

Załącznik nr 2a

**Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych  
(w języku polskim)**

**Michał Makowski**

Warszawa 2019

## Spis treści

1. Imię i nazwisko: .....	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.....	3
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych... 3	
4. Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311):.....	3
Założony cel pracy .....	3
Opis sposobu osiągnięcia celu pracy.....	5
Podsumowanie .....	14
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych). .....	14
5.1. Charakterystyka dorobku naukowego publikacyjnego.....	14
5.2. Zestawienie dorobku naukowego: .....	23
5.3. Udział w projektach badawczych .....	24
5.4. Nagrody dotyczące działalności naukowej: .....	25

1. Imię i nazwisko:  
Michał Makowski
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.
  - a) magister inżynier na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn, Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, 2001 rok,
  - b) doktor nauk technicznych w zakresie budowy i eksploatacji maszyn, Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, 2009 rok. Tytuł rozprawy doktorskiej: *Badania wpływu sterowania tłumikiem magneto-reologicznym w zawieszeniu pojazdu samochodowego na komfort jazdy.*
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych.
  - a) Adiunkt – 2009 – obecnie, Politechnika Warszawska, Instytut Pojazdów, Zakład Ciągników i Napędów Hydrauliczny, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa.
  - b) Asystent – 2006–2009, Politechnika Warszawska, Instytut Pojazdów, Zakład Ciągników i Napędów Hydraulicznych, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa,
4. Wskazanie osiągnięcia\* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311):
  - a) Makowski M.: *Półaktywne systemy redukcji drgań pojazdów*. Monografia, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2019. ISSN 0137-2335, ISBN 978-83-7814-922-4.
  - b) Recenzenci wydawniczy: dr hab. inż. Łukasz Jankowski, prof. IPPT PAN, dr hab. inż. Lech Knap, prof. PW.
  - c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania:

#### ***Założony cel pracy***

Praca pod tytułem *Półaktywne systemy redukcji drgań pojazdów* poświęcona została zagadnieniom związanym z projektowaniem, budową, modelowaniem, badaniami numerycznymi i eksperymentalnymi półaktywnego systemu służącego do redukcji drgań pojazdów. Układ może być wyposażony w sterowane tłumiki drgań różnego typu. System

ze względu na swoją uniwersalność także może być wykorzystany do tłumienia drgań maszyn lub konstrukcji budynków.

Opracowanie półaktywnego systemu redukcji drgań wymagało realizacji szczegółowych celów badawczych takich jak:

- przeprowadzenie analizy materiałów inteligentnych z uwagi na możliwość wykorzystania ich do budowy sterowanych tłumików drgań,
- badania dostępnych na rynku wybranych konstrukcji sterowanych tłumików wykorzystujących ciecze magneto-reologiczne i elektro-reologiczne,
- opracowanie projektu i budowa oryginalnych konstrukcji sterowanych tłumików drgań wykorzystujących ciecze magneto-reologiczne oraz materiały piezoelektryczne w celu oceny koncepcji opracowanych rozwiązań,
- opracowanie projektu oraz budowa samochodowych sterowanych tłumików magneto-reologicznych i tłumików hydraulicznych z zaworami piezoelektrycznymi,
- analiza zbudowanych i dostępnych na rynku rozwiązań półaktywnych tłumików na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych z uwagi na realizowany zakres sił tarcia oraz czas zmian tych sił pod wpływem sygnału zasilania,
- opracowanie modeli sterowanych tłumików oraz identyfikacja ich parametrów w oparciu o zaproponowaną metodę identyfikacji,
- wyznaczenie uniwersalnej charakterystyki półaktywnych tłumików służącej do wyznaczania sygnałów sterowania tymi tłumikami,
- opracowanie modelu pojazdu wyposażonego w sterowane tłumiki drgań,
- opracowanie algorytmów sterowania układem redukcji drgań ze sterowanymi tłumikami,
- określenie odpowiednich kryteriów oceny skuteczności działania półaktywnego systemu redukcji drgań pojazdów,
- opracowanie modelu elektronicznego układu sterowania półaktywnymi tłumikami,
- analiza wyników badań symulacyjnych na podstawie przyjętych kryteriów sterowania,
- budowa elektronicznego układu pomiarowego i sterowania sygnałami zasilającymi tłumiki drgań,
- aplikacja półaktywnego systemu redukcji drgań na pojazdach celem jego doświadczalnej weryfikacji,

- analiza możliwości dalszego rozwoju opracowanego systemu półaktywnego systemu redukcji drgań pojazdów.

Realizacja powyższych szczegółowych celów badawczych umożliwiła opracowanie skutecznego półaktywnego systemu redukcji drgań pojazdów, który z uwagi na uniwersalność może być stosowany do ograniczenia drgań występujących: w maszynach roboczych, konstrukcjach lotniczych, a nawet w konstrukcjach budynków.

### ***Opis sposobu osiągnięcia celu pracy***

Tematyka prezentowana w pracy wpisuje się w obecne trendy związane z rozwojem urządzeń działających przy niskim zapotrzebowaniu na energię. Naukowcy z wielu ośrodków naukowo-badawczych ciągle opracowują nowe i coraz bardziej wydajne systemy redukcji drgań pojazdów oraz maszyn. Zaproponowana w monografii metoda budowy takich systemów jest wynikiem wieloletnich badań prowadzonych przez autora podczas realizacji projektów badawczych związanych z redukcją drgań w układach mechanicznych wykonywanych w Instytucie Pojazdów Politechniki Warszawskiej oraz ze współpracy z innymi ośrodkami badawczymi. Przeprowadzone prace umożliwiły osiągnięcie założonego celu naukowego, jakim było opracowanie skutecznie działającego półaktywnego systemu redukcji drgań pojazdów.

