

prof. dr hab. inż. Zbigniew ZEMBATY,

z.zembaty@po.opole.pl,

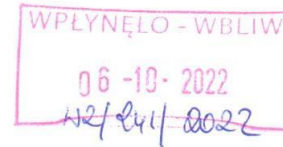
[url.: www.z.zembaty.po.opole.pl](http://www.z.zembaty.po.opole.pl)

Politechnika Opolska

Ul. Próżkowska 76

45-758 Opole

Opole, 30 września, 2022



RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Dawida PROKOPOWICZA:

Wybrane zagadnienia dynamiki, aerodynamiki i niezawodności rurociągowych mostów wiszących

1. PODSTAWA RECENZJI

Recenzję opracowano na zlecenie Rady Naukowej Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Wrocławskiej, pismem Przewodniczącego Rady z dnia 20 czerwca 2022 (pismo razem z rozprawą wpłynęło na Politechnikę Opolską w dniu 18 lipca 2022).

2. CHARAKTERYSTYKA PRACY I JEJ TREŚĆ

Przedstawiona do oceny rozprawa liczy 236 stron i obejmuje siedem rozdziałów, trzy załączniki oraz spis 152 pozycji literatury.

Rozprawa dotyczy analizy statyki i dynamiki specyficznego rodzaju konstrukcji, to jest wiszących mostów przenoszących rurociągi ponad przeszkodami terenowymi, na ogół nad rzekami. W pierwszej części konstrukcję wsporczą rurociągu potraktowano jako zespół współpracujących ze sobą tzw. „podstruktur” czyli fragmentów o jednolitych schematach statycznych wydzielonych z całej konstrukcji (rurociąg, ciągną, wieszaki, odciaży i pylony). Niektóre z podstruktur podległy modelowaniu z uwzględnieniem ich nieliniowej pracy a inne liniowej. W ten sposób opracowano numeryczny model tej konstrukcji który był podstawą obliczeń w programie Mathcad. Przeprowadzono także porównawcze obliczenia w programie MES SOFiSTiK. W drugiej części pracy przeanalizowano drgania konstrukcji wywołane medium transportowanym rurociągiem, ze szczególnym uwzględnieniem stanów przejściowych podczas początkowych i końcowych chwil napełniania rurociągu. W kolejnej części podjęto analizę problemu drgań losowych analizowanej konstrukcji pod wpływem wiatru. Na zakończenie podjęto próbę zastosowania obliczeń niezawodności przy zastosowaniu tzw. zagadnienia pierwszego przewyższenia dla drgań losowych analizowanej konstrukcji.

3. UWAGI OGÓLNE

Temat statyki i dynamiki wiszących mostów będących konstrukcjami wsporczyimi pod rurociągami można uznać za wart specjalnych badań. Konstrukcje te mają bowiem swoją specyfikę. Stosunkowo stabilne obciążenie użytkowe zachęca do projektowania tych konstrukcji bardziej odważnie niż klasyczne mosty wiszące lub kładki. Uznać można, w związku z tym, że głównym obciążeniem decydującym o wymiarowaniu będzie obciążenie wiatrem. Z drugiej strony bardzo podatne dynamicznie konstrukcje o dużych przemieszczeniach mogą wymagać nieliniowych modeli numerycznych. To wszystko są wyzwania wymagające wielowątkowego podejścia.

Taka jest też specyfika recenzowanej rozprawy przyjęta przez jej autora. Niesie to jednak ze sobą cechy pozytywne i negatywne. Pozytywne ze względu na różnorodność wyników które robią duże wrażenie na czytającym i z pewnością pozwoliły doktorantowi osiągnąć znaczny postęp wiedzy własnej w tym zakresie. Negatywne, bo niektóre problemy, zdaniem piszącego te słowa, zostały przeanalizowane zbyt powierzchownie a niektóre uproszczenia mogły spowodować, że wnioski z rozprawy nie będą mogły być stosowane do realnych wiszących mostów przenoszących rurociągi. Należy dodać w tym miejscu, że Autor przeprowadził bardzo szeroko zakrojoną analizę literaturową dotyczącą tych konstrukcji. Przedstawił bardzo ciekawe opisy znajdujących się w wielu miejscach na świecie tych budowli, a także omówił literaturę dotyczącą ich obliczeń i projektowania.

