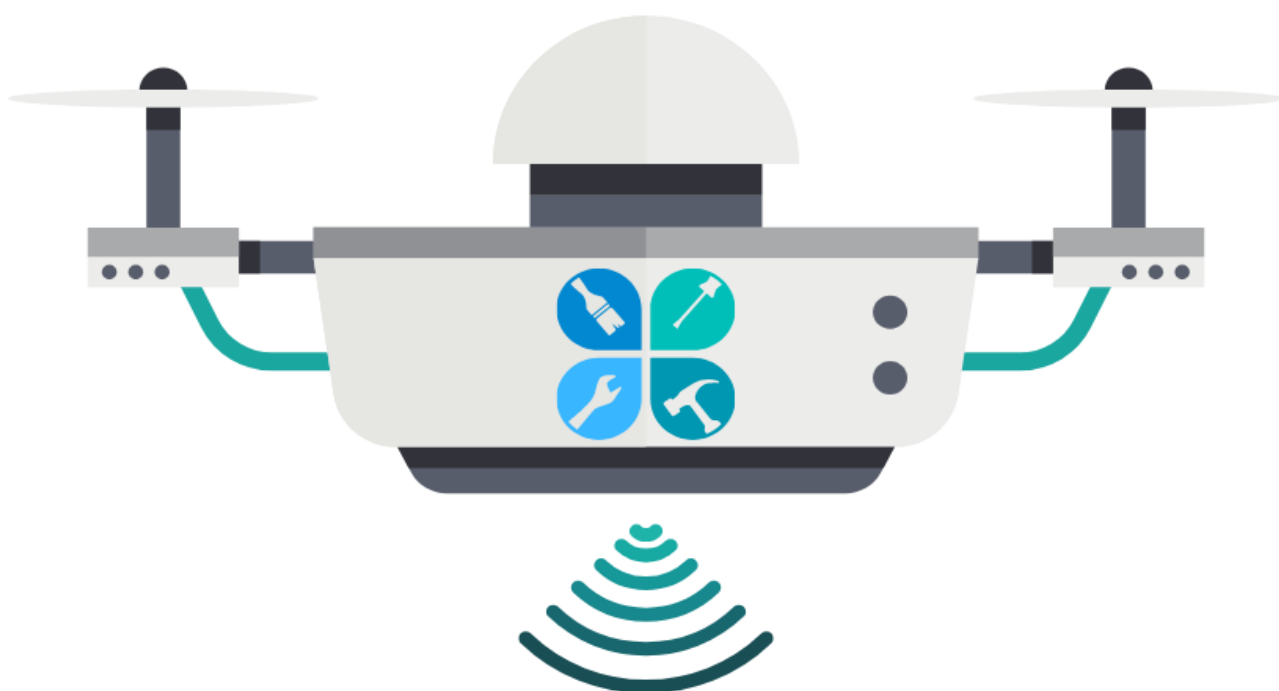




PODRĘCZNIK

DLA TECHNIKÓW DS. NAPRAW I KONSERWACJI BEZPIŁOTNIKÓW

ROZWÓJ UMIEJĘTNOŚCI ZAWODOWYCH TECHNIKÓW ELEKTROMECHANIKÓW W ZAKRESIE
KONSERWACJI I NAPRAWY BEZZAŁOGOWYCH STATKÓW POWIETRZNYCH

2023-1-TR01-KA220-VET-000151085



Co-funded by
the European Union



Rozwój umiejętności zawodowych techników elektromechaników w zakresie konserwacji i naprawy bezzałogowych statków powietrznych

REDAKTORZY

Seyhun Durmuş Uniwersytet Balıkesir, Turcja • **Abdullah Soykan** Uniwersytet Balıkesir, Turcja **Cumali Yaşar**, Uniwersytet Çanakkale Onsekiz Mart, Turcja • **Tülay Dargut Güler** Uniwersytet Çanakkale Onsekiz Mart, Turcja

AUTORZY

Seyhun Durmuş i Abdullah Soykan, Uniwersytet Balıkesir, Turcja • **Cumali Yaşar, Cafer Türkmen, Tülay Durgut Güler, Can Aktaş i Zafer Karadayı**, Uniwersytet Çanakkale Onsekiz Mart, Turcja • **Elif Anda i Caner Anda** Mellis Eğitim Teknoloji Ticaret Limited Şirketi, Turcja • **Łukasz Korcz, Ewelina Zawielak i Jozef Pacha**, Zespół Szkół Rolniczych im. gen. Jana Henryka Dąbrowskiego w Środzie Wielkopolskiej, Polska • **Vasileios Skliros, Christos Skliros, Afroditi Sakellariopoulou i Esmeralda Rouka**, Dronint, Cypr • **Cosmin Daniel Nedelcu, Lucia Anișoara Raileanu, Olaru Gheorghe i Matei Cristian**, Școala Militară de Maistri Militari si Subofiteri a Fortelor Aeriene „Traian Vuia”, Rumunia

PROJEKT GRAFICZNY

Elif Anda

DATA PUBLIKACJI

2025

KOORDYNATOR PROJEKTU

Uniwersytet Balıkesir, Turcja

ORGANIZACJE PARTNERSKIE PROJEKTU

Uniwersytet Çanakkale Onsekiz Mart, Turcja · Zespół Szkół Rolniczych im. gen. Jana Henryka Dąbrowskiego w Środzie Wielkopolskiej, Polska · Dronint, Cypr · Szkoła Wojskowa dla Podoficerów i Podchorążych Sił Powietrznych „Traian Vuia”, Rumunia · Mellis Eğitim Teknoloji Ticaret Limited Şirketi, Turcja

LICENCJA I ZASTRZEŻENIA

Niniejsza praca jest objęta licencją Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0).

Projekt „**Rozwój umiejętności zawodowych techników elektromechaników w zakresie konserwacji i naprawy bezzałogowych statków powietrznych** – 2023-1-TR01-KA220-VET-000151085” jest współfinansowany przez program Erasmus+ na rzecz kształcenia, szkolenia, młodzieży i sportu. Wsparcie Komisji Europejskiej dla powstania niniejszej publikacji nie oznacza poparcia dla jej treści, które odzwierciedlają wyłącznie poglądy autorów, a Komisja nie ponosi odpowiedzialności za jakiegokolwiek wykorzystanie informacji w niej zawartych.

PODZIĘKOWANIA

Niniejsza książka została przygotowana przy cennym udziale partnerów projektu UAVET i służy jako uzupełniający materiał szkoleniowy do programu szkoleniowego UAVET opracowanego z myślą o kształceniu techników naprawy i konserwacji bezzałogowych statków powietrznych.

2.1.1. Partnerzy projektu i członkowie zespołu

Chcielibyśmy podziękować naszym partnerom za ich wysiłki i skrupulatną pracę przy przygotowywaniu niniejszego podręcznika. Nasze organizacje partnerskie to:



2.1.2. Materiały wizualne

Oprócz materiałów wizualnych wykonanych przez członków konsorcjum partnerskiego, wykorzystaliśmy również materiały wizualne pochodzące z [serwisów Canva](#) (wersja Pro), [Pixabay](#) i [Pexels](#) na podstawie odpowiednich licencji. Wyrażamy wdzięczność tym platformom za ich cenne wysiłki w dostarczaniu nam wysokiej jakości materiałów wizualnych. Niektóre ilustracje przedstawiające elementy dronów zawarte w niniejszej publikacji zostały wygenerowane przy użyciu GPT 4.0 firmy OpenAI. Ich wykorzystanie jest zgodne z polityką OpenAI dotyczącą treści i użytkowania.

Materiały wizualne w niniejszej publikacji, stworzone przez nasz zespół, są dostępne do wykorzystania na żądanie. Jeśli chcesz z nich skorzystać, skontaktuj się z nami pod adresem projectuavet@gmail.com. Treść niniejszej publikacji jest ogólnodostępna i może być udostępniana, adaptowana, modyfikowana lub redystrybuowana – w całości lub w części – pod warunkiem podania odpowiedniego źródła.

2.1.3. Wytyczne dotyczące wykorzystania treści

Chociaż informacje zawarte w niniejszej książce można swobodnie wykorzystywać, modyfikować i udostępniać, uprzejmie prosimy, aby „informacje” zawarte w książce nie były wykorzystywane do celów komercyjnych, ponieważ celem tego projektu jest rozpowszechnianie wiedzy i promowanie zrozumienia w sposób demokratyczny.

Prosimy o podanie źródła pochodzenia informacji w nowych wersjach i użycie następującego oświadczenia: My/niniejsze badanie/praca/książka wykorzystaliśmy i zaadaptowaliśmy informacje zawarte w książce „Podręcznik dla techników naprawy i konserwacji bezzałogowych statków powietrznych” przygotowanej w ramach projektu „Erasmus+ KA220 HED Project UAVET: Rozwój umiejętności zawodowych techników elektromechaników w zakresie konserwacji i naprawy bezzałogowych statków powietrznych”. Doceniamy ich wkład i chcielibyśmy przypisać sobie spostrzeżenia i pomysły pierwotnie przedstawione w ich pracy.

SPIS TREŚCI

PODZIĘKOWANIA	3
SPIS TREŚCI.....	5
WPROWADZENIE.....	7
CEL PODRĘCZNIKA.....	7
ROZDZIAŁ 1.....	8
ELEMENTY SYSTEMU BEZZAŁOGOWEGO STATKU POWIETRZNEGO	8
1.1. <i>Płatowiec.....</i>	8
1.2. <i>Układ napędowy (silniki, regulatory prędkości, śmigła)</i>	9
1.3. <i>System zasilania (akumulatory, ładowanie, dystrybucja energii).....</i>	10
1.4. <i>System sterowania lotem (autopilot, czujniki, GPS).....</i>	11
1.5. <i>System komunikacyjny (RC, telemetria).....</i>	12
1.6. <i>Pilot zdalnego sterowania / naziemna stacja kontroli (GCS)</i>	13
1.7. <i>Ładunki użytkowe (kamery, czujniki itp.)</i>	14
ROZDZIAŁ 2.....	16
ROZWIĄZYWANIE PROBLEMÓW	16
2.1. <i>Wprowadzenie: Zakres i uzasadnienie</i>	16
2.2. <i>Problemy często występujące w bezzałogowych statkach powietrznych.....</i>	17
2.3. <i>Rozpoznawanie usterek w systemach</i>	29
2.4. <i>Narzędzia diagnostyczne i metody wykrywania usterek w bezzałogowych statkach powietrznych.....</i>	373
2.5. <i>Schematy blokowe rozwiązywania problemów</i>	44
2.6. <i>Kalibracja czujników.....</i>	58
2.7. <i>Dzienniki lotów</i>	62
2.8. <i>Interpretacja kodów błędów</i>	67
ROZDZIAŁ 3.....	74
PROCEDURY KONSERWACYJNE.....	74
3.1. <i>Listy kontrolne przed lotem.....</i>	74
3.2. <i>Listy kontrolne po locie.....</i>	75
3.3. <i>Aktualizacja oprogramowania sprzętowego</i>	76
3.4. <i>Pielęgnacja baterii.....</i>	78
3.5. <i>Rodzaje konserwacji.....</i>	80
3.6. <i>Harmonogramy konserwacji</i>	81
3.7. <i>Procedury czyszczenia i ochrony</i>	83

3.8.	<i>Przewidywana żywotność komponentów</i>	85
3.9.	<i>Kwestie środowiskowe (praca w warunkach zapylenia, wilgoci itp.)</i>	86
ROZDZIAŁ 4.....		90
PROCEDURY NAPRAWY I WYMIANY KOMPONENTÓW		90
4.1.	<i>Materiały wymagane do konserwacji, naprawy i wymiany elementów bezzałogowego statku powietrznego oraz przygotowanie miejsca pracy</i>	90
4.2.	<i>Wprowadzenie do części dronów, ich wymiana i rodzaje awarii.....</i>	93
4.3.	<i>Procedury instalacji i aktualizacji oprogramowania</i>	130
4.4.	<i>Praktyczna ocena procesów wymiany części</i>	144
4.5.	<i>Podstawowe wykorzystanie sprzętu i zastosowania w dronach</i>	146
ROZDZIAŁ 5.....		156
DOKUMENTACJA I KOMUNIKACJA.....		156
5.1.	<i>Formularze dokumentacji konserwacji</i>	156
5.2.	<i>Informacje dotyczące zgodności z przepisami.....</i>	164
5.3.	<i>Wytyczne producenta.....</i>	166
5.4.	<i>Wykazy części zamiennych.....</i>	170
5.5.	<i>Przepisy dotyczące bezpieczeństwa i higieny pracy</i>	173
5.6.	<i>Standardowe procedury operacyjne (SOP) i instrukcje robocze (WO)</i>	176
5.7.	<i>Odpowiedzialność (ubezpieczenie, zgłaszanie incydentów)</i>	181
5.8.	<i>Skuteczna komunikacja zawodowa.....</i>	184

WPROWADZENIE

Cel podręcznika

Witamy w cyfrowym podręczniku UAVET dotyczącym naprawy i konserwacji dronów! Niniejszy podręcznik jest jednym z kluczowych wyników projektu UAVET, obok e-booka dotyczącego standardów zawodowych, programu szkoleniowego UAVET oraz samouczków wideo. Jest to przyjazny dla użytkownika i łatwy w przyswojeniu zasób, starannie opracowany, aby służyć jako praktyczny i kompleksowy przewodnik dla studentów i absolwentów kształcenia i szkolenia zawodowego (VET), którzy aspirują do kariery jako technicy naprawy i konserwacji dronów.

Podręcznik cyfrowy ma na celu nie tylko przekazanie wiedzy teoretycznej, ale także integruje praktyczne zastosowania w celu poprawy jakości nauki, umożliwiając użytkownikom dokładne zapoznanie się z materiałem. To praktyczne podejście sprawia, że podręcznik jest nie tylko źródłem informacji, ale także skutecznym narzędziem nauczania i uczenia się, które wypełnia lukę między teorią a praktyką.

Naszym celem jest wzmocnienie pozycji młodych ludzi poprzez wyposażenie ich w wiedzę techniczną i praktyczne doświadczenie niezbędne do pewnego wejścia na rynek konserwacji dronów. Ponadto chcemy wspierać szkoły zawodowe i instytucje szkoleniowe w zapewnianiu wysokiej jakości edukacji dostosowanej do potrzeb branży dronów.

Podręcznik składa się z pięciu głównych rozdziałów:

- 1. Komponenty systemu UAV,**
- 2. Rozwiązywanie problemów,**
- 3. Procedury konserwacji,**
- 4. Procedury naprawy i wymiany komponentów**
- 5. Dokumentacja i komunikacja.**

ROZDZIAŁ 1

Elementy systemu bezzałogowego statku powietrznego

W niniejszym rozdziale znajdują się wprowadzające i ogólne opisy elementów systemu bezzałogowego statku powietrznego (UAV), a szczegółowe wyjaśnienia dotyczące ich mniejszych części zostaną przedstawione w kolejnych rozdziałach.

1.1. Płatowiec



Rysunek 1.1 Płatowiec bezzałogowego statku powietrznego

Płatowiec stanowi szkielet konstrukcyjny każdego bezzałogowego statku powietrznego, podtrzymując i integrując wszystkie główne podsystemy, takie jak napęd, awionika, zasilanie i ładunek. Jego konstrukcja ma bezpośredni wpływ na właściwości aerodynamiczne statku powietrznego, wydajność lotu i ogólną wytrzymałość.

W zależności od profilu misji, konstrukcje mogą się znacznie różnić pod względem kształtu i konfiguracji, od układów wielowirnikowych (takich jak quadcoptery lub hexacoptery) po konstrukcje stałopłatowe lub hybrydowe VTOL. Materiały takie jak włókno węglowe, wzmocnione kompozyty i lekkie stopy aluminium są zazwyczaj stosowane w celu osiągnięcia równowagi między wytrzymałością, masą i odpornością.

Dobrze zaprojektowany kadłub ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia stabilnych właściwości lotnych, niezawodności systemu i pomyślniej integracji zaawansowanych technologii bezzałogowych statków powietrznych.

1.2. Układ napędowy (silniki, regulatory prędkości, śmigła)



Rysunek 1.2 Śmigła bezzałogowego statku powietrznego (Właściciel zasobu: DRONINT)

Układ napędowy odpowiada za generowanie ciągu, który umożliwia UAV start, manewrowanie i utrzymanie stabilnego lotu. Sercem tego układu są bezszczotkowe silniki prądu stałego, znane ze swojej wydajności, niezawodności i wysokiego stosunku mocy do masy, co czyni je idealnymi dla platform powietrznych.

Silniki te napędzają śmigła, które są specjalnie zaprojektowane do manipulowania przepływem powietrza i wytwarzania siły nośnej. Liczba i orientacja śmigieł różnią się w zależności od konfiguracji bezzałogowego statku powietrznego, od platform z jednym wirnikiem po quadcoptery, hexacoptery, a nawet octocoptery do zastosowań związanych z transportem ciężkich ładunków.

Elektroniczne regulatory prędkości (ESC) służą jako łącznik między kontrolerem lotu a silnikami. Regulują one prędkość obrotową i kierunek każdego silnika na podstawie danych wejściowych w czasie rzeczywistym, umożliwiając bezzałogowemu statkowi powietrznemu precyzyjną regulację przepustnicy i skoordynowane manewry lotnicze.

Silniki, ESC i śmigła tworzą razem ściśle zintegrowany system, który decyduje o responsywności, stabilności i osiągnięciach lotniczych bezzałogowego statku powietrznego.

1.3. System zasilania (akumulatory, ładowanie, dystrybucja energii)

System zasilania jest elektrycznym rdzeniem bezzałogowego statku powietrznego, odpowiedzialnym za dostarczanie energii do wszystkich kluczowych komponentów, od silników i kontrolerów lotu po kamery i łącza komunikacyjne. Sercem tego systemu są baterie litowo-polimerowe (LiPo), które stanowią jedną z najważniejszych innowacji we współczesnej technologii dronów.

Zapewniają one idealną równowagę między wysoką wydajnością energetyczną a niską masą, dzięki czemu bezzałogowe statki powietrzne mogą pozostawać w powietrzu dłużej bez utraty wydajności. Mówiąc najprościej, akumulatory te na nowo zdefiniowały możliwości w zakresie czasu lotu i



Rysunek 1.3 Akumulatory do bezzałogowych statków powietrznych (Właściciel zasobu: DRONINT)

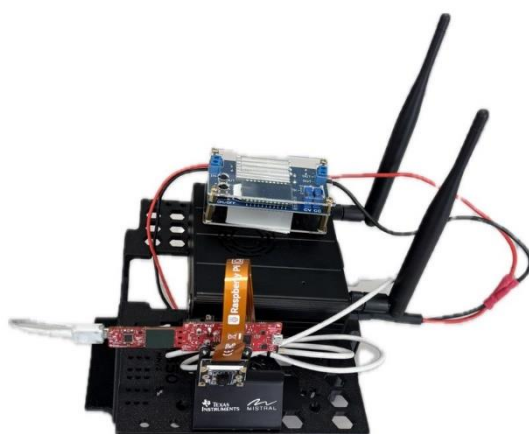
Dobrze zaprojektowany system zasilania to coś więcej niż tylko podłączenie baterii. Niezbędne jest bezpieczne ładowanie. Baterie LiPo wymagają ładowania zrównoważonego, aby zapewnić jednakowe napięcie we wszystkich ogniwach, co pomaga przedłużyć żywotność baterii i zmniejsza ryzyko przegrzania lub awarii. Na pokładzie płytki rozdzielcze zasilania (PDB) lub zintegrowane moduły zasilające kierują energią elektryczną tam, gdzie

jest ona potrzebna, często wykorzystując regulatory napięcia do dostarczania czystej, stabilnej energii do wrażliwych systemów, takich jak autopilot i telemetria.

Profesjonalne drony są również wyposażone w system monitorowania zasilania w czasie rzeczywistym, dzięki czemu piloci i systemy pokładowe mogą śledzić napięcie, prąd i pozostałą pojemność podczas lotu. Pozwala to na podejmowanie inteligentnych decyzji, takich jak uruchomienie funkcji powrotu do bazy przed zbyt niskim poziomem naładowania baterii, co ma kluczowe znaczenie dla uniknięcia awarii i zapewnienia powodzenia misji.

1.4. System kontroli lotu (autopilot, czujniki, GPS)

System kontroli lotu jest mózgiem bezzałogowego statku powietrznego. Odpowiada on za interpretację danych z czujników, wykonywanie poleceń lotniczych oraz utrzymywanie stabilności i responsywności statku powietrznego w każdych warunkach. Sercem tego systemu jest kontroler lotu, często nazywany płytą główną drona. To właśnie tam zbiegają się wszystkie dane z czujników, GPS i wprowadzane przez użytkownika, a także tam podejmowane są w



Rysunek 1.4 Kontroler lotu bezzałogowego statku powietrznego (Właściciel zasobu: DRONINT)

Oprogramowanie autopilota, zazwyczaj zintegrowane z kontrolerem lotu, zarządza zarówno operacjami ręcznymi, jak i autonomicznymi. Stabilizuje drona, zarządza orientacją (pochyleniem, przechyłem i odchyleniem) oraz wykonuje zaprogramowane trasy lotu lub misje waypoint. Niezależnie od tego, czy dron leci ręcznie, czy autonomicznie, autopilot zapewnia płynne i skoordynowane sterowanie, nawet w dynamicznych środowiskach. Aby zapewnić precyzyjne zachowanie podczas lotu, kontroler wykorzystuje zestaw wbudowanych czujników:

- Żyroskopy i akcelerometry, które monitorują ruch kątowy i przyspieszenie liniowe w celu zapewnienia równowagi i stabilności.

- Magnetometry, które działają jak cyfrowe kompasy, utrzymując prawidłową orientację drona względem pola magnetycznego Ziemi.
- Barometry i wysokościomierze, które dostarczają dokładnych danych dotyczących wysokości.
- Moduły GPS, które często są połączone z fuzją IMU (Inertial Measurement Unit) i dostarczają dane pozycyjne w czasie rzeczywistym, umożliwiając takie funkcje, jak autonomiczna nawigacja, powrót do domu i geo-ogrodzenie.

Wszystkie te elementy tworzą ściśle zintegrowany system, który zapewnia dronowi możliwość precyzyjnego latania, szybkiego reagowania i wykonywania złożonych misji przy minimalnym udziale człowieka. Bez solidnego systemu kontroli lotu bezpieczna i niezawodna praca drona po prostu nie byłaby możliwa.

1.5. System komunikacyjny (RC, telemetria)

System komunikacyjny bezzałogowego statku powietrznego łączy drona z pilotem lub naziemną stacją kontroli (GCS), umożliwiając sterowanie i monitorowanie w czasie rzeczywistym. Działa on w oparciu o połączenie radiowe (RC) i telemetryczne, które są niezbędne do bezpiecznego i skutecznego działania.

Łącze RC pozwala operatorowi na ręczne sterowanie ruchami drona, zazwyczaj przy użyciu częstotliwości takich jak 2,4 GHz lub 5,8 GHz. Bardziej zaawansowane systemy mogą wykorzystywać łączność radiową dalekiego zasięgu, a nawet łączność satelitarną do misji poza zasięgiem wzroku (BVLOS). Łącza te są zabezpieczone i zoptymalizowane pod kątem niskich opóźnień, zapewniając natychmiastową reakcję na polecenia pilota.



Rysunek 1.5 Telemetria UAV

Z kolei telemetria jest kanałem informacji zwrotnej drona. Nieustannie przesyła ona krytyczne dane lotu z powrotem do GCS, w tym pozycję GPS, wysokość, prędkość, kierunek, napięcie akumulatora, stan silnika i odczyty czujników. Ten strumień informacji pochodzi zazwyczaj z autopilota i czujników pokładowych, takich jak żyroskopy, akcelerometry, magnetometry i system zasilania. Umożliwia on pilotowi lub operatorowi misji

monitorowanie stanu UAV w czasie rzeczywistym i proaktywne reagowanie na anomalie, takie jak niski poziom naładowania baterii, utrata sygnału lub naruszenie geofence.

Komunikacja odbywa się zazwyczaj za pośrednictwem anten zamontowanych zarówno na bezzałogowym statku powietrznym, jak i stacji naziemnej, przy czym niektóre systemy wykorzystują anteny kierunkowe lub różnicowe w celu utrzymania integralności sygnału na większych odległościach.

W zastosowaniach profesjonalnych niezawodna komunikacja jest sprawą bezdyskusyjną. Niezależnie od tego, czy dron leci ręcznie, czy wykonuje w pełni autonomiczną misję, solidne łącza danych zapewniają pełną świadomość sytuacyjną, zgodność z protokołami bezpieczeństwa i sukces misji.

1.6. Pilot zdalnego sterowania / naziemna stacja kontroli (GCS)

Pilot zdalnego sterowania lub naziemna stacja kontroli (GCS) to interfejs człowiek-maszyna systemu UAV. To właśnie tam operatorzy UAV monitorują telemetrię, planują misje i wydają polecenia lotu w czasie rzeczywistym. Niezależnie od tego, czy jest to ręczny pilot ze zintegrowanym wyświetlaczem, czy pełnowymiarowy GCS oparty na laptopie, komponent ten jest niezbędny zarówno dla pilotów ręcznych, jak i autonomicznych.



Rysunek 1.6 Pilot zdalnego sterowania UAV (Właściciel zasobu: DRONINT)

Nowoczesne konfiguracje GCS zazwyczaj obejmują:

- Wizualizację telemetrii na żywo (np. wysokość, prędkość, kierunek, stan baterii)
- Transmisję wideo w czasie rzeczywistym z kamer pokładowych
- Interfejsy planowania misji, umożliwiające użytkownikom wstępne definiowanie punktów trasy i geofence
- Ręczne sterowanie awaryjne do interwencji w sytuacjach awaryjnych lub zadań wymagających precyzji

Pilot zdalnego sterowania, często używany w operacjach terenowych, jest zazwyczaj wyposażony w dwa joysticki, konfigurowalne przyciski i ekran o wysokiej jasności do wyświetlania danych telemetrycznych i obrazu wideo. Można go również podłączyć do tabletów lub smartfonów z zainstalowanymi specjalistycznymi aplikacjami lotniczymi. Bardziej zaawansowane konfiguracje GCS są używane w centrach kontroli lub mobilnych pojazdach dowodzenia i obejmują wiele ekranów, anteny dalekiego zasięgu oraz redundantne łącza komunikacyjne.

Systemy te obsługują również krytyczne funkcje dowodzenia i kontroli (C2), takie jak:

- Powrót do punktu startowego (RTH) w przypadku utraty sygnału
- Ustawienia awaryjne (np. automatyczne lądowanie, zawis, utrzymanie pozycji)
- Integracja z platformami zarządzania przestrzenią powietrzną, umożliwiająca bezpieczną pracę w złożonych środowiskach

Ostatecznie GCS działa jako centralny system nerwowy każdej misji UAV, łącząc świadomość sytuacyjną, sterowanie ręczne i autonomiczne zarządzanie lotem w jednym zintegrowanym centrum.

1.7. Ładunki (kamery, czujniki itp.)

Ładunki to narzędzia dostosowane do konkretnej misji, przewożone przez bezzałogowy statek powietrzny. Określają one, do czego faktycznie służy dron, czy to do mapowania terenów rolniczych, inspekcji infrastruktury, czy też prowadzenia akcji poszukiwawczo-ratowniczych. Najpopularniejszymi ładunkami są kamery i czujniki, ale różnią się one znacznie pod względem typu i złożoności w zależności od zastosowania.



Rysunek 1.7 Kamera bezzałogowego statku powietrznego (Właściciel zasobu: DRONINT)

Kamery są często głównym ładunkiem i mogą być zamontowane na stałe lub zdejmowane. Wiele dronów jest wyposażonych w modułowe komory ładunkowe, co pozwala operatorom na szybką wymianę kamer lub czujników w zależności od zadania. Same kamery mogą mieć różną specyfikę, od standardowych czujników RGB do fotografii i filmowania, po wysoce specjalistyczne systemy, takie jak:

- Kamery wielospektralne do analizy rolnictwa i roślinności.
- Kamery termowizyjne lub na podczerwień do mapowania ciepła, poszukiwań i ratownictwa lub kontroli elementów elektrycznych.
- Systemy LiDAR do precyzyjnego mapowania 3D i modelowania terenu.

Oprócz obrazowania, drony mogą również przenosić czujniki jakości powietrza, detektory promieniowania lub monitory środowiskowe do misji naukowych i przemysłowych. Modułowość i elastyczność nowoczesnych systemów ładunku UAV pozwala jednej platformie obsługiwać szeroki zakres misji poprzez prostą wymianę pakietu czujników. Ostatecznie to ładunek nadaje dronowi jego przeznaczenie, a wybór odpowiedniego ładunku ma kluczowe znaczenie dla powodzenia każdej operacji powietrznej.

ROZDZIAŁ 2

Rozwiązywanie problemów

2.1. Wprowadzenie: Zakres i uzasadnienie

Skuteczne rozwiązywanie problemów ma fundamentalne znaczenie dla utrzymania gotowości operacyjnej i bezpieczeństwa lotów w przypadku bezzałogowych statków powietrznych (UAV). Niniejszy rozdział zawiera kompleksowe ramy identyfikacji, diagnozowania i rozwiązywania najczęściej występujących usterek UAV, które mogą zagrozić powodzeniu misji i integralności statku powietrznego. Przedstawione tutaj systematyczne podejście obejmuje rozpoznawanie symptomów usterek, stosowanie procedur diagnostycznych oraz wykorzystanie specjalistycznych narzędzi w celu zapewnienia szybkiego rozwiązania problemów.

Zakres rozdziału obejmuje podstawowe metody rozwiązywania problemów, od identyfikacji podstawowych objawów po zaawansowane techniki diagnostyczne z wykorzystaniem dzienników lotów i interpretacji kodów błędów. Strukturalne schematy blokowe prowadzą techników przez logiczne sekwencje rozwiązywania problemów, a procedury kalibracji czujników zapewniają optymalną wydajność systemu. Ta systematyczna metodologia umożliwia technikom zajmującym się dronami zminimalizowanie przestojów statków powietrznych i utrzymanie najwyższych standardów bezpieczeństwa i niezawodności operacyjnej. Rysunek 2.1 stanowi symboliczną reprezentację ilustrującą proces identyfikacji i rozwiązywania problemów w systemach dronów.



Rysunek 2.1 Rozwiązywanie problemów w dronach

Rozwiązywanie problemów w dronach obejmuje ustrukturyzowany proces przed lotem, w trakcie lotu i po locie. Tabela 2.1 przedstawia procedury rozwiązywania problemów dostosowane do różnych faz eksploatacji dronów. Kontrola przed lotem obejmuje kontrolę wzrokową pod kątem uszkodzeń fizycznych lub poluzowania elementów, diagnostykę systemu za pomocą oprogramowania, kalibrację czujników (IMU, kompas, GPS), weryfikację stanu oprogramowania układowego i oprogramowania oraz ocenę warunków środowiskowych, takich jak pogoda i jakość sygnału GPS.

Tabela 2.1 *Procedury rozwiązywania problemów zgodnie z fazami eksploatacji dronów*

Kontrola przed lotem	Monitorowanie podczas lotu	Analiza po locie
Kontrole wizualne	Analiza telemetry w czasie rzeczywistym	Przegląd dzienników
Diagnostyka systemu	Alarmy pokładowe	Porównania wydajności
Kalibracja czujników	Obserwacja zachowania podczas lotu	Kontrola komponentów
Stan oprogramowania sprzętowego/programowego		Tworzenie kopii zapasowych danych i raportowanie
Kontrola warunków otoczenia		Klasyfikacja problemów

Monitorowanie podczas lotu koncentruje się na analizie telemetrycznej w czasie rzeczywistym kluczowych parametrów, takich jak napięcie, temperatura i wysokość, śledzeniu alertów pokładowych oraz obserwowaniu wszelkich nieprawidłowości w zachowaniu podczas lotu. Analiza po locie obejmuje przegląd dzienników lotów, porównanie oczekiwanych i rzeczywistych wyników, ponowne sprawdzenie komponentów, tworzenie kopii zapasowych danych i generowanie raportów oraz klasyfikację zidentyfikowanych problemów do kategorii związanych z oprogramowaniem, sprzętem lub użytkownikami.

2.2. Problemy często spotykane w bezzałogowych statkach powietrznych

2.2.1. Typowe awarie w systemie napędowym bezzałogowych statków powietrznych

Układ napędowy bezzałogowego statku powietrznego składa się z silnika, regulatora prędkości (ESC) i śmigieł. Silniki bezszczotkowe odpowiadają za obracanie śmigieł w celu uniesienia bezzałogowego statku powietrznego w powietrze, a ich prędkość jest bezpośrednio związana z wartością kV. Śmigła są elementami generującymi ciąg, a ich rozmiar i skok są ważnymi parametrami. Mogą obracać się zgodnie z ruchem wskazówek

zegara lub przeciwnie do ruchu wskazówek zegara. Elektroniczne regulatory prędkości (ESC) to obwody elektroniczne, które regulują prędkość obrotową silników zgodnie z sygnałami z kontrolera lotu.

Awarie silnika mogą wynikać z różnych przyczyn, z których każda ma wpływ na wydajność i niezawodność. Najczęściej spotykanym problemem jest przegrzanie, często wynikające z intensywnego użytkowania, niewystarczającego chłodzenia lub przeciążenia silnika. Innym częstym problemem jest przedostawanie się zanieczyszczeń, zwłaszcza w dronach eksploatowanych na zewnątrz, gdzie do silnika mogą dostać się cząsteczki piasku, kurzu lub ścinków trawy. Uszkodzenia łożysk mogą wynikać z długotrwałego użytkowania, wibracji lub uderzeń fizycznych, co prowadzi do zwiększonego tarcia i zmniejszenia wydajności. Wygięte lub źle wyrównane wały () są często wynikiem wypadków, twardych lądowań lub niewyważonych śmigieł, co może zakłócić płynną pracę silnika. Spalone uzwojenia, spowodowane nadmiernym prądem, zwarciami lub ciągłym przeciążeniem, mogą prowadzić do całkowitej awarii silnika. Wreszcie, chociaż pogorszenie jakości magnesów jest najmniej powszechne, może wystąpić w wyniku długotrwałego narażenia na wysokie temperatury lub naturalnego starzenia się, co zmniejsza siłę magnetyczną i wydajność silnika. Tabela 2.2 przedstawia szczegółowy przegląd typowych usterek obserwowanych w układzie napędowym bezzałogowych statków powietrznych.

Awarie ESC mogą wynikać z różnych przyczyn. Przegrzanie jest częstym problemem, często spowodowanym niewystarczającym chłodzeniem lub nadmiernym poborem prądu, co może spowodować uszkodzenie elementów wewnętrznych. Awarie tranzystorów MOSFET lub kondensatorów, które są niezbędnymi elementami przetwarzającymi energię, mogą spowodować całkowite spalanie. Kolejnym zagrożeniem są słabe połączenia lutowane, zwłaszcza gdy są one narażone na ciągłe wibracje i ciepło, co prowadzi do przerywanych lub całkowitych rozłączeń. Problemy z sygnałem, takie jak uszkodzenie lub utrata sygnału PWM z kontrolera lotu, mogą zakłócić prawidłowe działanie ESC.

Tabela 2.2 Najczęstsze usterek w układzie napędowym bezzałogowych statków powietrznych



Silnik

Przegrzanie

Wnikanie zanieczyszczeń

Uszkodzone łożyska

Wygięty lub źle wyrównany wał

Spalone uzwojenie

Zużycie magnesów



ESC

Przegrzanie

Słabe połączenia lutowane

Utrata sygnału

Problemy z kalibracją

Problemy z zasilaniem

Problemy z synchronizacją

silnika

Uszkodzenia spowodowane

wilgocią



Śmigło

Pęknięcia i nacięcia

Zużycie

Uszkodzenia spowodowane

uderzeniem śmigła

Odształcenia

Nieprawidłowy montaż

Niewyważenie

Luzy

Błędy oprogramowania sprzętowego lub nieprawidłowa kalibracja mogą powodować błędy związane z oprogramowaniem, które wpływają na wydajność. Problemy z zasilaniem, w tym wahania napięcia lub awaria obwodu BEC (Battery Eliminator Circuit), mogą destabilizować ESC. Problemy z synchronizacją silnika, zazwyczaj związane z niedopasowaniem czasowym, mogą powodować niestabilne działanie silnika. Wreszcie, przedostanie się wody lub wilgoci może prowadzić do zwarc i korozji, co dodatkowo obniża niezawodność ESC.

Awaryjne śmigieł w bezzałogowych statkach powietrznych mogą wynikać z różnych problemów, które zagrażają bezpieczeństwu lotu i wydajności. Pęknięcia i nacięcia na łopatkach często wynikają z uderzeń obcymi przedmiotami lub długotrwałego użytkowania, co prowadzi do osłabienia konstrukcji. Ogólne zużycie może z czasem pogorszyć integralność materiału, zwiększając ryzyko awarii podczas pracy. Uszkodzenia śmigła spowodowane uderzeniami, zazwyczaj w wyniku kolizji z twardymi powierzchniami, mogą prowadzić do widocznych lub ukrytych pęknięć. Odształcenie śmigła, spowodowane ciepłem lub uderzeniem, wpływa na wydajność aerodynamiczną i stabilność. Nieprawidłowy montaż może spowodować niewspółosiowość, a niewyważenie śmigła może powodować drgania, które obciążają silnik i ramę. Ponadto poluzowanie mocowania śmigła może

prowadzić do jego odłączenia lub nieregularnego obracania się, co stanowi poważne zagrożenie dla bezpieczeństwa.

2.2.2. Typowe usterki w układzie zasilania bezzałogowego statku powietrznego

System zasilania bezzałogowego statku powietrznego opiera się na dwóch kluczowych komponentach: akumulatorze i płycie rozdzielczej zasilania (PDB). Akumulator, zazwyczaj typu litowo-polimerowego (LiPo), pełni rolę głównego źródła zasilania drona, a kluczowe parametry elektryczne, takie jak napięcie nominalne (S-count), pojemność (mAh) i maksymalna ciągła szybkość rozładowania (C-rating) mają kluczowe znaczenie przy jego wyborze. PDB, czyli zintegrowany obwód zasilania, pełni funkcję centralnego węzła elektrycznego, rozdzielając energię z akumulatora do kluczowych komponentów, takich jak kontroler lotu ESC i inne elementy elektroniczne. Płytkę tę może być czasami zintegrowana z kontrolerem lotu lub jednostką ESC 4 w 1.

Awarie akumulatorów mogą wynikać z wielu przyczyn, zarówno naturalnego starzenia się, jak i niewłaściwego użytkowania. Najczęstszym i najbardziej oczekiwanym problemem występującym wraz ze starzeniem się akumulatora jest utrata pojemności. Nierównowaga ogniw, polegająca na tym, że poszczególne ogniwa w wielokomórkowym pakiecie mają różne poziomy napięcia, często prowadzi do niestabilności napięcia, co dodatkowo wpływa na wydajność. W miarę starzenia się akumulatorów wzrasta również ich opór wewnętrzny, co zmniejsza ich wydajność. Zużycie złącza jest kolejnym częstym problemem spowodowanym wielokrotnym użyciem, które z czasem może pogorszyć wydajność. Poważniejsze problemy obejmują wybrzuszanie się lub pęcznienie, zwłaszcza w przypadku akumulatorów litowo-jonowych i LiPo, co wskazuje na uszkodzenia wewnętrzne i stanowi poważne zagrożenie dla bezpieczeństwa. Przegrzanie może wynikać z wysokiego poboru prądu lub uszkodzenia, natomiast uszkodzenie spowodowane głębokim rozładowaniem występuje, gdy akumulator zostanie rozładowany poniżej bezpiecznego poziomu napięcia, co często powoduje nieodwracalne szkody. Starsze typy akumulatorów, takie jak NiMH, mogą cierpieć na efekt pamięci, w którym niekompletne cykle rozładowania zmniejszają pojemność. Zwarcia, zazwyczaj spowodowane uszkodzeniami fizycznymi, mogą prowadzić do wycieku elektrolitu lub, w skrajnych przypadkach, do niekontrolowanego wzrostu temperatury, niebezpiecznego stanu, w którym zwarcia wewnętrzne powodują niekontrolowane nagrzewanie się, potencjalnie prowadzące do pożaru lub wybuchu. Tabela 2.3 przedstawia szczegółowy przegląd typowych usterek obserwowanych w systemie zasilania bezzałogowych statków powietrznych.

Tabela 2.3 Najczęstsze usterki w układzie zasilania bezzałogowych statków powietrznych

SYSTEM ZASILANIA BEZZAŁOGOWYCH STATKÓW POWIETRZNY



Akumulator
 Utrata pojemności
 Nierównowaga ogniw
 Niespójność napięcia
 Zwiększona rezystancja wewnętrzna
 Zużycie złącza
 Pęcznienie
 Przegrzanie
 Uszkodzenie spowodowane głębokim rozładowaniem
 Efekt pamięci
 Zwarcie
 Wyciek elektrolitu
 Termiczna niekontrolowana reakcja



Płyta rozdzielcza zasilania (PDB)
 Zimne połączenia lutowane
 Awarie połączeń
 Zwarcia
 Uszkodzone regulatory napięcia
 Ślady przypalenia
 Awarie kondensatorów
 Przegrzanie
 Uszkodzenia ścieżek drukowanych
 Uszkodzenia pinów złącza
 Problemy z zakłóceniami EMI/RFI
 Problemy z uziemieniem

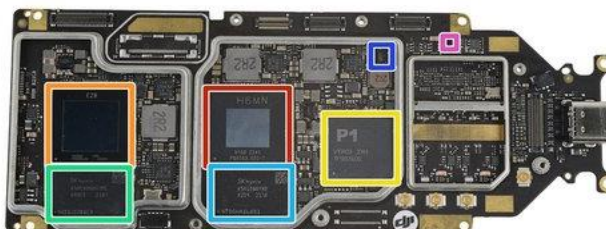
Awaria płyty rozdzielczej zasilania (PDB) drona może wynikać z różnych problemów, które zakłócają dostarczanie zasilania do kluczowych komponentów. Typowe problemy obejmują zimne połączenia lutowane i awarie połączeń, które mogą powodować sporadyczne przerwy w zasilaniu lub całkowite odłączenie. Zwarcia i uszkodzone regulatory napięcia mogą prowadzić do niestabilności systemu lub awarii komponentów, co często objawia się śladami przypalenia lub oznakami przegrzania. Awarie kondensatorów i uszkodzone ścieżki PCB dodatkowo zakłócają regulację napięcia i przepływ energii. Uszkodzenie pinów złącza może powodować zawodność połączeń, natomiast zakłócenia elektromagnetyczne (EMI lub RFI) i problemy z uziemieniem mogą powodować szumy sygnału, wpływając zarówno na dokładność sterowania, jak i czujników.

2.2.3. Typowe usterki w płycie kontrolera lotu i czujniku lotu bezzałogowego statku powietrznego

W skomplikowanym systemie sterowania dronem, często porównywanym do jego „mózgu” i „układu nerwowego”, kontroler lotu (FC) pełni rolę centralnej jednostki przetwarzającej, interpretując dane z różnych czujników w celu zapewnienia stabilnego lotu i nawigacji. Kluczowym elementem tego systemu jest inercyjna jednostka pomiarowa (IMU), która integruje akcelerometr do pomiaru przyspieszenia liniowego i żyroskop do pomiaru obrotu kątownego. Dodatkowe czujniki, takie jak magnetometr (kompas), określają kierunek, a barometr mierzy wysokość na podstawie ciśnienia powietrza. Do precyzyjnego pozycjonowania globalnego, pomiaru wysokości i prędkości względem ziemi niezbędny jest moduł GPS/GNSS. Ponadto moduł zabezpieczający przed awarią ma kluczowe znaczenie dla zainicjowania automatycznych procedur awaryjnych, takich jak powrót do punktu startowego w przypadku utraty sygnału lub krytycznej awarii systemu. Bardziej zaawansowane drony mogą również zawierać pokładowe jednostki przetwarzające, które zarządzają złożonymi funkcjami, takimi jak omijanie przeszkód lub zadania oparte na sztucznej inteligencji. Tabela 2.4-2.5 zawiera szczegółowy przegląd typowych usterek obserwowanych odpowiednio w płycie kontrolera lotu i czujnikach lotu.

Tabela 2.4 Najczęstsze usterki na płycie kontrolera lotu bezzałogowych statków powietrznych

PŁYTKA STEROWNIKA LOTU



Problemy z połączeniem	Problemy z oprogramowaniem układowym	Problemy z reakcją systemu	Problemy ze sprzętem	Zakłócenia zewnętrzne
Utrata połączenia radiowego z pilotem zdalnego sterowania	Problemy z aktualizacją oprogramowania	Brak reakcji	Przegrzanie spowodowane intensywnym użytkowaniem lub słabą wentylacją	Zakłócenia elektromagnetyczne (EMI)
Awaria łącza telemetrycznego	Konflikty oprogramowania układowego	Nieprawidłowa reakcja na polecenia	Niestabilność zasilania	pochodzące z urządzeń zewnętrznych
Przekroczenie limitu czasu	między komponentami	Nieregularne zachowanie i nieoczekiwane manewry		

komunikacji między FC a stacją naziemną	Błędy pętli rozruchowej	Niestabilność pętli sterowania	Awaria wewnętrznych komponentów	Zakłócenia częstotliwości radiowej (RFI)
Problemy z połączeniem odbiornika	Uszkodzenie parametrów	Problemy z dostrajaniem PID	Błędy pamięci	
	Uszkodzenie pamięci flash	Problemy z aktywacją zabezpieczenia awaryjnego	Zawieszanie się procesora	

Tabela 2.5 Najczęstsze usterki czujników lotu bezzałogowych statków powietrznych

CZUJNIKI LOTU			
			
IMU (inercyjna jednostka pomiarowa)	Magnetometr (kompas)	Barometr	Moduł GPS/GNSS
Dryft/awaria żyroskopu	Problemy z kalibracją kompasu	Odchylenie czujnika ciśnienia	Utrata sygnału GPS
Problemy z kalibracją akcelerometru	Błędy deklinacji magnetycznej	barometrycznego	Nieprawidłowe raportowanie danych dotyczących lokalizacji
Dryft temperatury IMU	Dryf kompasu w czasie	Niestabilność utrzymywania wysokości	Pogorszenie dokładności GPS
Szumy wywołane drganiem w odczytach IMU	Zakłócenia metalowe wpływające na odczyty kompasu	Błędy kompensacji temperatury	Problemy z konstelacją satelitów
Błędy orientacji montażu IMU	Problemy z kalibracją żelaza twardego/miękkiego	Problemy z kalibracją barometru	Falszowanie/zakłócenie sygnału GPS
Niespójność wielu IMU (w przypadku użycia wielu IMU)	Problemy z kalibracją żelaza	Zatkanie czujnika ciśnienia	Błędy RTK/różnicowego GPS
Awarie monitorowania stanu IMU	Niezgodność kierunku kompasu i GPS	(kurz/wilgoć)	Problemy z połączeniem GPS i kompasu
	Niespójność wielu kompasów	Gwałtowne zmiany wysokości powodujące opóźnienie czujnika	

Problemy z
przełączaniem
między
konstelacjami
Opóźnienia
zimnego startu GPS
Ostrzeżenia HDOP
(poziome rozmycie
precyzji)

2.2.4. Typowe usterki w systemie komunikacyjnym bezzałogowych statków powietrznych

Systemy komunikacyjne dronów borykają się z różnymi problemami, takimi jak utrata sygnału, zakłócenia ze strony pobliskich źródeł częstotliwości radiowej (RF) oraz ograniczenia zasięgu spowodowane odległością lub przeszkodami. Anomalie zasilania, warunki środowiskowe i przeciążenie częstotliwości w pasmach 2,4 GHz/5,8 GHz mogą zakłócać sterowanie. Uszkodzenia anteny, awarie połączeń i wadliwe wyjścia kanałów utrudniają transmisję. Błędy oprogramowania układowego mogą powodować nieprawidłowe działanie. Łącza telemetryczne i wideo cierpią z powodu słabych sygnałów, zakłóceń, opóźnień, utraty pakietów i zakłóceń związanych z zasilaniem. Niekorzystne warunki pogodowe i awarie stacji naziemnych również wpływają na wydajność. Ogólnie rzecz biorąc, utrzymanie niezawodnych systemów nadajników radiowych (Tx) i odbiorników (Rx) ma zasadnicze znaczenie dla stabilnej i bezpiecznej pracy bezzałogowych statków powietrznych. Tabela 2.6 zawiera szczegółowy przegląd typowych usterek obserwowanych w systemie komunikacyjnym bezzałogowych statków powietrznych.

Tabela 2.6 Najczęstsze usterki w systemie komunikacyjnym bezzałogowych statków powietrznych

SYSTEM KOMUNIKACYJNY BEZZAŁOGOWYCH STATKÓW POWIETRZNYCH



Nadajnik radiowy (Tx) i odbiornik (Rx)



Transmisja danych (telemetry, nadajnik wideo)

Utrata sygnału i zakłócenia	Słaby sygnał
Ograniczenia zasięgu	Zakłócenia
Nieprawidłowości związane z baterią i zasilaniem	Duże opóźnienia
Wpływ na środowisko	Utrata/uszkodzenie pakietów
Konflikty pasm częstotliwości	Problemy z zasilaniem
Uszkodzenie anteny	Czynniki środowiskowe
Błędy wiązania i parowania	Zatłoczenie pasma częstotliwości
Wadliwe wyjścia kanałów	Problemy ze stacją naziemną
Usterki oprogramowania układowego i oprogramowania	Uszkodzone/nieprawidłowo ustawione anteny
	Błędy oprogramowania układowego

System komunikacyjny zazwyczaj składa się z nadajnika radiowego, ręcznego urządzenia pilota służącego do wysyłania poleceń, które są następnie odbierane przez odbiornik radiowy drona i przekazywane do kontrolera lotu. Radio telemetryczne zapewnia niezbędne połączenie dwukierunkowe, umożliwiając dronowi wysyłanie do pilota istotnych danych, takich jak stan baterii, pozycja i ogólny stan, a także odbieranie ustawień lub poleceń.

Aby zapewnić świadomość sytuacyjną w czasie rzeczywistym, nadajnik wideo (VTx) przesyła pilotowi obraz na żywo z kamery drona. Co najważniejsze, anteny są podłączone do wszystkich tych komponentów: Tx, Rx, VTx i odbiornika wideo (VRx), aby zapewnić wydajną i niezawodną transmisję oraz odbiór sygnałów radiowych.

2.2.5. Typowe usterki w ładunku UAV

Drony są bardzo wszechstronne dzięki ładunkowi, który obejmuje sprzęt dostosowany do konkretnych zadań, wykraczający poza podstawowe elementy lotnicze. System ten często obejmuje kamerę, która ma kluczowe znaczenie dla różnych zastosowań, od wysokiej jakości fotografii i filmowania po zaawansowaną nawigację opartą na wizji, z opcjami od stabilizowanych gimbałem urządzeń zapewniających płynny obraz po FPV (First Person View) i specjalistyczne kamery wielospektralne.

