

dr hab. inż. Bartłomiej Dyniewicz, prof. IPPT
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
ul. Pawińskiego 5B
02-106 Warszawa

Warszawa, 8 grudnia 2020

Opinia o rozprawie doktorskiej mgr. inż. Filipa Zakęsia

“Dynamika belek wieloprzęsłowych i płyt podpartych punktowo poddanych działaniu obciążeń ruchomych”

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa dotyczy analizy drgań konstrukcji ciągłych jedno i dwuwymiarowych poddanych ruchomemu obciążeniu nieinercyjnemu. Maszynopis liczy łącznie 109 stron tekstu. Zasadniczy tekst ujęty został na 97 stronach, poprzedzony jest spisem treści, 8 stron to spis literatury, w którym znajduje się 93 pozycji. Na końcu pracy zamieszczono streszczenie w języku polskim i angielskim. Praca została wykonana na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej.

Konstrukcje inżynierskie poddane ruchomym obciążeniom stanowią istotną grupę obiektów budowlanych. Zagadnienie to obejmuje przede wszystkim budowle komunikacyjne takie jak mosty drogowe i kolejowe, kładki dla pieszych, pasy lotniskowe czy estakady suwnicowe. Ruchome obciążenia mają także istotne znaczenie w modelowaniu zjawisk falowych w m.in. w zagadnieniach kolejowych. Bardzo często ruchome obciążenia są źródłem istotnych drgań, które mogą doprowadzić do uszkodzenia konstrukcji lub jej całkowitego zniszczenia.

Celem pracy jest wyznaczenie półanalitycznych rozwiązań problemu drgań belkowych oraz płytowych układów konstrukcyjnych podpartych punktowymi podporami pośrednimi. W pracy rozpatrzono przypadki ruchomych obciążeń nieinercyjnych, a konkretnie ruchomej siły skupionej oraz ruchomego obciążenia równomiernie rozłożonego poruszających się ze stałą prędkością. Wyniki prac doktoranta zostały przez niego zaprezentowane w pięciu artykułach opublikowanych w czasopiśmie krajowych i międzynarodowych.



Niniejsza rozprawa podzielona jest na 9 rozdziałów. Rozprawa poprzedzona jest wykazem najważniejszych oznaczeń (2 strony). Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do rozprawy i obejmuje przegląd wybranych pozycji literaturowych (5 stron). Cel i zakres pracy przedstawiono w rozdziale drugim, na dwóch stronach. Rozdział trzeci stanowi wprowadzenie do prowadzonych badań (24 strony). Prezentuje wybrane rozwiązania w przypadku modelu belki Eulera. Wyprowadzono równanie ruchu belki, a następnie przedstawiono zagadnienie własne w przypadku swobodnego podparcia obu jej końców, obustronnego utwierdzenia obu jej końców oraz jednostronnego utwierdzenia i swobodnego podparcia końca. Następnie zaprezentowano rozwiązanie belki Eulera poddanej ruchomemu obciążeniu stałą siłą punktową, a następnie stałą siłą rozłożoną. Uwzględniono w analizie także drgania swobodne, po zjeździe obciążenia z belki. W rozdziale czwartym, na piętnastu stronach, omówiono drgania wieloprzęsłowych belek poddanych działaniu ruchomego obciążenia. Zastępując podpory pośrednie odpowiednimi siłami, możemy przedstawić drgania układu wieloprzęsłowego jako drgania belki jedoprzęsłowej. Rozwiązanie można przedstawić w postaci splotu, wykorzystując tzw. rozwiązanie fundamentalne równania różniczkowego. Stosując superpozycję obciążeń otrzymano układ równań całkowych Volterry, z których możliwe jest wyznaczenie sił będących reakcjami w myślowo usuniętych podporach. Następnie przedstawiono procedurę numeryczną, która posłużyła do całkowania otrzymanego układu równań. Rozdział podsumowano zamieszczonymi przykładami obliczeniowymi dotyczącymi belki dwuprzęsłowej oraz trójprzęsłowej obciążonej ruchomą siłą skupioną oraz ruchomym obciążeniem rozłożonym. W rozdziale piątym, na sześciu stronach, przedstawiono analizę drgań układu dwóch belek połączonych między sobą elementami sprężystymi. Górna belka poddana jest działaniu ruchomego obciążenia. Przedstawiono rozwiązanie uwzględniające dowolny zestaw więzi sprężystych oraz zróżnicowane parametry geometryczno-materiałowe obydwu belek. Rozwiązanie stanowi rozwinięcie procedur przedstawionych w poprzednim rozdziale. Na końcu rozdziału zaprezentowano przykład obliczeniowy. W rozdziale szóstym, na 13 stronach, przedstawiono wybrane rozwiązania cienkiej płyty Kirchhoffa poddanej ruchomym obciążeniom nieinercyjnym. Zaprezentowano rozwiązania płyty swobodnie podpartej obciążonej punktową stałą siłą, stałym obciążeniem rozłożonym oraz zmienną w czasie siłą skupioną. Następnie przedstawiono analizę drgań swobodnie podpartej płyty z punktowymi podporami pośrednimi rozmieszczonymi w dowolnym miejscu. Rozdział podsumowuje przykład obliczeniowy płyty swobodnie podpartej z dwiema podporami pośrednimi. Rozdział siódmy (17 stron) poświęcony jest wykorzystaniu metod dyskretnych w analizie dynamiki konstrukcji poddanej ruchomemu obciążeniu. Zaproponowano metodę różnic skończonych oraz metodę granulacji mas w dyskretyzacji przestrzennej konstrukcji oraz metodę Newmarka do całkowania w czasie otrzymanego układu równań różniczkowych zwyczajnych. W rozdziale przedstawiono przykład belki trójprzęsłowej o zmiennym przekroju, poddanej działaniu siły skupionej. Zadanie rozwiązano obiema przedstawionymi metodami. W rozdziale ósmym, na 5 stronach, przedstawiono zagadnienie ruchomych obciążeń losowych. Zastosowano dynamiczną funkcję wpływu w analizie dwóch przypadków obciążeń losowych, czasoprzestrzennego stacjonarnego procesu stochastycznego oraz losowej serii ruchomych sił skupionych. Przedstawione



