

prof. dr hab. inż. Jerzy Manerowski
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
ul. Księcia Bolesława 6
01-494 Warszawa

Warszawa, 25.11.2020 r.

R e c e n z j a
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Troki
pt. „Analiza numeryczna drgań łopatek wirnikowych turbin parowych
metodą TIP-TIMING ”

1. Uwagi ogólne

Przedmiotem rozprawy jest identyfikacja parametrów drgań łopatek maszyn wirnikowych (amplitud, częstotliwości i kątów przesunięcia fazowego). Podstawą identyfikacji są wyniki pomiarów czasów przejścia wierzchołków łopatek pod czujnikami zamocowanymi w korpusie maszyn (metoda TIP-TIMING). Istotą pracy są opracowane modele matematyczne drgań wraz z oprogramowaniem komputerowym przetwarzania wyników pomiarów i identyfikacji parametrycznej.

Rozprawa przedstawiona jest w 12 rozdziałach i 8 załącznikach na 211 stronach. Wykaz literatury obejmuje 132 pozycje istotnie związanych z problematyką rozprawy, z tego 10 publikacji współautorskich doktoranta, z tego 3 z listy filadelfijskiej.

2. Treść i ocena rozprawy

Rozdziały 1-4 zawierają wprowadzenie w problematykę rozprawy. Przegląd literatury jest starannie opracowany, obejmuje reprezentatywne pozycje dotyczące głównie metod wykorzystania pomiarów TIP-TIMING do określenia parametrów drgań łopatek wirnikowych turbin parowych i lotniczych silników turbinowych. 4 rozdz. zawiera jasno przyjęte jej cele: oprogramowanie do przetwarzania wyników pomiarów eksperymentalnych, identyfikacja parametrów drgań ww. łopatek (z wykorzystaniem nieliniowej metody najmniejszej sumy kwadratów) wraz z oceną dokładności wyznaczanych parametrów – z wykorzystaniem danych literaturowych jak i badań na stanowisku laboratoryjnym IMP.

Rozdz. 5 rozprawy przedstawia wykorzystywane modele matematyczne zarówno istniejące w literaturze (m.in. aproksymacji jak i najmniejszej sumy kwadratów) jak i własne dostosowane do realizacji jej celów. Znaczącymi są tu własne algorytmy określania czasów przejścia łopatek pod czujnikami oraz ich przemieszczeń. Rozpatrywane są tu przypadki badań eksperymentalnych z zastosowaniem jednego i wielu czujników. W p. 5.10 Autor przyjmuje model drgań giętnych o jednej składowej harmonicznej (zal. 44) oraz 2 składowych (zal. 44b) – drgania giętno-skrętne. W dalszych rozważaniach wyznaczane są parametry drgań łopatek o jednej składowej harmonicznej. W p. 10.8 (badania na stanowisku laboratoryjnym IMP) również dotyczą wymienionego przypadku. Wymaga to wyjaśnienia wraz z opisem jak wyznaczany jest kąt przesunięcia fazowego. W związku z tym korzystne byłoby przedstawienie składowych macierzy β (zal. 7 s.19).

Za znaczące w rozprawie są numeryczne badania symulacyjne drgań łopatek. Autor opracował modele i oprogramowanie komputerowe pozwalające na wyznaczenie czasów przejścia drgających łopatek (o założonych parametrach) pod czujnikami zamocowanymi w obracającym się z różnymi prędkościami wirnika. Następnie wykorzystując te dane określa parametry drgań łopatek z wykorzystaniem autorskiego oprogramowania. Uzyskane wyniki pozwoliły na ocenę poprawności opracowanych modeli i oprogramowania wraz z ilościową oceną dokładności odwzorowania założonych (symulowanych) drgań. Rozważane tu łoby

przypadki drgań łopatek (liczba łopatek w stopniu wirnika, różne parametry drgań, liczba czujników zamocowanych w korpusie i różne prędkości obrotowe wirnika) odpowiadają rozpatrywanym badaniom numerycznym drgań z wykorzystaniem wyników pomiarów eksperymentalnych (na rzeczywistych obiektach).