Uzupełnieniem kamery jest często stosowany gimbal, który aktywnie stabilizuje kamerę, zapewniając wyraźny i stabilny obraz niezależnie od ruchu drona. Oprócz rejestrowania obrazu, ładunek może również zawierać różnorodne specjalistyczne czujniki, takie jak LiDAR do precyzyjnego mapowania, kamery termowizyjne do wykrywania ciepła, czujniki gazu do monitorowania środowiska lub czujniki wielospektralne do analizy rolniczej, co

naprawdę umożliwia dronom wykonywanie szerokiego zakresu zadań. Tabela 2.7 przedstawia szczegółowy przegląd typowych usterek obserwowanych w ładunku bezzałogowych statków powietrznych.

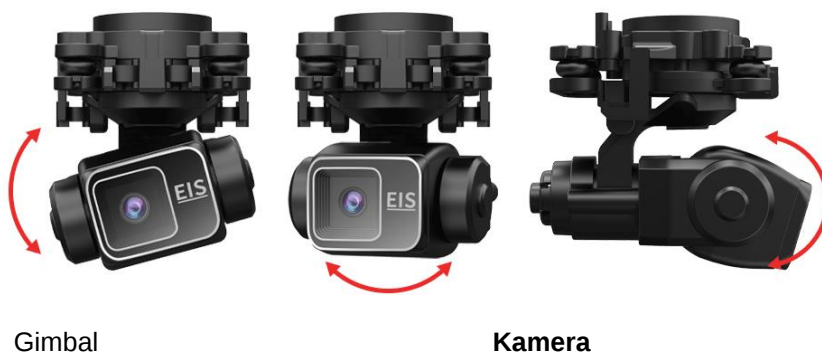
Systemy gimbalowe i kamerowe są podatne na różne problemy, które mogą wpływać na wydajność i jakość obrazu. Typowe usterki gimbala obejmują awarię silnika gimbala, często spowodowaną ciągłą pracą, uderzeniami fizycznymi lub nadmiernym obciążeniem. Kolejnym częstym problemem jest pękanie przewodów elastycznych w wyniku powtarzających się ruchów gimbala, a z czasem mogą pojawić się luźne połączenia spowodowane wibracjami lub ogólnym zużyciem. Wibracje obrazu mogą wynikać z niewyważenia lub uszkodzenia śmigieł, co zakłóca stabilność materiału filmowego.

Ponadto awaria kalibracji gimbala może wynikać z nagłych zmian temperatury lub uderzeń, a system zawieszenia gimbala, który obejmuje mechanizmy tłumiące i elastyczne łączniki, jest również podatny na zużycie i uszkodzenia. Jeśli nachylenie lub obrót gimbala przekroczy jego ograniczenia mechaniczne, wewnętrzne ograniczniki mogą ulec naprężeniu lub pęknięciu.

W tabeli 2.7 przedstawiono szczegółowy przegląd typowych usterek obserwowanych w ładunku bezzałogowych statków powietrznych.

Tabela 2.7 Najczęstsze usterki występujące w ładunku bezzałogowych statków powietrznych

ŁADUNEK BEZZAŁOGOWYCH STATKÓW POWIETRZNYCH



Awaria silnika gimbała	Problemy z czujnikiem aparatu
Pęknięcie przewodu elastycznego	Problemy z kartą SD
Luźne połączenia	Zaparowanie obiektywu
Drgania obrazu	Niezgodności oprogramowania
Awaria kalibracji gimbała	układowego
Uszkodzenie systemu zawieszenia gimbała	
Przechylenie/obróć gimbała przekracza limity	

W przypadku kamery problemy obejmują uszkodzenie czujnika kamery, wynikające zazwyczaj z długotrwałego użytkowania lub uderzenia. Często występują również problemy z kartą SD, takie jak uszkodzenie karty, błędy nagrywania i utrata danych. Czynniki środowiskowe, takie jak zmiany temperatury, mogą prowadzić do zaparowania obiektywu w wyniku gromadzenia się wilgoci wewnątrz obiektywu. Wreszcie, niezgodności oprogramowania układowego mogą wystąpić z powodu błędów aktualizacji lub konfliktów oprogramowania, wpływając na prawidłowe funkcjonowanie zarówno gimbała, jak i systemów kamer.

2.2.6. Typowe usterki w konstrukcji i oprogramowaniu bezzałogowych statków powietrznych

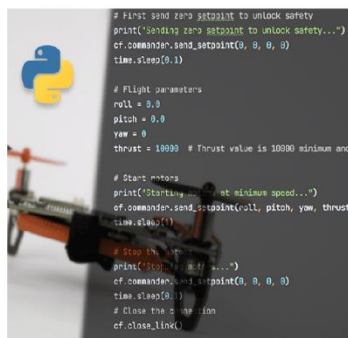
Podstawową konstrukcją każdego bezzałogowego statku powietrznego jest jego rama i podwozie, stanowiące niezbędny szkielet, na którym zintegrowane są wszystkie pozostałe elementy. Ta podstawowa konstrukcja zazwyczaj obejmuje ramę główną, służącą jako główna powierzchnia górna i dolna do montażu elektroniki i innych części. Od tych płyt odchodzą ramiona, kluczowe elementy, do których bezpiecznie przymocowane są silniki, o konstrukcji różnej, od stałej do wygodnej, składanej, ułatwiającej transport. Całą konstrukcję spajają różne elementy montażowe, takie jak śruby, nakrętki i podkładki dystansowe, zapewniające sztywność i stabilność. Wreszcie, podwozie zapewnia niezbędne stopki lub płozy, umożliwiające dronowi bezpieczne i stabilne lądowanie. Tabela 2.8 przedstawia szczegółowy przegląd typowych usterek obserwowanych w konstrukcji i oprogramowaniu bezzałogowych statków powietrznych.

Tabela 2.8 Najczęstsze usterki w konstrukcji i oprogramowaniu bezzałogowych statków powietrznych



Korpus/rama

Pęknięcia i złamania
Luźne śruby i połączenia
Wibracje
Wygięte lub źle wyrównane części
Zmęczenie materiału
Zużycie
Korozja
Awaryjne łożysk i punktów obrotu
Odształcenia



Oprogramowanie/oprogramowanie układowe

Problemy z optymalizacją mocy
Błędy odczytu danych
Przerwy w komunikacji
Utrata danych
Problemy ze stabilizacją
Problemy z kompatybilnością
Błędy aktualizacji
oprogramowania sprzętowego
Problemy z połączeniem GSC
Uszkodzenie pliku dziennika
Błędy mechanizmu
zabezpieczającego

Awaryjne ramy drona obejmują zazwyczaj pęknięcia i złamania elementów konstrukcyjnych, które są zazwyczaj wynikiem twardych lądowań, kolizji lub zmęczenia materiału. Problemy te bezpośrednio zagrażają integralności konstrukcji i stanowią poważne zagrożenie dla bezpieczeństwa. Luźne śruby i połączenia często powstają w wyniku długotrwałych wibracji, cykli rozszerzania się i kurczenia pod wpływem temperatury lub niewystarczającego dokręcenia podczas montażu, co może powodować odłączenie się części, brak równowagi systemu i pogorszenie wydajności.

Samo uszkodzenie spowodowane wibracjami, wywołane przez niewyważenie silnika, uszkodzenie śmigła lub nadmierną prędkość obrotową, przyspiesza zmęczenie materiału i powoduje poluzowanie krytycznych połączeń. Wygięte lub źle wyrównane części, zwykle spowodowane uderzeniami, nieprawidłowym montażem lub nadmiernym obciążeniem, zakłócają aerodynamikę i powodują niewyważenie. Zmęczenie materiału, spowodowane powtarzającym się obciążeniem, starzeniem się lub czynnikami środowiskowymi, stopniowo osłabia elementy i zwiększa ryzyko nagłego pęknięcia. Ogólne zużycie spowodowane

tarciem, ekspozycją na czynniki środowiskowe i normalnym użytkowaniem prowadzi do spadku wydajności i utraty skuteczności uszczelnień.

Korozja spowodowana wilgocią, solą lub chemikaliami degraduje materiały i osłabia elementy konstrukcyjne. Awarie łożysk i punktów obrotowych, często spowodowane nieodpowiednim smarowaniem, zanieczyszczeniem lub przeciążeniem, upośledzają działanie mechanizmów, takich jak podwozie. Wreszcie, odkształcenia spowodowane nadmiernymi temperaturami, niewłaściwym przechowywaniem lub uderzeniami powodują trudności w montażu i ciągle problemy z niewyważeniem.

2.3. Rozpoznawanie usterek w systemach bezzałogowych statków powietrznych

2.3.1. Objawy usterek w układach napędowych bezzałogowych statków powietrznych

Problemy z napędem bezzałogowych statków powietrznych objawiają się nietypowym hałasem/wibracjami silnika, przegrzaniem lub gwałtownymi ruchami, co często wskazuje na problemy z silnikiem. Awarie ESC objawiają się nagłym zatrzymaniem silnika, nieregularnym działaniem lub brakiem reakcji przepustnicy, często towarzyszą im ślady przypalenia lub spuchnięte elementy. Uszkodzenie śmigła prowadzi do zwiększonych wibracji i zmniejszenia siły nośnej.

W połączeniu mogą one powodować ogólną niestabilność lotu, nieoczekiwaną utratę wysokości lub niemożność utrzymania zawisu. Tabela 2.9 zawiera szczegółowy przegląd typowych objawów usterek obserwowanych w układach napędowych bezzałogowych statków powietrznych.

2.3.2. Objawy awarii w układach zasilania bezzałogowych statków powietrznych

Problemy z zasilaniem bezzałogowych statków powietrznych często wynikają z baterii lub płyty rozdzielczej zasilania (PDB). Problemy z baterią obejmują skrócony czas lotu, gwałtowne spadki napięcia, pęcznienie, przegrzanie i nierównowagę ogniw. Problemy z płytą PDB zazwyczaj objawiają się niestabilnym zasilaniem, przegrzaniem, utratą zasilania elementów lub odbarwieniem połączeń lutowanych.

Rozpoznanie tych objawów ma kluczowe znaczenie dla szybkiej diagnozy i bezpiecznej eksploatacji. Tabela 2.10 zawiera szczegółowy przegląd typowych objawów awarii obserwowanych w systemach zasilania bezzałogowych statków powietrznych.

Tabela 2.9 Najczęstsze objawy nieprawidłowego działania układu napędowego bezzałogowych statków powietrznych

		
Silnik	ESC	Śmigło
Nietypowe odgłosy/wibracje Trudności z obracaniem ręcznym Niespójna moc Przegrzanie Widoczne uszkodzenia/odbarwienia Skręcanie silnika Nadmierny pobór prądu Zgrzytanie łożysk lub nierówny obrót	Nagłe zatrzymanie silnika Nieregularne działanie silnika SC nie włącza się Nietypowe odgłosy Ślady przypalenia Spuchnięte elementy Przegrzanie Brak reakcji na ruch pedału gazu Przerywane połączenie Wskaźniki LED pokazujące kody błędów Spadki napięcia pod obciążeniem	Zwiększone wibracje Zmniejszona siła nośna/ciąg Widoczne uszkodzenia

Tabela 2.10 Najczęstsze objawy awarii systemu zasilania bezzałogowych statków powietrznych

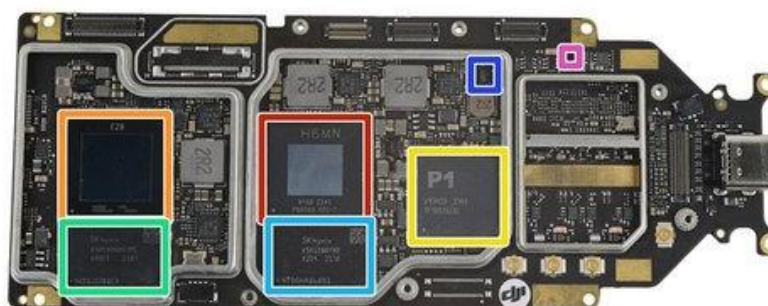
	
Akumulator	Płyta rozdzielcza zasilania (PDB)
Skrócony czas lotu	Nierównomierny rozkład mocy

Gwałtowne spadki napięcia pod obciążeniem	Przegrzanie
Fizyczne spęcznie	Widoczne ślady przypalenia
Przegrzanie podczas ładowania	Przegrzanie
Przegrzanie	Utrata zasilania niektórych komponentów
Bateria nie utrzymuje ładunku	Przerywane zasilanie silników/kamery
Czas ładowania dłuższy niż normalnie	Odbarwione lub stopione połączenia lutowane
Nierównowaga napięcia między ogniwami akumulatora	
Nietypowe dźwięki podczas ładowania	
Korozja lub wyciek wokół zacisków akumulatora	

2.3.3. Objawy nieprawidłowego działania płyty kontrolera lotu UAV i czujnika lotu

Typowe problemy z kontrolerem lotu (FC) obejmują awarię zasilania, pętle rozruchowe, problemy z połączeniem USB i niemożność uzbrojenia. Mogą wystąpić nieprawidłowe odczyty czujników, niekontrolowane ruchy, opóźniona reakcja drążka lub odleganie. Nawet przy prawidłowej konfiguracji kontrolery FC mogą powodować desynchronizację silników, awarie funkcji GPS lub niestabilny lot z powodu głębszych usterek systemu lub oprogramowania układowego. W tabeli 2.11-12 przedstawiono szczegółowy przegląd typowych objawów nieprawidłowego działania obserwowanych odpowiednio w płycie kontrolera lotu i czujnikach lotu.

Tabela 2.11 Najczęstsze objawy nieprawidłowego działania płytki kontrolera lotu bezzałogowych statków powietrznych



Problemy z uzbrojeniem i przed lotem

Objawy behawioralne

Brak zasilania/brak świateł	Nieprawidłowe ruchy
Błąd uruchamiania	Nieregularne zachowanie podczas lotu
Komputer/konfigurator nie wykrywa urządzenia	Brak reakcji/opóźnienie drążka sterowego
Błąd uzbrojenia	Odleganie / utrata kontroli
Nieprawidłowe flagi uzbrojenia	Przerywane przerwy w zasilaniu
Niespójne odczyty czujników	Niespójna autonomia
	Brak synchronizacji silnika/zacięcia

Błędy czujników w bezzałogowych statkach powietrznych, zwłaszcza w IMU, magnetometrze, barometrze i GPS/GNSS, mogą prowadzić do poważnych anomalii lotu. Awarie IMU mogą powodować kołysanie lub niestabilne zawisanie. Błędy magnetometru mogą powodować dryfowanie, problemy z odchyleniem lub awarie trybu GPS. Problemy z barometrem często prowadzą do niestabilności wysokości. Błędy GPS/GNSS mogą powodować słabe namierzenie satelity, niedokładne pozycjonowanie lub skoki mapy. Problemy te mogą uniemożliwić stabilny lot lub działanie funkcji powrotu do punktu startowego (RTH). Połączenie awarii czujników może nawet spowodować odlot, stwarzając poważne zagrożenie dla bezpieczeństwa.

Tabela 2.12 Najczęstsze objawy nieprawidłowego działania czujników lotu bezzałogowych statków powietrznych

   			
Błędy IMU (inercyjnej jednostki pomiarowej)	Błędy magnetometru (kompasu)	Błędy barometru	Błędy modułu GPS/GNSS
Nieregularne zachowanie podczas lotu	Toaleta kręglarska	Niestabilność wysokości	Brak możliwości ustalenia pozycji
Dryfowanie	Nieregularne zachowanie podczas skrętu	Nieprawidłowy odczyt wysokości	Powolne uzyskiwanie pozycji
Brak stabilizacji	Nieprawidłowe wyświetlanie kursu	Brak utrzymania wysokości	Niska liczba satelitów
Niepożądane ruchy	Brak możliwości włączenia trybów	Słabe śledzenie terenu	Słaby HDOP/VDOP
Brak uzbrojenia/uruchomienia			Niedokładna pozycja
			Dryf/skoki pozycji

wspomaganych przez GPS	Problemy z wysokością RTH	Brak możliwości włączenia trybów GPS
Słaba wydajność RTH		Nieregularne
Awarie kalibracji		działanie funkcji rth
		Ryzyko odlotu

2.3.4. Objawy nieprawidłowego działania systemu komunikacyjnego bezzałogowego statku powietrznego

Niepożądane ruchy, takie jak dryfowanie lub drgania, często wskazują na problemy w systemie komunikacyjnym bezzałogowego statku powietrznego, wpływające na działanie nadajnika radiowego (Tx) i odbiornika (Rx). Objawy obejmują awarie połączeń, słaby/przerywany sygnał lub całkowitą utratę sygnału, co prowadzi do wyświetlenia ostrzeżenia „rozłączenie” na stacji naziemnej lub komunikatu „brak sygnału” w goglach FPV.

Ponadto powolna/zawieszająca się telemetria, opóźnienia wideo, pikselizacja i zmniejszony zasięg są typowymi oznakami problemów z transmisją danych, które zagrażają bezpieczeństwu lotu i kontroli. Tabela 2.13 zawiera szczegółowy przegląd typowych objawów nieprawidłowego działania obserwowanych w systemie komunikacyjnym bezzałogowego statku powietrznego.

2.3.5. Objawy nieprawidłowego działania ładunku UAV

Awarie gimbała i kamery w bezzałogowych statkach powietrznych często objawiają się wyraźnymi symptomami. Problemy z gimbałem obejmują nietypowe odgłosy, przechylanie się, awarie inicjalizacji, widoczne ugięcie i nieregularne ruchy. Problemy z kamerą mogą prowadzić do rozmytych lub zniekształconych nagrań, zmian kolorów, nieprawidłowej ekspozycji i zacinania się obrazu wideo. Objawy te mają kluczowe znaczenie dla diagnozowania i rozwiązywania problemów związanych z komponentami obrazowania i stabilizacji drona. Tabela 2.14 zawiera szczegółowy przegląd typowych objawów nieprawidłowego działania obserwowanych w ładunku UAV.

Tabela 2.13 Najczęstsze objawy nieprawidłowego działania systemu komunikacyjnego bezzałogowych statków powietrznych



Nadajnik radiowy (Tx)
Odbiornik radiowy (Rx)
Brak zasilania/brak reakcji
Błąd połączenia
Wadliwe wyjścia kanałów
Słaby sygnał
Sygnał przerywany
Utrata sygnału



Transmisja danych (telemetria, nadajnik wideo)

Stacja naziemna wyświetla ostrzeżenie „Rozłączono”
Gogle FPV wyświetlają komunikat „Brak sygnału” lub zakłócenia śnieżne
Powolne aktualizacje telemetrii lub zawieszanie się
Opóźnienia w przekazie wideo
Wartości migoczą lub skaczą nieregularnie
Brak lub uszkodzenie wyświetlanych danych
Pikselizacja, rozrywanie obrazu, efekt śniegu w obrazie
Migotanie lub znikanie elementów OSD
Zmniejszony zasięg
Nagłe zakłócenia statyczne
Wzorzyste linie lub fale w obrazie wideo

Tabela 2.14 Najczęstsze objawy nieprawidłowego działania ładunku UAV



Gimbal

Nietypowe odgłosy z silników gimbała
 Gimbal przechyla się na jedną stronę po włączeniu zasilania
 Gimbal nie uruchamia się prawidłowo podczas startu
 Widoczne ugięcie lub opadanie gimbała
 Gimbal porusza się, ale nie utrzymuje pozycji
 Gimbal dryfuje lub przechyla się nieoczekiwanie
 Ruchy gimbała są nierówne lub zacinają się podczas pracy
 Gimbal nadmiernie wibruje lub trzęsie się
 Powolne lub nie reagujące sterowanie gimbalem
 Gimbal blokuje się lub całkowicie przestaje reagować
 Nieregularne lub losowe ruchy gimbała

Kamera

Niewyraźny lub nieostry obraz
 Efekt galaretki lub rolling shutter w filmie
 Zniekształcenie lub wypaczenie obrazu
 Zmiany kolorów lub nieprawidłowy balans bieli
 Prześwietlone lub niedoświetlone nagrania
 Zacinanie się wideo lub utrata klatek

2.3.6. Objawy nieprawidłowego działania ramy i oprogramowania bezzałogowego statku powietrznego

Usterki ramy UAV są często widoczne lub wykrywalne podczas lotu. Należy zwracać uwagę na widoczne pęknięcia, luźne śruby lub wygięte ramiona, ponieważ mają one bezpośredni wpływ na integralność strukturalną. Objawy występujące podczas lotu (In-) obejmują nadmierne wibracje, nietypową niestabilność lub trudności z utrzymaniem poziomego lotu, co wskazuje na podstawowe problemy z ramą.

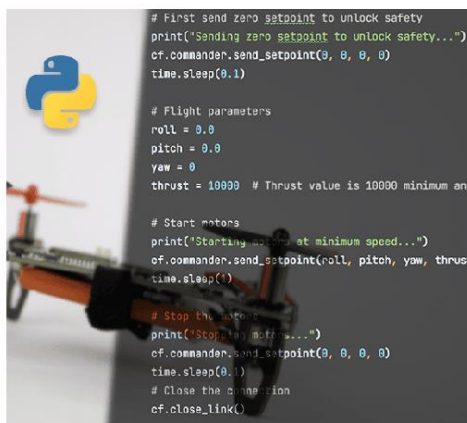
Inne oznaki, takie jak zdeformowane sekcje, zużyte otwory na śruby, grzechoczące dźwięki lub problemy z mechanizmami składania, również wskazują na poważne uszkodzenia ramy, które wymagają natychmiastowej uwagi w celu zapewnienia bezpiecznej eksploatacji. Tabela 2.15 zawiera szczegółowy przegląd typowych objawów nieprawidłowego działania ramy i oprogramowania bezzałogowego statku powietrznego.

Tabela 2.15 Najczęstsze objawy nieprawidłowego działania ramy i oprogramowania bezzałogowych statków powietrznych



Korpus/rama

Widoczne pęknięcia lub złamania włókna węglowego/tworzywa sztucznego
 Luźne lub brakujące śruby i elementy mocujące
 Wygięte lub skręcone ramiona ramy
 Nadmierne wibracje podczas lotu
 Nietypowa niestabilność lotu lub kołysanie
 Trudności z utrzymaniem poziomego lotu
 Odształcone lub wypaczone sekcje ramy
 Zużyte lub powiększone otwory na śruby
 Korozja lub odbarwienie powierzchni
 Stukające dźwięki podczas pracy
 Trudności z składaniem/rozkładaniem (w przypadku dronów składanych)



Oprogramowanie/oprogramowanie układowe

Nieregularne lub niestabilne zachowanie podczas lotu
 Nieoczekiwane zmiany wysokości
 Brak reakcji na polecenia sterujące
 Awaria funkcji powrotu do punktu startowego
 Niestabilność utrzymywania pozycji
 Utrata transmisji danych telemetrycznych
 Zaniki sygnału sterującego
 Przerwy lub opóźnienia w transmisji obrazu
 Ostrzeżenia o rozłączeniu stacji naziemnej
 Ciągłe sygnały dźwiękowe lub ostrzeżenia LED
 Błędy sprawdzania stanu systemu
 Ostrzeżenia o niskim poziomie naładowania baterii pomimo pełnego naładowania
 Błędy pamięci lub pamięci masowej

Gdy dron wykazuje niestabilny lot, zmiany wysokości lub ignoruje polecenia, prawdopodobną przyczyną są problemy z oprogramowaniem lub oprogramowaniem układowym. Awarie funkcji powrotu do punktu startowego, niestabilne utrzymywanie pozycji,

utrata telemetrii, zanik sygnałów sterujących i przerwy w transmisji wideo również wskazują na te problemy. Utrzymujące się sygnały dźwiękowe błędów, ostrzeżenia LED, awarie kontroli stanu, fałszywe alerty o niskim poziomie naładowania baterii i błędy pamięci dodatkowo wskazują na podstawowe nieprawidłowości w działaniu oprogramowania lub oprogramowania układowego, które wymagają uwagi i potencjalnych aktualizacji.

2.4. Narzędzia diagnostyczne i metody wykrywania usterek bezzałogowych statków powietrznych

Treść tej sekcji dotyczy rozwiązywania problemów z dronami, w szczególności w kategoriach „Narzędzia” i „Metody diagnostyki usterek”. Wizualną reprezentację powszechnie stosowanych narzędzi diagnostycznych do usterek UAV przedstawiono na rysunku 2.2.



Rysunek 2.2 Powszechnie stosowane narzędzia diagnostyczne do wykrywania awarii bezzałogowych statków powietrznych

2.4.1. Narzędzia diagnostyczne i metody diagnostyki systemów napędowych bezzałogowych statków powietrznych

W przypadku silników diagnostyka obejmuje kontrolę wzrokową, monitorowanie rezystancji/temperatury oraz analizę drgań za pomocą oscyloskopu lub stanowiska testowego silnika. ESC są oceniane poprzez kontrolę wzrokową pod kątem spalonych elementów, monitorowanie temperatury oraz testowanie prądu/napięcia za pomocą multimetru i kamery termowizyjnej. Śmigła są diagnozowane poprzez kontrolę

wzrokową/dotykową, testy wyważenia oraz sprawdzanie montażu za pomocą lupy i wyważarki śmigieł, co zapewnia wydajną i bezpieczną pracę drona. W tabeli 2.16 przedstawiono kluczowe narzędzia pomiarowe i metody diagnostyki usterek układów napędowych bezzałogowych statków powietrznych.

2.4.2. Narzędzia diagnostyczne i metody diagnostyczne dla układów zasilania bezzałogowych statków powietrznych

Diagnostyka układów zasilania bezzałogowych statków powietrznych opiera się na specjalnych narzędziach i metodach. W przypadku akumulatorów kluczowe znaczenie dla testowania napięcia, sprawdzania pojemności i monitorowania temperatury mają multimetr cyfrowy, analizator akumulatorów i termometr na podczerwień. W przypadku płyt rozdzielczych (PDB) do kontroli wzrokowej, pomiaru napięcia i termowizji w celu zlokalizowania problemów niezbędne są multimetr cyfrowy, kamera termowizyjna i lupa. Połączenie tych metod zapewnia kompleksową diagnostykę usterek, od wyważenia ogniw po analizę poboru prądu, co pozwala zachować niezawodność bezzałogowych statków powietrznych. W tabeli 2.17 przedstawiono kluczowe narzędzia pomiarowe i metody diagnostyki usterek w systemach zasilania bezzałogowych statków powietrznych.

Tabela 2.16 Narzędzia i metody diagnostyki usterek w układzie napędowym bezzałogowych statków powietrznych

	Silnik	ESC	Śmigło
Narzędzia	Oscyloskop	Multimetr	Szko powiększające
	Stanowisko	Oscyloskop	Jasna latarka LED
	testowe silnika	Kamera termowizyjna	Waga do wyważania
	Gaussmeter	Karta/oprogramowanie do	śmigieł
	Kamera	programowania ESC	Klucz dynamometryczny
	termowizyjna lub	Oprogramowanie do	Analizator drgań
	termometr na	konfiguracji kontrolera lotu	
	podczerwień	Tester śmigieł	
		Szko powiększające	
Metoda diagnostyki usterek	Kontrola wzrokowa	Kontrola wzrokowa pod	Kontrola wzrokowa i
	Ręczny test obrotu	kątem spalonych elementów	dotykowa
	wału	Monitorowanie temperatury	Kontrola z użyciem
	Pomiar rezystancji	za pomocą telemetrii	powiększenia
	multimetrem a		Test równowagi
	uzwojeń silnika		Test elastyczności

Monitorowanie temperatury silnika	Pomiar poboru prądu w stosunku do mocy znamionowej	Test obrotowy
Analiza drgań		Kontrola dźwiękowa
Pomiar prędkości obrotowej Pobór mocy	Testowanie napięcia pod obciążeniem	Kontrola montażu
	Sprawdzenie spadków/skoków napięcia	
	Test ciągłości za pomocą multimetru	
	Sprawdzenie ciągłości przewodów sygnałowych	
	Sprawdź połączenia płyty rozdzielczej zasilania	
	Testowanie przy użyciu sprawdzonego kontrolera lotu	
	Termowizja podczas pracy	

Tabela 2.17 Narzędzia i metody diagnostyki usterek w systemie zasilania bezałogowych statków powietrznych

	Akumulator	Płyta rozdzielcza zasilania (PDB)
Narzędzia	Multimetr cyfrowy	Multimetr cyfrowy
	Analizator akumulatorów	Kamera termowizyjna
	Miernik rezystancji wewnętrznej	Termometr cyfrowy z sondą
	Termometr na podczerwień	Szko powiększające z oświetleniem LED
	Ładowarka akumulatorów	Stacja lutownicza z regulacją temperatury
Metoda diagnostyki usterek	Testowanie napięcia	Kontrola wzrokowa
	Sprawdzanie równowagi ogni	Pomiar napięcia
	Testowanie pojemności	Analiza poboru prądu
	Pomiar rezystancji wewnętrznej	Test ciągłości
	Monitorowanie temperatury	Termowizja
	Kontrola wzrokowa	
	Testowanie szybkości rozładowania	
	Analiza czasu ładowania	

2.4.3. Narzędzia diagnostyczne i metody dla płytki kontrolera lotu i czujnika lotu bezzałogowego statku powietrznego

Diagnozowanie usterek bezzałogowych statków powietrznych, zwłaszcza tych związanych z niekontrolowanymi ruchami, takimi jak dryfowanie lub drgania, w dużym stopniu opiera się na systematycznym podejściu do płytki kontrolera lotu i czujników lotu. Jak szczegółowo opisano w tabeli 2.18, do wykrywania problemów w tych skomplikowanych systemach niezbędny jest szereg specjalistycznych narzędzi pomiarowych, w tym oscyloskopy i analizatory logiczne. Skuteczne metody diagnostyki usterek obejmują kontrolę wzrokową i analizę zasilania kontrolera lotu oraz analizę rejestrowanych danych i testy środowiskowe czujników lotu, zapewniając kompleksowe rozwiązywanie problemów w celu uzyskania optymalnej wydajności drona.

Tabela 2.18 Narzędzia i metody diagnostyki usterek w płycie kontrolera lotu i czujniku lotu bezzałogowych statków powietrznych

	Płytki kontrolera lotu	Czujnik lotu
Narzędzia	Multimetr cyfrowy	Multimetr cyfrowy
	Oscyloskop	Oscyloskop
	Analizator widma	Analizator logiczny
	Analizator logiczny	Urządzenie do testowania
	Sonda prądowa/miernik	GPS/GNSS
	cęgowy	Narzędzie do kalibracji
	Stacja do naprawy gorącym	kompasu
	powietrzem	Platforma testowa IMU
Metoda diagnostyki usterek	USB	Analizator widma
	Kontrola wzrokowa	Analiza rejestrów danych
	Analiza zasilania	Testy kalibracji statycznej
	Testowanie portów	Odniesienia krzyżowe
	komunikacyjnych	Testy środowiskowe
	Sprawdzenie kalibracji czujnika	Śledzenie ścieżki sygnału
	Śledzenie sygnału	Testy protokołów
	Flashowanie/odzyskiwanie	komunikacyjnych
	oprogramowania układowego	
	Wymiana komponentów	
	Analiza termiczna	

2.4.4. Narzędzia diagnostyczne i metody dla systemu komunikacyjnego bezzałogowego statku powietrznego

Diagnozowanie usterek komunikacyjnych w bezzałogowych statkach powietrznych ma kluczowe znaczenie dla niezawodnego działania. Jak szczegółowo opisano w tabeli 2.19, skuteczne rozwiązywanie problemów wymaga zastosowania specjalnych narzędzi pomiarowych i metod dla kluczowych komponentów. W przypadku nadajnika radiowego (Tx) i odbiornika radiowego (Rx) inżynierowie wykorzystują narzędzia takie jak analizatory widma RF i mierniki SWR do przeprowadzania testów siły sygnału i zasięgu, zapewniając solidne łącza sterujące. Podobnie problemy z transmisją danych obejmujące telemetrię i wideo są rozwiązywane za pomocą analizy utraty pakietów i analizy przemiatania częstotliwości, często przy użyciu mierników RSSI i analizatorów antenowych. Te systematyczne podejścia, oparte na odpowiednich instrumentach, mają kluczowe znaczenie dla utrzymania integralności komunikacji bezzałogowych statków powietrznych.

Tabela 2.19 Metody i narzędzia diagnostyki usterek w systemach komunikacyjnych bezzałogowych statków powietrznych

Metoda diagnostyki usterek	Nadajnik radiowy (Tx)	Transmisja danych (telemetria,
	Odbiornik radiowy (Rx)	nadajnik wideo)
	Testowanie siły sygnału	Analiza utraty pakietów
	Testowanie zasięgu	Analiza przemiatania częstotliwości
	Skanowanie częstotliwości	Testowanie siły sygnału
	Testowanie połączenia/linku	Testowanie charakterystyki anteny
	Testowanie bezpieczeństwa awaryjnego	Obliczanie budżetu łącza
	Mapowanie kanałów	Pomiar opóźnienia
	Pomiar opóźnienia	
Narzędzia	Analizator widma RF Miernik SWR Multimetr	

Oscyloskop
Miernik mocy RF
Analizator antenowy
Generator sygnałów
Miernik RSSI

2.4.5. Narzędzia diagnostyczne i metody diagnostyczne dla ładunku UAV

Skuteczne rozwiązywanie problemów związanych z ładunkiem bezzałogowego statku powietrznego zależy od zastosowania odpowiednich narzędzi pomiarowych i metod diagnostyki usterek, jak pokazano w tabeli 2.20. W przypadku gimballi narzędzia takie jak inklinometry i analizatory drgań, w połączeniu z kontrolą wzrokową i testami obciążeniowymi, pozwalają precyzyjnie zlokalizować problemy związane ze stabilnością i ruchem.

Tabela 2.20 Narzędzia i metody diagnostyki usterek w ładunku bezzałogowych statków powietrznych

Narzędzia	Gimbal	Kamera
	Inklinometr	Tester sygnału HDMI/wideo
	Analizator drgań	Analizator protokołów USB
	Miernik prądu cęgowy	Multimetr cyfrowy
	Tester enkodera/czujnika	Oscyloskop
	położenia	Analizator widma
	Precyzyjne suwmiarki	
	Multimetr	
	Oscyloskop	
Metoda diagnostyki usterek	Kontrola wzrokowa	Kontrola wzrokowa
	Testy funkcjonalne	Testy zasilania
	Testy obciążeniowe	Śledzenie ścieżki sygnału
	Śledzenie sygnału	Wymiana komponentów
	Analiza rejestru danych	Weryfikacja wersji oprogramowania
		układowego
		Analiza drgań
		Testowanie protokołów
		komunikacyjnych

W przypadku kamer przydatne są testy sygnału HDMI/wideo oraz analizatory widma, w połączeniu z testowaniem zasilania i weryfikacją protokołów komunikacyjnych, które

pozwalają rozwiązać problemy związane z obrazowaniem i przepływem danych. Przestrzeganie tych systematycznych podejść ma kluczowe znaczenie dla utrzymania integralności operacyjnej krytycznego ładunku drona.

2.4.6. Narzędzia diagnostyczne i metody dla ram UAV i oprogramowania

Utrzymanie integralności strukturalnej bezzałogowego statku powietrznego ma kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa i wydajności lotu. Jak przedstawiono w tabeli 2.21 „Narzędzia pomiarowe i metody diagnostyki usterek w konstrukcji i oprogramowaniu bezzałogowych statków powietrznych”, niezbędna jest dokładna kontrola przed lotem korpusu/konstrukcji drona. Narzędzia takie jak lupa i oświetlenie LED pomagają w szczegółowej kontroli wzrokowej i sprawdzaniu elementów mocujących. Poziomica bąbelkowa pomaga zapewnić symetrię i wyrównanie, a analizator drgań może wykryć subtelne problemy.

Regularne kontrole przebiegu kabli, izolacji i zabezpieczenia uchwytu baterii zapobiegają typowym awariom, zapewniając niezawodne i bezpieczne działanie drona.

Tabela 2.21 *Narzędzia i metody diagnostyki usterek w konstrukcji i oprogramowaniu bezzałogowych statków powietrznych*

	Korpus/rama	Oprogramowanie
Narzędzia	Lupa	Analizatory logów (planowanie misji,
	Oświetlenie LED	qgroundcontrol)
	Suwmiarka cyfrowa	Panele telemetryczne czasu rzeczywistego
	Śrubokręt	Narzędzia symulacyjne (gazebo, SITL)
	Poziomica	Wskaźniki monitorowania stanu
	Analizator drgań	Monitory ping/heartbeat
	Waga	Konsola debugowania / logi kontroli naziemnej
	Miernik skoku gwintu	Rejestratory danych (ROS bag, rejestrator MAVlink)
Metoda diagnostyk i usterek	Szczegółowa kontrola wzrokowa	Analiza kodów błędów
	Sprawdzenie symetrii	Kontrola nadmiarowości czujników
	Kontrola elementów mocujących	Timer watchdog
		Kontrola spójności szacowania stanu
		Walidacja poprawności parametrów

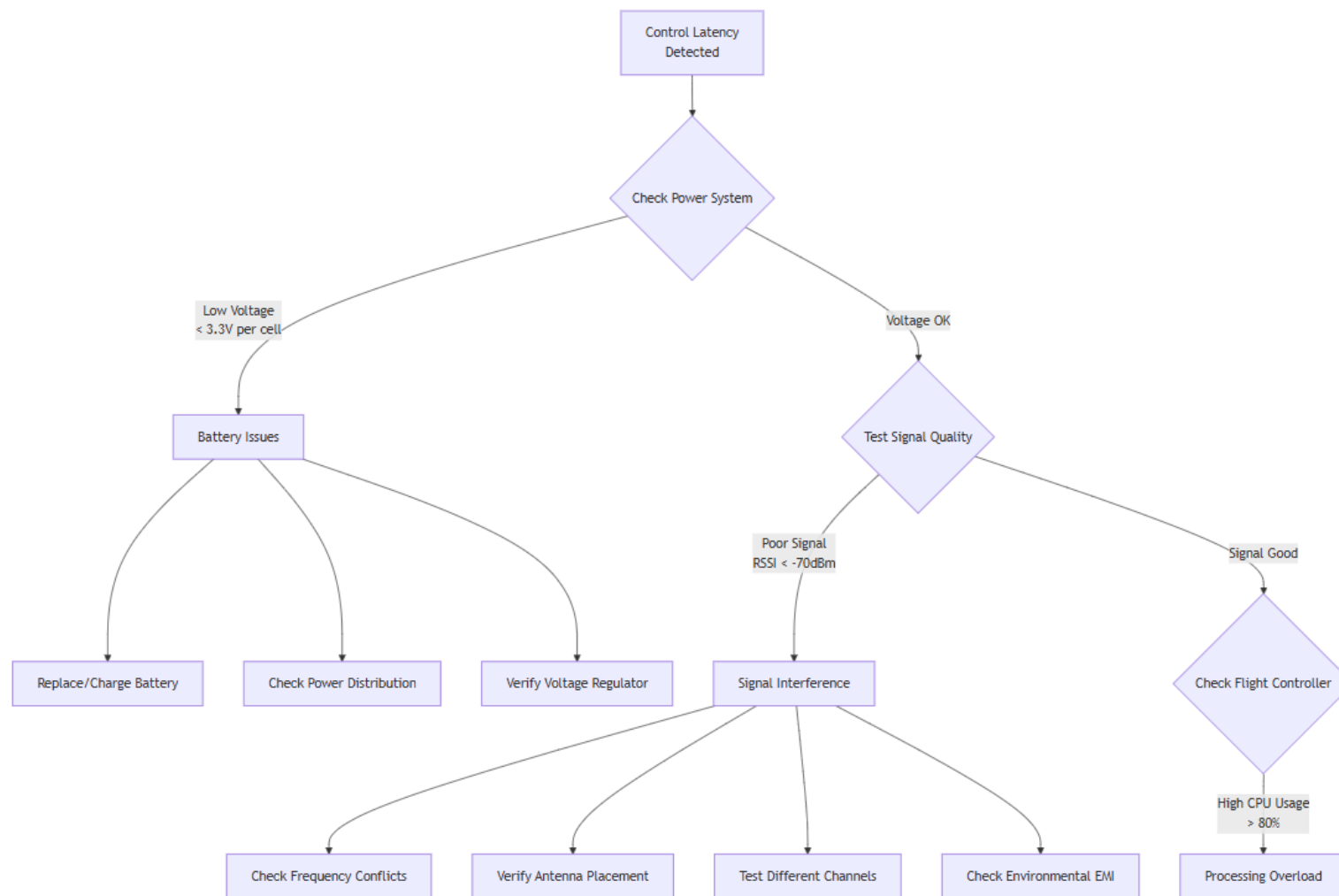
Kontrola przebiegu kabli i izolacji	Porównanie sygnatur logów
Kontrola uchwytu baterii i mocowania	Analiza wyzwalaczy zabezpieczających
Test elastyczności i skręcania nadwozia	

2.5. Schematy blokowe rozwiązywania problemów

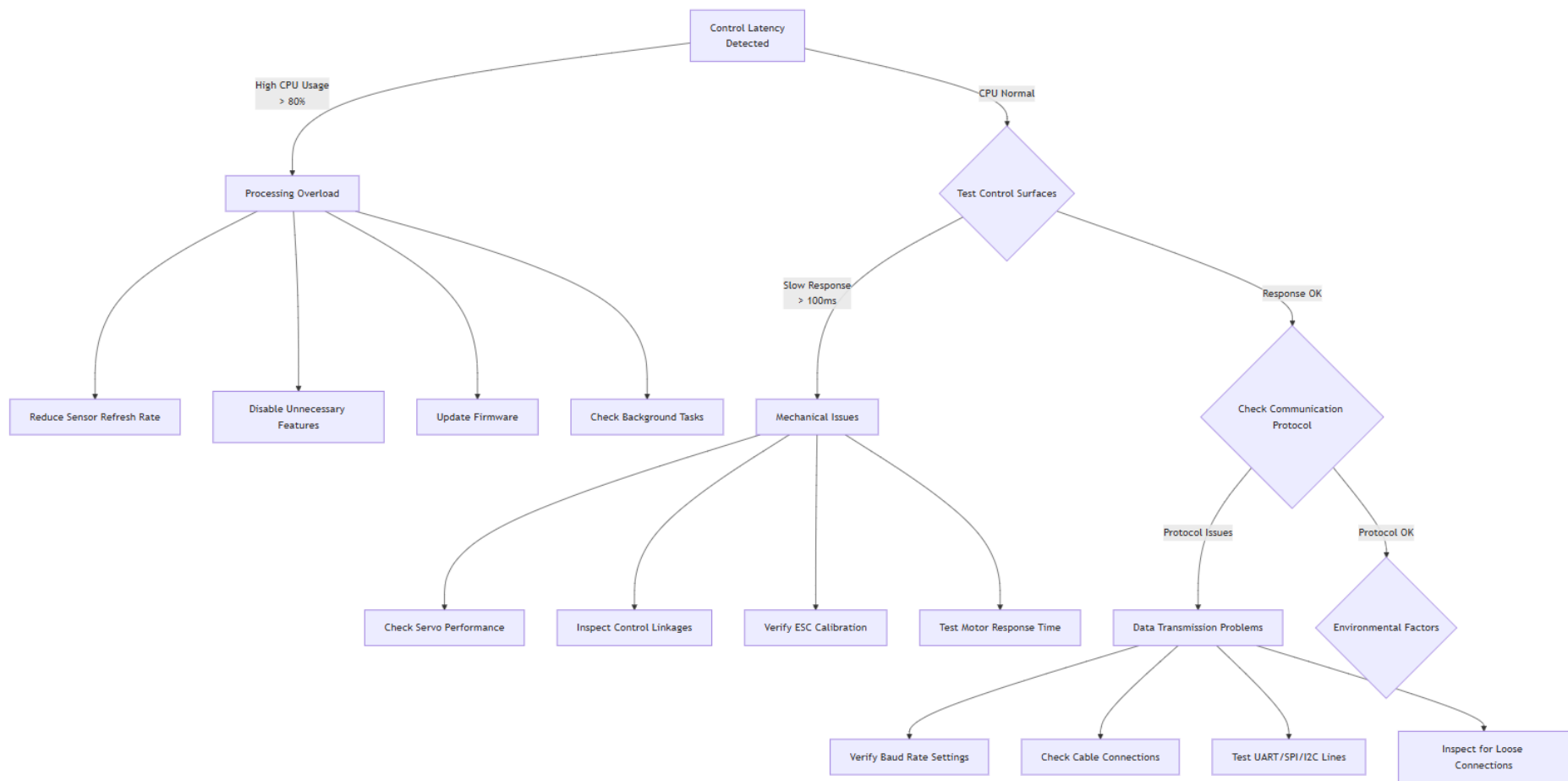
W tej sekcji przedstawiono ustrukturyzowane podejście do diagnozowania typowych problemów operacyjnych występujących w bezzałogowych statkach powietrznych (UAV). Schematy blokowe mają na celu pomóc w identyfikacji i rozwiązywaniu problemów, takich jak opóźnienia sterowania, dryf podczas zawisu, skrócony czas lotu, nieoczekiwane zmiany wysokości, asymetryczne zachowanie podczas lotu, niestabilny zawis, nadmierne wibracje, nieoczekiwane zmiany trybu pracy i wysoka temperatura. Każda usterka jest poparta dedykowanymi diagramami i odniesieniami wizualnymi zamieszczonymi w tym rozdziale, które prowadzą użytkowników krok po kroku przez ścieżki decyzyjne. Celem jest zwiększenie wydajności konserwacji, zminimalizowanie przestojów oraz wsparcie zarówno początkujących, jak i doświadczonych operatorów w osiągnięciu bezpiecznego i stabilnego działania dronów.

Oprócz anomalii w działaniu podczas lotu, systemy bezzałogowych statków powietrznych są również podatne na różne problemy operacyjne i elektroniczne, które mogą zagrozić powodzeniu misji. Jednym z najczęstszych problemów jest pogorszenie jakości obrazu wideo i zdjęć, często wynikające z nieprawidłowej kalibracji gimbala, zabrudzenia obiektywu lub wadliwych kart SD. Utrata sygnału jest często zgłaszana w gęsto zabudowanych obszarach miejskich, obszarach o wysokich zakłóceniach elektromagnetycznych lub w niekorzystnych warunkach pogodowych. Powszechne są również automatyczne wyzwalacze lądowania, spowodowane zazwyczaj niskim poziomem naładowania baterii, przerwaniem sygnału lub aktywacją wbudowanych protokołów bezpieczeństwa. Innym powszechnym problemem są przerwy w połączeniu kontrolera, które mogą wynikać z nadmiernego zasięgu, fizycznych przeszkód lub konfliktów częstotliwości. Awarie powrotu do domu, zwykle związane z błędami rejestracji GPS lub niedokładnościami wykrywania przeszkód. Inne problemy w tej kategorii to niewystarczająca odporność na wiatr, szczególnie wpływająca na lekkie drony, oraz zamrażanie stabilizacji gimbala lub kamery z powodu zmęczenia materiałowego lub niespójności oprogramowania układowego.

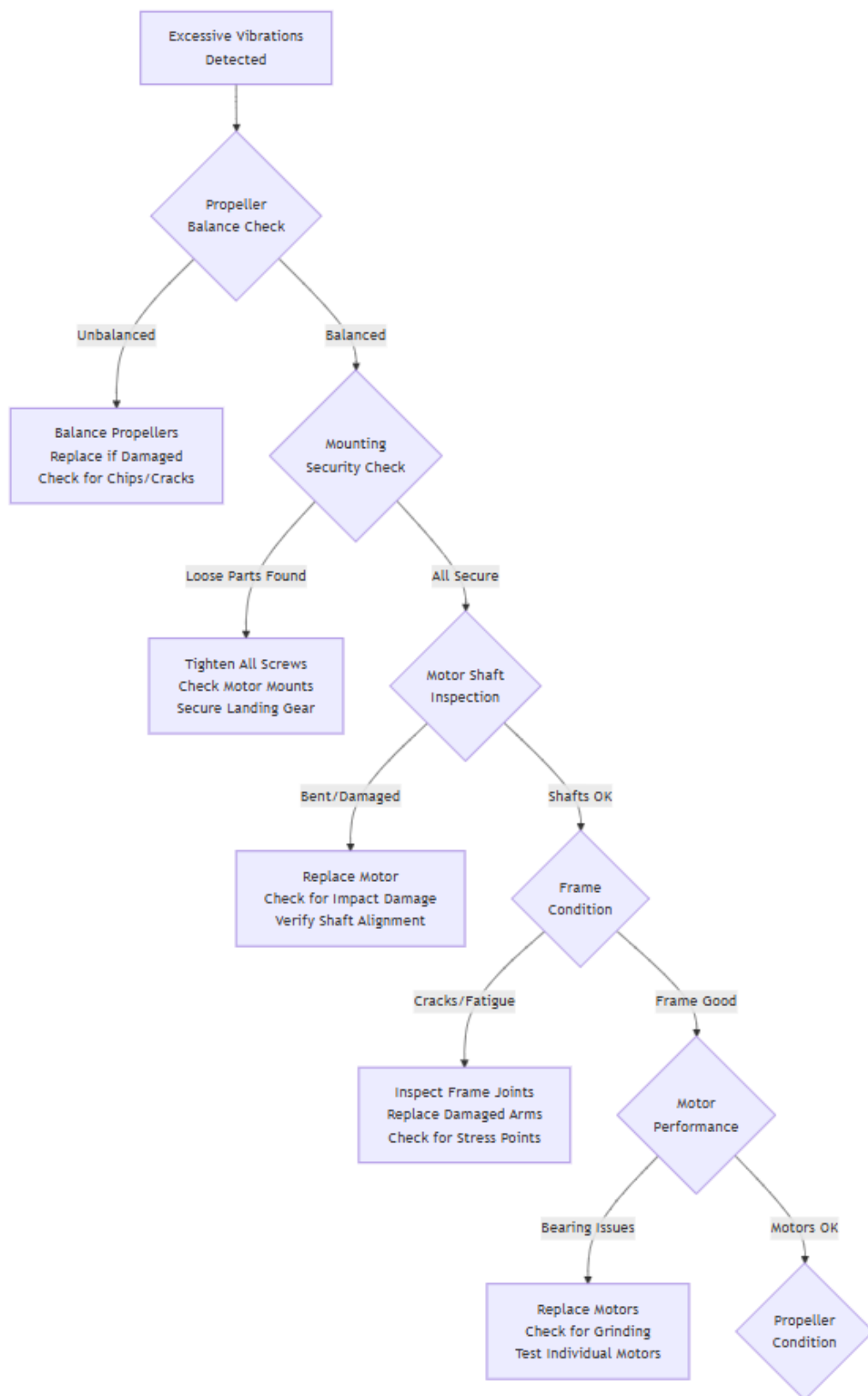
Kompleksowe schematy blokowe przedstawiono na **rysunkach od 2.3 do 2.12**, aby pomóc w rozwiązywaniu różnych problemów, w tym opóźnień sterowania, nadmiernych wibracji, dryfowania podczas zawisu, skrócenia czasu lotu, nieoczekiwanych zmian wysokości, asymetrycznego zachowania podczas lotu, niestabilnego zawisu, wysokiej temperatury i nieoczekiwanych zmian trybu. Schematy te prowadzą użytkowników przez systematyczne etapy diagnostyczne, zapewniając skuteczne identyfikowanie przyczyn źródłowych i odpowiednie działania naprawcze. Każdy schemat blokowy jest zaprojektowany tak, aby rozwiązać konkretne problemy, minimalizując przestoje i zwiększając bezpieczeństwo pracy. Postępując zgodnie z tymi ustrukturyzowanymi procedurami, użytkownicy mogą lepiej zrozumieć podstawowe systemy i podejmować świadome decyzje dotyczące konserwacji, co ostatecznie poprawia wydajność i niezawodność bezzałogowych statków powietrznych zarówno w warunkach terenowych, jak i laboratoryjnych.



