

dr hab. inż. Łukasz Jankowski, prof. IPPT PAN
Zakład Technologii Inteligentnych
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
ul. Pawińskiego 5B
02-106 Warszawa
email: ljank@ippt.pan.pl

Warszawa, 22 grudnia 2022 r.

Recenzja
rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Marka Nalepki
pt. „Analiza nieliniowych drgań i dynamiczna identyfikacja postępujących
uszkodzeń konstrukcji żelbetowej”

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania recenzji jest pismo nr RB00ST00/162/2022 Pana dr. hab. inż. Damiana Bębna, prof. PO, Przewodniczącego rady naukowej dyscypliny inżynieria lądowa i transport Politechniki Opolskiej, z dnia 12 października 2022 r., dołączona do niego rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Marka Nalepki pt. „Analiza nieliniowych drgań i dynamiczna identyfikacja postępujących uszkodzeń konstrukcji żelbetowej” oraz art. 14 ust. 2 pkt 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2017 r., poz. 1789, z późn. zm.), w związku z art. 179 ust. 1 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669, z późn. zm.).

Praca powstała w Katedrze Mechaniki, Konstrukcji Budowlanych i Inżynierskich Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Opolskiej. Promotorem Doktoranta jest Pan prof. dr hab. inż. Zbigniew Zembaty.

2. Zasadność podjęcia tematu

Przedmiot swojej pracy Doktorant formułuje następująco (str. 9):

przeprowadzenie analizy nieliniowych drgań i dynamiczna identyfikacja postępujących uszkodzeń pewnych konstrukcji ramowych podczas ich postępującego uszkodzania.

Tezami rozprawy są natomiast stwierdzenia (str. 10):

- *Duże, nieliniowe drgania konstrukcji żelbetowych, podczas których ulegają one uszkodzeniom, mogą podlegać monitorowaniu umożliwiającemu wstępną diagnostykę uszkodzeń jeszcze w trakcie trwania tych drgań (alarmowanie o uszkodzeniach).*
- *Transformata Falkowa jest narzędziem, które może informować o występowaniu tych uszkodzeń w trakcie trwania odpowiedzi.*

Przedmiot i teza pracy zostały sformułowane poprawnie i precyzyjnie. Temat wpisuje się w ważny i intensywnie rozwijany obszar światowej nauki i techniki związany z globalnymi metodami detekcji uszkodzeń i monitorowania stanu technicznego konstrukcji (ang. structural health monitoring, SHM).

W kontekście rozprawy należy podkreślić, że większość publikowanych prac z tego zakresu dotyczy wnioskowania o stanie technicznym konstrukcji na podstawie analizy jej odpowiedzi mechanicznej zarejestrowanej w już ustalonym stanie uszkodzenia, to znaczy po jego wystąpieniu. Takie metody monitorowania można nazwać monitorowaniem offline. W odróżnieniu od tego typu podejść, Pan Marek Nalepka rozważa w swojej rozprawie metody monitorowania stanu technicznego konstrukcji online, to znaczy pozwalające na wnioskowanie o uszkodzeniu bezpośrednio na podstawie odpowiedzi konstrukcji na wymuszenie niszczące/uszkodzające, jeszcze w trakcie jego występowania i oddziaływania na konstrukcję. Tego typu systemy są rzadko rozważane w literaturze z zakresu SHM. Ich potencjalne znaczenie jest istotne, ponieważ rozwój jedynie metod monitorowania online może umożliwić powstanie systemów alarmujących o potencjalnym uszkodzeniu konstrukcji w czasie rzeczywistym, jeszcze w trakcie jego powstawania i rozwoju.

Problem rozważany w rozprawie recenzent uważa więc za interesujący i aktualny, ważny zarówno z badawczego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia. Podjęcie tak określonej tematyki badań należy uznać za w pełni uzasadnione.