w rozdziale procedury wykorzystano do określenia charakterystyk probabilistycznych ugięcia belek przedstawionych w rozdziałach poprzednich. Rozdział ostatni prezentuje podsumowanie rozprawy.

2. Uwagi krytyczne

W podrozdziale 3.1 belka Eulera została błędnie nazwana prętem. Zgodnie z nomenklaturą stosowaną w teorii drgań równanie pręta opisuje ruch osiowy i posiada całkowicie odmienny charakter fizyczny (pręt jest równaniem falowym). W dalszej części rozprawy błąd ten nie jest już kontynuowany.

Wyniki uzyskane w przykładach obliczeniowych zaprezentowanych na końcach większości rozdziałów warto było zweryfikować rozwiązaniami otrzymanymi w niezależny sposób, stosując np. rozpowszechnioną metodę elementów skończonych lub wykorzystać procedury numeryczne metody różnic skończonych, zaprezentowane przez Autora w rozdziale 7. Jest to szczególnie istotne w przypadku konstrukcji wieloprzęsłowych, których weryfikacja poprawności rozwiązania półanalizy nie jest trywialna.

Rozwiązanie numeryczne przedstawione w rozdziale 7, jako przykład obliczeniowy, w dużym stopniu zależy od przyjętej dyskretyzacji przestrzennej oraz dobranego kroku czasowego. Autor zaproponował podział belki trójprzęsłowej na 120 odcinków w przypadku metody różnic skończonych, natomiast w metodzie granulacji mas zastosowano 119 mas skupionych. W obu przypadkach czas przejazdu obciążenia podzielono na 480 kroków czasowych. Dlaczego zdecydowano się właśnie na taką dyskretyzację? Warto uzasadnić wybrany podział przestrzenny przedstawiając rozwiązania problemu przy różnych poziomach dyskretyzacji. To samo dotyczy kroku czasowego.

Stwierdzenie z rozdziału 9 o tym, że proponowane w rozprawie rozwiązanie półanalizy może stanowić alternatywę dla rozwiązań otrzymanych metodą elementów skończonych jest dość wątpliwe. Metoda elementów skończonych zyskała dużą popularność dzięki swojej niezaprzeczalnej uniwersalności. Możemy w prosty sposób wprowadzić zmiany geometryczne badanej konstrukcji. Możliwa jest także zmiana charakteru ruchomego obciążenia, np. uwzględnienie bezwładności ruchomej masy. Rozwiązania półanalizy mają niestety spore ograniczenia.