Na początku pracy zaprezentowane zostały materiały tzw. inteligentne (ang. Smart materials), do których zalicza się wiele różnych materiałów o zmiennych właściwościach. Przeprowadzona została analiza związana z możliwością wykorzystania tych materiałów w budowie sterowanych tłumików drgań. Pod uwagę były brane cechy takie jak: czas zmiany właściwości fizycznych materiału pod wpływem sygnału sterowania oraz możliwość uzyskania określonego zakresu sił tłumienia. Na tej podstawie wytypowane zostały materiały: ciecze magneto-reologiczne (MR), ciecze elektro-reologiczne (ER) oraz materiały piezoelektryczne (PZ). Ciecz magneto-reologiczna i ciecz elektro-reologiczna w rzeczywistości jest zawiesiną cząstek metali w płynie nośnym. W przypadku tych cieczy można mówić o zmianie tzw. kwazi-lepkości, ponieważ lepkość związana jest tylko z cieczami jednorodnymi. Cechą charakterystyczną cieczy MR jest możliwość zmiany jej „lepkości” pod wpływem pola magnetycznego w czasie ok. 5 ms. Podobnymi właściwościami charakteryzuje się ciecz ER. W tej cieczy zmiana „lepkości” następuje pod wpływem zmian pola elektrostatycznego a czas zadziałania to ok. 10 ms. Nieco innymi cechami charakteryzują się materiały piezoelektryczne. Materiały PZ zbudowane są ze

stosów piezoelektrycznych, których odkształcenie następuje pod wpływem przyłożonego napięcia prądu elektrycznego. Czas w jakim następuje zmiana długości stosu PZ to ok. 2,5 ms. Materiał ten planowano wykorzystać do budowy zaworu w tłumiku hydraulicznym, gdzie podczas przepływu oleju przez regulowaną szczelinę będzie następowało rozpraszanie energii. Podsumowując, cechy wytypowanych materiałów „inteligentnych” (cieczy magneto-reologicznych, cieczy elektro-reologicznych i materiałów piezoelektrycznych) umożliwiają wykorzystanie ich do budowy sterowanych tłumików drgań.

Na podstawie przeprowadzonej analiza wykazano możliwość wykorzystania materiałów typu smart do budowy sterowanych tłumików drgań. Opracowane zostały konstrukcje tłumików badawczych: tłumika magneto-reologicznego (MRD-IP) oraz tłumika hydraulicznego z zaworem piezoelektrycznym (PZD-IP), które zostały przedstawione w drugim rozdziale opracowania. W przypadku tłumika MRD-IP sygnałem zasilania było natężenie prądu przepływającego przez cewkę znajdującą się w tłumiku, która wytwarzała pole magnetyczne a ciecz MR znajdująca się w tym polu zmieniała swoje właściwości. Wówczas pod wpływem ruchu tłoka wymuszany był przepływ cieczy MR przez szczelinę, co powodowało rozpraszanie energii. Przeprowadzone zostały badania związane z wpływem wielkości szczeliny, przez którą przepływa ciecz oraz doбором materiału do budowy elementów tłumika na uzyskiwany zakres sił tłumienia. W wyniku przeprowadzonych analiz dobrano wielkość szczeliny oraz materiał do budowy poszczególnych elementów tłumika z uwagi na uzyskiwanie odpowiednich zakresów sił tarcia oraz przyrosty tych sił (tj. różnice pomiędzy siłą maksymalną i minimalną). Podobną analizę przeprowadzono na podstawie opracowanej konstrukcji tłumika z zaworem piezoelektrycznym. Tłumik ten został wypełniony olejem hydraulicznym, który pracuje jako cylinder hydrauliczny dwustronnego działania. Komory zostały połączone przez tzw. bypass z zaworem dławiącym, gdzie wielkość szczeliny była zmieniana przez dławik połączony ze stosem piezoelektrycznym. Rozpraszanie energii następowało w wyniku przepływu cieczy hydraulicznej przez szczelinę, a siła tarcia związana była z długością stosu PZ sterującego wielkością szczeliny. W opracowanej konstrukcji tłumika PZD-IP zapewniono regulację początkowej wielkości szczeliny, co umożliwiało dobór zakresu sił tłumienia. Natomiast przyrost sił tarcia związany był z sygnałem zasilania tłumika, wpływającym na długość stosu PZ.

Półaktywny system redukcji drgań pojazdów opracowany został celem aplikacji i weryfikacji m.in. do samochodów: dostawczego i terenowego. Pojazdy te różniły się rozwiązaniami konstrukcyjnymi zawieszzeń, co wpływało na konieczność zabudowy konstrukcji opartych częściowo na fabrycznych elementach tłumików drgań

