

Dr hab. inż. Damian BĘBEN, prof. uczelni  
Wydział Budownictwa i Architektury  
Politechnika Opolska  
ul. Katowicka 48  
45-061 Opole  
e-mail: d.beben@po.edu.pl  
tel. 693 205 658

Opole, 9 grudnia 2019 r.

## **REZENZJA**

rozprawy doktorskiej mgr inż. **Joyraja CHAKRABORTY** pt.

**Development of industrial monitoring systems with sensor integration,  
data fusion and information management**

### **1. Podstawa opracowania**

Niniejszą recenzję rozprawy doktorskiej opracowano na zlecenie Pani Przewodniczącej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna prof. dr hab. inż. Ewy MAJCHRZAK z Politechniki Śląskiej (pismo zlecające nr RD(IMe) – 15/006/2019/20 z dnia 2 grudnia 2019 r.).

Recenzowana praca została napisana pod kierunkiem dr hab. inż. Andrzeja KATUNINA, prof. PŚ i dr hab. inż. Marka SALAMAKA, prof. PŚ.

### **2. Ocena ogólna rozprawy**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Joyraja CHAKRABORTY pt. „*Development of industrial monitoring systems with sensor integration, data fusion and information management*”, napisana jest w języku angielskim na 152 stronach w tym jednostronicowe streszczenia w j. polskim i angielskim oraz spis rysunków. Praca składa się z ośmiu rozdziałów, wykazu wykorzystywanych skrótów, spisu literatury obejmującego 206 pozycje. Praca ma charakter doświadczalno-teoretyczny i dotyczy zagadnień interdyscyplinarnych związanych z budownictwem (w szczególności z badaniem mostów), fizyki materiałów, analizy sygnałów pomiarowych i gromadzenia danych pomiarowych. Tematyka rozprawy jest bardzo ważna z naukowego i praktycznego punktu widzenia, gdyż dotyczy zagadnień monitorowania stanu technicznego konstrukcji, głównie obiektów mostowych, z wykorzystaniem nowoczesnych technik pomiarowych. Z tego względu uważam wybór tematu za trafny i wpisujący się aktualne trendy w budownictwie, zwłaszcza

mostowym. Konkludując, uważam podjęcie przez Doktoranta tego tematu za jak najbardziej zasadne.

### **3. Ocena szczegółowa rozprawy**

Opiniowana rozprawa doktorska ma charakter doświadczalno-teoretyczny. Kluczowe dla rozprawy są rozdziały 6 i 7 ze względu na postawione we wstępie cele pracy i sformułowaną tezę.

Pierwszy etap pracy (rozdział 1: Introduction) dotyczy motywacji Doktoranta do podjęcia tematu i uwidocznienie ważności monitorowania stanu konstrukcji (SHM – structural health monitoring). Moim zdaniem ten rozdział powinien być częścią kolejnego rozdziału.

W rozdziale 2 Autor przedstawił wprowadzenie do konstrukcji budowlanych i pomiarowych technik nieniszczących. Podrozdziały 2.1-2.3 dotyczące konstrukcji budowlanych, mostów, żelbetu i uszkodzeń konstrukcji betonowych, z mojego punktu widzenia, jako inżyniera budowlanego, są zbyt liczne w pracy doktorskiej. Biorąc jednak pod uwagę fakt, że Doktorant nie jest inżynierem budowlanym i praca była głównie wykonywana na Wydziale Mechanicznym Technologicznym, nie jest to duże uchybienie. Następnie w tym rozdziale Autor opisał znane techniki badań nieniszczących. W rozdziale 3 Doktorant zidentyfikował problem naukowy, określił cele pracy i sformułował tezę. W rozdziale 4 podano podstawy technik ultradźwiękowych badania konstrukcji, w tym propagację fal ultradźwiękowych w różnych materiałach, a także problem odbicia i rozproszenia fal. Scharakteryzowano ponadto przetworniki ultradźwiękowe. Następnie w rozdziale 5 opisano metody wczesnego wykrywania uszkodzeń.

