

Warszawa, 13.09.2017r.

Prof. dr hab. inż. Stanisław Radkowski
Instytut Pojazdów
Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych
Politechnika Warszawska

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Krystiana Szopy pt.

„Identyfikacja uszkodzeń wybranych konstrukcji wsporczych napowietrznych linii elektroenergetycznych”.

1. Uwagi o sformułowanym zadaniu

Problematyka wykorzystania wibroakustyki w zagadnieniach związanych z eksploatacją infrastruktury elektroenergetycznej, w szczególności w diagnozowaniu faz rozwoju uszkodzeń i oceny stanu technicznego konstrukcji stale budzi szerokie zainteresowanie.

Dyspozytorzy sieci, coraz więcej uwagi poświęcają zagadnieniom bezpieczeństwa i niezawodności – rozumianych jako właściwości elementu lub systemu, umożliwiające w założonym czasie i przyjętych warunkach eksploatacyjnych spełnienie zadań funkcjonalnych według żądanych wymagań. Dodatkowo, analiza bezpieczeństwa wymaga badania poszczególnych faz istnienia obiektu, warunków realizacji zadań funkcjonalnych, utrzymania zadanego stanu technicznego oraz możliwych zagrożeń związanych z hipotetycznymi awariami. Stąd coraz większe znaczenie diagnostyki eksploatacyjnej.

Fakt, że występowaniu błędów nie zawsze będzie towarzyszył zauważalny wzrost mocy sygnału wibroakustycznego, a jedynie zmiana częstotliwościowej struktury widma sygnału, wskazuje na konieczność bardziej szczegółowego spojrzenia na metody analizy związków pomiędzy wspomnianymi zmianami struktury widma a występującymi błędami. Z tego punktu widzenia istotne znaczenie ma umiejętność doboru odpowiednich środków i metod oceny stanu technicznego uszkodzenia.

W przypadku wielkogabarytowych konstrukcji kratowych podstawowym zadaniem realizowanym z wykorzystaniem metod wibroakustycznych jest śledzenie zmian własności dynamicznych obiektu, a szczególnie wywołanych uszkodzeniami, lokalnych zmian sztywności oraz towarzyszących temu jakościowych zmian naprężeń w przekrojach

poprzecznych nadzorowanych węzłów. Dodatkowo znajomość charakterystyk dynamicznych może być wykorzystana do prognozowania zaburzeń stateczności konstrukcji w trudnych warunkach zewnętrznych obciążeń.

Aplikacja tych metod w praktyce do obiektów o skomplikowanej geometrii wskutek bardzo rozbudowanego aparatu matematycznego jest zadaniem wymagającym i na dodatek obciążonym ryzykiem popełnienia dużych błędów, które mogą być spowodowane wieloma czynnikami takimi jak: złe uwarunkowanie macierzy, błędy pomiarowe, występowanie epistemologicznych niepewności modeli, niejednoznaczność rozwiązań oraz trudności interpretacyjne wpływu pojedynczych uszkodzeń na parametry sygnału wibroakustycznego. Wszystkie te problemy zostały omówione w pracy.

Mając na uwadze obecny stan wiedzy w tym zakresie należy uznać, że cele rozprawy sformułowane przez Autora są poprawne, a tematyka pracy ma duże znaczenie naukowo-poznawcze i aplikacyjne.

2. Charakterystyka pracy

Opiniowana praca składa się z sześciu rozdziałów, streszczeń w języku polskim i angielskim, spisu treści, wykazu ważniejszych skrótów i oznaczeń, wykazu literatury, spisu tablic oraz spisu rysunków i zajmuje 211 stron. Wykaz literatury obejmuje 203 pozycje, z których zdecydowaną większość Autor przywołuje w treści rozprawy. Układ treści, podział na rozdziały, sformułowanie celu rozprawy oraz wniosków końcowych są czytelne i logiczne.

3. Ogólna ocena rozprawy

Na podstawie przeprowadzonego studium analityczno-krytyczne Autor kieruje swoje zainteresowania w stronę metod, których celem jest badanie postaci drgań własnych z ograniczoną liczbą punktów pomiarowych przy założeniu, że jest możliwe ich wykorzystanie w diagnostyce konstrukcji wsporczych napowietrznych linii elektroenergetycznych.

Analiza postaci drgań własnych umożliwia nie tylko detekcję uszkodzeń, ale również jego lokalizację oraz identyfikację. Stąd, badania podjęte w rozprawie doktorskiej koncentrują się głównie na identyfikacji uszkodzeń wspomnianych wsporczych konstrukcji na podstawie analizy postaci drgań własnych i rozwiązania zagadnienia własnego oraz przyjętego w efekcie tych rozważań modelu odwrotnego, zredukowanego do mierzonej liczby stopni swobody. Doktorant wykazuje, że taki tok postępowania umożliwia lokalizację oraz oszacowanie wielkości uszkodzenia poszczególnych elementów konstrukcji. Ocenie wartości otrzymanego rozwiązania służy teoretyczna analiza modalna badanej konstrukcji wsporczej, w której ważną rolę przypada analizie wrażliwości parametrów modalnych w przyjętym modelu uszkodzeń, wybranych elementów. Okazuje się to szczególnie istotne, w zakresie niskich

