

dr hab. inż. Lucjan Ślęczka, prof. PRz

Rzeszów, 21 lutego 2022 r.

Politechnika Rzeszowska

Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury

ul. Poznańska 2, 35-084 Rzeszów

e-mail: slęczka@prz.edu.pl

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgra inż. Marcina Osiniaka pt.

***Metody poprawy skuteczności monitoringu konstrukcji stalowych przy użyciu czujników
inklinometrycznych***

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej prof. dra hab. inż. Tomasza Stareckiego, z dnia 22 grudnia 2021 r. i dołączona do niego rozprawa doktorska mgra inż. Marcina Osiniaka, o tytule wymienionym wyżej, której promotorką jest dr hab. inż. Lidia Łukasiak, prof. uczelni, a promotorem pomocniczym dr inż. Zbigniew Pióro.

2. Charakterystyka i zawartość rozprawy

Rozprawa dotyczy monitorowania nieprzekroczenia stanu granicznego nośności konstrukcji stalowych dachów w obiektach użyteczności publicznej. Monitorowanie takie wynika z przepisów prawa budowlanego, a pośrednio z potrzeby bezpiecznego utrzymania tych obiektów.

Rozprawa jest zawarta na 124 stronach. Składa się z 6 rozdziałów, bibliografii obejmującej 100 pozycji, czterech załączników oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

Wstęp o objętości 14 stron stanowi uzasadnienie podjętej tematyki, wskazuje na potrzebę monitoringu konstrukcji obiektów budowlanych i kładzie nacisk na właściwy sposób jego przeprowadzania. Treść tego rozdziału jest również omówieniem problemu naukowego rozprawy. Rozdział kończy się sformułowaniem dwóch zasadniczych tez rozprawy, określeniem jej celu oraz krótką charakterystyką badań i analiz podjętych w dysertacji, prowadzących do osiągnięcia zamierzonego celu.

Rozdział drugi, o objętości 11 stron, stanowi przegląd dotychczasowego stanu zagadnienia związanego z monitoringiem zachowania konstrukcji obiektów wielkopowierzchniowych.

Poddano krytyce dotychczas wykorzystywane wielkości monitorujące, takie jak pomiar odkształcenia lub ugięcia dźwigarów dachowych w pojedynczych punktach, wskazując na ograniczenia związane z takimi pomiarami oraz problemy z wiarygodnością powiązania ich wyników ze stopniem wykorzystania nośności obliczeniowej konstrukcji. W szczególności wykazano, że w sytuacji obciążenia konstrukcji śniegiem innego niż równomiernie rozłożone, ugięcie jako wielkość monitorująca coraz mniej dokładnie obrazuje wielkość monitorowaną (stopień wykorzystania nośności obliczeniowej). Dokładność ta maleje wraz ze zwiększaniem się asymetrii obciążenia, gdy pomiar ugięcia rygla dachowego przeprowadzany jest w jednym punkcie.

Rozdział trzeci, o objętości 28 stron, przedstawia nową wielkość monitorującą zaproponowaną przez Autora, którą jest większy z dwóch kątów obrotu przekrojów poprzecznych dźwigara dachowego, mierzonych przeciwnych końcach dźwigara. Wskazano w nim praktyczną przydatność takich pomiarów inklinometrycznych. Wykazano istniejące powiązanie pomiędzy zaproponowaną wielkością monitorującą a stopniem wykorzystania nośności obliczeniowej konstrukcji, a co najważniejsze jego wiarygodność w warunkach obciążenia zmiennego, które może przybierać różne rozkłady przestrzenne. Autor analizował tę zależność i oceniał jej dokładność dla jednoprzęsłowej belki swobodnie podpartej, jednonawowej ramy portalowej oraz swobodnie podpartej kratownicy o kształcie dwutrapezowym, z niewielkim nachyleniem pasa górnego. Do jakościowego i ilościowego wykazania powiązania pomiędzy wielkością monitorującą a monitorowaną, Autor zastosował analizę parametryczną i obliczenia z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Rozdział zawiera również ocenę wrażliwości położenia przekrojów poprzecznych, w których mierzone są kąty obrotu, na dokładność uzyskiwanych wyników.