(amortyzatorów). Zawieszenie przednie pojazdu dostawczego Ford Transit jest typu McPherson. Do budowy tłumika magneto-reologicznego (MRD-FT) zdecydowano się na wykorzystanie fabrycznych elementów tłumika, celem wykorzystania oryginalnych miejsc mocowania amortyzatora w/w samochodzie. Do tłumika MRD-FT zaprojektowana została głowica MR, którą umieszczono na tłoczysku w rurze wewnętrznej. Pojazd Ford Transit posłużył również do przeprowadzenia badań systemu ze sterowanym tłumikiem piezoelektrycznym (PZD-FT). Do budowy tłumika piezoelektrycznego również wykorzystano obudowę fabrycznego amortyzatora samochodu Ford Transit. Konstrukcję tą zmodyfikowano poprzez zabudowę tzw. by-passu z zaworem PZ, podobnie jak to miało miejsce w przypadku badawczego tłumika MDR-IP. Na podstawie badań eksperymentalnych wyznaczono zakresy działania sił tarcia w tłumikach MRD-FT oraz PZD-FT, które były tak dobrane, aby pokrywały charakterystykę dyssypacyjną fabrycznego tłumika drgań. Kolejnym pojazdem badawczym był samochód terenowy Honker 2000, do którego opracowane zostały tłumiki magneto-reologiczne (MRD-Honker). W budowie tego tłumika wykorzystano elementy samochodowego amortyzatora, celem wykorzystania fabrycznych punktów mocowań w pojeździe. Rozwiązanie to różniło się od konstrukcji tłumika MRD-FT, w tym przypadku głowicę MR zabudowano na rurze wewnętrznej. Przeprowadzona analiza na podstawie charakterystyki dyssypacyjnej sterowanego tłumika MRD-Honker potwierdziła możliwość zmiany zakresu sił tłumienia. Opracowane oryginalne konstrukcje samochodowych tłumików drgań (MRD-FT, MDR-Honker, PZD-FT) zapewniały możliwość zmian zakresu sił tłumienia na podstawie sygnału zasilania w czasie do 10 ms. Wykorzystanie fabrycznych podzespołów pojazdów Ford Transit i Honker 2000 do budowy sterowanych tłumików drgań uprościło ich sposób zabudowy oraz zachowany został poziom bezpieczeństwa w przypadku zabudowy tłumika w pojeździe z zawieszeniem typu McPherson. Samochodowe tłumiki drgań przedstawione zostały w drugim rozdziale, który został poświęconym prezentacji sterowanych tłumików drgań.

Opracowane oryginalne konstrukcje sterowanych tłumików: MRD-IP, MRD-FT, MRD-Honker, PZD-IP, PZD-FT posłużyły do przeprowadzenia badań ich właściwości, które wykonano na oryginalnym stanowisku laboratoryjnym. Wyniki badań wykorzystano do wyznaczenia charakterystyk dyssypacyjnych w płaszczyźnie siła-przemieszczenie i siła-prędkość, gdzie przedstawiono zmiany sił tłumienia związane z sygnałem zasilania. W przypadku tłumików MRD cewki były zasilane natężeniem prądu w zakresie 0 – 2 A, a stopy piezoelektryczne w tłumikach PZD zasilane były napięciem 0 – 150 V. Przykładowe wyniki badań eksperymentalnych sterowanych tłumików przedstawiono w rozdziale

trzecim. Wartość sił tarcia w tłumikach MRD oraz PZD była związana ze zmianami sygnałów zasilania. Na podstawie wyznaczonych charakterystyk dyssypacyjnych stwierdzono, że w obydwu typach sterowanych tłumików przy zasilaniu uzyskano co najmniej trzykrotny wzrost sił tłumienia w stosunku do badań bez zasilania. Wyznaczone charakterystyki posłużyły do dalszych badań związanych z opracowaniem modeli tłumików drgań.

Wielkość sił tarcia w sterowanych tłumikach uzależniona była od prędkości odkształceń zawieszonych oraz sygnałów sterujących. Sygnały te wyznaczone były na podstawie algorytmu sterowania, który działał w oparciu o charakterystyki dyssypacyjne tłumików. Celem realizacji tego zadania konieczne było opracowanie uniwersalnej charakterystyki sterowanego tłumika. W wyniku przeprowadzonej analizy badań eksperymentalnych przedstawionych w rozdziale trzecim wykazano, że istnieje duże podobieństwo w sposobie modelowania charakterystyk dyssypacyjnych: tłumików magneto-reologicznych, tłumików elektro-reologicznych oraz tłumików z zaworem piezoelektrycznym. Dlatego też do opisu tych tłumików można przyjąć jeden uniwersalny model, który przyjęto w postaci struktury reologicznej opisanej przez cztery parametry. Wyznaczona charakterystyka dyssypacyjna na podstawie modelu odpowiadała wynikom badań rzeczywistego tłumika. Zaproponowana została metoda identyfikacji parametrów modelu, a do oceny uzyskanych rozwiązań przyjęty został wskaźnik jakości rozwiązań. W metodzie tej wykorzystano algorytmy genetyczne. Celem uzyskania wyższej zbieżności wyników w krótszym czasie, wyznaczone były wartości punktów początkowych na podstawie metody wizualnej. W wyniku przeprowadzonej walidacji modeli wykazano skuteczność przyjętej metody, która służyła do wyznaczania parametrów modeli trzech rodzajów sterowanych tłumików drgań (MRD, ERD, PZD). Opracowana metoda posłużyła również do wyznaczenia, w celach porównawczych, parametrów sterowanego tłumika za pomocą modelu Bouca-Wena. Model ten jest często wykorzystywany do opisu sterowanych tłumików. Wadą tego modelu jest opis przez siedem parametrów, które jest trudno wyznaczyć na podstawie charakterystyki dyssypacyjnej tłumika drgań. Przeprowadzony proces identyfikacji za pomocą modelu Bouca-Wena okupiony został dłuższym czasem obliczeniowym a wartość wskaźnika jakości była zbliżona z proponowaną metodą. Zaproponowana w pracy metoda jest bardzo prosta i może z powodzeniem być wykorzystywana przez inżynierów w procesie identyfikacji sterowanych tłumików drgań, jak również tłumików klasycznych (pasywnych). Przeprowadzone prace związane z modelowaniem sterowanego tłumika zaowocowały opracowaniem tzw. uniwersalnej charakterystyki sterowania. Przeprowadzona została



regularyzacja tej charakterystyki celem uniknięcia niejednoznacznego rozwiązania. Opracowana w ten sposób charakterystyka została przedstawiona w rozdziale czwartym. Charakterystyka ta została wykorzystana w algorytmie sterowania tłumików podczas badań numerycznych oraz eksperymentalnych badań trakcyjnych.

