

dr hab. inż. Jerzy Rojek, profesor IPPT PAN
Zakład Metod Komputerowych
Instytut Podstawowych Problemów Techniki
Polskiej Akademii Nauk
ul. Pawińskiego 5B
02-106 Warszawa
e-mail: jrojek@ippt.gov.pl

Warszawa, 2.03.2012 r.

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Cezarego Graczykowskiego
pt. „Inflatable Structures for Adaptive Impact Absorption”

1. Ogólna charakterystyka pracy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Cezarego Graczykowskiego pt. „Inflatable Structures for Adaptive Impact Absorption” została przygotowana pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Jana Holnickiego-Szulca w Zakładzie Technologii Inteligentnych Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie. Praca, o łącznej objętości 431 stron, składa się z 8 rozdziałów oraz bibliografii obejmującej 324 pozycji. Praca jest napisana w języku angielskim, zawiera krótkie streszczenie w języku polskim.

Przedmiotem pracy są konstrukcje pneumatyczne w zastosowaniu do adaptacyjnego rozpraszania energii uderzeń. Autor rozpatruje bardzo szerokie spektrum konstrukcji pneumatycznych, a mianowicie cylinder pneumatyczny spełniający funkcję amortyzatora (uwaga: polskie tłumaczenie raczej amortyzator a nie absorber), cienkościennie pompowane konstrukcje stalowe, pneumatyczne odbojniki morskie oraz poduszki powietrzne. Wspólnym elementem tych wszystkich konstrukcji jest wykorzystanie czynnika wypełniającego te konstrukcje, sprężonego gazu, do rozpraszania energii uderzenia.

W rozdziale 1 autor przedstawił uzasadnienie podjęcia tematyki badawczej, przedstawił koncepcję adaptacyjnej absorpcji uderzenia oraz scharakteryzował konstrukcje pneumatyczne i pompowane oraz ich zastosowania, w tym wykorzystanie konstrukcji pneumatycznych do amortyzacji uderzeń. Na podstawie literatury dokonał przeglądu stanu wiedzy w zakresie podjętej tematyki badawczej, a następnie przedstawił cele i plan swojej rozprawy. Jako główny cel swojej pracy autor określił opracowanie i weryfikację koncepcji adaptacyjnych konstrukcji pneumatycznych. Autor definiuje te konstrukcje jako sztywne lub odkształcalne konstrukcje składające się z uszczelnionych komór powietrznych wyposażonych w sterowalne inflatory oraz szybkie zawory upustowe umożliwiające przepływ gazu pomiędzy komorami oraz na zewnątrz konstrukcji. Sterowanie ciśnieniem gazu ma zapewnić optymalne dostosowanie charakterystyki dynamicznej, i w efekcie optymalną dysypację energii uderzenia. Cel pracy ma być osiągnięty poprzez realizację 3 zadań szczegółowych:

1. sformułowanie i implementację modeli matematycznych adaptacyjnych konstrukcji pneumatycznych (pompowanych)
2. opracowanie algorytmów sterowania ciśnieniem w celu uzyskania optymalnej amortyzacji uderzenia
3. opracowanie koncepcji wdrożenia adaptacyjnych konstrukcji pneumatycznych oraz numeryczna symulacja ich efektywności.

W rozdziale 2 autor przedstawił modele teoretyczne. Ogólny model matematyczny oparty jest na sprzężeniu równań opisujących zagadnienie brzegowo-początkowe ciała odkształcalnego z równaniami Naviera-Stokesa opisujących przepływ gazu. Autor przedstawił ogólne sformułowanie równań opisujących zagadnienie sprzężone dynamiki konstrukcji pneumatycznej oddziałującej ze sprężonym gazem. W modelu uwzględniono sterowalny zawór umożliwiający kontrolowanie przepływu gazu podczas uderzenia. Autor zaproponował również modele uproszczone oparte na założeniu jednorodności parametrów gazu w komorach oraz analitycznym opisie przepływu przez zawór.