Reasumując, uznać można, że **w Rozprawie podjęto analizowanie wyraźnie zdefiniowanego, praktycznego problemu badawczo-projektowego inżynierii lądowej. Zastosowano do tego nowoczesny aparat matematyczny i numeryczny.**

4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ I OCENA ICH ORYGINALNOŚCI

W rozdziale trzecim przygotowano model obliczeniowy mostu wiszącego wykorzystując do tego celu tzw. metodę „podstruktur”. Przyjęto, że rurociąg sam w sobie stanowi element konstrukcyjny a jego pracę wspierają wieszaki i odciągi. W odróżnieniu od typowego mostu wiszącego w tym wypadku dodane są także poziomo ułożone, specjalne odciągi wiatrowe. Świadczy to o istotnej roli giętej, poziomej podatności tych mostów. Założono, że cięgna oraz odciągi są przegubowo połączone z pylonami, a w przypadku rurociągu, założono dowolne połączenie z pylonami a także alternatywnie brak połączenia z pylonem (podparcia na osobnych fundamentach). Jako obciążenia przyjęto ciężar własny, ciężar medium poruszającego się w rurociągu i obciążenie wiatrem. Założono, że na odciągi i pylony wiatr nie oddziałuje. Szczególnie to pierwsze założenie jest mocnym ograniczeniem realnego modelowania tych budowli, gdyż drgania odciągów to bardzo ważny element drgań lekkich i

rozległych konstrukcji jakimi są mosty wiszące. W rozdziale 3.3 na stronach 58-94 Autor szczegółowo wyprowadza równania ruchu pod-struktur cięgien, rurociągu, wieszaków i pylonów a następnie przeprowadza agregację tych równań (macierzy) do końcowego równania ruchu które jest weryfikowane poprzez obliczenia zagadnienia własnego przy wykorzystaniu tego modelu i programu MES SOFiSTiK. Kończącym efektem rozdziału trzeciego jest numeryczny model przykładowego wiszącego mostu rurociągowego o rozpiętości przęsła głównego 655.3 metra (Rys. 3.16). W rozprawie przyjęto nieliniowość pracy cięgien i rurociągu (duże przemieszczenia), choć w analizach numerycznych ograniczono się do obliczeń w zakresie liniowym. Autor zauważył, że przyjęty przez niego model pozwala uzyskać taką samą dokładność co model MES przygotowany za pomocą komercyjnego programu (SOFiSTiK) o 2.5 razy większej liczbie stopni swobody.

W kolejnym rozdziale (rozdział 4) doktorant przeprowadza analizę ruchu mostu pod wpływem transportu cieczy. W szczególności analizuje jak zmienia się zagadnienie własne całej konstrukcji pod wpływem ruchu medium w rurociągu. W podsumowaniu tego rozdziału Autor stwierdził, że uwzględnienie efektów dynamicznych przepływu ciągłej masy jako modelu cieczy i efektów nieliniowych związanych z dużymi przemieszczeniami rurociągu ma znaczenie tylko w przypadku bardzo ekstremalnych prędkości przepływu nie spotykanych na ogół dla typowych rurociągów.

Zdaniem piszącego tą recenzję można uznać, że mimo pewnych ograniczeń dotyczących zakresu obciążeń i nieliniowości, rozdziały 3-4 stanowiące najbardziej pracochłonna część rozprawy (w sumie 88 stron + załączniki 2 i 3) i należą do najbardziej oryginalnej jej części, wnosząc najciekawsze wyniki. Nic dziwnego, że zostały one opublikowane w prestiżowym czasopiśmie „*Computers & Structures*”. Takie „oszczędne” równania ruchu mogą być wykorzystywane przez innych badaczy to rozmaitych celów i tym samym stanowią cenny wkład w rozwój badań.

