

Dr hab. inż. Janusz Piechna  
prof. nzw. Politechniki Warszawskiej

## Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Cezarego Graczykowskiego pt. "Inflatable Structures for Adaptive Impact Absorption"

### 1. Zawartość rozprawy

Praca liczy 429 stron. Zasadnicza część pracy zawarta jest w 6-ciu rozdziałach. Część ta poprzedzona jest wstępem i zakończona podsumowaniem. Spis literatury zawiera 324 pozycje, w tym 17 publikacji lub patentów, których Doktorant jest współautorem.

We wstępie Doktorant określił cel swoich działań. Sformułował tezę pracy i przedstawił aktualny stan wiedzy dotyczącej adaptacyjnych konstrukcji pochłaniających energię zderzenia.

Treść zawarta w rozdziale 2 stanowi podstawy teoretyczne dla dalszych działań Doktoranta. Przedstawia ogólne równania w różnych układach odniesienia, proponuje ich uproszczenia i podaje strategie sterowania.

W rozdziale 3 Doktorant przedstawia rozważania dotyczące pracy tłumików pneumatycznych. Przedstawia modele i rozważania własności rozpraszających poszczególnych realizacji technicznych. Wykorzystuje tu założenie o równomiernym rozkładzie ciśnienia w komorze tłumika. Stara się określić czułość odpowiedzi układu na wpływ szeregu parametrów: charakterystyki zaworu upustowego, początkowego ciśnienia w cylindrze, tarcia tłoka, masy tłoka, własności kontaktowych materiału.

Przedstawia strategie sterowania prowadzące do optymalizacji pochłaniania energii zderzenia w oparciu o różne kryteria.

W rozdziale 4 tym przedstawione zostały przykłady numerycznych symulacji pracy tłumika przy założeniu nierównomiernego rozkładu ciśnienia w jego komorze.

Rozdział 5-ty poświęcony jest analizie własności rozpraszających wypełnionych sprężonym gazem struktur cienkościennych.

W rozdziale 6-tym analizowane są poduszki powietrzne z układem adaptacyjnym. Zawiera on analizy pneumatycznych odbojników, poduszek systemu awaryjnego lądowania wraz z przedstawieniem i analizą systemów sterowania.

W rozdziale 7-mym przedstawione zostały modele zaworów typu piezoelektrycznego i membranowego.

Pracę kończą rozdziały zawierające podsumowanie i wnioski z przeprowadzonych badań, podsumowanie oryginalnych osiągnięć w pracy, omówienie kolejnych wyzwań w dziedzinie adaptacyjnych struktur wypełnionych sprężonym gazem.

### 2. Zasadność podjęcia tematu

Jako cel pracy Doktorant określa podjęcie badań i opracowanie alternatywnych do dotychczas stosowanych pasywnych systemów, systemów adaptacyjnych rozpraszających energię uderzeń występujących w wielu dziedzinach współczesnych działań inżynierskich.

Tezą pracy jest stwierdzenie, iż poprzez wykorzystanie koncepcji Adaptacyjnego Pochłaniania Energii Zderzeń możliwe jest znaczące złagodzenie występujących w czasie zderzenia opóźnień oraz obciążeń konstrukcji w stosunku do występujących w powszechnie stosowanych systemach pasywnych.

Tak określony cel pracy jest bardzo szeroki i ambitny. Doktorant zakreśla jednak obszar swoich działań ograniczając go do sztywnych komór z ruchomą ścianą (tłokiem), poduszek gazowych, cienkościennych struktur wypełnionych sprężonym gazem, sterowanych zaworów i strategii ich sterowania.

Należy uznać podjęcie takiego tematu badań za w pełni uzasadnione, a nakreślony cel pracy i hipotezę za sformułowane poprawnie.

### 3. Ocena sposobu i stopnia rozwiązania problemu.

Doktorant do rozwiązania postawionego problemu wybrał analizy teoretyczne i modelowanie numeryczne. Swoje działania zawarł w trzech grupach aktywności:

Sformułowanie matematyczne modelu Adaptacyjnej Konstrukcji Pneumatycznej (AKP) i jego numeryczną implementację.

