

Dawid Prokopowicz

## WYBRANE ZAGADNIENIA DYNAMIKI, AERODYNAMIKI I NIEZAWODNOŚCI RUROCIĄGOWYCH MOSTÓW WISZĄCYCH

### Streszczenie

WPŁYNEŁO - WBLIW  
3.0-06-2022  
12/10/2022

W rozprawie zaproponowano zastosowanie techniki podstruktur do budowy modelu numerycznego wiszących mostów rurociągowych na potrzeby analiz zagadnień dynamicznych. Zgodnie z ideą tej metody, złożoną konstrukcję mostu potraktowano jako zespół współpracujących ze sobą podstruktur, dla których indywidualnie dobiera się metodę formułowania równań ruchu. Zastosowanie tego podejścia umożliwiło uwzględnienie odrębnych cech charakteryzujących wydzielone podstruktury, przy równoczesnym zmniejszeniu liczby dynamicznych stopni swobody modelu konstrukcji w porównaniu z typowymi modelami MES.

W modelu mostu wyróżniono następujące podstruktury: rurociąg, ciągną główne i wiatrowe, wieszaki, odciągi oraz pylony. Równania ruchu elementów ciągnowych wyprowadzono metodą Galerkina, przyjmując za punkt wyjścia cząstkowe równania różniczkowe opisujące przestrzenne, nieliniowe drgania wstępnie napiętego ciągną podpartego na końcach, z uwzględnieniem ruchu podpór i punktowego obciążenia wieszakami. Rurociąg potraktowano jako smukłą belkę o przekroju rurowym, której drgania giętne w płaszczyźnie pionowej i poziomej są opisane nieliniowym równaniem Eulera-Bernoulliego. Równania drgań w obu płaszczyznach przekształcono do postaci równań zwyczajnych za pomocą metody elementów skończonych w ujęciu Galerkina. Wieszaki łączące rurociąg z ciągnami głównymi i wiatrowymi przyjęto jako pręty typu kratownicowego. Równania ruchu pylonów wyznaczono stosując standardową metodę elementów skończonych. Końcowe równania ruchu opisujące nieliniowe drgania rurociągowego mostu wiszącego uzyskano biorąc pod uwagę warunki zgodności przemieszczeń oraz równowagi sił w miejscach połączeń podstruktur.

Opracowany model numeryczny mostu wykorzystano do sformułowania efektywnych algorytmów przeznaczonych do analizy wybranych zagadnień dynamiki, aerodynamiki i niezawodności, ilustrując w ten sposób możliwości obliczeniowe jakie daje zaproponowany model. Na podstawie obszernych studiów literaturowych i przeglądu głównych problemów badawczych związanych z dynamiką wiszących mostów rurociągowych wybrano do szczegółowych analiz trzy zagadnienia: przepływ cieczy przez rurociąg, wzbudzenie drgań turbulentnym wiatrem (buffeting) oraz niezawodność w sensie pierwszego przekroczenia. Analizy przeprowadzono w zakresie nieprezentowanym dotąd w literaturze. W szczególności zbadano efekty wynikające z nieliniowości geometrycznej spowodowanej dużymi przemieszczeniami rurociągu i ciągien. Ponadto, oceniono wpływ prędkości przepływu cieczy na częstości drgań własnych mostu i charakterystyki drgań deterministycznych (liniowych i nieliniowych)

Dawid Prokopowicz

wymuszonych przepływem cieczy, a także na charakterystyki drgań stochastycznych wzbudzanych buffetingiem i prawdopodobieństwo przekroczenia założonego poziomu przemieszczeń rurociągu.

Do badań numerycznych przyjęto przykładowy model rurociągowego mostu wiszącego, wzorowany na obiekcie rzeczywistym. Przedstawiono wyniki rozwiązań zagadnienia własnego, prowadzące do ustalenia miarodajnej liczby funkcji aproksymujących przemieszczenia cięgien oraz miarodajnej liczby elementów skończonych zastosowanych do dyskretyzacji rurociągu. W badaniach poświęconych oddziaływaniu na rurociąg płynącej cieczy przyjęto, że ciecz jest półnieskończonym odcinkiem ciągłej ruchomej masy i rozważono trzy scenariusze obciążenia: napływ cieczy, stan ustalony, gdy rurociąg jest całkowicie napełniony cieczą i opróżnianie rurociągu. Określono wartość krytyczną prędkości ruchu masy cieczy w stanie ustalonym, przy której konstrukcja mostu traci stateczność. W analizach numerycznych skupiono uwagę na wyznaczeniu pionowych przemieszczeń rurociągu, w zakresie rozwiązań liniowych i nieliniowych, quasi-statycznych i dynamicznych. Stwierdzono, że zarówno wpływy nieliniowe jak i wpływy dynamiczne ujawniające się w przemieszczeniach rurociągu spowodowanych przepływem cieczy są mało istotne, gdy prędkość przepływu mieści się w zakresie do 5 m/s, stosowanym w praktyce w wiszących mostach rurociągowych.