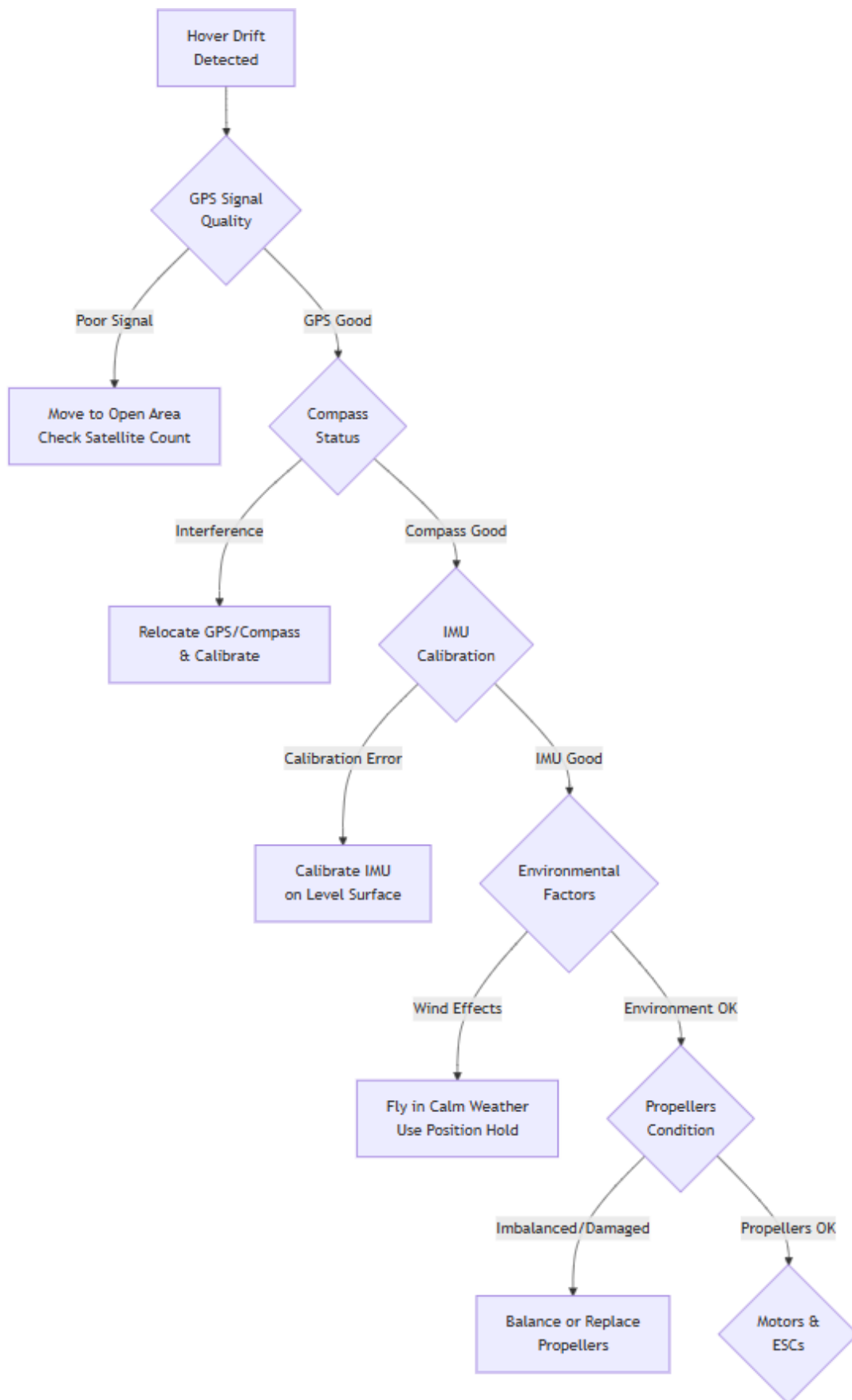
Rysunek 2.3. Schematy blokowe dotyczące rozwiązywania problemów związanych z opóźnieniem sterowania (część 1)



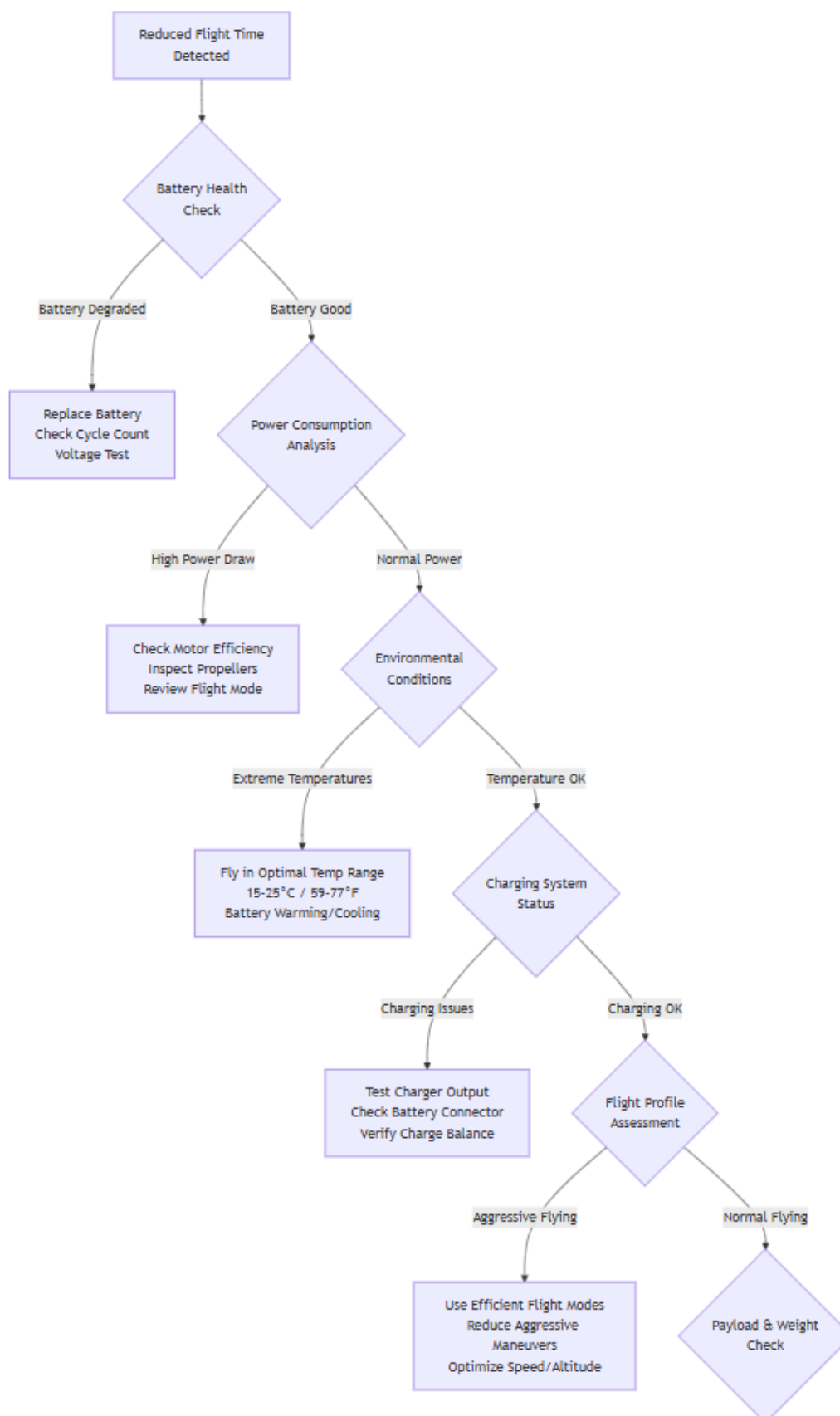
Rysunek 2.4. Schematy blokowe dotyczące rozwiązywania problemów związanych z opóźnieniem sterowania (część 2)



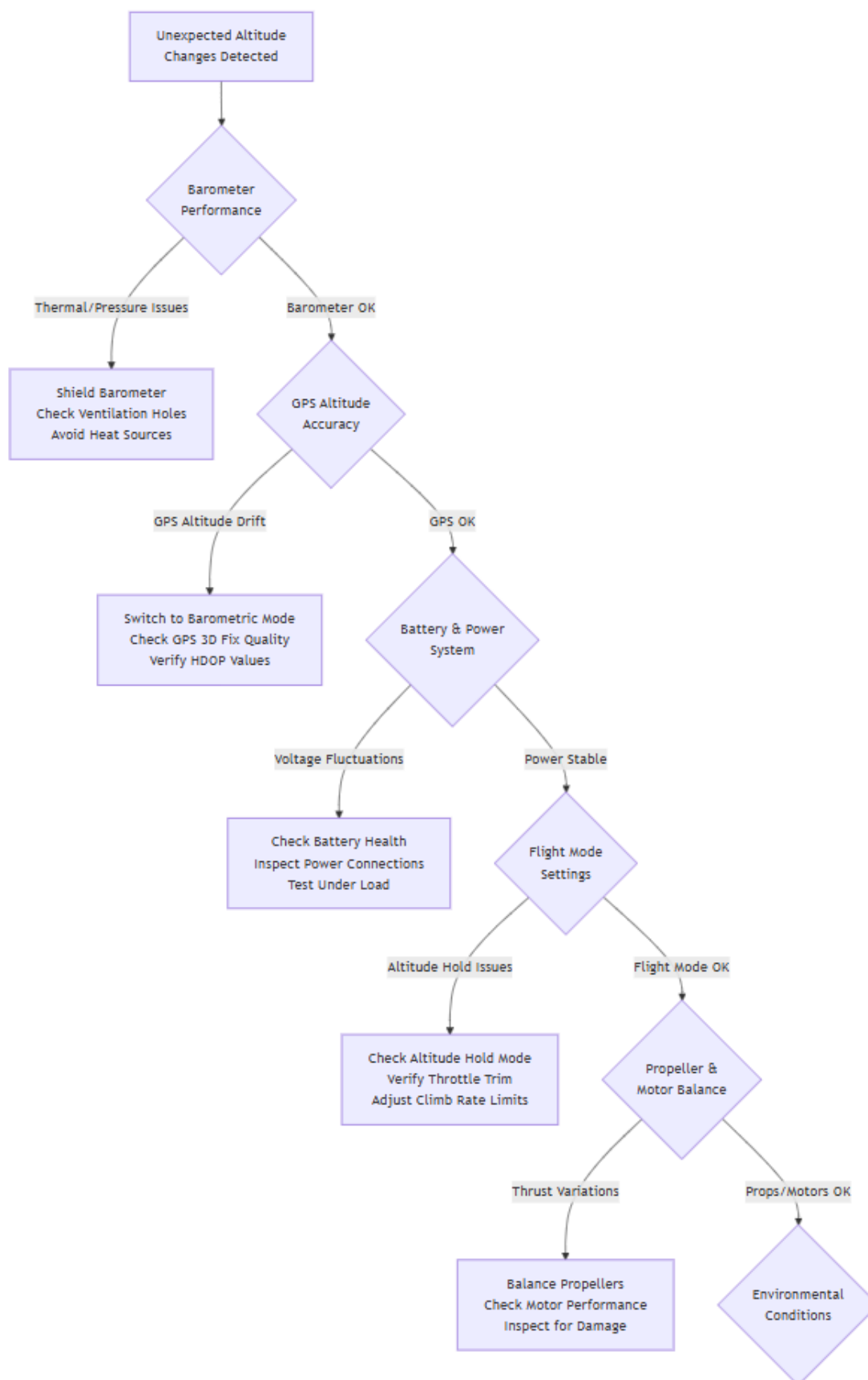
Rysunek 2.5 Schematy blokowe dotyczące rozwiązywania problemów związanych z nadmiernymi drganiami



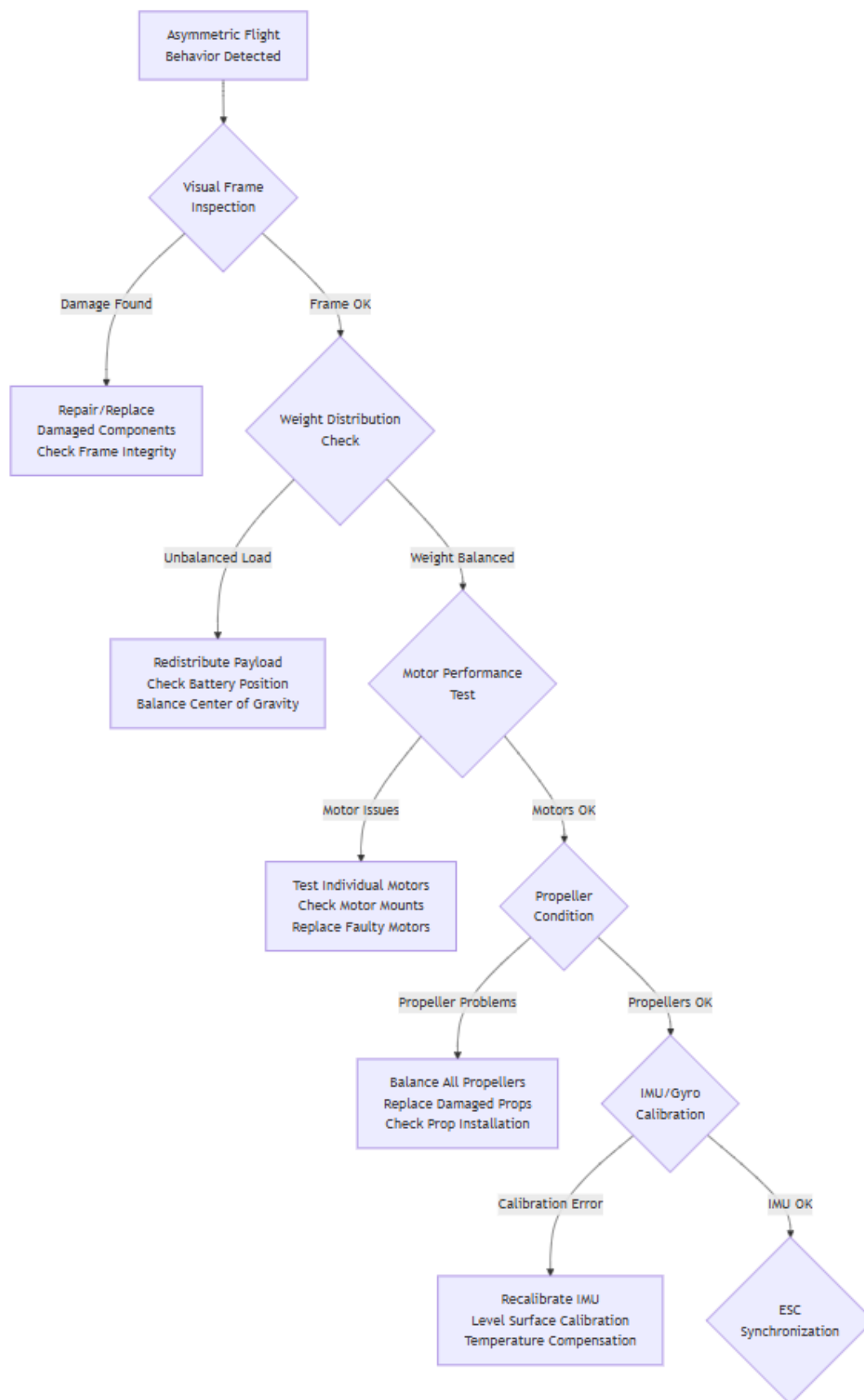
Rysunek 2.6 Schematy blokowe dotyczące rozwiązywania problemów związanych z dryfowaniem podczas zawisu



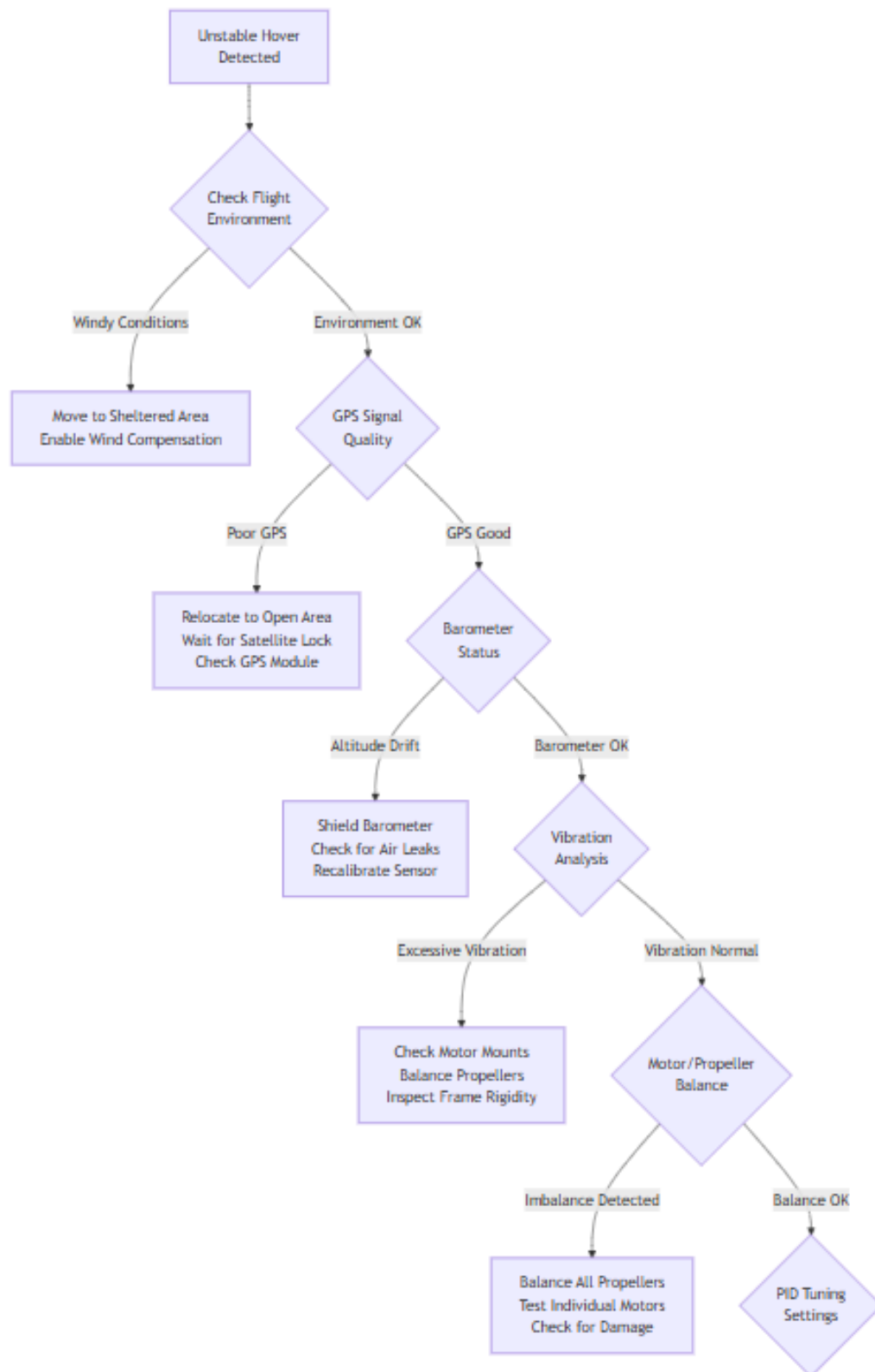
Rysunek 2.7 Schematy blokowe dotyczące rozwiązywania problemów związanych ze skróceniem czasu lotu



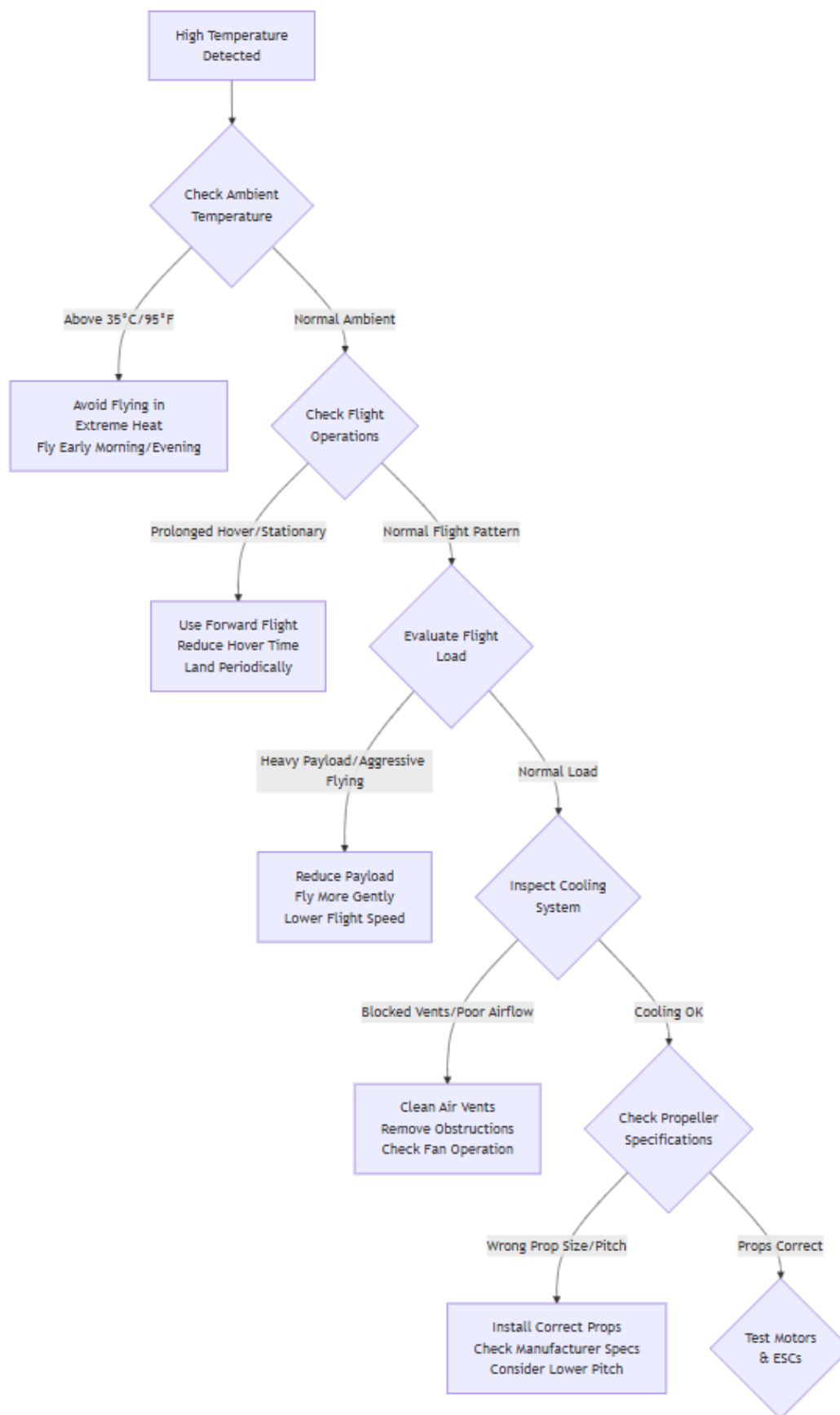
Rysunek 2.8 Schematy blokowe dotyczące rozwiązywania problemów związanych z nieoczekiwanymi zmianami wysokości



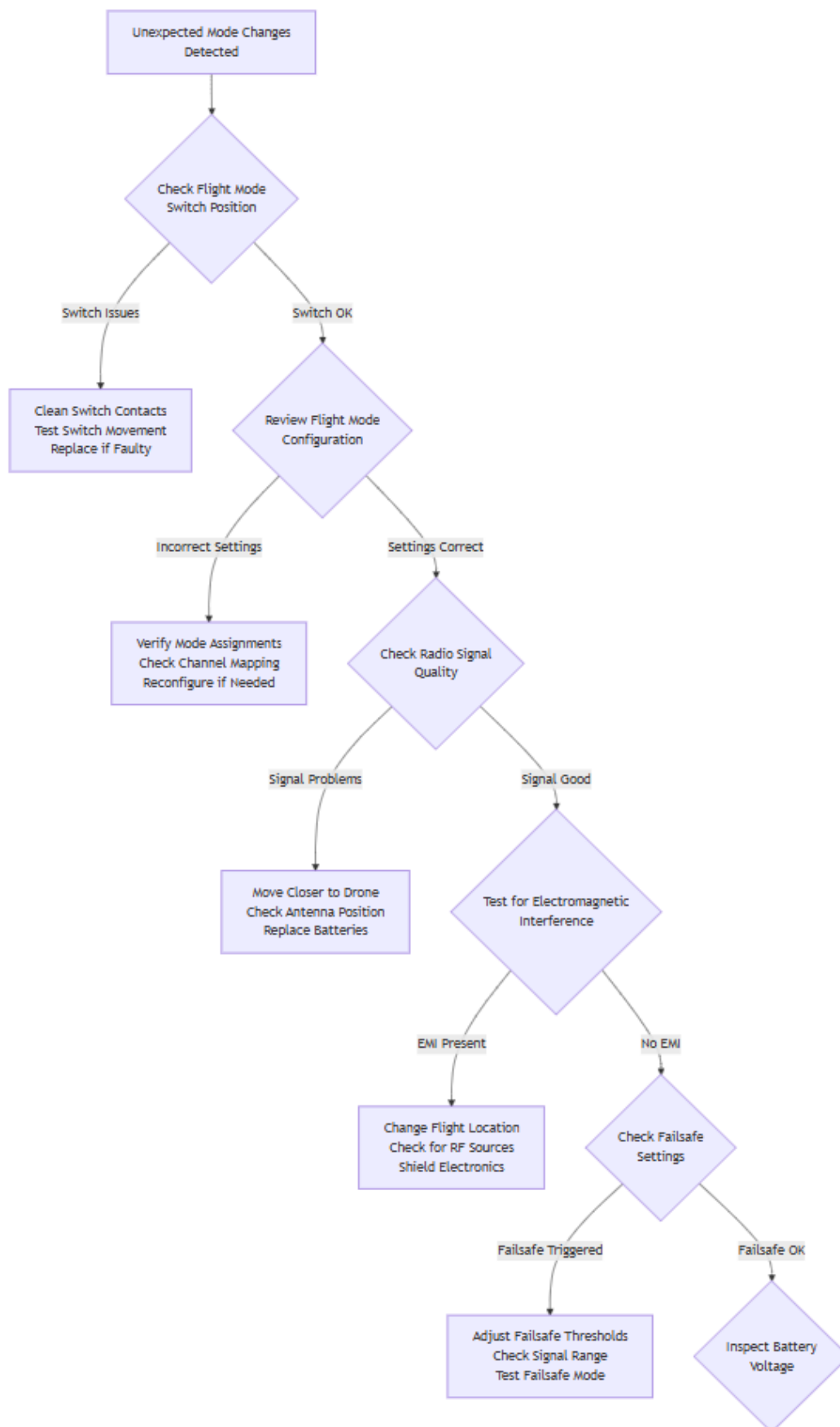
Rysunek 2.9 Schematy blokowe dotyczące rozwiązywania problemów związanych z asymetrycznym zachowaniem podczas lotu



Rysunek 2.10 Schematy blokowe dotyczące rozwiązywania problemów związanych z niestabilnym zawieszem



Rysunek 2.11 Schematy blokowe dotyczące rozwiązywania problemów związanych z wysoką temperaturą



Rysunek 2.12 Schematy blokowe dotyczące rozwiązywania problemów związanych z nieoczekiwaną zmianą trybu

2.6. Kalibracja czujników

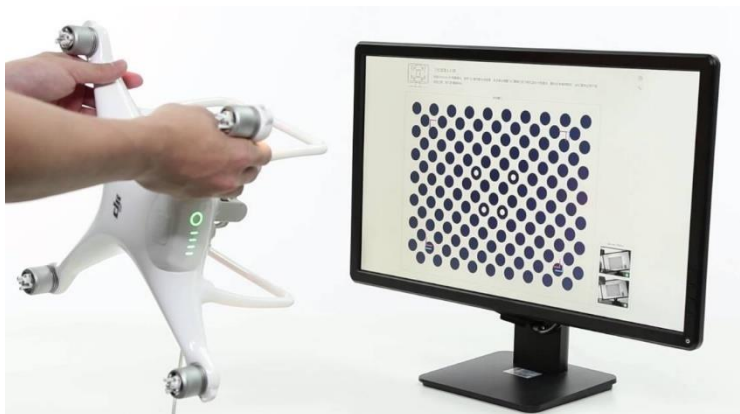
Kalibracja czujników jest niezbędna do zapewnienia dokładnego i bezpiecznego działania systemów dronów. Różne komponenty wymagają kalibracji z różną częstotliwością w zależności od użytkowania i zmian środowiskowych. Na przykład kompas wymaga najczęstszej kalibracji, zwłaszcza po dużych zmianach lokalizacji lub wysokości. IMU musi być ponownie skalibrowane po awariach lub zmianach temperatury. Kalibracja gimbala, nadajnika, czujnika przepływu optycznego, GPS i ESC jest zazwyczaj uruchamiana w przypadku problemów z wydajnością lub zmian sprzętowych.

2.6.1. Procedury kalibracji

Każdy czujnik ma unikalne warunki i wymagania kalibracyjne, takie jak stabilność powierzchni, oświetlenie lub zakłócenia magnetyczne, co sprawia, że rutynowe kontrole mają kluczowe znaczenie dla utrzymania optymalnej funkcjonalności drona. Procedury kalibracji kompasu i czujnika wizyjnego przedstawiono na rysunku 2.13. Tabela 2.22 zawiera szczegółowe informacje na temat procedur kalibracji kompasu, IMU, gimbala, pilota zdalnego sterowania, czujnika wizyjnego i ESC.



Kalibracja kompasu



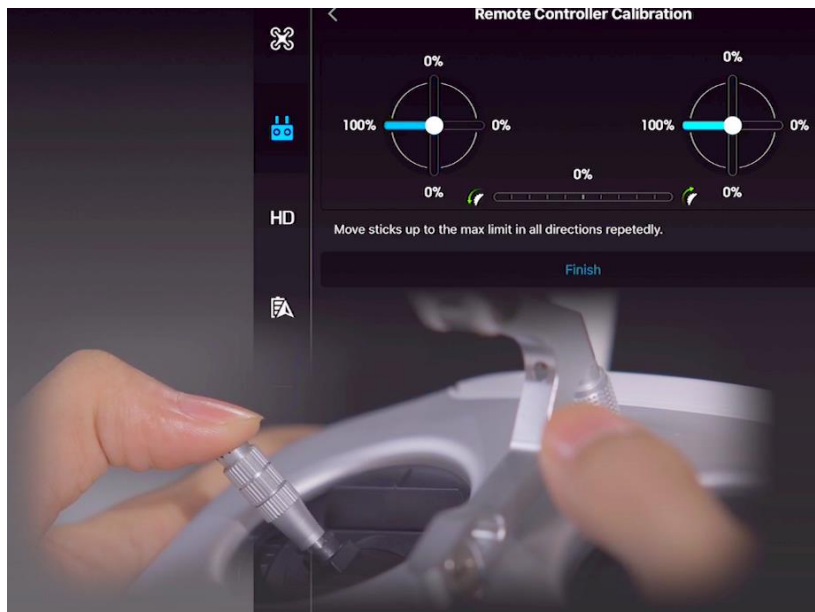
Kalibracja czujnika wizyjnego

Tabela 2.22 Procedury kalibracji kompasu, IMU, gimbała, pilota zdalnego sterowania, czujnika wizyjnego i ESC

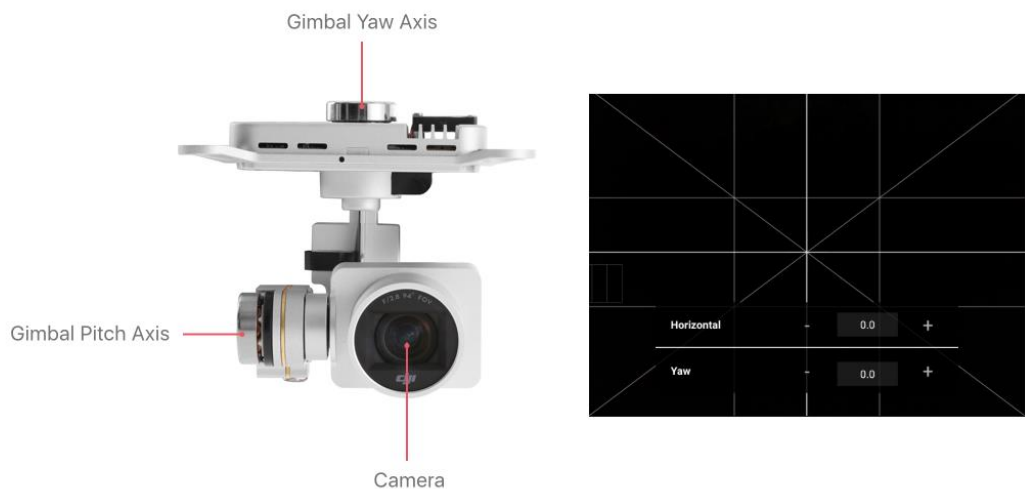
Element	Procedura
Kalibracja kompasu	Trzymaj drona w pozycji poziomej i obróć go o 360°. Trzymaj pionowo (nosem w dół) i obróć o 360°.
Kalibracja IMU	Umieść drona na płaskiej powierzchni. Uruchom kalibrację za pomocą aplikacji. Trzymaj stabilnie i postępuj zgodnie z instrukcjami wyświetlanymi na ekranie.
Kalibracja gimbała	Umieść drona na równej powierzchni. Upewnij się, że ruch gimbała nie jest niczym ograniczony. Dostęp do kalibracji gimbała za pośrednictwem aplikacji. Gimbal wykona pełny zakres ruchów.
Kalibracja pilota zdalnego sterowania	Dostęp do kalibracji za pośrednictwem aplikacji Postępuj zgodnie z instrukcjami dotyczącymi ruchu drążka wyświetlanymi na ekranie.
Kalibracja czujnika wizyjnego	Wybierz dobrze oświetlony obszar o zróżnicowanej fakturze. Trzymaj drona na wysokości około 0,5 m. Powoli poruszaj dronem zgodnie z instrukcjami aplikacji. Utrzymuj stałą wysokość.
Kalibracja ESC	Zdejmij śmigła (ze względów bezpieczeństwa). Podłącz akumulator drona i nadajnik (TX). Włącz nadajnik, ustaw przepustnicę na maksimum. Włącz drona. Po sygnale dźwiękowym zmniejsz przepustnicę do minimum; ESC ponownie wyemitują sygnał dźwiękowy. Wyłącz zasilanie drona, a następnie włącz je ponownie.

Kalibracja czujników jest istotną częścią konfiguracji drona, zapewniającą stabilny lot i dokładne gromadzenie danych. Każdy czujnik wymaga określonej procedury: w celu kalibracji kompasu dron obraca się w poziomie i w pionie; kalibracja IMU polega na umieszczeniu drona na płaskiej powierzchni i postępowaniu zgodnie z instrukcjami aplikacji. Kalibracja gimbała wymaga ustawienia w miejscu bez przeszkód, na równej powierzchni,

umożliwiającej gimbaleowi wykonanie pełnego zakresu ruchów. Procedury kalibracji kontrolera i gimbala przedstawiono na rysunku 2.14.



Kalibracja kontrolera



Kalibracja gimbala

Rysunek 2.14 Kalibracja pilota zdalnego sterowania i gimbala

Kalibracja nadajnika odbywa się za pomocą aplikacji poprzez poruszanie drążkami zgodnie z instrukcją. W przypadku czujników przepływu optycznego dron jest utrzymywany 0,5 metra nad dobrze oświetloną, teksturowaną powierzchnią i poruszany powoli. Kalibracja ESC, która ze względów bezpieczeństwa wymaga demontażu śmigła, polega na ustawieniu poziomów przepustnicy i synchronizacji ESC zgodnie z sygnałami dźwiękowymi. Każdy krok zwiększa dokładność i bezpieczeństwo lotu. W tabeli 2.23 przedstawiono częstotliwość

kalibracji, warunki wyzwalania i podstawowe właściwości komponentów, które często wymagają kalibracji w bezzałogowym statku powietrznym.

2.6.2. Częstotliwość kalibracji, warunki wyzwalania i kluczowe cechy w bezzałogowych statkach powietrznych

Tabela 2.23 Częstotliwość kalibracji, warunki wyzwalania i podstawowe właściwości komponentów, które często wymagają kalibracji w bezzałogowym statku powietrznym

Element	Częstotliwość kalibracji	Warunki uruchomienia	Najważniejsze cechy
COMPASS	Najczęściej Przed każdym lotem lub w razie potrzeby	Zmiana lokalizacji (>50 mil / 80 km) Zmiana wysokości (>1000 ft / 300 m) Zmiany pola magnetycznego Podróż do nowych regionów	Wrażliwość na pole magnetyczne Wymaga otwartej przestrzeni Brak zakłóceń metalowych
IMU	Bardzo częste Co 30 mil (48 km) lub po otrzymaniu ostrzeżenia	Zmiany temperatury Po awariach Długie przechowywanie Alerty systemowe	Zawiera żyroskop, akcelerometr, magnetometr Wymaga stabilnej powierzchni
GIMBAL	Częste W przypadku problemów z wydajnością	Pochylenie horyzontu (>20°) Wibracje/drgania Nierównowaga kamery Błędy stabilizacji	Wymaga poziomej powierzchni Test pełnego zakresu ruchu
PILOT ZDALNEGO STEROWANIA	Średnio częste W przypadku problemów z wiązaniem lub wprowadzaniem danych	Nowe powiązanie kontrolera Jeśli ruchy drążka nie odpowiadają reakcji drona Opóźnienia wejściowe Spadki zasięgu	Kalibracja ruchu drążków Sprawdzenie siły sygnału
CZUJNIK OPTYCZNY	Średnio częste	Gdy soczewka czujnika jest zabrudzona	Wymaga powierzchni z wzorem/teksturą.

	Gdy wykrywanie przeszkód pogarsza się	Lot nad różnymi rodzajami powierzchni (beton, trawa, piasek) Problemy z utrzymaniem pozycji (bez GPS) Gdy zmniejsza się czułość zmiany wysokości	Optymalna wysokość robocza: 0,3–8 metrów. Warunki oświetleniowe mają kluczowe znaczenie.
GPS	Średnio częste Po większych zmianach lokalizacji	Podróże międzykontynentalne Słaby sygnał GPS Awarie RTH Dryf pozycji	Częsta automatyczna kalibracja Zależność od oprogramowania sprzętowego
ESC	Średnio częste Po wymianie silnika/ESC	Zainstalowano nowy ESC/silnik Niespójności przepustnicy Problemy z synchronizacją silnika	Nowoczesne drony radzą sobie z tym za pomocą oprogramowania Regulacja zakresu przepustnicy Sprawdzanie reakcji silnika

Częstotliwość kalibracji różni się w zależności od komponentu i często jest wywoływana przez warunki środowiskowe lub związane z wydajnością. Czujniki magnetyczne wymagają kalibracji przed każdym lotem, zwłaszcza po pokonaniu długich dystansów lub wystąpieniu zmian pola magnetycznego. IMU wymaga bardzo częstych kontroli ze względu na zmiany temperatury, awarie lub alerty, wymagając stabilnej powierzchni. Kalibracja gimbału jest potrzebna, gdy występują problemy ze stabilizacją kamery. Piloty zdalnego sterowania i czujniki przepływu optycznego wymagają kalibracji o średniej częstotliwości, zwłaszcza po zmianach wiązań lub spadku dokładności lotu. GPS i ESC również wymagają ponownej kalibracji po znacznych zmianach lokalizacji lub wymianie sprzętu, chociaż nowoczesne systemy często obsługują częściową autokalibrację.

2.7. Dzienniki lotów

Dzienniki lotów są kluczowym elementem dochodzeń dotyczących dronów, oferując kompleksowy cyfrowy ślad każdej misji. Dostarczają one istotnych informacji na temat zachowania drona, działań pilota, warunków środowiskowych i wydajności systemu. Analiza

tych dzienników obejmuje ustrukturyzowany proces kryminalistyczny, począwszy od zabezpieczenia oryginalnych danych i weryfikacji ich integralności, aż po pozyskanie dzienników z wielu źródeł, takich jak drony, aplikacje lub urządzenia mobilne. Rysunek 2.15 ilustruje najpopularniejsze narzędzia do przeglądania dzienników lotów. Za pomocą specjalistycznych narzędzi, takich jak Mission Planner, PX4 Flight Review i oprogramowanie kryminalistyczne, śledczy badają trasy lotów, dane GPS, systemy zasilania, dokładność czujników i inne elementy. Ta wieloaspektowa analiza pomaga odtworzyć przebieg zdarzeń, ocenić zgodność z przepisami lotniczymi i precyzyjnie zidentyfikować przyczyny źródłowe.



Rysunek 2.15 Narzędzia do przeglądania dzienników lotów

26-etapowy proces podzielono na pięć głównych kategorii: działania przed dochodzeniem i gromadzenie danych, wstępna analiza i weryfikacja danych, czynniki ludzkie i operacyjne, rekonstrukcja zdarzenia i przyczyny oraz raport końcowy i ocena ryzyka (patrz tabele 2.24–2.28).

Tabela 2.24 Etapy przed dochodzeniem i gromadzeniem danych dla dzienników lotów

Wstępne dochodzenie i gromadzenie danych		
Krok	Procedura i parametry	Narzędzia/oprogramowanie

Konfiguracja przed dochodzeniem	Zabezpieczenie łańcucha dowodowego Dokumentowanie oryginalnych plików Utworzenie kopii kryminalistycznych Weryfikacja integralności plików	Narzędzia do generowania skrótów MD5/SHA Blokery zapisu Oprogramowanie do tworzenia obrazów kryminalistycznych
Pobieranie logów	Pobieranie logów z drona/aplikacji/karty SD W razie potrzeby wyodrębnianie danych z urządzeń mobilnych	DJI Assistant 2 Autel Explorer Yuneec DataPilot Mission Planner PX4 Flight Review
Kontrola zgodności z przepisami prawnymi	Ograniczenia przestrzeni powietrznej Zezwolenia na loty Ważność ubezpieczenia	Baza danych lokalnych władz System LAANC Baza danych certyfikatów operatorów

Tabela 2.25 Wstępna weryfikacja i etapy sprawdzania poprawności danych w dziennikach lotów

Wstępna weryfikacja i walidacja danych		
Krok	Procedura i parametry	Narzędzia/oprogramowanie
Wstępna weryfikacja dzienników	Czas trwania lotu	Narzędzia open source (MAVEExplorer)
	Podstawowe parametry	Oprogramowanie producenta
	Komunikaty o błędach	Interfejsy API
	Ostrzeżenia systemowe	dotyczące pogody
	Prędkość/kierunek wiatru	Dane METAR
	Widoczność	Historyczne bazy danych pogodowych
	Temperatura	Planowanie misji
Analiza danych środowiskowych	Wykreślanie współrzędnych GPS	FlytNow
	Analiza trasy lotu	DroneDeploy
Analiza tras lotów i GPS	Sprawdź odchylenia	Google Earth Pro
	Jakość sygnału GPS	Przegląd lotu PX4
	Zmiany wysokości	Wieża, niestandardowe skrypty analityczne
Analiza wysokości i prędkości lotu	Zmiany prędkości	
	Prędkości wznoszenia/opadania	
	Anomalie prędkości lotu	

	Analiza kątów pochylenia, przechyłu i odchylenia	MAVEplorer Planer misji
Analiza położenia i stabilności	Sprawdź, czy nie ma oscylacji i nietypowych ruchów	Skrypty MATLAB/Python
	Napięcie akumulatora	DJI Assistant 2
	Pobór prądu	Narzędzia do analizy baterii
	Zużycie energii	
Analiza systemu zasilania	Warunki termiczne	Niestandardowe pulpity nawigacyjne
	Prędkość obrotowa silnika	Recenzja lotu PX4
	Dane ESC	Planer misji
	Wytwarzana siła ciągu	Oprogramowanie do testowania silników
Analiza silnika i napędu	Wydajność śmigła	Narzędzia MAVLink
	Siła sygnału radiowego	Oprogramowanie do analizy sygnału
	Dane wejściowe sterowania	radiowego
	Dane telemetryczne	Mierniki siły sygnału
Analiza komunikacji i sterowania	Jakość połączenia	Planer misji
	Weryfikacja spójności i dokładności danych IMU, kompasu, barometru i GPS	Narzędzia do kalibracji czujników
Weryfikacja danych z czujników		Skrypty do walidacji danych
	Przegląd trybów autonomicznych, realizacji punktów trasy, wydajności powrotu do bazy	Oprogramowanie do planowania misji
Analiza trybu lotu i automatyzacji		Narzędzia do analizy autopilota
	Wykorzystanie analizy FFT danych z akcelometru	Narzędzia FFT MATLAB/Python
	Sprawdź rezonans i problemy mechaniczne	Oprogramowanie do analizy drgań
Analiza drgań i analiza mechaniczna		Analizatory widma
	Sprawdź działanie gimbału, stabilność kamery, wpływ ciężaru ładunku	Narzędzia do analizy gimbału, Oprogramowanie do stabilizacji obrazu
Analiza ładunku i kamery		Kalkulatory ciężaru/równowagi

Tabela 2.26 Czynniki ludzkie i operacyjne w dziennikach lotów

Czynniki ludzkie i operacyjne		
Krok	Procedura i parametry	Narzędzia/oprogramowanie
Analiza czynników ludzkich	Ocena działań pilotów, podejmowanych decyzji, czasu reakcji, dokumentacji szkoleniowej	Rejestratory danych lotu Dzienniki pilota Bazy danych szkoleń
Analiza geofencingowa i stref zakazu lotów	Weryfikacja zgodności z ograniczeniami przestrzeni powietrznej, skuteczność geofencing	Bazy danych geofencing Mapy przestrzeni powietrznej Narzędzia do weryfikacji NFZ
Analiza zakłóceń elektromagnetycznych	Sprawdź, czy nie ma zakłóceń radiowych, zakłóceń GPS i zakłóceń komunikacyjnych	Analizatory widma Detektory zakłóceń RF Narzędzia do analizy EMI

Tabela 2.27 Rekonstrukcja zdarzeń i etapy ustalania przyczyn na podstawie dzienników lotów

Rekonstrukcja zdarzenia i przyczynowość		
Krok	Procedura i parametry	Narzędzia/oprogramowanie
Rekonstrukcja osi czasu zdarzenia	Stworzenie szczegółowej osi czasu wydarzeń prowadzących do zdarzenia	Oprogramowanie do analizy osi czasu Narzędzia do korelacji zdarzeń Narzędzia do analizy czasowej w medycynie sądowej
Analiza porównawcza	Porównaj z lotami bazowymi, podobnymi incydentami, danymi producenta	Narzędzia do analizy statystycznej Porównawcze bazy danych Analiza trendów
Analiza przyczyn źródłowych	Zastosowanie systematycznych metod dochodzeniowych (5-Why, Fishbone, FMEA)	Oprogramowanie do analizy przyczyn źródłowych Ramy dochodzeniowe

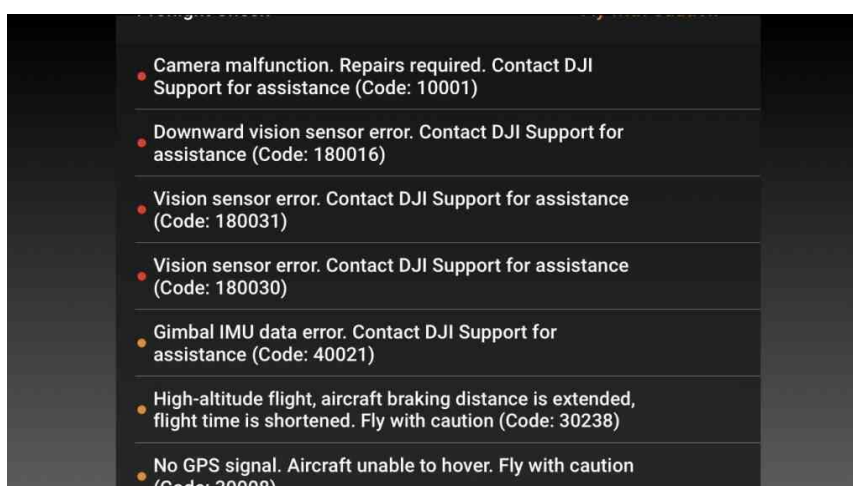
Tabela 2.28 Końcowe etapy raportowania i przeglądu ryzyka dla dzienników lotów

Raportowanie końcowe i przegląd ryzyka		
Krok	Procedura i parametry	Narzędzia/oprogramowanie

Kryminalistyka cyfrowa	Wyodrębnianie danych z urządzeń mobilnych Analiza danych aplikacji Odzyskiwanie usuniętych plików	Cellebrite Oxygen Forensic EnCase Narzędzia do analizy kryminalistycznej urządzeń mobilnych
Analiza zgodności i przepisów	Sprawdź zgodność z przepisami, obowiązki operatora, dokumentację konserwacji	Bazy danych regulacyjnych Listy kontrolne zgodności Ścieżki audytu
Ocena wpływu warunków pogodowych	Analiza wpływu warunków pogodowych na osiągi lotu i podejmowanie decyzji przez pilotów	Narzędzia do analizy warunków pogodowych Dane meteorologiczne Modele wpływu
Ocena ryzyka	Ocena czynników ryzyka, marginesów bezpieczeństwa, identyfikacja zagrożeń	Narzędzia do oceny ryzyka Oprogramowanie do analizy bezpieczeństwa Bazy danych zagrożeń
Dokumentacja dowodów	Dokumentowanie wszystkich ustaleń, tworzenie prezentacji wizualnych, przygotowywanie raportów prawnych	Narzędzia do generowania raportów Systemy zarządzania dowodami, dokumentacja prawna

2.8. Interpretacja kodów błędów

W przypadku wystąpienia problemów w bezzałogowych statkach powietrznych (UAV) systemy wewnętrzne generują kody błędów wskazujące charakter problemu. Zrozumienie i interpretacja tych kodów błędów ma kluczowe znaczenie dla skutecznego rozwiązywania problemów, konserwacji i bezpiecznej eksploatacji. W tej sekcji omówiono różne aspekty interpretacji kodów błędów UAV, w tym ogólne kategorie, kody specyficzne dla poszczególnych marek oraz inne wskaźniki diagnostyczne. Aspekty te obejmują ogólne kategorie kodów błędów dronów, które zapewniają podstawową wiedzę na temat typowych problemów występujących w różnych platformach UAV. Ponadto szczegółowo omówiono kody błędów dronów DJI ze względu na powszechne stosowanie tej marki i unikalny system diagnostyczny. W przypadku platform open source w sekcji tej omówiono kody błędów ArduPilot, oferując wgląd w sposób, w jaki systemy te komunikują usterki. Oprócz kodów tekstowych wzorce diod LED służą jako wizualne wskaźniki stanu drona i błędów, natomiast sygnały dźwiękowe pilota zdalnego sterowania zapewniają wskazówki słuchowe, które pomagają operatorom w szybkiej identyfikacji problemów podczas lotu i reagowaniu na nie. Jak pokazano na rysunku 2.16, systemy DJI wykorzystują szereg kodów błędów.



