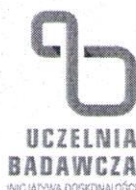




Politechnika
Śląska



UCZELNIA
BADAWCZA
INICJATYWA DOSKONAŁOŚCI

Wydział Mechaniczny Technologiczny
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

Dr hab. inż.
Andrzej Katunin
Profesor uczelni

Gliwice, dn. 08.08.2022

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. **Artura Kurnyty**

pt. „**Monitorowanie pęknięć zmęczeniowych elementów struktury statku powietrznego za pomocą zintegrowanej sieci rezystancyjnych czujników drabinkowych**”

1. Ogólna charakterystyka pracy

Monitorowanie stanu elementów statków powietrznych wiąże się z coraz bardziej restrykcyjnymi wymaganiami ze strony instytucji krajowych i międzynarodowych, stanowiących organy nadzorujące i wykonawcze w lotnictwie cywilnym i wojskowym, a także ze strony podmiotów komercyjnych, chcących zapewnić większe bezpieczeństwo i niezawodność eksploatowanych statków powietrznych. Wiąże się to nie tylko z bezpieczeństwem i zdatnością statków powietrznych do lotu, ale również z redukcją kosztów eksploatacji, ponoszonych podczas stosowania powszechnej już filozofii tolerowanego uszkodzenia, gdzie głównym narzędziem analizy stanu elementów statków powietrznych są metody badań nieniszczących, stosowane w sposób regularny podczas inspekcji. Metody monitorowania stanu konstrukcji wpisują się w najnowszą i ciągle rozwijaną filozofię monitorowania opartego na stanie (ang. Condition-Based Monitoring – CBM), które pozwalają w sposób istotny zwiększyć prawdopodobieństwo wykrycia i/lub propagacji uszkodzenia we wczesnym stadium rozwoju przy jednoczesnej redukcji kosztów eksploatacji. Zatem podjęta przez Autora rozprawy tematyka badań jest aktualna i bardzo dobrze wpisuje się w obecne potrzeby rozwoju systemów monitorowania stanu konstrukcji w lotnictwie. W rozprawie Autor skupia się na analizie stosowalności rezystancyjnych czujników drabinkowych do celów monitorowania stanu elementów statków powietrznych w warunkach typowych dla eksploatacji statków powietrznych, a także proponuje nowe rozwiązania w zakresie monitorowania propagacji pęknięć zmęczeniowych, demonstrując efektywność opracowanego podejścia zarówno w warunkach laboratoryjnych i eksploatacyjnych. Proponowana metodyka, odznacza się wysoką skutecznością w wykrywaniu i monitorowaniu propagujących pęknięć zmęczeniowych, a niski stopień skomplikowania jej implementacji sprzętowej i interpretacji wyników stanowi podejście konkurencyjne w stosunku do klasycznych metod i technik monitorowania stanu konstrukcji, stosowanych w lotnictwie. Uznaję zatem tematykę podjętych badań za uzasadnioną, a zakres prezentowanych rozwiązań za innowacyjny.

Politechnika Śląska
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

ul. Konarskiego 18a, pok. 407, 44-100 Gliwice
+48 32 237 10 69
andrzej.katunin@polsl.pl

NIP 631 020 07 36

ING Bank Śląski S.A. o/Gliwice 60 1050 1230 1000 0002 0211 3056



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Rozprawę przedstawiono na 176 stronach maszynopisu oraz zawiera ona spis treści, wykaz oznaczeń i skrótów, wprowadzenie, pięć rozdziałów, wnioski i spis bibliografii.

We wprowadzeniu Autor ogólnie definiuje problem badawczy, przytaczając przesłanki, przemawiające za rozwojem technik monitorowania stanu konstrukcji w aspektach zwiększenia bezpieczeństwa, gotowości operacyjnej oraz obniżenia kosztów eksploatacji statków powietrznych.

Rozdział 1. stanowi przegląd technik badań nieniszczących oraz monitorowania stanu konstrukcji ze szczegółową analizą ich stosowalności przy inspekcjach okresowych oraz ciągłym monitorowaniu elementów statków powietrznych. Szczególną uwagę Autor rozprawy poświęcił nowoczesnym czujnikom oporowym w świetle ich wykorzystania w zintegrowanych systemach monitorowania stanu technicznego, rozwijanych obecnie w ramach filozofii CBM.

