

Kraków, 25.04.2022

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. **Kamila Kowalczyka** pt.

Ocena rozmiaru uszkodzeń metalowych struktur statków powietrznych przy wykorzystaniu czujników prądowirowych

Promotor: płk dr hab. inż. **Krzysztof Dragan**, prof. ITWL
Promotor pomocniczy: dr **Michał Dziendzikowski**

1. Wstęp

Recenzję rozprawy doktorskiej pod wyżej wymienionym tytułem opracowano na podstawie zlecenia prof. Grzegorza Kowalczyka, sekretarza Rady Naukowej Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych z dn. 16.03.2022.

Rozprawa została napisana w języku polskim. Praca liczy 183 strony, składa się z 6 rozdziałów oraz 2 załączników. Rozprawa zawiera wykaz bibliograficzny liczący 118 pozycji.

Rozprawa dotyczy opracowania zintegrowanych czujników prądowirowych do wykrywania lokalnych uszkodzeń struktur statków powietrznych. Zakres pracy jest bardzo obszerny, ponieważ obejmuje praktycznie wszystkie etapy opracowania prototypu. Najpierw zaproponowano metody obliczeniowe, a następnie wykonano zestaw czujników. Opracowano również układ pomiarowy do rejestracji mierzonych parametrów. Wreszcie doktorant przeprowadził bardzo szczegółowe badania w laboratorium i na obiektach rzeczywistych.

Praca została przeze mnie rozpatrywana jako osiągnięcie w dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna.

2. Treść rozprawy

Rozprawa składa się z 6 rozdziałów, w tym bibliografii, liczącej 118 pozycji oraz 2 załączników. Praca nie zawiera natomiast spisu oznaczeń ani stosowanych skrótów.

Rozdział 1 jest obszernym wprowadzeniem do pracy. Autor w przystępny sposób przedstawił problemy bezpiecznej eksploatacji konstrukcji, szczególnie z uwzględnieniem przemysłu lotniczego. Obszernie omówił, z przywołaniem wielu źródeł, ewolucję koncepcji eksploatacji statków powietrznych, tj. bezpiecznej trwałości, wg bezpiecznego uszkodzenia aż do tolerowanego uszkodzenia. Jednocześnie przedstawił koszty wiążące się z utrzymaniem ruchu, szczególnie w kontekście starzejącej się floty, zarówno w segmencie cywilnym, jak i wojskowym. Rozwiązaniem wspierającym utrzymanie ruchu jest rozwój metod badań

nieniszczących oraz systemów monitorowania (tu określanym terminem HUMS – Health and Usage Monitoring System). Rozważania te Autor wieńczy tezą naukową oraz krótkim omówieniem zawartości pracy.

W dalszej części rozdziału obszernie i przystępnie opisano metody badań nieniszczących, ze szczególnym uwzględnieniem metody prądów wirowych. Przedstawiono również różne konfiguracje sond, z czego Autor do dalszych badań wybrał wariant sondy bezwzględnej. W dalszej części rozdziału znajdujemy wprowadzenie do problematyki systemów ciągłego monitorowania struktur, znane również jako techniki SHM. Szeroko omówiono stosowane w tych systemach czujniki, a szczególnie zintegrowane czujniki wiropiętrowe. Przedstawiono je w wielu wariantach na podstawie obszernej analizy źródeł. W ten sposób Autor przekonująco argumentuje konieczność podjęcia tematu opracowania płaskich sond absolutnych do monitorowania rozwoju pęknięć elementów konstrukcji statków powietrznych. Rozdział pierwszy kończy ponowne sformułowanie tezy naukowej pracy (nota bene, identycznej z tezą ze str. 16) oraz planowanych zadań badawczych. Jako główny cel użytkarny pracy postawiono rozwój zautomatyzowanych systemów HUMS.

Rozdział 2 przedstawia proces projektowania, wykonania i testowania parametrów planarnych sond wiropiętrowych. Doktorant rozpoczyna od wymagań aplikacyjnych, a następnie wprowadza metody obliczeniowe. Na podstawie tych metod proponuje on 5 geometrii sond prądowirowych różniących się kształtem, wymiarami oraz przewidzianym zastosowaniem. Ze względu na obszar zastosowania sondy opracowano w wersjach na podłożu sztywnym i elastycznym. W ostatnich podrozdziałach zamieszczono badania parametrów elektrycznych oraz czułości wykonanych sond. Uzyskano dobrą zgodność parametrów teoretycznych z rzeczywistymi.