3. Zakres i treść rozprawy

Rozprawa liczy 164 strony i jest sformułowana w języku polskim. Struktura rozprawy jest czytelna i właściwie dobrana do prezentowanych treści. Zasadnicza jej część zawiera się w Rozdziałach 1–7, poprzedzonych krótkim streszczeniem w języku polskim i angielskim, wykazem skrótów i symboli oraz wprowadzeniem, a zakończonych podsumowaniem, obszernym spisem literatury oraz wykazem rysunków i tabel. Bibliografia jest obszerna i liczy 159 pozycji, w tym 1 artykuł samodzielnego autorstwa Doktoranta opublikowany w roku 2017 w czasopiśmie „Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture”.

Część zatytułowana „Wprowadzenie” to – zgodnie z tytułem – zwięzłe, ogólne wprowadzenie do rozprawy. Doktorant charakteryzuje przedmiot rozprawy, jej motywację i problem naukowy oraz podaje cel, tezy i zakres pracy.

W kolejnych Rozdziałach 1–4 Doktorant przedstawia tło literaturowe rozprawy i badanych przez siebie metod. W szczególności:

Rozdział 1, zatytułowany „*Monitorowanie stanu technicznego konstrukcji (Structural Health Monitoring) – podstawowe informacje*” zawiera podstawowe ogólne informacje dotyczące metod monitorowania stanu technicznego konstrukcji. Pan Marek Nalepka wymienia i omawia typowe podstawowe cele metod SHM, rodzaje systemów monitorowania oraz ich podstawowe cechy i ograniczenia.

Rozdział 2 (*Przegląd wybranych metod identyfikacji uszkodzeń na podstawie pomiarów drgań*) to przegląd wybranych, podstawowych metod wykorzystywanych dla celów monitorowania stanu technicznego konstrukcji. Omówione są typowe metody wykorzystujące dane modalne (tzn. częstotliwości własne, postaci drgań własnych, współczynniki tłumienia modalnego i podatności modalne) oraz funkcje odpowiedzi częstotliwościowej (ang. frequency response function, FRF). Ostatnia, najdłuższa część rozdziału poświęcona jest zastosowaniom transformacji falkowej w SHM.

Rozdział 3 (*Modelowanie nieliniowej dynamiki żelbetu*) zawiera przegląd wybranych modeli konstytutywnych betonu i stali zbrojeniowej, czyli materiałów składowych żelbetu, oraz ich

zachowanie pod obciążeniem statycznym i dynamicznym. W rozdziale omówione zostały również sposoby modelowania nieliniowości żelbetu w modelach numerycznych.

W Rozdziale 4 (*Konstrukcje żelbetowe pod obciążeniem dynamicznym – przegląd wybranych publikacji*) Doktorant przedstawia i omawia wybrane publikacje dotyczące liniowej i nieliniowej analizy konstrukcji żelbetowych poddanych obciążeniu dynamicznemu. Część omówionych prac i przytoczonych wyników dotyczy trendów zmian charakterystyk modalnych konstrukcji w warunkach postępującego uszkodzenia.

Rozdział 5 (*Eksperyment na stole wstrząsowym*) przedstawia szczegółowo eksperymenty relatywnie dużej skali wykonane w roku 1998 w ramach europejskiego projektu badawczego „*Damage estimation using dynamic excitations*”. Eksperymenty dotyczyły dwóch ram żelbetowych o wymiarach 3,4 x 3,4 x 4,15 m poddanych na stole wstrząsowym symulowanym wymuszeniom sejsmicznym o amplitudzie stopniowo narastającej od małych drgań liniowych aż do wymuszeń niszczących. W rozdziale opisane są modele poddane badaniom, scenariusz eksperymentu oraz wyniki badań modalnych obu ram otrzymane pomiędzy kolejnymi wymuszeniami sejsmicznymi na podstawie analizy słabych drgań diagnostycznych.

Rozdziały 6 i 7 to kluczowe rozdziały pracy. Zdefiniowane w nich są zaproponowane przez Doktoranta wskaźniki uszkodzeń oraz przedstawione wyniki ich zastosowania do nieliniowych drgań ram żelbetowych opisanych w Rozdziale 5.

