

Wrocław, 22 grudnia 2022 r.

Dr hab. inż. Piotr Ruta, prof. uczelni
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Politechniki Wrocławskiej

RECENZJA

Pracy doktorskiej mgr inż. Marka Nalepki pt.

„Analiza nieliniowych drgań i dynamiczna identyfikacja postępujących uszkodzeń konstrukcji żelbetowej”

1. Podstawa formalna

Recenzja opracowana została na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Opolskiej reprezentowanej przez Przewodniczącego Rady dr hab. inż. Damiana Bębna, pismo RB00ST00/163/2022 z dnia 12 października 2022 roku. Postawą opracowania recenzji jest 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.). Rozprawa doktorska mgr inż. Marka Nalepki została napisana w języku polskim, pod kierunkiem promotora pracy prof. dr hab. inż. Zbigniewa Zembatego i promotora pomocniczego dra inż. Piotra Bońkowskiego.

2. Ocena celowości podjętej tematyki oraz omówienie treści rozprawy

Wraz z upływem czasu stan techniczny konstrukcji ulega pogorszeniu. Proces ten to wynik oddziaływania na konstrukcję wielu czynników m.in. czynników eksploatacyjnych czy też nieprzewidzianych na etapie projektowania sytuacji wyjątkowych. Ciągłe monitorowanie stanu konstrukcji i detekcji uszkodzeń znane w literaturze pod skrótem SHM (Structural Health Monitoring) jest zatem istotnym i ważnym działaniem z punktu widzenia praktyki inżynierskiej. Dzięki tym działaniom pozwalającym na wczesne wykrywanie uszkodzeń możemy przeciwdziałać ich skutkom, takim jak skróceniu czasu planowanej eksploatacji, a w skrajnych sytuacjach zapobiegać awariom czy też katastrofom monitorowanej konstrukcji.

Kolejnym ważnym problemem jest numeryczne modelowanie konstrukcji z możliwie dokładnym uwzględnieniem jej cech rzeczywistych. W konstrukcjach żelbetowych (a takimi zajmuje się w pracy doktorant), ze względu na wstępne i postępujące zarysowania oraz charakter współpracy betonu i stali zbrojeniowej, uwzględnienie w modelach numerycznych zjawisk nieliniowych na pewno wpłynie na „jakość” otrzymanych wyników numerycznych tj. zgodność tych wyników z wynikami otrzymanymi w ramach przeprowadzonych badań eksperymentalnych. Poprawne zamodelowanie konstrukcji jest jednym z ważnych czynników decydujących o poprawnym określeniu możliwości dalszego jej użytkowania. Poprawnie zdefiniowany model pozwala również na uzyskanie miarodajnych odpowiedzi konstrukcji w różnych rodzajach symulacjach numerycznych.

Rozwój metod pomiarowych, możliwości obliczeniowych sprzętu komputerowego oraz stały rozwój oprogramowania są czynnikami stymulującymi rozwój szeroko rozumianej tematyki SHM. Potwierdzeniem tego faktu są liczne publikacje dotyczące tego tematu. Podjęta zatem przez doktoranta w rozprawie tematyka jest ważna ze względu na jej charakter aplikacyjny, jak również jest interesująca z poznawczego punktu widzenia.

Recenzowana praca o łącznej objętości 164 stron, napisana w języku polskim, składa się ze streszczenia (w języku polskim i angielskim), z wprowadzenia, z 8 rozdziałów, ze spisu literatury obejmującego 159 pozycji oraz ze spisów: skrótów i symboli, rysunków i tabel.

We wprowadzeniu doktorant opisał przedmiot pracy i sformułował problem naukowy będący przedmiotem rozprawy. Określił postawione cele i sformułował jej tezy. Wprowadzenie kończy się zwięzłym omówieniem zakresu pracy.