W rozdziale 2. Autor zdefiniował tezę rozprawy oraz przedstawił poszczególne zadania badawcze wraz z programem badań.

Rozdział 3. stanowi syntetyczny opis przeprowadzonych badań w zakresie monitorowania propagacji pęknięć zmęczeniowych z wykorzystaniem komercyjnych oporowych czujników drabinkowych. W wyniku przeprowadzonych badań w warunkach laboratoryjnych i eksploatacyjnych Autor zidentyfikował szereg wad tych czujników, istnienie których stało się motywacją do podjęcia badań w zakresie opracowania nowych czujników.

W rozdziale 4. zostały zawarte wyniki badań Autora rozprawy w zakresie opracowania nowych drabinkowych czujników oporowych, których konstrukcja opiera się na wykonaniu ścieżek przewodzących z wykorzystaniem specjalnych farb elektroprzewodzących, dzięki czemu udało się wyeliminować niektóre wady charakterystyczne dla badanych komercyjnych czujników drabinkowych, które zostały opisane w rozdziale 3. Badania weryfikacyjne zostały przeprowadzone na elementach statków powietrznych, a zaobserwowane wady opracowanych czujników stały się przedmiotem dalszych rozważań Autora.

W ostatnim rozdziale Autor przedstawił wyniki multidyscyplinarnych badań materiałowych, mających na celu wyjaśnienie zaobserwowanych wad opracowanych czujników oraz ulepszenie właściwości użytkowych tych czujników. Kompleksowe badania materiałów pod względem ich właściwości mechanicznych, elektrycznych, cieplnych, adhezyjnych i morfologicznych pozwoliły wyjaśnić obserwowane zjawiska oraz dodatkowo ulepszyć opracowane czujniki, biorąc pod uwagę wyniki tych badań.

Pracę kończy podsumowanie, które zawiera ważne obserwacje i właściwie sformułowane wnioski, a także zawiera bezpośrednie udowodnienie tezy rozprawy na podstawie uzyskanych wyników badań. W podsumowaniu Autor przytoczył najważniejsze elementy oryginalne pracy oraz sformułował kierunki dalszych prac w zakresie prowadzonych badań.

Bibliografia zawiera 155 ponumerowanych pozycji, w tym 9 pozycji są współautorstwa Autora rozprawy.



2. Cel rozprawy i teza naukowa

Zdefiniowany cel rozprawy we wprowadzeniu oraz teza naukowa sformułowana w rozdziale 2. dotyczą opracowania efektywnych czujników do ciągłego monitorowania stanu elementów statków powietrznych, a w szczególności detekcji i kwantyfikacji pęknięć zmęczeniowych w tych elementach z wykorzystaniem koncepcji opartej na sieci czujników oporowych. Cel rozprawy i sformułowana teza naukowa są uzasadnione przede wszystkim ze względu na aspekty użytkowe rozprawy i cechują się wysoką oryginalnością naukową. Dodatkowo potwierdza to brak systematycznych opracowań w zakresie przedmiotu podjętych badań.

Problem badawczy, rozwiązywany przez Autora rozprawy wynika z jego długoletnich badań i budowanych kompetencji w zakresie oceny integralności elementów statków powietrznych zarówno z wykorzystaniem technik badań nieniszczących oraz monitorowania stanu konstrukcji. Zdefiniowana teza rozprawy jest poprawna merytorycznie i właściwie oddaje istotę rozwiązywanego problemu badawczego. Na podstawie analizy całokształtu rozprawy stwierdzam, że sformułowana teza rozprawy została spełniona poprzez opracowanie nowego rodzaju drabinkowych czujników oporowych o potwierdzonych właściwościach użytkowych i zniwelowanych wadach w stosunku do podobnych rozwiązań komercyjnych, dostępnych na rynku. Opracowane czujniki umożliwiają skuteczną detekcję i kwantyfikację pęknięć zmęczeniowych w elementach statków powietrznych, czego dowodzi Autor rozprawy, przedstawiając wyniki badań z ich wykorzystaniem zarówno w warunkach laboratoryjnych i eksploatacyjnych.