częstotliwości, gdzie jak należało oczekiwać, postaci drgań własnych są wrażliwe na uszkodzenia elementów należących do krawężników i ukośników dolnej części słupa. Wykorzystana przez Autora możliwość redukcji modelu matematycznego umożliwiła zmniejszenie wymiaru globalnych macierzy, dobór liczby stopni swobody w funkcji liczby punktów pomiarowych oraz wpłynęła na skrócenie czasu obliczeń. Zachowując interpretację fizyczną podczas redukcji modeli cyfrowych, Autor przeprowadza identyfikację postaci drgań własnych względem modelu pełnego wykorzystując do tego celu kryterium MAC (Modal Assurance Criterion). Wykazano, że metodą której zastosowanie w zadaniu redukcji modelu jest obciążone najmniejszym błędem, jest metoda dynamicznej redukcja Kiddera.

W konkluzji Doktorant stwierdza, że mając zapewniony dostęp do odpowiedniego modelu numerycznego nadzorowanego obiektu, którym w tym przypadku jest konstrukcja wsporcza, można osiągnąć poziom czwarty wg skali Ryttera umożliwiający ocenę stopnia zagrożenia stateczności konstrukcji.

Zagadnienia podjęte w pracy zostały przedstawione w sześciu rozdziałach, które w szczególności zawierają:

- a) wstęp przedstawiający problematykę diagnostyki kontrolnej napowietrznych linii elektroenergetycznych;
- b) wprowadzenie w tematykę rozprawy w tym zagadnienia niezawodności napowietrznych sieci elektroenergetycznych, uwzględniające wpływ struktury wiekowej infrastruktury elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych w Polsce, analizę bezpośrednich i pośrednich przyczyn awarii linii napowietrznych przeprowadzoną na wybranym przykładzie, z uwzględnieniem wpływu ekstremalnych warunków atmosferycznych na obciążenie konstrukcji wsporczej;
- c) przegląd metod analizy sygnału wibroakustycznego szczególnie użytecznych w zadaniu identyfikacji uszkodzeń w konstrukcjach prętowych, ze wskazaniem na metody diagnostyczne odwołujące się do dziedziny częstotliwości oraz analizy modalnej;
- d) opis laboratoryjnego eksperymentu diagnostycznego z wykorzystaniem fizycznego modelu stalowego słupa sieci elektroenergetycznej, który umożliwia przeprowadzenie analizy własności dynamicznych konstrukcji wsporczej z wykorzystaniem pełnego modelu a następnie modeli zredukowanych wraz z badaniem opracowanych, dla różnych metod redukcji, macierzy transformacji wykorzystanych w zadaniu identyfikacji uszkodzeń w różnych ich przypadkach.
- e) Wyniki przeprowadzonej eksperymentalnej analizy modalnej oraz procesu identyfikacji cyfrowego modelu obiektu przedstawiono w kolejnym rozdziale. Autor skupił się na prezentacji algorytmu identyfikacji stanu technicznego konstrukcji wsporczej z

wykorzystaniem zmiany lokalnej sztywności w relacji naprężenia w konstrukcji do zmian odpowiedzi dynamicznej układu.

Całość została podsumowana w rozdziale szóstym.

Wyniki uzyskane w eksperymencie diagnostycznym i podczas przeprowadzanych symulacji potwierdziły uprzednie rozważania teoretyczne i poprawne wyznaczenie celów. Całość przeprowadzonych wywodów należy uznać za przekonywującą. Przedstawiony materiał ma kompleksowy charakter i wskazuje na dobre przygotowanie warsztatowe Kandydata.

4. Uwagi szczegółowe i zapytania

Należy podkreślić, że Autor recenzowanej rozprawy oprócz wielowątkowej analizy teoretycznej modelu konstrukcji nośnej słupa elektroenergetycznego przeprowadził eksperyment laboratoryjny, co umożliwiło Mu podjęcie szerszego programu weryfikacji przyjętych założeń i procedur diagnostyczno - prognostycznych. Ciekawym uzupełnieniem badań laboratoryjnych byłyby próby odtworzenia strukturalnych i dynamicznych obciążeń konstrukcji słupa, nawet tylko w kategoriach jakościowych, bez odwoływania się do statycznych i dynamicznych podobieństw konstrukcji. Pozwoliłoby to ocenić wpływ globalnej zmiany struktury naprężeń w poszczególnych elementach krytycznego przekroju konstrukcji wspornikowej na stan techniczny całej konstrukcji.

Zdjęcia zniszczonych słupów zamieszczone na rysunkach. 2.2 i 2.3. zdają wskazywać na istnienie skorelowania pomiędzy usytuowaniem miejsca uszkodzenia z charakterystycznym układem konstrukcji prętów podpory, co może wynikać z istotnej zmiany struktury naprężeń. Stąd, nasuwa się pytanie, czy Autor analizował możliwość ustalenia krytycznych węzłów kratownicowych w funkcji rozkładu naprężeń w przekroju poprzecznym konstrukcji i ich wpływ na przebieg procesu zniszczenia konstrukcji nośnej.