Wypracowany w rozdziałach 3-4 model wiszącego mostu z rurociągiem został użyty do analizy działania wiatru na tą konstrukcję. Doktorant zdecydował się użyć innego niż typowe podejście do drgań losowych konstrukcji pod wpływem wiatru. Zamiast przyjmować tradycyjne podejście częstotliwościowe zastosował opis wiatru poprzez jego funkcje korelacyjną. Jest to oryginalne podejście mające pewne zalety, ale i wady. Analizy w dziedzinie czasu umożliwiają uwzględnianie efektów niestacjonarności. Jednak analizy w dziedzinie częstości pozwalają dużo oszczędniej stosować złożone numeryczne modele wielu zjawisk które w sposób szczególny zależą od częstości.

Doktorant zdecydował się pominąć efekty drgań samowzbudnych zostawiając ten temat na osobne badania stosując tradycyjny model drgań quasi-ustalonych. Jest to uzasadnione faktem, że takie analizy wykonuje się najczęściej po badaniach modelu konstrukcji w tunelu

wiatrowym, gdy okazuje się że problem taki może się pojawić. Jednak większym uproszczeniem jest, zadeklarowane na stronie 148 rozprawy, pominięcie efektów działania wiatru na odciągi i pylony. O ile te ostatnie można stosunkowo łatwo przewidzieć o tyle nieustalone, stany nieliniowych drgań odciągów mogą znacząco zmienić końcowe efekty działania wiatru na tak wiotkie konstrukcje wiszące jak kilkusetmetrowe wiszące mosty z rurociągami.

Zdaniem recenzenta analizy numeryczne przykładowej konstrukcji przedstawione w rozdziale 5.4 są mało przekonujące. Doktorant po prostu przedstawił zasadniczy wynik rozprawy komunikując, że model sprawdził się w obliczeniach. Dysponując tak dopracowanym modelem mostu mógł doktorant przeprowadzić obszerną analizę parametryczną wskazującą które parametry konstrukcji i obciążenia są szczególnie ważne i które mogą być decydujące w projektowaniu. Przykładowym parametrem szczególnie istotnym dla długich, jednowymiarowych obiektów jest na przykład skala korelacji przestrzennej. Autor po prostu przyjął wielkość parametru $\lambda=7$. Dla mostu o głównym przęśle o rozpiętości ponad 600m parametryczna analiza wpływu tego parametru na odpowiedź w zależności od różnych literaturowych założeń mogła być szczególnie interesująca. Jak wyglądałaby odpowiedź mostu rurowego nisko nad ziemią, a jak gdy most taki przechodziłby wysoko nad wąwozem? Jak zmieniłyby się drgania konstrukcji, gdyby założyć inne literaturowe propozycje parametru λ ?

Kolejnym uproszczeniem przyjętym w analizie numerycznej jest założenie liniowości zagadnienia. Mimo przygotowanego uprzednio nieliniowego modelu konstrukcji losowe drgania pod wpływem wiatru były już analizowane po przyjęciu modelu zlinearyzowanego. I ostatni, jednak szczególnie ważny problem to fakt analizowania odpowiedzi modelu tak jakby całe obciążenie wiatru oddziaływało wyłącznie na rurociąg z pominięciem odciągów. Zdaniem piszącego te słowa pozostawia to wnioski z analiz z rozdziału 5 jedynie w sferze akademickich dyskusji, gdyż drgania licznych odciągów tak wiotkiej konstrukcji jak lekki most o rozpiętości ponad 600m zupełnie zmieniłyby analizowany problem dynamiczny.

W ostatnim rozdziale zawierającym wyniki rozprawy (rozdział 6) przedstawiono wyniki analizy niezawodności mostu stosując aparat tzw. zagadnienia pierwszego przewyższenia procesów stochastycznych (*First Passage Problem*). Wyniki te jednak pozostają czysto akademickie. Jak wiadomo zagadnienie pierwszego przewyższenia odnosi się to przebiegu procesu stochastycznego dla wybranej wielkości, np. naprężeń wywołanych zginaniem w danym miejscu, naprężeniom w wybranym odciągu itp. Trudno mówić tu o pełnej, ogólnej niezawodności. W analizie drgań konstrukcji pod wpływem wiatru pojawia się natomiast problem realnego poziomu, do którego może dochodzić odpowiedź konstrukcji. Odchylenia standardowe procesu stochastycznego odpowiedzi znajdują się znacznie poniżej wartości szczytowych. Jeszcze Davenport podjął się rozwiązać ten problem wyprowadzając wzory na

