

Streszczenie

Wraz z dynamicznym wzrostem liczby bezzałogowych statków powietrznych (BSP) operujących w przestrzeni lotniczej, zwiększa się liczba incydentów i niebezpieczeństw wynikających z uszkodzeń i anomalii pracy ich układów napędowych i wykonawczych. Obecnie duże wyzwanie stanowi wczesne i skuteczne wykrywanie wszelkich awarii i uszkodzeń, mogących skutkować niekontrolowanym zachowaniem drona w czasie jego eksploatacji. W BSP szczególnie narażone na uszkodzenia są śmigła, których kondycja warunkuje bezpieczeństwo i precyzję lotów autonomicznych. Tematyka rozprawy dotyczy diagnostyki stanu śmigieł wielowirnikowych dronów, przeprowadzanej w zautomatyzowany sposób w trakcie wykonywanego lotu. Autor w rozprawie stawia i udowadnia tezę, że taka diagnostyka może być prowadzona skutecznie w reżimie czasu rzeczywistego, przy użyciu zaproponowanych metod uczenia maszynowego, na bazie przetwarzania danych sensorycznych w mikrokontrolerze pokładowym drona.

W ramach prac zaprojektowano niezależny od systemów pokładowych drona układ akwizycji danych sensorycznych, który posłużył do zebrania pomiarów z czujników zamontowanych w pobliżu śmigieł. Sygnały rejestrowano w trakcie licznych kampanii lotów eksperymentalnych z użyciem wybranych modeli dronów, zarówno w przestrzeni miejskiej, jak i w laboratorium. Rozpatrywano scenariusze obejmujące różne typy usterek oraz dwa rozmiary uszkodzeń śmigieł w rozmaitych zestawieniach ich lokalizacji na ramionach BSP. Pomiary z akcelerometrów, żyroskopów oraz mikrofonów cyfrowych zebrano i upubliczniono w ogólnodostępnym repozytorium danych pomiarowych.

Na podstawie zgromadzonych danych przygotowano klasyfikatory uszkodzeń w postaci modeli sztucznej sieci neuronowej. Klasyfikator zaimplementowany w mikrokontrolerze przeprowadzał diagnostykę, określając rodzaj, miejsce i rozmiar uszkodzenia dwu- i trójpłatowych śmigieł. Podczas eksperymentów badano klasyfikatory przygotowane z użyciem różnych czujników i ich

kombinacji, korzystających z danych w dziedzinie czasu, wyekstrahowanych cech dziedziny częstotliwości oraz sygnatur czasowo-częstotliwościowych. Część modeli pozwoliła na diagnozowanie anomalii w reżimie czasu rzeczywistego, zapewniając klasyfikację przeprowadzaną 500 razy na sekundę.

W rozprawie zaproponowano także dwa nowe wskaźniki oceny jakości klasyfikatorów. Pierwszy z nich pozwala porównać różne klasyfikatory z uwzględnieniem ich dokładności oraz liczby rozpatrywanych klas. Drugi wskaźnik dotyczy systemów, w których czas detekcji jest wielkością krytyczną. Umożliwia on ocenę klasyfikatorów o różnej dokładności, liczbie klas oraz czasie przetwarzania.

W drodze badań eksperymentalnych wykazano wysoką skuteczność detekcji dla zaproponowanego podejścia w zakresie lokalizacji i identyfikacji uszkodzeń śmigieł wielowirnikowych BSP. Z uwagi na specyfikę lotów bezzałogowymi statkami powietrznymi klasy wielowirnikowej (mocno ograniczony udźwig i czas lotu), szczególnie duży nacisk położono na optymalizację zaproponowanych rozwiązań, aby:

- a) opracowany elektroniczny system pomiarowy był lekki i uniwersalny (możliwy do użycia w dowolnym dronie wielowirnikowym),
- b) zaproponowane metody przetwarzania sygnałów cechowała możliwie niska złożoność obliczeniowa.

Dzięki temu proponowane metody wykazują potencjał ich implementacji w systemach awioniki pokładowej dronów zarówno produkowanych seryjnie, jak i konstrukcji własnych.

Abstract

With the rapid expansion of the number of unmanned aerial vehicles (UAVs) operating in the airspace, the incidents and dangers resulting from damage and anomalies in the operation of their propulsion and actuation systems are increasing. Today, a major challenge is the early and effective detection of any malfunctions and faults that may result in uncontrolled behavior of the drone during its operation. In UAVs, particularly vulnerable to fault are propellers, the condition of which determines the safety and precision of autonomous flight. The subject of the dissertation concerns the condition diagnostics of the propellers of multi-rotor drones, carried out in an automated manner during the flight being performed. In the dissertation, the author posits and proves the thesis that such diagnostics can be carried out effectively in the real-time regime, using the proposed machine learning methods, based on the processing of sensory data in the drone's on-board microcontroller.

As part of the work, a sensory data acquisition system independent of the drone's onboard systems was designed and used to collect measurements from sensors mounted near the propellers. Signals were recorded during numerous experimental flight campaigns using selected drone models, both in urban space and in the laboratory. Scenarios involving different types of defects and two sizes of propeller faults in various sets of their locations on UAV arms were considered. Measurements from accelerometers, gyroscopes, and digital microphones were collected and made publicly available in a sensory data repository.

Based on the collected data, fault classifiers were prepared in the form of artificial neural network models. The classifier implemented in the microcontroller performed diagnostics, determining the type, location, and size of faults in two- and three-bladed propellers. During the experiments, classifiers prepared with various sensors and their combinations were tested, using time-domain data, extracted frequency-domain features, and time-frequency

signatures. Some of the models allowed for diagnosing anomalies in the real-time regime, providing classification performed 500 times per second.

The dissertation also proposes two new indicators for evaluating the quality of classifiers. The first one allows for the comparison of different classifiers with respect to their accuracy and the number of classes considered. The second indicator applies to systems in which detection time is a critical quantity. It allows the evaluation of classifiers with different accuracy, number of classes, and processing time.

Through experimental research, high detection performance was demonstrated for the proposed approach in locating and identifying UAV multi-rotor propeller faults. Given the nature of multi-rotor class drone flight (severely limited payload and flight time), particular emphasis was placed on optimizing the proposed solutions to:

- a) the developed electronic measurement system was lightweight and versatile (usable in any multi-rotor drone),
- b) the proposed signal processing methods had the lowest possible computational complexity.

As a result, the proposed methods show potential for their implementation in on-board avionics systems of both mass-produced drones and custom designs.