2022). Hydrogen fuel cell-powered drone ambulance for the emergency medical services. Future Energy, 1(1), 6–11.
196. Tian, W., Zhang, X., Zhou, P., & Guo, R. (2025). Review of energy management technologies for unmanned aerial vehicles powered by hydrogen fuel cell. Energy, 323.
197. Torres-Sánchez, J., López-Granados, F., Serrano, N., Arquero, O., & Peña, J. M. (2015). High-throughput 3-D monitoring of agricultural-tree plantations with unmanned aerial vehicle (UAV) technology. PLOS ONE, 10(6), e0130479.
198. Trinh, M. L., Nguyen, D. T., Dinh, L. Q., Nguyen, M. D., Setiadi, D. R. I. M., & Nguyen, M. T. (2025). Unmanned Aerial Vehicles (UAV) networking algorithms: Communication, control, and AI-based approaches. Algorithms, 18(5), 244.
199. Truog, S., Maxim, L., Matemba, C., Blauvelt, C., Ngwira, H., Makaya, A., Moreira, S., Lawrence, E., Ailstock, G., Weitz, A., West, M., & Defawe, O. (2020). Insights Before Flights: How Community Perceptions Can Make or Break Medical Drone Deliveries. Drones, 4(3), 51.
200. Tsao, K.-Y., Girdler, T., & Vassilakis, V. G. (2022). A survey of cyber security threats and solutions for UAV communications and flying ad-hoc networks. Ad Hoc Networks, 133, 102894.
201. Tsouros, D. C., Bibi, S., & Sarigiannidis, P. G. (2019). A review on UAV-based applications for precision agriculture. Information, 10(11), 349.
202. Tubis, A. (2024). The New Paradigm of Risk in Internal Transport Supporting Logistics 4.0 System. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. Springer Cham.

203. Tubis, A. A., & Żurek, A. (2022). The use of drones to handle internal logistic flows in the company from the chemical sector. In Proceedings of the 10th Carpathian Logistics Congress (CLC 2022) (pp. 107–112). Tanger Ltd.
204. Tubis, A. A., & Żurek, A. M. (2021). Adverse event analysis in the application of drones supporting safety and identification of products in warehouse storage operations. In Proceedings of the 31st European Safety and Reliability Conference (ESREL 2021) (pp. 1–8). Research Publishing.
205. Tubis, A. A., & Żurek, A. M. (2022). Analysis of adverse events related to the use of drones in material handling at a chemical manufacturer site. In Proceedings of the 32nd European Safety and Reliability Conference (ESREL 2022) (pp. 1–8). Research Publishing.
206. Tubis, A. A., Poturaj, H., Dereń, K., & Żurek, A. (2024). Risks of drone use in light of literature studies. Sensors, 24(4), 1205.
207. Tubis, A., Ryczyński, J., & Żurek, A. (2021). Risk assessment for the use of drones in warehouse operations in the first phase of introducing the service to the market. Sensors, 21(20), 6713.
208. Vega Díaz, J. J., Vlaminck, M., Lefkaditis, D., Orjuela Vargas, S. A., & Luong H. (2020). Solar panel detection within complex backgrounds using thermal images acquired by UAVs. Sensors, 20(21), 6219.
209. Villa, T. F., Salimi, F., Morton, K., Morawska, L., & Gonzalez, F. (2016). Development and validation of a UAV based system for air pollution measurements. Sensors, 16(12), 2202.
210. Villarino, A., Valenzuela, H., Antón, N., Domínguez, M., & Méndez Cubillos, X. C. (2025). UAV applications for monitoring and management of civil infrastructures. Infrastructures, 10(5), 106.
211. Voskuijl, M. (2022). Performance analysis and design of loitering munitions: A comprehensive technical survey of recent developments. Defence Technology, 18(3), 325–343.
212. Wang, B., Liu, J., Li, J., & Li, M. (2023). UAV LiDAR and hyperspectral data synergy for tree species classification in the Maoershan Forest Farm region. Remote Sensing, 15(4), 1000.
213. Wang, K. (2016). Logistics 4.0 solution: New challenges and opportunities. In Proceedings of the 6th International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation (IWAMA 2016) (pp. 68–74). Atlantis Press.
214. Wang, N., Mutzner, N., & Blanchet, K. (2023). Societal acceptance of urban drones: A scoping literature review. Technology in Society, 75, 102377.
215. Wang, X., Liang, J., & Rongliang, L. (2024). In-site experimental study on the effects of infrared thermal imaging technology on levee leakage detection. Scientific Reports, 14, 26032.
216. Wang, Y., Zhu, H., Zhao, Z., Zhang, C., & Lan, Y. (2021). Modeling, system measurements and controller investigation of a small battery-powered fixed-wing UAV. Machines, 9(12), 333.
217. Wang, Z., Li, Y., Wu, S., Zhou, Y., Yang, L., Xu, Y., Zhang, T., & Pan, Q. (2023). A survey on cybersecurity attacks and defenses for unmanned aerial systems. Journal of Systems Architecture, 138, 102870.
218. Wawrla, L., Maghazei, O., & Netland, T. (2019). Applications of drones in warehouse operations (White paper). ETH Zurich, Department of Management, Technology, and Economics (D-MTEC), Chair of Production and Operations Management.
219. Werbińska-Wojciechowska, S., Giel, R., & Winiarska, K. (2024). Digital twin approach for operation and maintenance of transportation system—Systematic review. Sensors, 24(18), 6069.