3. Ocena merytoryczna pracy

W ramach przeprowadzonych prac eksperymentalnych przez Autora rozprawy zostały przebadane komercyjne drabinkowe czujniki oporowe w sposób systematyczny, na tej podstawie wskazano wady użytkowe tych czujników, które stały się przedmiotem dalszych badań Autora. W kolejnych etapach prac Autor rozprawy opracował nowe czujniki oparte na idei mikroelektroniki elastycznej z wykorzystaniem farb elektroprzewodzących do przygotowania ścieżek pomiarowych, będących głównym elementem opracowanych czujników. Zidentyfikowane wady opracowanych czujników zostały poddane szczegółowej analizie i interpretacji, a także zostały podjęte działania w celu ich eliminacji. Należy zatem stwierdzić, że układ pracy jest spójny i logiczny, a kolejność przedstawionych wyników badań nie budzi wątpliwości.

Przegląd dostępnej literatury przygotowany przed Autora rozprawy wskazuje na umiejętność poprawnego doboru i analizy źródeł, szczególnie w przypadku braku bogatej literatury w podjętej tematyce badań. Piśmiennictwo, cytowane w rozprawie zostało dobrane w sposób rzetelny i poprawny, co pozwoliło przedstawić aktualny stan badań w tematyce rozprawy. Wnioski, zdefiniowane na podstawie przeglądu literatury, przemawiają w sposób jednoznaczny i nie budzący wątpliwości za potrzebą rozwoju czujników elektrooporowych do monitorowania propagacji pęknięć zmęczeniowych, których opracowania i badania podjął się Autor rozprawy.

Jak słusznie zauważa Autor, systematyczna analiza wrażliwości drabinkowych czujników oporowych na propagujące pęknięcie nie była wcześniej przeprowadzana. Przedstawione w rozdziale 3. wyniki stanowią cenne opracowanie nie tylko ze względu na weryfikację podatności czujników w różnych warunkach (laboratoryjne, eksploatacyjne), ale także ze względu na przeprowadzenie badań na różnych obiektach, w tym elementach o skomplikowanej postaci geometrycznej pochodzących ze statków powietrznych. Przeprowadzone badania eksperymentalne, opis których został zawarty w rozdziale 3., pozwoliły zidentyfikować szereg wad tych czujników, m.in. wrażliwość na kierunek propagacji pęknięcia oraz trudności związane z ich instalacją na elementach o skomplikowanej postaci geometrycznej. Uzyskane wyniki badań uwiarygadniają motywację Autora rozprawy do opracowania nowych czujników celem niwelacji wykrytych wad podczas badań z wykorzystaniem czujników komercyjnych, a także świadczą o jego bardzo dobrym przygotowaniu teoretycznym i praktycznym do podjęcia opisanych w rozprawie badań.

Opracowanie i charakteryzacja czujników drabinkowych do pomiaru propagacji pęknięć zmęczeniowych w elementach statków powietrznych z wykorzystaniem koncepcji elektroniki elastycznej i farb elektroprowadzących stanowią nowość i główny wkład Autora rozprawy w rozwój dyscypliny badań nieniszczących i monitorowania stanu konstrukcji. Autor zademonstrował skuteczność zaproponowanych przez siebie rozwiązań w warunkach eksploatacyjnych, przeprowadzając eksperymenty na elementach krytycznych samolotu szkoleniowego oraz śmigłowca transportowego, dodatkowo walidując uzyskane wyniki w pełnoskalowej próbie zmęczeniowej samolotu. Potwierdza to umiejętność Autora rozprawy samodzielnie planować i prowadzić badania naukowe, a także interpretować wyniki tych badań.

Ponadto, zaplanowane i przeprowadzone multidyscyplinarne badania materiałowe i termoelektromechaniczne stanowią cenne źródło informacji o zasadach działania i warunkach eksploatacji opracowanych czujników oraz wskazują na zdolność Autora rozprawy do samodzielnej analizy zjawisk fizycznych i przyczyn niezgodności oraz samodzielnego rozwiązania zdefiniowanych przez siebie problemów naukowych. Zaprezentowane wyniki badań w rozdziale 5. w sposób dokładny i wiarygodny wyjaśniają większą część zaobserwowanych zjawisk podczas badań wstępnych, opisanych w rozdziale 4.

