

Dr hab. inż. Jerzy Augustyn
Katedra Informatyki, Elektroniki i Elektrotechniki,
Politechnika Świętokrzyska
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7,
25-314 Kielce
email: j.augustyn@tu.kielce.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marcina Osiniaka
pt.: „Metody poprawy skuteczności monitoringu konstrukcji stalowych
przy użyciu czujników inklinometrycznych”

1. Wstęp

Przedłożona recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej, prof. dr. hab. inż. Tomasza Stareckiego (pismo z dnia 23.12.2021 r.). Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Lidia Łukasik, prof. uczelni.

2. Opinia o tematyce i zakresie rozprawy

Monitoring stopnia wykorzystania nośności stalowych konstrukcji dachów obiektów wielkopowierzchniowych jest istotnym zagadnieniem z punktu widzenia zapewnienia bezpieczeństwa użytkowania takiego obiektu. Jest to ważne w szczególności w przypadku oddziaływań klimatycznych na dachy takich budynków, zwłaszcza obciążenia zalegającym śniegiem. Takie zjawiska powodują często nierównomierne obciążenia konstrukcji dachu, co utrudnia budowę poprawnie działającego systemu monitoringu. Wszystkie takie systemy monitorują stopień wykorzystania nośności konstrukcji metodą pośrednią, najczęściej poprzez pomiar odkształcenia powierzchniowego lub ugięcia elementu konstrukcji dachu. Są to pomiary o charakterze punktowym, wykonywane w miejscach, gdzie wielkość mierzona wykazuje największą zmienność pod wpływem obciążenia, co nie zawsze umożliwia poprawne oszacowanie stopnia wykorzystania nośności konstrukcji w przypadku nierównomiernego obciążenia, a w skrajnych przypadkach może prowadzić do katastrofy budowlanej. Autor rozprawy przeprowadził krytyczną analizę dotychczas stosowanych metod monitoringu konstrukcji obiektów wielkopowierzchniowych. Jej wynikiem jest wprowadzenie współczynnika przeciążenia konstrukcji, jako miary stopnia wykorzystania jej nośności oraz porównanie metodą symulacyjną zachowania się typowych ustrojów konstrukcyjnych stosowanych w obiektach wielkopowierzchniowych pod wpływem

niesymetrycznego obciążenia. W wyniku tych badań Autor zaproponował wprowadzenie nowej wielkości monitorującej stan obciążenia konstrukcji - kąta obrotu przekrojów poprzecznych elementów konstrukcji dachów. W wyniku badań symulacyjnych wybranych ustrojów konstrukcyjnych określił wymagany zakres pomiaru kąta obrotu, miejsce instalacji sensorów oraz sposób interpretacji wyników pomiaru. Wielkość monitorująca została zdefiniowana jako większy z dwóch kątów obrotu przekrojów poprzecznych mierzonych symetrycznie względem środka rozpiętości monitorowanego elementu. Do pomiaru kąta obrotu zaproponował inklinometr. Zrealizowane w tym zakresie badania i analizy mieszczą się w obszarze zainteresowania mechaniki budowli, ale ich przeprowadzenie było koniecznym punktem wyjścia do realizacji układu pomiarowego.

Kolejnym etapem prac było określenie wymaganych parametrów technicznych sensora, wybór typu sensora oraz szczegółowa analiza, krytycznych z punktu widzenia zastosowania, parametrów wybranego rozwiązania. Autor rozprawy wybrał do dalszych prac konstrukcyjnych różnicowy sensor inklinometryczny SCA103T-D04, wykonany w technologii MEMS. Praktyczne wykorzystanie tego sensora wymagało rozwiązania metody korekcji temperaturowego dryftu zera i czułości w szerokim zakresie temperatury pracy oraz bezprzewodowej transmisji danych przy zapewnieniu niskiego poboru mocy, umożliwiającego wieloletnią bezobsługową pracę inklinometru. Końcowym, chociaż czasochłonnym, etapem prac była weryfikacja poprawności przeprowadzonych badań w warunkach rzeczywistych, na funkcjonującym obiekcie budowlanym. Wyniki uzyskane w czasie ponad czteroletnich testów wykonanego modelu urządzenia pomiarowego potwierdziły możliwość zastosowania jako wielkości monitorującej kąta obrotu przekroju poprzecznego wybranego elementu konstrukcji dachu oraz możliwość zastosowania do tego celu wybranego rozwiązania sensora inklinometrycznego. Zrealizowane w tym zakresie analizy i badania eksperymentalne są charakterystyczne dla obszaru badawczego elektroniki, aktualnie należącej do dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika.