220. Wieland, A., & Durach, C. F. (2021). Two perspectives on supply chain resilience. Journal of Business Logistics, 42(3), 315–324.
221. Woods, D. D. (2015). Four concepts for resilience and the implications for the future of resilience engineering. Reliability Engineering & System Safety, 141, 5–9.
222. Wu, K., Cao, X., Yang, P., Yu, Z., Wu, D. O., & Quek, T. Q. S. (2023). QoE-driven video transmission: Energy-efficient multi-UAV network optimization. arXiv preprint arXiv:2307.12264.
223. Xia, X., Fattah, S. M. M., & Babar, M. A. (2023). A survey on UAV-enabled edge computing: Resource management perspective. ACM Computing Surveys, 56(3), Article 78, 1–36.
224. Xiao, J., Li, Y., Cao, Z., & Xiao, J. (2024). Cooperative trucks and drones for rural last-mile delivery with steep roads. Computers & Industrial Engineering, 187, 109849.
225. Xu, L., Cao, X., Du, W., & Li, Y. (2023). Cooperative path planning optimization for multiple UAVs with communication constraints. Knowledge-Based Systems, 260, 110164.
226. Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. Journal of Sensors, 2017, 1353691.
227. Yingst, A., & Marojevic, V. (2023). Power tether for long duration multi-copter flight. HardwareX, 15, e00466.
228. Yun, S., Im, S. Y., & Han, J. (2025). Development of a hydrogen fuel cell hybrid urban air mobility system model using a hydrogen metal hydride tank. Energies, 18(1), 39.
229. Yun, S., Im, S. Y., & Han, J. (2025). Development of a Hydrogen Fuel Cell Hybrid Urban Air Mobility System Model Using a Hydrogen Metal Hydride Tank. Energies, 18(1), 39.
230. Zeng, Y., Zhang, R., & Lim, T. J. (2016). Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges. IEEE Communications Magazine, 54(5), 36–42.
231. Zhang C., & Elaksher A. (2012). An Unmanned Aerial Vehicle-Based Imaging System for 3D Measurement of Unpaved Road Surface Distresses. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 27(2), 118-129.
232. Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. Precision Agriculture, 13(6), 693–712.
233. Zhang, K., Pakrashi, V., Murphy, J., & Hao, G. (2024). Inspection of floating offshore wind turbines using multi-rotor unmanned aerial vehicles: Literature
234. Zhang, P., Chen, S., Zheng, X., Li, P., Wang, G., Wang, R., Wang, J., & Tan, L. (2025). UAV communication in space–air–ground integrated networks (SAGINs): Technologies, applications, and challenges. Drones, 9(2), 108.
235. Zhang, S., Liu, W., & Ansari, N. (2022). On tethered UAV-assisted heterogeneous network. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 71(1), 975–983.
236. Zhang, Z., & Shu, Z. (2024). Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-assisted damage detection of wind turbine blades: A review. Energies, 17(15), 3731.
237. Zhao, S., Kang, F., Li, J., & Ma, C. (2021). Structural health monitoring and inspection of dams based on UAV photogrammetry with image 3D reconstruction. Automation in Construction, 130, 103832.
238. Zhou, R., Almustafa, M. K., Nehdi, M. L., & Su, H. (2024). Automated localization of dike leakage outlets using UAV-borne thermography and YOLO-based object detectors. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 218, 551–573.
239. Zrelli, I., Rejeb, A., Abusulaiman, R., AlSahafi, R., Rejeb, K., & Iranmanesh, M. (2024). Drone applications in logistics and supply chain management: A systematic review using latent Dirichlet allocation. Arabian Journal for Science and Engineering, 49, 12411–12430.

240. Zufferey, R., Cherpillod, A., van der Horst, J., Mintchev, S., & Floreano, D. (2022). A perching ornithopter with bioinspired claws and tail perches autonomously on a branch. Nature Communications, 13(1), 7683.

SPIS TABEL

1) Tab. 5.1. Etapy procesu badawczego …… 98
2) Tab. 6.1. Baza wiedzy na potrzeby badania odporności systemu UAV-AutoID …… 108
3) Tab. 6.2. Zbiór wskaźników i mierników opisujących filary odporności systemu UAV-AutoID …… 113
4) Tab. 6.3. Charakterystyka poziomów oceny odporności …… 115
5) Tab. 6.4. Zmienne lingwistyczne i przypisane im wartości dla oceny częstotliwości i skutków występujących zdarzeń niepożądanych …… 118
6) Tab. 7.1. Specyfikacja techniczna drona …… 125
7) Tab. 7.2. Pozostałe elementy systemu UAV-AutoID …… 127
8) Tab. 7.3. Macierz wartości referencyjnych …… 131
9) Tab. 7.4. Bieżąca wartość wskaźników i ich kwalifikacja do wyróżnionych poziomów odporności …… 132
10) Tab. 7.5. Oszacowane parametry ryzyka wraz z kalkulacją RPN dla przypadku 1 … 133
11) Tab. 7.6. Bieżąca wartość wskaźników i kwalifikacja do poziomów odporności (Przypadek 2) …… 137
12) Tab. 7.7. Oszacowane parametry ryzyka wraz z kalkulacją RPN dla przypadku 2 ….. 139
13) Tab. 7.8. Bieżąca wartość wskaźników i ich kwalifikacja do poziomów odporności … 142
14) Tab. 7.9. Oszacowane parametry ryzyka wraz z kalkulacją RPN dla przypadku 3 … 144