Zasadniczym etapem dysertacji jest weryfikacja eksperymentalna wrażliwości zastosowanych czujników (rozdział 6). Ponadto w tym rozdziale szczegółowo opisano projekt nowego systemu akwizycji danych i ograniczenia tego systemu. W kolejnym podrozdziale opisano wzorcową konstrukcję żelbetową i przebieg badań niszczących w laboratorium. Następnie scharakteryzowano referencyjną rzeczywistą konstrukcję żelbetową wybudowaną na poligonie badawczym w Niemczech. Opisano przebieg badania i zbieranie danych. Wykonano analizę i dyskusję uzyskanych wyników badań. Na koniec tego rozdziału przedstawiono badania doświadczone na rzeczywistym moście drogowym położonym nad rzeką Kłodnica w Gliwicach. Most jest o konstrukcji ciągłej wykonany z betonu sprężonego, a badania wykonano na skrajnym przęśle o rozpiętości 36 m.

W rozdziale 7, Autor przedstawił wyniki różnych poziomów łączenia danych na podstawie eksperymentu przedstawionego w rozdziale 6. Ponadto opisano łączenie poziomu sygnału. W rozdziale 8 sformułowano wnioski końcowe z pracy doktorskiej, a także Doktorant wykazał udowodnienie postawionej na wstępie zasadniczej tezy pracy, o możliwości wykorzystania opracowanej metodologii do monitorowania dużych konstrukcji budowlanych. Co bardzo istotne, Autor wskazał również kierunki dalszych badań w przedmiocie rozprawy – co świadczy o dojrzałości badawczej Doktoranta.

#### **4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne**

Poniżej przedstawiłem uwagi krytyczne i dyskusyjne do poszczególnych rozdziałów rozprawy.

##### **4.1. Uwagi merytoryczne**

Uwaga ogólna odnośnie układu pracy: Występuje zbyt duże rozdrobnienie rozdziałów. Na przykład rozdziały nr 1, 2 i 3 powinny stanowić jeden duży rozdział.

##### **Rozdział 2:**

1. Jak już wspomniałem wcześniej, podrozdziały 2.1-2.3 z mojego (budowlanego) punktu widzenia dotyczą oczywistych kwestii i nie powinny być tak szeroko opisywane. Niemniej jednak, zdaję sobie sprawę, że Doktorant nie jest inżynierem budowlanym, a sama praca była realizowana pod z udziałem dwóch opiekunów reprezentujących dwie różne dyscypliny inżynierii mechanicznej i lądowej.

2. Pkt 2.4.1: Byłoby dobrze, żeby rozgraniczyć w badaniach nieniszczących (NDT) techniki, które wymagają kontaktu z badanym obiektem i bezkontaktowe. Obecnie są one wymieszane, a „filozofia” ich używania jest inna.

3. Pkt 2.4.1: Efektywność metod NDT wykorzystujących przebieg fal elektromagnetycznych, akustycznych, czy ultradźwiękowych są mocno uzależnione od właściwości materiału (jego przenikalności magnetycznej, przewodności elektrycznej i przenikalności dielektrycznej). To wszystko wpływa na prędkość ww. fal w materiale (np. betonie) i w efekcie na dokładność (czy nawet poprawność) uzyskiwanych wyników. Proszę odnieść się do tych kwestii.

4. Pkt 2.4.1: W tym punkcie należałoby także wspomnieć o technice GPR (ground penetrating radar), skaningu laserowym, GPS czy technologii LiDAR. Ostatnio także czujniki rotacyjne

są wykorzystywane do SHM, co jest stosunkowo tanią technologią. Ponadto powstają prace badawcze oparte np. na pomiarach smartfonami, które mają takie czujniki rotacyjne wbudowane. Proszę o komentarz do ww. metod i ich możliwości wykorzystania do monitorowania konstrukcji budowlanych.