Rozdział 3 omawia system pomiarowy, który współpracuje z sondą prądowirową i mierzy jej parametry elektryczne, a dzięki temu jest w stanie analizować wady materiałowe. Doktorant zaproponował dwie metody – okresowy pomiar impedancji przyrządem laboratoryjnym oraz ciągle monitorowanie indukcyjności sondy dedykowanym przyrządem pomiarowym. Szczegółowo omówił obie metody oraz zaproponował syntetyczny wskaźnik uszkodzeń dla metody pomiaru impedancji. Zaletą drugiej metody jest możliwość prostego ciągłego monitorowania parametrów układu.

Rozdział 4 jest najobszerniejszą częścią pracy i przedstawia weryfikację opracowanej metody. Autor zaprezentował eksperymenty laboratoryjne oraz na obiektach rzeczywistych. W pierwszym etapie prac poszczególnie wersje czujników badano podczas czterech serii prób zmęczeniowych próbek, które pozyskano z rzeczywistych struktur statków powietrznych. W kolejnych seriach badano: szew nitowy fragmentu poszycia skrzydła, ciągły fragment poszycia skrzydła, strukturę duralową oraz dźwigar skrzydła. W każdym przypadku Doktorant szczegółowo przeanalizował i przedstawił rezultaty uzyskane przy użyciu poszczególnych wersji sond dla poszczególnych etapów propagacji pęknięć struktur. W drugim etapie badań, przedstawionym w kolejnych podrozdziałach, Doktorant przedstawił wyniki badań stabilności temperaturowej oraz stabilności starzeniowej, przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych. Końcowe podrozdziały omawiają wyniki eksperymentów stabilności w warunkach zewnętrznych, w warunkach eksploatacji na śmigłowcu oraz podczas próby zmęczeniowej.

Rozdział 5 zawiera podsumowanie rozprawy. Zawarto w nim najważniejsze osiągnięcia Doktoranta, uzyskane jako wynik realizacji założonego planu badań. Przedstawiono następnie wnioski wynikające z wykonanych badań oraz propozycję planu dalszych badań.

Rozdział 6 zawiera bibliografię, przywołaną w rozprawie. W spisie znaleźć można liczne książki oraz artykuły naukowe, co jest zrozumiałe i typowe dla rozpraw doktorskich. Co istotne, Autor przywołuje również normy branżowe, patenty i strony firm oferujących rozwiązania rynkowe. Świadczy to o aplikacyjnym charakterze pracy.

Załącznik 1 zawiera opis metodyki instalacji czujników prądowirowych, a Załącznik 2 – szczegóły konstrukcyjne czujników w wersjach sztywnej i elastycznej.

3. Analiza krytyczna

3.1. Uwagi ogólne

Wiedza na temat stanu technicznego struktur, czy też szerzej ujmując – obiektów technicznych, jest bardzo potrzebna do zarządzania ich eksploatacją. Dzięki rozwojowi metod oceny stanu i systemów monitorowania możliwa jest poprawa poziomu bezpieczeństwa i optymalizacja kosztów obsługi. Jest to trend wyraźnie widoczny np. w coraz bardziej zaawansowanych systemach monitorowania maszyn (ang. CMS – Condition Monitoring System). Analogiczne zjawiska trafnie zauważa i opisuje p. Kamil Kowalczyk w swojej pracy doktorskiej.

W tym kontekście podjęte przez niego zadanie opracowania metody wczesnego wykrywania i monitorowania pęknięć zmęczeniowych metalowych struktur lotniczych przy wykorzystaniu sieci zintegrowanych czujników prądowirowych należy uznać za aktualne i istotne, zarówno z punktu widzenia naukowego, jak i praktycznego. Ważną korzyścią z implementacji zaproponowanych przez niego metod jest możliwość śledzenia rozwoju uszkodzenia w czasie. Tylko w takim przypadku jest możliwa realizacja podejścia tolerowanego uszkodzenia w powiązaniu z ograniczaniem zakresu, czasu i kosztów okresowych badań nieniszczących. Jest to trend analogiczny do rozwoju tych metod np. w energetyce, gdzie również mamy do czynienia z wydłużaniem okresów międzyremontowych oraz generalnie starzejącą się flotą maszyn wytwórczych. Dzięki znajomości stanu technicznego maszyn jesteśmy więc w stanie: wykryć uszkodzenie, zlokalizować je i ocenić jego stopień zaawansowania. Jest to klasyczna już sekwencja stosowana w diagnostyce. Z punktu widzenia zarządzania eksploatacją z kolei zasadniczą korzyścią jest możliwość prognozowania rozwoju uszkodzeń, a co za tym idzie – planowania remontów i innych działań z zakresu utrzymania ruchu.