Rysunek 2.16 Kody błędów DJI

2.8.1. Klasyfikacja i priorytetyzacja błędów

Systematycznie zbieraj wszystkie dostępne informacje o błędach z wielu źródeł. Obejmuje to rejestrowanie dokładnych kodów błędów wyświetlanych na kontrolerze lub stacji kontroli naziemnej, odnotowywanie sekwencji wzorów diod LED i ich czasu trwania, nasłuchiwanie określonych wzorów sygnałów dźwiękowych, sprawdzanie powiadomień w aplikacji mobilnej oraz przeglądanie dzienników lotów, jeśli są dostępne. Dokumentuj sekwencję zdarzeń prowadzących do błędów oraz wszelkie czynniki środowiskowe (pogoda, lokalizacja, źródła zakłóceń). Kompleksowy przegląd typów błędów przedstawiono w tabeli 2.29. Sklasyfikuj błąd według typu systemu (sterowanie lotem, napęd, nawigacja, komunikacja, ładunek) i poziomu ważności. Błędy krytyczne dla lotu, mające wpływ na podstawową stabilność lub sterowanie, mają absolutny priorytet, a następnie błędy nawigacyjne i komunikacyjne, które mają wpływ na powodzenie misji, a następnie błędy związane z ładunkiem i funkcjami ułatwiającymi obsługę. Klasyfikacja ta pomaga określić, czy należy przerwać misję, wdrożyć rozwiązania zastępcze, czy kontynuować z modyfikowanymi procedurami.

Tabela 2.29 Ogólna kategoryzacja błędów

Kategoria	Opis
Błędy silnika/ESC	Silnik nie obraca się, ESC przegrzewa się lub występuje desynchronizacja.
Błędy akumulatora/PDB	Spadek napięcia, przetężenie, zbyt niskie napięcie, bateria nie wykryta.

Błędy komunikacji	Utrata telemetrii, utrata połączenia RC, przekroczenie limitu czasu MAVLink.
Błędy gimbału i kamery	Brak stabilizacji gimbału, przechylenie horyzontu, utrata sygnału z kamery, zniekształcenie obrazu.
Błędy kompasu	Zakłócenia magnetyczne, awaria kalibracji lub niezgodność między kompasami.
Błędy GPS	Słaby/brak sygnału, zła geometria satelitów lub awaria anteny.
Błędy IMU/akcelometru	Błąd kalibracji, dryft czujnika, problemy z temperaturą.
Błędy barometru	Problemy z czujnikiem wysokości, zatkana wentylacja, dryft temperaturowy.
Błędy czujnika wizyjnego	Błąd wykrywania przeszkód, słabe śledzenie powierzchni, zabrudzona lub zablokowana soczewka.
Błędy oprogramowania	Awaria oprogramowania układowego, uszkodzenie parametrów, niezgodna konfiguracja lub awaria uruchamiania systemu.

2.8.2. Kody błędów dronów DJI

Kody błędów DJI są uporządkowane w sekwencji numerycznej, a każdy kod reprezentuje określoną kategorię lub typ problemu. Takie uporządkowane podejście pozwala użytkownikom szybko zidentyfikować i rozwiązać problemy na podstawie numeru kodu. W tabeli 2.30-37 wymieniono kody błędów dronów DJI według klas.

Tabela 2.30 Błędy kamery i karty SD w dronach DJI

Kod błędu	Opis	Możliwe rozwiązanie
1000	Nieprawidłowe działanie kamery	Skalibruj kamerę
10016	Kamera nie jest skalibrowana	Włóż kartę SD
10022	Brak karty SD	Spróbuj ponownie włożyć kartę lub wymień kartę SD
10023	Awaria karty SD	Nie można zawisnąć, lataj ostrożnie

Tabela 2.31 Błędy GPS i barometru dla dronów DJI

Kod błędu	Opis	Możliwe rozwiązanie
3000	Statek powietrzny w trybie położenia	Napraw lub wymień moduł GPS
30007	Brak sygnału GPS	Sprawdź otoczenie, może być konieczna naprawa GPS
30008	Brak sygnału GPS/słaby sygnał	Sprawdź połączenie RC
3004	Nie powiodła się inicjalizacja barometru	Uruchom ponownie samolot lub wymień moduł GPS

30049	Błąd modułu GPS	Skalibruj IMU, może być konieczna naprawa modułu GPS
-------	-----------------	--

Tabela 2.32 Błędy silnika ESC i śmigła w dronach DJI

Kod błędu	Opis	Możliwe rozwiązanie
300	Silnik pracuje na biegu jałowym	Upewnij się, że śruby napędowe nie są zablokowane.
30046	Silnik przeciążony	Usuń nadmierny ładunek.
30047	Niewystarczająca siła/błąd ESC	Sprawdź połączenia silnika i ESC.
30165	Silnik zablokowany	Sprawdź, czy nie ma fizycznych przeszkód.
30168	Osiągnięto maksymalne obciążenie mocy	Unikaj agresywnych manewrów.
30210	Sprzęt systemu zasilania	Uruchom ponownie statek powietrzny. Jeśli problem nie zostanie rozwiązany, zaktualizuj oprogramowanie sprzętowe.

Tabela 2.33 Błędy IMU i kompasu dla dronów DJI

Kod błędu	Opis	Możliwe rozwiązanie
3005	Wymagana kalibracja IMU	Skalibruj IMU w ustawieniach
30055	IMU nie jest skalibrowane	Skalibruj IMU
30060	Błąd kompasu	Usuń metalowe przedmioty, skalibruj kompas
30082	Ograniczona pozycja IMU	Upewnij się, że statek powietrzny jest wypoziomowany

Tabela 2.34 Błędy akumulatora w dronach DJI

Kod błędu	Opis	Możliwe rozwiązanie
3006	Nieprawidłowo zainstalowana bateria	Odłącz i ponownie zainstaluj baterię
30078	Niski poziom naładowania baterii	Sprawdź/naładuj/ogrzej baterię
110002	Przegrzanie baterii	Sprawdź/wymień moduł GPS
110024	Błąd akumulatora – automatyczny powrót do punktu startowego	Przerwij lot, poczekaj, aż bateria ostygnie

Tabela 2.35 Błędy pilota zdalnego sterowania i inne błędy dronów DJI

Kod błędu	Opis	Możliwe rozwiązanie
30029	Pilot zdalnego sterowania odłączony	Uruchom ponownie samolot

30064	Nie można wystartować	Sprawdź ograniczenia obszaru lotu, w razie potrzeby uruchom ponownie
30226	Start nie powiódł się	Sprawdź warunki startu

Tabela 2.36 Błędy gimbała dla dronów DJI

Kod błędu	Opis	Możliwe rozwiązanie
4000	Zablokowany gimbal	Sprawdź, czy pokrywa gimbała została zdjęta, upewnij się, że obraca się swobodnie
40003	Przeciążenie silnika gimbała	Sprawdź, czy gimbal może się swobodnie obracać
40011	Błąd kalibracji gimbała	Uruchom ponownie statek powietrzny
40012	Nie można połączyć gimbała	Wymień gimbal
40021	Błąd danych IMU gimbała	Napraw lub wymień moduł GPS

Tabela 2.37 Błędy czujnika wizyjnego dla dronów DJI

Kod błędu	Opis	Możliwe rozwiązanie
180016	Błąd czujnika wizyjnego skierowanego w dół	Uruchom ponownie drona. Jeśli problem nie zostanie rozwiązany, czujniki wymagają wymiany.
180018	Błąd czujnika widzenia przedniego	Sprawdź/wyczyść czujniki.
180030/31	Błąd czujnika wizyjnego	Uruchom ponownie drona. Jeśli problem nie zostanie rozwiązany, czujniki wymagają wymiany. Skontaktuj się z pomocą techniczną DJI.

2.8.3. Kody błędów ArduPilot

Podczas kontroli przed lotem systemy UAV wyświetlają określone kody ostrzegawcze, aby poinformować użytkowników o potencjalnych problemach związanych z bezpieczeństwem lub konfiguracją. Zrozumienie tych kodów pomaga zapewnić stabilne działanie podczas lotu i zapobiega awariom w powietrzu. W poniższej tabeli wymieniono typowe komunikaty o błędach, ich znaczenie i zalecane działania. Tabela 2.38 zawiera listę często występujących błędów.

Tabela 2.38 Typowe komunikaty o błędach ArduPilot

Komunikaty o błędach	Znaczenie	Działanie
PreArm: Kompas nie jest skalibrowany	Kompas nie jest gotowy	Skalibruj kompas

Odchylenie EKF	Awaria fuzji czujników	Sprawdź IMU/GPS/kompas
Zakłócenie GPS	Nagłe odchylenie sygnału GPS	Sprawdź antenę, przenieś ją w otwarte miejsce
Nieprawidłowe działanie AHRS	Błąd w ocenie położenia	Ponownie skalibruj IMU
Brak odbiornika RC	Brak sygnału z kontrolera	Sprawdź połączenie/połącz kontroler

2.8.4. Metody komunikacji błędów

Metoda interpretacji wzorów LED polega na wykorzystaniu migających świateł. Na przykład szybkie miganie czerwonym światłem może sygnalizować krytyczny błąd, taki jak awaria silnika lub błąd ESC, podczas gdy stałe zielone światło zazwyczaj wskazuje na normalne działanie. Powolne miganie żółtym światłem często oznacza, że GPS nie jest zablokowany lub że konieczna jest kalibracja. Brzęczyki lub głośniki mogą emitować sygnały dźwiękowe, aby ostrzec użytkownika o określonych warunkach lub problemach systemu. Na przykład jeden sygnał dźwiękowy może oznaczać, że bateria jest podłączona, trzy szybkie sygnały dźwiękowe mogą sugerować błąd ESC lub silnika, a ciągły sygnał dźwiękowy może ostrzegać o niskim poziomie naładowania baterii lub aktywacji zabezpieczenia przed awarią. Te sygnały dźwiękowe są cenne podczas kontroli przed lotem lub gdy dron znajduje się poza zasięgiem wzroku, ale nadal w zasięgu słuchu. Aplikacje mobilne, takie jak DJI Fly, wyświetlają komunikaty o błędach w postaci wyskakujących okienek lub powiadomień. Komunikaty te zawierają bezpośrednie, przyjazne dla użytkownika informacje, takie jak „Wymagana kalibracja kompasu”, „Brak sygnału GPS” lub „Bateria na wyczerpaniu – lądowanie”. Oprogramowanie stacji kontroli naziemnej (GCS), takie jak Mission Planner na komputerze stacjonarnym lub tablecie, oferuje alerty oparte na teledzieleniu w czasie rzeczywistym. Mogą one obejmować ostrzeżenia HUD (Heads-Up Display), takie jak „Odchylenie EKF” lub „Zabezpieczenie: uruchomiono RTL”, komunikaty na pasku stanu lub nakładki z kodami kolorystycznymi na mapie na żywo wskazujące lokalizację i charakter problemu. Różne metody wskazywania błędów przedstawiono w tabeli 2.39.

Tabela 2.39 Metody sygnalizacji błędów

Kategoria	Opis
Interpretacja wzorów diod LED	Wykorzystanie migających świateł (zwykle diod LED RGB) w określonych wzorach lub kolorach
Kody dźwiękowe/sygnały dźwiękowe	Brzęczyki lub głośniki wytwarzają wzory dźwiękowe

Komunikaty o błędach w aplikacji mobilnej	Aplikacja mobilna towarzysząca (np. DJI Fly) wyświetla komunikaty tekstowe lub wyskakujące okienka
Alerty stacji kontroli naziemnej	Oprogramowanie GCS (np. Mission Planner) wyświetla alerty oparte na danych telemetrycznych w czasie rzeczywistym.

ROZDZIAŁ 3

Procedury konserwacyjne

3.1. Listy kontrolne przed lotem

Aby zapewnić bezpieczeństwo i optymalną wydajność drona, niezbędne są regularne przeglądy (rysunek 1). Kontrole te pomagają zidentyfikować potencjalne problemy przed lotem i zapobiec ryzyku.

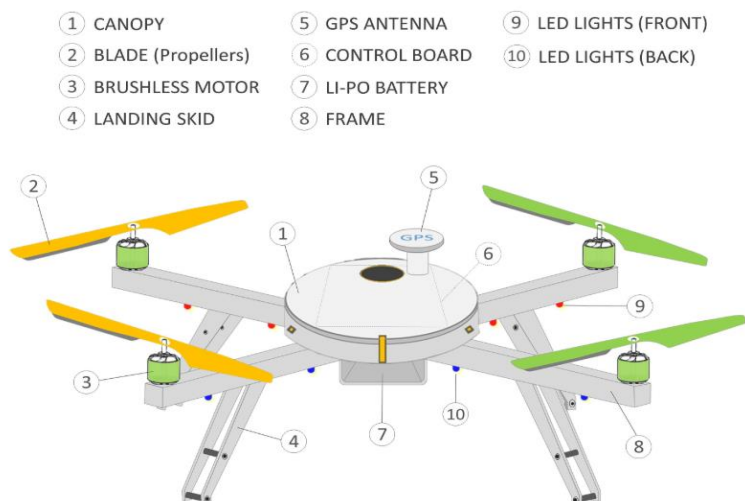
Ramiona drona należy sprawdzić pod kątem pęknięć, wygięć lub osłabień w miejscach połączeń. Ważne jest również sprawdzenie, czy ramiona są prawidłowo zamocowane i czy mechanizm składania lub rozkładania działa prawidłowo, aby uniknąć problemów konstrukcyjnych podczas lotu.

Należy sprawdzić **śmigła** pod kątem zadrapań, odprysków lub deformacji, które mogłyby wpłynąć na stabilność drona. Należy również sprawdzić, czy są one prawidłowo zamontowane (CW/CCW), aby zapobiec nadmiernemu luzowi i zapewnić płynny lot.

Korpus drona należy sprawdzić pod kątem pęknięć, uderzeń lub obecności ciał obcych. Należy upewnić się, że pokrywy są prawidłowo zamknięte, a otwory wentylacyjne są czyste, aby zapobiec gromadzeniu się kurzu i zanieczyszczeń.

Aby zapewnić funkcjonalne i bezpieczne źródło zasilania, przed każdym lotem należy sprawdzić **akumulator**. Zaleca się, aby poziom naładowania akumulatora wynosił co najmniej 70% w przypadku lotów średniej długości i 100% w przypadku lotów długotrwałych.

Aby uniknąć ryzyka, nie wolno używać przegrzanych lub spuchniętych akumulatorów. Ważnymi aspektami, które należy sprawdzić, są bezpieczne zamocowanie akumulatora, mechanizm blokujący oraz czystość złączy. **Stabilność i dokładność** nawigacji zależą od prawidłowego działania czujników



Rysunek 3.1 Elementy składowe drona

i systemu GPS. Czujniki optyczne i ultradźwiękowe należy oczyścić z kurzu lub brudu i zaleca się przetestowanie ich pod kątem wykrywania przeszkód.

System GPS powinien nawiązać połączenie w otwartej przestrzeni, gdzie **dostępnych jest** co najmniej **6–8 satelitów**. Jeśli GPS nie łączy się prawidłowo, może być konieczna ponowna kalibracja kompasu.

Przed użyciem należy **sprawdzić** pilota zdalnego sterowania, **aby upewnić się**, że sygnał jest **stabilny**, a połączenie działa prawidłowo. Drona należy przetestować na wysokości 1–2 metrów pod kątem przechylenia, obrotu, ruchu bocznego i przyspieszenia, sprawdzając, czy reaguje szybko i dokładnie. Funkcje automatyczne, takie jak „Powrót do domu” i tryb zawisu, należy przetestować w bezpiecznych warunkach, aby zapewnić ich sprawne działanie.

3.2. Listy kontrolne po locie

Aby zapewnić prawidłowe działanie i trwałość drona, ważne jest regularne przeprowadzanie kontroli i staranne konserwowanie. Proces ten obejmuje fizyczną kontrolę urządzenia, rejestrowanie incydentów, prawidłowe czyszczenie i ocenę danych lotu.

Szczegółowa kontrola wzrokowa jest niezbędna do wykrycia ewentualnych uszkodzeń. Zaleca się sprawdzenie ramion, śmigieł i korpusu pod kątem oznak zużycia lub uszkodzeń (rysunek 2). Należy również sprawdzić akumulator, aby zapobiec problemom spowodowanym przegrzaniem lub spęgnięciem. Czujniki i kamera powinny być okresowo sprawdzane i czyszczone w celu usunięcia wszelkich osadów brudu, które mogłyby wpływać na działanie drona.



zapobiegają przyszłym incydentom.

Aby zapewnić wydajną i bezpieczną pracę, konieczne jest monitorowanie problemów występujących podczas lotów. Kolizje, utrata sygnału lub inne anomalie powinny być rejestrowane w dzienniku lotów, fizycznym lub cyfrowym. Informacje te pomagają zidentyfikować powtarzające się problemy i

Regularna konserwacja drona polega na usuwaniu kurzu za pomocą miękkiej ściereczki lub delikatnej szczotki. Obiektyw kamery należy

Rysunek 3.2 Kontrola wzrokowa elementów

czyścić ściereczką z mikrofibry i specjalnym roztworem czyszczącym, aby zachować klarowność obrazu. Trudno dostępne miejsca można czyścić małą, miękką szczotką, aby usunąć zanieczyszczenia.

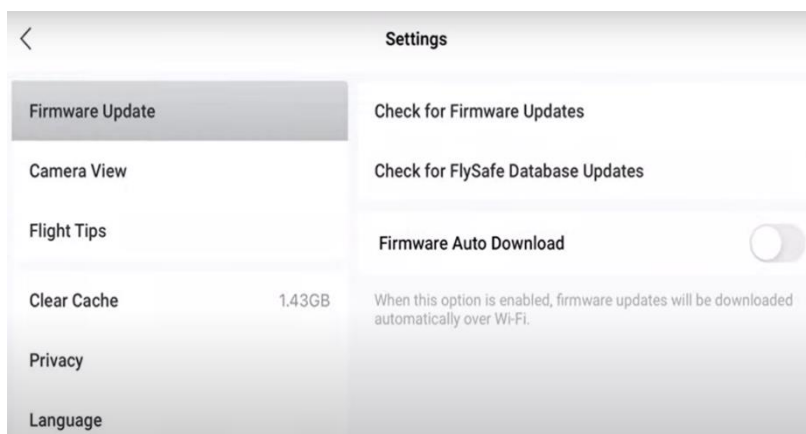
Analiza trasy, wysokości i prędkości drona dostarcza cennych informacji na temat jego działania. Identyfikacja anomalii i zapisywanie danych lotu pomaga zoptymalizować wykorzystanie urządzenia i zapobiegać błędom.

Aby utrzymać drona w optymalnym stanie, kontrole należy przeprowadzać w bezpiecznym środowisku. Zaleca się zapoznanie się z instrukcją obsługi urządzenia w celu poznania szczegółowych wymagań i unikanie używania drona w przypadku wykrycia jakichkolwiek problemów.

3.3. Aktualizacja oprogramowania układowego

Aktualizacje oprogramowania układowego są niezbędnym krokiem w utrzymaniu wydajności, bezpieczeństwa i stabilności działania drona (rysunek 3). Oprogramowanie układowe to wewnętrzne oprogramowanie, które kontroluje działanie wszystkich elementów, od silników i czujników po system GPS i połączenia zdalnego sterowania. Aby uniknąć błędów operacyjnych lub luk w zabezpieczeniach, zaleca się regularną aktualizację oprogramowania układowego drona przy użyciu oficjalnych metod dostarczonych przez producenta.

Pierwszym krokiem w procesie aktualizacji jest sprawdzenie aktualnej wersji zainstalowanego oprogramowania układowego. W tym celu dron musi być podłączony do aplikacji producenta, takiej jak DJI Fly, Autel Explorer lub dedykowanego oprogramowania,



Rysunek 3.3 Aktualizacja oprogramowania układowego

takiego jak DJI Assistant 2. Informacje o wersji oprogramowania układowego drona, pilota zdalnego sterowania i akumulatorów można zazwyczaj znaleźć w sekcji „Ustawienia” lub „Informacje” aplikacji. Zidentyfikowaną wersję należy

porównać z najnowszą dostępną wersją na oficjalnej stronie internetowej producenta, aby ustalić, czy aktualizacja jest konieczna.

Po ustaleniu konieczności aktualizacji następnym krokiem jest pobranie odpowiedniego pliku oprogramowania układowego dla danego modelu drona. Pobieranie powinno odbywać się wyłącznie z oficjalnej strony internetowej producenta lub z powiązanej aplikacji mobilnej. Ważne jest, aby sprawdzić zgodność pobranego pliku (np. rozszerzenia plików, takie jak .bin lub .zip), aby uniknąć problemów z instalacją lub niezgodności.

Istnieje kilka metod aktualizacji oprogramowania sprzętowego drona, w zależności od modelu i producenta.

Korzystając z aplikacji mobilnej, aktualizację można łatwo przeprowadzić, łącząc drona przez Wi-Fi, Bluetooth lub kabel USB. Aplikacja powiadomi użytkownika o dostępności nowej wersji i automatycznie poprowadzi proces pobierania i instalacji. Podczas aktualizacji ważne jest, aby nie odłączać żadnego z podłączonych urządzeń.

Aktualizacje oprogramowania układowego za pomocą komputera są wykonywane poprzez podłączenie drona do komputera stacjonarnego lub laptopa za pomocą kabla USB i użycie oficjalnego oprogramowania producenta. Procedura polega na pobraniu pliku oprogramowania układowego i zainicjowaniu aktualizacji zgodnie z instrukcjami oprogramowania. W przypadku niektórych modeli istnieje również możliwość aktualizacji poprzez umieszczenie pliku oprogramowania układowego na karcie microSD, co jest metodą często stosowaną w przypadku dronów przemysłowych lub specjalistycznych, takich jak Flyability Elios 2. W przypadku dronów kompatybilnych z protokołem DroneCAN użytkownicy mogą korzystać z narzędzi takich jak DroneCAN GUI lub Mission Planner do aktualizacji oprogramowania układowego.

Po zakończeniu procesu dron uruchomi się ponownie automatycznie, a użytkownik musi sprawdzić poprawność instalacji, ponownie uruchamiając aplikację lub oprogramowanie. Zaleca się, aby po każdej aktualizacji przeprowadzić lot testowy w bezpiecznym miejscu, aby potwierdzić prawidłowe działanie sprzętu.

Aktualizacje oprogramowania układowego można przeprowadzać za pomocą aplikacji mobilnych, takich jak DJI Fly, Autel Explorer lub Parrot FreeFlight, dostępnych zarówno na platformy iOS, jak i Android. Zaletą korzystania z aplikacji mobilnych jest ich przyjazny dla

użytkownika interfejs i szybki dostęp do aktualizacji, ale wymagają one stabilnego połączenia internetowego, poziomu naładowania baterii co najmniej 50% i wystarczającej ilości miejsca na urządzeniu.

Alternatywnie, oprogramowanie komputerowe, takie jak DJI Assistant 2 lub Mission Planner, zapewnia większą stabilność podczas złożonych aktualizacji, umożliwiając efektywne zarządzanie plikami oprogramowania układowego. Metoda ta wymaga połączenia USB, dostępu do Internetu oraz wcześniejszej instalacji aplikacji na komputerze. W przypadku niektórych modeli dodatkowym rozwiązaniem do aktualizacji może być karta microSD.

Aby zapobiec przerwaniu procesu lub wystąpieniu błędów, należy upewnić się, że baterie drona, pilota zdalnego sterowania i urządzenia używanego do aktualizacji są naładowane do co najmniej 50%, a najlepiej do 100%. Jeśli oprogramowanie układowe baterii wymaga oddzielnych aktualizacji, należy je wykonać przed użyciem drona.

Zaleca się wykonanie kopii zapasowej ustawień drona (niestandardowe tryby lotu, kalibracje) na karcie microSD, komputerze lub w chmurze. Podczas aktualizacji należy unikać zakłóceń Wi-Fi, a używane połączenia USB powinny być kompatybilne i w dobrym stanie. Dodatkowo, zdjęcie śmigieł drona i tymczasowe wyłączenie oprogramowania antywirusowego na komputerze może pomóc zminimalizować ryzyko błędów.

Po aktualizacji należy przetestować **wszystkie podstawowe funkcje drona** (lot, kamera, czujniki). W razie potrzeby przed wznowieniem normalnej pracy należy przeprowadzić ponowną kalibrację kompasu, inercyjnego układu pomiarowego (IMU) lub gimbału kamery.

W przypadku częstego lub profesjonalnego użytkowania dronów zaleca się comiesięczne sprawdzanie dostępności aktualizacji oprogramowania układowego. Użytkownikom sporadycznym zazwyczaj wystarczą kontrole przeprowadzane co kwartał. Krytyczne aktualizacje, zwłaszcza te, które naprawiają problemy związane z bezpieczeństwem, należy instalować natychmiast po ich udostępnieniu. Przed każdą ważną misją lub specjalistycznym lotem zaleca się przeprowadzenie pełnego testu sprzętu. Dla dodatkowego bezpieczeństwa wskazane jest zachowanie poprzednich wersji oprogramowania układowego, o ile producent na to pozwala.

3.4. Pielęgnacja baterii

W tej sekcji przedstawiono podstawowe zalecenia dotyczące prawidłowego ładowania, rozładowywania i przechowywania akumulatorów LiPo, mające na celu przedłużenie ich żywotności i zapobieganie ryzyku uszkodzenia lub pożaru.

- **Aby zmaksymalizować wydajność i żywotność akumulatorów LiPo**, należy przestrzegać odpowiednich zasad podczas procesu ładowania i rozładowywania (rysunek 4).

Aby uniknąć uszkodzenia akumulatora, zaleca się stosowanie wyłącznie ładowarek zatwierdzonych przez producenta, takich jak ładowarki DJI lub Autel. Ładowanie powinno odbywać się przy prądzie 1C (np. 5 A dla akumulatora 5000 mAh), unikając częstego szybkiego ładowania, które może skrócić żywotność ogniw.



Rysunek 3.4 Akumulator LiPo

- **Proces ładowania należy przeprowadzać** w dobrze wentylowanym pomieszczeniu w temperaturze od 15 do 25°C, a po osiągnięciu 100% naładowania należy odłączyć akumulator.
- **Aby zapobiec uszkodzeniu ogniw**, bateria nie powinna być rozładowywana poniżej 20–25%. Jeśli bateria osiągnie krytyczny poziom (10–15%), zaleca się natychmiastowe ładowanie. Po każdym locie należy sprawdzić poziom naładowania baterii za pomocą dedykowanej aplikacji lub wskaźników LED na baterii.
- Aby zoptymalizować żywotność akumulatora, zaleca się stosowanie **cykli częściowego rozładowania, np. 30–40%**. Jeśli akumulator nie będzie używany przez dłuższy czas, co kilka tygodni należy przeprowadzać kontrolowany cykl.
- **Aby zapobiec awariom i zagrożeniom pożarowym**, akumulatory należy zawsze ładować na niepalnych powierzchniach, takich jak ognioodporne torby LiPo. Jeśli temperatura akumulatora przekroczy 45°C podczas ładowania, proces należy natychmiast przerwać. Podczas lotu należy unikać eksploatacji drona w ekstremalnych temperaturach (<0°C lub >40°C), a pomiędzy wymagającymi lotami zaleca się 10–15-minutowy okres chłodzenia.
- **Aby zapewnić długotrwałą sprawność akumulatorów**, należy je przechowywać przy poziomie naładowania 50–60% (3,8–3,85 V na ogniwo) (rysunek 5). Należy

unikać przechowywania ich w stanie całkowicie naładowanym lub całkowicie rozładowanym. Miejsce przechowywania powinno być suche, o temperaturze 15–25°C, z dala od wilgoci i kurzu. Poziom naładowania akumulatorów należy sprawdzać co 2–3 miesiące, a co 6 miesięcy zaleca się przeprowadzenie pełnego cyklu ładowania i rozładowania.

- **Akumulator LiPo może zazwyczaj wytrzymać od 200 do 300 pełnych cykli ładowania**, a cykle częściowe mogą potencjalnie wydłużyć żywotność do 400–500 użyć. Pojemność akumulatora zwykle spada o 20–30% po około dwóch latach. Oznaki zużycia obejmują skrócony czas lotu, pęcznienie, wycieki i przegrzanie. Stan baterii można monitorować za pomocą aplikacji producenta, takiej jak funkcja „Battery Health” w DJI Fly. W przypadku poważnego zużycia baterie należy wymienić na oryginalne modele, unikając zamienników innych producentów.

3.5. Rodzaje konserwacji

Aby zapewnić optymalne działanie drona, konieczne jest przyjęcie odpowiedniej strategii konserwacji. Może to być konserwacja naprawcza, zapobiegawcza lub predykcyjna, z których każda pełni określoną rolę w utrzymaniu i ochronie urządzenia.

- **Konserwacja korygująca** polega na naprawie drona po wykryciu usterki i jest reaktywnym podejściem do problemów, takich jak uszkodzone śmigła, wadliwe silniki lub błędy oprogramowania. Typowe przykłady obejmują wymianę uszkodzonych śmigieł, naprawę silników, które wydają nietypowe dźwięki, ponowną kalibrację lub wymianę wadliwych czujników, naprawę ramy po twardym lądowaniu oraz ponowną instalację oprogramowania układowego w celu usunięcia błędów. Procedury zazwyczaj obejmują użycie aplikacji producenta do identyfikacji kodów błędów, zapoznanie się z instrukcją obsługi drona, skontaktowanie się z autoryzowanym centrum serwisowym w przypadku złożonych napraw oraz używanie wyłącznie oryginalnych części. Główną zaletą tego podejścia jest szybkie rozwiązywanie problemów, jednak wiąże się ono z wyższymi kosztami i nie zapobiega wystąpieniu nowych awarii.
- **Konserwacja zapobiegawcza** koncentruje się na zapobieganiu awariom przed ich wystąpieniem poprzez regularne kontrole. Ten rodzaj planowej weryfikacji jest niezbędny dla częstych lub profesjonalnych użytkowników. Przykłady obejmują kontrolę zużycia śmigieł, czyszczenie czujników i kamer, sprawdzanie kabli pod kątem korozji, kalibrację kompasu, IMU i gimbała oraz monitorowanie stanu baterii.

Harmonogram konserwacji zapobiegawczej może obejmować codzienne kontrole wzrokowe (śmigła, rama, czujniki), cotygodniowe szczegółowe czyszczenie i sprawdzanie połączeń, comiesięczną kalibrację czujników i monitorowanie baterii oraz kwartalne kontrole silników i aktualizacje oprogramowania układowego. Zalety tego podejścia obejmują zmniejszenie ryzyka awarii i wydłużenie żywotności drona, chociaż jego skuteczne wdrożenie wymaga czasu i dyscypliny.

- **Konserwacja predykcyjna** to zaawansowana metoda, która przewiduje awarie poprzez analizę danych zebranych przez drona. Opiera się ona na dziennikach lotów i czujnikach w celu wykrywania zużycia i jest idealna dla profesjonalnych flot lub krytycznych misji. Przykłady zastosowań obejmują monitorowanie cykli i temperatur baterii, analizę drgań silnika, wykrywanie nietypowych wzorców w dziennikach lotów oraz wykorzystanie sztucznej inteligencji do formułowania konkretnych zaleceń. Technologie wykorzystywane w tym zakresie obejmują specjalistyczne oprogramowanie, takie jak AirData UAV, DJI FlightHub i DroneLogbook, zintegrowane czujniki do monitorowania w czasie rzeczywistym oraz przetwarzanie w chmurze do zarządzania flotą. Metoda ta jest stosowana głównie w środowiskach profesjonalnych, rzadziej w użytku indywidualnym. Jej zalety obejmują optymalizację kosztów i skrócenie czasu przestoju, ale wdrożenie może być kosztowne i wymaga zaawansowanej wiedzy technicznej.

3.6. [Harmonogramy konserwacji](#)

Aby utrzymać drona w optymalnym stanie technicznym, ważne jest wprowadzenie regularnego programu konserwacji. Konserwacja ta może mieć charakter naprawczy, zapobiegawczy lub predykcyjny, a częstotliwość każdego rodzaju kontroli zależy od użytkowania i specyficznych cech urządzenia.

Tabela 3.1 Częstotliwość konserwacji dronów

Częstotliwość	Konserwacja naprawcza	Konserwacja zapobiegawcza	Konserwacja predykcyjna
Codziennie	Sprawdzanie kodów błędów po każdym locie za pomocą dedykowanych aplikacji.	Kontrola wzrokowa śmigieł, ramy i czujników. Sprawdzanie	Monitorowanie dzienników lotów pod kątem natychmiastowych

	Naprawianie drobnych usterek, takich jak uszkodzone śmigła lub luźne śruby.	poziomu naładowania baterii i szybkie czyszczenie elementów optycznych.	błędów. Ocena stanu baterii za pomocą specjalistycznych aplikacji.
Cotygodniowe	Naprawa lub wymiana uszkodzonych elementów, w tym silników i czujników. Ponowna instalacja oprogramowania układowego w przypadku powtarzających się błędów.	Dokładne czyszczenie drona, sprawdzanie połączeń pod kątem zużycia, testowanie podstawowych funkcji, takich jak lot i działanie kamery.	Analiza dzienników lotów w celu wykrycia nietypowych wzorców, takich jak drgania silnika. Monitorowanie cykli ładowania akumulatora.
Co miesiąc	Naprawa głównych komponentów, takich jak płyta główna, w autoryzowanym centrum serwisowym. Przywracanie ustawień z kopii zapasowej w przypadku wystąpienia problemów z oprogramowaniem sprzętowym.	Kalibracja kompasu, IMU i gimbała. Sprawdzanie stanu baterii i eliminowanie potencjalnych usterek. Aktualizacja oprogramowania układowego.	Analiza danych lotu w celu identyfikacji zużycia komponentów. Generowanie raportów prognostycznych w celu optymalnego planowania konserwacji.
Rocznie	Wymiana kluczowych komponentów, takich jak silniki lub baterie. Przeprowadzenie całkowitego przeglądu w autoryzowanym centrum serwisowym.	Szczegółowa kontrola elementów wewnętrznych. Zapobiegawcza wymiana zużytych śmigieł i weryfikacja zgodności z	Ocena długoterminowej wydajności poprzez analizę danych historycznych. Planowanie wymiany komponentów, takich jak baterie po 200–

	obowiązującymi przepisami.	300 użytkowania.	cyklach
--	----------------------------	---------------------	---------

Ważne uwagi

- **Konserwacja naprawcza** jest wykonywana tylko w przypadku wystąpienia awarii, a jej częstotliwość zależy od napotkanych incydentów.
- **Konserwacja zapobiegawcza** jest niezbędna w przypadku wszystkich dronów i musi być przeprowadzana zgodnie z regularnym harmonogramem.
- **Konserwacja predykcyjna** jest idealnym rozwiązaniem dla profesjonalnych flot i jest wdrażana przy użyciu zaawansowanych narzędzi programowych.
- **Częstotliwość** powinna być dostosowana do specyfikacji producenta i sposobu użytkowania drona – czy to w celach rekreacyjnych, czy przemysłowych.

3.7. [Procedury czyszczenia i ochrony](#)

3.7.1. [Właściwe czyszczenie i ochrona drona](#)

Aby utrzymać drona w optymalnym stanie, niezbędne jest jego prawidłowe czyszczenie przy użyciu odpowiednich materiałów i przestrzeganie środków ostrożności dotyczących wrażliwych elementów.

W przypadku powierzchni zewnętrznych, soczewek i czujników zaleca się stosowanie ściereczek z mikrofibry, które nie pozostawiają włókien i nie są ścierne. Przykładami skutecznych produktów są Amazon Basics i 3M Microfiber. Aby zapobiec uszkodzeniom, na ściereczkę — a nie bezpośrednio na drona — należy nanieść nieściernie roztwory, takie jak alkohol izopropylowy (70–90%) lub specjalne środki do czyszczenia soczewek (np. Zeiss). Sprężone powietrze, używane z odległości 10–15 cm, pomaga usunąć kurz z otworów wentylacyjnych i silników. Miękkie szczotki, takie jak antystatyczne szczotki LensPen, są idealne do czyszczenia czujników i silników. Spraye ochronne, takie jak H₍₂₎ oNano Coating, można nakładać na powierzchnie zewnętrzne, unikając kontaktu z czujnikami i soczewkami.



Rysunek 3.5 Czyszczenie czujników

Czyszczenie czujników optycznych, ultradźwiękowych i LiDAR należy wykonywać suchą ściereczką z mikrofibry lub alkoholem izopropylowym, unikając nadmiernego nacisku i płynów, które mogą przedostać się do elementów wewnętrznych. Silniki należy czyścić sprężonym powietrzem i miękkimi szczotkami, bez ręcznego obracania ich, aby zapobiec zużyciu mechanicznemu. Szczególną uwagę należy zwrócić na obiektywy kamer i gimballi, które należy czyścić ściereczkami z mikrofibry i płynami do czyszczenia obiektywów, unikając ręcznego poruszania gimbałem. Porty i złącza należy odkurzać sprężonym powietrzem lub delikatnymi szczotkami, unikając stosowania płynów.

Aby zapobiec uszkodzeniu drona, należy unikać kontaktu z wodą, która może powodować korozję i zwarcia, z wyjątkiem modeli wodoodpornych, takich jak DJI Matrice 30. Nie wolno używać substancji żrących, takich jak detergenty, aceton, amoniak i chlor. Strumienie wody pod ciśnieniem i odkurzacze mogą uszkodzić delikatne elementy, a nadmierne użycie płynów może pogorszyć działanie czujników i płyt elektronicznych. Czyszczenie drona należy zawsze wykonywać przy wyłączonym urządzeniu i wyjętej baterii przed podjęciem jakichkolwiek działań.

3.7.2. Czyszczenie drona można dostosować w zależności od kontekstu użytkowania:

- **W terenie:** Przeznaczone do szybkiego czyszczenia po locie przy użyciu przenośnych narzędzi, takich jak ściereczki z mikrofibry, miękkie szczotki, sprężone powietrze i alkohol izopropylowy. Procedury obejmują wyłączenie drona, wyjęcie baterii, odłączenie śmigieł, użycie sprężonego powietrza do silników i czujników, czyszczenie soczewek i czujników mikrofibrą oraz przeprowadzenie ogólnej kontroli ramy. Środki ostrożności obejmują unikanie narażenia na działanie wiatru i kurzu, minimalizowanie użycia płynów oraz przechowywanie drona w ochronnej walizce transportowej.

- **W warsztacie:** Szczegółowe czyszczenie zapewnia długotrwałą ochronę. Narzędzia obejmują ściereczki z mikrofibry, 90% alkohol izopropylowy, sprężone powietrze o większej mocy, szczotki antystatyczne i spraye ochronne. Procedury obejmują odłączenie baterii, zdjęcie śmigieł, rozłożenie ramy (jeśli pozwala na to producent), czyszczenie silników, otworów wentylacyjnych i portów, nałożenie sprayu ochronnego na powierzchnie zewnętrzne, ponowne złożenie drona i przetestowanie jego działania. Środki ostrożności obejmują korzystanie z czystego środowiska pracy, unikanie nieautoryzowanego demontażu i stosowanie narzędzi antystatycznych.

3.8. Przewidywana żywotność komponentów

3.8.1. Żywotność komponentów i kryteria wymiany

Aby zapewnić długotrwałą funkcjonalność drona, konieczne jest planowanie konserwacji i określenie optymalnego czasu wymiany zużytych komponentów. Żywotność tych części zależy od użytkowania, warunków lotu i regularnej konserwacji.

Tabela 3.2 Szacowana żywotność

Element	Szacowana żywotność	Kryteria wymiany
Śmigła	100–200 godzin lotu / 6–12 miesięcy	Obecność pęknięć, odprysków, nietypowych wibracji lub utrata stabilności lotu.
Akumulatory (LiPo)	200–300 cykli / 1–3 lata	Pojemność poniżej 70%, pęcznienie, wyciek lub błędy zgłaszane przez aplikację.
Silniki	500–1000 godzin lotu / 2–5 lat	Nieprawidłowe odgłosy, wibracje, przegrzanie lub zużycie łożysk.
ESC (elektroniczne regulatory prędkości)	1000–2000 godzin lotu / 3–7 lat	Awarie silników, przegrzanie lub uporczywe błędy oprogramowania.
Sterowniki	3–5 lat / Zużycie fizyczne	Słaba bateria, nie reagujące przyciski lub joysticki, częste rozłączenia.

3.8.2. Czynniki wpływające na żywotność komponentów:

- **Śmigła:** materiał (tworzywo sztuczne lub włókno węglowe), narażenie na kurz, uderzenia lub trudne warunki wpływają na trwałość.
- **Baterie:** Częste cykle pełnego ładowania i niewłaściwe przechowywanie mogą znacznie skrócić żywotność baterii.
- **Silniki:** Silniki bezszczotkowe są trwalsze, ale praca w ekstremalnych warunkach zwiększa zużycie.
- **ESC:** Skoki napięcia i wysokie temperatury przyspieszają zużycie, a awarie mogą potencjalnie wpływać na wiele silników jednocześnie.
- **Sterowniki:** zużycie fizyczne i niezgodność z aktualizacjami oprogramowania układowego mogą wpływać na wydajność.

Aby zapobiec awariom i utrzymać optymalną wydajność drona, należy przestrzegać następujących kryteriów:

- **Kontrola wizualna i funkcjonalna:** Przed każdym lotem należy sprawdzić śmigła pod kątem pęknięć, a baterie pod kątem spęcznienia lub wycieków. Silniki i ESC należy monitorować pod kątem nietypowych odgłosów i przegrzania, a kontrolery należy testować pod kątem responsywności joysticka i stabilności połączenia.
- **Spadek wydajności:** Jeśli czas lotu spadnie poniżej 70%, stabilność ulegnie pogorszeniu lub sterowanie dronem stanie się nieprecyzyjne, zaleca się wymianę komponentów.
- **Raporty oprogramowania:** Specjalistyczne aplikacje (np. AirData UAV) mogą wskazywać zużycie baterii, degradację silnika lub inne krytyczne błędy.
- **Zużycie fizyczne:** Wszelkie widoczne uszkodzenia, takie jak wyszczerbione śmigła lub spuchnięte akumulatory, wymagają natychmiastowej wymiany.
- **Zalecenia producenta:** Należy przestrzegać odstępów czasu określonych w instrukcji, takich jak wymiana śmigieł co 200 godzin lotu, i zawsze używać oryginalnych części.
- **Warunki specjalne:** Drony używane intensywnie lub w trudnych warunkach (pył, wilgoć) wymagają częstszych przeglądów i dostosowania harmonogramu konserwacji.

3.9. [Czynniki środowiskowe \(praca w warunkach zapylenia, wilgoci itp.\)](#)

3.9.1. [Obsługa dronów w trudnych warunkach](#)

Aby zapewnić wydajność i trwałość drona, podczas pracy w środowiskach zapyłonych, wilgotnych lub o ekstremalnych temperaturach należy podjąć określone środki.

Aby chronić komponenty przed gromadzeniem się kurzu, zaleca się stosowanie filtrów wlotu powietrza, takich jak te dostępne dla DJI Mavic 3 Enterprise. Filtry te należy czyścić lub wymieniać po każdej misji, aby zapobiec zablokowaniu przepływu powietrza. Dodatkowo, zainstalowanie osłon ochronnych na śmigła i czujniki, takich jak osłony śmigieł PGYTECH, może pomóc w ograniczeniu narażenia na kurz. Należy je jednak zdejmować podczas normalnej eksploatacji, aby zoptymalizować osiągi lotu. Po każdym locie silniki, czujniki i otwory wentylacyjne należy czyścić sprężonym powietrzem lub miękką szczotką, a śmigła i czujniki należy sprawdzić pod kątem osadów kurzu. Należy bezwzględnie unikać lotów podczas burz piaskowych i sprawdzić stopień ochrony drona przed cząstkami kurzu (np. IP54 dla DJI Matrice 30).

Aby zapobiec korozji i zwarciom, drony powinny być odpowiednio uszczelnione. Sprawdzanie uszczelek i portów, takich jak te o stopniu ochrony IP43 w DJI Mavic 3 Enterprise, przyczynia się do ochrony wewnętrznej. Zastosowanie sprayu hydrofobowego, takiego jak H₂O Nano Coating, może zapewnić dodatkową ochronę, ale należy go trzymać z dala od czujników i obiektywów. Drony bez stopnia ochrony IP należy chronić przed deszczem i mgłą. Po locie urządzenie należy dokładnie wysuszyć: wyjąć baterię, wytrzeć drona ściereczką z mikrofibry i pozostawić do wyschnięcia na powietrzu w wentylowanym miejscu na 2–4 godziny. Aby wchłonać wilgoć wewnętrzną, można użyć żelu krzemionkowego lub ryżu na 12–24 godziny. Do suszenia dronów nie wolno używać źródeł ciepła, takich jak suszarki do włosów. Należy unikać uruchamiania mokrego drona, a loty nad głęboką wodą powinny być wykonywane wyłącznie modelami wodoodpornymi, takimi jak SwellPro SplashDrone. Przechowywanie drona w wodoodpornej walizce transportowej pomaga chronić go przed wilgocią podczas transportu i przechowywania.

Aby zachować optymalną wydajność, drony należy chronić zarówno przed ekstremalnie niskimi, jak i wysokimi temperaturami. W niskich temperaturach (poniżej 0°C) przed użyciem należy ogrzać akumulatory. Zaleca się stosowanie funkcji podgrzewania (jeśli jest dostępna) oraz izolowanych futerałów. W gorącym otoczeniu (powyżej 40°C) należy unikać długotrwałego wystawiania drona na bezpośrednie działanie promieni słonecznych. Między intensywnymi lotami wymagane są 10–15-minutowe przerwy na ochłodzenie, a pokrowce odblaskowe mogą pomóc w utrzymaniu optymalnej temperatury pracy. Niezależnie od temperatury otoczenia, przed uruchomieniem drona

należy go aklimatyzować przez 10–15 minut, a baterie należy przechowywać w temperaturze od 15 do 25°C. Aby przestrzegać określonych przez producenta limitów temperatury pracy drona, należy zapoznać się z instrukcją obsługi.

3.9.2. Przechowywanie i transport

Aby zapobiec uszkodzeniom podczas transportu i przechowywania, należy stosować odpowiednie wyposażenie ochronne i przestrzegać przepisów bezpieczeństwa.

Twarde futerały, takie jak futerał DJI Mavic 3 lub modele Pelican o stopniu ochrony IP67, zapewniają ochronę przed uderzeniami, kurzem i wodą. Futerały te powinny być wyposażone w specjalne wkładki piankowe, które bezpiecznie utrzymują elementy, a baterie muszą być przechowywane oddzielnie w ognioodpornych przegrodach. W przypadku krótkich podróży lekką i przenośną opcją są miękkie torby, takie jak torba na ramię DJI lub Lowepro DroneGuard. Torby te powinny być odpowiednio wyściełane, aby zapewnić dodatkową ochronę, i należy unikać ich przeładowywania. Aby zapewnić bezpieczny transport, śmigła należy przechowywać oddzielnie, elementy powinny być dobrze zamocowane, a przed podróżą należy sprawdzić przepisy linii lotniczych dotyczące baterii LiPo.

Utrzymanie dobrego stanu komponentów **drona** wymaga odpowiednich warunków przechowywania. Optymalna temperatura powinna wynosić od 15 do 25°C, unikając ekstremalnych wartości poniżej 0°C lub powyżej 40°C. Wilgotność powinna być utrzymywana poniżej 60%, a stosowanie żelu krzemionkowego lub osuszaczy pomaga zapobiegać gromadzeniu się wilgoci. Drony powinny być przechowywane w czystym, dobrze wentylowanym miejscu, z dala od bezpośredniego światła słonecznego, aby uniknąć ekspozycji na promieniowanie UVB. Baterie należy przechowywać przy poziomie naładowania 50–60% i sprawdzać co 2–3 miesiące. Aby zapewnić maksymalne bezpieczeństwo, zaleca się stosowanie ognioodpornych pojemników na baterie, a szafki do przechowywania powinny być suche. Należy unikać przechowywania drona w wilgotnych miejscach, takich jak piwnice, i nie należy kłaść na nim ciężkich przedmiotów.

Aby chronić składane ramiona, należy je odpowiednio zabezpieczyć za pomocą zacisków, a w futerałach należy stosować podpórki z pianki, aby zapobiec niekontrolowanym ruchom. Ważne jest, aby nie używać siły podczas składania mechanizmów. Gimbal należy zablokować za pomocą dedykowanych urządzeń, takich jak

DJI Gimbal Lock, a dodatkową ochronę można zapewnić za pomocą pianki lub nieagresywnych taśm samoprzylepnych. Przed zablokowaniem gimbału należy wyłączyć drona. Śmigła należy zdjąć i przechowywać oddzielnie, aby zapobiec deformacji i przypadkowej aktywacji.

Aby zachować zgodność z przepisami dotyczącymi akumulatorów LiPo, należy je transportować z naładowaniem nieprzekraczającym 30%, zgodnie z wytycznymi IATA. W przypadku podróży lotniczych akumulatory należy przewozić w bagażu podręcznym i sprawdzić dopuszczalny limit energii (np. <100 Wh). Należy umieścić odpowiednie oznaczenia, takie jak „Akumulator litowy” i „Kruche”, oraz dołączyć deklarację zgodności. Ogólne przepisy wymagają sprawdzenia ograniczeń celnych dotyczących dronów, dodania etykiet z danymi kontaktowymi oraz stosowania twardych futerałów do transportu drogowego lub kolejowego. Przed podróżą należy zapoznać się z przepisami IATA i zasadami linii lotniczych, aby uniknąć problemów związanych z transportem. Ze względów bezpieczeństwa nie wolno transportować uszkodzonych akumulatorów.

ROZDZIAŁ 4

Procedury naprawy i wymiany komponentów

Celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie praktycznego przewodnika dotyczącego procesów konserwacji, naprawy i wymiany części bezzałogowych statków powietrznych (UAV). W szczególności szczegółowo omówiono wiedzę techniczną, metody i praktyczne zastosowania wymagane od osób przeszkolonych jako technicy UAV do wykonywania systematycznych i bezpiecznych interwencji.