Badania eksperymentalne pojazdów z półaktywnym systemem redukcji drgań poprzedzone zostały badaniami numerycznymi. W tym celu opracowany został matematyczny model pojazdu wyposażony w sterowane tłumiki drgań. Model w postaci układu mechanicznego prezentowany był przez nadwozie podparte w czterech punktach przez zawieszenie oraz koła pojazdu. Nadwozie zostało przyjęte w postaci nieodkształcalnej bryły opisanej przez macierz bezwładności. Zawieszenie prezentują elementy sprężyste oraz sterowane tłumiki drgań, które opisuje uniwersalna charakterystyka przedstawiona w rozdziale czwartym. Koła pojazdu zaprezentowano za pomocą punktów materialnych oraz elementów sprężystych i tłumiących, które charakteryzują cechy opon. Rozmieszczenie podpór względem nadwozia zostało opisane przez parametry geometryczne, gdzie przyjęto symetryczny rozstaw kół względem płaszczyzny symetrii. Elementy sprężysto-dyssypacyjne opisujące zawieszenie zostały umieszczone bezpośrednio nad kołami. Drgania pojazdu były wymuszone kinematycznie od podłoża. Przyjęto, że model pojazdu znajduje się w polu grawitacyjnym a siły w elementach sprężystych spowodowane ugięciami zawieszenia były przyrostem tych sił w stosunku do sił statycznych. Drgania nadwozia zostały opisane przez trzy współrzędne a ruchy kół opisano za pomocą czterech współrzędnych przedstawiających ruchy pionowe każdego koła. Model pojazdu ze sterowanymi tłumikami drgań został przedstawiony w piątym rozdziale. Na tej podstawie możliwe było przeprowadzenie badań numerycznych, gdzie siły tarcia wyznaczane były w oparciu o opracowany algorytm.

Skuteczność działania opracowanego półaktywnego systemu redukcji drgań pojazdów związana była z możliwością zmian sił tarcia w tłumikach drgań oraz z odpowiednim algorytmem sterowania służącym do wyznaczenia tych sił. Przyjęty algorytm sterowania działał w oparciu o określone kryterium, które służyło do oceny uzyskanych wyników rozwiązań. W rozdziale piątym prezentowanej pracy przedstawione zostały dwa kryteria związane z przyspieszeniami. Pierwszy funkcjonal kryterialny  $\mathcal{K}^{(1)}$  uwzględnia przyspieszenia pionowe nadwozia, ale również przyspieszenia związane z wychyleniami wzdłużnymi oraz poprzecznymi nadwozia. Na podstawie tego kryterium w każdej chwili czasowej związanej z krokiem symulacji (ang. instantaneous optimal control) wyznaczany

był wektor sił tłumienia  $T^{opt} \in R^4$  na podstawie algorytmu sterowania. Uzyskiwano w ten sposób zbiór rozwiązań spełniających warunek rozwiązania przy założeniu pierwszego funkcjonału kryterialnego. Drugim funkcjonałem kryterialnym  $\mathcal{K}^{(sky)}$  było uzyskanie minimalizacji przyspieszeń nadwozia względem nieruchomego układu współrzędnych (tzw. sky-hook). W przypadku tego kryterium siła tarcia uzależniona była od prędkości przemieszczeń nadwozi względem układu odniesienia. Praktyczna realizacja takiego połączenia nie jest możliwa, dlatego wyznaczone siły tarcia działały pomiędzy nadwoziem i kołami pojazdu. Opracowany został algorytm sterowania służący do wyznaczenia wektora sił tłumienia w każdej chwili czasowej związanej z krokiem symulacji. Podobnie, jak w przypadku pierwszego kryterium wyznaczany był zbiór rozwiązań spełniających warunek rozwiązania. Przedstawione zostało przykładowe rozwiązanie zadania optymalizacyjnego, które posłużyło do wyznaczenia pojedynczego wektora sił tarcia. Zaproponowane rozwiązanie zadania optymalizacyjnego zostało wykorzystane do rozwiązania zadania pierwszego i drugiego funkcjonału kryterialnego. W rozdziale szóstym został przedstawiony funkcjonal kryterialny związany ze zmianą nacisków kół na nawierzchnię drogi. Na podstawie rozwiązania zadania w zbiorze rozwiązań dopuszczalnych w każdej chwili czasowej otrzymywano pojedynczy wektor sił tarcia. Opracowany został algorytm sterowania siłą tłumienia, który był stosunkowo prosty do zastosowania, dlatego też algorytm ten wykorzystano podczas badań trakcyjnych pojazdów z systemem redukcji drgań. Algorytmy sterowania oparte na podstawie pierwszego oraz drugiego kryterium zastosowano podczas badań numerycznych modelu pojazdu. Wektory sił tarcia otrzymane na podstawie algorytmów sterowania przy założonym kryterium służyły do wyznaczenia sygnałów sterowania w półaktywnych tłumikach.