Rozdz. 7 rozprawy dotyczy badania parametrów drgań łopatek turbiny parowej (z wykorzystaniem autorskiego oprogramowania) w procesie tzw. odstawiania (badania na rzeczywistym obiekcie). Wykorzystane zostały tu pomiary czasów przejścia łopatek pod czujnikami (w części zamieszczonymi w wieloautorskiej monografii [78]). Wysoko oceniam wykonane badania drgań łopatek w szczególności w obszarze rezonansów. Głównie:

- wpływu liczby czujników na uzyskiwane wartości parametrów drgań (p. 7.5). Autor dysponował wynikami badań czasów przejścia łopatek pod 5 czujnikami. Wykazał, że korzystnie jest stosowanie 3 czujników,
- wpływu liczby danych (liczby obrotów wirnika) na wyniki obliczeń przy jednym czujniku w korpusie. Wyniki wskazują, iż należy wykorzystać kilkaset obrotów,
- porównanie wyników własnych z wynikami zamieszczonymi w ww. monografii.

Na wykresach niepoprawnie użyte są określenia przebiegów czasowych przemieszczeń łopatek jako amplitudy (np. 7.3, 7.4 i dalsze, również w następnych rozdziałach).

Rozdział 8 zawiera badania parametrów drgań łopatek turbiny energetycznej z różnymi wartościami ciśnienia w kondensatorze. Na wstępie rozdziału przedstawiony jest układ pomiarowy, wraz z opisem trudności identyfikacji czasów przejścia łopatek pod kolejnymi czujnikami z danych pomiarowych. Starannie opracowane są:

- wpływ ciśnienia w kondensatorze na amplitudy drgań łopatek (wzrost amplitud ze wzrostem ciśnienia,
- wyniki badań porównawczych – własnych z zawartymi w literaturze,
- wyniki badań z wykorzystaniem danych pomiarowych z jednego czujnika. Wykazano tu, że wyniki w tym przypadku są poprawne. Ma to duże znaczenie w praktycznej diagnostyce turbiny.

Uważam, że w tym rozdziale jak i w rozdz. 7 korzystne byłoby zamieszczenie wyników obliczeń dla kolejnych iteracji wykorzystywanej nieliniowej metody najmniejszej sumy kwadratów (zal. 8 s.20, w tej zależności po = powinno być β^k). Powyższe dotyczy również wartości kątów fazowych.

Podobnie jak w poprzednich rozdziałach, w rozdz. 9 przedstawione są badania łopatek w nominalnym zakresie pracy turbiny. Małe amplitudy drgań i zakłócenia prowadzą do wniosku o zastosowanie czujników o wyższej dokładności.

Znaczące w rozprawie (rozdz. 10) są numeryczne badania drgań łopatek z wykorzystaniem danych eksperymentalnych (czasów przejścia łopatek pod czujnikami) uzyskanych na stanowisku laboratoryjnym IMP. Łopatki zastąpione zostały dwoma niezależnie wprowadzanymi w ruch segmentami (płytkami). Rozpatrywane są tu przypadki niedrgających i drgających wirujących łopatek o różnych parametrach (giętnie, skrętnie i giętno-skrętnie). Badania numeryczne niedrgających łopatek wykorzystane zostały do oceny jakości pomiarów na stanowisku jak i oceny poprawności przyjętych modeli matematycznych oraz oprogramowania komputerowego. Wymieniona ocena, wynikami obliczeń została potwierdzona jako poprawna. Przesunięcia łopatek wynoszą tu $\pm 0,2\text{mm}$. Autor sugeruje tu wpływ sztywności zamocowania łopatek (płytek). Można do tego dodać luzu w połączeniach segmentów jak i dokładność pomiarów czasów przejścia. Zakładane w eksperymencie amplitudy o dużych wartościach (np. 15mm – p. 10.5) są odwzorowane z dużą dokładnością (ok. 1%) obliczeniami autorskim oprogramowaniem (zarówno amplitudy jak i częstotliwości). Te wyniki korespondują z ww. wynikami badań niedrgających łopatek. Badania symulowanych drgań skrętnych na ww. stanowisku są rozpatrywane w p. 10.6. Założono tu amplitudę o stosunkowo małej wartości (1,8mm) i częstotliwości 5Hz. Z punktu widzenia pomiarów czasów przejścia łopatek wydaje się, że bez znaczenia jest czy są to drgania giętne czy skrętne. Celowym jest wyjaśnienie tu dlaczego zostały wyróżnione drgania skrętne? Dokładność odwzorowania (amplitudy) wyników eksperymentu obliczeniami wynosi w tym przypadku 10%. Jest to wartość bliska dokładności uzyskanej