W rozdziale 1 autor przedstawił podstawowe informacje dotyczące monitorowania stanu technicznego konstrukcji SHM. Przedstawił podstawowe pojęcia oraz omówił opisywane w literaturze poziomy identyfikacji uszkodzeń, pozwalające wraz z ich wzrostem na doprecyzowanie informacji o zidentyfikowanym uszkodzeniu, od jego wykrycia, poprzez jego lokalizację, aż do prognozy dalszego bezpiecznego czasu jej użytkowania. Omówił główne cele stawiane procedurom wykorzystywanym w SHM oraz przedstawił ich ogólny podział na metody globalne i lokalne, omawiając następnie każdą z nich. W rozdziale tym zostały również opisane trudności i problemy, na jakie napotyka się w rozwoju technologii SHM.

Rozdział 2 to przegląd wybranych metod identyfikacji uszkodzeń na podstawie pomiarów drgań konstrukcji. W kolejnych podrozdziałach przedstawiono opisane w

literaturze metody identyfikacji uszkodzeń, omawiając zalety i wady tych metod.

Omawianymi metodami były:

- metody identyfikacji wykorzystujące zmiany częstości własnych konstrukcji; omówiono stosowane w literaturze parametry będące wskaźnikami powstania uszkodzenia jak również jego lokalizacji,
- metody identyfikacji wykorzystujące zmiany w przebiegu form własnych,
- metody wykorzystujące zmiany własności tłumiących badanego układu,
- metody wykorzystujące w identyfikacji macierze podatności modalnej,
- metody identyfikacji oparte na analizie odpowiedzi częstotliwościowej (FRF – Frequency Response Function)

W ostatnim podrozdziale rozdziału 2 doktorant omówił metody identyfikacji uszkodzeń wykorzystujące Transformaty Falkowe. We wstępie tego podrozdziału przedstawiono podstawowe informacje dotyczące transformaty Falkowej (CWT) oraz omówiono zalety tej transformaty w porównaniu z klasyczną transformatą Fouriera. Przedstawiono zaczerpnięte z literatury przykłady, w których dla modelu numerycznego i rzeczywistego obiektu przeprowadzono analizę drgań z wykorzystaniem CWT i na bazie otrzymanych skalogramów zidentyfikowano uszkodzenia konstrukcji. W dalszej części przedstawiono opisane w literaturze różne kryteria pozwalające na identyfikacje uszkodzeń, opisano liczne parametry wyznaczane z wykorzystaniem współczynników falkowych, które mogą być wskaźnikami uszkodzenia konstrukcji. bez względu na wygląd skalogramu.

W kolejnym rozdziale omówiono przyjmowane w literaturze sposoby modelowania nieliniowych własności elementów żelbetowych. Opisano m. in. przyjmowane w ich opisie związki konstytutywne dla betonu i stali zbrojeniowej. Opisano również stosowane sposoby modelowania nieliniowości w modelach numerycznych.

Rozdział 4 poświęcono przeglądowi literatury dotyczącej metod identyfikacji uszkodzeń w konstrukcjach żelbetowych, z wykorzystaniem wyników testów dynamicznych, wiążących stan uszkodzenia bezpośrednio z dynamiczną odpowiedzią układu lub wyznaczonymi na ich podstawie charakterystykami dynamicznymi badanego układu.

Przedstawiony przegląd literatury dotyczył prac w których:

- zidentyfikowano uszkodzenia w konstrukcjach rzeczywistych,
- identyfikację przeprowadzano na podstawie symulacji polegających na analizie odpowiedzi dynamicznej modeli numerycznych z wprowadzonymi w modelach znanymi „uszkodzeniami”,

- prowadzono badania porównawcze polegające na porównaniu odpowiedzi (lub wyznaczonych na jej podstawie charakterystyk) układu rzeczywistego z odpowiedziami wyznaczonymi numerycznie z wykorzystaniem numerycznego modelu analizowanego układu.

W rozdziale 5 opisano badania eksperymentalne, z których wyniki zostały wykorzystane przez doktoranta w dalszej części pracy. Badania te dotyczyły analizy drgań dwóch żelbetowych ram przestrzennych i były prowadzone w dwóch etapach. W pierwszym etapie wykonano szereg testów generując drgania układu: obciążeniem impulsowym, ruchem harmonicznym stołu wstrząsowego o wolno narastającej częstości wymuszenia (testy rezonansowe) oraz losowymi drganiami stołu. Wykonane w tym etapie testy pozwoliły na niezależne wyznaczenie częstości drgań własnych i współczynników tłumienia. Przyjęta w tej części intensywność wymuszenia nie powodowała uszkodzeń ram.