Badania numeryczne pojazdu ze sterowanymi tłumikami zostały poprzedzone opracowaniem modelu układu elektrycznego takiego tłumika. Model ten umożliwił realizację sił tarcia w sterowanych tłumikach na podstawie sygnału zasilania. W rozdziale piątym zaprezentowany został przykładowy model zasilania tłumików magneto-reologicznych. W modelu tym układ elektroniczny tłumików MR prezentowany został przez indukcyjność i rezystancję. Wartość natężenia prądu wyznaczana była w generatorze DC/DC, który zmieniał wartość napięcia akumulatora na napięcia zasilania na podstawie sygnału sterowania. Sygnał zasilania tłumików uzyskiwany był w oparciu o wartości ugięć zawieszenia w sterowniku działającym na podstawie algorytmu sterowania. Zastosowanie

modelu elektrycznego umożliwiło przeprowadzenie badań numerycznych, gdzie uwzględniono opóźnienie zadziałania tłumika względem sygnału sterowania.

Opracowane modele pojazdu oraz układu elektronicznego i przyjęta uniwersalna charakterystyka sterowanego tłumika posłużyły do przeprowadzenia badań numerycznych pojazdu wyposażonego w półaktywny system redukcji drgań. Do badań symulacyjnych wykorzystany został opracowany model pojazdu. Parametry dobierano wzorując się na samochodzie sportowym Honda del Sol. Badania były prowadzone ze zmienną prędkością przejazdu po nierównościach o niewielkiej amplitudzie, celem wywołania drgań nadwozia oraz jego przechyłów pod wpływem sił bezwładności podczas przyspieszenia lub hamowania. W zawieszeniu pojazdu umieszczono sterowane tłumiki MR. Badania zostały przeprowadzone przy zastosowaniu dwu algorytmów sterowania z uwzględnieniem pierwszego i drugiego funkcjonału kryterialnego. W celach porównawczych zostały przeprowadzone badania pojazdu z klasycznym zawieszeniem. Do oceny uzyskanych wyników badań przyjęte zostały dwa wskaźniki: pierwszy charakteryzujący przyspieszenia nadwozia (wskaźnik komfortu) oraz drugi charakteryzujący zmienność nacisków na nawierzchnię drogi (wskaźnik obciążeń dynamicznych/ bezpieczeństwo). Zmniejszenie się tych wskaźników oznaczało redukcję intensywności drgań. Biorąc pod uwagę wskaźnik komfortu uzyskano zmniejszenie tego wskaźnika o ok. 52 % w przypadku pierwszego funkcjonału kryterialnego  $\mathcal{K}^{(1)}$  i o ok. 42 % w przypadku drugiego funkcjonału kryterialnego  $\mathcal{K}^{(sky)}$  w stosunku do badań pojazdu z zawieszeniem klasycznym. Przeprowadzona analiza wyników badań symulacyjnych potwierdziła, że zastosowanie półaktywnego systemu redukcji drgań w pojazdach działającego z uwzględnieniem kryteriów minimalizacji przyspieszeń umożliwia ich ograniczenie w stosunku do pojazdu z klasycznym zawieszeniem.

Celem przeprowadzenia badań eksperymentalnych półaktywnego systemu redukcji drgań pojazdu opracowany został elektroniczny układ pomiarowy, który mógł być zastosowany do badań trakcyjnych. Elektroniczny układ pomiarowy przedstawiony w rozdziale 6 składał się: z komputera sterującego, uniwersalnego układu kontrolno-sterującego, modułów zasilania sterowanych tłumików drgań oraz czujników ugięć zawieszenia. Opracowany algorytm sterowania działał w oparciu o przyjęte funkcje kryterialne oprogramowane w komputerze sterującym, gdzie generowany był sygnał sterowania. Na podstawie tego sygnału w uniwersalnym układzie kontrolno-sterującym, powstawał sygnał zasilania półaktywnych tłumików. W układzie kontrolno-sterującym była

możliwość wymiany modułów zasilania tłumików, gdzie opracowano moduły do tłumików: magneto-reologicznych, elektro-reologicznych oraz hydraulicznych z zaworem piezoelektrycznym. Takie rozwiązanie zapewniło uniwersalność działania układu oraz możliwość rozbudowy o nowe moduły do innych typów tłumików. Układ ten służył również do przetwarzania sygnałów pochodzących z czujników przemieszczeń, przyspieszeń, żyroskopu oraz sygnałów z pomiaru natężenia prądu lub napięcia zasilającego sterowane tłumiki. Elektroniczny układ pomiarowy jest uniwersalny z uwagi na możliwość zasilania różnych typów sterowanych tłumików, jak również możliwość stosowania go podczas badań stacjonarnych oraz trakcyjnych pojazdów samochodowych.