Model uproszczony oparty na równaniach różniczkowych zwyczajnych jest wykorzystany w rozdziale 3 do analizy cylindrów pneumatycznych wykorzystanych jako adaptacyjne amortyzatory. Za pomocą modelu uproszczonego zbadano charakterystykę odpowiedzi dynamicznej oraz proces dysypacji energii trzech typów amortyzatorów (z wypływem gazu do otoczenia, z wypływem gazu do akumulatora oraz z zaworem między komorami amortyzatora). Zaproponowane strategie sterowania, uwzględniające różne zasady działania i ograniczenia zaworu, mają na celu optymalną ochronę uderzającego i uderzanego obiektu. Przedstawiona jest metodologia optymalnego projektowania adaptacyjnych absorberów pneumatycznych oraz podstawowa weryfikacja eksperymentalna. Jako zastosowanie praktyczne rozpatrywano podwozie samolotu z adaptacyjnym amortyzatorem pneumatycznym. Weryfikację eksperymentalną przeprowadzono na własnym stanowisku laboratoryjnym.

Bardziej złożony model oparty na rozwiązaniu numerycznym równań dynamiki płynów wykorzystany jest w rozdziale 4 do symulacji odpowiedzi różnych typów amortyzatorów.

W rozdziale 5 autor rozpatruje adaptacyjne konstrukcje pneumatyczne w postaci cienkościennych pompowanych konstrukcji metalowych. Wpływ ciśnienia wewnętrznego na utratę stateczności cienkościennej konstrukcji metalowej jest badany doświadczalnie i numerycznie na przykładzie puszek zawierającej sprężony gaz obciążonej ściskającą siłą osiową oraz momentem. Autor przedstawił możliwość wykorzystania koncepcji adaptacyjnej amortyzacji uderzenia za pomocą sprężonego powietrza w konstrukcji drzwi samochodu osobowego oraz drogowej bariery ochronnej. Efektywność proponowanych rozwiązań konstrukcyjnych została zbadana numerycznie.

W rozdziale 6 rozpatrywane są pneumatyczne konstrukcje tekstylne, odbojnik morski oraz poduszka powietrzna, jako konstrukcje do adaptacyjnej absorpcji uderzenia. Odbojnik morski w kształcie torusa, otaczający wieżę morskiej elektrowni wiatrowej, ma za zadanie optymalnie łagodzić odpowiedź dynamiczną wieży i statku podczas dokowania, natomiast system adaptacyjnych poduszek powietrznych wyposażonych w sterowalne zawory może być wykorzystany jako system awaryjnego lądowania śmigłowców lub innych obiektów latających.

W rozdziale 7 modele wykorzystujące pełne sprzężenie równań mechaniki konstrukcji i mechaniki płynów są użyte do symulacji i analizy sterowalności zaworów do konstrukcji pneumatycznych. Zaproponowane są trzy metody modelowania oraz strategia sterowania zaworu piezoelektrycznego. Przy wykorzystaniu dwóch metod numerycznych wykonane zostały symulacje działania samoczynnie zamykającego się zaworu membranowego. Zostały zrealizowane strategie sterowania otwarciem zaworu wykorzystujące różne sprzężenia zwrotne.

Rozdział 8 stanowi podsumowanie całej pracy. Autor zawarł w nim wnioski końcowe z przeprowadzonych badań oraz zestawiał szczegółowo oryginalne elementy pracy

2. Ocena pracy

Autor postawił sobie bardzo ambitne zadanie stworzenia kompletnej i spójnej teorii adaptacyjnych konstrukcji pneumatycznych, obejmującej bardzo szeroką klasę konstrukcji od cylindrów pneumatycznych, poprzez cienkościenne konstrukcje metalowe do konstrukcji tekstylnych. Koncepcja adaptacyjnego rozpraszania energii uderzenia za pomocą konstrukcji pneumatycznych i przedstawione rozwiązania konstrukcyjnych są oryginalnymi propozycjami autora. Tematyka rozprawy jest ważna pod względem zastosowań w technice i nowatorska na tle aktualnego stanu wiedzy naukowej i inżynierskiej. Trafnie została wybrana jako przedmiot pracy doktorskiej.

Rozpatrywane zagadnienie stanowi trudny problem sprzężony, w ogólnym przypadku wymagający stosowania zaawansowanego opisu konstrukcji oddziałującej z przepływem gazu. Do tego dochodzi konieczność zastosowania metod optymalizacji w celu określenia optymalnego sterowania ciśnieniem gazu.

