

dr hab. inż. Igor Maciejewski  
Katedra Mechatroniki i Automatyki  
Wydział Mechaniczny  
Politechnika Koszalińska

Koszalin, 25 listopada 2019

**Recenzja pracy doktorskiej  
mgr. inż. Ramiego Faraja pt.**

**„Development of self-adaptive systems  
for mitigation of response under dynamic excitation”**

wykonana na zlecenie Dyrektora Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN

Promotor: prof. dr hab. inż. Jan Holnicki-Szulc

**Tematyka pracy**

Rozprawa doktorska mgr. inż. Ramiego Faraja poświęcona jest zagadnieniom adaptacyjnej absorpcji energii uderzeń, a jej celem jest opracowanie samo-adaptacyjnych absorberów do rozpraszania energii kinetycznej zatrzymywanego obiektu. W ramach niniejszej rozprawy podjęto problematykę łagodzenia odpowiedzi dynamicznej układu pod działaniem obciążenia mechanicznego, spowodowanego uderzeniami.

Tematyka opiniowanej pracy jest aktualna, ważna ze względów praktycznych i interesująca ze względów naukowych. Stosowane od wielu lat pasywne oraz obecnie rozwijane półaktywne absorbery energii uderzenia pełnią ważną rolę w wielu konstrukcjach inżynierskich podlegających udarowi mechanicznemu. Współczesny postęp technologiczny w obszarze układów pomiarowych i sterujących sprzyja rozwojowi absorberów adaptacyjnych, a projektowane układy wykazują coraz większą skuteczność działania przy różnych warunkach wymuszenia dynamicznego.

## Zakres pracy

Rozprawa doktorska mgr. inż. Ramiego Faraja obejmuje jednotematyczny cykl pięciu artykułów naukowych, które opublikowano w uznanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym:

- [1] Faraj R., Graczykowski C., Holnicki-Szulc J., *Adaptable pneumatic shock-absorber*, Journal of Vibration and Control, Vol. 25, No. 3, pp. 711-721, 2019 (IF 2017: 2,197);
- [2] Faraj R., Jankowski Ł., Graczykowski C., Holnicki-Szulc J., *Can the inerter be a successful shock-absorber? The case of a ball-screw inerter with a variable thread lead*, Journal of The Franklin Institute, pp. 1-18, 2019 (IF 2017: 3,576);
- [3] Faraj R., Holnicki-Szulc J., Knap L., Seńko J., *Adaptive inertial shock-absorber*, Smart Materials and Structures, Vol. 25, pp. 1-9, 2016 (IF 2016: 2,909);
- [4] Graczykowski C., Faraj R., *Development of control systems for fluid-based adaptive impact absorbers*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 122, No. 2019, pp. 622-641, 2019 (IF 2017: 4,370);
- [5] Faraj R., Graczykowski C., *Hybrid Prediction Control for self-adaptive fluid-based shock-absorbers*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 449, pp. 427-446, 2019 (IF 2017: 2,618).

W pierwszych dwóch artykułach [1-2] przedstawiono autorskie propozycje adaptowalnych absorberów energii uderzenia, które dzięki zastosowaniu techniki jednokrotnej rekonfiguracji układu zapewniają przystosowanie się absorbera do zróżnicowanych warunków wymuszenia. Innowacyjna technika adaptacji zakłada dostosowanie właściwości tłumiących układu bezpośrednio przed pojawieniem się wymuszenia lub w początkowej fazie procesu absorpcji energii uderzenia, a dalsze jego działanie odbywa się w sposób całkowicie pasywny.

W pracy [1] zaprezentowano nowatorski absorber pneumatyczny o adaptowalnej charakterystyce odpowiedzi dynamicznej, który umożliwia łagodzenie skutków uderzeń mechanicznych poprzez sprężanie powietrza (absorpcja energii uderzenia) i następnie jego upust (dyssypacja zakumulowanej energii). Optymalny kształt otworów spustowych zapewnia utrzymanie stałej wartości siły reakcji w zakresie całego skoku absorbera, a jej adaptację do zmiennych warunków wymuszenia uzyskano poprzez wprowadzenie specyficznego systemu przesłon, dławiącego przepływ powietrza z układu pneumatycznego do atmosfery.

W następnej pracy [2] przedstawiono autorskie rozwiązanie absorbera śrubowego, który składa się ze śruby kulowej o malejącym skoku gwintu oraz ułożyskowanej w obudowie nakrętki kulowej. W przypadku takiego rozwiązania technicznego siła reakcji absorbera wynika przede wszystkim z efektów bezwładnościowych, co

klasyfikuje zaproponowany układ do grupy tzw. „inerterów”. W odróżnieniu od znanych literaturowo absorberów, alternatywne urządzenie zapewnia uzyskanie stałej siły reakcji absorbera wskutek zastosowania zmiennego skoku gwintu tocznego, co w efekcie pozwala uzyskać optymalny przebieg procesu hamowania chronionego obiektu, niezależnie od jego prędkości początkowej.