W trakcie czytania rozprawy nasuwa się kilka uwag:

- nie udało mi się ustalić w jaki sposób Autor dobiera grupy punktów pomiarowych w procedurze identyfikacji zmian postaci drgań własnych;

- Autor poświęca wiele miejsca zagadnieniu uwarunkowania macierzy, co jest kluczowym problemem w przypadku korzystania z modeli odwrotnych, mimo to trudno ustalić wynikającą stąd wartość błędów w otrzymanych rozwiązaniach (np. rysunek 4.19).

- redukcja modeli matematycznych może doprowadzić do całkowitego pominięcia niektórych postaci drgań własnych, skąd pewność, że nie są to częstości krytyczne dla prognozy zmian stanu technicznego konstrukcji;

-zastosowanie połączeń śrubowych prowadzi do wystąpienia dodatkowych efektów nieliniowych wywołanych występowaniem zjawiska tarcia w tego typu połączeniach, jakie to może mieć wpływ na ostateczny wynik oszacowania stanu technicznego konstrukcji.

5.Końcowa ocena pracy

Przeprowadzony szeroki zakres analiz umożliwił Autorowi opracowanie algorytmu identyfikacji stanu technicznego konstrukcji wsporczych napowietrznych linii elektroenergetycznych charakteryzującego się małą wrażliwością na błędy pomiarowe, oraz sformułowanie szeregu interesujących wniosków, wskazujących na:

-konieczność uwzględniania wpływu trudnych warunków atmosferycznych na zachowanie się linii elektroenergetycznych;

-nieliniowy charakter relacji pomiędzy zmianami parametrów modalnych a zmianami wskaźników uszkodzeń, co zmniejsza efektywność metody identyfikacji uszkodzeń opartą na analizie macierzy wrażliwości i istotnie ogranicza jej zakres zastosowań w diagnostyce konstrukcji wsporczych;

-ograniczony zakres zastosowań statycznych metody redukcji jedynie do zakresu niskich częstotliwości, w odróżnieniu do metod dynamicznych, które pozwalają zredukować model, a parametry otrzymane z takiego modelu odpowiadają parametrom modelu pełnego dla tej samej częstotliwości drgań układu;

- problem jednocześnie wysokiej wrażliwości stosowanych metod na błędy pomiarowe oraz błędy modelowania, co stanowi podstawowe utrudnienie w projektowaniu algorytmów uszkodzeń konstrukcji metodami diagnostyki wibroakustycznej na 2 i 3 poziomie skali Ryttera;

-znaczenie zmian lokalnej sztywności dla ostatecznej postaci drgań własnych oraz stanu naprężenia w układzie, które wykazują silną ujemną korelacją liniową, co może być wykorzystane w określaniu stanu technicznego konstrukcji wsporczej na podstawie odpowiedzi dynamicznej.

Oceniając całość przedstawionej rozprawy należy podkreślić istotną wagę poznawczą i techniczną głównego problemu pracy. Autor w głównej mierze skupił się nad opracowaniem metody analizy zagrożeń dla pewnej klasy zadań diagnostycznych, co w pełni wyczerpuje zakres rozprawy doktorskiej. Równocześnie takie ujęcie pozwala całkowicie ocenić poprawność przyjętej metodyki postępowania, przeprowadzić analizę i zweryfikować otrzymane wyniki.

Zagadnienie zostało rozwiązane samodzielnie, a uzyskane rezultaty mogą być w części wykorzystane bezpośrednio w postaci rozwiązań aplikacyjnych, w części stanowią przesłankę do dalszych badań metodycznych. Rozwiązując zadanie określone w pracy Autor wykazał się dobrą znajomością i wyczuciem problemów technicznych i rzetelną wiedzą w dziedzinie analizy sygnałów, szczególnie w ujęciu modalnym. Połączenie tej wiedzy ze znajomością metod klasyfikacji w układach diagnostycznych umożliwiło Doktorantowi rozwiązanie interesującego zadania naukowego.

W szczególności warto podkreślić merytoryczną stronę rozprawy, w tym kompleksowe opracowanie procedury diagnozowania stanu technicznego konstrukcji kratowych. Szczególną wagę ma połączenie badań laboratoryjnych, symulacyjnych z aplikacją, bowiem podkreśla możliwość połączenia zadania naukowego z możliwością praktycznego wykorzystania wyników rozprawy.

Na uwagę zasługuje zakres prac badawczych, które umożliwiły opracowanie recenzowanej rozprawy doktorskiej, oryginalność rozwiązania istotnego zagadnienia naukowego, a tym samym fakt potwierdzenia umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta. Stąd, przedłożona rozprawa może służyć za podstawę do rozpatrzenia wniosku o nadanie Kandydatowi stopnia doktora nauk technicznych. Wobec spełnienia wszystkich wymogów Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Krystiana Szopy do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