SPIS RYSUNKÓW

1) Rys. 0.1. Struktura rozprawy doktorskiej 8
2) Rys. 1.1. Podstawowe typy wielowirnikowych UAV – quadcopter, hexacopter i octocopter 12
3) Rys. 1.2. Zastosowanie quadcoptera w inspekcji infrastruktury przemysłowe 13
4) Rys. 1. 3. Zastosowanie UAV wielowirnikowych w akcjach ratowniczych i poszukiwawczych 14
5) Rys. 1.4. Koncepcja roju dronów wielowirnikowych w zastosowaniach cywilnych i wojskowych 15
6) Rys. 1.5. Schemat budowy i profil aerodynamiczny UAV stało płatowego 16
7) Rys. 1. 6. UAV stałopłatowy w misji mapowania terenów rolniczych 17
8) Rys. 1.7. Patrol graniczny realizowany przez UAV stałopłatowy 17
9) Rys. 1.8. Przykład mapy 3D utworzonej przez UAV stałopłatowy z systemem LIDAR 18
10) Rys. 1.9. Koncepcja UAV stałopłatowego z napędem wodorowym 19
11) Rys. 1.10. UAV VTOL podczas pionowego startu 20
12) Rys. 1.11. Hybrydowy UAV podczas inspekcji farmy wiatrowej 20
13) Rys. 1.12. UAV VTOL w misji rozpoznawczej 21
14) Rys. 1.13. Koncepcja UAV VTOL z napędem wodorowym 22
15) Rys. 1.14. Przykład UAV napędzanego energią słoneczną typu HAPS (High-Altitude Pseudo Satellite) 23
16) Rys. 1.15. UAV solarny wykorzystywany w misjach humanitarnych i kryzysowych ... 23
17) Rys. 1.16. UAV solarny w badaniach atmosferycznych i środowiskowych 24
18) Rys. 1.17. Schemat budowy i działania drona na uwięzi wraz z elementami bazy naziemnej 25
19) Rys. 1.18. Bezzałogowy statek powietrzny na uwięzi jako mobilny punkt obserwacyjny w misjach wojskowych 26
20) Rys. 1.19. Dron na uwięzi jako powietrzna stacja przekaźnikowa 5G 27
21) Rys. 1.20. Przykładowe konstrukcje UAV inspirowanych ptakami (ornithopters – widok laboratoryjny) 28
22) Rys. 1.21. Biomimetyczny dron inspirowany owadami w locie w zamkniętej przestrzeni 28
23) Rys. 1.22. Schemat konstrukcji skrzydła biomimetycznego UAV z wykorzystaniem kompozytów i MEMS 29
24) Rys. 1.23. Nano-UAV klasy <250 g wykorzystywany w inspekcjach przemysłowych ... 30
25) Rys. 1.24. Koncepcja swarm UAV – nano-drony współpracujące przy mapowaniu terenu katastrofy 31
26) Rys. 1.25. Schemat UAV zasilanego ogniwem paliwowym 32
27) Rys. 1.26. UAV podczas inspekcji linii przesyłowych wysokiego napięcia 39
28) Rys. 1.27. UAV w inspekcji łopat wirnika turbiny wiatrowej 40
29) Rys. 1.28. UAV termowizyjny w diagnostyce farmy fotowoltaicznej 41
30) Rys. 6.1. Etapy metody M-UAV w ocenie ex post odporności systemów UAV–AutoID 105
31) Rys. 6.2. Dom odporności systemu UA-AutoID 113
32) Rys. 6.3. Schemat macierzy referencyjnej 116
33) Rys. 6.4. Schemat macierzy oceny 117
34) Rys. 6.5. Źródła generujące ryzyko 119

35) Rys. 6.6. Macierz oceny ryzyka 120
36) Rys. 7.1. Kamery zamontowane na dronie 123
37) Rys. 7.2. Lądowisko dla drona 123
38) Rys. 7.3. Dron wykonujący misję skanowania produktów składowanych w magazynie 124
39) Rys. 7.4. Dron NeuroSpace 126
40) Rys. 7.5. Macierz ryzyka dla zdarzeń niepożądanych zarejestrowanych w przypadku 1 134
41) Rys. 7.6. Macierz ryzyka dla zdarzeń niepożądanych zarejestrowanych w przypadku 2 139
42) Rys. 7.7. Macierz ryzyka dla zdarzeń niepożądanych zarejestrowanych w przypadku 3 144