W drugim etapie testów stół generował ruch o charakterze sejsmicznym o skokowo narastającej intensywności, pozwalającej na uzyskanie kolejnych stanów uszkodzenia badanej ramy. Po każdym wymuszeniu sejsmicznym o zadanej ustalonej intensywności dokonywano inwentaryzacji uszkodzeń i wykonywano testy pozwalające na określenie charakterystyk modalnych układu.

W kolejnym rozdziale doktorant zaproponował i przetestował dwa nowe wskaźniki pozwalające na identyfikację uszkodzenia. Podstawą do wyznaczenia tych wskaźników jest zależność BS – przemieszczenia (BS - Base-shear). Wykresy te nazywane w pracy „histerezą” są zapisem drgań ramy. Pierwszy ze wskaźników a_{stf} to współczynnik kierunkowy prostej najlepiej dopasowanej (w sensie metody najmniejszych kwadratów) w pętli „histerezy”. Wartość tego współczynnika maleje wraz ze spadkiem efektywnej sztywności konstrukcji. Drugą miarą σ_{dmg} jest odchylenie standardowe „histerezy” od wyznaczonej funkcji liniowej. Testy potwierdzające przydatność tych wskaźników do identyfikacji uszkodzeń doktorant wykonał wykorzystując wyniki eksperymentów opisanych w rozdziale 5. W rozdziale tym zostały również opisane, wykonane przez doktoranta numeryczne modele ramy żelbetowej na której wykonywane były badania eksperymentalne. Modele te wykonane z wykorzystaniem programu *SeismoStruct* z uwzględnieniem efektów nieliniowych (fizyczna nieliniowość betonu i stali zbrojeniowej). Poprawność zbudowanego modelu potwierdzono porównując pierwsze trzy częstości własne modelu z częstościami obiektu rzeczywistego oraz porównując odpowiedzi konstrukcji rzeczywistej z odpowiedzią modelu dla poszczególnych

stanów uszkodzenia. Wykorzystując zbudowany model numeryczny wyznaczono zależności siły BS od względnego przemieszczenia i na ich podstawie obliczono wprowadzone na początku rozdziału wskaźniki uszkodzenia: α_{stf} i σ_{dmg} . Tak otrzymane wskaźniki porównano ze wskaźnikami wyznaczonymi na podstawie wyników doświadczalnych, potwierdzając zgodność zachowania się modelu i konstrukcji.

Na bazie wykresów BS-przemieszczenie wyznaczonych na podstawie wyników pomiarów i wyników symulacji uzyskanych numerycznie dokonano porównania zdefiniowanych na wstępie tego rozdziału wskaźników.

W rozdziale 7 dokonano identyfikacji uszkodzeń ram żelbetowych z wykorzystaniem Ciągłej Transformaty Falkowej. W przeprowadzonych analizach wykorzystano wyniki obliczeń numerycznych wykonanych dla modelu ramy portalowej oraz wyniki badań eksperymentalnych opisanych we wcześniejszych rozdziałach. W rozdziale tym wskazano jakie cechy ciągłej Transformaty Falkowej oraz jakie cechy wybranych charakterystyk wyznaczonych na jej podstawie wskazują na uszkodzenie konstrukcji.

Rozdział 8 zawiera podsumowanie i wnioski.

3. Uwagi ogólne

Jak już wspomniałem wcześniej, podjęta przez doktoranta tematyka jest ważna z punktu widzenia praktyki inżynierskiej, jak również jest interesująca z punktu widzenia poznawczego. Analiza opisanych zagadnień wymagała od doktoranta znajomości wiedzy z zakresu technik pomiarowych, modelowania konstrukcji z uwzględnianiem jej cech nieliniowych oraz zaawansowanych metod matematycznych z zakresu transformacji całkowych w tym na co zwracam szczególną uwagę znajomość wiedzy dotyczącej Transformat Falkowych.