Opracowanie algorytmu sterowania mającego na celu złagodzenie skutków zderzenia.

Opracowanie koncepcji konstrukcji inżynierskiej realizującej model AKP i algorytm sterowania oraz numeryczną symulację jej efektywności.

Konsekwencje takiego podziału widoczne są dalej w pracy.

Przyjęty przez autora sposób rozwiązania problemu wymagał bardzo szerokiej wiedzy i ogromu pracy. Przedstawiony materiał wystarczyłby na kilka prac doktorskich. Oprócz prostych modeli, których równania Doktorant całkował bezpośrednio wykorzystując oprogramowanie do tworzenia własnych kodów, zostały przedstawione rozwiązania numeryczne bardzo skomplikowanych problemów mechaniczno-przepływowych. Uważam, iż przedstawione rozwiązania deformacji wypełnionych sprężonym gazem konstrukcji cienkościennych, poduszek powietrznych w postaci odbojników lub systemów awaryjnego lądowania, zaworów membranowych stanowią znaczące osiągnięcie w symulacji procesów mechaniczno-przepływowych. Uważam też, iż opracowanie i realizacja algorytmów sterowania z wykorzystaniem komercyjnych solverów dla ciała stałego i cieczy jest osiągnięciem znacznym i przykładem dużej wiedzy Doktoranta w dziedzinie numerycznej symulacji i umiejętności praktycznego wykorzystania różnorodnego oprogramowania.

Analiza procesów występujących w omawianych konstrukcjach wymagała od Autora posiadania ogromnej wiedzy w obszarze mechaniki ciała stałego, mechaniki płynów, matematyki i umiejętności powiązania tej wiedzy. Wydaje się że Autor sprostał tym wymaganiom tworząc multi dyscyplinarne modele zjawisk fizycznych występujących w strukturach absorbujących i rozpraszających energię zderzeń i przedstawiając ich numeryczne rozwiązania oraz analizy.

### 4. Uwagi krytyczne

Praca jest bardzo obszerna. Praca bardziej przypomina pracę habilitacyjną niż rozprawę doktorską. Omawia wiele zjawisk fizycznych wraz z ich współdziałaniem. Tematyka poruszana w pracy jest bardzo interesująca i trudna zarówno do analizy jak i praktycznej realizacji. Rysunek 1.6 jest dobitną ilustracją zmian w złożoności stosowanych modeli i systemów sterowania w kolejnych analizowanych konstrukcjach.

Miejscami, czytanie pracy jest dla czytelnika niezwykle męczące. Pod koniec niektórych rozdziałów czytelnik nie pamięta już co było na jego początku.

Zwykle analizując jakiś proces najpierw identyfikujemy zjawiska fizyczne tam występujące, a następnie staramy się je opisać równaniami. Doktorant podchodzi do rozwiązania problemu niekonwencjonalnie zaczynając od napisania równań, a następnie mówi o fizyce, traktując ją niezwykle swobodnie.

W pracy występują wyraźnie zróżnicowane poziomy ogólności zapisu matematycznego.

W rozdziale 2-gim Doktorant przedstawia na bardzo wysokim poziomie abstrakcji równania opisujące dynamikę Adaptacyjnej Konstrukcji Pneumatycznej. Równania są tak ogólne, iż mogą ukrywać bardzo różne realizacje ich rozwiązań. Na przykład równania Naviera-Stokesa 2.2.99-2.2.101 nigdy nie są praktycznie wykorzystywane w takiej postaci. By móc je scałkować numerycznie na jakiegokolwiek siatce dyskretyzującej obszar obliczeniowy muszą one zostać poddane operacji uśredniania czasowego lub przestrzennego, muszą być ustalone jakieś modele turbulencji dla domknięcia układu równań. W rozdziale 4.1 (str. 205) i 7.2 (str. 391) autor przedstawia piękny formalnie opis ruchu płynu, który z praktycznych powodów jest całkowicie bezużyteczny. O ile model taki w rozdziałach teoretycznych ma swoje uzasadnienie, to tam gdzie mowa jest o konkretnych rozwiązaniach numerycznych wydaje się być nie na miejscu.