Autor sformułował bardzo ogólny model matematyczny wychodząc od podstawowych praw zachowania. Następnie wprowadzał założenia upraszczające pokazując sposób dojścia do modeli uproszczonych. Autor wykazał się przy tym bardzo dobrą znajomością teorii mechaniki ciała stałego i mechaniki płynów. Podstawowe równania zostały przedstawione bardzo obszernie, może nawet zbyt obszernie. Formułując model ogólny, autor wielokrotnie przedstawiał dobrze znane równania i wyprowadzenia, które dla przejrzystości sformułowania można by pominąć. Wyprowadzenie niektórych równań można by przedstawić w aneksie.

Rozwiązania poszczególnych modeli zostały uzyskane za pomocą własnych programów, jak również za pomocą komercyjnych programów numerycznych ewentualnie z dodatkiem własnych procedur. Dostrzegalna jest pewna luka między podstawowymi równaniami modelu matematycznego a równaniami dyskretnymi MES dla konstrukcji oraz równaniami dyskretnymi dla zagadnienia mechaniki płynów. Nie pokazano przejścia od podstawowych równań opisujących problem do równań stosowanych w zastosowanej metodzie numerycznej np. w metodzie elementów skończonych. Powoduje to niejasność odnośnie zastosowanych dyskretyzacji, opisu nieliniowości, metod rozwiązania, stosowanych elementów skończonych, modeli materiału, itp. Nie wiadomo jak zostało zrealizowane sprzężenie między rozwiązaniem zagadnienia dynamiki konstrukcji oraz mechaniki płynów przy zastosowaniu różnych programów komercyjnych stosowanych do rozwiązania tych dwóch problemów. Rozumiem jednak, że dodanie dodatkowych informacji zwiększyłyby i tak dużą objętość pracy.

Należy jednak stwierdzić, że autor rozwiązał poszczególne przypadki stosując odpowiednie modele i algorytmy rozwiązania. Przeanalizował wiele konkretnych przypadków. Autor wykazał się umiejętnością tworzenia zaawansowanych modeli numerycznych złożonych zagadnień mechaniki, ich rozwiązywania za pomocą różnorodnych kodów numerycznych, jak również za pomocą własnych programów. Na podkreślenie zasługuje fakt, że w części rozpatrywanych przypadków badania numeryczne zostały połączone z własnymi badaniami eksperymentalnymi, co pozwoliło zweryfikować i uwiarygodnić stosowane modele.

Praca zawiera wiele oryginalnych wyników, które stanowią ważny wkład autora w dziedzinie mechaniki. Za najważniejsze osiągnięcia autora uważam:

- 1) sformułowanie i implementacje modeli adaptacyjnych konstrukcji pneumatycznych
- 2) opracowanie metod optymalnego sterowania ciśnieniem dla rozpatrywanych konstrukcji
- 3) zaproponowanie nowych koncepcji adaptacyjnych konstrukcji pneumatycznych

- 4) uzyskane wyniki numeryczne w przeprowadzonych symulacjach adaptacyjnych konstrukcji pneumatycznych

Wobec powyższego stwierdzam, że postawione cele badawcze zostały zrealizowane przez doktoranta.

Praca jest napisana bardzo starannie i poprawnie pod względem językowym. Cytowana literatura jest obszerna i pokazuje dobrą orientację autora w dotychczasowych osiągnięciach i aktualnie prowadzonych badaniach w zakresie tematyki rozprawy.