Oryginalnymi elementami pracy są: wprowadzone przez doktoranta w rozdziale 6 wskaźniki wskazujące na uszkodzenie konstrukcji i testy potwierdzające ich przydatność w identyfikacji uszkodzeń, stworzone przez doktoranta modele konstrukcji uwzględniające m.in. nieliniowe związki konstytutywne w opisie betonu i stali zbrojeniowej oraz przeprowadzone przez doktoranta obszerne analizy numeryczne. Analizy te potwierdzają, że doktorant biegle opanował specjalistyczne oprogramowanie wykorzystywane m.in. przy projektowaniu konstrukcji poddanych działaniu obciążeń sejsmicznym. Na uwagę zasługuje również wykonany przez doktoranta obszerny przegląd literatury.

Recenzent prosi, aby w czasie publicznej obrony doktorant bardziej szczegółowo opisał wykorzystywany do modelowania numerycznego element *fiber* oraz, aby odpowiedział na następujące pytania, odnoszące się do używanego przez doktoranta programu obliczeniowego *SeismoStruct*, a dokładniej do wykorzystywanych przez doktoranta elementów typu *fiber*. Czy w elementach tych pojawienie się zarysowań jest uwzględniony tylko globalnie w związkach konstytutywnych, czy też element ten (lub program) ma wbudowany mechanizm automatycznej modyfikacji elementu w przypadku pojawienia się rys.

4. Uwagi szczegółowe

Przedstawione poniżej uwagi szczegółowe mają głównie charakter redakcyjny i podano je celem udoskonalenia formy przyszłych prac doktoranta.

1. Str. 9, 10, 11, tytuły podrozdziałów zapisane tym samym rozmiarem czcionki co tytuł rozdziału. Przy braku numeracji tych podrozdziałów może to czytelnika wprowadzać w błąd odnośnie struktury tego rozdziału
2. Str. 17, niezrozumiałe dla recenzenta zdanie „*Podstawami metod identyfikacji i zastosowanych technik są zależności, które pośrednio i bezpośrednio wpływają na ich wybór, jak i również dostarczają pewnych problemów wynikających z ich praktycznego zastosowania [33, 147].*”
3. Str. 20, jest: „*analizując cechy kształtu postaci*”, proponuję zastąpić: *analizując cechy kształtu form własnych lub analizując cechy postaci form własnych.*
4. W przeglądzie literatury doktorant przed numerem pozycji [...] nie umieszcza nazwiska (nazwisk) autorów.
5. Str. 22 jest: „*z wykorzystaniem przesunięcia częstotliwościach naturalnych*”, proponuję zastąpić: *z wykorzystaniem zmian częstości własnych.*
6. Str. 22, jest: „*j-otego*” powinno być: *j-tego.*
7. Str. 22, Zdanie „*Zagadnienie to zostało rozwinięte przez autorów w [47]*” precyzyjniej oddawałoby intencje doktoranta w formie: *Zagadnienie to zostało rozwinięte przez autorów pracy [47]*”.
8. Str. 23. Czy wzór (2.7) jest poprawny? Jeżeli tak to uszkodzenie pojawia się, gdy $\%C_i < 0$?
9. Str. 23, ostatni wiersz, jest „*... uszkodzonej i nieuszkodzonej.*”, a powinno być *nieuszkodzonej i uszkodzonej.*