Przy założeniach jakie Doktorant przyjmuje wyniki symulacji i wnioski z nich wynikające są poprawne. Natomiast czasem przyjęte założenia mogą budzić wątpliwości.

Doktorant z upodobaniem przyjmuje model izotermiczny przemiany termodynamicznej zachodzącej w komorach. Przy pokazywanych czasach procesu rzędu 0.3 -0.4 sekundy, takie założenie jest nieuzasadnione. Jednym z przykładów jest symulacja pokazana na str. 208.

Proponowane w rozdziale 2.2 możliwe uproszczenia modeli (strona 50) także częściowo budzą wątpliwości.

Przyjęcie modelu płynu nieściśliwego tylko w okolicy zaworów jest nieuzasadnione. Zawory powodują największe zmiany ciśnienia i tam prędkości przepływu, gęstości itd najsilniej zależą od przyjętego modelu.

Uproszczenie do równań akustycznych jest wątpliwe w sytuacji gdy podstawowym celem symulacji jest uzyskanie wartości sił pochodzących od reakcji płynu.

Proponowany model hybrydowy generalnie jest poprawny, lecz nie zawiera żadnych informacji o położeniu miejsca podziału pomiędzy składowymi modelami.

Brak dowodu na przyjęcie modelu równomiernego rozkładu ciśnienia dla prędkości zderzenia mniejszych od 10 m/s (str. 72).). Taki wniosek można przyjąć na podstawie pokazanych dalej wyników obliczeń, ale nie powinien on być wstępnym założeniem.

W rozdziale 4.4 Doktorant wykorzystując tylko równanie ciągłości i pędu, a pomijając równanie energii, próbuje sprężyć nieściśliwy płyn, co samo w sobie jest zadaniem karkołomnym. Po długich wywodach, z oczywistych powodów, nie przedstawia żadnego przykładu numerycznego, twierdząc jedynie, iż wykorzystując odpowiedni solver da się to zagadnienie rozwiązać. Nie da się.

Autor do swoich działań podchodzi bardzo formalnie zwracając uwagę na aspekty matematyczne, zaniehbując aspekty fizyczne. Regulacja prędkości gazu wylatującego z cylindra (str. 213) z matematycznego punktu widzenia jest to rozwiązanie proste i eleganckie, natomiast praktycznie nie realizowalne.

Autor analizując siły pochodzące od przepływu działające na płytkę zaworu (str. 381) umieszczoną wewnątrz i na zewnątrz obszaru z którego odbywa się przepływ nie rozważa struktury przepływu, możliwych rozkładów ciśnienia i jego konsekwencji, koncentrując się na aspektach formalnych, co może prowadzić do niepoprawnych wniosków.

Przykład ilustrujący pracę zaworu (str. 376) nie jest szczęśliwie dobrany, gdyż zmiany wydatku w czasie bardziej zależą od wymiarów komory za zaworem niż od przepływu przez zawór.

Autor tak przesadnie skrupulatny w zapisie formalnych równań i warunków brzegowych zupełnie nie przejmując się istotnymi szczegółami modeli płynu i przepływu w rozwiązaniach numerycznych. W pracy nie znalazłem żadnych informacji o modelach turbulencji i początkowych parametrach turbulencji w żadnym z przedstawianych rozwiązań numerycznych. Nie pamięta on także o warunkach początkowych niezbędnych do uzyskania rozwiązania numerycznego. Co jest szczególnie istotne w przypadku analizy pracy zaworów membranowych (str. 396).

Gęstość siatek dyskretyzujących obszary przepływu w szczelinach zaworów w których z założenia występują duże prędkości jest zbyt mała by uzyskać w miarę dokładne rozwiązanie (Rys. 4.9, 4.15, 4.17).