współczynnik porywów wiatru który obecnie znajduje się w normach wiatrowych większości krajów. Współczynniki te wynoszą od 2.5 do 3.5 lub więcej i zależą od liczby przejść przez zero procesu odpowiedzi w całym okresie uśredniania (najczęściej 10min=600s). Jednak wzór Davenporta nierealistycznie zakłada niezależność przewyższeń co, jak wiadomo, nie jest prawdziwe dla procesów o wąskim widmie, czyli dla typowych, słabo tłumionych drgań budowli np. stalowych konstrukcji mostu rurociągowego (drgania z dominującym podstawowym okresem drgań własnych). Błąd ten skorygował dziesięć lat później E.H. Vanmarcke uwzględniając zjawisko „grupowych przewyższeń”. W takim ujęciu problem pierwszego przewyższenia nie jest jednak analizowany w rozdziale szóstym, gdzie podane są wyniki dość przewidywalne o charakterze analiz czysto akademickich.

5. SZCZEGÓŁOWE UWAGI KRYTYCZNE

5.1 Na stronie 36, Doktorant komentując artykuł [51] nie wspomina, że istotnym wyróżnikiem tej pracy jest uwzględnienie znacząco niekonserwatywnego, sejsmicznego efektu przestrzennego działania wymuszenia sejsmicznego. Dotyczy to efektu opóźnienia czasowego a także spadku koherencji sygnału sejsmicznego między podporami. Tematyka ta ma już w inżynierii sejsmicznej obszerną literaturę. W przypadku konstrukcji na wielu podporach ten efekt może bardzo znacząco podwyższyć obciążenie sejsmiczne mostów o dużych rozpiętościach jakimi są wiszące mosty podtrzymujące rurociągi.

5.2 Strona 62 cytat: (...) *W przypadku zagadnienia nieliniowego na ogół pomija się składniki wyższego rzędu niż drugi (jako małe wyższego rzędu), zatem w dalszych rozważaniach pominięto w (3.7) składniki z podwójnym podkreśleniem (...).*

Stwierdzenie „na ogół się pomija” jest niewystarczające w przypadku tak istotnego dla tej pracy równania. Zapewne uwzględnienie lub nie składników podwójnie podkreślonych bardzo nieznacznie wpływa na wyniki. Pytanie: jak nieznacznie? W jakim zakresie przemieszczeń? Badane konstrukcje ciągnowe mogą bowiem całkiem realnie reprezentować duże przemieszczenia. W rozprawie powinna być w tym miejscu dyskusja – co najmniej literaturowa – ale w miarę możliwości jakaś analiza wrażliwości wyników.

5.3 str 142. Cytat: (...) według [152] *czas uśredniania porywistego wiatru powinien być większy – od jednej do dwóch godzin. (...)*

Jeśli już Autor porusza ten temat to powinien kilkoma zdaniem skomentować ten interesujący i ważny problem. Czas uśredniania powinien być wielokrotnie dłuższy niż najdłuższy okres drgań własnych konstrukcji, tak aby wyraźnie oddzielić stały, statyczny wiatr od porywów. Jeśli jednak czas ten byłby dużo dłuższy to obciążenie z „wiatru

statycznego” (mean wind velocity) przyjmie znacząco mniejszą wartość i zmienić będzie się musiała filozofia projektowania na obciążenie wiatrem.

5.4 str. 142 cytat: „Warto też zauważyć, że składowe poprzeczne turbulencji wiatru v i w są często pomijane, ponieważ są zwykle dużo mniejsze od składowej wzdłużnej u [152]”

To zdanie może być bardzo mylące. Bywają sytuacje, np. dla kominów stalowych, dla których to drgania poprzeczne do napływu wiatru decydują o ich projektowaniu.