5. Pkt 2.5 (Conclusion): Proszę wziąć pod uwagę, że z budowlanego punktu widzenia spękanie betonu czy nawet zarysowania betonu (do pewnego stopnia) są rzeczą normalną. Co np. w inżynierii mechanicznej jest niedopuszczalne. Zatem rodzi się pytanie: jak opracować (zaprojektować) system, który nie będzie alarmował, np. o zwykłych spękaniaх skurczowych betonu, ale już ostrzeże zarządcę o np. przekroczeniu dopuszczalnych ugięć.

### **Rozdział 3:**

1. Spękania betonu to jest jego normalny proces np. związany z skurczem betonu. Dlatego nie jest konieczne alarmowanie o wykryciu uszkodzeń w początkowym etapie, ale bardzo dobrym rozwiązaniem byłoby zapisywanie wykrytych mikrouszkodzeń i w momencie przekroczenia pewnej granicy przesyłanie sygnału do zarządcy. Proszę o komentarz, jak to zamierza doktorant rozwiązać?

2. Pkt 3.1: Doktorant wspomina o mikrouszkodzeniach betonu, czyli o bardzo małych ( $10^{-6}$ ). Kiedy można uznać, że uszkodzenie jest istotne, a kiedy jeszcze nie?

3. Proszę krótko podsumować przegląd literatury w zakresie głównej tematyki rozprawy i na tym tle pokazać swój wkład.

### **Rozdział 4:**

1. Pkt 4.2.2: Czy w równaniach (4.2)-(4.3) jest uwzględnione tłumienie propagacji fal?

2. Str. 43: Prędkości fal w materiale to bardzo ważny wskaźnik, od którego zależą wyniki badań (ich poprawność). Jak ustalić realną prędkość fal w danym materiale?

### **Rozdział 5:**

1. Pkt 5.1.1: Funkcja korelacji wzajemnej jest bardzo pożyteczna, w celu np. ustalenia w jakim stopniu pojazd przejeżdżający lewą stroną mostu wpływa na prawy fragment mostu (rozkład poprzeczny obciążenia). Czy można to zastosować np. do ustalenia wpływu lokalnego uszkodzenia (pęknięcia) na ogólną nośność mostu?

2. Str. 61: Czy jest jakaś zasadnicza różnica między CWT i WT?

## **Rozdział 6:**

1. Pkt 6.2.1: Badania wykonano tylko na jednej belce. Generalnie, dobrze jest badać elementy na co najmniej 3 sztukach, wtedy można wyciągnąć lepsze wnioski pod względem statystycznym, zwłaszcza dla materiałów niejednorodnych.
2. Str. 67: Proszę o podanie kryterium Nyquista i jaki ma on wpływ na analizę sygnałów? Czy są jakieś jego ograniczenia?
3. Str. 73: Czujniki odkształceń mierzą odkształcenia a nie przemieszczenia. Ponadto proszę o pokazanie lokalizację innych czujników na belce.
4. Proszę o podanie więcej szczegółów modelowania belki za pomocą MES.
5. Proszę o komentarz do uzyskanych wyników MES i eksperymentu.
6. Czy wykonano badania dynamiczne belki? Są one kluczowe dla obiektów mostowych.
7. Pkt. 6.4: Dobrze jest pokazać przekroje poprzeczne badanej belki z wymiarami. Czy to była belka z betonu zwykłego czy sprężona?
8. Rys. 6.29 jest kluczowy, dlatego powinien być bardziej czytelny, np. pokazywać wymiary obciążenia statycznego, miejsca położenia obciążenia, itd.
9. Proszę podać dane wzbudnika. Jakie wymuszenie dynamiczne było przykładane do belki i w jakich miejscach?
10. Pkt 6.4.5: Wymagane jest lepsze wyjaśnienie odnośnie przebiegu badań: czy po każdej serii obciążenia statycznego, zdejmowano obciążenie z belki i czekano np. 1 min, czy po odczycie deformacji belki w danym etapie, czekano 1 min (bez zdejmowania obciążenia) zanim przesunięto obciążenie do kolejnego miejsca obciążenia? Czy były mierzone deformacje trwałe? Czy wykonano dynamiczne badania belki w stanie uszkodzonym (zarysowanym)? Wyniki mogłyby być bardzo ciekawe.
11. Rys. 6.32: Oznaczenia na rysunku są inne niż w tekście. Poza tym, dlaczego krzywa oznaczona jako Pa ma ujemny współczynnik?
12. Rys. 6.38: Dlaczego brak symetrii w uzyskanych odkształceniach?