Rozdział czwarty, o objętości 25 stron zawiera określenie podstawowych parametrów, jakie powinien spełniać czujnik inklinometryczny służący do wykorzystania w systemach monitoringu, opis budowy sensora a także badania korekcji jego temperaturowego dryftu w opracowanym prototypie.

Rozdział piąty, o objętości 9 stron jest opisem czteroletnich badań przeprowadzonych na istniejącym obiekcie budowlanym, w warunkach rzeczywistych, których celem było zweryfikowanie wiarygodności zaproponowanego systemu i możliwości praktycznej realizacji takiego monitoringu.

Rozdział 6, o objętości 5 stron, jest podsumowaniem pracy i oceną realizacji osiągnięcia wyznaczonego celu.

3. Ogólna ocena

3.1 Ocena tematyki rozprawy

Recenzowana rozprawa dotyczy tematyki utrzymania stalowych obiektów budowlanych przy zastosowaniu ich monitoringu, który pozwala zapobiegać potencjalnym katastrofom budowlanym wywołanym ekstremalnymi oddziaływaniami klimatycznymi, tj. obciążeniem śniegiem lub opadami deszczu.

Większość inżynierów budownictwa jest zdania, że właściwie zaprojektowana, poprawnie wykonana i utrzymywana konstrukcja nie wymaga monitoringu pozwalającego na określenie stopnia wykorzystania jej nośności obliczeniowej. Potrzeba ta pojawia się jednak, jako konieczność spełnienia niektórych szczegółowych zapisów prawa budowlanego dotyczących pewnych typów konstrukcji lub jako spełnienie wymagań użytkowników, związanych ze zwiększeniem bezpieczeństwa eksploatowanej konstrukcji. W szczególności monitoring taki może wspomagać decyzję dotyczącą odśnieżania dachu. Monitoring najczęściej dotyczy stalowych konstrukcji dachów, w których udział oddziaływań zmiennych w kombinacji obliczeniowej służącej do sprawdzenia stanu granicznego nośności jest największy. Coraz częstsze decyzje inwestorów, aby instalować systemy monitoringu związane są także z chęcią właściwego zarządzania obiektem na etapie eksploatacji.

Tak więc recenzowana dysertacja ma wymiar praktyczny, związany ze skutecznością monitorowania bezpieczeństwa konstrukcji budowlanych, podjęty temat jest aktualny a otrzymane wyniki, poza wartością naukową, mają wybitnie aplikacyjny charakter. Z naukowego punktu widzenia monitorowanie odpowiedzi nieuszkodzonej konstrukcji na przykładane do niej obciążenie wpisuje się w obręb szerszej dziedziny, określanej jako *structural health monitoring*.

Trudnością w podjęciu tego tematu jest interdyscyplinarność. Praca dotyczy badań naukowych w zakresie elektroniki i automatyki, ale także w zakresie teorii pomiaru deformacji ustrojów budowlanych oraz podstaw naukowych wdrożenia opracowanej techniki do monitorowania bezpieczeństwa konstrukcji budowlanych w skali technicznej. Jest więc na styku dyscyplin automatyka, elektronika i elektrotechnika oraz inżynieria lądowa i transport, według aktualnej klasyfikacji.

3.2 Ocena merytoryczna

O bezpieczeństwie konstrukcji decyduje nieprzekroczenie warunków stanu granicznego nośności. Zgodnie z zasadami i przepisami budowlanymi podczas projektowania wyznacza się w konstrukcji wartość obliczeniową efektu oddziaływania (czyli odpowiednie siły wewnętrzne)

i sprawdza, czy ich wielkość nie przekracza odpowiedniej nośności konstrukcji. Te siły wewnętrzne wyznacza się dla zdefiniowanych przypadków i wartości oddziaływań, stosując różne poziomy analizy.

Problem, który podjął Doktorant jest w istocie zagadnieniem odwrotnym, gdzie na podstawie wartości pewnej mierzalnej cechy odpowiedzi konstrukcji można wnioskować o rzeczywistej wartości rozkładu obciążenia śniegiem (lub innego obciążenia atmosferycznego) na rozległym obszarze dachu. Obciążenie takie ma losowy charakter i wpływa na szukany stopień wykorzystania nośności obliczeniowej konstrukcji. Na tak podjęte zagadnienie wpływa także dokładność pomiaru wielkości monitorującej, możliwość wykonania odpowiedniego sensora i jego późniejsza trwałość.

Zaproponowana przez Autora wielkość monitorująca w postaci większego z dwóch kątów obrotu przekroju poprzecznego rygła dachowego jest innowacyjna i nie była dotychczas rozpatrywana jako wielkość monitorująca wyężenie konstrukcji ani w Polsce, ani na świecie. Świadczą o tym uzyskane przez Doktoranta zarówno polskie, europejskie, jak i amerykańskie patenty.

Dysertacja ma charakter analityczno-eksperymentalny. W pierwszej części Autor skupił się na udowodnieniu poprawności zaproponowanego podejścia, w którym na podstawie dwóch zmierzonych kątów obrotu oceniany jest stopień wykorzystania nośności obliczeniowej konstrukcji w warunkach obciążenia zmiennego, mającego nieumiejscowiony charakter (tj. mogący mieć różny rozkład przestrzenny w stosunku do konstrukcji). W drugiej części dysertacji Autor podjął budowę prototypu sensora mierzącego kąt obrotu przekroju konstrukcji z odpowiednią dokładnością, i to niezależnie od czynników zakłócających (jak na przykład zmiany temperatury), oraz posiadającego odpowiednią trwałość. Na tę część składa się także weryfikacja przydatności i zakresu stosowalności sensora, wraz z doświadczalnym wyznaczeniem mechanizmu korekcji temperaturowej wskazań.

Niżej podpisanemu bliższe są zagadnienia konstrukcji stalowych i ich analizy, więc recenzja ta jest skierowana przede wszystkim ku zagadnieniom związanym z innowacyjnością i skutecznością opracowanych przez Autora urządzeń pomiarowych i techniki monitorowania bezpieczeństwa konstrukcji budowlanych, a w mniejszym stopniu ku zagadnieniom związanym z elektroniką i teorią pomiarów.

Identyfikacja stopnia wykorzystania nośności obliczeniowej konstrukcji na podstawie pomierzonego większego kąta obrotu przekroju rygła dachowego jest przetestowana przez Autora dla jednoprzęsłowej belki swobodnie podpartej, jednonawowej ramy portalowej i dźwigara kratowego dwutrapezowego. Bezwymiarowym wskaźnikiem, zaproponowanym

przez Autora do oceny dokładności takiej identyfikacji jest tzw. „współczynnik przeciążenia”, który jest w istocie współczynnikiem korelacji pomiędzy dwiema zmiennymi. Jedną z nich jest stosunek maksymalnego naprężenia normalnego powstałego przy nierównomiernym obciążeniu do maksymalnego naprężenia normalnego przy obciążeniu jednorodnym. Drugą zmienną jest zaś stosunek większego kąta obrotu przekroju poprzecznego rygła przy obciążeniu nierównomiernym do kąta obrotu przekroju przy obciążeniu równomiernie rozłożonym.

Autor w przeprowadzonych analizach udowadnia, że wartość tego współczynnika korelacji jest względnie stała i oscyluje w przedziale $0,8 \div 1,10$, co pozwala z taką dokładnością wyznaczyć wartości naprężenia normalnego pod obciążeniem nierównomiernym, które są dla niego wskaźnikiem obliczeniowego wyężenia konstrukcji. Przeprowadzone przez Autora analizy parametryczne i obliczenia MES są poprawne i prowadzą do udowodnienia hipotezy, że zaproponowana nowa wielkość monitorująca (większy z dwóch kątów obrotu przekrojów konstrukcji) może służyć do wyznaczenia wielkości naprężenia normalnego od obciążenia o bliżej nieznanym rozkładzie i wartości.

Uproszczeniem zastosowanym w dysertacji jest jednak utożsamienie stopnia wykorzystania obliczeniowej nośności konstrukcji z wielkością maksymalną powstającego naprężenia normalnego. W rzeczywistości obliczeniowy warunek nośności polega nieprzekroczeniu przez powstającą siłę przekrojową nośności na działanie tej siły. Aby przyjęta w pracy miara naprężeniowa była tożsama z ogólnym warunkiem nośności konstrukcji należy wyraźnie zaznaczyć, że zachowanie ustroju konstrukcyjnego musi być liniowo sprężyste. Autor czyni co prawda założenie o liniowo-sprężystej charakterystyce materiału, lecz należy rozszerzyć go o brak występowania efektów II rzędu w rozpatrywanej konstrukcji i brak występowania węzłów podatnych. Ponieważ położenie największego momentu zginającego od obciążenia nierównomiernego zmienia się w stosunku do położenia ekstremalnego momentu od obciążenia równomiernie rozłożonego, dodać należy jeszcze warunek względnej stałości przekroju poprzecznego rygła dachowego i regularności rozstawu stężeń bocznych.

Z rozpatrywanych przez Autora konstrukcji wymogi te są praktycznie zawsze spełnione w ustrojach belkowych i kratownicach dachowych o niewielkim nachyleniu pasa górnego. W przypadku ram portalowych, należy zachować nieco większą ostrożność i szczegółowo sprawdzać wymienione wyżej ograniczenia.

Pragnę wyraźnie podkreślić, że sformułowane wyżej uwagi w żaden sposób nie podważają poprawności zaproponowanej przez Doktoranta metody. Wyrażają one jedynie potrzebę bardziej precyzyjnego określania granic, gdzie ta metoda - zdaniem niżej podpisanego - może być stosowana bez obaw już dziś (belki i kratownice dachowe w ustrojach słupowo ryglowych),

a które typy konstrukcji należy jeszcze traktować z nieco większą rezerwą (ramy portalowe) i przeprowadzać dla nich bardziej szczegółowe analizy stosowalności tej metody.

3.3 Ocena formalnej postaci rozprawy

Tytuł przedstawionej dysertacji jest szczegółowy i dobrze opisuje jej zawartość.

Na podstawie syntezy aktualnego stanu wiedzy Autor wyraźnie i trafnie zdefiniował cele pracy. Zakres badań umożliwiającą realizację założonego celu został właściwie określony. Praca została podzielona na rozdziały wzajemnie ze sobą korespondujące i stanowiące logiczny wywód. Podsumowania zawarte w końcówkach poszczególnych rozdziałów (a niekiedy i podrozdziałów) stanowiących kolejne etapy badań, świadczą o umiejętności logicznego przedstawienia swojego wyводу i dużej dojrzałości badawczej Doktoranta.

Przegląd piśmiennictwa odnosi się do współczesnych prac naukowych.

Praca jest napisana starannie i ogólnie poprawną polszczyzną, od strony redakcyjnej jest właściwie skomponowana i starannie ilustrowana. W tekście występuje niewielka liczba usterek stylistycznych lub interpunkcyjnych. Nie wpływają one na merytoryczny poziom pracy, dlatego nie ma potrzeby ich tu przywoływać. Kilka niezręcznych określeń technicznych, które nie powinny pojawić się w dysertacji, przywołano w uwagach szczegółowych.

4. Uwagi szczegółowe

- Autor bardzo wiele razy (ponad stukrotnie!) używa w tekście określenia „wykorzystanie/wyczerpanie nośności konstrukcji”, co dla osób niezbyt blisko związanych z teorią projektowania konstrukcji budowlanych może kojarzyć się ze stanem ich fizycznego zniszczenia. W rzeczywistości chodzi tu o stopień wykorzystania „nośności obliczeniowej”, która to posiada jeszcze odpowiedni zapas bezpieczeństwa w stosunku do fizycznego stanu zniszczenia. Dla precyzyjnego opisu, jaki stan określa wielkość monitorująca należy używać sformułowania „nośność obliczeniowa”.
- Podobnie sformułowanie „wykorzystanie nośności od obciążeń zmiennych” (strona 5) jest błędne. Nośność konstrukcji jest cechą niezależną od oddziaływań.
- Wyniki analiz dotyczących rozpatrywanych konstrukcji (rozdział 3) są bardzo jasno przedstawione. Pożądane byłoby jednak bardziej szczegółowe opisanie założeń do tych analiz, szczególnie w przypadku ramy portalowej – jakie są warunki jej poparcia, czy węzły słup-rygiel i węzeł kalenicowy są sztywne, czy zastosowano pręty o stałym przekroju poprzecznym, a jeżeli nie (co sugerują Rys. 2-1, 3-4 oraz 3-10) to jaka była proporcja zmiany sztywności giętnej na długości prętów.