4.1. Materiały wymagane do konserwacji, naprawy i wymiany części UAV oraz przygotowania miejsca pracy

Przed rozpoczęciem konserwacji, naprawy i wymiany części UAV niezwykle ważne jest prawidłowe określenie narzędzi, które będą używane, oraz odpowiednie przygotowanie ich do zastosowania (rysunek 4.1). W tej sekcji przedstawiono opatrzoną komentarzami listę podstawowych narzędzi powszechnie używanych w takich operacjach (tabela 4.1). Krótko i w prosty sposób opisano funkcję każdego narzędzia oraz sposób jego użycia w połączeniu z poszczególnymi częściami.



Rysunek 4.1 ne materiały wymagane w procesach konserwacji, naprawy i wymiany bezzałogowych statków powietrznych

Tabela 4.1 ne materiały wymagane w procesach konserwacji, naprawy i wymiany bezzałogowych statków powietrznych

PODSTAWOWE NARZĘDZIA RĘCZNE	
Material	Opis
Zestaw śrubokrętów (mini)	Służy do odkręcania małych części, takich jak kontroler lotu, ESC, kamera. Wymagane są głównie końcówki krzyżakowe (gwiazdźiste), płaskie i imbusowe (sześciokątne).
Pęseta (antystatyczna)	Służy do precyzyjnego pozycjonowania małych kabli i złączy. Szczególnie skuteczna w pozycjonowaniu kabli po lutowaniu.
Szczypce i szczypce igłowe	Służą do wyciągania zakleszczonych kabli lub przytrzymywania małych części.
Ściągacz izolacji i dłuto boczne	Konieczne jest otwarcie końcówek kabli i odcięcie nadmiaru długości. Przed lutowaniem należy otworzyć końcówkę kabla.
Nożyczki (typu elektrycznego)	Do cięcia taśmy izolacyjnej, osłony termicznej lub plastikowych elementów mocujących.

NARZĘDZIA DO INTERWENCJI ELEKTRONICZNEJ	
Material	Opis
Stacja lutownicza	Urządzenie lutownicze z regulacją temperatury zapewnia prawidłowe połączenie przewodów i elementów podczas procesów lutowania.
Drut lutowniczy i pasta lutownicza	Do zapewnienia połączeń elektrycznych stosuje się lut przewodzący. Pasta lutownicza ma duże znaczenie dla przewodzenia ciepła i jakości połączeń.
Multimetr	Do pomiaru napięcia, testowania zwarć i sprawdzania ciągłości kabli. Stosowany zwłaszcza w testach ESC i PDB.
Opalarka (opalarek na gorące powietrze)	Do usuwania rur termokurczliwych i delikatnych części. Stosowana np. do usuwania lutowanych części BGA.

MATERIAŁY MONTAŻOWE I MOCUJĄCE	
Material	Opis
Śruby i śruby zapasowe (M2, M3)	Metalowe lub plastikowe śruby o różnych rozmiarach używane do mocowania części.
Podkładka antywibracyjna (podkładka tłumiąca)	Umieszczona pod kontrolerem lotu, zapobiega drganiom i poprawia wydajność czujnika.

Opaski zaciskowe (opaski kablowe)	Służą do mocowania kabli i zapewniają estetyczny wygląd po montażu.
Rurki termokurczliwe (rurki termokurczliwe)	Służą do izolacji i ochrony lutowanych końcówek. Po podgrzaniu kurczą się i przylegają do kabla.

URZĄDZENIA DO TESTOWANIA I KALIBRACJI

Material	Opis
Programator ESC / narzędzie BLHeli	Do aktualizacji oprogramowania ESC i wprowadzania poprawek kalibracyjnych.
Oprogramowanie do kalibracji IMU i kompasu	Operacje kalibracji są wykonywane za pomocą oprogramowania takiego jak Betaflight, iNav, Mission Planner.
Tester serwomechanizmów (opcjonalnie)	Służy do ręcznego testowania ESC lub reakcji silnika. Do celów szkoleniowych.

WYPOSAŻENIE BEZPIECZEŃSTWA I OCHRONY

Material	Opis
Opaska na nadgarstek i mata ESD	Zapobiegają uszkodzeniom elementów elektronicznych spowodowanym elektrycznością statyczną.
Rękawiczki nitrylowe lub lateksowe	Zapewniają ochronę dłoni podczas delikatnych zabiegów, są odporne na oleje.
Okulary ochronne	Chronią przed rozpryskami i iskrami podczas lutowania.
Etui zabezpieczające LiPo	Służy do bezpiecznego przechowywania i transportu baterii.
Gaśnica (mała gaśnica CO₂)	Powinna znajdować się w miejscu pracy, aby można było ją użyć w razie pożaru akumulatora.

UKŁAD BIURKA I OTOCZENIA

Cechy	Opis
Oświetlenie	Zalecane są mocne, bezcieniowe lampy stołowe, które zapewniają dobre oświetlenie całego obszaru.
Antystatyczna nakładka na biurko	Standard dla powierzchni montażowych urządzeń elektronicznych.
Pudełka na części i etykiety	Aby każda część była uporządkowana i nie mieszała się z innymi.
Lista zapasowych części	Posiadanie części zamiennych, takich jak ESC, FC, silnik, śmigło, ułatwia pracę.

Konfiguracja miejsca pracy:

- Najlepiej wybrać czysty, uporządkowany i dobrze oświetlony stół. Zaleca się używanie gładkiej powierzchni w jasnym kolorze, aby zapobiec zgubieniu małych części.
- Chronić elementy elektroniczne przed wyładowaniami elektrostatycznymi, używając opaski antystatycznej lub maty antystatycznej.
- Uporządkowanie narzędzi i sprzętu w łatwo dostępny sposób zmniejsza liczbę błędów i straty czasu podczas pracy.
- Odporna na wysoką temperaturę strefa lutowania zapewnia bezpieczne użytkowanie lutownic i innych urządzeń grzewczych.
- Podczas pracy z delikatnymi częściami należy mieć pod ręką pęsetę, szczypce, śrubokręty i materiały do oznaczania.

Protokoły bezpieczeństwa:

- Przed każdą operacją należy wyjąć baterię drona i upewnić się, że cały system jest odłączony od zasilania.
- Ważne jest, aby nie wdychać oparów podczas lutowania i zapewnić dobrą wentylację miejsca pracy.
- Połączenia należy sprawdzić za pomocą multimetru pod kątem zwarc; należy unikać nieprawidłowych połączeń kablowych.
- Podczas pracy z akumulatorami LiPo, które stwarzają zagrożenie pożarowe, należy podjąć środki ostrożności, takie jak stosowanie torby bezpieczeństwa, metalowej powierzchni i gaśnicy.
- Po zakończeniu procesu wszystkie używane urządzenia należy wyczyścić i bezpiecznie przechowywać.

Dokładne wykonanie tych przygotowań przyczynia się do wydajnego, bezpiecznego i bezbłędного przeprowadzenia procesów naprawy i wymiany części.

4.2. Wprowadzenie do części dronów, ich wymiana i rodzaje awarii

W niniejszym rozdziale szczegółowo przedstawiono podstawowe części, które składają się na drona, wyjaśniając krok po kroku, w jaki sposób mogą one ulec awarii i jak je wymienić w razie potrzeby. W każdym podrozdziale omówiono funkcję danej części, typowe rodzaje awarii, bezpieczne metody demontażu i montażu oraz wskazówki dotyczące konserwacji.



Rysunek 4. Przykładowy dron2

Po przeczytaniu tego rozdziału użytkownik będzie posiadał wiedzę i umiejętności niezbędne do rozpoznania wszystkich części składających się na bezzałogowy statek powietrzny (UAV) (rysunek 4.2), identyfikacji uszkodzonych części oraz wykonywania podstawowych czynności serwisowych.

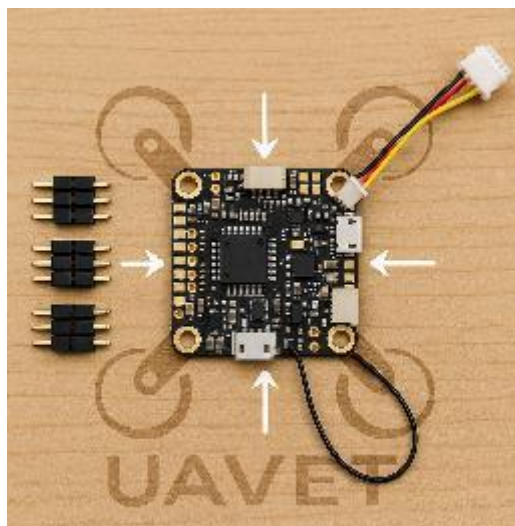
4.2.1. Kontroler lotu

Kontroler lotu (rysunek 4.3) jest centralną jednostką przetwarzającą i systemem sterowania drona.



Rysunek 4. Elementy kontrolera lotu drona3

Zintegrowana z nim jednostka pomiaru bezwładnościowego (IMU) zbiera surowe dane z czujników, takich jak żyroskop, akcelerometr, barometr, magnetometr, i przetwarza je w czasie rzeczywistym (rysunek 4.4). Komunikuje się również z sterownikami silników (ESC), modułem GPS i innymi komponentami peryferyjnymi. W ten sposób nieustannie oblicza i analizuje dynamikę lotu, taką jak pozycja, prędkość, kierunek i przyspieszenie drona. Interpretuje polecenia wydawane przez pilota lub systemy autonomiczne i wysyła kontrolowane polecenia do silników i innych elementów wykonawczych, zapewniając w ten sposób stabilny, zrównoważony i bezpieczny lot drona.



Rysunek 4.4 Wewnętrzna struktura i komponenty kontrolera lotu

4.2.1.1. Do czego służy?

- Utrzymuje stabilny i zrównoważony lot drona w płaszczyźnie poziomej i pionowej.
- Natychmiast wykrywa odchylenia spowodowane wiatrem, prądami powietrza i innymi czynnikami zewnętrznymi oraz generuje sygnały sterujące korygujące.
- Zmieniając prędkość i kierunek śmigieł, zapewnia sterowanie i manewrowość drona.
- Zarządza autonomicznymi trybami lotu; wykonuje funkcje takie jak śledzenie trasy wspomagane przez GPS, nawigacja po punktach trasy, utrzymywanie pozycji i powrót do bazy.
- Dostarcza dane telemetryczne w czasie rzeczywistym i przesyła parametry lotu do naziemnej stacji kontroli, umożliwiając kontrolę operacyjną i monitorowanie.

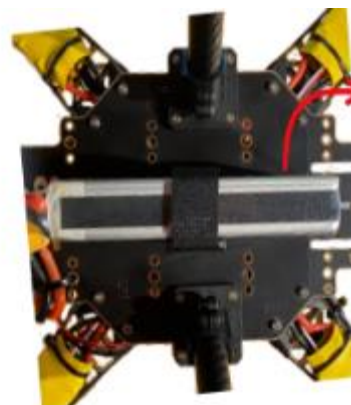
4.2.1.2. Objawy awarii:

- Dron może zachowywać się niestabilnie podczas startu lub lotu i może się przewracać lub tracić kontrolę.
- Podczas lotu można zaobserwować problemy ze stabilnością, wibracje lub nagłe odchylenia.
- Opóźniona, niekompletna lub brak reakcji na polecenia pilota wskazuje na problem z przetwarzaniem lub komunikacją kontrolera lotu.
- Niektóre kody błędów migają na wskaźnikach LED kontrolera lotu, umożliwiając diagnostykę.
- Tryby lotu mogą nie działać prawidłowo w wyniku błędów kalibracji czujników lub przerw w komunikacji.

4.2.1.3. Procedura wymiany i montażu

Krok 1

Odłącz wszystkie źródła zasilania drona (rysunek 4.5). Upewnij się, że system jest całkowicie odłączony od zasilania, zwłaszcza poprzez wyjęcie baterii. Ma to kluczowe znaczenie dla uniknięcia ryzyka zwarcia elektrycznego i uszkodzenia komponentów.



Rysunek 4.5 . Odłączenie zasilania drona w celu bezpiecznej interwencji

Krok 2

Określ fizyczną lokalizację kontrolera lotu (FC). Znajduje się on zazwyczaj w środkowej części korpusu drona, w obszarze izolowanym od wibracji. Posiada wiele połączeń kablowych i zintegrowanych czujników (IMU, barometr, kompas).

Krok 3

Ostrożnie odłącz wszystkie kable podłączone do kontrolera lotu (kable sygnałowe ESC, kabel anteny GPS, połączenia odbiornika, linie danych czujników itp.). Aby zapobiec nieprawidłowemu podłączeniu kabli, należy oznaczyć lokalizację każdego połączenia lub zapisać ją, wykonując zdjęcia w wysokiej rozdzielczości.

Krok 4

Odkręć śruby lub wsporniki mocujące kontroler lotu. Zachowaj podkładki antywibracyjne lub silikonowe taśmy uszczelniające użyte podczas montażu lub wymień je w razie potrzeby.

Krok 5

Ostrożnie umieść nowy kontroler lotu w jego pierwotnej pozycji i orientacji. Większość kontrolerów lotu ma strzałkę wskazującą kierunek przodu; upewnij się, że jest ona ustawiona równolegle do przodu drona.

Krok 6

Wytnij i bezpiecznie podłącz wszystkie kable połączeniowe do odpowiednich portów zgodnie z oznaczeniami i zdjęciami. Wytrzymałość końcówek kabli i czystość połączeń lutowanych mają kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa lotu.

Krok 7

Skalibruj kontroler lotu. Można to zrobić zarówno ręcznie, jak i za pomocą oprogramowania, takiego jak Betaflight, Mission Planner, iNav.

- Kalibracja IMU: Dron musi znajdować się na stabilnej i poziomej powierzchni.
- Kalibracja kompasu: Dron należy obrócić o 360° w otwartej przestrzeni, z dala od wpływu pola magnetycznego.
- Kalibracja akcelerometru: zapewnia dokładność czujników akcelerometru drona.
- Regulacja kursu: Należy ustawić prawidłowy kurs, aby zapewnić kompatybilność kompasu i GPS.

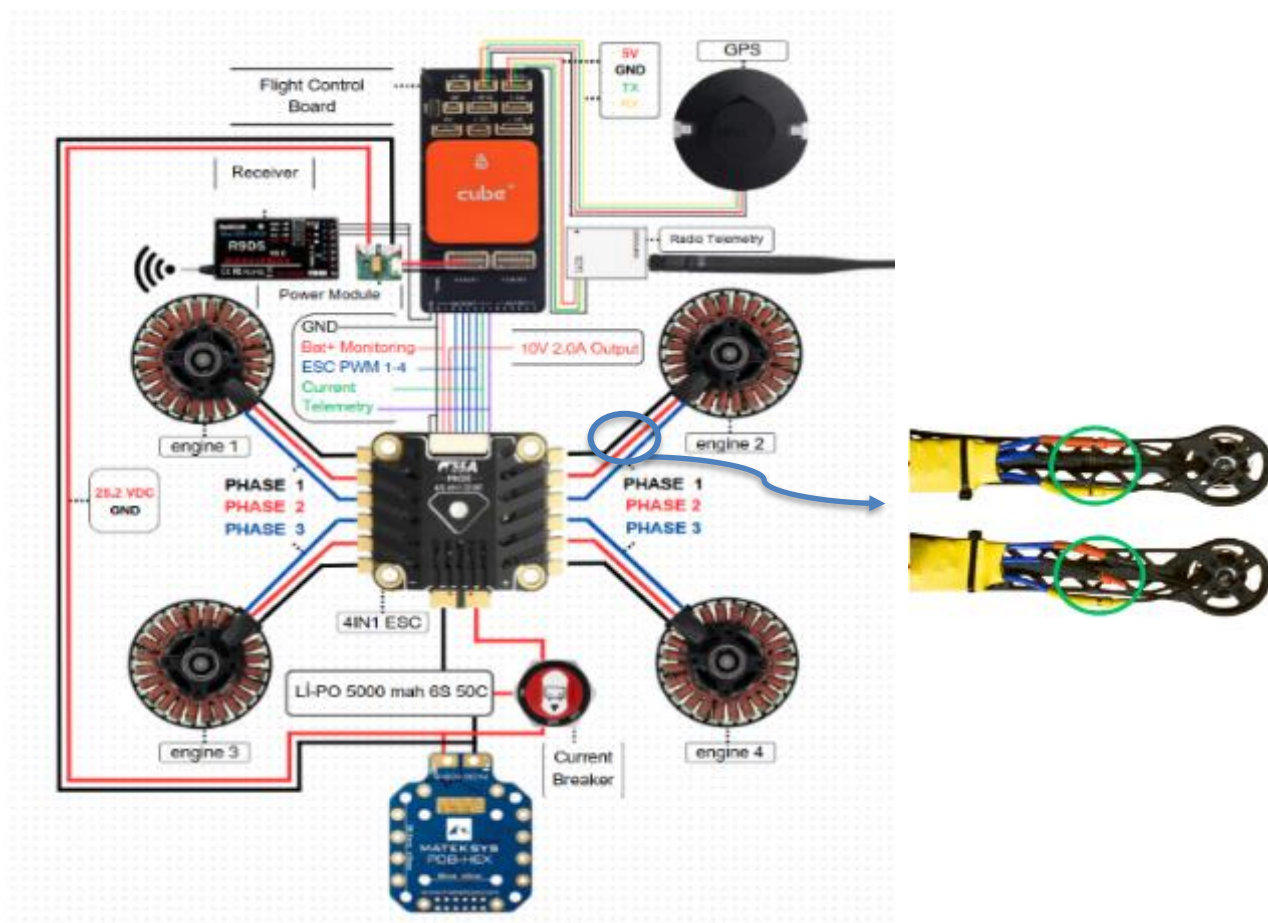
Krok 8

Po kalibracji i podłączeniu należy wykonać lot testowy. Pierwszy lot należy wykonać z małą prędkością i na małej wysokości.

- Sprawdź powolny start drona, stabilne utrzymywanie pozycji i sterowanie.
- W przypadku wykrycia jakichkolwiek nieprawidłowości, wibracji lub niekontrolowanych ruchów należy ponownie przeprowadzić kalibrację i sprawdzić połączenie.

4.2.2. ESC (elektroniczna jednostka sterująca prędkością)

ESC (elektroniczny regulator prędkości) to obwód elektroniczny, który precyzyjnie kontroluje prąd elektryczny i sygnał wysyłany do silników drona (rysunek 4.6). Przekształca on polecenia dotyczące prędkości i kierunku otrzymane przez pilota z kontrolera lub kontrolera lotu na sygnał elektryczny wymagany przez silniki. W ten sposób prędkość i kierunek obrotów każdego silnika są kontrolowane niezależnie. ESC są ogólnie kompatybilne z trójfazowymi silnikami bezszczotkowymi i zapewniają stabilną pracę silnika.



Rysunek 4.6 Elektroniczny regulator prędkości (ESC) drona

4.2.2.1. Jakie jest jego działanie?

- Umożliwia silnikom obracanie się z żądaną prędkością i w żądanym kierunku.
- Natychmiastowo wprowadza zmiany prędkości wymagane do utrzymania równowagi i kontroli kierunku podczas lotu.
- Zazwyczaj do każdego silnika używany jest jeden regulator ESC; niektóre systemy mogą mieć połączone płytki ESC (ESC 4 w 1), które sterują czterema silnikami.
- Zapewnia ochronę silników przed sytuacjami takimi jak przetężenie i przegrzanie.

4.2.2.2. Objawy awarii:

- Jeden z silników w ogóle nie uruchamia się lub nagle zatrzymuje się podczas lotu.
- Dron wykonuje salta w wyniku nieprawidłowych ruchów podczas startu lub lotu.
- ESC przegrzewa się i wydziela zapach spalenizny.
- Wskaźniki LED na ESC nie świecą się lub migają w sposób nieprawidłowy.

4.2.2.3. Procedura wymiany i montażu

Wymagane składniki:

- Zestaw do lutowania (lutownica z regulacją temperatury)

- Pęseta odporna na wysoką temperaturę
- Pasta termoprzewodząca (wymagana do odprowadzania ciepła w niektórych modelach ESC)
- Multimetr (do sprawdzania ciągłości obwodu i zwarcć)

Krok 1

Całkowicie odłącz zasilanie drona, wyjmując baterię.

Krok 2

Określ położenie ESC w dronie. ESC znajduje się zazwyczaj obok silnika lub w dolnej części korpusu drona, osobno lub jako płytką 4 w 1.

Krok 3

Dokładnie sprawdź wszystkie połączenia kablowe podłączone do ESC:

- Kable silnika (zwykle kable 3-fazowe)
- Kable zasilające (czerwony = dodatni, czarny = ujemny)
- Kabel sygnałowy (połączenie między ESC a kontrolerem lotu)

Krok 4

Oznacz i sfotografuj porty. Pozwoli to uniknąć ryzyka nieprawidłowego podłączenia podczas podłączania nowego ESC.

Krok 5

Ostrożnie odłącz stare kable ESC, podgrzewając końcówkę lutowniczą. Uważaj, aby usunąć końcówki kabli i punkty lutownicze bez ich uszkodzenia.

Krok

Przylutuj nowy ESC do tych samych portów, co stary ESC:

- Kabel sygnałowy musi być podłączony do kontrolera lotu.
- Trzy kable silnika muszą być prawidłowo przylutowane do odpowiednich faz silnika.
- Kable zasilające należy podłączyć do PDB lub bezpośrednio do linii akumulatora.

Krok 7

Dokładnie sprawdź połączenia lutowane. Sprawdź ciągłość za pomocą multimetru, aby upewnić się, że nie ma zwarcia.

Krok 8

Przed ponownym podłączeniem akumulatora sprawdź wszystkie połączenia. Następnie wykonaj lot próbny, aby sprawdzić prawidłowe działanie ESC i silnika.

4.2.3. Silnik

Silnik jest podstawowym elementem napędowym drona. Przekształca energię elektryczną w energię mechaniczną i obraca śmigło, umożliwiając dronowi start, manewrowanie i stabilny lot (rysunek 4.7). Każdy silnik jest sterowany przez podłączony do niego elektroniczny regulator prędkości (ESC).



Rysunek 4. Silnik elektryczny drona7 – główny siłownik zapewniający ruch śmigła

4.2.3.1. Objawy awarii:

- Przechylenie się na jedną stronę lub niekontrolowane przewracanie się podczas startu lub lotu drona.
- Silnik wydaje nietypowe dźwięki, gaśnie lub pracuje nierówno podczas pracy.
- Odpowiedni silnik nie obraca się lub nie wytwarza mocy, mimo że ESC działa prawidłowo.
- Silnik przegrzewa się lub śmigło nie obraca się z wymaganą prędkością.

4.2.3.2. Procedura wymiany i montażu

Wymagane elementy:

- Mini śrubokręt
- Klucz sześciokątny (Allen) (zwykle M2 lub M3)
- Stacja lutownicza
- Pęseta i szczypce
- Rurka żaroodporna (do izolacji) i nożyczki
- Multimetr (opcjonalnie, do testowania połączeń)

Krok 1

Całkowicie odłącz zasilanie systemu drona, wyjmując baterię. Jest to obowiązkowe dla bezpieczeństwa procesu.

Krok 2

Zdiagnozuj uszkodzony silnik. Zazwyczaj odbywa się to poprzez sprawdzenie, czy silnik porusza się podczas testu ESC.

Krok 3

Odkręć śruby, którymi silnik jest przymocowany do korpusu drona. Silniki są zazwyczaj montowane za pomocą 2 lub 4 śrub. Śmigło należy odkręcić.

Krok 4

Zidentyfikuj 3 przewody między silnikiem a ESC. Przewody te są zazwyczaj przylutowane lub połączone złąkami.

Krok 5

Ostrożnie usuń stare kable silnika za pomocą lutownicy. Uważaj, aby nie uszkodzić połączeń.

Krok 6

Zamontuj nowy silnik w tych samych otworach, w których był przykręcony stary silnik.

Krok 7

Przylutuj trzy przewody silnika do tych samych przewodów fazowych na ESC.

Uwaga Jeśli chcesz zmienić kierunek obrotów silnika, możesz to zrobić, zmieniając położenie przewodów dwufazowych.

Krok 8

Zaizoluj lutowane połączenia rurką i sprawdź, czy nie ma zwarcia za pomocą multimetru.

Krok 9

Włącz system, podłączając akumulator, i sprawdź kierunek obrotów silnika.

W razie potrzeby kierunek obrotów silnika można regulować za pomocą oprogramowania, takiego jak Betaflight.

4.2.4. Śmigło

Śmigła wykorzystują ruch obrotowy silników drona do wytworzenia przepływu powietrza, umożliwiając w ten sposób dronowi generowanie siły nośnej (rysunek 4.8). Ta siła nośna pozwala dronowi na start, lądowanie oraz poruszanie się w przód i w tył oraz w lewo i w prawo w płaszczyźnie poziomej. Śmigła obracają się zgodnie z ruchem wskazówek zegara

(Clockwise - CW) i przeciwnie do ruchu wskazówek zegara (Counter-Clockwise - CCW) jako system podwójny, zapewniając w ten sposób stabilność i kontrolę kierunku.



Rysunek 4. Śmigło drona

4.2.4.1. Jakie jest jego działanie?

- Śmigła przekształcają energię mechaniczną wytwarzaną przez silniki w siłę napędową, umożliwiając dronowi start.
- Dzięki obrotom w kierunku CW i CCW umożliwiają one stabilny lot i manewrowość drona.
- Stabilność drona, precyzja sterowania i osiągi lotu w dużej mierze zależą od dokładności, wyważenia i sztywności konstrukcyjnej śmigieł.

4.2.4.2. Objawy awarii

- Podczas lotu drona obserwuje się drgania, wibracje lub niestabilne ruchy.
- Śmigło może mieć uszkodzenia fizyczne (pęknięcia, złamania, wygięcia).
- Podczas startu dron traci orientację lub ma tendencję do przewracania się.
- Powstający strumień powietrza jest niewystarczający lub nieregularny; dron traci siłę nośną.

4.2.4.3. Procedura wymiany i montażu

Wymagane elementy:

- Umiejętność demontażu śmigła za pomocą klucza lub ręcznie
- Zapasowy zestaw śmigieł CW i CCW
- Mały klucz dynamometryczny, jeśli jest to pożądane (aby zapobiec nadmiernemu dokręceniu)

Krok 1

Całkowicie odłącz baterię i wyłącz zasilanie drona.

Krok 2

Zidentyfikuj śmigło wymagające wymiany. Pomocna może być kontrola wzrokowa lub objawy występujące podczas lotu.

Krok

Zwróć uwagę na kierunek obrotów śmigła (zgodnie z ruchem wskazówek zegara lub przeciwnie do ruchu wskazówek zegara). Zazwyczaj jest on wskazany strzałką na śmigle.

Krok 4

Ostrożnie zdejmij śmigło ręcznie lub za pomocą klucza do śmigła.

Uwaga: Śmigła obracające się zgodnie z ruchem wskazówek zegara (CW) należy zdejmować w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara, a śmigła obracające się w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara (CCW) należy zdejmować w przeciwnym kierunku.

Krok 5

Umieść nowe wirniki na wale silnika, zachowując prawidłowy kierunek obrotów (rysunek 4.9).

- W silnikach CW należy montować wyłącznie śmigła CW, a w silnikach CCW wyłącznie śmigła CCW.
- Zamontowanie śmigła w niewłaściwym kierunku powoduje całkowitą utratę kontroli nad dronem.

Krok 6

Dokręć wirnik, ale unikaj nadmiernego dokręcania.

- Jeśli jest uszczelka mocująca lub podkładka, pamiętaj, żeby ją włożyć.
- Sprawdź ręcznie, czy wirnik nie jest luźny.

Krok 7

Po wymianie wszystkich śmigieł należy sprawdzić kierunek obrotów za pomocą oprogramowania do testowania silników (np. zakładka Motor w Betaflight).



Rysunek 4.9 . Montaż śmigła drona — kontrola kierunku i dokręcenia

4.2.4.4. Lot testowy

- Pierwszy lot należy wykonać przy niskiej prędkości i na małej wysokości.
- Zwróć uwagę na stabilność kierunkową drona.
- W przypadku ewentualnych problemów, takich jak wibracje, hałas lub ugięcie, należy ponownie sprawdzić śmigło i, jeśli to konieczne, zdemontować je i ponownie zamontować.

4.2.4.5. Wskazówki

- Przed każdym lotem należy sprawdzić, czy śmigła nie są poluzowane.
- Po upadku lub uderzeniu śmigło należy sprawdzić pod kątem stanu fizycznego i funkcjonalnego.
- Śmigła CW i CCW nie powinny być mylone w zestawach śmigieł zapasowych; zazwyczaj różnią się one kolorem lub oznaczeniami.

4.2.5. Bateria (bateria LiPo)

Baterie LiPo (litowo-polimerowe) są głównym źródłem energii w systemach dronów (rysunek 4.10). Są one szeroko stosowane, zwłaszcza w multikopterach, ze względu na ich niewielką wagę i wysoką gęstość energii. Pojemność (mAh) i stan akumulatora mają bezpośredni wpływ na czas lotu i osiągi drona. Akumulatory LiPo mogą mieć różną liczbę ogniw, zazwyczaj 3S (3 ogniwa), 4S (4 ogniwa) lub więcej. Napięcie nominalne każdego ogniwa wynosi około 3,7 V.

Uwaga: Im większa liczba ogniw, tym wyższe całkowite napięcie akumulatora. Na przykład akumulator 3S zapewnia około 11,1 V.



Rysunek 4. Akumulator do drona (akumulator LiPo) firmy 10

4.2.5.1. Do czego służy?

- Dostarcza energię do wszystkich elementów elektronicznych, takich jak ESC, silnik, kontroler lotu i kamera.
- Liczba ogniw i pojemność są ważne dla zapotrzebowania drona na energię i czasu lotu.
- Napięcie (V) i pojemność (mAh) są głównymi kryteriami decydującymi o wydajności i czasie lotu drona.

Uwaga: Wysoka pojemność (mAh) oznacza dłuższy czas lotu, ale może zwiększyć wagę baterii.

4.2.5.2. Objawy awarii i zagrożenia bezpieczeństwa

- Pęcznienie lub deformacja baterii jest niebezpieczne i wymaga natychmiastowej wymiany.
- Przegrzanie lub nierównowaga napięcia między ogniwami zwiększa ryzyko pożaru.
- Jeśli czas lotu ulegnie nieoczekiwanemu skróceniu, może to oznaczać niską pojemność baterii.
- Nagłe spadki napięcia mogą spowodować nagłe wyłączenie drona w powietrzu.

Uwaga: Nigdy nie należy używać spuchniętych baterii, ponieważ stanowią one zagrożenie dla bezpieczeństwa.

4.2.5.3. Procedura wymiany i montażu

Wymagane elementy:

- Złącza zasilające XT60 lub XT90 (dla kompatybilności kabli)
- Pasek z rzepem do baterii lub urządzenie mocujące
- Odporna na wysoką temperaturę powierzchnia robocza lub mata
- Torba bezpieczeństwa LiPo (zalecana ze względu na ryzyko pożaru)

Krok 1

Ostrożnie wyjmij starą baterię, trzymając ją wyłącznie za złącza, nie ciągnąc za kable.

Krok 2

Sprawdź kabel połączeniowy baterii i złącze. Jeśli nie są kompatybilne, można użyć odpowiedniego adaptera.

Krok 3

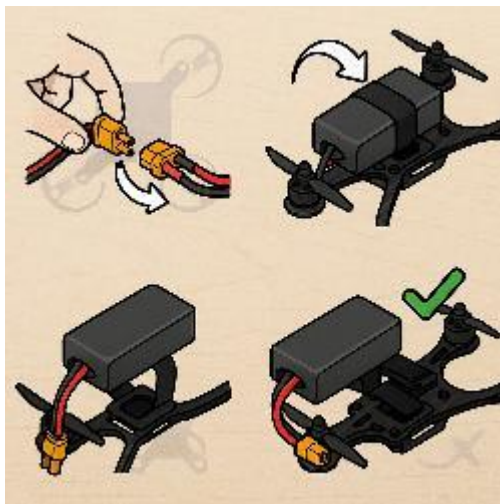
Jeśli bateria jest przymocowana do korpusu drona za pomocą paska lub innego urządzenia, ostrożnie je poluzuj.

Krok 4

Umieść nowy akumulator w prawidłowej orientacji (etykieta na górze, kable z tyłu). Ważne jest, aby nie naruszyć środka ciężkości (rysunek 4.11).

Krok

Mocno przymocuj baterię za pomocą paska z rzepem (rysunek 4.11).



Rysunek 4.11 Prawidłowe ustawienie i zamocowanie baterii drona

Krok 6

Podłącz kabel zasilający zgodnie z prawidłową polaryzacją. Nieprawidłowe podłączenie może spowodować uszkodzenie baterii i kontrolera lotu (końcówki oznaczone symbolem + należy połączyć ze sobą, a końcówki oznaczone symbolem - również ze sobą).

Uwaga: Bardzo ważne jest przestrzeganie biegunowości, w przeciwnym razie może dojść do uszkodzenia sprzętu elektronicznego.

Krok

Zmierz napięcie ogniw akumulatora. Idealny zakres wynosi od 3,7 V (nominalne) do 4,2 V (pełne naładowanie).

Krok 8

Włącz system i sprawdź, czy zasilanie jest odbierane, sprawdzając wskaźniki LED.

4.2.5.4. Testowanie i bezpieczeństwo

- Pierwszy lot powinien być krótki, a napięcie akumulatora powinno być monitorowane.
- Przed każdym ładowaniem sprawdź wyrównanie ogniw.
- Używaj wyłącznie ładowarek kompatybilnych z akumulatorami LiPo i wysokiej jakości.
- Jeśli nie będziesz używać akumulatorów przez dłuższy czas, przechowuj je w bezpiecznej torbie LiPo i chroń przed bezpośrednim działaniem promieni słonecznych.

Uwaga: Akumulatory LiPo są wrażliwe; niewłaściwe obchodzenie się z nimi zwiększa ryzyko pożaru, dlatego należy zachować ostrożność.

4.2.6. PDB (płytką dystrybucji zasilania)

Płytką dystrybucji zasilania (PDB) to obwód elektroniczny, który centralnie rozdziela energię elektryczną z akumulatora do wszystkich elementów elektronicznych drona (rysunek 4.12). ESC (elektroniczna kontrola prędkości), kontroler lotu, nadajniki wideo (VTX), systemy LED i inne moduły są zasilane przez PDB. Wiele płyt PDB posiada regulatory napięcia 5 V i 12 V, aby spełnić różne wymagania dotyczące napięcia, filtry i czujniki prądu do pomiaru mocy rozpraszanej podczas lotu.



Rysunek 4.12 Płytką rozdzielczą zasilania drona (PDB)

4.2.6.1. Do czego służy?

- Rozdziela wysokie napięcie z akumulatora, przekształcając je w bezpieczne i regularne napięcia odpowiednie do potrzeb komponentów drona.
- Zapewnia bezpośrednie zasilanie ESC i kontrolera lotu.
- Płyty PDB z wyjściami 5 V lub 12 V umożliwiają przesyłanie energii odpowiedniej dla czujników i urządzeń działających przy różnych napięciach.

- Modele z czujnikami prądu optymalizują zarządzanie akumulatorem poprzez monitorowanie zużycia energii podczas lotu.

4.2.6.2. Objawy awarii

- Dron w ogóle się nie włącza lub cały system nagle wyłącza się podczas lotu.
- Na PDB widoczne są fizyczne uszkodzenia, takie jak ślady przypalenia, zapach lub czernienie.
- ESC lub kontroler lotu nie otrzymuje zasilania i nie działa.
- Na wyjściach napięcia mierzone są nieprawidłowe wartości, takie jak brak równowagi lub 0 V.
- Podczas testowania multimetrem nie ma ciągłości na wyjściach PDB.

4.2.6.3. Procedura wymiany i montażu

Wymagane elementy:

- Stacja lutownicza (lutownica z regulacją temperatury)
- Drut lutowniczy, topnik, pompa lutownicza
- Multimetr (do testowania)
- Rurki odporne na wysoką temperaturę
- Pęseta i szczypce

Krok 1

Odłącz zasilanie całego systemu, wyjmując baterię drona.

Krok 2

Oznacz wszystkie kable podłączone do PDB i udokumentuj punkty połączeń, wykonując zdjęcia w wysokiej rozdzielczości (rysunek 4.13). Jest to bardzo ważne dla prawidłowego podłączenia.

Krok

Ostrożnie odłącz ESC, kontroler lotu i wszystkie inne połączenia przewodów za pomocą grotu lutownicy (rysunek 4.13).

Krok

Jeśli PDB ma śruby mocujące, odkręć je i wyjmij stare PDB z obudowy.

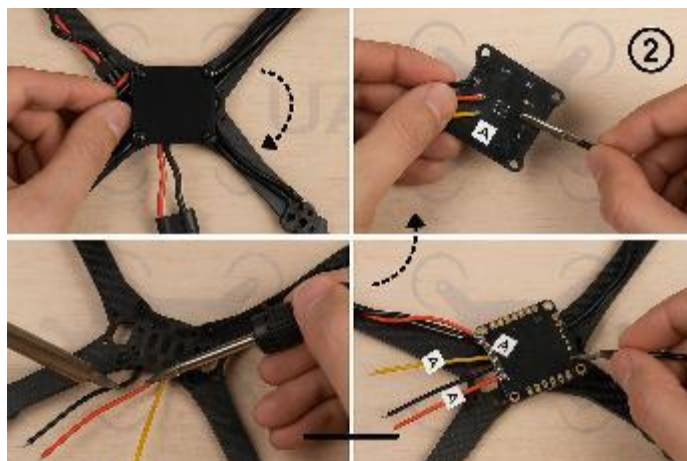
Krok 5

Przymocuj nową płytkę PDB do korpusu drona, zwracając uwagę na jej pierwotne położenie i orientację.

Krok

Przylutuj przewody w odpowiedniej kolejności do odpowiednich zacisków (rysunek 4.13):

- Wejścia zasilania ESC (+ i -)
- Wyjścia urządzenia, takie jak kontroler lotu (FC), VTX, LED
- Złącze wejściowe akumulatora (zwykle gniazdo XT60)



Rysunek 4.13 Wymiana i montaż PDB

Krok 7

Sprawdź punkty lutownicze za pomocą multimetru, aby upewnić się, że nie ma zwarcia i że ciągłość jest zachowana, oraz upewnij się, że przewody nie stykają się ze sobą.

Krok 8

Przeprowadź końcową kontrolę wzrokową i jeśli połączenia są bezpieczne i prawidłowe, podłącz akumulator i włącz zasilanie systemu.

4.2.6.4. Testowanie i kalibracja

- Zmierz napięcia wyjściowe PDB (5 V, 12 V) za pomocą multimetru.
- Sprawdź, czy ESC i kontroler lotu są zasilane.
- Jeśli na PDB znajduje się czujnik prądu, sprawdź, czy jest on prawidłowo podłączony do kontrolera lotu i czy jest zdefiniowany w oprogramowaniu (Betaflight, iNav).

4.2.6.5. Wskazówki

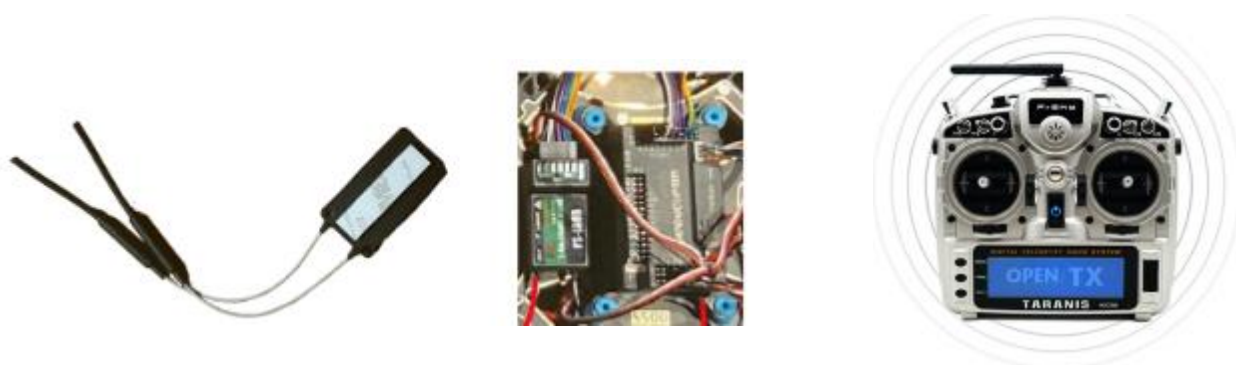
- Lutuj szybko, ale ostrożnie, uważając, aby nie uszkodzić pól lutowniczych nadmiernym ciepłem.
- Krótkie i grube kable zasilające są ważne dla wysokiej przepustowości prądu i zapobiegają przegrzaniu.

- Część płytki PDB stykająca się z korpusem drona musi być wyposażona w podkładkę izolacyjną lub plastikową osłonę, co eliminuje ryzyko zwarcia.

Uwaga: Prawidłowe działanie PDB ma kluczowe znaczenie dla ogólnego zarządzania zasilaniem i bezpieczeństwa drona.

4.2.7. Odbiornik

Odbiornik to moduł elektroniczny, który przesyła sygnały o częstotliwości radiowej (RF) z pilota zdalnego sterowania do kontrolera lotu w dronie (rysunek 4.14). Polecenia wysyłane przez pilota z pilota zdalnego sterowania — takie jak przepustnica, orientacja, kontrola wysokości — są najpierw odbierane przez odbiornik, a następnie przesyłane do kontrolera lotu. Dlatego odbiornik odgrywa kluczową rolę w ręcznym lub półautonomicznym sterowaniu dronem.



Rysunek 4.14 . Element odbiornika drona

4.2.7.1. Do czego służy?

- Odbiera sygnały wysyłane z pilota zdalnego sterowania.
- Zapewnia ruchy drona poprzez przekazywanie odebranych sygnałów do kontrolera lotu.
- Wykorzystuje różne protokoły transferu danych (PWM, PPM, SBUS, iBUS, CRSF – Crossfire).
- Niektóre odbiorniki przełączają się w tryb awaryjny (failsafe) w celu zapewnienia bezpieczeństwa w przypadku utraty sygnału.

Uwaga: Funkcja Failsafe pozwala dronowi zachowywać się bezpiecznie w przypadku utraty sygnału (np. lądowanie).

4.2.7.2. Objawy awarii

- Dron wyświetla ostrzeżenie „brak sygnału” po włączeniu.

- Brak połączenia z pilotem zdalnego sterowania.
- Wskaźnik LED na odbiorniku świeci się na czerwono lub nie świeci się wcale.
- ESC nie działają, ponieważ kontroler lotu nie może odebrać sygnału.

4.2.7.3. Procedura wymiany i montażu

Wymagane elementy:

- Mini śrubokręt
- Stacja lutownicza (w przypadku niektórych modeli)
- Pęseta
- Taśma 3M lub dwustronna taśma montażowa
- Multimetr (opcjonalnie do testowania połączeń)

Krok 1

Całkowicie odłącz zasilanie systemu, wyjmując baterię.

Krok

Zlokalizuj odbiornik prądu w dronie. Znajduje się on zazwyczaj w pobliżu kontrolera lotu.

Krok 3

Ostrożnie odłącz przewody sygnałowe (3 piny: sygnał, +5 V, GND) podłączone do kontrolera lotu. Jeśli są one przylutowane, odłącz przewody za pomocą lutownicy.

Krok 4

Zdejmij stary odbiornik z taśmy lub uchwytu mocującego.

Krok 5

Umieść nowy odbiornik w tej samej pozycji i zamocuj go bezpiecznie za pomocą taśmy dwustronnej. Antena powinna być skierowana na zewnątrz i, jeśli to możliwe, umieszczona w miejscu wolnym od wibracji.

Krok 6

Podłącz przewody sygnałowe, +5V i GND do odpowiednich pinów. Podłącz do portu SBUS lub iBUS na kontrolerze lotu.

Krok 7

Wykonaj parowanie z pilotem zdalnego sterowania. Włącz odbiornik, zazwyczaj poprzez naciśnięcie i przytrzymanie przycisku parowania, a następnie przełącz pilota zdalnego sterowania w tryb parowania.

Krok 8

Połączenie jest udane, jeśli dioda LED na odbiorniku świeci się na zielono. Wykonaj testy ruchu w interfejsie oprogramowania (np. Betaflight > zakładka Odbiornik).

4.2.7.4. Testowanie i kalibracja

- Poruszaj joystickami i obserwuj polecenia w oprogramowaniu.
- Sprawdź, czy sekwencja kanałów (TAER / AETR) jest prawidłowa.
- Skonfiguruj ustawienia Failsafe, aby określić, co dron zrobi w przypadku awarii sygnału.

4.2.7.5. Wskazówki

- Umieść odbiornik i anteny z dala od silników, które generują zakłócenia magnetyczne i elektryczne.
- Siła sygnału wzrasta, jeśli anteny są ustawione pod kątem 90° względem drona.
- Regularnie monitoruj jakość sygnału i logi podczas lotów na duże odległości.

Uwaga: Położenie odbiornika i anteny ma kluczowe znaczenie dla jakości sygnału i bezpieczeństwa lotu.

4.2.8. Moduł GPS

Moduł GPS (Global Positioning System) umożliwia dronowi określenie jego dokładnej pozycji na ziemi za pomocą satelitów (rysunek 4.15). Informacje o pozycji mają kluczowe znaczenie dla autonomicznych trybów lotu drona, utrzymania pozycji, powrotu do punktu startowego (RTH) i misji z punktami nawigacyjnymi.



Rysunek 4.15 Moduł GPS (Global Positioning System) drona

4.2.8.1. Jakimi są jego funkcje?

- Wykrywa aktualne współrzędne szerokości i długości geograficznej oraz wysokość drona.
- Dostarcza dane dotyczące prędkości i kierunku lotu.
- Niezbędny w autonomicznych misjach lotniczych (np. podążanie po z góry ustalonej trasie).
- Funkcja RTH pozwala dronowi bezpiecznie powrócić do punktu startowego w przypadku utraty sygnału sterującego.

Uwaga: W przypadku utraty sygnału GPS dron może przełączyć się w tryb bezpieczeństwa.

4.2.8.2. Objawy awarii

- Brak połączenia z satelitami lub całkowity brak sygnału GPS.
- Dron nie może przełączyć się w tryb GPS.
- W interfejsie oprogramowania nie są widoczne współrzędne GPS.
- Opóźnione, niedokładne lub niespójne dane dotyczące pozycji.

4.2.8.3. Procedura wymiany i montażu

Wymagane elementy:

- Mini śrubokręt
- Pęseta
- Stacja lutownicza (może być wymagana w przypadku niektórych modeli GPS)
- Płytki montażowe GPS lub taśma
- Multimetr (do celów kontrolnych, opcjonalnie)

Krok 1

Odłącz zasilanie systemu, odłączając drona od akumulatora.

Krok

Zlokalizuj moduł GPS w dronie. Zazwyczaj jest on zamontowany na górze drona, izolowany od wibracji, skierowany w stronę otwartej przestrzeni.

Krok

Odłącz 4-żyłowy kabel łączący kabel anteny GPS z kontrolerem lotu. Przewody te zazwyczaj składają się z linii TX (nadajnik), RX (odbiornik), 5V i GND.

Krok 4

Ostrożnie usuń taśmę lub uchwyt mocujący moduł.

Krok

Zamontuj nowy moduł GPS w tej samej pozycji i orientacji.

- Aby uzyskać najlepszy odbiór sygnału satelitarnego, antena powinna być skierowana do góry i nie powinna znajdować się w pobliżu źródeł pola magnetycznego lub metalu.

Krok 6

Podłącz przewody TX i RX do kontrolera lotu, łącząc je krzyżowo (TX → RX, RX → TX).

Podłącz również przewody GND i 5V do odpowiednich pinów.

Krok 7

Włącz drona i sprawdź połączenie GPS za pomocą oprogramowania (np. Betaflight > zakładka GPS).

Krok 8

Poczekaj, aż moduł GPS „zablokuje się”, nawiązując połączenie z co najmniej 6 satelitami.

Po zablokowaniu system jest gotowy do lotu.

4.2.8.4. Testowanie i kalibracja

- Aby przetestować funkcję RTH, można wykonać kontrolowany lot testowy.
- Dane dotyczące prędkości i kierunku otrzymane za pośrednictwem GPS należy monitorować w interfejsie oprogramowania.
- Historię lotów i dokładność lokalizacji należy zweryfikować poprzez analizę plików dziennika GPS.

4.2.8.5. Wskazówki

- Antena GPS powinna być umieszczona jak najdalej od powierzchni metalowych i pól magnetycznych generowanych przez silniki.
- Antena powinna być zawsze skierowana do góry i izolowana od wibracji.
- Moduły GPS mogą potrzebować więcej czasu na ustalenie pozycji podczas pierwszego uruchomienia, zwłaszcza w nowych lub słabych obszarach sygnału; zaleca się cierpliwość.

Uwaga: Lokalizacja i montaż modułu GPS mają kluczowe znaczenie dla pomyślnej nawigacji drona.

4.2.9. Kamera i czujniki obrazu

Kamera jest elementem optycznym, który pozwala dronowi widzieć świat zewnętrzny i przesyłać ten obraz w czasie rzeczywistym na ekran FPV (First Person View) lub gogle pilota (rysunek 4.16). Czujniki obrazu to elementy elektroniczne, które przekształcają informacje świetlne z kamery na sygnał cyfrowy; najpopularniejsze typy to czujniki CMOS. Kamera pozwala pilotowi postrzegać otoczenie, omijać przeszkody, śledzić cele i rejestrować zarówno podczas lotów ręcznych, jak i autonomicznych.



Rysunek 4.16 Kamera drona i czujnik obrazu

4.2.9.1. Do czego służy?

- Zapewnia transmisję obrazu w czasie rzeczywistym (system FPV).
- Rejestruje filmy i zdjęcia; zazwyczaj nagrania są zapisywane na karcie SD.
- Wspiera podejmowanie decyzji dotyczących ruchu na podstawie danych wizualnych w zadaniach autonomicznych.
- Jest wykorzystywana w zaawansowanych funkcjach, takich jak wykrywanie wizualne, śledzenie celu i rozpoznawanie platformy lądowania.

4.2.9.2. Objawy awarii

- Brak obrazu na ekranie FPV.
- Problemy z wyświetlaniem, takie jak czarny ekran lub uszkodzone piksele.
- Przerwy w wyświetlaniu obrazu spowodowane luźnymi połączeniami kamery.
- Problemy z wykrywaniem światła: zbyt ciemny lub zbyt jasny obraz.
- Zakłócenia lub przerywana transmisja obrazu FPV.

4.2.9.3. Procedura wymiany i montażu

Wymagane elementy:

- Mały śrubokręt
- Stacja lutownicza (niektóre modele mogą jej wymagać)

- Pęseta
- Taśma montażowa lub podkładka antywibracyjna
- Kabel połączeniowy FPV (zwykle 3-4-pinowy)

Krok 1

Całkowicie odłącz zasilanie systemu, wyjmując baterię.

Krok 2

Zlokalizuj położenie kamery na korpusie drona (zwykle z przodu).