Opracowane elementy półaktywnych systemów redukcji drgań pojazdów (sterowane tłumiki drgań, algorytmy sterowania siłami tarcia oraz elektroniczny układ pomiarowy) posłużyły do przeprowadzenia badań doświadczalnych, które zostały przedstawione w szóstym rozdziale. Do przeprowadzenia badań z półaktywnym systemem redukcji drgań pojazdów wykorzystano trzy rodzaje samochodów: dostawczy, terenowy oraz sportowy. W zawieszeniach pojazdów zostały zamontowane sterowane tłumiki drgań (magneto-reologiczne i hydrauliczne z zaworem piezoelektrycznym). Podczas badań trakcyjnych do sterowania siłą w tłumikach wykorzystany został algorytm, który działał w oparciu o kryterium minimalizacji zmian nacisków. W przyjętym algorytmie wyznaczany był wektor sił tłumienia w każdym kroku pomiarowym na podstawie sygnałów pomiarowych. W samochodzie dostawczym Ford Transit w zawieszeniu montowane były tłumiki magneto-reologiczne (MDR-FT) lub hydrauliczne z zaworem piezoelektrycznym (PZD-FT). Tłumiki magneto-reologiczne wykorzystano również podczas badań samochodu terenowego Honker 2000 (tłumiki MRD-Honker) oraz samochodu sportowego Honda del Sol (tłumiki komercyjne RD-8041-1). Badania trakcyjne przeprowadzone zostały na różnych odcinkach z uwagi na przeznaczenie pojazdów. Przeprowadzone zostały również badania pojazdów z klasycznym zawieszeniem w celach porównawczych. Przeprowadzona analiza wykazała skuteczność działania półaktywnego systemu redukcji drgań pojazdów. Przykładowo w przypadku badań samochodu Ford Transit z tłumikami MRD-FT uzyskano redukcję obciążeń dynamicznych o 50 % w stosunku do badań pojazdu z klasycznym zawieszeniem. Podczas badań tego pojazdu z tłumikami PZD-FT na podstawie analizy przebiegów przyspieszeń pionowych nadwozia przeprowadzonych na podstawie normy ISO 2631 wykazano, że przy prędkości jazdy 45 km/h uzyskano największe ponad dwukrotne wydłużenie czasu jazdy w warunkach komfortu w stosunku do badań pojazdu z klasycznym zawieszeniem. W przypadku badań terenowych pojazdu Honker 2000 z tłumikami MRD-

Honker uzyskano zmniejszenie wskaźnika obciążeń dynamicznych o 14 % w stosunku do badań pojazdu z klasycznym zwieszeniem. Podczas badań samochodu Honda del Sol z półaktywnym systemem redukcji drgań uzyskano ograniczenie ugięć przedniego zawieszenia podczas hamowania o 30 % w porównaniu z badaniami pojazdu z klasycznym zwieszeniem. Podobne efekty uzyskano podczas badań pojazdu ze sterowanymi tłumikami na łuku drogi, gdzie uzyskano zmniejszenie prędkości obrotu nadwozia względem osi pionowej o 20 %. Na podstawie przykładowych wyników badań pojazdów z półaktywnym systemem redukcji drgań można stwierdzić, że zastosowanie tego systemu umożliwia poprawę jazdy w warunkach komfortu oraz istnieje możliwość poprawy bezpieczeństwa poprzez zmniejszenie zmian nacisków kół na nawierzchnię drogi.

Zaproponowany w pracy półaktywny systemem redukcji drgań pojazdów może być zastosowany także do redukcji drgań innych obiektów, czego przykładem może być zaprezentowany w rozdziale szóstym układ wieloczłonowy. Układ ten zaprojektowany został jako model maszyny wieloczłonowej lub niekonwencjonalny model budynku. W proponowanym układzie do redukcji drgań zastosowane zostały tłumiki elektroreologiczne (ERD). Podczas przeprowadzonych badań wektor sił tłumienia wyznaczany był na podstawie algorytmu sterowania oraz wykorzystano uniwersalny elektroniczny układ pomiarowy z modułem do zasilania tłumików ERD. Perspektywy dalszego rozwoju pracy zostały przedstawione w rozdziale siódmym, gdzie zaproponowano rozbudowę opracowanego półaktywnego systemu redukcji drgań pojazdów o elementy aerodynamiczne celem poprawy wskaźnika obciążeń dynamicznych. Natomiast rozbudowa systemu redukcji drgań o układ rejestrujący nierówności przed pojazdem pozwoli na wyznaczenie sygnału sterowania tłumikami z odpowiednim wyprzedzeniem niwelującym efekty zwłoki działania tłumików. Opracowany system redukcji drgań z uwagi na stosunkowo krótki czas zadziałania może być zastosowany także w podwoziach samolotów, gdzie możliwe będzie sterowanie siłą tłumienia w każdej fazie lądowania. Opracowany półaktywny system redukcji drgań może być częścią składową większego systemu cyberfizycznego (cyber physical system), co może stanowić rozwinięcie zakresu działania półaktywnego systemu o nowe możliwości wynikające z oprogramowania i komunikacji z innymi systemami. Przedstawiony półaktywny system redukcji drgań pojazdów z uwagi na swoją uniwersalność może mieć wiele zastosowań oraz istnieje możliwość jego rozbudowy o nowe elementy.

## *Podsumowanie*

Założony badawczy cel pracy związany z opracowaniem półaktywnego systemu redukcji drgań pojazdów został osiągnięty. W poszczególnych częściach pracy przedstawione zostały:

- przegląd cech materiałów „inteligentnych” oraz analiza dotycząca możliwości zastosowania tych materiałów do budowy sterowanych tłumików drgań,
- opracowane i zbudowane zostały oryginalne sterowane tłumiki drgań (magneto-reologiczne i hydrauliczne z zaworem piezoelektrycznym),
- zaproponowane zostały: uniwersalny model sterowanego tłumika, metoda identyfikacji jego parametrów oraz walidacji,
- opracowany został model pojazdu z systemem półaktywnej redukcji drgań,
- opracowane zostały kryteria sterowania oraz algorytm wyznaczania wartości sił tarcia w sterowanych tłumikach drgań (kryterium komfortu i bezpieczeństwa),
- opracowany półaktywny system redukcji drgań pojazdów zabudowany został do tłumienia drgań w samochodach: dostawczym, terenowym i sportowym,
- przeprowadzona analiza badań symulacyjnych i doświadczalnych potwierdziła, że opracowany półaktywny system redukcji drgań jest skuteczny i może być zastosowany do tłumienia drgań pojazdów, maszyn oraz budynków.