Uwzględniając przedstawione wyżej argumenty uważam, że podjęte w recenzowanej pracy doktorskiej badania naukowe, których celem jest (str. 12 pracy) "...opracowanie wiarygodnej metody określania stopnia wykorzystania nośności ustrojów konstrukcyjnych oraz opracowanie bezprzewodowego, bezobsługowego i uniwersalnego urządzenia pomiarowego dla systemu monitoringu konstrukcji dachu bazującego na tej metodzie" są aktualne i ważne oraz mają istotne znaczenie praktyczne.

3. Przegląd i ocena treści rozprawy

Przedstawiona rozprawa o objętości 116 stron zawiera 6 rozdziałów zasadniczych, bibliografię, obejmującą 100 pozycji oraz 4 załączniki o objętości 16 stron, będące opisem laserowej metody pomiaru odległości, analizy ugięcia jednoprzęsłowej belki podpartej swobodnie pod wpływem jednorodnego obciążenia, stanowiska laboratoryjnego do przeprowadzenia badań temperaturowych prototypu badawczego inklinometru oraz założeń projektowych i dokumentacji elektrycznej wykonanego prototypu badawczego.

W rozdziale pierwszym Autor przedstawia podstawowe zagadnienia związane z monitoringiem konstrukcji budowlanych, omawia potrzebę stosowania monitoringu, związaną zarówno z zapewnieniem bezpieczeństwa ludzi i mienia, jak i obniżeniem kosztów eksploatacji takich obiektów. Ponadto omawia dotychczasowy stan techniki w tym obszarze, zwracając uwagę na brak wiarygodnych rozwiązań monitoringu stopnia wykorzystania

nośności konstrukcji pod zmiennym obciążeniem z uwzględnieniem nierównomierności jego rozłożenia. Następnie formułuje podstawowe właściwości, jakimi powinien się charakteryzować wiarygodny system monitoringu konstrukcji. Dotyczą one jednoznaczności związku pomiędzy wielkością monitorującą, a stopniem wykorzystania nośności konstrukcji oraz wyboru sposobu jej pomiaru. W wyniku tej analizy został określony cel oraz sformułowane dwie tezy pracy. Pierwsza teza dotyczy braku wiarygodności wyników jednopunktowych pomiarów typowych wielkości monitorujących (odkształcenia, ugięcia i przemieszczenia) dla oceny stopnia wykorzystania nośności ustrojów konstrukcyjnych poddanych niesymetrycznym obciążeniom. Druga - określa konieczność wykonywania pomiarów wielkości monitorującej w co najmniej dwóch punktach ustroju konstrukcyjnego poddanego niesymetrycznym obciążeniom, w celu dostatecznie dokładnego określenia stopnia wykorzystania jego nośności. W takim przypadku wielkością monitorującą może być kąt obrotu przekroju poprzecznego elementu konstrukcji.

Rozdział drugi, o charakterze przeglądowym, Autor poświęcił omówieniu stosowanych systemów monitoringu konstrukcji budowlanych, wykorzystujących dwie wielkości monitorujące: odkształcenie powierzchniowe lub ugięcie elementu konstrukcji dachu. W tym kontekście przedstawia podstawowe wady czujników tensometrycznych, koncentrując uwagę na pomiarach ugięcia metodą geodezyjną, wizyjną, tachimetrem lub laserowym urządzeniem pomiarowym. Analizując ugięcie, jako wielkość monitorującą, Doktorant zwrócił uwagę na niejednoznaczność zależności pomiędzy wielkością monitorowaną - maksymalnym naprężeniem występującym w monitorowanym elemencie, a wielkością monitorującą - jego ugięciem, w przypadku niesymetrycznego obciążenia. W celu określenia jednoznacznego związku pomiędzy tymi wielkościami, zdefiniował współczynnik przeciążenia konstrukcji η (2-1) oraz przeprowadził obliczenia zmienności wartości tego współczynnika dla jednonawowego układu ramowego o zmiennym stopniu niesymetrii obciążenia. Uzyskane wyniki potwierdziły, że pomiar ugięcia, w przypadku niesymetrii obciążenia, daje wartości zaniżone nawet o 50%, w porównaniu z rzeczywistym stopniem wykorzystania nośności konstrukcji.