Krok 3

Odłącz kabel łączący kamerę. Kamery FPV mają zazwyczaj 3 piny: wyjście wideo (VTX), zasilanie (5 V) i uziemienie (GND).

Krok 4

Ostrożnie odkręć śruby lub usuń taśmę mocującą kamerę. W niektórych modelach kamera może być przykręcona do bocznej ramy.

Krok 5

Umieść nową kamerę w tej samej pozycji montażowej (rysunek 4.17). W razie potrzeby użyj gumowej podkładki antywibracyjnej.



Rysunek 4.17 Wymiana i montaż kamery drona

Krok 6

Podłącz przewody w następującej kolejności:

- Kabel wideo → do wejścia VTX
- +5V i GND → PDB lub kontroler lotu do połączenia zasilania

Krok

Uruchom drona i przetestuj obraz za pomocą wyświetlacza FPV lub gogli.

Krok 8

Jeśli obraz jest dostępny, dostosuj kąt kamery do kierunku patrzenia pilota i ustabilizuj go.

4.2.9.4. Testowanie i kalibracja

- Należy sprawdzić ostrość obrazu z kamery; jeśli jest zamazany, należy wyczyścić obiektyw.
- Jakość obrazu należy ocenić w zależności od warunków oświetleniowych (czy w ciemności występują zniekształcenia).
- Transmisja wideo przez VTX musi być nieprzerwana i stabilna.
- Opóźnienie obrazu powinno być jak najmniejsze.

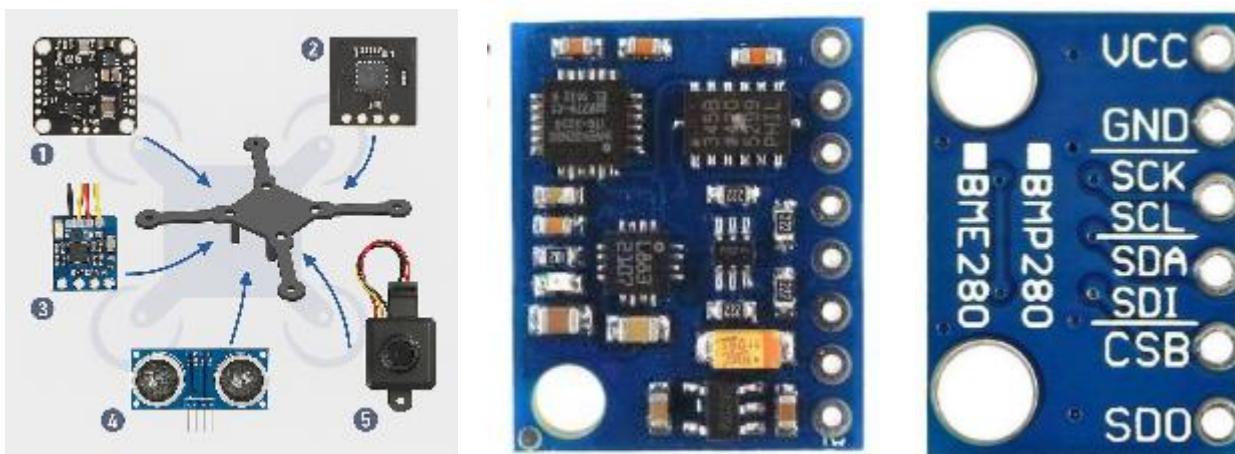
4.2.9.5. Wskazówki

- Zaleca się stosowanie osłony obiektywu, aby chronić obiektyw kamery przed zarysowaniami.
- Kable kamery i VTX należy trzymać z dala od elementów takich jak silniki i regulatory ESC, które wytwarzają pola magnetyczne.
- Wysokiej jakości kabel FPV poprawia jakość sygnału i stabilność transmisji.
- Zewnętrzna część kamery nie powinna być narażona na nadmierne zapylenie i wilgoć.

Uwaga Stabilne i niezawodne działanie kamery i systemu obrazowania ma kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa lotu FPV.

4.2.10. Czujniki (IMU, barometr, kompas itp.)

Czujniki to urządzenia elektroniczne, które w sposób ciągły przesyłają dane do kontrolera lotu, wykrywając otoczenie drona i jego własne ruchy (rysunek 4.18). Czujniki te pomagają zapewnić stabilny i kontrolowany lot, mierząc informacje dotyczące równowagi, orientacji, wysokości i pozycji drona.



Rysunek 4.18 Czujniki drona

4.2.10.1. Jakie są ich funkcje?

- **IMU (inercyjna jednostka pomiarowa):** zawiera akcelerometr i żyroskop. Dostarcza informacji o ruchu i orientacji drona w trzech osiach.
- **Barometr:** oblicza wysokość drona poprzez pomiar ciśnienia powietrza. Jest wykorzystywany do stabilizacji wysokości i funkcji wysokościomierza.
- **Kompas:** określa orientację drona względem północy magnetycznej. Ma kluczowe znaczenie dla śledzenia trasy wspomaganego przez GPS i automatycznego wyznaczania trasy.
- **Czujnik przepływu optycznego lub TOF:** mierzy odległość od ziemi podczas lądowania lub wykrywa ruch w przypadku stacjonarnego położenia.

Uwaga: Wszystkie te czujniki razem tworzą świadomość przestrzenną drona i są niezbędne dla bezpieczeństwa lotu.

4.2.10.2. Objawy awarii

- Dron nieustannie ślizga się lub driftuje w jednym kierunku.
- Podczas lądowania i startu obserwuje się drgania, skoki lub odchylenia kierunkowe.
- Tryb GPS nie działa lub nie można uzyskać blokady kierunku.
- Nie można ustabilizować wysokości z powodu błędu barometru.
- W interfejsie oprogramowania pojawiają się ostrzeżenia o błędach, takie jak „Błąd czujnika”, „Nie znaleziono żyroskopu”, „Zły stan kompasu”.

4.2.10.3. Procedura wymiany i montażu

Wymagane elementy:

- Stacja lutownicza (do czujników lutowanych)
- Szczypce do usuwania mikro złączy

- Pęseta
- Opaska ochronna przed elektrycznością statyczną
- Oprogramowanie do kalibracji (Betaflight, iNAV, Mission Planner)

Krok 1

Odłącz zasilanie systemu, wyjmując baterię.

Krok 2

Zidentyfikuj moduł lub czujnik zewnętrzny zawierający uszkodzony czujnik (zwykle znajduje się on na kontrolerze lotu (FC)).

Krok 3

Ostrożnie odłącz złącze czujnika (takie jak I2C, SPI lub UART). Jeśli czujnik jest bezpośrednio przylutowany, należy go delikatnie oddzielić za pomocą lutownicy.

Krok 4

Nowy czujnik montuje się na tym samym module w prawidłowej orientacji i kolejności pinów. Ponieważ większość czujników jest kierunkowa, zamontowanie ich do góry nogami spowoduje generowanie nieprawidłowych danych.

Krok 5

Po zakończeniu podłączania system jest ponownie zasilany.

4.2.10.4. Kalibracja czujnika (za pomocą oprogramowania)

- Kalibracja IMU: Dron umieszcza się na stałych płaszczyznach w różnych osiach (np. w menu Betaflight > Setup).
- Kalibracja kompasu: Dron jest obracany o 360° wokół każdej osi i zbierane są wartości pola magnetycznego.
- Kalibracja barometru: zazwyczaj odbywa się automatycznie, ale zaleca się ręczne testowanie w wentylowanym otoczeniu.
- GPS – ustawienie kompasu: Sprawdzane jest dopasowanie kierunku i kompasu.

4.2.10.5. Wskazówki

- Czujniki powinny być umieszczone jak najdalej od silników, regulatorów prędkości i innych elementów generujących pola magnetyczne.
- Kalibrację należy przeprowadzać w otwartej przestrzeni, z dala od zakłóceń elektromagnetycznych.

- W przypadku awarii czujnika zintegrowanego z kontrolerem lotu (FC) zazwyczaj konieczna jest całkowita wymiana płytki FC.
- Czujniki optyczne umieszczone pod podwoziem muszą być chronione przed kurzem, brudem i wilgocią.

Uwaga: Prawidłowe działanie czujników ma kluczowe znaczenie dla stabilności lotu i bezpieczeństwa drona.

4.2.11. Podwozie i elementy ochronne

Podwozie jest elementem konstrukcyjnym, który styka się z podłożem i chroni elementy elektroniczne i mechaniczne, absorbując energię uderzenia podczas lądowania (rysunek 4.19). Zapewnia ono miękkie lądowanie i pomaga dronowi ustawić się na stabilnej i wyważonej platformie.



Rysunek 4.19 Podwozie drona

Elementy ochronne obejmują osłony śmigieł, podpory korpusu, gumy amortyzujące wstrząsy, osłony anten i podobne części (rysunek 4.20). Elementy te zapewniają ochronę drona przed uderzeniami fizycznymi, takimi jak upadki, uderzenia lub tarcie.



Rysunek 4. Elementy ochronne drona20

4.2.11.1. Jakie jest ich zadanie?

- **Podwozie:** chroni korpus drona i elementy wewnętrzne, amortyzując fale uderzeniowe podczas kontaktu z twardym podłożem.
- **Osłona śmigła:** zapobiega uszkodzeniu lub zniszczeniu śmigieł w razie wypadku.
- **Osłona korpusu / amortyzator:** zapobiega uszkodzeniu wrażliwych części elektronicznych w wyniku uderzeń fizycznych.
- **Stabilizator anteny:** zapobiega pękaniu i przemieszczaniu się anten FPV.

4.2.11.2. Objawy awarii

- Dron jest niestabilny podczas lądowania lub na ziemi, przechylając się na jedną stronę.
- Podwozie może być pęknięte, złamane lub rozciągnięte.
- Elementy ochronne mogły się poluzować lub przemieścić w wyniku uderzenia.
- Jeśli podczas lotu obserwuje się zwiększone wibracje (szczególnie jeśli nie są dostępne miękkie podkładki do lądowania).

4.2.11.3. Procedura wymiany i montażu

Wymagane elementy:

- Mini śrubokręt (zwykle M2 lub M3)
- Nowy podwozie lub zapasowy zestaw ochronny
- Pęseta

- Taśma dwustronna lub podkładki montażowe (w przypadku niektórych modeli)
- Plastikowa opaska zaciskowa (opaska zaciskowa)

Krok 1

Odłącz wszystkie źródła zasilania drona, system musi być odłączony od zasilania.

Krok 2

Zidentyfikuj uszkodzone lub nieprawidłowo działające części podwozia. Zazwyczaj składa się ono z 2 lub 4 części przymocowanych do podstawy drona.

Krok 3

Odkręć śruby lub mocowania zabezpieczające podwozie. Niektóre modele mogą być wyposażone w system zatrzasków, należy je ostrożnie zdjąć.

Krok 4

Zainstaluj nowe podwozie w jego pierwotnym położeniu i symetrycznie. Stabilność wysokości ma bezpośredni wpływ na osiągi podczas startu i lądowania.

Krok 5

Włóż elementy ochronne:

- Osłona śmigła jest zwykle mocowana na poziomie śmigła lub w mocowaniu silnika.
- Podkładki amortyzujące są przyklejane do podstawy drona za pomocą taśmy dwustronnej.
- Osłony lub wsporniki anten są montowane z tyłu drona, aby zapobiec uszkodzeniu anten FPV.

Krok 6

Umieść drona na płaskiej i twardej powierzchni. Upewnij się, że wszystkie części znajdują się na tej samej wysokości i są symetryczne.

4.2.11.4. Testowanie i kontrole przed lotem

- Przed startem dron musi znajdować się na równym i stabilnym podłożu.
- Po każdym lądowaniu należy sprawdzić, czy śruby, taśmy i elementy mocujące podwozia nie są poluzowane.
- Należy sprawdzić, czy elementy ochronne nie wibrują podczas lotu.

4.2.11.5. Wskazówki

- Zamiast plastikowego podwozia należy preferować podwozie wzmocnione włóknem węglowym lub lekkie podwozie aluminiowe, które zapewniają większą trwałość.

- W przypadku dronów wykorzystywanych do celów edukacyjnych obowiązkowe jest stosowanie osłon śmigieł.
- Elementy ochronne nie powinny być zbyt ciężkie i nie powinny negatywnie wpływać na dynamikę lotu i osiągi drona.

4.2.12. Gimbal

Gimbal to elektroniczny i mechaniczny system stabilizacji, który umożliwia kamerze zamontowanej na dronie uzyskanie stabilnego i wyważonego obrazu bez drgań (rysunek 4.21). Zazwyczaj jest on wyposażony w silniki 2-osiowe (pochylenie-odchylenie) lub 3-osiowe (pochylenie-odchylenie-przechylenie). Nawet jeśli dron się porusza, kamera zamontowana na gimbalu pozostaje nieruchoma w płaszczyźnie poziomej, co pozwala uzyskać wyraźny obraz lub wideo. Gimbal może działać zarówno w trybie ręcznym, jak i automatycznym.



Rysunek 4. Gimbal

4.2.12.1. Jak ma zastosowanie?

- Zapewnia stabilność obrazu poprzez amortyzację drgań i wstrząsów występujących podczas lotu drona.
- Zapewnia wysoką jakość obrazu podczas profesjonalnych nagrań wideo i sesji zdjęciowych.
- Umożliwia zdalne sterowanie kątem kamery (np. za pomocą kontrolera FPV).
- W misjach autonomicznych jest wykorzystywany do przechwytywania obrazu i śledzenia obiektów pod określonym kątem.
- Zapewnia algorytmom przetwarzania obrazu stały punkt odniesienia.

4.2.12.2. Objawy awarii

- Jeśli kamera stale się trzęsie, drga lub funkcja stabilizacji orientacji nie działa.
- Jeśli słychać odgłosy mechaniczne lub obserwuje się nagrzewanie silników gimbała.
- Jeśli gimbal nie wykonuje ruchów kalibracyjnych po włączeniu drona.
- Jeśli gimbal nie reaguje lub nie zmienia kąta za pomocą pilota zdalnego sterowania.
- Jeśli kąt obrazu nie pozostaje stały, ale zmienia się w zależności od kierunku lotu.

4.2.12.3. Procedura wymiany i montażu

Wymagane elementy:

- Mini śrubokręt i klucz imbusowy
- Pęseta i szczypce
- Stacja lutownicza (niektóre modele)
- Zamienny gimbal (kompatybilny model)
- Kable połączeniowe (UART, sygnał serwomechanizmu itp.)

Krok 1

Całkowicie odłącz zasilanie systemu, wyjmując baterię drona.

Krok 2

Określ położenie istniejącego modułu gimbała. Zazwyczaj znajduje się on z przodu drona, w dolnej części, i jest zamontowany za pomocą gumowych pasków antywibracyjnych.

Krok 3

Ostrożnie odłącz kable połączeniowe kamery, przewód zasilający i kable sygnałowe. Oznacz każde połączenie lub zrób zdjęcie.

Krok 4

Odkręć śruby i wsporniki mocujące gimbal. Ostrożnie usuń wszystkie gumowe elementy zawieszenia.

Krok

Umieść nowy gimbal w tym samym miejscu, zachowując tę samą orientację i oś. Obiektyw kamery powinien być ustawiony w kierunku przedniej części drona.

Krok

Podłącz kable zasilające gimbała i połączenia sygnałowe do odpowiednich pinów (np. UART1 TX/RX).

Krok 7

Przeprowadź kalibrację gimbała za pomocą oprogramowania (np. Betaflight, Mission Planner, oprogramowanie układowe gimbała).

Krok 8

Przeprowadź lot testowy, aby sprawdzić prawidłowe działanie gimbała, stabilność obrazu i ruch kamery.

4.2.12.4. Testowanie i kalibracja

- Gimbał powinien wykonać ruch autokalibracji podczas uruchamiania.
- W systemie FPV nie powinno występować migotanie ani przesunięcie kierunku obrazu.
- Ruchy pochylenia i obrotu wykonywane za pomocą sterowania powinny być płynne.
- W razie potrzeby należy ponownie skonfigurować ustawienia PID i balans mocy silnika za pomocą oprogramowania.

4.2.12.5. Wskazówki

- Nie należy ręcznie wymuszać ruchu silników gimbała, ponieważ może to spowodować ich uszkodzenie.
- Aparat i gimbał należy regularnie czyścić, aby chronić je przed nadmiernym zapyleniem, wilgocią i wibracjami.
- Kable aparatu i gimbała muszą być krótkie i dobrze zamocowane, ponieważ luźne kable mogą zakłócać działanie gimbała.
- Należy regularnie sprawdzać aktualizacje oprogramowania i firmware'u gimbała.

Uwaga: Prawidłowe działanie systemu gimbała ma kluczowe znaczenie dla jakości obrazu, bezpieczeństwa FPV i profesjonalnego filmowania.

4.2.13. Okablowanie i złącza

Okablowanie w systemach dronów stanowi podstawową infrastrukturę, która umożliwia połączenie wszystkich elementów elektronicznych (silników, ESC, kontrolera lotu, akumulatora, GPS, odbiornika, kamery itp.). Dzieli się ono na trzy podstawowe grupy: kable przesyłowe zasilania, linie nośne sygnału i linie przesyłowe danych. Układ okablowania ma ogromne znaczenie dla wydajności elektrycznej drona, stabilności sygnału i bezpieczeństwa.

4.2.13.1. Jak jest jego zadanie?

- Zapewnia bezpieczny przepływ energii elektrycznej z akumulatora do ESC, silników i płyt sterujących.
- Przesyła sygnały sterujące między takimi elementami, jak ESC, odbiornik, czujniki.
- Zapewnia transmisję danych, takich jak telemetria, obraz i GPS (UART, I2C, SPI, SBUS itp.).
- Pomaga utrzymać prawidłową polaryzację i poziomy napięcia w całym systemie.
- W systemach modułowych złącza ułatwiają wymianę części.

4.2.13.2. Powszechnie stosowane typy kabli i złączy

- Kable zasilające: grube kable izolowane silikonem 12-16 AWG (między akumulatorem a ESC-PDB)
- Kable sygnałowe: pojedyncze lub wielokrotne przewody połączeniowe 26-30 AWG (FC-ESC-do odbiornika)
- Kable FPV: 3-4-pinowe linie transmisji wideo (kamera do VTX)
- Typy złączy:
 - XT60 / XT90: do podłączenia akumulatora
 - JST / PH / SH: do podłączenia odbiornika i czujnika
 - Serwo (3-pinowe): do sygnału + 5 V + GND
 - USB / Micro-USB / Type-C: do konfiguracji i aktualizacji

4.2.13.3. Objawy awarii

- System w ogóle się nie włącza (przerwanie kabla lub nieprawidłowe podłączenie)
- ESC lub FC wyłącza się i włącza z powodu nieregularnego zasilania
- Nagłe przerwy w zasilaniu lub utrata sygnału podczas lotu
- Brak transmisji danych telemetrycznych, utrata obrazów
- Zwarcie spowodowane nieprawidłowym lutowaniem (zapach spalenizny, dym)

4.2.13.4. Prawidłowa procedura okablowania i podłączania

Wymagane składniki:

- Stacja lutownicza i wysokiej jakości drut lutowniczy
- Nożyczki, szczypce, pęseta
- Rurki żaroodporne i opalarka
- Multimetr (do testowania ciągłości i napięcia)
- Zestaw złączy (XT60, JST, serwo itp.)
- Opaski zaciskowe i spirale organizacyjne

Krok

Odłącz zasilanie całego systemu, wyjmij akumulator.

Krok 2

Przygotuj kable do podłączenia o odpowiedniej grubości i izolacji. Ich długość powinna być krótka i odpowiednia do ich funkcji.

Krok 3

Ostrożnie zdejmij izolację z końcówek kabli, które mają być lutowane, i pokryj je warstwą lutownia.

Krok 4

Przylutuj szybko i czysto.

- Pady lutownicze dla kabli zasilających muszą być mocne.
- Należy unikać odwrotnego podłączenia kabli sygnałowych.

Krok 5

Po lutowaniu zaizoluj rurką, w razie potrzeby użyj opalarki.

Krok 6

Sprawdź poprawność połączeń za pomocą multimetru (zwłaszcza zacisków + i -).

Krok 7

Zabezpiecz kable za pomocą opasek zaciskowych lub podkładek izolacyjnych. Luźne i chwiejne połączenia mogą być przyczyną przyszłych awarii.

4.2.13.5. Testowanie i kalibracja

- Test napięcia należy przeprowadzić na wszystkich liniach zasilających za pomocą multimetru.
- Sprawdź, czy porty kabli sygnałowych (UART1, SBUS, i2C) są podłączone do właściwego portu.
- Sprawdź, czy wszystkie podłączone komponenty są rozpoznawane przez interfejs oprogramowania (ESC, odbiornik, GPS itp.).
- Przed włączeniem systemu należy ponownie sprawdzić wszystkie trasy kabli.

4.2.13.6. Wskazówki

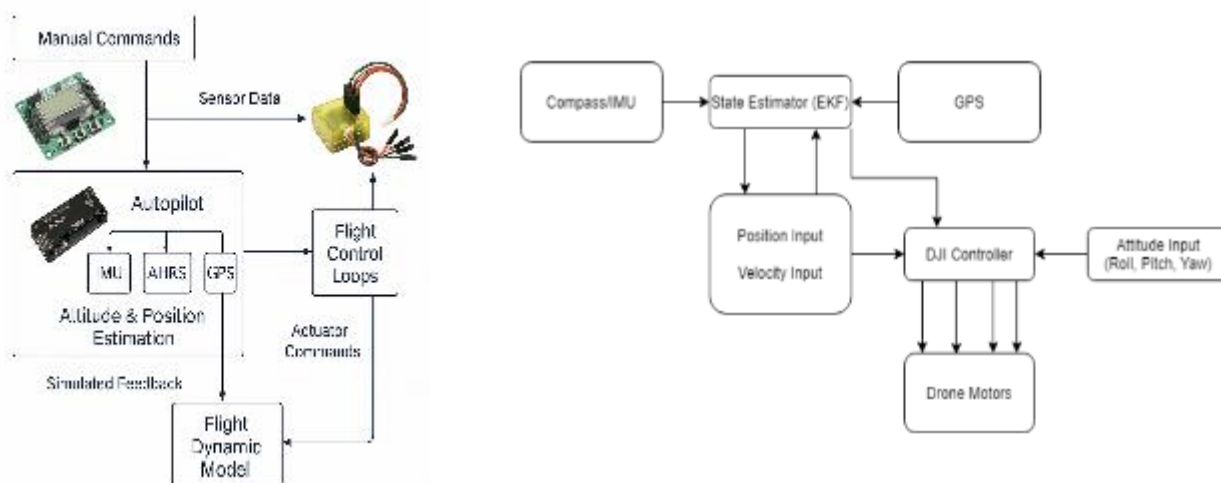
- Kable sygnałowe muszą być trzymane z dala od kabli silnika (ochrona przed zakłóceniami).
- Należy stosować kodowanie kolorami: czerwony (+), czarny (-), biały/żółty (sygnał).

- Zwróć uwagę na jakość lutowania; złe lutowanie może prowadzić do długotrwałych awarii.
- Schematyczne planowanie przebiegu kabli w każdym nowym systemie ułatwia konserwację w przyszłości.
- Należy unikać niepotrzebnie długich kabli, ponieważ zwiększają one masę i powodują zagrzenie systemu.

Uwaga: Prawidłowe okablowanie i użycie złączy ma zasadnicze znaczenie dla bezpiecznego i bezawaryjnego działania drona. Najmniejszy błąd w okablowaniu może zagrazić całemu systemowi.

4.3. Procedury instalacji i aktualizacji oprogramowania

W niniejszym rozdziale przedstawiono kompleksowy przewodnik dotyczący instalacji, aktualizacji i testowania funkcjonalności oprogramowania do sterowania lotem dronów. Zawiera on również podstawowe informacje na temat architektury oprogramowania dronów, technologii symulacyjnych i globalnego ekosystemu oprogramowania (rysunek 4.22). Celem jest umożliwienie nawet użytkownikom bez doświadczenia w zakresie oprogramowania zrozumienie i zastosowanie podstawowych pojęć. W ten sposób przedstawiono zarówno wiedzę teoretyczną, jak i praktyczne zastosowania.



Rysunek 4.22 Schematy systemu oprogramowania do sterowania lotem dronów i architektura

4.3.1. Czym jest oprogramowanie dronów?

Oprogramowanie dronów to zestaw programów, które regulują przepływ danych między kontrolerem lotu, czujnikami, GPS, silnikami i innymi komponentami elektronicznymi, integrują systemy i wykonują operacje lotnicze dronów. Oprogramowanie to jest zazwyczaj zorganizowane w dwóch głównych warstwach:

- **Oprogramowanie sterujące lotem (oprogramowanie układowe):**

Wykrywa ono aktualny stan lotu drona, przetwarza dane z czujników, przekazuje polecenia lotu do napędów silników i zapewnia stabilny, bezpieczny lot drona. Warstwa ta współdziała bezpośrednio ze sprzętem i tworzy mechanizm podejmowania decyzji w czasie rzeczywistym. Na przykład oprogramowanie układowe open source PX4 i ArduPilot należą do tej kategorii.

- **Stacja kontroli naziemnej (GCS):**

Warstwa oprogramowania, która umożliwia operatorom dronów komunikację z

dronem, planowanie misji, określanie tras lotu i monitorowanie danych telemetrycznych w czasie rzeczywistym za pośrednictwem komputera z systemem operacyjnym typu open source () lub urządzenia mobilnego. Popularne oprogramowanie GCS to między innymi QGroundControl i Mission Planner.

- **Dodatkowe warstwy i integracja:**

Niektóre zaawansowane systemy mogą zawierać dodatkowe warstwy oprogramowania, takie jak moduły autonomicznego lotu, sztucznej inteligencji i przetwarzania obrazu. Moduły te zwiększają możliwości drona w zakresie wykrywania otoczenia i wykonywania złożonych zadań.

Główne elementy oprogramowania drona można podsumować w tabeli 4.2.

Tabela 4.2 . Podstawowe komponenty oprogramowania drona

Element	Opis
FC (kontroler lotu)	Działa jako centralny mózg drona, przetwarzając wszystkie dane z czujników i wysyłając polecenia do silników.
Oprogramowanie układowe	Jest to podstawowa warstwa oprogramowania zainstalowana na FC. Można ją aktualizować i determinuje ona osiągi lotu.
GCS (stacja kontroli naziemnej)	Jest to oprogramowanie działające na komputerze lub urządzeniu mobilnym użytkownika, zapewniające planowanie lotu, monitorowanie danych i aktualizacje oprogramowania.
Sterownik USB / szeregowy	Sterowniki umożliwiające wymianę danych między dronem a komputerem.
IMU / AHRS / INS	Systemy czujników określające orientację, przyspieszenie i położenie drona (IMU: inercyjny układ pomiarowy, AHRS: system odniesienia położenia i kierunku, INS: inercyjny system nawigacyjny)
MAVLink	Jest to lekki i znormalizowany protokół, który umożliwia komunikację między dronem a naziemną stacją kontrolną.
Bootloader / tryb DFU	Specjalne tryby pracy używane podczas instalacji i aktualizacji oprogramowania układowego.

4.3.2. Znaczenie i funkcje oprogramowania

Oprogramowanie drona ma kluczowe znaczenie nie tylko dla sterowania sprzętem, ale także dla bezpieczeństwa, dokładności i wydajności lotu. Odpowiednie oprogramowanie zwiększa stabilność drona, dokładnie przetwarza dane z czujników i uruchamia automatyczne interwencje (np. RTH - Return To Home) w sytuacjach awaryjnych.

4.3.3. Architektura oprogramowania drona

Oprogramowanie autopilota drona działa podczas lotu w następujący sposób:

- Gromadzenie danych z czujników: Czujniki takie jak IMU, GPS, AHRS i INS gromadzą w czasie rzeczywistym informacje o ruchu, położeniu i kierunku drona.
- Pętla sterowania: zebrane dane są przekazywane do pętli sterowania lotem, gdzie są analizowane i tworzony jest mechanizm decyzyjny.
- Generowanie poleceń: Kontroler wysyła polecenia do silników i innych elementów wykonawczych zgodnie z przetworzonymi danymi.
- Komunikacja ręczna i telemetryczna: Sterowanie ręczne i zdalne monitorowanie są zapewnione dzięki sygnałom sterującym RC i danym telemetrycznym.
- Zarządzanie sterownikami: Sterowniki szeregowo zarządzają przepływem danych wejściowych (z czujników) i wyjściowych (do silników i innych elementów wykonawczych).
- Model dynamiki lotu: Wydajność lotu jest testowana poprzez symulację charakterystyki lotu (stosowaną zwłaszcza w symulacjach).

4.3.4. Procedura instalacji oprogramowania

Przygotowanie:

Krok 1

Dron jest podłączony do komputera za pomocą kabla USB.

Krok 2

Na komputerze zainstalowane jest wymagane oprogramowanie (np. Betaflight Configurator).

Krok 3

Należy zainstalować sterowniki portu szeregowego (np. Zadig).

Proces instalacji oprogramowania:

Krok 1

Podłącz kontroler lotu do komputera za pomocą kabla USB.

Krok 2

Otworzy się aplikacja GCS (Betaflight, iNav, Mission Planner itp.).

Krok 3

Wybierz model kontrolera lotu (np. STM32F405).

Krok 4

Wybierz odpowiednią wersję oprogramowania układowego w zakładce „Firmware Flasher”.

Krok 5

Naciśnij przycisk „Flash Firmware”, aby rozpocząć instalację.

Krok 6

Po załadowaniu oprogramowania układowego FC uruchamia się ponownie, a system jest automatycznie rozpoznawany.

Uwaga: W niektórych modelach kontrolerów lotu może być konieczne naciśnięcie przycisku „BOOT” na urządzeniu lub przełączenie się do trybu DFU (Device Firmware Upgrade) w celu załadowania oprogramowania układowego.

Aktualizacja ESC (elektronicznej regulacji prędkości)

Krok

Bateria drona jest zainstalowana.

Krok 2

Otworzy się oprogramowanie do aktualizacji ESC, takie jak BLHeli Suite lub BLHeli Configurator.

Krok 3

ESC są wprowadzane i aktualizacja oprogramowania układowego jest wykonywana, jeśli jest dostępna.

Krok 4

Kierunki silników są testowane za pomocą oprogramowania i w razie potrzeby odwracane.

4.3.5. Zaawansowane platformy oprogramowania dla dronów

Zaawansowane platformy oprogramowania dla dronów można podsumować w tabeli 4.3.

Tabela 4.3 Zaawansowane platformy oprogramowania dla dronów

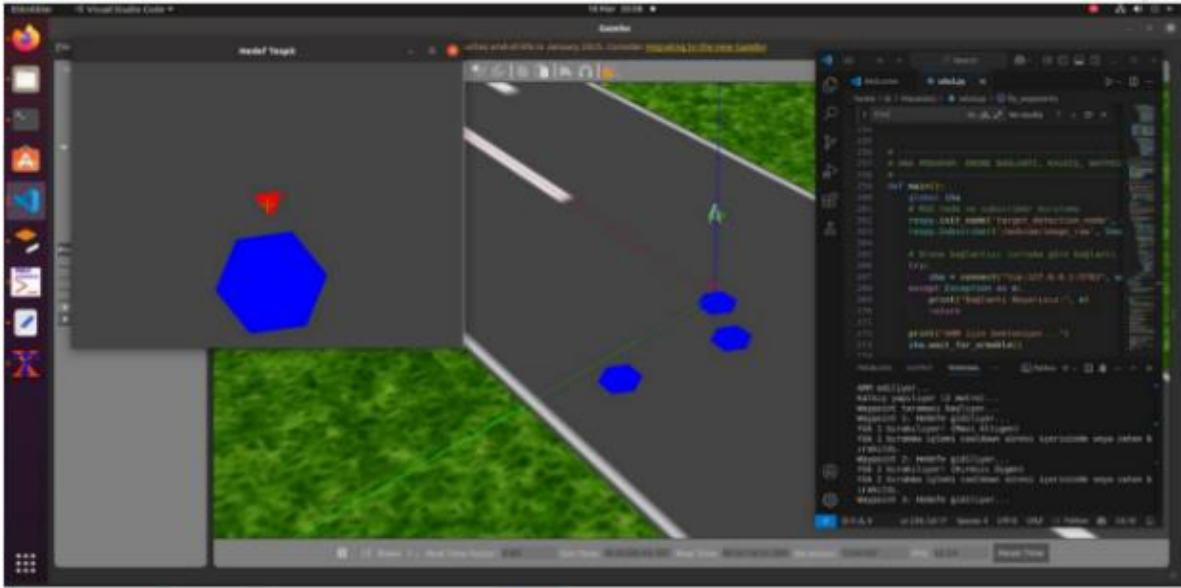
Platforma	Funkcja
PX4 Autopilot	Jest to otwarte i modułowe oprogramowanie do sterowania lotem, odpowiednie do zastosowań przemysłowych.
ArduPilot	Oprogramowanie typu open source obsługujące wiele platform, takich jak samoloty, wielowirnikowce, pojazdy lądowe i morskie.
DJI SDK	Zestaw SDK do zaawansowanych aplikacji mobilnych i integracji dronów w systemach zamkniętych, opracowany przez DJI.
ROS	System operacyjny Robot Operating System jest wykorzystywany do logiki lotu wspomaganej sztuczną inteligencją, misji autonomicznych i aplikacji SLAM (Simultaneous Localisation and Mapping).

4.3.6. Systemy symulacyjne: SITL i HITL

SITL (Software in the Loop): SITL to symulacja lotu wykonywana na poziomie oprogramowania bez użycia rzeczywistego sprzętu. Oprogramowanie sterujące lotem jest uruchamiane w środowisku wirtualnym na komputerze i symulowana jest dynamika lotu (rysunek 4.23). Metoda ta przyspiesza procesy tworzenia i testowania oprogramowania, eliminuje potrzebę stosowania sprzętu i umożliwia badanie sytuacji ryzykownych w

bezpiecznym środowisku. Jest ona stosowana zwłaszcza do weryfikacji algorytmów sterowania lotem.

HITL (Hardware in the Loop): Symulacja HITL odbywa się poprzez zintegrowanie rzeczywistego sprzętu kontrolera lotu ze środowiskiem symulacyjnym. W ten sposób oprogramowanie i sprzęt są testowane razem. Dane z czujników i polecenia sterujące są przesyłane między sprzętem a symulatorem w czasie rzeczywistym. HITL ma kluczowe znaczenie dla oceny rzeczywistej wydajności kontrolera lotu i wykrywania problemów związanych z integracją sprzętu i oprogramowania.



Rysunek 4.23 . Środowisko symulacji dronów typu Software-in-the-Loop (SITL)

Szczegółowe informacje porównawcze dotyczące narzędzi do symulacji dronów podsumowano w tabeli 4.4.

Tabela 4.4 Narzędzia do symulacji porównawczej

Symulator	Obsługa SITL	Obsługa HITL	Obsługa ROS	Opis
AirSim	✓	✓	♦ (pośredni)	Platforma symulacyjna oparta na silniku Unreal Engine, opracowana przez firmę Microsoft. Służy do testowania sztucznej inteligencji pojazdów bezzałogowych oraz przetwarzania obrazów.
Gazebo	✓	✓	✓	Oferuje pełną integrację z systemem operacyjnym Robot Operating System (ROS). Tworzy realistyczne środowiska lotów dronów z silnikami fizycznymi i symulacją czujników.

JMavSim	✓	✓	✓	Lekki i szybki symulator zintegrowany z ekosystemem PX4. Idealny do podstawowych testów dynamiki lotu i nawigacji.
FlightGear	✓	✓	✗	Symulator lotu typu open source z dużą mapą świata i realistycznymi warunkami pogodowymi. Jest zazwyczaj preferowany do celów szkoleniowych i ogólnych symulacji lotniczych.
X-Plane	✓	✓	✗	Profesjonalny i komercyjny symulator lotu. Zapewnia wysoki realizm fizyczny i szczegółową dynamikę lotu. Odpowiedni dla zaawansowanych użytkowników i szkolenia pilotów komercyjnych.
MATLAB/Simulink	✓	✓	♦	Wykorzystywany głównie do celów akademickich i badawczych, systemów sterowania i modelowania dynamicznego.

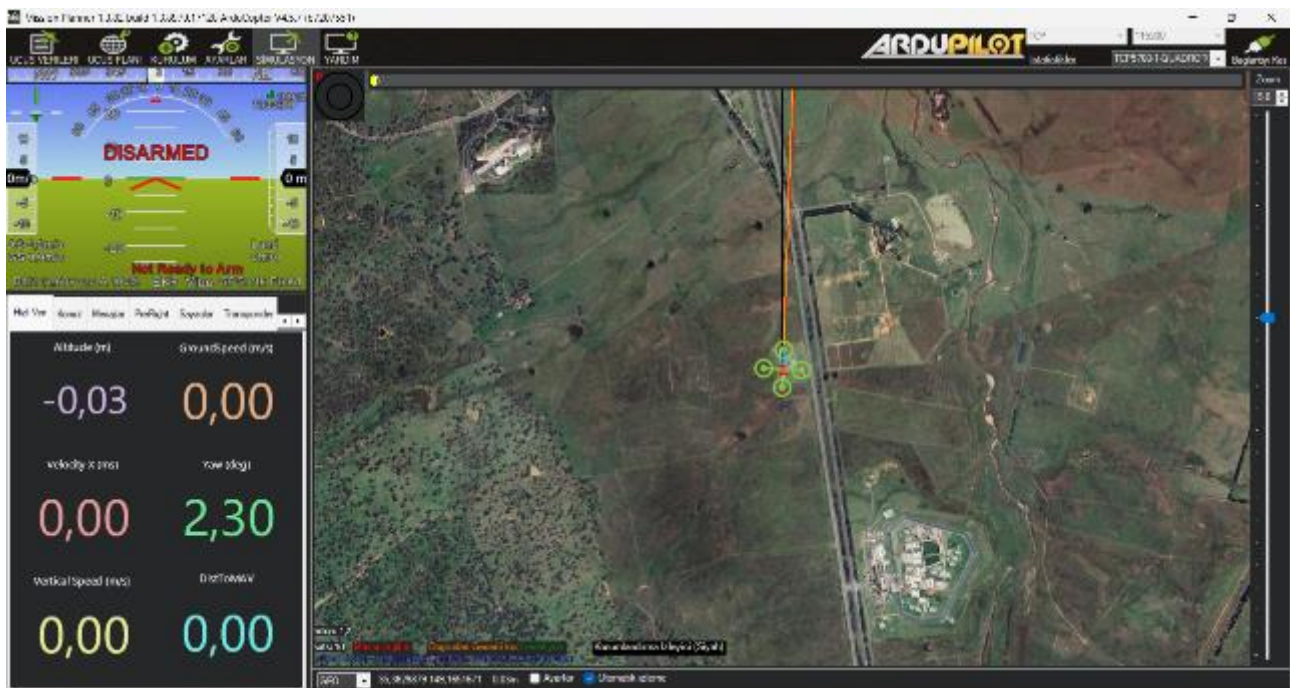
4.3.7. GCS (oprogramowanie do kontroli naziemnej) – szczegółowa recenzja

QGroundControl:

- Kompatybilność: Obsługa protokołów PX4 i MAVLink.
- Funkcje: Przyjazny dla użytkownika interfejs graficzny umożliwia planowanie misji, wyświetlanie telemetrii na żywo, szczegółowe ustawianie parametrów lotu i rysowanie trasy na mapie. Dostępny w wersji mobilnej i stacjonarnej.
- Zalety: Otwarte oprogramowanie, regularnie aktualizowane, obsługa wielu platform.

Mission Planner:

- Kompatybilność: Opracowany dla pojazdów opartych na ArduPilot.
- Funkcje: Szczegółowe ustawienia lotu, kalibracja czujników, zaawansowane rejestrowanie i analiza danych po locie (rysunek 4.24).
- Obszar zastosowania: Preferowany przez profesjonalnych użytkowników i badaczy.



Rysunek 4.24 Interfejs Mission Planner – dane telemetryczne i śledzenie lokalizacji na mapie

MAVProxy:

- Kompatybilność: Działa ze wszystkimi dronami opartymi na MAVLink.
- Funkcje: Oparty na wierszu poleceń, zapewnia sterowanie i automatyzację operacji za pośrednictwem terminala przy niskim zużyciu zasobów.
- Zalety Idealny do projektów automatyzacji i integracji dzięki swojej lekkiej strukturze.

UGCS (Universal Ground Control Software):

- Kompatybilność: Kompatybilne z wieloma platformami dronów.
- Cechy: Zapewnia profesjonalne rozwiązania, takie jak zaawansowane planowanie misji oparte na mapach, zarządzanie flotą, zarządzanie przestrzenią powietrzną i automatyzacja misji.
- Obszar zastosowania: Nadaje się do komercyjnych i przemysłowych operacji z wykorzystaniem dronów.

Dodatkowe informacje

- Protokół MAVLink: Standardowy protokół komunikacji między GCS a dronem. Dane telemetryczne, polecenia i informacje z czujników są przesyłane za pośrednictwem tego protokołu.
- Znaczenie symulacji: Umożliwia testowanie oprogramowania i sprzętu przed rzeczywistym lotem, zmniejsza koszty i ryzyko.
- Wybór oprogramowania GCS: Zależy od potrzeb użytkownika, typu drona i zakresu misji. QGroundControl jest preferowany do prostych misji, Mission Planner do zaawansowanych analiz, a UGCS do operacji komercyjnych.

4.3.8. Procedury tworzenia kopii zapasowych/przywracania parametrów

W niniejszym rozdziale opisano proces tworzenia kopii zapasowej wszystkich parametrów konfiguracyjnych (ustawień PID, kalibracji czujników, trybów lotu, wartości granicznych itp.) wykorzystywanych w systemie sterowania lotem drona oraz przywracania ich w razie potrzeby. Proces ten pozwala uniknąć straty czasu i wysiłku w przypadku resetowania systemu, aktualizacji oprogramowania układowego lub przejścia na inny kontroler lotu. Jest to kluczowy krok zarówno dla bezpieczeństwa, jak i zrównoważonego zarządzania systemem.

4.3.8.1. Czym jest tworzenie kopii zapasowej i dlaczego jest to ważne?

Wszystkie ustawienia dokonane w oprogramowaniu sterującym lotem drona są przechowywane w pamięci systemu. Ustawienia te mają bezpośredni wpływ na charakterystykę lotu.

Proces tworzenia kopii zapasowej pozwala na zapisanie tych ustawień w postaci zewnętrznego pliku i umożliwia ponowne wykorzystanie tej samej konfiguracji w przypadku awarii lub wymiany systemu.

4.3.8.2. Zalety

- Łatwe przywrócenie wszystkich ustawień po aktualizacji oprogramowania układowego
- Przenoszenie podobnych ustawień między różnymi platformami dronów
- Analiza historycznych parametrów w celu wykrywania problemów i porównywania
- Odtwarzanie standardowych ustawień w instytucjach edukacyjnych

4.3.8.3. Parametry, które można zarchiwizować

- Wartości PID
- Ustawienia RC i definicje trybów
- Informacje dotyczące kalibracji ESC
- Dane kalibracji czujników (IMU, kompas, barometr)
- Ustawienia trybu awaryjnego
- Konfiguracje gimbała, GPS, OSD
- Automatyczne zadania lotu (punkty trasy)

4.3.8.4. Procedura tworzenia kopii zapasowej

Wymagane oprogramowanie

- Konfigurator Betaflight (dla multikopterów)
- Mission Planner (dla systemów opartych na ArduPilot)
- QGroundControl (dla systemów PX4)

1. Podłączenie systemu:

Krok 1

Dron jest podłączony do komputera za pomocą kabla USB.

Krok 2

Otwieramy odpowiednie oprogramowanie do sterowania z ziemi i nawiązujemy połączenie.

2. Kopia zapasowa parametrów:

Betaflight:

Krok 3

Przejdź do zakładki „CLI”.

Krok 4

Wpisz polecenie diff all → wyświetlą się tylko zmienione parametry.

Krok 5

Wynik jest zaznaczany w całości i eksportowany jako plik z rozszerzeniem .txt.

Alternatywa: wszystkie konfiguracje można pobrać za pomocą polecenia dump.

Mission Planner:

Krok 6

Wybierz „Pełna lista parametrów” lub „Pełne drzewo parametrów” w zakładce „CONFIG/TUNING”.

Krok 7

Naciśnij przycisk „Zapisz do pliku” w prawym dolnym rogu i wyeksportuj jako plik z rozszerzeniem .param.

QGroundControl:

Krok 8

W zakładce „Parametry” kliknij ikonę kopii zapasowej w prawym górnym rogu.

Krok 9

Zostanie on zapisany na komputerze jako plik .params.

Procedura przywracania

Krok

Nowy lub zresetowany kontroler lotu jest podłączony do komputera.

Krok

Wybierz przywrócenie parametrów za pomocą oprogramowania GCS.

Betaflight:

Krok 3

Przejdź do zakładki CLI.

Krok 4

Wklej wcześniej otrzymane dane wyjściowe diff all do okna CLI.

Krok 5

System zostanie ponownie uruchomiony za pomocą polecenia save.

Mission Planner:

Krok 6

Plik .param jest ładowany za pomocą opcji „Load from File” (Załaduj z pliku).

Krok 7

Parametry są zapisywane w systemie poprzez naciśnięcie przycisku „Write Params” (Zapisz parametry).

QGroundControl:

Krok 8

Importowany jest wcześniej utworzony plik kopii zapasowej .params.

Krok 9

System automatycznie rozpoznaje i stosuje parametry.

4.3.8.5. Wskazówki i ostrzeżenia

- Wersja oprogramowania sprzętowego używana przed operacją przywracania musi być zgodna z wersją oprogramowania sprzętowego z kopii zapasowej. W przeciwnym razie niektóre parametry mogą być nieprawidłowe.
- Należy zachować ostrożność podczas przenoszenia zbędnych parametrów do dronów o innej strukturze sprzętowej (np. innym IMU lub ESC), należy stosować tylko wspólne parametry.
- Pliki diff można edytować; ręcznie można przywrócić tylko żądane ustawienia.
- Nazwanie plików kopii zapasowej datą, modelem drona i informacjami o oprogramowaniu układowym pozwala uniknąć nieporozumień.

4.3.8.6. Dodatkowe zalecenia dotyczące bezpieczeństwa

- Po każdej ważnej zmianie ustawień należy wykonać nową kopię zapasową.
- Kopie zapasowe powinny być przechowywane w chmurze lub na dyskach zewnętrznych.
- W przypadku organizacji zajmujących się szkoleniami i zarządzaniem flotą zaleca się stosowanie scentralizowanego repozytorium kopii zapasowych.

Uwaga: Operacje tworzenia kopii zapasowych i przywracania parametrów zapewniają znaczne korzyści pod względem czasu i kosztów, zwłaszcza w procesach rozwoju, testowania i eksploatacji. Wyrobienie sobie nawyku wykonywania tych czynności ma kluczowe znaczenie dla użytkowników na wszystkich poziomach.

4.3.9. Procedury przywracania ustawień fabrycznych

W tej sekcji omówiono przywracanie oprogramowania kontrolera lotu drona do ustawień fabrycznych. Reset jest wymagany w takich przypadkach, jak złożone błędy konfiguracji, niestabilne zachowanie podczas lotu, niezgodne parametry lub przekazanie urządzenia nowemu użytkownikowi. Po tym procesie urządzenie powraca do domyślnych ustawień fabrycznych oprogramowania i jest gotowe do ponownej konfiguracji.

4.3.9.1. Co to jest reset i kiedy się go wykonuje?

Reset fabryczny przywraca wszystkie parametry karty sterowania lotem do wartości predefiniowanych (domyślnych) przez system.

Zazwyczaj stosuje się go w następujących przypadkach:

- Niemożność cofnięcia nieprawidłowych ustawień oprogramowania
- Nieoczekiwane zachowanie systemu po zainstalowaniu nowego oprogramowania układowego
- Przywrócone parametry powodują niestabilny lot

- Resetowanie systemu podczas przekazywania drona innemu użytkownikowi/studentowi
- Czysty start w celu rozwiązywania problemów z konfiguracją PID, czujników lub UART

Ostrzeżenia

- Resetowania nie można cofnąć. Wszystkie bieżące ustawienia zostaną usunięte.
- Zdecydowanie zaleca się wykonanie kopii zapasowej parametrów przed resetowaniem.
- W przypadku problemów sprzętowych reset nie zadziała; należy najpierw przeprowadzić test fizyczny.

4.3.9.2. Procedura resetowania (zgodnie z oprogramowaniem)

1. Resetowanie za pomocą konfiguratora Betaflight

Krok 1

Dron jest podłączony do komputera za pomocą kabla USB.

Krok

Otwórz Betaflight i połącz się z kontrolerem lotu.

Krok 3

Przejdź do zakładki CLI w menu po lewej stronie.

Krok 4

Wpisz następujące polecenie:

- *defaults*
- *save*

Krok 5

System uruchamia się ponownie i wszystkie ustawienia powracają do domyślnych wartości fabrycznych.

Alternatywa:

Reset można również wykonać za pomocą ekranu ładowania oprogramowania układowego, wybierając opcję Resetuj ustawienia lub Całkowite wymazanie układu w menu głównym.

2. Resetowanie za pomocą Mission Planner

Krok

Otwórz Mission Planner i podłącz drona.

Krok

Przejdź do zakładki Config/Tuning (Konfiguracja/Dostrajanie).

Krok

W sekcji Pełna lista parametrów kliknij opcję Przywróć domyślne ustawienia w prawym dolnym rogu.

Krok 4

Ostrzeżenia zostaną potwierdzone, a system automatycznie powróci do wartości domyślnych.

Krok

Naciśnij przycisk Zapisz parametry i uruchom ponownie system.

3. Resetowanie za pomocą QGroundControl

Krok

Podłącz drona przez USB i uruchom QGroundControl.

Krok

Przejdź do zakładki Parameters (Parametry).

Krok

Wybierz przycisk „Resetuj wszystko do wartości domyślnych” w prawym górnym rogu.

Krok 4

Po potwierdzeniu system automatycznie uruchomi się ponownie.

Resetowanie za pomocą przycisku sprzętowego (dostępne w niektórych kontrolerach lotu)

Niektóre kontrolery lotu można zresetować za pomocą fizycznego przycisku „RESET” lub kombinacji przycisków „BOOT + POWER”.

Ponieważ sposób użycia różni się w zależności od modelu karty, należy sprawdzić dokumentację producenta.

Kolejne kroki:

Po przywróceniu ustawień fabrycznych należy wykonać następujące czynności:

- Należy ponownie skalibrować czujniki (IMU, kompas, barometr).
- Należy ponownie skonfigurować tryby lotu i ustawienia sterowania.
- Należy przeprowadzić kalibrację ESC i test kierunku silnika.
- W razie potrzeby wybrane parametry można przywrócić za pomocą kopii zapasowej diff.

4.3.9.3. Wskazówki

- Resetowanie po aktualizacji oprogramowania układowego może zapobiec niezgodnościom systemu.
- Polecenie domyślne resetuje tylko parametry, nie zmienia oprogramowania układowego.
- Jeśli przenosisz tę samą płytkę do innej platformy drona, reset zapewnia czysty start.
- W przypadku dronów wykorzystywanych do celów edukacyjnych zaleca się resetowanie przed każdym uczniem.