Doktorant trafnie wskazuje, że obecnie nie istnieją jeszcze rozwiązania metod SHM, które pokrywałyby w pełni konstrukcję statków powietrznych. Ponieważ najpoważniejszym zainteresowaniem cieszy się wykrywanie pęknięć struktur, w tym właśnie kierunku rozwinęły się zainteresowania badawcze Doktoranta.

Autor przeprowadził wyczerpującą analizę literatury światowej w badanej dziedzinie. Znaczną część cytowanych przez Niego prac stanowią prace prowadzone przez inne ośrodki, publikowane w literaturze o zasięgu światowym. Zestawienie obejmuje zarówno pozycje klasyczne, jak i najnowsze artykuły w periodykach naukowych. Jak wspomniano wcześniej, z uwagi na aplikacyjny charakter pracy, Autor przywołuje również normy branżowe, patenty i strony internetowe. Potwierdza to dobrą znajomość analizowanej problematyki.

Silną stroną pracy jest jej kompleksowość. Doktorant wychodzi od wymagań aplikacyjnych. Następnie przytacza metody projektowe, które w rozsądnym czasie pozwalają na zaprojektowanie sond prądowirowych. Wykonuje zestaw kilkunastu sond o różnych

parametrach i przygotowuje układy pomiarowe do akwizycji danych. Wreszcie, w serii eksperymentów w laboratorium i na rzeczywistych statkach powietrznych weryfikuje proponowane metody. Tworzy to razem pełen cykl procesu badawczo-rozwojowego i podnosi proponowaną metodę na znacznie wyższy poziom gotowości technologicznej. Uważam całość pracy p. Kowalczyka za cenną i wartą kontynuacji w celu wdrożenia jako element systemu HUMS.

Pomimo pozytywnej oceny całości pracy, mam jednak kilka uwag, zarówno ogólnych, jak i szczegółowych. Jednocześnie, proszę je potraktować jako problemy do dyskusji.

1. Na str. 57 Autor formułuje tezę, że wdrożenie technologii HUMS przyczyni się do ograniczenia nakładów czasowych i finansowych koniecznych do realizacji badań nieniszczących. Należy jednak pamiętać, że wdrożenie systemów klasy HUMS również pociąga za sobą koszty i to dosyć znaczne. Proponowane metody są metodami lokalnymi, więc można oczekiwać konieczności zainstalowania bardzo dużej liczby czujników. Czy Autor dokonał – choćby wstępnej – analizy opłacalności ekonomicznej takiej operacji?
2. Na str. 72 Doktorant pisze „Dzięki otrzymanym wynikom badania uzyskano ponadto także wskazania dotyczące powtarzalności produkcji czujników”. O powtarzalności można mówić na podstawie analizy liczebnej próby statystycznej. Proszę o informację, na jak liczebnej próbce wykonano te badania.
3. Na str. 91 podczas opisu metody wysokoczęstotliwościowej rejestracji indukcyjności, znajduje się zdanie: „W ramach realizacji prac badawczych opracowano zatem aparaturę pomiarową do wysokoczęstotliwościowej akwizycji wskazań czujników prądowirowych”. Nie przedstawiono niestety schematu – choćby blokowego – opracowanego układu. Ze sformułowania nie wynika też, czy aparatura była wykonana przez Doktoranta, czy przez inne osoby z zespołu.
4. Dlaczego w dwóch pierwszych eksperymentach nie przedstawiono wyników wysokoczęstotliwościowej akwizycji indukcyjności z wykorzystaniem układu LDC? Metoda jest wspomniana (na str. 95 i str. 115), ale nie zamieszczono żadnych wyników.

Proszę o wyjaśnienie powyższych kwestii.

3.2. Uwagi szczegółowe i edycyjne

Uwagi szczegółowe odnoszą się do zauważonych w rozprawie drobnych błędów. Przed wszystkim dysertacja zyskałaby na opracowaniu zestawienia użytych skrótów oraz symboli.