Rozdział trzeci zawiera analizę porównawczą dwóch wielkości monitorujących stopień wykorzystania nośności konstrukcji: ugięcia i kąta obrotu przekroju poprzecznego w warunkach niesymetrycznie rozłożonego obciążenia. Autor poddał analizie również właściwości czujników mierzących te wielkości, uwzględniając parametry metrologiczne, środowisko pracy, koszty utrzymania i energochłonność. Analiza czujników wykazała większą przydatność inklinometrów w monitoringu konstrukcji. Z drugiej strony, obliczenia trzech typowych ustrojów konstrukcyjnych: jednoprzęsłowej belki podpartej swobodnie, jednonawowego układu ramowego oraz dwutrapezowego dźwigara kratowego, w oparciu o współczynnik przeciążenia konstrukcji, wykazały, że jedynie zastosowanie jako wielkości monitorującej większego z dwóch kątów obrotu przekrojów poprzecznych mierzonych symetrycznie względem środka rozpiętości monitorowanego elementu umożliwia określenie stopnia wykorzystania nośności elementu w akceptowalnych granicach. Przeprowadzone analizy są oryginalnym osiągnięciem Autora rozprawy, a ich wyniki stały się podstawą pięciu zgłoszeń patentowych.

W obszernym rozdziale czwartym Autor, na podstawie wymaganych w systemach monitoringu parametrów metrologicznych inklinometru, dokonał wyboru sensora inklinometrycznego. Doktorant rozważał dwie odmiany inklinometrów: elektrolityczne i akcelerometry wykonane w technologii MEMS. Swoją decyzję oparł na analizie dokumentacji i materiałów dostarczanych przez producentów takich sensorów. Tego typu publikacje z

natury rzeczy nie zawsze przedstawiają w obiektywny sposób właściwości różnych typów sensorów. Nie negując trafności wyboru typu sensora, należy zwrócić uwagę, że w obiegu naukowym dostępne są recenzowane publikacje o charakterze przeglądowym, na podstawie których można dokonać takiego wyboru, kierując się obiektywnymi kryteriami. Można w tym miejscu wymienić publikacje: Jae Hyoung Lee, Seung S. Lee: Electrolytic tilt sensor fabricated by using electroplating process. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 167, Issue 1, 2011, pp. 1-7, doi.org/10.1016/j.sna.2011.01.011; Łuczak S.; Ekwirska M.: Electric-Contact Tilt Sensors: A Review. *Sensors* 2021, 21, 1097. doi.org/10.3390/s21041097; Łuczak S., Grepl R., Bodnicki M.: Selection of MEMS Accelerometers for Tilt Measurements. *Journal of Sensors* Vol. 2017, Article ID 9796146, 13 pages, doi.org/10.1155/2017/9796146 i Rao K. et al.: A High-resolution Area-change-based Capacitive MEMS Accelerometer for Tilt Sensing. 2020 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/INERTIAL48129.2020.9090016. W ostatniej z tych publikacji autorzy wymieniają między innymi sensor zastosowany w recenzowanej pracy. Określając możliwość zastosowania wybranego typu sensora, Autor analizował pasmo sygnału wyjściowego, zapewniające założoną rozdzielczość pomiaru oraz wartości temperaturowego dryftu zera i czułości. Ze względu na konieczność korekcji dryftów temperaturowych, Doktorant zbudował stanowisko badawcze prototypu inklinometru. Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów opracował algorytmy realizujące korekcję dryftu zera oraz czułości. Ostatnim etapem projektu czujnika kąta obrotu była optymalizacja pod względem minimalizacji zużycia energii pozostałych elementów urządzenia pomiarowego: przetwornika analogowo-cyfrowego, przetwornicy impulsowej wraz ze stabilizatorem napięcia oraz modułu komunikacji radiowej.