Uwaga: Przywrócenie ustawień fabrycznych pozwala niedoświadczonym użytkownikom pozbyć się błędnych konfiguracji i zwiększyć bezpieczeństwo lotu. Dlatego każdy użytkownik powinien być w stanie wykonać tę procedurę bezpiecznie i świadomie.

4.4. Praktyczna ocena procesów wymiany części

Celem tej sekcji jest ocena praktycznych kompetencji osób przeprowadzających operacje wymiany części w bezzałogowych statkach powietrznych (UAV). Ocena obejmuje tylko 13 części wymienionych w punkcie **4.2 Identyfikacja części drona, wymiana i rodzaje awarii.**

Zakres oceny:

Procesy wymiany następujących 13 podstawowych części będą oceniane krok po kroku pod kątem dokładności zastosowania, zgodności z zasadami bezpieczeństwa, prawidłowego użycia narzędzi i czasu trwania procesu:

1. Kontroler lotu (FC)
2. ESC (elektroniczny regulator prędkości)
3. Silnik
4. Śmigło
5. Akumulator
6. PDB (płyta rozdzielcza zasilania)
7. Odbiornik
8. Moduł GPS

9. Kamera / czujniki obrazu
10. Czujniki (IMU, barometr, kompas)
11. Podwozie
12. Elementy ochronne (klatka śmigła itp.)
13. Test po montażu (moc, połączenie, sprawdzenie kierunku)

4.4.1. Metody oceny

Proces oceny zostanie przeprowadzony zgodnie z tabelą 4.5. Przykładowa lista kontrolna i system punktacji zostały przedstawione w tabeli 4.6 i tabeli 4.7.

Tabela 4.5. Proces oceny

Metoda	Opis
Zadanie praktyczne	Każdy uczeń otrzymuje losowo przydzieloną część i ma za zadanie wykonać praktyczny demontaż/montaż.
Obserwacja z listą kontrolną	Trener obserwuje i ocenia każdy etap zgodnie z listą kontrolną.
Kryteria czasowe	Czas realizacji zadania powinien mieścić się w określonych granicach.
Bezpieczeństwo i zgodność z normami ESD	Oceniane są opaski antystatyczne, bezpieczeństwo lutowania i prawidłowe użycie narzędzi.

Tabela 4.6. Przykładowa lista kontrolna (zmiana kontrolera lotu)

Kryteria	Ocena	Opis
Przerwanie dostawy energii	5	Przed rozpoczęciem procesu należy wyjąć baterię
Oznakowanie i sfotografowanie kabli	10	Czy wszystkie połączenia są prawidłowo udokumentowane?
Demontaż starej części	10	Czy lutowanie zostało wykonane bez uszkodzeń?
Prawidłowy montaż nowej części	20	Dokładna kontrola kierunku i dokręcania
Dokładność połączeń	20	Czy występuje odwrotna polaryzacja lub luźny kabel?
Jakość lutowania	10	Ryzyko zimnego lutowania / zwarcia

Kryteria	Ocena	Opis
Test końcowy (połączenie USB / oświetlenie LED)	15	Czy FC inicjuje się prawidłowo?
Ogólny porządek i bezpieczeństwo pracy	10	Korzystanie z narzędzi i sprzętu, czystość miejsca pracy
Łącznie: 100 punktów		

Tabela 4.7. Skala punktacji

Zakres punktów	Poziom osiągnięć
90	Doskonały – wszystkie procedury zostały wykonane w całości i bez błędów
75	Pomyślny – zadowalający, z wyjątkiem drobnych błędów
60	Wymaga poprawy – występują nieistotne braki
0	Niekorzystny wynik – brak znajomości procedury składania wniosków

Cykl pomiarowy i certyfikacja

- W wyniku oceny dla każdego studenta sporządzany jest indywidualny raport.
- W razie potrzeby przysługuje prawo do ponownego złożenia wniosku i wprowadzenia poprawek.
- Wszystkie operacje są dokumentowane i archiwizowane za pomocą nagrań wideo/zdjęć.

4.5. Podstawowe wykorzystanie sprzętu i zastosowania w dronach

Głównym celem tej sekcji jest przekazanie podstawowych informacji na temat sprzętu, z którego użytkownik może korzystać podczas naprawy, konserwacji, serwisowania lub usuwania usterek dronów, oraz zaprezentowanie różnych technik.

4.5.1. Wykorzystanie i zastosowania multimetru w dronach

4.5.1.1. Cel

W niniejszym rozdziale wyjaśniono podstawy obsługi multimetru oraz sposób i sytuacje, w których urządzenie to jest wykorzystywane w systemach dronów. Multimetr jest

nieodzownym urządzeniem pomiarowym służącym do pomiaru wartości elektrycznych, takich jak napięcie, prąd, rezystancja i wykrywanie usterek. W systemach dronów składających się z elementów elektronicznych czynności kontrolne, które można wykonać za pomocą multimetru, sprawiają, że procesy konserwacji są bezpieczne i skuteczne. W tym rozdziale użytkownicy poznają podstawowe techniki pomiarowe i będą w stanie zrozumieć, jak przeprowadzać praktyczne testy diagnostyczne, kontrolę połączeń i testy bezpieczeństwa za pomocą multimetru.

4.5.1.2. Czym jest multimetr?

Multimetr to cyfrowy lub analogowy przyrząd pomiarowy umożliwiający pomiar wielu wielkości elektrycznych. Zazwyczaj posiada następujące tryby pomiarowe:

- Napięcie stałe ($V_{=}$): Pomiar napięcia stałego (np. kontrola baterii)
- Napięcie prądu przemiennego ($V_{\sim}$): Pomiar napięcia przemiennego (w niektórych systemach ładowania dronów)
- Rezystancja (Ω): pomiar wartości rezystancji w obwodzie lub komponentach
- Test ciągłości (tryb ciągłości/brzęczyka): sprawdza przewodność między dwoma punktami (sygnał dźwiękowy)
- Pomiar prądu (A): pomiar prądu płynącego przez obwód (zwykle w połączeniu szeregowym)

Tabela 4.8. Obszary zastosowania multimetru w dronach

Obszar zastosowania	Rodzaj pomiaru	Opis
Kontrola napięcia akumulatora	Napięcie prądu stałego	Sprawdzone jest, czy akumulator litowo-polimerowy znajduje się w prawidłowym zakresie napięcia.
Test zwarcia na kablach zasilających	Ciągłość (brzęczyk)	Sprawdzone jest, czy nie ma zwarcia między zaciskami + i - akumulatora.
ESC – test połączenia silnika	Ciągłość / opór	Sprawdzone jest połączenie kabli od ESC do silnika.
Sprawdzenie integralności punktów lutowniczych	Ciągłość	Sprawdź, czy lutowane końcówki są ze sobą połączone.

Obszar zastosowania	Rodzaj pomiaru	Opis
Sprawdzenie złącza	Ciągłość	Sprawdzana jest przewodność złączy, takich jak XT60, serwo, JST.
Kontrola napięcia wyjściowego PDB	Napięcie prądu stałego	Mierzone jest prawidłowe napięcie na wyjściach płyty rozdzielczej zasilania (PDB).
Test regulatora napięcia	Napięcie stałe	Sprawdzana jest dokładność wyjść 5 V i 12 V.
Test elementów pasywnych, takich jak bezpieczniki, rezystory itp.	Rezystancja	Sprawdzone jest, czy elementy działają zgodnie z obwodem.

4.5.1.3. Podstawowe zastosowanie: krok po kroku

Wymagane materiały:

- Multimetr cyfrowy
- Sondy multimetru (czerwona: dodatnia / czarna: ujemna)
- Dron (zaleca się rozpoczęcie pracy w stanie wyłączonym)

1. Pomiar napięcia prądu stałego (test akumulatora):

- Ustaw multimetr w pozycji „DCV” (np. skala 20 V).
- Czarna sonda jest umieszczana w kontakcie z ujemnym (-) biegunem baterii, a czerwona sonda jest umieszczana w kontakcie z dodatnim (+) biegunem baterii.
- Odczyt wartości:
 - $\approx 11,1\text{--}12,6$ V dla akumulatora 3S
 - Dla akumulatora 4S powinna wynosić $\approx 14,8\text{--}16,8$ V.

2. Kontrola zwarcia (test ciągłości):

- Multimetr przełącza się w tryb „Buzzer / Continuity” (Brzęczyk / Ciągłość).
- Urządzenie wydaje sygnał dźwiękowy, gdy dwie sondy dotkną linii zwartej.
- Jeśli sygnał dźwiękowy jest słyszalny między zaciskami dodatnim i ujemnym w gnieździe połączenia akumulatora, oznacza to zwarcie.

3. Pomiar rezystancji (testowanie lutów lub elementów):

- Przełącz multimetr do pozycji „ Ω ”.

- Dwie sondy należy dotknąć do lutowanych lub podłączonych przewodów.
- Wartość między 0 a 1 Ω oznacza prawidłowe połączenie. Jeśli wartość jest nieskończona lub opór jest bardzo wysoki, może to oznaczać rozłączenie.

4. Test napięcia wyjściowego PDB:

- Podłącz baterię (z zachowaniem ostrożności).
- Za pomocą multimetru mierzy się napięcie wyjściowe PDB wynoszące 5 V lub 12 V.
- Niskie lub zerowe napięcie, awaria PDB lub usterka lutowania.

4.5.1.4. Ostrzeżenia dotyczące bezpieczeństwa

- Podczas pomiaru przy podłączonym akumulatorze należy ostrożnie obchodzić się z sondami, aby uniknąć zwarcia.
- Jeśli ma być wykonywany pomiar prądu, urządzenie musi być podłączone szeregowo i należy użyć portu „10A” urządzenia.
- Nie należy przeprowadzać testu zwarcia przy podłączonym akumulatorze.
- W przypadku linii o wysokim natężeniu prądu należy najpierw przeprowadzić test napięcia, a następnie test ciągłości.

4.5.1.5. Wskazówki

- Zabezpieczenie przewodów multimetru za pomocą kolorowych zacisków krokodylkowych pozwala uwolnić ręce.
- Po każdej nowej instalacji przed włączeniem systemu należy przeprowadzić test zwarcia.
- Pierwsze miejsce, które należy sprawdzić w przypadku awarii: napięcie akumulatora i przewody zasilające.
- W przypadku pracy z wieloma dronami utworzenie oznaczonych punktów testowych zapewnia systematyczną kontrolę.

Uwagi: Multimetr jest najbardziej podstawowym i kluczowym narzędziem nie tylko dla profesjonalnych techników, ale także dla hobbystów korzystających z dronów. Prawidłowe jego użycie pozwala uniknąć wielu problemów i zapewnia bezpieczeństwo procesów konserwacyjnych.

4.5.2. Podstawowe zastosowania i zastosowania oscyloskopu w dronach

W tym rozdziale zostaną przedstawione sygnały (PWM, UART, sygnały ESC, wyjścia czujników), które można testować za pomocą oscyloskopu w systemach dronów, a użytkownicy będą mogli wykonać podstawowe odczyty przebiegów, analizy częstotliwości, napięcia i ciągłości sygnału.

4.5.2.1. Cel

Celem tego rozdziału jest przekazanie podstawowych informacji na temat funkcji oscyloskopu, sposobów jego użytkowania oraz obszarów zastosowań, zwłaszcza w systemach dronów. Oscyloskop jest niezbędnym urządzeniem testowym do obserwacji zmian sygnałów elektrycznych w czasie, zwłaszcza w zakresie jakości sygnału, protokołów komunikacyjnych i analizy szumów.

4.5.2.2. Czym jest oscyloskop?

Oscyloskop to urządzenie, które może natychmiastowo wyświetlać wykres **amplitudy w funkcji czasu (V-t)** sygnałów elektrycznych w obwodzie. Pozwala on analizować charakterystykę sygnałów, taką jak **kształt, częstotliwość, amplituda, okres i zawartość szumów**.

Tabela 4.9. Podstawowe wielkości, które można mierzyć za pomocą oscyloskopu

Parametr pomiarowy	Opis
Amplituda (Vpp/Vmax)	Różnica napięcia między szczytami sygnału
Częstotliwość (Hz)	Liczba powtórzeń sygnału w ciągu jednej sekundy
Okres (T)	Czas trwania sygnału w jednym cyklu
Szerokość PWM (ms)	Czas trwania impulsu w sygnałach ESC i serwomechanizmu
Szum / tętnienia	Niepożądane wahania sygnału na liniach zasilających
UART / SBUS	Dokładność i czas trwania protokołów komunikacji szeregowej

Tabela 4.10. Zastosowania oscyloskopów w systemach dronów

Zastosowanie	Opis
Analiza sygnału ESC PWM	Testowany jest czas trwania impulsu i częstotliwość sygnałów FC → ESC.
Kontrola połączenia UART	Analizowany jest przepływ danych między FC a GPS, odbiornikiem lub modulem telemetrycznym.
Test wyjścia czujnika (np. barometru, IMU)	Obserwowana jest reakcja napięciowa czujników z wyjściem analogowym.
Analiza szumów PDB regulatora	/ Wykrywanie tętnień jest wykonywane na liniach wyjściowych 5 V / 12 V.

Zastosowanie	Opis
Test sygnału gimbała / serwomechanizmu	Kontroluje się płynność i częstotliwość sygnałów PWM.

4.5.2.3. Podstawowe zastosowanie oscyloskopu: krok po kroku

Niezbędny sprzęt:

- Oscyloskop cyfrowy (minimum 2 kanały)
- Zestaw sond (z opcją tłumienia 1x/10x)
- Otwarty system drona lub płytką testową do zastosowania

1. Podłączanie sondy:

- Czarna sonda zaciskowa (GND) łączy się z uziemieniem systemu.
- Końcówka sondy (zwykle BNC → końcówka haczykowa) jest podłączana do mierzonej linii sygnałowej.

2. Ustawienia kanałów:

- Wybrany jest kanał 1, ustawienie **tłumienia sondy 1x/10x** jest prawidłowe.
- Wprowadzono ustawienia napięcia/podziałki i czasu/podziałki (na przykład 2 V/podziałka – 1 ms/podziałka).
- Wartości są optymalizowane, aż kształt sygnału pojawi się na wyświetlaczu.

3. Ustawienie wyzwalacza:

- Tryb wyzwalania (Edge, Auto) jest ustawiony w celu ustabilizowania sygnału.
- Wybrano narastające lub opadające zbocze, poziom wyzwalania ustawiono na środek sygnału.

4. Przegląd:

- Analizowana jest częstotliwość, amplituda, cykl pracy (dla PWM) i kształt sygnału.
- W przypadku nieregularnego przebiegu, szumu lub spadku napięcia, jest to odnotowywane.
- W sygnałach danych szeregowych sprawdzana jest dokładność bitów startowych/stopowych lub szybkości transmisji.

4.5.2.4. Praktyczny przykład testu drona: analiza ESC PWM

- Po włączeniu kontrolera lotu sonda jest podłączana do pinu sygnałowego ESC.
- Częstotliwość obserwowanego sygnału PWM wynosi zazwyczaj około **400 Hz - 600 Hz**.
- Czas trwania impulsu PWM waha się od 1000 μ s (0%) do 2000 μ s (100%) w zależności od położenia przepustnicy.

- Nieregularny przebieg → może to oznaczać problem z zakłóceniami / połączeniem.

4.5.2.5. Ostrzeżenia dotyczące bezpieczeństwa

- Nie należy mierzyć napięcia akumulatora bezpośrednio za pomocą oscyloskopu, ponieważ może to spowodować uszkodzenie urządzenia.
- Jeśli przewód uziemiający sondy jest podłączony do niewłaściwej linii, istnieje ryzyko zwarcia.
- W przypadku wykonywania pomiarów w różnych systemach należy sprawdzić współczynnik tłumienia sondy.
- Umieszczenie sondy jest bardzo ważne w przypadku linii danych o wysokiej częstotliwości (może powodować zakłócenia).

4.5.2.6. Wskazówki

- Łatwo jest przeciąć dowolny kabel sygnałowy i utworzyć specjalne punkty testowe do pomiaru.
- Tryby przechowywania oscyloskopu mogą być wykorzystywane do długoterminowej analizy sygnału.
- Poziom tętnienia regulatora powinien wynosić ≤ 50 mV podczas testowania wyjść PDB.
- Sygnały PWM powinny pojawiać się na oscyloskopie jako przebieg prostokątny.

Uwaga: Wykorzystanie oscyloskopów odgrywa kluczową rolę w zaawansowanej diagnostyce i debugowaniu systemów dronów. Szczególnie w przypadku dokładności poziomów sygnałów, bezpieczeństwa połączeń i stabilności systemu, prawidłowe korzystanie z tego urządzenia jest niezbędną umiejętnością dla inżynierów systemowych i techników.

4.5.3. Techniki lutowania i zastosowania w dronach

4.5.3.1. Cel

Celem tego rozdziału jest szczegółowe wyjaśnienie procesu **lutowania**, podstawowej umiejętności w montażu obwodów elektronicznych, oraz nauczanie, jak technika ta jest stosowana w systemach dronów. Lutowanie umożliwia trwałe połączenie kabli, złączy, elementów obwodów i podkładek na płytce. Prawidłowe lutowanie ma kluczowe znaczenie dla bezpiecznych, trwałych i dokładnych połączeń transmisji sygnału w systemach dronów.

4.5.3.2. Czym jest lutowanie?

Lutowanie to łączenie dwóch lub więcej części metalowych za pomocą **stopionego drutu lutowniczego**. Proces ten jest wspomagany ciepłem i zapewnia zarówno **wytrzymałość mechaniczną**, jak i **przewodność elektryczną** połączeń. Powszechnie stosowanym

stopem lutowniczym jest 60% cyny i 40% ołowiu (Sn/Pb) lub lutowniki bezołowiowe zgodne z dyrektywą RoHS.

Tabela 4.11. Podstawowe materiały stosowane w lutowaniu

Materiał	Opis
Lutownica (ołówek lutowniczy)	Narzędzie ręczne o różnych mocach, które wytwarza ciepło z końcówki
Drut lutowniczy	Drut na bazie cyny z topnikiem wewnątrz
Topnik (materiał topnikowy)	Umożliwia rozprowadzenie lutowia po powierzchni i usunięcie tlenków
Pompa lutownicza / siatka druciana	Służy do usuwania wadliwego lutu
Pęseta/szczypce odporne na wysoką temperaturę	Służą do mocowania elementów
Makaron i opalarka	Zapewnia izolację kabla po lutowaniu

Tabela 4.12. Główne punkty wymagające lutowania w dronie

Element	Punkt lutowania
PDB (płytki dystrybucji zasilania)	Kable zasilające ESC, złącze akumulatora
ESC – połączenie silnika	3-fazowy kabel silnika → pady ESC
FC – odbiornik / GPS / telemetria	Kable sygnałowe UART / I2C
Kamera – VTX	Linie wideo i zasilające
Moduły czujników	I2C, SPI lub bezpośrednie połączenia lutowane

4.5.3.3. Podstawowe kroki lutowania

1. Oczyszczyć powierzchnię: Podkładka lub końcówka kabla przeznaczona do lutowania musi być czysta i wolna od tlenków. W razie potrzeby przetrzyj ją alkoholem i bawełną.
2. Ustaw temperaturę lutownicy: idealna temperatura do ogólnego lutowania wynosi 320–370 °C. Nadmierne ciepło może uszkodzić pady.
3. Przygotuj drut lutowniczy i grot: Grot jest cynowany (wstępnie powlekany) poprzez lekkie dotknięcie drutu lutowniczego do grotu lutownicy.
4. Lutowanie:

- Dotknij końcówką lutownicy powierzchni przeznaczonej do lutowania.
- Druk lutowniczy dotyka rozgrzanego punktu i topi się.
- Lut powinien rozprzecz się równomiernie i być „błyszczący i gładki”.
- Po wycofaniu lutownicy połączenie musi pozostać nieruchome (do momentu ostygnięcia).

5. Kontrola i czyszczenie: Po ostygnięciu sprawdza się połączenie. W razie potrzeby pozostałości topnika usuwa się za pomocą alkoholu izopropylowego.

4.5.3.4. Przykład zastosowania w dronie: lutowanie gniazda akumulatora XT60

Materiały: złącze XT60, kabel silikonowy 12 AWG, druk lutowniczy, rurka

Kroki

1. Końce kabli są odizolowane i cynowane.
2. Określa się końce + i - złącza XT60.
3. Przewody są lutowane do złącza (w krótkim czasie, poprzez kontakt).
4. Miejsca lutowania są izolowane rurką.
5. Test ciągłości przeprowadza się za pomocą multimetru.

Tabela 4.13. Typowe błędy lutowania

Rodzaj błędu	Opis
Zimne lutowanie (zimne połączenie)	Matowa i popękana powierzchnia, słaby kontakt elektryczny
Nadmiar lutowia	Nadmiar drutu → ryzyko zwarcia
Niewystarczające ogrzewanie	Lut nie przylega do powierzchni, występuje słabe połączenie
Pęknięcie podkładki	Podkładka karty może się podnieść po dłuższym wystawieniu na działanie ciepła

4.5.3.5. Bezpieczeństwo i wskazówki

- Lutowanie należy przeprowadzać w dobrze wentylowanym pomieszczeniu (dym jest szkodliwy).
- Aby zapewnić bezpieczeństwo, podczas lutowania należy używać okularów ochronnych i rękawic.
- Podczas lutowania na płytce czas działania lutownicy powinien być krótki, aby uniknąć rozpraszania ciepła na inne elementy.
- Zawsze zaleca się sprawdzenie punktów lutowania za pomocą multimetru.

- Po lutowaniu kable muszą być zamocowane i nie mogą pozostawać swobodnie zwisające.

Uwaga: Wysokiej jakości połączenie lutowane jest podstawowym warunkiem długotrwałego, bezpiecznego i stabilnego działania systemu drona. Nieprawidłowe lutowanie, zwłaszcza w połączeniach ESC, akumulatora i sygnału, może prowadzić do awarii systemu i ryzyka pożaru.

ROZDZIAŁ 5

Dokumentacja i komunikacja

5.1. Formularze rejestru konserwacji

Przed każdym użyciem bezzałogowego statku powietrznego, zwanego dalej dronem, należy upewnić się, że jest on w dobrym stanie technicznym. W tym celu zaleca się prowadzenie szczegółowej dokumentacji stanu technicznego drona, jego serwisowania, napraw i konserwacji. W zależności od złożoności konstrukcji, rodzaju wykonywanych zadań, wielkości drona, przewożonych środków (w tym materiałów i substancji niebezpiecznych), a także lokalizacji i zakresu konserwacji, dokumentacja ta może być przechowywana w jednej księdze lub w kilku oddzielnych rejestrach.

Dokumentacja może być również przechowywana w formie elektronicznej, na przykład w postaci programu komputerowego lub aplikacji mobilnej, jeśli pozwalają na to przepisy krajowe. Dane te powinny być archiwizowane (w razie potrzeby wraz z kopiami zapasowymi), tak aby można było odtworzyć pełną historię przeprowadzonych napraw i konserwacji, a także informacje na temat zaangażowanych zasobów, materiałów, sprzętu i personelu.

W przypadku wykorzystania bezzałogowego statku powietrznego personel obsługujący drona musi być w stanie określić jego stan techniczny, czy jest on w pełni, częściowo lub w ogóle niezdolny do działania. Dokumentacja określająca stan techniczny drona ma na celu określenie jego stanu technicznego i potwierdzenie, że wszystkie niezbędne okresowe przeglądy zostały przeprowadzone zgodnie z harmonogramem oraz że stan drona pozwala mu na wykonywanie przewidzianych zadań. Dokumentacja stanu technicznego drona powinna również zawierać informacje o wszystkich aktualizacjach oprogramowania i konfiguracjach systemu drona, które mogą mieć wpływ na bezpieczeństwo i funkcjonalność drona.

Jeśli dron jest w pełni sprawny, personel obsługujący może wykonać zadanie przy użyciu drona. Jeśli dron nie jest sprawny, nie można wykonywać zadań przy użyciu drona. Jeśli jednak dron jest częściowo sprawny, personel musi być świadomy usterek i ograniczeń drona (można stworzyć listę niesprawnych elementów i ograniczeń w użytkowaniu drona). Należy zauważyć, że podczas korzystania z drona do lotów personel musi mieć bezpośredni

dostęp do informacji dotyczących napraw i konserwacji, które odzwierciedlają bezpośredni stan techniczny drona i jego użyteczność. Szczegółowe informacje dotyczące konkretnej konserwacji (wydajność, użycie narzędzi, zasoby itp.) nie muszą być bezpośrednio dostępne dla osoby wykonującej loty, ale muszą być archiwizowane i dostępne do wglądu w razie potrzeby.

Aby zapewnić prawidłowy proces naprawy i konserwacji, poprzedza go planowanie i zgromadzenie zasobów niezbędnych do przeprowadzenia napraw i konserwacji w celu zapewnienia gotowości UAV. Dokumentacja sprawozdawcza natomiast dostarcza informacji na temat wykonanych prac i umożliwia prawidłowe przeprowadzenie procesu planowania.

Dokumentacja planowania odnosi się do dokumentów, które są tworzone przed rozpoczęciem czynności serwisowych lub konserwacyjnych. Służy ona do planowania, organizowania i przygotowywania wszystkich zadań związanych z dronami. Dokumentacja planowania obejmuje harmonogram konserwacji oraz plan regularnych kontroli i konserwacji dronów. Ponadto plan zarządzania zasobami obejmuje planowanie zasobów ludzkich, materialnych i finansowych niezbędnych do utrzymania gotowości operacyjnej dronów. Dokumentacja planistyczna umożliwia systematyczne i skuteczne planowanie usług oraz zapewnia zgodność z wymogami regulacyjnymi, pomaga w alokacji zasobów i minimalizuje ryzyko. Dokumentacja ta musi określać częstotliwość, zakres oraz zasoby i materiały niezbędne do wykonania konserwacji. Bardzo ważnym czynnikiem jest określenie czasu potrzebnego dla personelu, sprzętu i miejsc konserwacji, co ma ogromne znaczenie dla sprawnego wykonywania zadań. Kluczowe znaczenie mają tutaj planowanie finansowe i zaopatrzenie.

Okresowe planowanie konserwacji dronów odnosi się do regularnych czynności konserwacyjnych, które są niezbędne do utrzymania sprzętu w dobrym stanie technicznym i gotowości operacyjnej. Dokumentacja planowania musi określać rodzaj kontroli, częstotliwość jej wykonywania oraz zakres prac (w tym zaangażowane zasoby – siła robocza, środki i materiały).

Dokumentacja ta dotyczy:

- kontrolę techniczną – codzienną (sprawdzanie ogólnego stanu drona, baterii, śmigieł i czujników przed każdym lotem);
- kontrola po locie (sprawdzenie, czy dron nie uległ uszkodzeniu podczas misji i czy wszystkie systemy działają prawidłowo);

- konserwację po określonej liczbie godzin lotu – przeglądy zalecane przez producenta po określonej liczbie godzin lotu, które mogą obejmować wymianę zużytych części, aktualizacje oprogramowania, kalibrację czujników i inne czynności techniczne;
- kontrola roczna – bardziej szczegółowa kontrola, która może obejmować bardziej kompleksowe testy wydajności i bezpieczeństwa, wymianę kluczowych komponentów i aktualizacje oprogramowania;
- naprawy – doraźne (usuwanie usterek lub awarii, które mogły wystąpić nieoczekiwanie) i po zdarzeniu (naprawy po uszkodzeniach wynikających z wypadków lub awarii);
- aktualizacje i modyfikacje – aktualizacje oprogramowania (instalacja najnowszych aktualizacji oprogramowania w celu poprawy funkcjonalności, bezpieczeństwa lub kompatybilności z nowymi systemami) oraz modyfikacje sprzętu (dodawanie nowych komponentów lub modyfikowanie istniejących w celu poprawy wydajności, trwałości lub spełnienia nowych wymagań operacyjnych).

Dokumentacja planowania powinna zawierać informacje na temat wykonywania usług, daty ostatniego serwisu/konserwacji oraz daty następnego.

Osobną kwestią jest regularne szkolenie osób wykonujących naprawy i konserwację dronów, które również powinno być zaplanowane i na które należy zarezerwować odpowiednie środki finansowe. Dokumentacja planistyczna pozwala na właściwe zarządzanie warsztatami i planowanie dostaw oraz materiałów do serwisowania i konserwacji, a także na planowanie wykorzystania powierzchni warsztatowej i personelu.

Dokumentacja wykonawcza składa się z dokumentów, które są tworzone podczas realizacji działań naprawczych i konserwacyjnych. Służą one do rejestrowania faktycznie wykonanych czynności. Dokumentacja wykonawcza obejmuje raporty serwisowe, szczegółowe raporty z przeprowadzonych przeglądów i napraw, zawierające daty, opisy prac, wykaz zasobów i materiałów (w tym części) oraz zaangażowany personel. Dokumentacja operacyjna powinna również zawierać dane dotyczące testów po naprawie, wyniki lotów testowych oraz wszelkie uwagi dotyczące dalszej eksploatacji drona. Dokumentacja operacyjna rejestruje rzeczywiste działania, co umożliwia monitorowanie i analizę procesów, dostarcza dowodów zgodności z procedurami i przepisami oraz ułatwia identyfikację problemów i wdrażanie środków naprawczych.

Dokumentacja powinna zawierać dokładne i przejrzyste zapisy wszystkich czynności serwisowych, naprawczych i konserwacyjnych przeprowadzonych na bezzałogowym statku powietrznym. Informacje zawarte w dokumentacji powinny obejmować: dokładną datę zakończenia każdego zadania serwisowego, naprawczego lub konserwacyjnego; szczegółowy opis rodzaju wykonanych prac (np. okresowa kontrola, naprawa uszkodzeń, wymiana części, aktualizacja oprogramowania) lub odniesienie do odpowiedniej procedury serwisowej określającej zakres wykonanych prac, użyte materiały, zasoby i narzędzia; informacje o wszystkich wymienionych częściach, zasobach i materiałach, w tym numerach katalogowych, ilości, stanie przed i po wymianie; identyfikację personelu zaangażowanego w prace serwisowe i naprawcze; potwierdzenie uzyskania specjalistycznych akredytacji i certyfikatów, jeżeli komponenty drona lub środki, materiały lub wyposażenie, które on przewozi, wymagają takich akredytacji i certyfikatów; zakończenie naprawy lub serwisu (jeśli wymagane) po sprawdzeniu, czy dron działa prawidłowo. W przypadku awarii, nieprzeprowadzenia konserwacji itp. dokumentacja musi wyraźnie wskazywać, że dron nie może być używany do wykonywania zadań lub może być używany tylko z ograniczeniami. Zaleca się potwierdzenie braku zatwierdzenia odpowiednimi informacjami, a także zatwierdzenie przywrócenia drona do użytku odpowiednimi informacjami.

Dokumentacja powinna również zawierać historię usterek, przeprowadzone testy diagnostyczne, wyniki testów i zalecenia techniczne dotyczące dalszej konserwacji. Dokumentacja wdrożeniowa musi zawierać wszystkie użyte materiały eksploatacyjne (np. smary, płyny, filtry) i specjalistyczne narzędzia wraz z ich numerami seryjnymi i datą ostatniej kalibracji.

Ponadto zaleca się posiadanie dokumentacji technicznej dotyczącej specjalistycznych środków, takiej jak karty charakterystyki środków i materiałów, które zawierają niezbędne informacje na temat właściwości środków i materiałów, sposobu ich obchodzenia się z nimi, informacji dotyczących zdrowia i bezpieczeństwa, informacji dotyczących bezpieczeństwa przeciwpożarowego itp.

Dokumentacja sprawozdawcza po zakończeniu działań odnosi się do dokumentów, które są tworzone po zakończeniu działań naprawczych i konserwacyjnych. Służy ona do analizy, sprawozdawczości i archiwizacji.

Kategoria ta obejmuje raporty dotyczące stanu technicznego, okresowe raporty oceniające stan techniczny dronów, zawierające zalecenia dotyczące przyszłych działań konserwacyjnych. Archiwizacja dokumentów polega na systematycznym przechowywaniu

wszystkich dokumentów związanych z eksploatacją i konserwacją dronów, zgodnie z wymogami regulacyjnymi. Analizy wydajności to raporty analizujące skuteczność działań konserwacyjnych, zawierające wnioski i sugestie dotyczące optymalizacji. Dokumentacja pokontrolna umożliwia retrospektywną analizę działań i wyciąganie wniosków, zapewnia zgodność z wymogami regulacyjnymi dotyczącymi przechowywania dokumentów oraz pomaga w ciągłym doskonaleniu procesów napraw i konserwacji. Dokumentacja sprawozdawcza powinna wspierać planowanie zakupów części zamiennych, materiałów eksploatacyjnych i materiałów, a także angażowanie warsztatów i personelu.

Regularne raportowanie i analiza danych zawartych w dokumentacji umożliwia optymalizację procesów logistycznych i operacyjnych, co przekłada się na zwiększenie wydajności i bezpieczeństwa eksploatacji dronów. Dokumentacja ta powinna również zawierać dane dotyczące utylizacji materiałów niebezpiecznych.

Aby zapewnić przejrzystość i spójność dokumentacji, zaleca się, aby była ona prowadzona w formie papierowej lub elektronicznej (oprogramowanie serwisowe, dedykowane aplikacje).

Szablony do prowadzenia dokumentacji – np. dzienniki kontroli, raporty z napraw, karty okresowej konserwacji. Formularze powinny być znormalizowane, przejrzyste i jednolite, aby umożliwić łatwe wprowadzanie i odczytywanie danych. Ułatwia to zarówno dokumentowanie czynności konserwacyjnych, jak i późniejsze archiwizowanie i analizowanie działań.

Procedury autoryzacyjne – dokumentacja powinna jasno wskazywać osoby odpowiedzialne za zatwierdzenie powrotu drona do eksploatacji po konserwacji lub naprawie. Należy określić formę potwierdzenia (podpis, pieczęć, autoryzacja elektroniczna) oraz sposób rejestrowania decyzji w rejestrach.

System klasyfikacji usterek – zaleca się wprowadzenie jednolitej klasyfikacji usterek na:

- krytyczne – uniemożliwiające użytkowanie drona,
- istotne – ograniczające zakres zadań,
- drobne – nie mające wpływu na bezpieczeństwo lotu, ale wymagające rejestracji i planowania usunięcia.

Ważnym elementem jest integracja z systemem zarządzania bezpieczeństwem (SMS) – dokumentacja powinna być powiązana z systemem SMS w celu analizowania zdarzeń,

wykrywania trendów dotyczących usterek oraz wdrażania środków zapobiegawczych i ostrożnościowych.

Okres przechowywania dokumentacji – zaleca się przechowywanie dokumentów dotyczących serwisowania, napraw i konserwacji przez co najmniej 5 lat lub zgodnie z obowiązującymi przepisami krajowymi. Dokumentacja może być przechowywana w formie papierowej lub elektronicznej, pod warunkiem zapewnienia bezpieczeństwa, integralności i możliwości odtworzenia pełnej historii serwisowej.

W środowisku technicznym, w którym działają specjaliści ds. napraw i konserwacji bezzałogowych statków powietrznych (UAV), dokumentacja techniczna służy nie tylko jako rejestr, ale przede wszystkim jako środek komunikacji. Jest ona kluczowym elementem umożliwiającym skuteczny transfer informacji między członkami zespołu, przełożonymi, klientami i organami nadzorczymi. Dobrze prowadzona dokumentacja zapewnia zgodność z procedurami, umożliwia ocenę jakości pracy, wspiera bezpieczeństwo operacyjne i stanowi podstawę do audytów i certyfikacji.

Dokumentacja techniczna UAV nie jest jednolita – składa się z wielu różnych formularzy, które pełnią odrębne funkcje i wymagają różnych kompetencji. Dokumenty te muszą być nie tylko poprawne pod względem merytorycznym, ale także przejrzyste, uporządkowane, kompletne i łatwo dostępne dla decydentów. Standardy zawodowe UAV (OSE) wyraźnie wskazują na potrzebę posiadania kompleksowej dokumentacji operacyjnej, konserwacyjnej i komunikacyjnej oraz wymagają od techników umiejętności jej tworzenia, analizowania i wykorzystywania w procesach naprawczych i decyzyjnych.

5.1.1. Rodzaje dokumentacji

5.1.1.1. Dokumenty operacyjne

Kategoria ta obejmuje dokumenty wykorzystywane podczas bieżącej eksploatacji bezzałogowych statków powietrznych. Są to przede wszystkim:

- Standardowe procedury operacyjne (SOP) – znormalizowane procedury operacyjne opisujące krok po kroku, jak przeprowadzać inspekcje, naprawy, testy i inne czynności.
- Zlecenia pracy (WO) – zlecenia pracy zawierające szczegółowe instrukcje, listę wymaganych materiałów, terminy realizacji i osoby odpowiedzialne.
- Listy kontrolne – listy kontrolne przed i po locie, mające na celu zapewnienie, że wszystkie etapy są wykonywane zgodnie z procedurą.

Są to dokumenty instruktażowe i koordynacyjne – ich celem jest zapewnienie, że cała załoga działa w sposób jednolity i zgodnie z ustalonymi standardami.

5.1.1.2. Dokumentacja techniczna i konserwacyjna

Obejmuje ona wszystkie dokumenty związane z diagnostyką, naprawami i konserwacją bezzałogowych statków powietrznych (UAV):

- Dzienniki konserwacji – dzienniki konserwacji, w których odnotowuje się działania techniczne, daty, części zamienne i osoby odpowiedzialne.
- Raporty napraw – szczegółowe raporty napraw zawierające opis usterki, diagnozę, podjęte działania naprawcze i wyniki końcowych testów.
- Biuletyny serwisowe i TSL (Technical Service Letters) – aktualizacje od producentów bezzałogowych statków powietrznych dotyczące np. nowych wymagań konserwacyjnych lub wykrytych wad produkcyjnych.

Technicy UAV muszą być w stanie samodzielnie prowadzić taką dokumentację, analizować jej treść i formułować zalecenia dotyczące dalszych działań.

5.1.1.3. Dokumentacja komunikacyjna (profesjonalne dokumenty komunikacyjne)

Są to dokumenty, których głównym celem jest przekazywanie informacji między członkami zespołu, klientem lub organem nadzorczym:

- Raporty dla klienta – raporty końcowe dla klienta, zawierające opis wykonanych usług, ocenę stanu bezzałogowego statku powietrznego oraz zalecenia operacyjne.
- Raporty z incydentów – formalne raporty dotyczące usterek, incydentów, awarii lub sytuacji niestandardowych, zawierające dane dotyczące bezzałogowego statku powietrznego, okoliczności, działania naprawcze i osoby odpowiedzialne.
- Komunikacja e-mailowa i notatki – dokumentacja elektroniczna obejmująca wiadomości e-mail, notatki ze spotkań technicznych, podsumowania odpraw i podsumowań.

Kompetencje komunikacyjne obejmują zarówno umiejętność sporządzania takich dokumentów, jak i rozumienie ich znaczenia w kontekście pracy zespołowej i kontaktów zewnętrznych.

5.1.1.4. Dokumentacja operacji lotniczych.

Grupa ta obejmuje:

- Dzienniki lotów – dzienniki lotów zawierające daty, lokalizacje, czas trwania lotu, dane operatora i cele misji.
- Raporty telemetryczne – dane telemetryczne z misji bezzałogowych statków powietrznych, wykorzystywane do analizy parametrów operacyjnych i diagnozowania błędów.
- Formularze dotyczące zezwoleń na loty i przepisów – dokumenty związane z uzyskaniem zezwoleń na loty, planowaniem tras i zgodnością z przepisami EASA lub przepisami krajowymi.

Technicy powinni być zaznajomieni nie tylko z procedurami operacyjnymi, ale także z przepisami dotyczącymi przestrzeni powietrznej, co wymaga odpowiedniej dokumentacji zgodności z prawem.

5.1.1.5. Dokumentacja dotycząca jakości i oceny

Są to dokumenty wykorzystywane do wewnętrznej oceny działań technicznych:

- Listy kontrolne audytu – listy kontrolne wykorzystywane do audytów wewnętrznych i zewnętrznych.
- Zalecenia dotyczące konserwacji zapobiegawczej – wnioski z inspekcji i analiz technicznych, zawierające propozycje środków zapobiegawczych.
- Rejestry ciągłego doskonalenia – dokumentacja zawierająca obserwacje i pomysły dotyczące usprawnienia procedur.

Technik UAV powinien umieć analizować zebrane dane, identyfikować nieprawidłowości i komunikować potrzebę zmian organizacyjnych lub technologicznych.

5.1.2. Elementy dokumentów

Każdy z wyżej wymienionych rodzajów dokumentów zawiera zestaw obowiązkowych elementów, takich jak:

- nagłówek z datą, nazwą bezzałogowego statku powietrznego, numerem seryjnym,
- dane osoby odpowiedzialnej za wypełnienie lub weryfikację dokumentu,
- opis działania lub zdarzenia,
- wykaz użytych materiałów i narzędzi,
- odniesienie do SOP lub WO,
- komentarze, zalecenia, podpis lub upoważnienie elektroniczne.

Kompletność, przejrzystość i zgodność tych dokumentów z wewnętrznymi i zewnętrznymi standardami ma kluczowe znaczenie dla skutecznego funkcjonowania zespołów UAV, ich legalnej działalności, bezpieczeństwa i odpowiedzialności zawodowej.

W standardach zawodowych dotyczących bezzałogowych statków powietrznych dokumentacja techniczna jest przedstawiana nie tylko jako zapis działań, ale także jako strategiczne narzędzie komunikacji zawodowej. Umożliwia ona sprawną wymianę informacji między specjalistami, zapewnia bezpieczeństwo operacji, wspiera zgodność z przepisami i umożliwia ciągłe doskonalenie procesów technicznych. Według OSE technik UAV musi nie tylko umieć prowadzić dokumentację, ale także wykorzystywać ją jako narzędzie analityczne, koordynacyjne i doradcze. Kompetencja ta łączy w sobie umiejętności techniczne, precyzję językową i odpowiedzialność zawodową, dlatego ma kluczowe znaczenie dla jakości i bezpieczeństwa całego sektora lotnictwa bezzałogowego.

5.2. [Informacje dotyczące zgodności z przepisami](#)

Przepisy bezpieczeństwa i wymogi zgodności są kluczowym elementem zarządzania flotą dronów (UAV). Zapewnienie, że wszystkie operacje są prowadzone zgodnie z obowiązującymi przepisami, ma zasadnicze znaczenie dla utrzymania wysokiego poziomu bezpieczeństwa, ochrony mienia i zgodności z przepisami prawnymi.

Wszystkie operacje z użyciem dronów muszą być zgodne z krajowymi i międzynarodowymi przepisami dotyczącymi bezzałogowych statków powietrznych. W wielu regionach świata głównymi organami regulacyjnymi są instytucje , takie jak Europejska Agencja Bezpieczeństwa Lotniczego (EASA) w Europie i Federalna Administracja Lotnictwa Cywilnego (FAA) w Stanach Zjednoczonych, które ustanawiają przepisy dotyczące operacji z użyciem dronów. Przepisy te obejmują różne aspekty, takie jak rejestracja dronów, licencjonowanie operatorów, zasady lotów w przestrzeni powietrznej, wymagania techniczne oraz przepisy dotyczące bezpieczeństwa i prywatności.

Zgodnie z przepisami międzynarodowymi wszystkie drony powyżej określonej masy muszą być zarejestrowane w odpowiednich rejestrach krajowych. Rejestracja ta jest wymagana przed rozpoczęciem eksploatacji i musi być aktualizowana w przypadku zmiany właściciela, modernizacji lub wycofania drona z eksploatacji. Rejestracja zapewnia identyfikowalność drona i ułatwia nadzór regulacyjny.

Operatorzy dronów muszą posiadać odpowiednie licencje i certyfikaty potwierdzające ich kwalifikacje i zdolność do bezpiecznego latania. Licencje te obejmują zarówno szkolenie

teoretyczne, jak i praktyczne, które należy regularnie odnawiać. Personel odpowiedzialny za serwisowanie sprzętu musi posiadać odpowiednie certyfikaty potwierdzające jego kwalifikacje i zdolność do obsługi i naprawy sprzętu.

Proces uzyskiwania licencji operatora obejmuje szkolenie teoretyczne i praktyczne, egzaminy oraz regularne odnawianie licencji. Operatorzy muszą znać przepisy ruchu lotniczego, zasady bezpieczeństwa, procedury awaryjne i ograniczenia dotyczące eksploatacji dronów. Ponadto operatorzy muszą znać lokalne przepisy dotyczące prywatności, zwłaszcza jeśli drony są wyposażone w kamery lub inne urządzenia monitorujące.

Personel techniczny odpowiedzialny za konserwację powinien regularnie uczestniczyć w szkoleniach, zdawać egzaminy, a w przypadku długiej przerwy w wykonywaniu obowiązków poddawać się ponownej ocenie swoich umiejętności i kwalifikacji. Należy zauważyć, że w wielu przypadkach ten sam personel wykonuje zarówno konserwację techniczną, jak i loty testowe dronów po naprawach, co wymaga rozległych umiejętności technicznych i operacyjnych.

W przypadku gdy dron przewozi materiały niebezpieczne lub specjalistyczny sprzęt, należy przestrzegać dodatkowych przepisów, które mogą obejmować zarówno kwestie bezpieczeństwa, jak i zdrowia.

Podczas projektowania, zakupu i eksploatacji dronów należy przestrzegać przepisów technicznych, którym muszą one odpowiadać. Drony muszą spełniać wymagania dotyczące konstrukcji, systemów nawigacyjnych, łączności i systemów bezpieczeństwa. Regularne przeglądy techniczne i konserwacja są niezbędne do zapewnienia, że drony pozostają zdadne do lotu i spełniają wszystkie wymagania techniczne.

Wszelkie modyfikacje lub modernizacje drona muszą być zgłaszane odpowiednim organom regulacyjnym i przez nie zatwierdzane. Operatorzy muszą również prowadzić szczegółową dokumentację każdej operacji, kontroli i naprawy, aby w razie kontroli móc wykazać zgodność z przepisami.

Drony, które rejestrują obrazy lub gromadzą dane, muszą działać zgodnie z przepisami dotyczącymi prywatności. Wiele krajów posiada szczegółowe przepisy regulujące gromadzenie i przetwarzanie danych osobowych. Operatorzy muszą być świadomi tych przepisów i zapewnić, że ich działania nie naruszają prywatności osób trzecich.

Wszystkie osoby odpowiedzialne za obsługę i konserwację dronów powinny mieć stały dostęp do aktualnej dokumentacji technicznej i obowiązujących przepisów dotyczących obsługi dronów. Regularne przeglądy i aktualizacje tych dokumentów są niezbędne do zapewnienia zgodności z przepisami i bezpieczeństwa operacyjnego.

Zaleca się, aby instrukcje obsługi i dokumentacja operacyjna zawierały jasne odniesienia do obowiązujących przepisów, norm technicznych i wytycznych krajowych organów lotniczych. Dokumentacja powinna również zawierać procedury zgłaszania incydentów i naruszeń, a także wytyczne dotyczące odpowiedzialności prawnej operatora w przypadku naruszenia przepisów.

Ważne jest również zapewnienie, aby wszystkie aktualizacje przepisów były niezwłocznie włączane do dokumentacji i przekazywane pracownikom.

5.3. Wytyczne producenta

Wytyczne producenta stanowią podstawę prawidłowej eksploatacji, przechowywania i konserwacji bezzałogowych statków powietrznych (UAV) i ich wyposażenia. Zostały one opracowane na podstawie testów technicznych, doświadczeń eksploatacyjnych i wymagań bezpieczeństwa. Przestrzeganie tych wytycznych ma zasadnicze znaczenie dla zapewnienia niezawodności sprzętu, zminimalizowania ryzyka awarii oraz zgodności z obowiązującymi normami i przepisami lotniczymi.

5.3.1. Zalecenia producentów

Zalecenia producenta powinny być opracowane w formie:

- instrukcji technicznych – zawierających szczegółowe dane dotyczące parametrów eksploatacji, przechowywania i transportu UAV,
- procedur operacyjnych – określających krok po kroku sposób przeprowadzania kontroli, konserwacji i napraw,
- arkuszy danych i specyfikacji technicznych – określających dopuszczalne wartości (np. temperatura, wilgotność, napięcie akumulatora, żywotność materiałów eksploatacyjnych),
- aktualizacji i biuletynów technicznych (biuletynów serwisowych) – wprowadzających zmiany wynikające z rozwoju technologicznego lub doświadczeń eksploatacyjnych.

Instrukcje powinny być dostępne w formie papierowej i elektronicznej, w języku oryginalnym oraz w języku użytkownika.

5.3.2. Obowiązki operatorów bezzałogowych statków powietrznych

Aby zapewnić zgodność z wytycznymi producenta, operatorzy bezzałogowych statków powietrznych powinni:

- przestrzegać procedur opisanych w dokumentacji przed i po każdym locie,
- prowadzić rejestr czynności technicznych w dzienniku pokładowym bezzałogowego statku powietrznego lub centralnej bazie danych,
- używać wyłącznie części i materiałów eksploatacyjnych zatwierdzonych przez producenta,
- szkolić personel techniczny i operacyjny zgodnie z najnowszymi instrukcjami i biuletynami technicznymi,
- stosować system kontroli jakości, w tym weryfikację zgodności wykonywanych czynności z dokumentacją producenta,
- regularnie weryfikować i aktualizować instrukcje techniczne oraz wdrażać zalecenia wynikające z nowych wydań dokumentacji. Warunki przechowywania można podzielić na wyposażenie magazynu (tj. to, co znajduje się na stałe w magazynie, tzw. wyposażenie i urządzenia magazynowe) oraz przechowywane przedmioty. Samo wyposażenie magazynu musi spełniać określone wymagania. Magazyn i jego wyposażenie muszą zapewniać odpowiednie warunki do przechowywania mienia.

Warunki panujące w magazynach można podzielić na warunki przechowywania środków trwałych (części, wyposażenie dronów), zasobów i materiałów o ograniczonej trwałości (płyny eksploatacyjne) oraz materiałów niebezpiecznych (baterie, smary, broń itp.).

Przy tworzeniu warunków przechowywania należy określić potrzeby związane z przeznaczeniem drona i jego konkretnym wyposażeniem.

Warunki przechowywania dronów (UAV) i ich komponentów mają kluczowe znaczenie dla zapewnienia ich trwałości, niezawodności i bezpieczeństwa eksploatacji. Prawidłowe przechowywanie minimalizuje ryzyko uszkodzeń, korozji i innych negatywnych skutków środowiskowych. Warunki przechowywania muszą być zgodne ze wszystkimi zaleceniami producenta i przepisami dotyczącymi pomieszczeń i przechowywanego mienia. Obejmuje to szereg obszarów, od nieuprawnionego dostępu, systemów monitorowania i powiadamiania, po wymagania producentów dotyczące stanu technicznego mienia, przepisów BHP, przepisów przeciwpożarowych itp.