Przedstawiony w pracy uniwersalny półaktywny system tłumienia drgań pojazdów wpisuje się w rozwijany obszar nauki związany z niskoenergetycznymi systemami redukcji drgań konstrukcji inżynierskich.

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych).

### 5.1. Charakterystyka dorobku naukowego publikacyjnego

#### a) Rozdziały z książek:

- [1] Grzesikiewicz W., Knap L., Makowski M.: Matematyczny opis napędu i hamowania pojazdu elektrycznego, Polioptymalizacja i Komputerowe Wspomaganie Projektowania. Mielno 2014 / Kiczowski Tomasz (red.), nr 278, 2014, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, ISBN 978-83-7365-358-0, s. 50–70
- [2] Knap L., Makowski M.: Nowe metody w diagnostyce uszkodzeń półaktywnych i aktywnych zawiesznień pojazdów, Wykorzystanie wieloźródłowej informacji w proaktywnej strategii eksploatacji, 2012/ Dybała Jacek (red.), Radkowski Stanisław

(red.); Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – Państwowego Instytutu Badawczego, ISBN 978-83-7789-035-6, s. 65–76.

b) Czasopisma znajdujące się w bazie Journal Citation Reports (JCR):

- [3] Makowski M., Knap L.: Investigation of an off-road vehicle equipped with magnetorheological dampers. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, Vol. 10(5), DOI: 10.1177/1687814018778222, pp. 1–11 (IF 0.827 (2018); 20 pkt MNiSW).
- [4] Grzesikiewicz W., Knap L., Makowski M., Pokorki J.: Study of the Energy Conversion Process in the Electro-Hydrostatic Drive of a Vehicle. *Energies* 2018, 11(2), 348; doi: 10.3390/en11020348 (IF 2,26 (2018); 25 pkt MNiSW).
- [5] Wijata A., Awrejcewicz J., Matej J., Makowski M.: Mathematical model for two-dimensional dry friction modified by dither. *Mathematics and Mechanics of Solids*, 22(10), 1936–1949. <https://doi.org/10.1177/1081286516650483>. (IF 2.953 (2016); 25 pkt MNiSW).
- [6] Makowski M., Zalewski R.: Vibration analysis for vehicle with vacuum packed particles suspension. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 53, 1, pp. 109-117, Warsaw 2015, Vol 53, No 1, pp. 109-117 (IF 0,63 (2015); 15 pkt MNiSW).
- [7] Makowski M., Knap L.: Reduction of wheel force variations with magnetorheological devices, *Journal of Vibration and Control*, vol. 20(10), 2014, s. 1552–1564, DOI:10.1177/1077546312472916 (2013) (IF 4,36 (2013); 45 pkt MNiSW).

c) Czasopisma inne oraz publikacje konferencyjne:

- [8] Knap L., Grzesikiewicz W., Makowski M.: A New Approach to Design of a Cyberphysical System Exemplified by Its Use in the Electro-Hydraulic Hybrid Drive. *Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance / Burduk A. Chlebus E., Nowakowski T., Tubis A. (eds), Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance. ISPEM 2018, Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 835, 2019, ISBN 9783319974897, ss. 22-31, DOI:10.1007/978-3-319-97490-3\_3 (15 pkt MNiSW).
- [9] Wijata A., Makowski M., Stańczyk B., Awrejcewicz J.: Modelling orthotropic friction with a nonlinear bristle model, *AIP Conference Proceedings* 2077, 020060 (2019), [doi.org/10.1063/1.5091921](https://doi.org/10.1063/1.5091921), Published Online: 21 February 2019 (15 pkt MNiSW).

- [10] Grzesikiewicz W., Makowski M.: Zagadnienie optymalizacji w półaktywnym układzie tłumienia drgań pojazdu. *MODELOWANIE INŻYNIERSKIE* 2018 nr 68, ISSN 1896-771X (8 pkt MNiSW).
- [11] Grzesikiewicz W., Makowski M., Knap L., Pokorski J.: Studies of electric drive with hydrostatic support. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 25, No. 1 2018, DOI: 10.5604/01.3001.0012.2476, pp. 265-274 (14 pkt MNiSW).
- [12] Grzesikiewicz W., Makowski M., Knap L., Pokorski J.: Conversion of energy in electric drive supported by the hydrostatic drive. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 25, No. 1 2018, DOI: 10.5604/01.3001.0012.2461, pp. 143-150 (14 pkt MNiSW).
- [13] Makowski M.: Algorithm for Damping Control in Vehicle Suspension Equipped with Magneto-Rheological Dampers. In: Awrejcewicz J. (eds) *Dynamical Systems in Theoretical Perspective. DSTA 2017. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics*, vol 248. Springer, Cham, 2018, doi.org/10.1007/978-3-319-96598-7\_19, pp. 235-247 (15 pkt MNiSW).
- [14] Grzesikiewicz W., Makowski M.: Model układu sterującego czterema magneto-reologicznymi tłumikami drgań pojazdu. *AUTOBUSY – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, Nr 12/2017, Radom 2017, ISSN 1509-5878, s. 144-148 (7 pkt MNiSW).
- [15] Grzesikiewicz W., Makowski M.: Symulacja drgań pojazdu wyposażonego w tłumiki magneto-reologiczne. *Symulacja w Badaniach i Rozwoju, Kwartalnik PTSK*, Vol. 8, No. 3-4/2017, Warszawa 2017, s. 85-95 (5 pkt MNiSW).
- [16] Makowski M., Skalski P.: Construction solutions of controlled dampers. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów*, 3(112)/2017, Warszawa 2017, s. 77-82 (7 pkt MNiSW).
- [17] Grzesikiewicz W., Knap L., Makowski M., Pokorski J.: *BADANIA DOŚWIADCZALNE HYBRYDOWEGO NAPIĘDU ELEKTRO-HYDROSTATYCZNEGO*, *Modelowanie Inżynierskie*, vol. 28, nr 59, 2016, s. 19–25 (8 pkt MNiSW).
- [18] Grzesikiewicz W., Knap L., Makowski M., Pokorski J.: Badania hybrydowego napędu elektryczno-hydrostatycznego, *Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, nr 12, 2016, s. 177–180 (7 pkt MNiSW).
- [19] Grzesikiewicz W., Knap L., Makowski M., Pokorski J.: *SYMULACYJNE BADANIA HYBRYDOWEGO NAPIĘDU ELEKTRYCZNO-HYDROSTATYCZNEGO*, *Modelowanie Inżynierskie*, vol. 27, nr 58, 2016, s. 37–43 (8 pkt MNiSW).