Rozdział piąty zawiera opis przeprowadzonych długookresowych testów na funkcjonującym obiekcie budowlanym wraz z dyskusją otrzymanych wyników. Autor umieścił dwa zestawy modułów sensorów na sąsiednich dźwigarach kratowych, usytuowanych w środkowej części obiektu magazynowego. Sensory zostały zamocowane symetrycznie na dolnym pasie dźwigara blisko podpór. Natomiast zgodnie z wynikami analizy przeprowadzonej w rozdziale 3, optymalne punkty instalacji sensorów znajdują się w górnym pasie takiego dźwigara. Autor nie wyjaśnia tej rozbieżności. Dodatkowo interpretację wyników utrudniają różnice konstrukcyjne pomiędzy dźwigarem analizowanym w rozdziale 3, a dźwigarem, na którym zainstalowano sensory podczas testów. Pomiaru kąta obrotu przekroju poprzecznego były wykonywane przez pierwsze 21 miesięcy co 1 godzinę, przez kolejny miesiąc - co 6 godzin, następnie przez 5 miesięcy co 2 godziny, a przez ostatnie 7 miesięcy - co 6 godzin. Autor niestety nie wyjaśnia powodu takiego zróżnicowania harmonogramu badań, jak również nie podaje czy mogło to wpłynąć na uzyskane wyniki testu. Otrzymane wyniki pomiarów potwierdziły możliwość wykorzystania zaproponowanej metody monitoringu do określenia stopnia wykorzystania nośności konstrukcji. Jednocześnie pośrednio wskazują na dobre właściwości opracowanego urządzenia pomiarowego, w tym dużą stabilność długookresową oraz założoną na etapie projektowania wartość temperaturowego dryftu zera.

Rozdział szósty jest podsumowaniem dokonań Doktoranta - przedstawieniem efektów jego pracy, uzyskanych oryginalnych osiągnięć oraz wniosków z przeprowadzonych analiz i badań eksperymentalnych.

Załączona bibliografia zawiera publikacje dotyczące monitoringu konstrukcji budowlanych, w większości odnoszących się do obiektów użytkowanych w Polsce. Druga grupa publikacji związana jest z sensorami wykorzystywanymi w systemach monitoringu.

Część z tych publikacji to materiały producentów takich sensorów, co w przypadku pracy, mającej charakter projektu jest w dużym stopniu uzasadnione. Mgr inż. Marcin Osiniak jest współautorem 11 spośród załączonych pozycji bibliograficznych, w tym 5 zgłoszeń patentowych. Autor rozprawy jednak nie zawsze dostatecznie precyzyjnie podaje dane bibliograficzne, co utrudnia dostęp do materiałów źródłowych. Dotyczy to np. pozycji: [26], [69], [72], [73], [86].

Dokonując merytorycznej oceny całej rozprawy stwierdzam, że jest ona napisana na właściwym poziomie merytorycznym. Zawiera dobrze sformułowany i ważny problem badawczy oraz prezentuje poprawne rozwiązanie tego problemu, które zostało uzyskane przez Autora z zastosowaniem odpowiedniej metodologii naukowej. Na podstawie przedstawionego omówienia treści całej rozprawy doktorskiej należy odnotować, że rozprawa ma charakter interdyscyplinarny, a jej Autor wykazał się umiejętnością formułowania problemów naukowo-badawczych, wykraczających również poza obszar elektroniki. Stanowi również oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej.

Do efektywnego rozwiązywania sformułowanego zagadnienia wykorzystał wiedzę z zakresu elektroniki, metrologii, modelowania i badań symulacyjnych oraz metod numerycznych, popartą wieloletnim doświadczeniem zawodowym w obszarze systemów monitoringu konstrukcji budowlanych.