W pracy znalazły się też inne błędy albo fragmenty do uzupełnienia, jak np.:

- W zastosowaniach metody prądów wirowych (str.29) nie ma wzmianki o pomiarze drgań; jest to natomiast podstawowa technika pomiaru drgań względnych wałów, powszechnie stosowana do diagnostyki parowych i gazowych turbin energetycznych.

- W pierwszym eksperymencie, gdzie monitorowano szew nitowy na rys. 4.1 (str. 96), znajduje się nieopisana sonda (pomiędzy E3 i E4). Wg zdjęcia jest to sonda typu C28, ale nie jest wspomniana w opisie ani wskazana na zdjęciu.

W tym miejscu chciałbym pochylić się jeszcze nad stroną edytorską i podkreślić bardzo dobrą edycję językową pracy. Jest ona starannie zredagowana, napisana czytelnym językiem i wolna od błędów językowych. Szczególnie ten ostatni aspekt, choć wydawać się może oczywistym, pozytywnie ją wyróżnia na tle – zbyt wielu – prac pisanych pośpiesznie i często niestarannie. Dysertacja mgr inż. Kowalczyka stanowi tu wzór godny naśladowania.

4. Główne osiągnięcia rozprawy

Uważam, że najważniejszymi osiągnięciami rozprawy jest zaproponowanie nowych metod do oceny rozmiaru uszkodzeń metalowych struktur statków powietrznych przy wykorzystaniu czujników prądowirowych. Na osiągnięcie to składają się następujące elementy:

- zaprojektowanie, wykonanie i badania wiroprądowych czujników propagacji pęknięć,
- integracja toru pomiarowego do akwizycji i rejestracji sygnału z czujników,
- opracowanie metod analizy i propozycja wskaźnika uszkodzeń,
- weryfikacja metody na podstawie badań zmęczeniowych i starzeniowych w laboratorium i na obiektach rzeczywistych,
- ocena perspektyw praktycznego zastosowania metody.

5. Wniosek końcowy

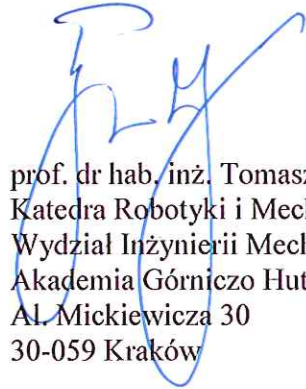
Rozprawa doktorska mgr inż. Kamila Kowalczyka, poświęcona metodom wczesnego wykrywania i monitorowania pęknięć zmęczeniowych przy wykorzystaniu sieci zintegrowanych czujników prądowirowych stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Uważam, że rozprawa zasługuje na ocenę bardzo pozytywną, a opisany sposób rozwiązania problemu naukowego jest poprawny. Rozprawa prezentuje wysoki poziom, a wyniki zostały prawidłowo zweryfikowane. Na szczególne podkreślenie zasługuje kompleksowy plan badań i jego konsekwentna realizacja.

Po zapoznaniu się z rozprawą stwierdzam, że Autor wykazał się dobrą znajomością dziedziny wiedzy z zakresu mechaniki, ale również technik pomiarowych, przetwarzania sygnałów oraz analizy wyników. Rozprawa dotyczy więc dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna, chociaż konieczne było też wykazanie się przez Doktoranta wiedzą z innych dziedzin.

Uważam, że zalety merytoryczne rozprawy zdecydowanie przeważają nad bardzo nielicznymi błędami i nieścisłościami. Uważam także, że Autor prawidłowo sformułował zadanie naukowe i rozwiązał je.

cl

W związku tym stwierdzam, że rozprawa mgr inż. Kamila Kowalczyka pt. „Ocena rozmiaru uszkodzeń metalowych struktur statków powietrznych przy wykorzystaniu czujników prądowirowych” spełnia ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i stawiam wniosek o jej dopuszczenie do publicznej obrony. Dodatkowo, z uwagi na bardzo szeroki zakres pracy oraz na bardzo dobrą jakość osiągniętych wyników wnioskuję o wyróżnienie pracy.



prof. dr hab. inż. Tomasz Barszcz
Katedra Robotyki i Mechatroniki
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Akademia Górniczo Hutnicza im. St. Staszica
Al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków