

dr hab. inż. Lucjan Ślęczka, prof. PRz

Rzeszów, 15 września 2022 r.

Politechnika Rzeszowska

Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury

ul. Poznańska 2, 35-084 Rzeszów

e-mail: slecza@prz.edu.pl

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Renaty Pigoń pt.

***Wybrane zagadnienia analizy masztów z uwzględnieniem sprężysto-plastycznych
właściwości odciągów***

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Rektora Politechniki Koszalińskiej, dr hab. inż. Danuty Zawadzkiej, prof. PK, z dnia 6 lipca 2022 r. i dołączona do niego rozprawa doktorska mgr inż. Renaty Pigoń, o tytule wymienionym wyżej, której promotorką jest dr hab. inż. Monika Matuszkiewicz, prof. PK.

2. Charakterystyka i zawartość rozprawy

Rozprawa dotyczy wpływu sprężysto-plastycznych właściwości odciągów linowych w masztach na globalne zachowanie tych konstrukcji. Odciągi masztów, wykonane z lin stalowych, z natury cechuje nieliniowa zależność pomiędzy siłą podłużną a wydłużeniem, lecz wynika ona głównie ze nieuniknionego zwisu liny. Większość dotychczasowych analiz i powszechne podejście inżynierskie opierają się na założeniu stałej wartości modułu sprężystości liny odciągowej. Założenie takie jest poprawne, gdy lina jest wstępnie przeciągnięta, czyli poddana kilkukrotnemu rozciąganiu i odciążaniu, jeszcze przed wbudowaniem w konstrukcję. Jest to jednak kłopotliwy zabieg technologiczny, wydłużający cały proces budowy i podnoszący koszty wykonawstwa. Oceniana praca dotyczy zachowania masztów, w których pojawia się dodatkowy efekt nieliniowości odciągów, wynikający ze sprężysto-plastycznych właściwości lin stalowych bez wstępnego przeciągnięcia.

Rozprawa jest zawarta na 231 stronach. Składa się z 6 rozdziałów, bibliografii obejmującej ponad 250 źródeł, trzech załączników oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Z naukowego punktu widzenia tematyka dysertacji leży w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport.

Wprowadzenie o objętości 69 stron stanowi uzasadnienie podjętej tematyki i jest bardzo obszernym przeglądem stanu zagadnienia projektowania masztów oraz działających na nie obciążeń, w tym oblodzenia i oddziaływań wyjątkowych. Rozdział kończy się określeniem celu i zakresu rozprawy oraz podaniem jej tezy.

Rozdział drugi, zawierający 26 stron, jest omówieniem problemu naukowego dysertacji, w którym podano charakterystykę lin stalowych stosowanych w konstrukcjach masztów. Przedstawiono tu także fizyczny opis sposobu zachowania lin pod obciążeniem powodujący nieliniową ich odpowiedź a także ściśle oraz przybliżone równania statyki pojedynczego ciągu. W szczególności zawarto tu również zasady procesu przeciągania lin, który wykonuje się w celu ustabilizowania ich właściwości sprężystych oraz porównanie zachowania liny nieprzeciągniętej w stosunku do zachowania takiej samej liny, poddanej procesowi przeciągania.

Rozdział trzeci, o objętości 23 stron, przedstawia procedury i rezultaty podjętych badań doświadczalnych lin stalowych. Badaniom poddano dwa typy lin – linę stalową jednozwitą otwartą PG40, o konstrukcji 1x37, średnicy nominalnej 20,1 mm i klasie wytrzymałości 1770 oraz linę splotkową wielozwitą 6x19-WSC o średnicy nominalnej 20 mm i klasie wytrzymałości 1960. Przygotowanie do badań polegało na wykonaniu uchwytów stożkowych elementów próbnych. Same badania miały charakter statycznej próby rozciągania, podczas której wyznaczano zależność siła-wydłużenie lin nieprzeciągniętych, określano współczynnik sprężystości lin po ich wstępnym przeciągnięciu i wyznaczano rzeczywiste wartości sił zrywających liny. Rozdział zawiera wyciąg rezultatów, uwzględniający podstawowe analizy statystyczne modułu sprężystości podłużnej lin przeciągniętych oraz wartości siły zrywającej. Wyniki badań w postaci zależności siła-wydłużenie zostały wykorzystane do zaproponowania funkcji aproksymujących zależność naprężenie-odkształcenie σ - ϵ badanych lin.

Rozdział czwarty, składający się z 26 stron, zawiera opis aktualnie stosowanych metod analizy masztów. Zaprezentowano podejście, w którym trzon masztu opisany jest zastępczym elementem belkowym, kratownicą przestrzenną z prętami łączonymi przegubowo lub kratownicą przestrzenną z ciągłymi prętami krawężnikowymi. Przedstawiono tu również wybrane metody rozwiązania nieliniowego zachowania ustrojów prętowo-cięgnowych i omówiono podstawy analizy masztów za pomocą MES.

Rozdział piąty, o objętości 44 stron, stanowi wraz z rozdziałem trzecim (badaniami własnymi) zasadniczy szkielet rozprawy. Przedstawiono w nim porównanie wyników otrzymanych z modeli numerycznych uwzględniających sprężysto-plastyczną zależność liny odciągowej (liny bez przeciągnięcia) w stosunku do rezultatów osiągniętych przy założeniu

tylko sprężystej zależności materiałowej takiej samej liny wstępnie przeciągniętej. Porównaniom takim poddano pojedyncze ciągnie w konfiguracji poziomej i nachylonej (pkt. 5.1), maszt pomiarowy z trzonem rurowym o wysokości $H = 100$ m (pkt. 5.3), maszt z trzonem kratowym o wysokości $H = 200$ m (pkt. 5.4), maszt z trzonem kratowym o wysokości $H = 190$ m (pkt. 5.5) oraz maszt z trzonem kratowym o wysokości $H = 140$ m (pkt. 5.6). Porównania obejmowały również zastosowanie dwóch modeli obliczeniowych trzonów masztów – z zastępczym elementem belkowym w stosunku do modelu z trzonem w postaci przestrzennej kratownicy (w pkt. 5.2 masztu o wysokości $H = 260$ m oraz dodatkowo w pkt. 5.5 masztu o wysokości $H = 190$ m). Wszystkie analizy przeprowadzono za pomocą wyrafinowanego modelowania MES, a uwzględniane w analizach właściwości odciągów zaimplementowano z przeprowadzonych badań własnych.

Rozdział szósty, ostatni, o objętości 4 stron, jest podsumowaniem pracy i oceną stopnia osiągnięcia wyznaczonego celu oraz zawiera proponowane kierunki dalszych badań.

3. Ogólna ocena

3.1 Ocena tematyki rozprawy

Recenzowana rozprawa dotyczy tematyki zachowania masztów stalowych, w których zastosowano liny odciągowe bez przeciągnięcia i tym samym wykazujące właściwości sprężysto-plastyczne.

Większość dotychczasowych prac poświęconych zachowaniu konstrukcji linowych i masztów opiera się na założeniu, że moduł sprężystości podłużnej E liny odciągowej jest stały, niezależnie od jej poziomu obciążenia. Założenie takie znajduje potwierdzenie jedynie w sytuacji, gdy liny odciągowe są przed wbudowaniem wstępnie przeciągnięte. Proces przeciągania lin jest traktowany jako kosztowne utrudnienie technologiczne i stąd pojawia się tendencja, aby stosować do budowy liny bez przeciągnięcia. Jest ona szczególnie widoczna przy wznoszeniu masztów pomiarowych.

Jakościowa odpowiedź masztu, w którym model materiałowy liny zachowuje się sprężysto-plastycznie (liny bez wstępnego przeciągnięcia) w stosunku do modelu liniowo-sprężystego w linach poddanych przeciągnięciu, jest ogólnie znana od wielu lat. W przypadku stosowania lin nieprzeciągniętych, w ciągnach po odciążeniu pozostają odkształcenia stałe zwiększające ich zwis i najczęściej pojawia się przechył trzonu masztu. Tym niemniej brak jest bardziej szczegółowego przeglądu stanu tego zagadnienia, dotyczącego zarówno samego procesu analizy konstrukcji prętowo-cięgnowych z linami nieprzeciągniętymi, jak i ilościowej

odpowiedzi masztów o różnych wysokościach, konstrukcji trzonu czy rozmaitej liczbie poziomów odciągów na takie podejście projektowe.

Wznoszenie masztów antenowych jest w tej chwili rzadsze niż w połowie XX wieku, lecz w ostatnich latach nastąpiło znaczne zwiększenie liczby budowanych obiektów masztowych, zarówno jako pomiarowych, stawianych w miejscach potencjalnych lokalizacji farm wiatrowych, jak i telekomunikacyjnych. Tak więc recenzowana dysertacja ma wymiar praktyczny, podjęty temat można ocenić jako aktualny a otrzymane wyniki, poza wartością naukową, mają wyraźnie aplikacyjny charakter.

Trudnością w podjęciu tego tematu jest jego złożony charakter. Maszty z odciągami są z wyglądu bardzo prostymi konstrukcjami, jednak podczas projektowania wymagają przeprowadzenia bardzo trudnego i czasochłonnego procesu zbierania oddziaływań i wyrafinowanej analizy globalnej.

3.2 Ocena merytoryczna

Dysertacja ma charakter eksperymentalno-analityczny. W części eksperymentalnej Autorka przeprowadziła kompleksowe badania wybranych typów lin stalowych w celu określenia ich właściwości strukturalnych, opisujących nieliniową zależność siła-wydłużenie lin nieprzeciągniętych oraz wartość współczynnika sprężystości liny po jej wstępnym przeciągnięciu. W części analitycznej przeprowadzono zaawansowaną analizę, najpierw samych cięgien a później masztów o zróżnicowanej konstrukcji i geometrii, z linami odciągowymi przeciągniętymi i nieprzeciągniętymi. Charakterystyki lin stalowych, zarówno przeciągniętych, jak i bez przeciągnięcia, wykorzystano z badań własnych. Podkreślić należy duży zakres przeprowadzonych analiz porównawczych. Przedstawione wyniki pozwoliły na wykazanie różnic jakościowych i ilościowych w zachowaniu konstrukcji prętowo-cięgnowych przy uwzględnieniu sprężysto-plastycznych właściwości odciągów w stosunku do odpowiedzi masztów uzyskanych z liniową charakterystyką materiałową zachowania liny.

Do osiągnięć uzyskanych przez Autorkę w dysertacji należy zaliczyć:

- Przeprowadzenie badań doświadczalnych lin stalowych o różnej konstrukcji (jednozwitej i wielozwitej) w celu określenia ich rzeczywistych charakterystyk mechanicznych.
- Przeprowadzenie dużego zakresu obliczeniowych analiz porównawczych zachowania masztów, o zróżnicowanej wysokości i budowie, za pomocą wyrafinowanego modelowania MES.
- Weryfikacja uzyskanych z analiz MES rezultatów przez porównanie z wynikami otrzymanymi z analitycznego rozwiązania równania cięgna.

- Wykazanie jakościowych, i przede wszystkim ilościowych, różnic w zachowaniu masztów z odciągami wykonanymi z lin o niesprężystej charakterystyce materiału w stosunku do odpowiedzi takich samych konstrukcji z linami o charakterystyce sprężystej.
- Potwierdzenie w przeprowadzonych symulacjach dobrej zbieżności modelu zastępczego masztu (z trzonem odwzorowanym belką o zastępczych charakterystykach geometrycznych przekroju) w stosunku do modelu dokładnego, gdzie trzon jest odwzorowywany jako kratownica przestrzenna elementami belkowymi i prętowymi.
- Podanie zaleceń co do stosowania poszczególnych typów skratowań w masztach o trzonie kratowym.

Wszystkie te elementy dysertacji zostały osadzone w starannie zebranych i usystematyzowanych przez Autorkę rezultatach prac naukowych, przepisów i wytycznych normowych dotyczących projektowania masztów.