10. Str. 24, wzór (2.9), jak definiujemy wektor zmiany i-tej częstości? Ponadto recenzent użyte przez doktoranta wyrażenie „częstotliwości dla i-tej postaci.”, zastąpiłby wyrażeniem: i-tej częstotliwości drgań własnych.
11. Str. 24. Wzór (2.11), w drugim wierszu, pierwszej kolumnie macierzy błędnie zapisany element tej macierzy, jest $\frac{\partial f_2}{\partial \omega_1}$, powinno być $\frac{\partial \omega_2}{\partial \omega_1}$
12. Str. 25 w opisie wzoru (2.12) jest $\phi_{q,i}$, powinno być $\Phi_{q,i}$.
13. Str. 28, wzór (2.19) i jego opis są błędne. W opisie powinno być $(\Phi_i)_k$ – k-ty element i-tego wektora własnego, a wzór (2.19) powinien przyjąć postać
- $$MAC(\Phi_i, \Phi_j) = \frac{|\sum_{k=1}^n (\Phi_i)_k (\Phi_i)_k^*|^2}{(\sum_{k=1}^n (\Phi_i)_k (\Phi_i)_k^*) (\sum_{k=1}^n (\Phi_j)_k (\Phi_j)_k^*)}$$
14. Str. 29, wzór 2.20, jest $(\Phi_i^*)_{ij}$ a powinno być $(\Phi_B^*)_{ij}$.
15. Str. wzór (2.25) powinno być $\Omega = \text{diag}(\omega_1^{-2}, \omega_2^{-2}, \dots, \omega_n^{-2})$.
16. Str. 34, drugi wiersz powyżej wzoru (2.24) jest $G - G_{undamaged}$, a chyba powinno być $G_{damaged} - G_{undamaged}$.
17. Str. 34, wzór (2.29). Czy jedna z macierzy K nie powinna być z indeksem *damaged*?
18. Str. 36, drugi wiersz po wzorze (2.30), jest: „j-otym”, powinno być: j-tym.
19. Str.37, Zdanie „ Uszkodzenie zostało przyłożone do belek za pomocą nacięć o określonej głębokości” jest niepoprawne. Proponuję:
- 1) Belki „uszkodzono” wykonując w nich nacięcia o określonej głębokości.
 - 2) Uszkodzenia belek miały postać nacięć o określonej głębokości.
20. Str. 37, zdanie opisane powyżej w p. 19. Jak zdefiniowany jest „współczynnik głębokości”?
21. Str. 50, drugie zdanie, drugiego akapitu „Uszkodzenie było przykładane w formie nacięć” – patrz komentarz w p. 19.
22. Str. 52, wzory (2.34) i (2.35) zmniejszyłbym rozmiar czcionki znaku mnożenia „x”.
23. Str. 59, Rys. 3.2 brak opisu krzywych na rysunku.
24. Str. 61, 6 wiersz od dołu: jest „wpływu”, powinno być: wpływ.
25. Str. 68, 10 wiersz od dołu, jest: „stanach granicznych”, powinno być: stanów granicznych.
26. Str. 124-126, rys. 7.9, 7.10, 7.11, brak opisów pozwalających na odróżnienie trzech sposobów prezentacji wyników odpowiednio dla współczynników DC, AC, SC.

27. Str. 144, 8 wiersz od góry, niepoprawne określenie: „...w *nieliniowym programie MES...*”.

5. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska poświęcona jest aktualnemu, istotnemu z punktu widzenia praktyki inżynierskiej, problemowi modelowania i identyfikacji postępujących uszkodzeń konstrukcji żelbetowych.

Doktorant dobrze sformułował cele i zakres pracy, zdefiniował nowe wskaźniki pozwalające na identyfikację pojawiających się w konstrukcji uszkodzeń, stworzył numeryczne modele konstrukcji żelbetowej uwzględniające nieliniowe cechy betonu i stali zbrojeniowej, przeprowadził szereg analiz numerycznych. W analizach tych doktorant stosował logiczną metodykę i stanowią one niezaprzeczalnie osiągnięcie doktoranta. Przytoczone krytyczne uwagi ogólne i szczegółowe minimalnie obniżają wartość ocenianej przeze mnie rozprawy, jednak w żadnym stopniu nie podważają osiągnięć autora.

W podsumowaniu chciałbym stwierdzić, że przedstawiona rozprawa doktorska mgr inż. Marka Nalepki pt. „Analiza nieliniowych drgań i dynamiczna identyfikacja postępujących uszkodzeń konstrukcji żelbetowej” jest samodzielnym rozwiązaniem zadania naukowego z dziedziny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport i odpowiada wymogom stawianym pracom doktorskim, co zgodnie jest 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.), upoważnia mnie do postawienia wniosku o przyjęcie pracy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

PIATEK MIA