4. Oryginalne osiągnięcia

Udowadniając sformułowane tezy oraz realizując wyznaczone cele badawcze, Autor rozprawy uzyskał kilka oryginalnych wyników naukowych i technicznych, do których między innymi zaliczam:

- 1) zastosowanie spójnej metodologii oceny stopnia wykorzystania nośności monitorowanych elementów konstrukcyjnych poddanych niesymetrycznym obciążeniom, dzięki zdefiniowaniu współczynnika przeciążenia konstrukcji,
- 2) wykazanie, na podstawie badań symulacyjnych, że koniecznym warunkiem uzyskania wiarygodnej informacji o stopniu wykorzystania nośności ustrojów konstrukcyjnych jest pomiar w co najmniej dwóch punktach monitorowanego elementu,
- 3) wykazanie, że kąt obrotu przekroju poprzecznego elementu konstrukcyjnego mierzony w bardziej obciążonym jego końcu jest dobrą miarą stopnia wykorzystania jego nośności, co umożliwiło opracowanie nowej, wiarygodnej metody monitoringu, w której wielkością monitorującą jest większy z kątów obrotu przekrojów poprzecznych,
- 4) projekt, wykonanie i badania laboratoryjne urządzenia pomiarowego dla systemu monitoringu, wykorzystującego opracowaną metodę pomiaru kąta obrotu,
- 5) czteroletnie testy opracowanej metody monitoringu w warunkach rzeczywistych.

Mając na uwadze wyżej wymienione oryginalne osiągnięcia naukowe i techniczne, uważam, że Pan mgr inż. Marcin Osiniak zrealizował założony cel badawczy oraz uzasadnił słuszność sformułowanych tez. Ponadto wykazał się umiejętnościami samodzielnego rozwiązywania problemów naukowo-technicznych z wykorzystaniem właściwych metod badawczych i na poziomie naukowym odpowiadającym wymaganiom przy realizacji rozpraw doktorskich z nauk inżynieryjno-technicznych.

5. Uwagi i komentarze

Przy zachowaniu pozytywnej oceny całości rozprawy, niezależnie od komentarzy sformułowanych w punkcie 3 recenzji, jej lektura nasuwa kilka kolejnych uwag o charakterze ogólnym i polemicznym:

- 1) Wprowadzone przez Autora definicje współczynników przeciążenia konstrukcji, odnoszące się do pomiarów kątów obrotu: (3-2) oraz (3-4) są nieprecyzyjne. Z analizy zmienności kątów obrotu pod wpływem obciążenia, np. przedstawionej w załączniku Z2, wynika, że kąty obrotu położone symetrycznie względem środka rozpiętości elementu mają przeciwne znaki. Wydaje się, że Autor milcząco założył, że w tych wzorach uwzględniane są wartości bezwzględne kątów obrotu. Z drugiej strony, wyniki analizy przedstawione w rozdziale 3, np. w tabelach 3-3, 3-8 wskazują, że dla niesymetrycznie obciążonego jednonawowego układu ramowego, kąt obrotu może zmienić znak wraz ze zmianą obciążenia. Czy nie może to prowadzić do błędnej interpretacji wyników pomiaru?
- 2) Autor w rozdziale 2 rozprawy, analizując możliwe rozwiązania systemów monitoringu, wyklucza możliwość zastosowania do pomiaru odkształceń powierzchniowych czujników tensometrycznych, ze względu na punktowy charakter pomiaru, nie odzwierciedlający rozkładu naprężenia w miejscach oddalonych od czujnika. Czy Autor rozważał możliwość zastosowania do pomiaru naprężeń powierzchniowych czujników światłowodowych z siatkami Bragga, umożliwiającymi wielopunktowy pomiar naprężeń wzdłuż światłowodu pomiarowego?
- 3) Na stronie 61 rozprawy Autor wskazuje, że jedynym sensorem, który można zastosować w systemach monitoringu jest układ SCA103T-D04. Z informacji dostępnej na stronach WWW producenta tego sensora wynika, że od czerwca 2019 roku układy tego typu zostały wycofane ze sprzedaży. Czy istnieją zamienniki o porównywalnych parametrach?
- 4) Na rys. 4-7 przedstawiono przebiegi czasowe szumów badanego prototypu inklinometru. Uzyskane wartości nieznacznie przekraczają wartości dopuszczalne określone przez producenta. Autor przypuszcza, że może to wynikać z zaburzeń generowanych przez wentylator lub sprężarkę komory temperaturowej. Hipotezę tę można zweryfikować, przedstawiając zmierzone wartości szumów w postaci histogramu. Postać histogramu mogłaby wskazać na występowanie składników okresowych, związanych na przykład z pracą wentylatora.
- 5) W rozdziale 4 rozprawy Autor przeprowadza aproksymację wielomianem czwartego stopnia metodą najmniejszej sumy kwadratów. Na jakiej podstawie został określony wymagany stopień wielomianu?
- 6) W recenzowanej rozprawie Autor często posługuje się pojęciem dokładności. Za "International Vocabulary of Metrology" (JCGM 200:2012) dokładność pomiaru można zdefiniować jako bliskość zgodności między wartością wielkości mierzonej a prawdziwą wartością wielkości mierzonej. Pojęcie „dokładność pomiaru” nie jest wielkością i nie ma określonej wartości liczbowej. Można uznać, że pomiar jest dokładniejszy, gdy zapewnia mniejszy błąd pomiaru. Wprawdzie producenci aparatury i przetworników często posługują się tym pojęciem na określenie