W kolejnych trzech artykułach [3-5] przedstawiono autorskie propozycje absorberów samo-adaptacyjnych. Potrafią one zaadaptować się zarówno do zróżnicowanych warunków wymuszenia tuż przed jego wystąpieniem, ale również do zmian wielkości opisujących stan układu w trakcie realizacji samego procesu absorpcji energii uderzenia.

W pracy [3] zaprezentowano sterowalny absorber inercyjny, który dzięki złożonej konstrukcji układu wykazuje cechy funkcjonalne absorberów adaptowalnych. Część mechaniczna zaproponowanego absorbera składa się z gwintowanego trzpienia przejmującego energię uderzenia, który został umieszczony przesuwnie w ramie przy użyciu zespołu współpracujących ze sobą tulei, połączonych dodatkowo z bezwładnikiem. Na szczególne uznanie zasługuje niekonwencjonalny system absorpcji energii uderzenia, którego działanie polega na zamianie ruchu postępowego trzpienia na ruch obracających się przeciwbieżnie tulei, rozdzielonych specjalnym materiałem z możliwością sterowania jego właściwościami lepkiemi. Adaptacja właściwości dynamicznych absorbera może być równocześnie realizowana poprzez przełączanie tzw. „blokerów”, które zamontowano pomiędzy współpracującymi ze sobą elementami układu.

W kolejnej pracy [4] analizowano wpływ nieprzewidzianych zakłóceń, zaburzających prawidłowe działanie obecnie stosowanych absorberów adaptowalnych. Badaniom rozpoznawczym poddano przykładowy, jednokomorowy absorber pneumatyczny, w przypadku którego przepływ powietrza wypływającego do atmosfery dławiono przez zawór. Wprowadzono autorską metodę sterowania układem ze sprzężeniem kinematycznym, które zapewnia samo-adaptacyjność do specyficznych warunków pracy absorbera. Zaproponowana strategia sterowania adaptacyjnego bazuje na pomiarach wielkości opisujących kinematykę ruchu elementu wykonawczego, co w konsekwencji wspomaga proces identyfikacji masy obiektu, czy też siły wymuszającej jego ruch.

W ostatniej pracy [5] dyskutowano możliwości zastosowania opracowanej metody sterowania w przypadku cyklicznych obciążeń absorbera. Analizowano tym razem właściwości dynamiczne dwukomorowego absorbera pneumatycznego, w którego tłoku zainstalowano zawór sterujący przepływem powietrza pomiędzy poszczególnymi komorami. Jednoznacznie wykazano dużą skuteczność absorpcji energii uderzenia oraz znaczną odporność układu na różnego rodzaju zakłócenia.

Zaawansowana metoda sterowania umożliwiła bowiem utrzymanie pożądanej wartości siły reakcji absorbera w całym zakresie jego przemieszczeń dzięki zaimplementowaniu dedykowanej predykcji stanu systemu, którą opracowano w oparciu o model odwrotny dynamiki ruchu układu.

### **Najważniejsze rezultaty naukowe**

Na podstawie analizy treści wyżej wymienionych prac można stwierdzić, że przedstawiona do oceny rozprawa zawiera cenne aspekty poznawcze i użytkowe. Do oryginalnych i z naukowego punktu widzenia wartościowych osiągnięć Autora zaliczyć należy:

1. Przedstawienie krytycznej analizy dotyczącej stanu wiedzy w zakresie projektowania absorberów różnej konstrukcji, wraz ze wskazaniem na niedoskonałości obecnie stosowanych rozwiązań technicznych pod względem niezadawalających zdolności adaptacyjnych absorberów do zmiennych warunków wymuszenia oraz ich niedostatecznej odporności na różnego rodzaju zaburzenia.
2. Opracowanie modeli matematycznych wybranych absorberów wraz z ich implementacją w programie komputerowym przeznaczonym do tworzenia symulacji numerycznych.
3. Zaproponowanie techniki jednokrotnej rekonfiguracji układu, która zapewnia dopasowanie właściwości dynamicznych absorbera do zróżnicowanych warunków wymuszenia.
4. Wyznaczanie optymalnych parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych absorberów adaptowalnych, co doprowadziło do uzyskania założonego poziomu dyssypacji energii uderzenia.
5. Przeprowadzenie syntezy autorskiego systemu sterowania absorberami samo-adaptacyjnymi, który gwarantuje rozpraszanie energii uderzenia w sposób optymalny względem wybranego kryterium oceny, wykazuje pożądaną odporność układu na zakłócenia oraz umożliwia ponowną adaptację systemu w przypadku wystąpienia kolejnych wymuszeń.
6. Weryfikacja eksperymentalna zaproponowanych strategii adaptacji dla wybranych absorberów, która potwierdziła jakościową i ilościową zgodność właściwości dynamicznych analizowanych układów i ich modeli.