5.5 strony 148-149. Cytat: *Założono, że są to procesy nieskorelowane, czyli wzajemnie niezależne, co jest istotnym, ale często stosowanym w literaturze uproszczeniem [19].*

Autor powinien sięgnąć do literatury dotyczącej metod stochastycznych i drgań losowych, aby lepiej rozpoznać kwestię czym różni się brak korelacji (zmiennych losowych i procesów stochastycznych) od ich niezależności. Z niezależności może bowiem wynikać brak korelacji, ale nie odwrotnie.

5.6 Strona 149-150. Cytat: *Założenie, że proces wzbudzenia jest procesem normalnym powoduje, że odpowiedź konstrukcji także jest procesem normalnym (gaussowskim) i pierwsze dwa momenty w pełni określają rozkład prawdopodobieństwa odpowiedzi [131]. W związku z tym, w tej pracy ograniczono analizę problemu drgań mostu spowodowanych oddziaływaniem buffetingu do teorii korelacyjnej, wyznaczając dwa pierwsze momenty odpowiedzi układu, czyli wartość oczekiwaną oraz funkcję kowariancyjną.*

Powyższe zdanie jest prawdziwe jedynie dla drgań liniowych. Gdy układ drgający wykonuje drgania nieliniowe to założenie o utrzymaniu rozkładu normalnego odpowiedzi nie jest prawdziwe. Jak wiadomo, mimo wstępnej budowy nieliniowego modelu badanej konstrukcji mostowej wszystkie numeryczne analizy ograniczono jednak do analiz liniowych lub zlinearyzowanych. Zatem warunek został spełniony. Nie zmienia to faktu, że cytowane powyżej zdanie jest niepoprawne.

6. WNIOSEK I KOŃCOWA OCENA PRACY

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Dawida PROKOPOWICZA jest przygotowana z dużym nakładem pracy i bardzo starannie wykonana oraz sprawia na czytającym wrażenie, że Doktorant głęboko zgłębił i rozpoznał analizowany problem.

Autor podjął analizę trudnego i wielowątkowego problemu z obszaru dynamiki dużych, lekkich konstrukcji inżynierskich jakimi są wiszące mosty przenoszące rurociągi.

Na szczególne podkreślenie zasługuje bardzo obszerny przegląd literaturowy zarówno od strony typowo inżynierskiej jak i od strony różnorodnych metod analizy drgań losowych konstrukcji wywołanych silnym wiatrem. Niestety chyba zbyt obszerna tematyka rozprawy sprawiła, że w wielu wypadkach główne wyniki rozprawy (znajdujące się w rozdziale piątym)

są mocno ograniczone i raczej mają charakter akademickich przyczynków niż realnych analiz dużych mostów przenoszących rurociągi. Zdaniem piszącego te słowa wynika to zarówno z prostoty problemów poddanych analizom parametrycznym, a także z faktu pominięcia wpływu działania wiatru na odcigi analizowanej konstrukcji. Kilka innych uproszczeń także ma wpływy na ograniczony zakres wniosków z rozprawy. Należy jednak podkreślić, że Doktorant bardzo dobrze zatytułował swoją rozprawę określając tym samym jej zakres. W ten sposób cel analiz i omówienia „wybranych zagadnień dynamiki (...) rurociągowych mostów wiszących” można uznać za osiągnięty mimo różnorodnych znaczących braków wskazanych w tej recenzji. Rozprawa zawiera kilka oryginalnych wyników w zakresie efektywnego modelowania złożonej konstrukcji za pomocą metody „podstruktur”, a także ciekawe analizy drgań mostu „rurociągowego” przy jednoczesnym działaniu medium transportowanego rurociągiem i wiatru (por. punkt 4 niniejszej recenzji).

Biorąc powyższe pod uwagę, oraz bardzo szeroki zakres Rozprawy, uznać można, że spełnia ona wymagania ustawy: *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. 2018 poz. 1668) z dnia 20 lipca 2018r. z późniejszymi zmianami i może być podstawą nadania Autorowi stopnia naukowego doktora nauk technicznych. Wnoszę o przyjęcie Rozprawy i dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