2. Uwagi dyskusyjne

1. Tytuł angielski, w którym autor używa terminu „inflatable structures”, niezbyt dokładnie oddaje zawartość pracy, gdyż termin ten dotyczy raczej konstrukcji pneumatycznych, których stabilność jest zapewniona przez ciśnienie wewnętrzne, trudno objąć tym określeniem np. cylindry pneumatyczne. Rozumiem, że trudno znaleźć termin obejmujący wszystkie rozpatrywane konstrukcje. Autor w samej pracy rozróżnia „pneumatic structures” i „inflatable structures”
2. Jakie są założenia dotyczące oddziaływania konstrukcji i płynu w modelu opisanym równaniami (2.108)-(2.113)? Czy sprzężenie jest dwukierunkowe?
3. Tarcie w cylindrze pneumatycznym (str. 74-75). Z jakiego rodzaju tarcie mamy do czynienia? Czy to jest tarcie hydrodynamiczne? Wydaje się, że określenie stosowanego modelu tarcia modelem Coulomba nie jest właściwe – nie ma tu siły normalnej, nie ma współczynnika tarcia. Drugi wzór w równaniu (3.1.6) – nie jest jasne co oznacza ^Φ (bez indeksu).
4. Niejasne jest dla mnie, dlaczego autor dla rozwiązania zagadnienia z 1 stopniem swobody w rozdziale 3 zastosował program metody elementów skończonych (Abaqus explicit), zaznaczając przy tym, że nie był wykorzystywany algorytm MES. Wydaje się, że takie zagadnienia powinno się rozwiązywać w inny sposób.
5. Czy model dwuwymiarowy na rys. 4.5 jest osiowosymetryczny? Przypuszczam, że tak. Z kolei modele na rys. 4.10, 4.17 nie są osiowosymetryczne? Czy model płaski jest wystarczający do modelowania przepływów w konstrukcjach takich jak na rys. 4.17?
6. Strona 248, równanie (5.1.9). Według podanej informacji, równanie to odnosi się do algorytmu wykorzystującego jawne całkowanie równań ruchu względem czasu. W standardowym sformułowaniu z całkowaniem jawnym nie występuje macierz sztywności, którą zawiera wyrażenie w równaniu (5.1.9). Jaki jest schemat rozwiązania (schemat całkowania względem czasu) równań (5.1.9)? Jeśli występuje macierz sztywności – jak ona jest wyznaczana w przypadku zastosowanego sformułowania nieliniowego?
7. Jaki był cel analizy drgań własnych w rozdziale 5? Analiza ta raczej nie była potrzebna do osiągnięcia głównego celu badań – określenia zachowania się konstrukcji poddanej obciążeniu uderzeniowemu.
8. W jaki sposób był modelowany materiał tekstylny, ortotropowy, niezdolny do przeniesienia naprężeń ściskających? Czy w analizowanych przypadkach konstrukcji tekstylnych występują naprężenia ściskające? Jakie elementy skończone były zastosowane: membrana (bez sztywności zgięciowej) czy element powłokowy?
9. Str. 296 – czy model 2D konstrukcji o kształcie torusa (rys. 6.1.5) jest wystarczająco dokładny?

4. Uwagi szczegółowe

Praca zawiera bardzo mało usterek, poniżej kilka zauważonych błędów.

Str. 26. drugi wzór 2.2.13, powinno być \bar{u}

Str. 35. Niezbyt fortunnie użyto symbolu μ na oznaczenie dwóch różnych wielkości: jednego z parametrów Lamé i lepkości.

Str. 257 – stosowane są jednostki spoza układu SI (atm)

Str. 13 Tensaitity beam ? aeriels vehicles

Str. 14 Preliminary test were made (błąd gramatyczny)

W streszczeniu polskim błędna jest numeracja rozdziałów pracy

5. Podsumowanie

Mgr Cezary Graczykowski jest autorem rozprawy doktorskiej wnoszącej wkład w rozwój dyscypliny naukowej mechanika wyrażający się rozwojem nowych koncepcji konstrukcji do dysypacji uderzeń, stworzeniem modeli teoretycznych oraz wynikami badań numerycznych i eksperymentalnych. Przedstawione uwagi do pracy mają głównie charakter dyskusyjny, nie podważają wysoce pozytywnej oceny uzyskanych wyników.

Mgr Cezary Graczykowski wykonał ogromną pracę, wykazał się wszechstronną wiedzą w dziedzinie mechaniki konstrukcji, mechaniki ciała stałego oraz mechaniki płynów. Jego praca jest na bardzo wysokim poziomie teoretycznym, posiada duży walor praktyczny

Mając na względzie oryginalne i wartościowe wyniki, uzyskane w pracy i wymienione w recenzji powyżej, uważam, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym – zawiera ona oryginalne rozwiązanie problemu naukowego z dyscypliny naukowej: mechanika, wykazuje wiedzę autora w dziedzinie mechaniki oraz pokazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia przez niego pracy naukowej. Wobec tego wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej p. mgr. inż. Cezarego Graczykowskiego i dopuszczenie jej do publicznej obrony.


dr hab. inż. Jerzy Rojek, prof. IPPT PAN