Dokumentacja warunków przechowywania sprzętu, komponentów i samych dronów ma na celu udokumentowanie rzeczywistego stanu środowiska. Dokumentacja ta składa się z codziennie aktualizowanych wykresów temperatury i wilgotności. Bardzo ważne jest również dokumentowanie wydajności i serwisowania sprzętu zapewniającego odpowiednie warunki, np. klimatyzatorów, osuszaczy itp. Dokumentacja powinna zawierać odniesienia do ochrony przed światłem i szkodnikami.

Należy zauważyć, że środki trwałe muszą spełniać szereg warunków (np. regały muszą mieć odpowiednią nośność itp.), natomiast środki ruchome często wymagają specjalistycznych certyfikatów potwierdzających ich sprawność (dźwigi, suwnice itp.).

Pomieszczenia akumulatorowe lub punkty ładowania akumulatorów muszą spełniać wymagania dotyczące punktów ładowania akumulatorów lub pomieszczeń akumulatorowych zgodnie z typem używanych akumulatorów. Dokumentacja ta powinna umożliwiać identyfikację ilości i stanu technicznego dostarczonych akumulatorów, przeprowadzanie okresowych kontroli oraz określenie zakresu prac wykonywanych na akumulatorach zgodnie z procedurami.

Dokumentacja dotycząca przechowywania materiałów niebezpiecznych musi być zgodna z warunkami przechowywania każdego materiału zgodnie z zaleceniami producenta.

Zgłaszanie stanu technicznego dronów i zalecanie odpowiednich działań konserwacyjnych jest kluczowym elementem skutecznego zarządzania flotą bezzałogowych statków powietrznych (UAV). Proces ten nie tylko pozwala utrzymać wysoki poziom bezpieczeństwa, ale także wpływa na niezawodność operacyjną dronów, co jest szczególnie ważne w misjach komercyjnych i specjalistycznych.

Każdy dron musi przechodzić regularne przeglądy i kontrole techniczne zgodnie z harmonogramem ustalonym przez producenta i przepisami obowiązującymi w danym kraju. Kontrole te obejmują kilka rodzajów przeglądów i są dokumentowane w:

- Dokumentacja kontroli przed lotem: Kontrole te są przeprowadzane przed każdym lotem w celu zapewnienia pełnej gotowości drona do wykonania misji.
- Dokumentacja kontroli po locie: Kontrole te oceniają stan techniczny drona po zakończeniu operacji w celu wykrycia ewentualnych uszkodzeń lub zużycia.
- Dokumentacja przeglądów okresowych: przeglądy te są regularnymi kontrolami przeprowadzanymi zgodnie z harmonogramem zalecanym przez producenta, które pozwalają wykryć problemy, zanim staną się poważne.

- Dokumentacja kontroli specjalnych: Kontrole te przeprowadzane są po incydentach lub awariach w celu oceny stanu technicznego drona i ustalenia, czy wymaga on naprawy lub wymiany kluczowych elementów.

Każda z tych kontroli powinna być odpowiednio udokumentowana, a jej wyniki zapisane w centralnej bazie danych lub dzienniku technicznym drona. Dokumentacja powinna jasno odzwierciedlać stan techniczny drona, a także stan poszczególnych systemów, takich jak układ napędowy, systemy nawigacyjne, akumulatory, silniki i inne kluczowe komponenty.

5.3.3. Raporty techniczne i ich znaczenie

Raporty techniczne stanowią podstawę do oceny stanu technicznego drona i planowania przyszłych działań konserwacyjnych. Każdy raport techniczny powinien zawierać:

- Opis stanu technicznego drona: szczegółowe informacje o aktualnym stanie drona, w tym wszelkie zidentyfikowane usterki, uszkodzenia lub oznaki zużycia komponentów.
- Dziennik konserwacji: informacje o wszelkich przeprowadzonych czynnościach konserwacyjnych, takich jak czyszczenie, smarowanie, kalibracja systemu, wymiana części lub naprawy.
- Zalecenia dotyczące dalszych działań: na podstawie wyników kontroli i raportów technicznych technicy mogą zalecić przyszłe czynności konserwacyjne lub naprawy, które należy przeprowadzić w celu zapewnienia bezpiecznego działania drona.

5.3.4. Planowanie konserwacji i dostaw

Raporty techniczne mają znaczący wpływ na planowanie konserwacji oraz logistykę dostaw części zamiennych i materiałów eksploatacyjnych. Szczegółowe raporty pozwalają na:

- Planowanie zaangażowania personelu: Przygotowanie z wyprzedzeniem harmonogramów pracy techników i operatorów w celu wykonania niezbędnych czynności konserwacyjnych.
- Planowanie dostaw: na podstawie raportów można zamówić niezbędne części zamienne, takie jak akumulatory, silniki, filtry lub inne kluczowe komponenty, minimalizując ryzyko przestoju w pracy.
- Optymalizację działalności warsztatu: dobrze zarządzana dokumentacja i raporty pozwalają na lepsze zarządzanie zasobami warsztatu, dzięki czemu wszystkie naprawy i konserwacje są wykonywane terminowo i efektywnie.

5.3.5. Znaczenie raportowania dla zgodności z przepisami

Dokładne raportowanie stanu dronów i dokumentowanie wszystkich czynności konserwacyjnych ma zasadnicze znaczenie nie tylko dla utrzymania gotowości operacyjnej, ale także w kontekście zgodności z przepisami. W wielu krajach regularne raportowanie kontroli, napraw i czynności konserwacyjnych jest wymogiem prawnym, a nieprzestrzeganie tych zasad może prowadzić do poważnych konsekwencji, takich jak utrata licencji lub odpowiedzialność prawna w przypadku wypadków.

Archiwizacja raportów technicznych umożliwia:

- Monitorowanie historii technicznej drona.
- Udostępnianie niezbędnej dokumentacji organom nadzorczym w przypadku audytów lub kontroli.
- Zapewnienie pełnej zgodności z lokalnymi i międzynarodowymi przepisami bezpieczeństwa lotniczego.

Podsumowując, regularne raportowanie stanu technicznego dronów i zalecanie czynności konserwacyjnych są kluczowymi aspektami zarządzania flotą bezzałogowych statków powietrznych. Pozwalają one utrzymać wysoki poziom bezpieczeństwa, zminimalizować ryzyko awarii i zoptymalizować logistykę operacji technicznych.

Zaleca się, aby dokumentacja techniczna producentów zawierała szczegółowe wytyczne dotyczące transportu dronów i ich komponentów, warunków przechowywania w różnych strefach klimatycznych oraz zalecenia dotyczące maksymalnych okresów przechowywania materiałów eksploatacyjnych. Instrukcje producenta powinny również zawierać procedury postępowania w przypadku odstępstw od norm (np. przekroczenie wilgotności, temperatury, utrata pojemności baterii) oraz określać, które komponenty należy natychmiast wycofać z eksploatacji. Wytyczne te powinny być regularnie aktualizowane i weryfikowane przez producentów.

5.4. Wykazy części zamiennych

Skuteczne zarządzanie częściami zamiennymi i zapasami jest kluczowym elementem utrzymania ciągłości operacyjnej floty dronów (UAV). Prawidłowo prowadzona ewidencja części zamiennych zapewnia dostępność komponentów w odpowiednim czasie, minimalizuje ryzyko przestojów operacyjnych, wspiera zgodność z przepisami i umożliwia kontrolę kosztów operacyjnych. Dokumentacja części zamiennych powinna być powiązana z systemem zarządzania zapasami i dokumentacją techniczną dronów, aby zapewnić spójność i przejrzystość procesów konserwacji.

Zapasy w kontekście zarządzania bezzałogowymi statkami powietrznymi (UAV) są kluczowym elementem zapewniającym skuteczne zarządzanie zasobami, kontrolę kosztów i zgodność z przepisami. Proces ten obejmuje identyfikację, rejestrowanie, monitorowanie i kontrolę wszystkich zasobów fizycznych związanych z eksploatacją dronów. Oto szczegółowy opis inwentaryzacji majątku:

Rejestr aktywów pozwala na identyfikację wszystkich aktywów związanych z eksploatacją dronów. Aktywa te obejmują:

- każdy bezzałogowy statek powietrzny, w tym jego numer seryjny, model, datę zakupu i specyfikacje techniczne.
- wszystkie części zamienne, akcesoria, baterie, czujniki i dodatkowe wyposażenie wykorzystywane w dronach.
- specjalistyczne narzędzia i sprzęt używany do konserwacji i naprawy dronów.
- warsztaty, magazyny, stacje ładowania i inne nieruchomości związane z eksploatacją dronów.

Każdy zidentyfikowany składnik majątku musi zostać zarejestrowany w systemie zarządzania zapasami. Należy rozróżnić rejestry składników majątku pomieszczeń (obiektów) i składowanych składników majątku. Rejestracja składników majątku obejmuje:

- Każdemu składnikowi majątku przypisywany jest unikalny numer identyfikacyjny ułatwiający śledzenie i zarządzanie. Najlepiej, jeśli jest on powiązany z numerem producenta lub kodem kreskowym.
- Szczegółowy opis zasobu, w tym jego specyfikacje techniczne, producent, model, numer seryjny, data zakupu i wartość.
- Miejsce przechowywania lub użytkowania zasobu, co ułatwia jego lokalizację i kontrolę.
- Aktualny stan techniczny zasobu, tj. jego kategoria przechowywania (np. nowy, używany, w naprawie) i status (np. dostępny, zarezerwowany, wycofany z eksploatacji).

Regularne monitorowanie stanu aktywów i aktualizacja danych w systemie magazynowym ma kluczowe znaczenie dla utrzymania dokładności i aktualności danych dotyczących aktywów. Dokumentacja ta powinna umożliwiać:

- kontrolę i przegląd aktywów w celu weryfikacji ich stanu, lokalizacji i zgodności z zapisami w rejestrze.
- aktualizację danych dotyczących zasobów w przypadku zmian, takich jak przeniesienie, naprawa, modyfikacja lub wycofanie z eksploatacji.
- śledzenie cyklu życia – monitorowanie cyklu życia aktywów, od zakupu, poprzez użytkowanie, aż po wycofanie z eksploatacji i utylizację.
- Kontrolowanie zapasów części zamiennych i materiałów eksploatacyjnych w celu zapewnienia ciągłości działania dronów.

Skuteczne zarządzanie częściami zamiennymi wymaga nie tylko prowadzenia ewidencji, ale także wdrożenia jasnych procedur składania wniosków na odpowiednich formularzach papierowych lub elektronicznych. Proces ten powinien być zorganizowany w dwóch trybach: Tryb bieżący (reaktywny). Stosowany w sytuacjach awaryjnych, gdy istnieje potrzeba natychmiastowej wymiany uszkodzonego lub zużytego elementu, którego brak uniemożliwia dalszą eksploatację drona. Zamówienia składane są na podstawie raportów z kontroli, napraw doraźnych lub incydentów. Dokumentacja powinna zawierać: opis usterki, wskazanie wymaganej części, numer katalogowy, pilność wniosku oraz osobę odpowiedzialną za wniosek. Tryb ten pozwala na szybkie przywrócenie gotowości operacyjnej bezzałogowego statku powietrznego, ale wiąże się z wyższym ryzykiem kosztowym (np. pilny zakup, brak optymalizacji ceny).

Tryb planowania (proaktywny). Opiera się on na harmonogramach okresowej konserwacji, zaleceniach producenta i danych historycznych dotyczących zużycia części. Planowane zapotrzebowania są zgłaszane z wyprzedzeniem, co pozwala na uwzględnienie ich w budżecie, optymalizację dostaw i zmniejszenie kosztów magazynowania. Dokumentacja planowania powinna zawierać: rodzaj części, przewidywaną datę wymiany, ilość i miejsce przechowywania. Tryb ten minimalizuje ryzyko przestojów i zwiększa przewidywalność procesów logistycznych.

Najlepsze wyniki osiąga się poprzez połączenie obu podejść – planowania w przypadku części eksploatacyjnych i typowych materiałów eksploatacyjnych, przy jednoczesnym zachowaniu procedur zgłoszeń awaryjnych.

Dokumentacja powinna jasno określać: kto składa zamówienie (np. serwisant, kierownik warsztatu), w jaki sposób jest ono zatwierdzane (autoryzacja, podpis, system elektroniczny),

gdzie trafia (dział logistyki, magazyn, bezpośrednio do dostawcy) i kiedy powinno zostać zrealizowane.

Idealny system magazynowy to taki, który nie tylko umożliwia składanie zamówień, ale także automatycznie generuje zamówienia, kontroluje poziomy zapasów i uzupełnia braki w sposób ciągły, zarówno w sposób planowy, jak i w odpowiedzi na doraźne potrzeby. Powinien on obejmować planowanie zakupów w oparciu o harmonogramy serwisowe, cykle serwisowe i przewidywaną intensywność eksploatacji bezzałogowych statków powietrznych, a także zarządzanie zapasami w czasie rzeczywistym z ciągłym monitorowaniem poziomów zapasów części, akcesoriów, narzędzi i materiałów eksploatacyjnych. Ważnym elementem jest możliwość obsługi bieżących zapotrzebowań, tj. natychmiastowego generowania potrzeb w sytuacjach awaryjnych, takich jak nagła awaria lub konieczność pilnej wymiany części. System powinien być zintegrowany z dokumentacją serwisową bezzałogowych statków powietrznych, tak aby automatycznie generował listy części niezbędnych do konserwacji na podstawie zapisów dotyczących napraw, konserwacji i przeglądów. Integralną częścią systemu jest również prowadzenie historii zakupów i zużycia, w tym numerów seryjnych części, dat zakupów, okresów gwarancji, danych dotyczących ich okresu przydatności do użycia, tj. ograniczonej przydatności do użycia ze względu na starzenie się materiałów, oraz kompletnej ewidencji ich wykorzystania. Pozwala to na planowanie rotacji zasobów, unika stosowania części przeterminowanych i minimalizuje straty wynikające z upływu ich okresu przydatności do użycia. System magazynowy powinien również posiadać mechanizmy autoryzacyjne, które jasno określają osoby odpowiedzialne za zatwierdzanie zamówień i przyjmowanie części do magazynu, oraz być powiązany z systemem finansowym, który umożliwia kontrolę budżetu, rezerwację środków i raportowanie kosztów związanych z konserwacją floty bezzałogowych statków powietrznych. Zapewnia to pełną kontrolę nad obiegami części zamiennych, minimalizuje ryzyko niedoborów magazynowych, skraca czas reakcji w sytuacjach awaryjnych, umożliwia efektywne planowanie wydatków oraz gwarantuje, że drony są eksploatowane w sposób bezpieczny, ekonomiczny i zgodny z wymogami technicznymi i regulacyjnymi.

5.5. Przepisy dotyczące bezpieczeństwa i higieny pracy

Przepisy dotyczące bezpieczeństwa i higieny pracy (BHP) oraz wymogi zgodności z przepisami stanowią podstawę zarządzania flotą bezzałogowych statków powietrznych (UAV). Mają one na celu ochronę zdrowia i życia operatorów oraz osób postronnych, a także ochronę mienia i środowiska. Obowiązki operatorów i personelu technicznego, a także

wymagania dotyczące dokumentacji i infrastruktury wspierającej bezpieczną eksploatację UAV muszą być jasno określone i znane wszystkim pracownikom.

Wszystkie operacje z użyciem dronów muszą być zgodne z krajowymi i międzynarodowymi przepisami dotyczącymi bezzałogowych statków powietrznych. W wielu regionach świata głównymi organami regulacyjnymi są instytucje takie jak Europejska Agencja Bezpieczeństwa Lotniczego (EASA) w Europie i Federalna Administracja Lotnictwa Cywilnego (FAA) w Stanach Zjednoczonych, które ustanawiają przepisy dotyczące operacji z użyciem dronów. Przepisy te obejmują różne aspekty, takie jak rejestracja dronów, licencjonowanie operatorów, zasady lotów w przestrzeni powietrznej, wymagania techniczne oraz przepisy dotyczące bezpieczeństwa i prywatności.

Zgodnie z przepisami międzynarodowymi wszystkie drony powyżej określonej masy muszą być zarejestrowane w odpowiednich rejestrach krajowych. Rejestracja ta jest wymagana przed rozpoczęciem operacji i musi być aktualizowana w przypadku zmiany właściciela, modernizacji lub wycofania drona z eksploatacji. Rejestracja zapewnia identyfikowalność drona i ułatwia nadzór regulacyjny.

Każda organizacja obsługująca bezzałogowe statki powietrzne powinna mieć osobę odpowiedzialną za zgodność z przepisami (kierownika ds. zgodności), która monitoruje zmiany w prawie i aktualizuje procedury.

Operatorzy dronów muszą posiadać odpowiednie licencje i certyfikaty potwierdzające ich kwalifikacje i zdolność do bezpiecznego latania. Licencje te obejmują zarówno szkolenie teoretyczne, jak i praktyczne, które musi być regularnie odnawiane. Personel odpowiedzialny za serwisowanie sprzętu musi posiadać odpowiednie certyfikaty potwierdzające jego kwalifikacje i zdolność do obsługi i naprawy sprzętu.

Operatorzy muszą przechodzić regularne szkolenia z zakresu bezpieczeństwa i higieny pracy w zakresie obsługi bezzałogowych statków powietrznych, pracy w terenie i reagowania w sytuacjach awaryjnych. W przypadku długiej przerwy w wykonywaniu obowiązków wymagana jest ponowna certyfikacja.

Podczas projektowania, zakupu i eksploatacji dronów należy przestrzegać przepisów technicznych, którym muszą one odpowiadać. Drony muszą spełniać wymagania dotyczące konstrukcji, systemów nawigacyjnych, komunikacyjnych i bezpieczeństwa. Regularne

przeglądy techniczne i konserwacja są niezbędne, aby zapewnić zdatność dronów do lotu i spełnienie wszystkich wymagań technicznych.

W przypadku gdy dron przewozi materiały niebezpieczne lub specjalistyczny sprzęt, należy przestrzegać dodatkowych przepisów, które mogą obejmować zarówno kwestie bezpieczeństwa, jak i zdrowia.

Wszelkie modyfikacje lub modernizacje drona muszą być zgłaszane odpowiednim organom regulacyjnym i przez nie zatwierdzane. Operatorzy muszą również prowadzić szczegółową dokumentację każdej operacji, kontroli i naprawy, aby w razie kontroli móc wykazać zgodność z przepisami.

Należy prowadzić rejestr legalizacji i kalibracji urządzeń pomiarowych używanych do obsługi bezzałogowych statków powietrznych (np. testerów akumulatorów, stacji diagnostycznych). Należy sprawdzać daty ważności elementów dronów o ograniczonym okresie przydatności (np. akumulatorów, żyroskopów, elementów pirotechnicznych).

Drony, które rejestrują obrazy lub gromadzą dane, muszą działać zgodnie z przepisami dotyczącymi prywatności. Wiele krajów posiada szczegółowe przepisy regulujące gromadzenie i przetwarzanie danych osobowych. Operatorzy muszą być świadomi tych przepisów i zapewnić, że ich działania nie naruszają prywatności osób trzecich.

W przypadku materiałów nagrywanych przez bezzałogowe statki powietrzne wymagane są procedury anonimizacji danych (np. zamazywanie twarzy, tablic rejestracyjnych). Dane powinny być zabezpieczone w systemie z kopią zapasową i kontrolą dostępu.

Prowadzenie dokładnej dokumentacji lotów dronów (UAV) ma zasadnicze znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa, zgodności z przepisami i monitorowania stanu technicznego dronów. Każdy lot powinien być rejestrowany w dzienniku lotów, aby umożliwić analizę retrospektywną, śledzenie zużycia sprzętu i identyfikację wszelkich problemów technicznych.

Rejestr wykonanych lotów powinien zawierać następujące informacje:

- Data i godzina lotu: Należy zapisać datę i dokładną godzinę rozpoczęcia i zakończenia lotu.
- Operator drona: dane osoby odpowiedzialnej za sterowanie dronem podczas misji.
- Model i numer seryjny drona: identyfikacja używanego sprzętu.
- Czas trwania lotu: całkowity czas pracy drona w powietrzu.

- Trasa lotu i wysokość: informacje o trasie lotu, wysokości i wszelkich zmianach podczas misji.
- Cele misji: Krótki opis zadań wykonywanych podczas lotu (np. monitorowanie, filmowanie, inspekcja itp.).
- Warunki pogodowe: informacje o panujących warunkach pogodowych, które mogły mieć wpływ na lot.
- Problemy techniczne: wszelkie usterki lub problemy napotkane podczas lotu, takie jak utrata łączności, awaria systemu, ograniczenia nawigacyjne.

Dziennik lotów służy jako podstawowe narzędzie do analizy stanu technicznego drona i planowania konserwacji. Dane te pozwalają na ocenę zużycia komponentów, żywotności baterii i innych elementów wymagających regularnej kontroli. Dokumentacja musi być archiwizowana w formie cyfrowej przez co najmniej 5 lat i zintegrowana z modułem planowania misji i konserwacji.

W wielu krajach operatorzy dronów są zobowiązani do posiadania ubezpieczenia od odpowiedzialności cywilnej na wypadek szkód wyrządzonych osobom trzecim lub mieniu. Ubezpieczenie to jest szczególnie ważne w przypadku lotów komercyjnych lub lotów nad obszarami zaludnionymi.

Zaleca się, aby organizacje eksploatujące bezzałogowe statki powietrzne posiadały również ubezpieczenie sprzętu od utraty lub uszkodzenia.

Operatorzy bezzałogowych statków powietrznych powinni znać i przestrzegać procedur awaryjnych, w tym procedur dotyczących awarii zasilania, utraty łączności, lądowania awaryjnego, pożaru akumulatora litowo-jonowego, kolizji lub uszkodzenia bezzałogowego statku powietrznego.

Każdy incydent powinien być odnotowany w raporcie z incydentu. Pracodawca i organizacja odpowiedzialna za eksploatację bezzałogowego statku powietrznego są zobowiązani do: zapewnienia pracownikom środków ochrony indywidualnej (np. okularów ochronnych, rękawic antystatycznych), organizowania okresowych szkoleń, nadzorowania przestrzegania przepisów BHP oraz wdrożenia systemu zarządzania bezpieczeństwem (SMS).

5.6. SOP i WO

Standardowe procedury operacyjne (SOP) i zlecenia pracy (WO) stanowią podstawę skutecznego zarządzania eksploatacją i konserwacją floty dronów (UAV). Wprowadzają porządek, systematyzują działania i zapewniają, że wszystkie procesy – od przygotowania misji po wsparcie techniczne – są realizowane zgodnie z przyjętymi standardami i przepisami prawnymi. SOP określają „jak” należy wykonać dane zadanie, natomiast WO wskazują „co” należy zrobić, kto ma to wykonać i kiedy. Razem tworzą one zintegrowany system, który zapewnia bezpieczeństwo, wysoką jakość operacji i pełną dokumentację procesów.

5.6.1. Standardowe procedury operacyjne (SOP)

Są one kluczowym elementem zarządzania flotą dronów (UAV). SOP zapewniają spójność, bezpieczeństwo i wydajność operacji poprzez ustanowienie szczegółowych, krok po kroku wytycznych dotyczących różnych aspektów eksploatacji dronów. Dzięki SOP organizacje mogą również zminimalizować ryzyko błędów operacyjnych i zapewnić zgodność z przepisami prawnymi.

Każda organizacja obsługująca drony powinna opracować i wdrożyć SOP dostosowane do specyfiki swojej działalności i zgodne z obowiązującymi przepisami. Proces ten obejmuje analizę ryzyka, identyfikację zadań krytycznych i określenie standardowych procedur. SOP powinny być regularnie weryfikowane i aktualizowane w odpowiedzi na zmiany technologiczne, regulacyjne i operacyjne.

SOP powinny również obejmować procedury awaryjne, które określają działania, jakie należy podjąć w sytuacjach kryzysowych, takich jak utrata łączności, problemy techniczne lub awarie systemu dronów.

5.6.1.1. Procedury przed lotem

Procedury przed lotem można podzielić na dwie kategorie: przygotowanie drona do lotu i przygotowanie personelu do lotu. Obie te kategorie mają kluczowe znaczenie dla zapewnienia pełnej sprawności drona i gotowości do bezpiecznego lotu. Standardowe procedury operacyjne powinny obejmować:

- Szczegółowe listy kontrolne obejmujące sprawdzenie stanu technicznego drona, sprawdzenie naładowania baterii, testy systemu nawigacji i komunikacji oraz sprawdzenie stanu fizycznego (np. uszkodzenia mechaniczne, zanieczyszczenia itp.).
- Przygotowanie personelu obejmuje przegląd i zatwierdzenie planu lotu, z uwzględnieniem warunków pogodowych, stref ograniczeń lotów i celów misji.

Operatorzy powinni również przejść szkolenie dotyczące procedur bezpieczeństwa i przepisów lotniczych obowiązujących w danej przestrzeni powietrznej. Operatorzy powinni również przygotować alternatywne plany na wypadek zmiany warunków.

Często organizowana jest odprawa przed lotem dla operatorów, tj. spotkanie zespołu operacyjnego w celu omówienia szczegółów misji, zidentyfikowania potencjalnych zagrożeń oraz przydzielenia ról i obowiązków. Odprawa może być również nagrywana lub dokumentowana w formie raportu do archiwizacji i przyszłej analizy.

5.6.1.2. Procedury po locie

Procedury po locie mają na celu zapewnienie, że dron jest odpowiednio zabezpieczony i przygotowany do kolejnych misji. SOP obejmuje zakres kontroli drona po locie w celu wykrycia ewentualnych uszkodzeń lub zużycia, a także sprawdzenie stanu naładowania baterii i zapisanie wyników w dzienniku lotu.

Jeśli dron nie jest wyposażony w rejestrator danych lotu, należy prowadzić dokumentację ręczną, w której należy zapisywać dane dotyczące lotu, w tym czas trwania, trasę, osiągnięte cele i wszelkie napotkane problemy. Dokumentacja ta jest niezbędna do analizy skuteczności operacji i wykrywania potencjalnych problemów technicznych.

Można również prowadzić rejestry spotkań podsumowujących, podczas których analizuje się przebieg misji, napotkane problemy oraz wnioski, które mogą poprawić skuteczność przyszłych operacji.

5.6.1.3. Funkcja standardowych procedur operacyjnych

Standardowe procedury operacyjne powinny określać standardowe metody wykonywania różnych zadań, takich jak:

- Procedury bezpiecznego startu i lądowania, z uwzględnieniem warunków terenowych i wymagań technicznych.
- Procedury nawigacyjne i utrzymywanie łączności z centrum operacyjnym, w tym regularne zgłaszanie pozycji i statusu drona.
- Standardowe procedury postępowania w przypadku awarii technicznych, utraty łączności, kolizji lub innych sytuacji awaryjnych.
- Procedury bezpieczeństwa zapewniające bezpieczną eksploatację dronów, w tym regularną ocenę ryzyka operacyjnego, identyfikację i analizę potencjalnych zagrożeń oraz opracowywanie strategii minimalizujących je.

SOP powinny również zawierać zasady dotyczące stosowania środków ochrony indywidualnej (ŚOI) przez operatorów i personel techniczny.

Aby utrzymać wysoki poziom bezpieczeństwa i wydajności operacyjnej, SOP powinny być traktowane jako „żywe” dokumenty, podlegające regularnym aktualizacjom. Zaleca się ich przegląd co najmniej raz w roku lub w przypadku wprowadzenia nowych technologii, zmiany przepisów lub wystąpienia incydentów operacyjnych. Kolejnym ważnym elementem jest sposób zarządzania dokumentacją – procedury powinny być dostępne zarówno w formie papierowej, jak i elektronicznej, z jasno określoną metodą dystrybucji i archiwizacji. SOP powinny być również zintegrowane z systemem zarządzania bezpieczeństwem (SMS), tak aby każda procedura była powiązana z analizą ryzyka, monitorowaniem zdarzeń i wnioskami z raportów. Konieczne jest również zapewnienie, aby wszystkie procedury zawierały wskazanie odpowiedzialności – kto wykonuje określone czynności i kto je zatwierdza. W ten sposób SOP stają się nie tylko instrukcjami pracy, ale także narzędziem budowania kultury bezpieczeństwa i porządku organizacyjnego.

5.6.2. Zlecenia pracy (WO)

WO są kluczowym elementem zarządzania eksploatacją i konserwacją dronów (UAV). Zlecenia pracy są tworzone w odpowiedzi na planowane inspekcje, konserwacje, naprawy i inne zadania operacyjne.

Proces tworzenia zleceń pracy rozpoczyna się od zidentyfikowania potrzeby wykonania zadania, która może wynikać z harmonogramu konserwacji, wyników kontroli, zgłoszonych usterek lub planowanych operacji. Zlecenia te mogą również wynikać z zaleceń zawartych w raportach dotyczących poprzednich operacji i napraw.

5.6.2.1. Treść zlecenia

Zlecenie pracy powinno zawierać następujące informacje:

- Identyfikacja zadania: unikalny numer zlecenia pracy, data wydania i identyfikacja drona (numer seryjny, model).
- Szczegółowy opis zadania do wykonania, w tym zakres prac, cel i wymagane działania.
- Planowana data i godzina rozpoczęcia i zakończenia zadania.
- Wymagane zasoby ludzkie (operatorzy, technicy), materiały (części zamienne, narzędzia, materiały eksploatacyjne) i wszelkie wsparcie logistyczne.
- Odniesienie do odpowiednich standardowych procedur operacyjnych (SOP) i instrukcji technicznych.

Po utworzeniu zlecenia pracy zadanie jest przydzielane odpowiednim technikom lub zespołom serwisowym. Przydzielanie zadań uwzględnia kwalifikacje i certyfikaty personelu, dostępność zasobów oraz priorytet zadania. Każdy przydzielony pracownik powinien otrzymać kopię zlecenia pracy oraz wszystkie niezbędne instrukcje i materiały.

5.6.2.2. Realizacja zlecenia

Personel przystępuje do realizacji zlecenia zgodnie z określonymi procedurami i standardami. Podczas wykonywania zadania specjaliści:

- Rejestrują postępy prac, dokumentują wykonane czynności, użyte materiały, wymienione części i wszelkie napotkane problemy.
- Przestrzegają standardowych procedur operacyjnych (SOP): upewniają się, że wszystkie działania są zgodne z obowiązującymi standardowymi procedurami operacyjnymi.
- Komunikują się z przełożonymi: regularnie informują przełożonych o postępach w pracy i wszelkich problemach, które mogą wymagać dodatkowych decyzji lub zasobów.

Zlecenia pracy powinny być tworzone i wykonywane w sposób umożliwiający pełne śledzenie ich cyklu życia – od momentu zgłoszenia zadania, poprzez jego wykonanie, aż po zamknięcie i archiwizację. Każde zlecenie pracy powinno zawierać jasną identyfikację zadania, dane osób odpowiedzialnych oraz podpisy (papierowe lub cyfrowe) osób wykonujących i zatwierdzających zadanie.

Dokumentacja powinna być przechowywana w sposób umożliwiający integrację z zarządzaniem magazynem – zlecenia mogą automatycznie generować zapotrzebowania na części zamienne, materiały eksploatacyjne lub narzędzia. Ważnym elementem jest również dokumentowanie wniosków z podsumowań po zakończeniu zadań – analiza przebiegu operacji i problemów pozwala nie tylko na usprawnienie przyszłych zadań, ale także na udoskonalenie standardowych procedur operacyjnych (SOP). Regularne archiwizowanie i analiza zrealizowanych zleceń serwisowych umożliwia identyfikację trendów, ocenę skuteczności działań konserwacyjnych oraz wdrażanie usprawnień organizacyjnych, co bezpośrednio przekłada się na zwiększenie bezpieczeństwa i niezawodności floty bezzałogowych statków powietrznych.

5.6.2.3. Kontrole jakości

Po zakończeniu pracy kierownik lub wyznaczony inspektor przeprowadza kontrolę jakości wykonanych zadań. Kontrola ta obejmuje:

- Sprawdzenie, czy wszystkie czynności zostały wykonane zgodnie z zleceniem pracy i obowiązującymi procedurami.
- Przeprowadzenie testów funkcjonalnych drona w celu upewnienia się, że jest on w pełni sprawny i gotowy do działania.
- Potwierdzenie wykonania zadania w systemie zarządzania zleceniami pracy i aktualizacja dokumentacji technicznej drona.
- Archiwizacja i analiza zlecenia pracy oraz powiązanej dokumentacji. Regularna analiza zarchiwizowanych zleceń pracy pozwala na identyfikację trendów, ocenę skuteczności działań konserwacyjnych oraz optymalizację procesów operacyjnych.

Organizacje powinny regularnie przeprowadzać wewnętrzne przeglądy i audyty zleceń pracy w celu zapewnienia zgodności z przepisami i procedurami oraz usprawnienia procesów zarządzania. Audyty te mogą obejmować przegląd dokumentacji, ocenę wydajności techników oraz analizę skuteczności zarządzania zasobami.

5.7. Odpowiedzialność (ubezpieczenie, zgłaszanie incydentów)

Zgłaszanie incydentów i wypadków związanych z dronami jest ważnym elementem zapewnienia bezpieczeństwa i zgodności z przepisami na całym świecie. Każdy operator dronów powinien zapoznać się z lokalnymi przepisami dotyczącymi zgłaszania incydentów, prowadzić szczegółową dokumentację i zgłaszać wszelkie nieprawidłowości w określonych terminach. Działania te przyczyniają się do zwiększenia bezpieczeństwa operacyjnego i zapobiegania przyszłym problemom. Chociaż metody i szczegóły zgłaszania mogą się różnić w zależności od przepisów obowiązujących w danym kraju, podstawowe zasady pozostają podobne. Każdy kraj ma zazwyczaj własny system zgłaszania incydentów, który jest zgodny z międzynarodowymi standardami bezpieczeństwa lotniczego.

5.7.1. Zgłaszanie incydentów

Pracownik, który jest świadkiem zdarzenia lub uczestniczy w wypadku, powinien niezwłocznie zgłosić to zdarzenie swojemu przełożonemu lub odpowiedniej jednostce organizacyjnej. W związku z tym należy ustawić metodę lub dokument, za pomocą którego pracownicy będą zgłaszać zdarzenia (niezależnie od tego, czy wymagają one natychmiastowej reakcji, czy nie).

Organizacja musi jasno określić osobę odpowiedzialną za zatwierdzanie zgłoszeń (np. kierownik, kierownik ds. zgodności).

Zgłaszanie incydentów jest zazwyczaj obowiązkowe, gdy drony są zaangażowane w poważne incydenty lub wypadki.

5.7.1.1. Możliwe zdarzenia

Incydenty mogą obejmować:

- Awaria techniczna: uszkodzenia mechaniczne, awarie systemu nawigacyjnego, problemy z silnikami, akumulatorami lub innymi kluczowymi komponentami drona.
- Utrata łączności: Przerwanie łączności między operatorem a dronem, co może prowadzić do niekontrolowanego lotu.
- Kolizje: zderzenie drona z obiektami (naturalnymi lub sztucznymi) podczas lotu.
- Zagrożenia bezpieczeństwa: Każda sytuacja, która może stanowić zagrożenie dla życia, zdrowia lub mienia osób postronnych.
- Naruszenia przepisów: Latanie w obszarach objętych zakazem lub przekraczanie limitów określonych w przepisach prawnych.

5.7.1.2. Sposoby zgłaszania incydentów

Incydenty i wypadki należy zgłaszać w określonym terminie, który może się różnić w zależności od kraju: Incydenty należy zgłaszać zazwyczaj w ciągu 72 godzin od ich wystąpienia, natomiast wypadki należy zgłaszać natychmiast, zazwyczaj w ciągu 24 godzin. Chociaż konkretne metody zgłaszania mogą się różnić w zależności od kraju, istnieją zasadniczo dwa główne sposoby zgłaszania incydentów:

- Zgłaszanie online: Wiele krajów posiada elektroniczne systemy zgłaszania incydentów, które umożliwiają szybkie i łatwe przesłanie szczegółów incyduentu przez Internet.
- Formularze zgłoszeniowe: w niektórych przypadkach można również pobrać formularze, wypełnić je ręcznie i przesłać do odpowiednich organów w formie elektronicznej lub papierowej.

5.7.1.3. Treść zgłoszeń incydentów

Każdy incydent należy zgłaszać natychmiast i rejestrować w systemie zarządzania incydentami, który powinien zawierać następujące informacje:

- Data i godzina zdarzenia: dokładny moment, w którym doszło do incyduentu.

- Lokalizacja: dokładne miejsce, w którym doszło do zdarzenia.
- Dane operatora: informacje o osobie odpowiedzialnej za obsługę drona w momencie zdarzenia.
- Szczegóły dotyczące drona: model, numer seryjny i inne informacje techniczne dotyczące drona, który brał udział w zdarzeniu.
- Uczestnicy
- Opis zdarzenia: Szczegółowe informacje o zdarzeniu, w tym wszystkie istotne okoliczności.
- Konsekwencje: Opis wszelkich szkód materialnych, uszkodzeń drona i obrażeń osób postronnych.
- Podjęte działania: Opis kroków podjętych w celu zapobieżenia eskalacji zdarzenia i zapewnienia bezpieczeństwa.
- Zalecenia: Wnioski i zalecenia dotyczące usprawnienia procedur lub technik w celu zapobiegania podobnym incydentom w przyszłości.

5.7.1.4. Inne kwestie

Szybkie zgłaszanie incydentów ma kluczowe znaczenie dla szybkiej analizy i ewentualnego wprowadzenia środków zapobiegawczych.

Incydenty powinny być regularnie analizowane przez zespół techniczny, a wszelkie wnioski powinny znaleźć odzwierciedlenie w modyfikacjach procedur operacyjnych, szkoleniach personelu i ulepszeniach technicznych sprzętu.

Właściwe zgłaszanie incydentów nie tylko pomaga zapobiegać przyszłym problemom, ale także zwiększa bezpieczeństwo operacyjne i buduje zaufanie do procedur zarządzania dronami.

Raporty te powinny umożliwiać analizę incydentów, identyfikację ryzyka i wdrożenie procedur mających na celu poprawę sytuacji.

W wielu krajach operatorzy dronów są zobowiązani do posiadania ubezpieczenia od odpowiedzialności cywilnej na wypadek szkód wyrządzonych osobom trzecim lub mieniu. Ubezpieczenie to jest szczególnie ważne w przypadku lotów komercyjnych lub lotów nad obszarami zaludnionymi.

Aby zwiększyć skuteczność zgłaszania incydentów i wypadków oraz poprawić bezpieczeństwo, organizacja powinna zintegrować system zgłaszania z systemem

zarządzania bezpieczeństwem (SMS). Dzięki temu każde zgłoszenie incydentu stanie się częścią szerszej analizy ryzyka i umożliwi opracowanie skutecznych środków zapobiegawczych.

Kolejnym ważnym aspektem jest wdrożenie „kultury sprawiedliwości”, tj. środowiska, w którym pracownicy mogą zgłaszać incydenty bez obawy o sankcje dyscyplinarne, chyba że doszło do rażącego zaniedbania. Podejście to promuje otwartość, zwiększa liczbę zgłaszanych incydentów i pozwala na skuteczniejsze identyfikowanie zagrożeń. W przypadku poważnych incydentów lub wypadków operatorzy są zobowiązani nie tylko do zgłoszenia incydentu wewnątrz, ale także do powiadomienia odpowiednich organów regulacyjnych, takich jak krajowy organ lotnictwa cywilnego (np. EASA w Europie, FAA w USA, ULC w Polsce).

Oprócz bieżącego zgłaszania incydentów organizacja powinna przygotowywać regularne raporty podsumowujące (np. miesięczne lub roczne), aby umożliwić analizę trendów, ocenę skuteczności działań naprawczych i planowanie dalszych środków zapobiegawczych. Raporty te mogą być wykorzystywane zarówno wewnątrz, jak i przekazywane organom nadzorczym.

Dobrze zaprojektowany system zgłaszania incydentów w połączeniu z obowiązkowym ubezpieczeniem nie tylko zwiększa bezpieczeństwo operacyjne, ale także buduje zaufanie klientów, organów regulacyjnych i opinii publicznej do organizacji zarządzającej flotą dronów.

5.8. Skuteczna komunikacja profesjonalna

W środowisku pracy technika zajmującego się obsługą i konserwacją bezzałogowych statków powietrznych (UAV) profesjonalna komunikacja odgrywa kluczową rolę w zapewnieniu płynnego przebiegu operacji, skuteczności napraw i bezpieczeństwa całego procesu operacyjnego. Jednym z najważniejszych narzędzi tej komunikacji jest odpowiednio prowadzona dokumentacja techniczna. Dokumentacja ta nie tylko umożliwia przekazywanie informacji między członkami zespołu, ale także stanowi podstawę kontaktu z klientami, przełożonymi, audytorami i przedstawicielami instytucji nadzorujących. W tym kontekście profesjonalna komunikacja przybiera formę uporządkowanego przekazywania informacji technicznych, operacyjnych, logistycznych i formalnych przy użyciu odpowiednio przygotowanych i znormalizowanych dokumentów.

Aby jednak dokumentacja mogła spełniać swoje zadania komunikacyjne, musi być wspierana przez zestaw zasad i elementów skutecznej komunikacji zawodowej. Skuteczność tej komunikacji obejmuje między innymi: jasność i jednoznaczność przekazu, stosowanie wspólnego języka i standardowych formatów, aktualność informacji, a także dostępność i bezpieczeństwo danych. Profesjonalna komunikacja techniczna wymaga również logicznej struktury dokumentów, zgodności z procedurami oraz otwartości na informacje zwrotne. Każdy technik powinien również posiadać umiejętności językowe i cyfrowe, aby efektywnie poruszać się w wielokanałowym środowisku dokumentacji. Wszystkie te elementy razem stanowią podstawę skutecznej i odpowiedzialnej wymiany informacji, która jest niezbędna podczas pracy z bezzałogowymi statkami powietrznymi.

Rodzaje dokumentów technicznych pełniących funkcję komunikacyjną są zróżnicowane i obejmują dokumenty związane zarówno z bieżącą eksploatacją, jak i planowaniem oraz raportowaniem działań. Najważniejsze dokumenty to raporty techniczne, które są tworzone przez techników serwisowych po przeprowadzeniu konserwacji, napraw lub przeglądów bezzałogowych statków powietrznych. Taki raport zawiera szczegółowy opis stanu technicznego urządzenia, wykrytych usterek, zużycia komponentów, przeprowadzonych testów, a także zalecenia dotyczące dalszych działań. Tego typu dokumentacja jest przekazywana zarówno wewnątrz – do przełożonych lub planistów technicznych – jak i zewnątrz, np. do klienta, który otrzymuje informacje zwrotne na temat stanu powierzonego sprzętu. Profesjonalizm tego dokumentu znajduje odzwierciedlenie w jego przejrzystości, zgodności z normami dokumentacyjnymi oraz umiejętności technika w zakresie precyzyjnego i obiektywnego formułowania wniosków.

Innym ważnym rodzajem dokumentów wspierających komunikację zawodową są zlecenia pracy. Dokumenty tego typu są wydawane przez osoby odpowiedzialne za planowanie lub zarządzanie konserwacją techniczną i zawierają konkretne instrukcje dotyczące zakresu działań, terminów, niezbędnych zasobów i przydzielonego personelu. Zlecenie pracy służy jako formalne przekazanie zadania, które musi zostać wykonane zgodnie z określonymi procedurami. Po zakończeniu pracy dokument jest często zwracany do wystawcy z adnotacją o przebiegu realizacji, ewentualnych problemach i końcowych wynikach. W ten sposób stanowi on dwukierunkowy kanał komunikacji: od klienta do wykonawcy i z powrotem, zapewniając pełną przejrzystość i odpowiedzialność operacyjną.

Standardowe procedury operacyjne, czyli SOP, są również szczególnie ważne w komunikacji zespołowej i organizacyjnej. Dokumenty tego typu szczegółowo określają sposób wykonywania określonych czynności, od przygotowania drona do lotu, poprzez zasady bezpiecznego startu, nawigacji i lądowania, aż po konserwację, utylizację materiałów i procedury awaryjne. SOP pełnią funkcję edukacyjną i koordynacyjną, umożliwiając wszystkim członkom zespołu działanie zgodnie z jednolitymi, sprawdzonymi schematami. Komunikacja za pośrednictwem SOP eliminuje domysły, niejasności i indywidualne interpretacje, prowadząc do większej przewidywalności i powtarzalności wyników pracy. Stanowią one również podstawę szkoleń, certyfikacji i wewnętrznych audytów jakości.

Dzienniki serwisowe i notatki techniczne, które mają charakter operacyjny i są na bieżąco aktualizowane, również odgrywają ważną rolę w codziennej praktyce technicznej. Rejestrują one wszystkie czynności wykonane na dronie w danym dniu, użyte materiały, użyte narzędzia oraz uwagi dotyczące dalszego użytkowania sprzętu. Dokumenty takie są szczególnie przydatne, gdy kilku techników pracuje na jednym urządzeniu na zasadzie rotacji lub zmian. Dziennik serwisowy umożliwia płynne przekazywanie informacji i kontynuację pracy bez konieczności czasochłonnego szkolenia nowych pracowników w bieżącej sytuacji. Z punktu widzenia komunikacji wewnętrznej jest to podstawowe narzędzie służące do utrzymania ciągłości działania.

W przypadku wykonywania napraw, przeglądów lub operacji lotniczych na zlecenie klienta, niezwykle ważnym dokumentem staje się raport końcowy przekazywany klientowi. Tego typu dokument powinien być sporządzony w sposób profesjonalny, przystępny i jednoznaczny. Powinien zawierać zarówno dane techniczne, jak i interpretację wyników prac, informacje o potencjalnych zagrożeniach oraz sugestie dotyczące dalszych działań. Profesjonalna komunikacja z klientem w formie pisemnego raportu technicznego ma kluczowe znaczenie dla budowania zaufania, zapewnienia przejrzystości usług i utrzymania wysokich standardów relacji handlowych.

Nie można również pominąć roli powiadomień i raportów z incydentów. W środowisku operacyjnym bezzałogowych statków powietrznych często zdarzają się sytuacje awaryjne, awarie, naruszenia przestrzeni powietrznej i inne nieprawidłowości. Każde takie zdarzenie musi być odpowiednio udokumentowane i zgłoszone wewnętrznie, a często także instytucjom zewnętrznym. Oprócz opisu zdarzenia, raport z incydentu zawiera dane operatora, dane drona, miejsce i czas zdarzenia oraz podjęte działania. Tego typu

dokumentacja jest niezwykle ważnym narzędziem komunikacji kryzysowej, umożliwiającym szybką reakcję, analizę sytuacji i wdrożenie działań naprawczych. Jednocześnie dokumenty te pełnią funkcję prawną i mogą stanowić podstawę do kontroli, ubezpieczenia lub działań naprawczych.

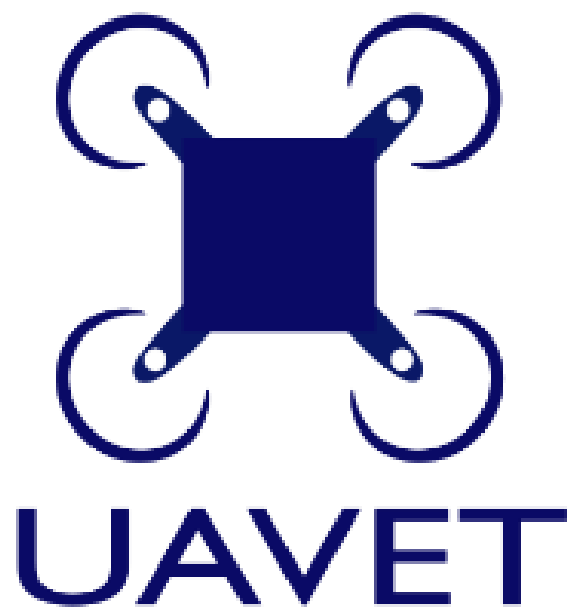
W kontekście komunikacji zawodowej nie można zapominać o mniej formalnych, ale nadal ważnych dokumentach, takich jak szablony wiadomości e-mail, notatki ze spotkań oraz protokoły z odpraw i podsumowań. Choć pozornie mniej techniczne, te formy dokumentacji są również integralną częścią codziennego funkcjonowania zespołów UAV i wpływają na efektywność współpracy. Dobrze przygotowany szablon wiadomości może przyspieszyć odpowiedź na zapytanie klienta, ułatwić raportowanie wyników lotu lub poprawić organizację zespołu.

Podsumowując, dokumentacja techniczna UAV służy nie tylko do rejestrowania danych i zapewnienia zgodności z procedurami, ale także stanowi podstawę skutecznej komunikacji zawodowej w środowisku technicznym. Dzięki doborowi i stosowaniu odpowiednich rodzajów dokumentów oraz przestrzeganiu zasad skutecznej komunikacji zawodowej możliwe jest dokładne przekazywanie informacji, skuteczne planowanie i wykonywanie zadań, szybkie reagowanie na sytuacje kryzysowe oraz budowanie relacji opartych na zaufaniu i przejrzystości. Właściwe wykorzystanie tej dokumentacji ma bezpośredni wpływ na jakość usług, bezpieczeństwo operacyjne i rozwój kompetencji całego zespołu technicznego.

Aby uzupełnić skuteczną komunikację zawodową w środowisku UAV, należy również zwrócić uwagę na rolę nowoczesnych narzędzi cyfrowych, które wspierają procesy raportowania, archiwizacji i wymiany informacji. Systemy CMMS (Computerised Maintenance Management System), aplikacje mobilne i zintegrowane platformy zarządzania flotą bezzałogowych statków powietrznych są coraz częściej wykorzystywane do umożliwienia dokumentacji w czasie rzeczywistym, automatycznego rejestrowania parametrów lotu i bieżącego raportowania stanu technicznego sprzętu. Takie rozwiązania umożliwiają szybką wymianę danych w zespole, a także łatwiejsze monitorowanie trendów awarii, planowanie przeglądów i analizę wydajności operacyjnej. Ważnym elementem skutecznej komunikacji zawodowej jest również odpowiednie szkolenie personelu w zakresie umiejętności miękkich.

Oprócz szkoleń technicznych operatorzy i technicy powinni regularnie uczestniczyć w szkoleniach z zakresu pisania raportów, przygotowywania notatek technicznych, odpraw

przed lotem i po locie oraz prawidłowego przekazywania informacji zwrotnych. Szkolenia te pozwalają na standaryzację komunikacji w zespole, eliminują ryzyko błędnej interpretacji i zapewniają, że wszystkie dane zawarte w dokumentacji są jasne, jednoznaczne i zgodne z normami. Integracja narzędzi cyfrowych z umiejętnościami komunikacyjnymi personelu tworzy spójny system wymiany informacji, który ma bezpośredni wpływ na jakość usług technicznych, bezpieczeństwo operacyjne i przejrzystość działań całej organizacji.



ROZWÓJ UMIEJĘTNOŚCI ZAWODOWYCH TECHNIKÓW ELEKTROMECHANIKÓW W ZAKRESIE
KONSERWACJI I NAPRAWY BEZZAŁOGOWYCH STATKÓW POWIETRZNYCH
2023-1-TR01-KA220-VET-000151085



Co-funded by
the European Union