Praca zawiera eksperymentalną weryfikację jednego z przypadków. Numeryczny model zawiera co najmniej dwa parametry które powinny być zidentyfikowane. Wartość siły tarcia tłoka o ścianki cylindra i współczynnik przepływu przez zawór są istotnymi parametrami wykorzystywanymi w obliczeniach numerycznych opartych o omawiany wcześniej model. W pracy występuje kilkadziesiąt wzorów opisujących zależność współczynnika przepływu od wielu parametrów. W momencie weryfikacji nie ma żadnej informacji na temat wartości tego współczynnika użytej w obliczeniach. Jest informacja, iż w większości przypadków uzyskano dobrą zgodność. Siła tarcia pomiędzy tłokiem a cylindrem jest skrupulatnie wypisywana we wszystkich wzorach. Ale jej wielkość, charakter zależności od ciśnienia, prędkości ruchu nie jest analizowany. W przypadku weryfikacji eksperymentalnej modelu jest okazja by chociaż oszacować proporcje pomiędzy siłami tarcia a innymi siłami występującymi w procesie.

Nie jest jasne, dlaczego analizowany przypadek nazywany jest pół-aktywnym, skoro otwarcie zaworu jest stałe. To typowy układ pasywny.

Wykonano eksperymenty z systemem adaptacyjnym, ale innym od omawianego wcześniej teoretycznie. Nie pokazano zależności otwarcia zaworu od czasu pomimo iż dane takie były dostępne i wcześniej eksponowane w rozważaniach teoretycznych.

Wydaje się, iż w pracy brak jest działań prowadzących do syntezy omawianych problemów. Autor koncentruje się na tworzeniu coraz to nowych przypadków różniących się drobnymi szczegółami. Zamiast szukania elementów wspólnych i ukazywania różnic autor koncentruje się na wielokrotnym pokazywaniu tych samych elementów w nowych konfiguracjach.

W tak ogromnej pracy zawsze można znaleźć elementy kontrowersyjne. Pracę jako całość oceniam bardzo wysoko, uważam że przedstawione wyżej uwagi krytyczne nie umniejszają jej oceny. Są tylko sugestią dla Doktoranta by zwracał baczniejszą uwagę na fizyczne aspekty swoich działań i nie polegał tylko na formalnych opisach matematycznych.

## 5. Wartość i znaczenie rozprawy

Doktorant podjął się rozwiązania bardzo złożonego multi-dyscyplinarnego zagadnienia. Główną wartością pracy jest pokazanie możliwości sprzęgania różnorodnych programów dla realizacji symulacji numerycznych kontrolowanego rozpraszania energii zderzenia w bardzo złożonych geometrycznie konstrukcjach zawierających elementy mechaniczne i przepływowe.