3.3 Ocena formalnej postaci rozprawy

Tytuł przedstawionej dysertacji jest szczegółowy i dobrze opisuje jej zawartość.

Na podstawie syntezy aktualnego stanu wiedzy Autorka wyraźnie i trafnie zdefiniowała cele pracy. Zakres badań umożliwiający realizację założonego celu został właściwie określony. Praca została podzielona na rozdziały wzajemnie ze sobą korespondujące i stanowiące logiczny wywód.

Przegląd piśmiennictwa odnosi się do współczesnych prac naukowych.

Praca jest napisana starannie i ogólnie poprawną polszczyzną, od strony redakcyjnej jest właściwie skomponowana i starannie zilustrowana. 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 sformułowań technicznych, które nie powinny pojawić się w dysertacji, przywołano w podanych dalej uwagach szczegółowych.

4. Uwagi szczegółowe

Dysertacja jest wykonana na wysokim poziomie. Tym niemniej niżej podano kilka komentarzy i pytań:

- Dysertacja jest bardzo obszerna i szczegółowo odwołująca się do dostępnego piśmiennictwa (objętość pracy wynosi 231 stron, zawiera 118 rysunków, 53 tabel i odniesienie do 259 pozycji bibliograficznych). Świadczy to o nakładzie wykonanej

pracy Autorki i jej bardzo dużej erudycji. W kilku jednak fragmentach, zdaniem recenzenta, objętość tekstu mogłyby ulec pewnemu skróceniu, bez strat dla czytelności pracy i jasności wyводу, np. zbędna jest informacja o oznakowaniach ostrzegawczych masztów (str. 27) a opis zagadnień związanych z obciążeniem oblodzeniem, zawarty na 10 stronach, jest zbyt długi. Podobnie informacje o obciążeniach wyjątkowych masztów oraz omówienie sposobów ich ujmowania w analizie, a także zagadnienie kombinacji oddziaływań nie wnoszą wiele do głównej myśli przewodniej dysertacji, w której rozpatrywano zachowanie masztów i lin odciągowych w sytuacji obliczeniowej trwałej (zwykłych warunków użytkowania).

- Wyniki przeprowadzonych badań lin nie zostały całkowicie jednoznacznie przedstawione. Wydaje się pożądanym pokazanie wszystkich uzyskanych zależności siła-wydłużenie (lub σ - ϵ) dla każdej z próbek z osobna (choćby w załączniku elektronicznym). Czy zależność obliczeniowa σ - ϵ dla liny jednozwitej została aproksymowana na podstawie tylko pojedynczego wyniku (str. 127, „W wyniku aproksymacji skończonego zbioru punktów doświadczalnych uzyskanych w trakcie rozciągania liny jednozwitej 1x37 dla wybranej próbki R1 przyjęto równanie wielomianowe 4-tego stopnia”), czy wszystkich wyników uzyskanych dla danego typu liny?
- W rozdziale 5 przedstawiającym porównanie odpowiedzi masztów z odciągami bez przeciągnięcia w stosunku do lin odciągowych wstępnie przeciągniętych, cztery z pięciu przeprowadzonych analiz uwzględniają wyłącznie średnie obciążenie wiatrem. Tylko w jednym przypadku rozpatrywano szereg układów obciążeń odcinkowych w kombinacji z obciążeniem średnim. Argumenty za takim podejściem do zagadnienia są podane przez Autorkę na str. 184. Czy jednak zaniżenie obliczeniowego wyężenia masztu wywołane pominięciem wpływu oddziaływań odcinkowych nie zaburza uzyskanych rezultatów i tym samym wynikających z nich wniosków?
- Zakres analizy globalnej masztów przedstawiony w rozdziale 5 należy ocenić jako reprezentatywny pod względem ich wysokości, liczby poziomów odciągów czy konstrukcji trzonu masztu (rurowy czy kratowy). Wszystkie rozpatrywane przykłady mają jednak odciągi umieszczone w trzech płaszczyznach. Jak jest zdanie Autorki na temat potencjalnie innej odpowiedzi masztów z dwiema płaszczyznami odciągów?
- Czy wniosek 4 (str. 162: „W praktyce inżynierskiej ciężna wykorzystywane jako odciągi masztów powinny być wstępnie przeciągnięte, ponieważ czynność ta eliminuje zmiany konfiguracji masztu po jego obciążeniu i odciążeniu”) należy traktować jako finalny dla