w przypadku niedrgających łopatek. Powyższe stwierdzenia odnoszą się również do wyników rozważań drgań łopatek zawartych w p. 10.7 – amplituda bliska dwukrotnej wartości poprzednio przyjętej (3,5mm). Otrzymana dokładność obliczeń amplitudy jest dwukrotnie wyższa (5%). W p. 10.8 rozpatrywane są drgania złożone - giętno-skrętne. Założona sumaryczna amplituda wynosi 1,7mm, a częstotliwość drgań w obu przypadkach 5Hz. To założenie odpowiada drganiom o jednej składowej harmoniczej. Brak tu informacji o założonej amplitudzie drgań skrętnych i giętnych jak i kątów przesunięcia fazowego. Czy rzeczywiście Autor rozpatruje drgania giętno-skrętne (o 2 składowych harmoniczych)?

Rozdział 10 rozprawy zawiera badania parametrów drgań łopatek sprężarki turbinowego silnika odrzutowego SO-3 w pełnym zakresie eksploatacji (prędkości obrotowych wirnika). Wykorzystane tu zostały wyniki pomiarów zawarte w literaturze oraz autorskie oprogramowanie. Tak jak w poprzednich rozdziałach, obliczenia, wnioskowanie wraz z oceną dokładności obliczeń są starannie opracowane. Uzyskane rezultaty wykazały, że przyjęta metodologia może być wykorzystana w badaniach łopatek o innych parametrach geometrycznych jak i prędkościach obrotowych wirnika. Ze względu na możliwość wykorzystania oprogramowania w eksploatacji samolotów w powietrzu, korzystne byłoby tu przedstawienie wyników obliczeń w kolejnych iteracjach metody nieliniowej i wpływu przyjętych wartości początkowych parametrów β (zał. 8). Czy wymienione wartości początkowe wyznaczone metodą liniową różnią się istotnie od nieliniowej?

3. Podsumowanie

Przedstawiona w rozprawie metodologia - wyznaczania parametrów drgań łopatek maszyn wirnikowych - jest oryginalnym osiągnięciem doktoranta. Tym samym stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Do zasadniczych znaczących elementów rozprawy zaliczam:

- opracowanie modeli matematycznych oraz oprogramowania komputerowego obliczeń parametrów drgań łopatek wirnikowych turbin energetycznych i silników lotniczych - z wykorzystaniem wyników czasów przejścia metody TIP-TIMING-wraz z graficzną prezentacją wyników,
- starannie opracowane wyniki obliczeń parametrów drgań łopatek. Znaczące są tu wyniki dokładności obliczeń tych parametrów /m.in. wpływ: liczby czujników pomiarowych w korpusie maszyny, liczby obrotów (danych) wykorzystywanych do obliczeń i wartości amplitud drgań rzeczywistych łopatek/ wraz z porównaniem ich z wynikami literaturowymi,
- możliwość bezpośredniego wykorzystania oprogramowania komputerowego w diagnostyce maszyn wirnikowych.

Uwagi zawarte w p. 2 recenzji nie zmniejszają wartości merytorycznej rozprawy

3. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymagania obowiązującej ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Troki pt. „Analiza numeryczna drgań łopatek wirnikowych turbin parowych metodą TIP-TIMING” do publicznej obrony.