Doktorant podaje 17 szczegółowych osiągnięć które występują w trzech grupach.  
Osiągnięcia w obszarze modelowania Adaptacyjnej Konstrukcji Pneumatycznej (AKP).  
Osiągnięcia związane rozwojem strategii sterowania AKP.  
Osiągnięcia związane z rozwojem koncepcji konstrukcji inżynierskich wykorzystujących opracowane modele i numerycznego modelowania ich efektywności.  
Ja pozwolę sobie nieco je uogólnić.  
Do osiągnięć zaliczyłbym opracowanie numerycznych modeli szeregu różnorodnych konstrukcji pochłaniających energię zderzenia.  
Opracowanie strategii i sposobów sterowania dla uzyskania optymalnych warunków rozpraszania energii zderzenia. Doktorant zaproponował kilka strategii sterowania badanymi urządzeniami sposobów sterowania.  
Wykonanie szeregu analiz numerycznych zachowania się adaptacyjnych konstrukcji pneumatycznych rozpraszających energię zderzenia. Doktorant przedstawił kilka rozwiązań numerycznych o różnym stopniu złożoności. Od prostych jednowymiarowych cylindrów pneumatycznych do bardzo złożonych, z występującym bardzo silnym sprzężeniem mechaniczno-przepływowym w przypadku zaworów membranowych. Przedstawione przykłady stanowią reprezentatywny przekrój problemów związanych z aktywnym sterowaniem strukturami pneumatycznymi.  
Numeryczna symulacja pracy trzech typów cylindrów pneumatycznych z systemem adaptacyjnym wykorzystującym strategię sterowania opartej na zasadzie optymalnego przejęcia uderzenia.  
Opracowanie koncepcji wielokomorowego odbojnika wieży wiatrowej turbiny morskiej, koncepcji wielokomorowej cienkościennej konstrukcji bariery ochronnej, poduszek powietrznych awaryjnego lądowania.  
Opracowanie szacowania osiągnięć zaworu membranowego.  
Przedstawiony przykład eksperymentalnej weryfikacji modelu numerycznego znacznie podnosi wartość pracy.  
Pomimo iż przedstawione metody i wnioski oparto na specyficznych przykładach są one na tyle ogólne, iż mogą być wykorzystane w każdych konstrukcjach tego typu.  
Praca otwiera nowe możliwości efektywnego projektowania pneumatycznych systemów rozpraszających energię zderzeń.

## 6. Uwagi redakcyjne

Praca jest za długa. Niektóre fragmenty pracy można byłoby zamieścić w postaci załącznika.  
Występują nieliczne błędy w równaniach. (Błędy w równaniach 2.3.29, 3.1.6, 3.1.1.15d).  
Brak oznaczeń zmiennych  $A$ ,  $l$  w równaniu (7.1.9),  $T$  w r-niu 7.1.11,  $d$  w r-niu 7.1.14a).  
Materiał ilustracyjny jest poprawny i komunikatywny. Wyjątek - opis rys. 5.1.16. Rys. 7.1.8 niezgodny z założeniami.  
W pracy występuje wiele wątków pobocznych nie mających bezpośredniego związku z głównym celem pracy. Wątek egzergii nie był nigdzie dalej wykorzystywany.  
Wnioski i konkluzje są w pracy bardzo rozproszone.

## 7. Ocena doktoranta

Tematyka podjęta przez Doktoranta jest bardzo szeroka i do tego multi-dyscyplinarna.  
Zagadnienia przedstawione w pracy są w wielu przypadkach bardzo złożone i wymagają do analizy niezwykle szerokiej wiedzy dotyczącej fizyki, termodynamiki, mechaniki, mechaniki płynów, matematyki, teorii sterowania, metod numerycznych i umiejętności wykorzystania zarówno programów do analizy przepływów, programów do analizy stanu ciała stałego jak i

oprogramowania pozwalającego na pisanie własnych kodów. Przedstawiona praca świadczy, iż Doktorant taką wiedzę i umiejętności posiada.

## 8. Konkluzja

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Cezarego Graczykowskiego pt. "Inflatable Structures for Adaptive Impact Absorption" stanowi oryginalne i samodzielne rozwiązanie bardzo złożonego problemu naukowego oraz świadczy o niezwykle szerokim zakresie wiedzy Doktoranta w tym zakresie. Tym samym spełnia ona wymagania jakie formułuje w stosunku do prac doktorskich Ustawa z dnia 14.03.2003r. "O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki" (Dz.U. 65/2003 z późn. zm.)

Stawiam wniosek o dopuszczenie pracy do publicznej obrony celem nadania jej Autorowi - mgr inż. Cezaremu Graczykowskiemu - stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie Mechanika

Stawiam też wniosek o wyróżnienie pracy. Uzasadniam ten wniosek ponad przeciętnym zakresem badań jakie przeprowadził Doktorant i złożonością rozwiązywanego zagadnienia. Pewne jej fragmenty mogłyby stanowić oddzielne prace doktorskie.



dr hab. inż. Janusz Piechna  
prof. nzw. Politechniki Warszawskiej