

Streszczenie

Zagadnienie zapewnienia bezpieczeństwa eksploatacji bezzałogowych systemów latających stanowi jedno z najważniejszych wyzwań stawianych przed tym szybko rozwijającym się segmentem gospodarki. Dostępne opracowania wskazują, że techniczne przyczyny defektów i awarii są najpowszechniejsze i występują znacznie częściej w porównaniu do lotnictwa załogowego. Wśród szczegółowych kategorii uszkodzeń miniaturowych UAV (ang. *Unmanned Aerial Vehicles*) najczęściej wskazywane są defekty systemów pomiarowych, zakłócenia kanałów komunikacji i sterowania oraz awarie elementów wykonawczych.

Tematyka rozprawy skupiona jest na rozwiązaniu szczególnego problemu technicznego, jakim jest wczesna i wykonywana automatycznie detekcja uszkodzeń rotorów wielowirnikowych jednostek latających. Przedstawiony jest proces badawczy, poczynając od rozpoznania i oszacowania skali problemu, poprzez analizę potencjalnych źródeł informacji diagnostycznej i zaproponowanie wskaźników stanu systemu, kończąc na opracowaniu szeregu metod detekcji, lokalizacji i identyfikacji zdefiniowanej klasy uszkodzeń. Rozwiązania oparte są o analizę i przetwarzanie sygnałów wibroakustycznych rejestrowanych w trakcie lotu oraz inteligentne modele pozwalające na klasyfikowanie uzyskanych sygnatur pod kątem wykrycia i zidentyfikowania defektów.

W początkowych rozdziałach pracy demonstrowany jest wpływ uszkodzeń płatów wirników na osiągi i charakterystyki pracy bezzałogowego systemu latającego. Poczynione obserwacje, rozszerzone następnie w szeregu dalszych eksperymentów, prowadzą do zaproponowania sposobów wykorzystania w diagnostyce informacji zawartej w widmie analizowanych sygnałów. Na ich podstawie opracowano ewolucyjnie cztery metody pozwalające na wykrycie uszkodzenia, określenie jego podtypu oraz wskazanie wadliwego zespołu napędowego. Trzy z nich wykorzystują analizę widma wibracji wpro-

wadzanych do konstrukcji UAV przez uszkodzony element wykonawczy i rejestrowanych z wykorzystaniem czujników inercyjnych. Ostatni algorytm oparty jest o analizę cepstralną sygnałów akustycznych uzyskanych dzięki miniaturowej macierzy mikrofonów. Wspólnym elementem stanowi zastosowanie technik uczenia maszynowego do rozpoznawania wzorców charakterystycznych dla danego stanu wirników.

W rozprawie zawarto również opis prac technicznych, obejmujących konstrukcję stanowisk badawczych oraz wykonanie oprzyrządowania pomiarowego w formie dedykowanych systemów pokładowych prototypowego UAV. Na potrzeby walidacji proponowanych rozwiązań diagnostycznych zebrano kilka zestawów danych wibroakustycznych obejmujących wiele przypadków defektów i rejestrowanych dla możliwie szerokiego spektrum warunków oraz trajektorii lotów. Każdy ze zbiorów opracowano na podstawie kilkudziesięciu rzeczywistych eksperymentów.

Przedstawione w pracy wyniki wskazują na wysoką skuteczność proponowanych metod w postawionym zadaniu diagnostycznym. Najlepsze modele pozwalają na prawidłowe określenie stanu systemu w niemal wszystkich analizowanych przypadkach. W procesie badawczym duży nacisk kładziono na możliwości implementacji rozwiązań w systemach awioniki pokładowej ograniczonych w zakresie mocy obliczeniowej z uwagi na masę, wymiary i pobór energii. Z tego względu proponowane w rozprawie metody charakteryzują się różnymi możliwościami w zależności od zasobów dostępnych dla danej wielkości i klasy docelowej jednostki latającej.

Abstract

The issue of ensuring the safe operation of unmanned aerial vehicles (UAVs) is one of the most important challenges facing this rapidly growing segment of the economy. Available studies indicate that technical causes of defects and failures are the most common and occur much more frequently compared to manned aviation. Among the variety of faults in miniature UAVs, the most common are errors in measurement systems, communication link interferences and actuators faults.

The topic of the dissertation is focused on the solution of a specific technical problem, which is the early and automatic fault detection in the rotors of multi-rotor aerial vehicles. The research process is presented, starting with the estimation of the importance and scale of the problem, through the analysis of potential sources of diagnostic information and the proposal of indicators of system status, ending with the development of a series of methods for detection, localization and identification of a defined class of faults. The solutions are based on the analysis and processing of vibroacoustic signals recorded during flight, as well as intelligent models that allow the classification of the obtained signatures for the fault detection and identification.

In the initial chapters of the thesis, the impact of rotor faults on the performance and operational characteristics of an unmanned aerial system is demonstrated. The observations made, extended in a series of further experiments, lead to the proposal of ways to use the information contained in the spectrum of the analyzed signals in diagnostics. Based on these, four methods have been evolutionarily developed to detect the fault, determine its subtype and indicate the faulty propulsion unit. Three of them use the analysis of the spectrum of vibrations introduced into the UAV structure by the defective actuator and recorded using inertial sensors. The last algorithm is based on cepstral analysis of acoustic signals obtained through a miniature microphone array. A common element is the use of machine learning methods to recognize patterns characteristic for a given rotor condition.

The dissertation includes a description of the technical works, including the construction of test stands and the implementation of measurement instrumentation in the form of dedicated on-board systems of the prototype UAV. For the validation of the proposed diagnostic solutions, several vibro-

acoustic datasets were collected covering multiple fault cases and recorded for wide range of conditions and flight trajectories. Each set was developed based on dozens of real experiments.

The results presented in the thesis indicate the high efficiency of proposed methods in diagnostic task posed. The best models correctly determine the state of the system in almost all analyzed cases. In the research process, great emphasis was placed on the possibility of implementing solutions in on-board avionics systems limited in terms of computing power due to weight, physical dimensions and power consumption. For this reason, the methods proposed in the dissertation are characterized by different capabilities depending on the resources available for the size and class of the target UAV.