Rozdział 6 (*Nieliniowa identyfikacja uszkodzonej ramy żelbetowej*) proponuje dwa wskaźniki uszkodzeń. Wskaźniki wykorzystują pętle wymuszenie–przemieszczenie zarejestrowane podczas kolejnych etapów badań na stole wstrząsowym i kwantyfikują średnie nachylenie pętli (czyli efektywną sztywność) oraz rozrzut zarejestrowanych wyników wokół sztywności efektywnej. Wykazana jest ewidentna zależność wartości obu wskaźników od intensywności uszkodzeń ram.

Rozdział 7 (*Zastosowanie Ciągłej Transformaty Falkowej w identyfikacji stanów dynamicznego uszkodzenia żelbetu*) analizuje możliwości wykorzystania transformacji falkowej w celu wykrywania uszkodzeń online, to jest poprzez analizę nieliniowej odpowiedzi konstrukcji na wymuszenie uszkadzające/niszczące. Rozdział zawiera propozycje czterech falkowych wskaźników uszkodzenia oraz przeprowadza ich analizę i weryfikację z wykorzystaniem zarejestrowanych odpowiedzi dwóch ram żelbetowych.

Rozdział 8 (*Podsumowanie i wnioski*) podsumowuje rozprawę oraz krótko przedstawia potencjalne dalsze kierunki badań.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

Rozprawa doktorska Pana Marka Nalepki poświęcona jest tematowi aktualnemu badawczo, oryginalnemu i o dużym znaczeniu aplikacyjnym. Doktorant poprawnie posługuje się klasyczną metodyką prowadzenia badań naukowych w swojej dyscyplinie, to jest 1) rozpoczyna pracę od zarysowania szerokiej problematyki oraz uwarunkowań technicznych; następnie na tym tle 2) prezentuje przegląd literatury oraz 3) określa problem szczegółowy i omawia jego znaczenie, jak również 4) opisuje konkretny przykład odpowiedniego badania eksperymentalnego i otrzymanych danych pomiarowych. Następnie Doktorant 5) przedstawia propozycje szeregu oryginalnych wskaźników uszkodzenia, 6) weryfikuje szczegółowo ich przydatność z wykorzystaniem danych

eksperymentalnych i numerycznych oraz 7) przedstawia wnioski i możliwe dalsze kierunki badań. Taki schemat badań, właściwie odzwierciedlony w strukturze rozprawy, pozytywnie świadczy o naukowej dojrzałości Doktoranta.

Tematyka rozprawy uzupełnia i dobrze wpisuje się w intensywnie rozwijany obszar światowej nauki związany z zagadnieniami monitorowania stanu technicznego konstrukcji inżynierskich. Za interesujące i istotnie oryginalne recenzent uznaje przede wszystkim następujące elementy rozprawy:

- Typowe metody monitorowania stanu technicznego konstrukcji wnioskują o obecności uszkodzenia już po jego wystąpieniu, na podstawie analizy małych drgań diagnostycznych. Rozprawa Pana Marka Nalepki dotyczy problemu detekcji uszkodzenia w czasie rzeczywistym, podczas jego powstawania, wykonywanej na podstawie analizy silnej, nieliniowej odpowiedzi konstrukcji na wymuszenie niszczące. Jest to podejście oryginalne badawczo oraz istotne ze względu na potencjalne zastosowania.
- Weryfikacja zaproponowanych wskaźników wykonana została na niezwykle interesujących danych pomiarowych otrzymanych podczas eksperymentów relatywnie dużej skali wykonanych w ramach europejskiego projektu badawczego „*Damage estimation using dynamic excitations*”. Eksperymenty dotyczyły dwóch ram żelbetowych o wymiarach 3,4 x 3,4 x 4,15 m umieszczonych na stole wstrząsowym i poddanych symulowanym wymuszeniom sejsmicznym o amplitudzie stopniowo narastającej od małych drgań liniowych aż do wymuszeń niszczących. Wyniki analizy takich danych pomiarowych – bliskich polowym, lecz zebranych w warunkach wymuszenia o kontrolowanej amplitudzie – są znacznie bardziej wartościowe niż dane numeryczne lub z eksperymentów przeprowadzonych w małej skali laboratoryjnej.
- Wartościowy jest również obszerny przegląd światowej literatury naukowej w zakresie rozprawy, a więc dotyczącej metod monitorowania stanu technicznego konstrukcji oraz modeli konstytutywnych i nieliniowej dynamiki żelbetu.