Praca zawiera drobne uchybienia redakcyjne w postaci błędów ortograficznych, błędów formatowania i sformułowań nietechnicznych. Niepoprawna jest numeracja tabel: tabele o numerze 1 występują na stronach 72. i 104. W związku z tym, kolejne numery tabel również nie są poprawne. Te uchybienia nie mają jednak wpływu na wysoką wartość merytoryczną i jakość uzyskanych wyników.

4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Lektura rozprawy doktorskiej pozwoliła sformułować szereg komentarzy, które stanowią dyskusję z Autorem w zakresie przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników.

- 1) Dla opracowanych czujników istotna jest ich odpowiednia orientacja względem kierunku propagacji pęknięcia, co niejednokrotnie podkreśla Autor rozprawy. Możliwa jest sytuacja, gdy pęknięcie będzie propagować wzdłuż ścieżki elektroprzewodzącej czujnika. Nasuwa się zatem pytanie: jak podejść do zagadnienia właściwej lokalizacji i orientacji czujnika, gdy nie nastąpiła inicjacja uszkodzenia?
- 2) Obserwowane przeskoki napięcia na wykresach zamieszczonych w rozprawie, które są wynikiem odpowiednio otwarcia/zamknięcia pęknięcia podczas obciążeń cyklicznych zostały poprawnie opisane i zinterpretowane. Jednak przy analizie uzyskiwanych wyników badań takie przeskoki utrudniają właściwą interpretację. Istnieje przynajmniej kilka sposobów eliminacji tego zjawiska zarówno na etapie prowadzenia badań oraz podczas analizy pozyskanych sygnałów. W jaki sposób można poprawić czytelność otrzymywanych wykresów, mając na uwadze unikanie wskazań fałszywie pozytywnych?
- 3) Jakich wskazań opracowanych czujników należy spodziewać się w przypadku występowania siatki pęknięć (tzw. multiple site damage), charakterystycznych dla pękania zmęczeniowego w elementach statków powietrznych?
- 4) W przypadku nanoszonych na badane elementy podkładów izolacyjnych, na których umieszczane są czujniki drabinkowe, należy spodziewać się zgodności tych podkładów z materiałem badanego elementu w zakresie mechanizmów pękania. W danym przypadku, ze względu na prowadzone obserwacje najbardziej korzystnym byłoby pękanie kruche. Czy, zdaniem Autora rozprawy, takie kryterium mogłoby istotnie wpływać na funkcjonalność opracowanych czujników?
- 5) W jaki sposób dobrane wartości obciążeń oraz współczynniki asymetrii cyklu podczas wysokocyklowych zmęczeniowych badań weryfikacyjnych, które zostały opisane w podrozdziale 5.2.4, korelują z obciążeniami typowymi dla badań zmęczeniowych elementów statków powietrznych?

5. Ocena końcowa

Tematyka podjętych przez Autora rozprawy badań jest unikatowa i dobrze wpisuje się w aktualne trendy badań naukowych prowadzonych w kraju i na świecie w zakresie monitorowania stanu elementów statków powietrznych i innych środków technicznych, a uzyskane wyniki cechują się wysoką oryginalnością i użytecznością. Opracowane czujniki do monitorowania propagacji pęknięć, dzięki uzyskanym właściwościom użytkowym i zaletom w stosunku do dostępnych komercyjnych rozwiązań, mogą znaleźć szerokie zastosowanie w szeregu praktycznych zagadnień, a przede wszystkim w monitorowaniu stanu elementów cywilnych i wojskowych statków powietrznych. Autor rozprawy rozwiązał zdefiniowane zagadnienie naukowe, czego dowodem są opracowane czujniki oraz metodyka pomiarowa, a także wykazał się szeroką wiedzą z zakresu inżynierii



mechanicznej i materiałowej, elektroniki, metod badań nieniszczących oraz monitorowania stanu konstrukcji. Rozprawa stanowi pracę ukończoną i kompletną.

Stwierdzam, że przedłożona mi do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Artura Kurnyty spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez aktualnie obowiązującą ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, i wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

Dr hab. inż. Andrzej Katunin, prof. PŚ