całej pracy? Wyniki analiz przedstawione na kolejnych stronach – według oceny recenzenta – wydają się potwierdzać możliwość stosowania lin nieprzeciągniętych w niektórych typach masztów. Samo usytuowanie tego wniosku wydaje się być niewłaściwe – pojawia się on po analizie obliczeniowej pojedynczego ciągu, i to o cięciwie poziomej, a jego treść dotyczy masztów.

- Podejście, w którym Autorka stosuje zależności naprężenie-odkształcenie σ - ε uzyskane z badania konkretnych lin odciągowych do opisu zachowania innych lin, lecz o tej samej konstrukcji i klasie wytrzymałości można uznać za wiarygodne. Szkoda jednak, że Autorka nie zdecydowała się na zwiększenie zakresu własnych badań doświadczalnych lin.

Praca napisana jest poprawnym językiem, lecz pojawia się w niej niewielka liczba pewnych niezręczności językowych dotyczących opisu zagadnień technicznych:

- Niejasny lub nieprecyzyjny jest sens takich sformułowań jak: „naprężenia wzmacniające”, „współczynnik przemieszczenia” (str. 80), czy „odciagi masztu utwierdzone są w [...] fundamentach”, (str. 24).
- Zamiast zdania „Maszty z odciągami należą do konstrukcji szczególnie wrażliwych na różnego typu nieliniowości” lepiej napisać „Maszty z odciągami zachowują się nieliniowo”, (str. 27).
- W zdaniu „Pod wpływem dużego ciężaru tych anten w masztach mikrofalowych powstają duże wartości momentów skręcających” (str. 69) Autorka ma na myśli zapewne efekty skręcania trzonu wywołane obciążeniem wiatrem na odstające od trzonu anteny.
- Zamiast „doraźnej granicy wytrzymałości plastycznej” (str. 92) Autorka zapewne ma na uwadze „doraźną granicę plastyczności”, a w sformułowaniu „wytrzymałość liny” (str. 100) zapewne „nośność liny”
- Stwierdzenie „Pionowanie masztu przy użyciu teodolitu” (str. 18) jest dużym skrótem myślowym.

5. Podsumowanie oraz wnioski końcowe

Przedstawiona do oceny dysertacja rozpatruje zagadnienie zachowania masztów stalowych podpartych odciągami z lin nieprzeciągniętych i dokładności modeli obliczeniowych stosowanych w ich analizie.

Sformułowany problem jest istotny z praktycznego punktu widzenia i został postawiony po szerokiej analizie stanu zagadnienia, biorącej pod uwagę aktualny stan wiedzy i rozwiązania stosowane w przemyśle.

Opiniowana praca stanowi udane rozwiązanie postawionego zadania naukowego. Autorka rozprawy wykazała się umiejętnością prowadzenia badań laboratoryjnych, rozwiązywania zagadnień teoretycznych, wykorzystania istniejących programów komputerowych oraz logicznym formułowaniem wniosków końcowych. Jasny wywód i logiczny sposób przedstawienia kolejnych etapów podjętych badań i analiz wskazują, że Autorka potrafi w pełni wykorzystać swoją wiedzę i posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Wszystko to oznacza, że rozprawa mgr inż. Renaty Pigoń pt. „Wybrane zagadnienia analizy masztów z uwzględnieniem sprężysto-plastycznych właściwości odciągów” spełnia wymogi 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. 2003 nr 65 poz. 595, z późniejszymi zmianami). Wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie mgr inż. Renaty Pigoń do publicznej obrony.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Luzer Jędrzej', is positioned in the lower right quadrant of the page.