5. Pytania i uwagi dyskusyjne

Recenzent nie zauważył w rozprawie żadnych większych błędów ani zaniedbań. Poniższe uwagi i pytania mają charakter dyskusyjny i w zamierzeniu mają przyczynić się do zwiększenia przejrzystości i walorów poznawczych rozprawy.

- Wartości dwóch spośród zaproponowanych wskaźników uszkodzenia wydają się zależeć nie tylko od wystąpienia ew. uszkodzenia, lecz również od amplitudy odpowiedzi konstrukcji (a więc i wymuszeń). W szczególności widać to przy analizie dwóch odpowiedzi Ramy 2 oznaczonych symbolami N i Na: podczas rejestracji obu tych odpowiedzi rama pozostawała w stanie nieuszkodzonym, jednak wartości wskaźnika σ_{dmg} oraz wskaźnika rozproszenia DC istotnie się różniły i były w przybliżeniu proporcjonalne do amplitudy wymuszenia. Interesujące byłoby rozważenie normalizacji względem amplitudy odpowiedzi (w wypadku σ_{dmg} niekoniecznie liniowej) i zbadanie czułości na uszkodzenie wskaźników znormalizowanych.
- Wskaźniki DC, AC i SC zdefiniowane na stronie 118 odpowiadają (pomijając drobne błędy literowe) znanym wzorom wyrażającym odchylenie standardowe, kurtozę i skośność próby. Oznacza to, że kwantyfikują wartości współczynnika falkowego. Wydaje się, że interesujące (i zgodne z sugestią zawartą na Rysunku 7.1) byłoby rozważenie tych wskaźników w odniesieniu do parametru skali ważonego wartością współczynnika falkowego. Wymagałoby

to odpowiedniej modyfikacji wzorów. Np. wzór na współczynnik rozproszenia zawierałby wariancję $(N - 1)^{-1} \sum_{i=1}^N c_i (s_i - \mu)^2$, gdzie c_i jest znormalizowanym współczynnikiem falkowym (odpowiednikiem masy prawdopodobieństwa), $c_i = C_i / \sum_i C_i$, a s_i jest wartością parametru skali odpowiadającą indeksowi i . Czy Doktorant przeprowadzał takie próby?

- Przegląd literatury z zakresu SHM jest obszerny i wartościowy, jednak koncentruje się głównie na klasycznych metodach wykorzystujących modalne własności konstrukcji, funkcję odpowiedzi częstotliwościowej lub transformację falkową. Recenzentowi nieco brakuje choćby pobieżnej charakterystyki coraz popularniejszych ostatnio metod SHM określanych z angielska jako „data-driven”. Obejmują one zarówno standardowe modele i techniki z zakresu analizy szeregów czasowych (ARMA, ARMAX itp.), redukcji wymiarowości (np. PCA) i clusteringu (np. t-SNE), jak i metody wykorzystujące techniki uczenia maszynowego (np. sztuczne sieci neuronowe typu encoder-decoder).

6. Uwagi techniczne i redakcyjne

Rozprawa sformułowana jest w języku polskim. Jej polszczyzna i skład są czytelne i zrozumiałe. Poniższe uwagi nie mają charakteru merytorycznego, a jedynie techniczno-redakcyjny.