## **Rozdział 7:**

1. Pytanie zasadnicze w przypadku konstrukcji żelbetowych, w którym momencie alarmować zarządcę, że coś się złego dzieje?
2. Proszę wyjaśnić, co wpływało na wskaźnik fałszywych alarmów?
3. Byłoby interesujące przetestować proponowaną metodę na starym moście, który ma obniżoną nośność. Być może Doktorant już takie badania wykonał?

## 4.2. Uwagi redakcyjne i edytorskie

### Rozdział 4:

1. Co oznacza „u” we wzorach (4.5 i (4.6)?
2. Doktorant raz używa sformułowania “speed of wave” a innym razem “velocity of wave”. Lepiej jest używać jednego określenia na prędkość fal.

### Rozdział 5:

1. Wzór (5.3): brak objaśnienia dla PA.
2. Pkt 4.1: Brak objaśnienia dla AR.
3. Wzór (5.6): brak objaśnienia  $i$ ,  $n$ .
4. Wzór (5.9): co oznaczają indeksy?
5. Wzór (5.10): co oznaczają  $\gamma$  i  $t$ ?
6. Str. 53: Proszę wyjaśnić NMSE. Chyba oznacza „normalized mean square error”. Brak w wykazie skrótów.

### Rozdział 6:

1. Oznaczenia w tekście inne niż na rys. 6.36. Np. na rys. nie widać czujnika Gekon 4911, 4200, 4202, 4370.

### Rozdział 7:

1. Wzór (7.2): co oznacza  $W1$ ?
2. Wzory (7.4) i (7.5): brak wyjaśniania niektórych symboli.

## 5. Podsumowanie

Doktorant samodzielnie rozwiązał postawione zadanie badawcze, przeanalizował dostępną literaturę, sformułował zakres, cel i tezę badawczą, a następnie konsekwentnie zmierzał do jej udowodnienia. Postawione we wstępie cele pracy zostały osiągnięte. Zaproponowany system monitorowania konstrukcji budowlanych, w szczególności obiektów mostowych, stanowi nowe podejście do badań tego typu obiektów. Opracowany system został przetestowany i zwalidowany na wybranym elemencie konstrukcyjnym w skali naturalnej i na rzeczywistym obiekcie mostowym. Wymienione powyżej uwagi krytyczne i dyskusyjne w żadnym stopniu nie umniejszają wartości naukowej i praktycznej pracy. Uważam, że istnieją

duże szanse na publikację uzyskanych wyników badań w znaczących czasopismach światowych.

Reasumując uważam, że recenzowana praca doktorska mgr inż. Joyraja CHAKRABORTY pt. „*Development of industrial monitoring systems with sensor integration, data fusion and information management*”, spełnia wszystkie wymogi Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (Dz.U. z 2017 r. pozycja 1789 z późniejszymi zmianami).

Wnioskuje zatem do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej o dopuszczenie mgr inż. Joyraja CHAKRABORTY do publicznej obrony recenzowanej rozprawy doktorskiej.

Handwritten signature in blue ink, appearing to read "Stefan Dobek".