● Błędy edytorskie:

- Problemy interpunkcyjne w przedstawianiu wzorów. Brak odstępu między wzorem i znakiem interpunkcyjnym na końcu. Błędnie umieszczone znaki interpunkcyjne we wzorach (3.24), (3.27), (3.36), (3.46), (3.57), (3.68), (3.69), (3.80), (4.23), (5.13), (5.14), (6.43), (6.45), (6.46) i innych.
- Zastosowano trzy różne sposoby oznaczania końca wiersza we wzorach wielowierszowych (brak znaku, przecinek lub średnik). Czasami występuje kombinacja kilku znaków w jednym wzorze (7.26), (7.27), (8.7).
- Nadmierne stosowanie dwukropka przed wzorami - str. 17-27, 34-37, 41-48, 58, 59, 61-71, 75, 76, 78-89, 91, 92, 94. Dwukropek stosujemy wtedy, gdy prezentujemy po sobie więcej niż jeden wzór.



- Brak znaku interpunkcji po wzorach (3.7), (3.39), (3.44), (3.45), (3.48)-(3.50), (4.1), (4.8), (6.40), (7.7), (7.12) i innych.
- Błędy składni na stronie 46.
- Niepotrzebnie duże litery w zdaniach na stronach 34, 37, 76.
- Dlaczego przemieszczenia belek na wykresach 3.11-3.14, 4.6, 4.7, 4.9, 4.10 oznaczone zostały literą v? W tekście literą v oznaczona została prędkość ruchomego obciążenia.

Podsumowując, rozprawa została starannie napisana, ze stosunkowo niewielką ilością błędów edytorskich.

● Przegląd literatury

Doktorant skupił się przede wszystkim na pozycjach literatury ściśle związanych z dynamiką konstrukcji poddanych ruchomym obciążeniom. Według opinii recenzenta przegląd literatury, warto uzupełnić o następujące pozycje:

[1] S. Kaliski, Drgania i fale, 1966.

[2] Z. Osiński, Teoria drgań, 1978.

Monografie te nie dotyczą ruchomych obciążeń, ale omawiają podstawy analizy drgań konstrukcji ciągłych. Stanowią one kanon literatury przedmiotu. Większość metod analizy drgań stosowane w niniejszej rozprawie można znaleźć we wspomnianych książkach.

3. Podsumowanie

Rozprawa dotyczy sposobu określania drgań cienkich belek wieloprzęsłowych oraz płyt z punktowymi podporami pośrednimi, poddanych działaniu ruchomych obciążeń nieinercyjnych. Rozpatrywane są obciążenia skupione oraz rozłożone poruszające się ze stałą prędkością. W pracy przedstawiono rozwiązania półanalityczne, wykorzystujące równania całkowite Volterra. Otrzymany analitycznie układ równań całkowitych ostatecznie rozwiązywany jest numerycznie. Prezentowane rozwiązania posiadają ograniczenia związane ze stałą geometrią belek i płyt. W przypadku zmiennego przekroju belki zaproponowano metody numeryczne stosując dyskretyzację przestrzenną analizowanych układów wg procedur metody różnic skończonych oraz granulacji mas. Przedstawiono również analizę drgań losowych na przykładzie stacjonarnego czasoprzestrzennego procesu stochastycznego oraz losowej serii ruchomych sił skupionych. Analizowane w rozprawie układy dynamiczne znajdują zastosowanie w konstrukcjach inżynierskich narażonych na wpływ obciążeń ruchomych. Otrzymane wyniki mogą stanowić bazę do weryfikacji rozwiązań numerycznych.



4. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Filipa Zakęsia prezentuje dobry poziom pod względem merytorycznym. Proponowane przez Autora półanalityczne rozwiązania równań ruchu opisujących drgania belki Eulera i płyty Kirchhoffa z pośrednimi podporami punktowymi pod obciążeniem ruchomym stanowią istotny wkład w rozwój dynamiki układów ciągłych poddanych ruchomym obciążeniom. Przedstawione rozwiązania mogą stanowić podstawę do weryfikacji rozwiązań numerycznych, wykorzystywanych w projektowaniu konstrukcji inżynierskich. W opinii recenzenta przedłożona rozprawa doktorska **spełnia wszystkie wymagania** zawarte w ustawie Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku (Dz. U. z 2003 roku, Nr 65, poz. 595 ze zm., tj. Dz. U. z 2016 poz. 882 i 1311) oraz § 6 ust. 1 i ust. 2 Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 26 września 2016 roku (Dz. U. z 2016 poz. 1586) oraz zgodnie z art. 179 ust. 1 i art. 174 ust. 2 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. „przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z 2018 późn. 1669 z późn. zm.) i art. 178 ust. 1 pkt. 1 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tj. Dz. U. z 2020 poz. 85). **Wnoszę o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.**

08.12.2020