Rozprawę doktorską mgr. inż. Ramiego Faraja oceniam bardzo wysoko. Wykorzystano w niej i twórczo rozwinięto metody analizy dynamicznej w odniesieniu do zagadnień adaptacyjnego rozpraszania energii uderzenia. W tym zakresie rozprawa stanowi istotny i znaczący wkład w rozwój komputerowo wspomaganego projektowania absorberów adaptacyjnych. Należy podkreślić, iż Doktorant jest współtwórcą kilku rozwiązań objętych ochroną patentową, co świadczy o nowatorskim charakterze przeprowadzonych przez Niego badań naukowych.

### Uwagi krytyczne

1. W artykule [1] do opisu masowego natężenia przepływu gazu przez opory miejscowe wykorzystano zależność, w której nie rozgraniczono podkrytycznego oraz krytycznego charakteru przepływu. Dlaczego nie skorzystano z szeroko wykorzystywanych w istniejącej literaturze modeli, przykładowo modelu opracowanego przez St.-Venant Wanzel'a lub modelu podanego w normie ISO 6358 wraz z procedurą wyznaczania krytycznego stosunku ciśnień?
2. W pracy [1] nie przedstawiono sposobu wyprowadzenia równania opisującego zmianę temperatury powietrza w przypadku opróżniania komory o zmiennej objętości. Wobec powyższego, w jaki sposób dokonano obliczenia wartości masowego natężenia przepływu przez opór pneumatyczny podczas absorpcji energii uderzenia?
3. W modelu absorbera śrubowego [2] wprowadzono opis matematyczny wyłącznie tarcia suchego, w którym nie uwzględniono zmiany wartości współczynnika tarcia w funkcji prędkości ruchu wzajemnie przemieszczających się elementów układu. Czy tak uproszczony model siły tarcia jest wystarczający do opisu złożonych zjawisk fizycznych zachodzących podczas procesu rozpraszania energii uderzenia?
4. Prowadzona w pracach [1-2] optymalizacja bazuje na kształtowaniu przebiegu procesu hamowania poruszającego się obiektu w taki sposób, aby uzyskać założone wartości siły reakcji absorbera. Jednak ze względów technologicznych wymagane jest także zapewnienie jak najmniejszego zakresu przemieszczeń absorbera. Znalezienie kompromisu pomiędzy przeciwstawnymi kryteriami oceny skuteczności działania układów rozpraszających energię uderzenia można więc potraktować jako problem optymalizacji wielokryterialnej. Niestety w ramach zrealizowanych prac nie zdecydowano się na poszukiwanie zestawu rozwiązań kompromisowych (leżących na tzw. „brzegu Pareto”).

5. W artykułach [4-5] przeprowadzono proces syntezy systemu sterowania z wykorzystaniem modelu odwrotnego elementu wykonawczego. Czy w warunkach występowania nieliniowości w modelu podukładu pneumatycznego uzyskano rozwiązanie analityczne zadania odwrotnego? W pracach brakuje dyskusji dotyczącej istnienia jednoznaczności oraz stabilności rozwiązania.

Przedstawione powyżej uwagi krytyczne nie umniejszają wartości naukowej pracy i nie wpływają na wniosek końcowy.

### **Wniosek końcowy**

Recenzowana praca zawiera rozwiązanie istotnego z technicznego punktu widzenia zadania naukowego. Zastosowano właściwe metody naukowe, a uzyskane rozwiązania są przydatne dla praktyki. W świetle kryteriów obowiązującej Ustawy o stopniach naukowych należy uznać zarówno przedkładaną pracę, jak i dorobek mgr. inż. Ramiego Faraja za wystarczający do przeprowadzenia publicznej obrony rozprawy doktorskiej przed Radą Naukową Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN.

Osiągnięte przez Doktoranta wyniki posiadają dużą wartość poznawczą i użyteczną. Podjęte przez Niego zagadnienia absorpcji energii uderzenia doprowadziły do opracowania innowacyjnych rozwiązań układów samo-adaptacyjnych, które z powodzeniem mogą zostać wykorzystane w praktyce. Biorąc jednocześnie pod uwagę uznanie Doktoranta w międzynarodowym środowisku naukowym, wnoszę do Rady Naukowej o rozpatrzenie wniosku o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Ramiego Faraja.

*Moniejshi*