Przedmiotem drugiej części badań było zagadnienie oddziaływania turbulencji wiatru na rurociągowy mosty wiszące poddane równoczesnemu obciążeniu ruchomą masą cieczy. Sformułowano siły aerodynamiczne działające na belkę rurociągową, przy założeniu, że stacjonarne losowe pole wiatru jest podzielone na segmenty wzdłuż rozpiętości mostu. Uwzględniono przestrzenną korelację fluktuacji prędkości wiatru pomiędzy poszczególnymi segmentami rurociągu i korelację czasową w obrębie danego segmentu. Przedstawiono rozwiązania teoretyczne w zakresie teorii korelacyjnej, tj. wyznaczono formuły określające wartości oczekiwane i wariancje poziomych przemieszczeń rurociągu. W analizie numerycznej tych charakterystyk zwrócono szczególną uwagę na wpływ prędkości ruchu masy wewnątrz rurociągu. Uzyskane wyniki obliczeń wykorzystano w kolejnej części rozprawy, gdzie przedstawiono rozwiązania problemu niezawodności w sensie pierwszego przekroczenia założonego stanu granicznego. Przeprowadzono analizę numeryczną średniej liczby przekroczeń w jednostce czasu oraz prawdopodobieństwa przekroczenia przemieszczeń granicznych, w zależności od prędkości przepływu masy oraz średniej prędkości wiatru.

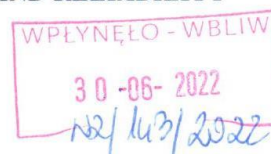
W podsumowaniu rozprawy sformułowano wnioski, które są potwierdzeniem osiągnięcia głównych celów badań oraz stanowią udowodnienie założonych na wstępie tez.

Prokopowicz

Dawid Prokopowicz

**SELECTED PROBLEMS OF DYNAMICS, AERODYNAMICS AND RELIABILITY  
OF PIPELINE SUSPENSION BRIDGES**

**Summary**



In the dissertation, in order to build a numerical model of pipeline suspension bridges for the dynamic analyzes, the substructure technique was proposed. According to the idea of this method, the complex structure of the bridge was considered as an assemblage of interconnected substructures for which the method of deriving of equations of motion was individually selected. Owing to this approach it was possible to take into account specific features characterizing the substructures, while at the same time reduce the number of dynamic degrees of freedom of the bridge model in comparison with typical FEM models.

The following substructures were highlighted in the bridge model: pipeline, main and wind cables, hangers, backstays and pylons. In the case of cable elements, equations of motion were derived using the Galerkin's method where the partial differential equations of nonlinear spatial vibrations were the starting point of the procedure. An initial tension of the cable, movement of supports and point load caused by hangers were taken into consideration. The pipeline was treated as a slender beam with pipe-type cross-section which bending vibrations in the vertical and horizontal planes were described by the nonlinear Euler-Bernoulli equation. The equations describing bending vibrations in both planes were transformed into ordinary equations in the time domain using Galerkin's Finite Element Method. Hangers connecting the pipeline with main and wind cables were assumed as extensible massless truss elements. The equations of motion for pylons were formulated using the standard finite element method. The final nonlinear equations governing the motion of a pipeline suspension bridge were obtained accounting for the compatibility of displacements and the equilibrium equations of interaction forces at interconnection points of the substructures.

The numerical model of the bridge was used to formulate effective algorithms for the analysis of selected problems of dynamics, aerodynamics and reliability, thus illustrating the wide range of possibilities offered by the proposed model. On the basis of extensive literature studies and a review of the main research issues related to the dynamics of pipeline suspension bridges, three problems were selected for detailed analyses: fluid flow in the pipeline, turbulent wind excitation (buffeting) and first-passage reliability problem. The analyzes were carried out in a scope not presented so far in the literature. In particular, the effects of geometric nonlinearity caused by large displacements of the pipeline and cables

Dawid Prokopowicz

were examined. Moreover, the influence of the fluid flow velocity on the natural frequencies of the bridge and the characteristics of deterministic vibrations (linear and nonlinear) forced by the fluid flow was evaluated. The flow velocity impact on the characteristics of stochastic vibrations induced by buffeting and the probability of exceeding the assumed level of pipeline displacements was also investigated. An exemplary model of a pipeline suspension bridge, based on a real object, was adopted for the numerical analyzes. The results of the eigenvalue problem were presented, leading to the determination of a reliable number of approximation functions describing the movement of cables and a representative number of finite elements used for pipeline discretization. In the studies devoted to the effect of fluid flow on the pipeline, the fluid was assumed as a semi-infinite segment of a continuous moving mass, and three load scenarios were considered: filling the pipeline, steady state when the pipeline is completely filled with the fluid, and emptying the pipeline. A critical value of the fluid mass velocity in the steady state, at which the bridge structure loses its stability, was determined. The numerical analyzes were focused on determining vertical displacements of the pipeline, covering linear and nonlinear, quasi-static and dynamic solutions. It was found that both the nonlinear and dynamic effects resulting from the fluid flow are small when the flow velocity is in the practical range of values, i.e. up to 5 m/s.

The subject of the second part of the research was the problem of wind turbulence effects on pipeline suspension bridges subjected to simultaneous load of moving mass of the fluid. The aerodynamic forces acting on the pipeline beam were formulated, assuming that the stationary random wind field is segmented along the bridge span. The spatial correlation between speed fluctuations of the wind acting on individual pipeline segments as well as the time correlation within a given segment were taken into account in theoretical solutions considered in terms of the correlation theory. The formulae defining the expected value and variance of the horizontal displacement at a given cross-section of pipeline were obtained. Numerical results were presented and analyzed with respect to the influence of velocity of the mass moving inside the pipeline. The obtained findings were applied in the next part of the dissertation, where the solutions to first-passage reliability problem of the considered bridge were presented. Numerical analyzes of the mean number of passages per time unit and the first-passage failure probability depending on the fluid mass velocity and the average wind speed were carried out.

Conclusions that confirm an accomplishment of the main research objectives and prove the assumed theses were formulated at the end of dissertation.

Prokopowicz