- Doktorant nie ustrzegł się błędów literowych, występujących zwłaszcza we wzorach. Na przykład:
 - We wzorze (2.24) symbol Ω prawdopodobnie powinien występować w potęgze „-2”.
 - Pierwsze $K_{undamaged}$ we wzorze (2.29) prawdopodobnie należy pominąć.
 - W definicji współczynnika DC na stronie 118 brakuje drugiej potęgi (odchylenia od średniej).
 - W definicji współczynnika SC na stronie 118 potęga w mianowniku powinna prawdopodobnie wynosić 3/2 a nie 3.
 - W definicjach współczynników AC i SC na stronie 118 C_1 powinno być zastąpione C_i .
- Wyjaśnienia dotyczące niektórych wzorów są niekompletne lub błędne. Na przykład:
 - Nie jest wyjaśnione znaczenie symboli $\Delta\omega_i^2$ i $\Delta\omega_i^2$ występujących w dolnej części strony 22.
 - Czytelnikowi brakuje objaśnień niektórych symboli występujących we wzorze (2.10).
 - We wzorze (2.19) sumowania powinny być określone względem indeksu k . W wyjaśnieniu poniżej tego wzoru indeksy k i i powinny być zamienione miejscami.
 - Nie jest jasne znaczenie indeksów i i j we wzorze (2.20) i w wyjaśnieniu poniżej tego wzoru.
 - Nie jest jasne znaczenie wielu symboli występujących w równaniach na stronie 53.
- Wartości zaznaczone na poziomej osi wykresu (3.3) powinny być prawdopodobnie dodatnie, tzn. podobne jak w wypadku wykresu (3.2).
- Nie jest jasne, czym się od siebie różnią dwa dolne wykresy Rysunku 4.4.
- W drugim akapicie Rozdziału 5.2 Doktorant opisuje drugi etap badań eksperymentalnych, który polegał na serii testów z wymuszeniem sejsmicznym. Czytelnikowi brakuje szczegółowszego określenia tego wymuszenia. Czy było to wymuszenie symulowane czy rzeczywiste rejestrowane?
- Niektóre krzywe regresji na Rysunkach 6.4, 6.7, 6.19 i 6.20 mają przebieg wizualnie nieintuicyjny (jest to wyraźnie widoczne np. na górnych prawych wykresach Rysunków 6.19

i 6.20). Taki ich przebieg w większości wypadków prawdopodobnie wynika z nierównomiernego zagęszczenia krzywych (nieodróżnialnych na wykresie), jest jednak nieco zaskakujący dla czytelnika.

- Ilustracje „rozproszenia” i „asymetrii” na Rysunku 7.1 – by być w zgodzie z definicjami (7.1) – powinny być odwrócone o 90 stopni i odnosić się raczej do wartości współczynnika falkowego niż do jego skali.
- Na stronie 127 wprowadzony jest współczynnik energii falki EnE . Jego interpretacja jest zrozumiała, czytelnikowi nieco jednak brakuje formalnej definicji. Podobna uwaga odnosi się do współczynnika pikowego wprowadzonego na stronie 117.
- Jeden ze wskaźników zdefiniowanych na stronie 118 został nazwany współczynnikiem asymetrii (AC). Jest on jednak odpowiednikiem kurtozy, która kwantyfikuje raczej „wagę ogonów” rozkładów prawdopodobieństwa niż asymetrię. Być może warto byłoby zmienić nazwę tego współczynnika.

7. Podsumowanie

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Marka Nalepki dotyczy aktualnego i oryginalnego tematu z obszaru monitorowania stanu technicznego konstrukcji inżynierskich: metod wykrywania uszkodzenia na podstawie analizy silnie nieliniowej odpowiedzi konstrukcji na wymuszenie niszczące. Rozwiązując postawiony problem badawczy Doktorant posłużył się klasyczną metodyką prowadzenia badań naukowych i wykazał się umiejętnością samodzielnego ich prowadzenia. Osiągnięte wyniki należy uznać za oryginalne i interesujące dla szerszego środowiska naukowego. Rozprawa generuje dalsze problemy badawcze, co potwierdza jej istotność. Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne mają charakter techniczny i nie umniejszają wartości pracy.

Recenzowana praca spełnia warunki stawiane formalnie i zwyczajowo rozprawom doktorskim, w szczególności wymogi art. 14 ust. 2 pkt 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach w zakresie sztuki (Dz.U. z 2017 r., poz. 1789, z późn. zm.), w związku z art. 179 ust. 1 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669, z późn. zm.). Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Wnioskuje o dopuszczenie rozprawy Pana mgr. inż. Marka Nalepki do publicznej obrony.