maksymalnych wartości błędu, jednak w pracach naukowych bardziej odpowiednie jest posługiwanie się w tym kontekście pojęciem niepewności pomiaru.

W tekście pracy występują również nieliczne uchybienia redakcyjne. Najbardziej istotne z nich wyszczególniono poniżej:

- 1) Na str. 3 Autor, powołując się na publikacje [16] i [17] wymienia liczbę katastrof w Polsce w 2014 roku, podczas gdy w tytule jednej z nich jest wprost odniesienie do katastrof w roku 2013, a druga ukazała się w 2013 roku.
- 2) W str. 17 i 28 rozprawy Autor odwołuje się do nieistniejącego "dodatku 0".
- 3) Na str. 29 oraz w podsumowaniu na str. 90, Autor sugeruje możliwość zbudowania "całkowicie bezprzewodowego" inklinometru. Czy można więc zbudować urządzenie "niecałkowicie" bezprzewodowe?
- 4) Na Rys. 3-9 przedstawiono na dwóch wykresach zależność współczynnika przeciążenia od stopnia niesymetrii obciążenia. Przyjęcie różnych wartości skali współczynnika przeciążenia utrudnia interpretację pokazanych zależności.
- 5) Na str. 56 Autor pisze: "W tym celu wystarczy na monitorowanym elemencie umieścić dwa urządzenia pomiarowe - inklinometry (w sposób analogiczny do pokazanego na Rys. 3-1, Rys. 3-4 lub Rys. 3-6)". Na tych rysunkach wskazane są jedynie punkty elementów konstrukcji, w których można umieścić urządzenie pomiarowe. Natomiast sposób montażu Autor przedstawia na Rys. 5-2.
- 6) Na str. 76, obliczając wartość ładunku pobieranego z baterii podczas transmisji pojedynczego wyniku pomiaru, Autor posługuje się wzorem, w którym występują nie zdefiniowane wcześniej zmienne: n oraz B .
- 7) W Załączniku 2, w zależnościach (Z2-5) oraz (Z2-6) błędnie oznaczono moment bezwładności symbolem I , zamiast używanego w pozostałych przypadkach - symbolu J .
- 8) Na str. 111 Autor pisze o "nieszczelności przekrycia dachu", zamiast "pokrycia dachu".

6. Wniosek końcowy

Uwzględniając wyżej wymienione uwagi i komentarze oraz całość rozprawy doktorskiej wraz z oryginalnymi osiągnięciami naukowo-badawczymi stwierdzam, że:

Opiniowana praca doktorska spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika, zgodnie z art. 13 ust. 1 Ustawy o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. z dnia 21.06.2016 r., poz. 882), wnoszę o przyjęcie rozprawy i jej dopuszczenie do publicznej obrony.