- Jednostką miary łukowej kąta obrotu w konstrukcjach budowlanych i programach do ich analizy jest radian [rad], lub wobec niewielkiej ich wartości miliradian [mrad], a nie stopień [°], który nie jest jednostką z układu SI.
- Nieco razi wielokrotne nadużywanie w tekście stopnia wyższego i najwyższego przymiotnika „dobry”, jak np.: „lepsza wielkość monitorująca”, „najlepsza miara”, itp. Charakterystyczną cechą obserwacji naukowej powinna być skłonność do ujmowania ilościowego zjawisk, dlatego warto pokusić się o bardziej precyzyjny opis, np.: „wielkość monitorująca mniej podatna na zakłócenia”, „bardziej dokładna miara”, itp.
- W dysertacji występuje kilkakrotne odwołanie do „dodatku 0”, którego jest brak. Zapewne chodzi o „załącznik 1”.
- Zauważyć należy nieco niejednolity styl opisów bibliograficznych i w przypadku odniesień do źródeł internetowych brak w wielu z nich dat ostatniego dostępu.
- Sformułowanie na stronie 23 („obciążenie jednostkowe będzie rosło”) jest niezręczne. Zapewne Autor miał na uwadze przyrost obciążenia równomiernie rozłożonego.

5. Podsumowanie oraz wnioski końcowe

Zaprezentowana praca rozpatruje zagadnienie zwiększenia skuteczności monitorowania bezpieczeństwa stalowych konstrukcji budowlanych z wykorzystaniem nowej wielkości monitorującej, którą jest większy z dwóch kątów obrotu przekroju poprzecznego dźwigara dachowego.

Sformułowany problem jest istotny z praktycznego punktu widzenia i został postawiony po szerokiej analizie stanu zagadnienia, biorącej pod uwagę piśmiennictwo, aktualny stan wiedzy i rozwiązania stosowane w przemyśle. Autor trafnie rozwiązał postawione zagadnienie, najpierw udowadniając powiązanie pomiędzy zaproponowaną przez siebie nową wielkością monitorującą a stopniem wykorzystania obliczeniowej nośności konstrukcji, następnie formułując wymagania techniczne niezbędne dla bezprzewodowego, bezobsługowego i uniwersalnego sensora, potrzebnego do takiego pomiaru. W kolejnej fazie Autor zbudował prototyp odpowiedniego inklinometru, który poddał badaniom laboratoryjnym pod kątem dokładności wskazań, rozdzielczości i trwałości. Kończącym etapem była ponad czteroletnia faza testowania sensora i zaproponowanej metody na rzeczywistym obiekcie budowlanym.

Zaprezentowane podejście polegające na powiązaniu oceny bezpieczeństwa stalowych konstrukcji budowlanych z mierzonym z odpowiednią dokładnością kątem obrotu konstrukcji jest w pełni oryginalne, o czym świadczą dokonane zgłoszenia patentowe, zarówno polskie, jak i międzynarodowe, z których dwa zakończyły się już przyznaniem patentów. Także budowa

odpowiednio czułego inklinometru, spełniającego wymagania techniczne wynikające z przeprowadzonej analizy, jest oryginalnym osiągnięciem Autora. Należy wysoko ocenić przydatność w praktyce zaproponowanej przez Autora metody oceny bezpieczeństwa stalowych konstrukcji budowlanych.

Jasny wywód i logiczny sposób przedstawienia kolejnych etapów podjętych badań i analiz wskazują, że Autor potrafi w pełni wykorzystać swoją wiedzę i posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Autor wykazał się osiągnięciami naukowymi w sensie interdyscyplinarnym, obejmującym dyscyplinę budownictwo (inżynieria lądowa i transport według nowej klasyfikacji) oraz dyscyplinę elektronika, będącej przedmiotem jego dotychczasowej działalności (automatyka, elektronika i elektrotechnika według nowej klasyfikacji).

Wszystko to oznacza, że recenzowana rozprawa spełnia w wyraźnym nadmiarze wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65. Poz. 595 z późniejszymi zmianami). Wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie mgra inż. Marcina Osiniaka do publicznej obrony.

Z uwagi na wysoki poziom recenzowanej rozprawy, jej praktyczną przydatność do oceny bezpieczeństwa konstrukcji budowlanych na podstawie stosunkowo nielicznej liczby pomiarów, a także jej interdyscyplinarność, wnioskuję o jej wyróżnienie.