- [20] Grzesikiewicz W., Makowski M.: Analiza drgań pojazdu z tłumikami magneto-reologicznymi. *AUTOBUSY – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, Nr 12/2016, Radom 2016, ISSN 1509-5878, s. 180-184 (7 pkt MNiSW).
- [21] Makowski M., Knap L., Gałęzia A., Jasiński M.: AN INVESTIGATION OF ACOUSTIC NOISE GENERATED BY WATER FLOWING THROUGH NOZZLES, *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów*, vol. 109, nr 5, 2016, s. 59–67 (8 pkt MNiSW).
- [22] Sar H., Makowski M.: Simulation of double lane change maneuver including road unevenness. *Proceedings of 20th International Scientific Conference. Transport Means. 2016. Part I.* pp. 145-150 (15 pkt MNiSW).
- [23] Sar H., Makowski M.: SAFETY OF AUTOMOBILE IN CURVILINEAR MOTION INCLUDING VERTICAL VIBRATIONS. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów* 4/2016, Warszawa 2016, pp. 33-44 (5 pkt MNiSW).
- [24] Grzesikiewicz W., Knap L., Makowski M., Pokorski J.: Dobór regulatora PID do hydrostatycznego napędu pojazdu, *Logistyka: czasopismo dla profesjonalistów*, nr 3/2015, 2015, s. 1686–1695.
- [25] Grzesikiewicz W., Knap L., Makowski M., Pokorski J.: Identyfikacja charakterystyk stanowiska laboratoryjnego do badania hybrydowego napędu elektryczno-hydrostatycznego, *Logistyka: czasopismo dla profesjonalistów*, vol. 3/2015, 2015, s. 1696–1705.
- [26] Grzesikiewicz W., Knap L., Makowski M.: STUDIUM ENERGETYCZNE HYDROSTATYCZNEGO NAPĘDU AKUMULATOROWEGO, *TTS Technika Transportu Szynowego*, vol. 19, nr 12, 2015, s. 1235–1238 (5 pkt MNiSW).
- [27] Makowski M., Grzesikiewicz W., Knap L., Pokorski J.: Analiza doboru układu regulacji do elektrycznego napędu pojazdu, *TTS Technika Transportu Szynowego*, nr 12/2015, 2015, s. 1006–1010 (5 pkt MNiSW).
- [28] Makowski M., Grzesikiewicz W., Knap L., Pokorski J.: Badania numeryczne elektrycznego układu napędowego pojazdu, *TTS Technika Transportu Szynowego*, nr 12/2015, 2015, s. 1011–1015 (5 pkt MNiSW).
- [29] Grzesikiewicz W., Knap L., Makowski M., Pokorski J.: Symulacyjne badanie ruchu pojazdu z napędem hydrostatycznym, *Logistyka: czasopismo dla profesjonalistów*, nr 4, 2014, s. 387–395 (10 pkt MNiSW).
- [30] Knap L., Makowski M., Grzesikiewicz W.: Badania doświadczalne właściwości akumulatora hydropneumatycznego, *Logistyka: czasopismo dla profesjonalistów*, vol. 3/2014, 2014, s. 2992–3001 (10 pkt MNiSW).

- [31] Makowski M., Knap L., Grzesikiewicz W.: Eksperymentalne badania elementów napędu elektro-hydrostatycznego – akumulator hydropneumatyczny, *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów*, nr 3(99)/2014, 2014, s. 67–78 (8 pkt MNiSW).
- [32] Makowski M., Reński A., Pokorski J.: Możliwość aplikacji różnych rodzajów sterowanych amortyzatorów w pojazdach samochodowych. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów* 4/2014, Warszawa 2014, s. 5-24 (4 pkt MNiSW).
- [33] Dybała J., Knap L., Makowski M. [i in.]: Badania wpływu zmiany temperatury na właściwości sterowanego tłumika piezoelektrycznego, *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów*, vol. 2, nr 93, 2013, s. 67–78 (8 pkt MNiSW).
- [34] Grzesikiewicz W., Knap L., Makowski M.: Matematyczny model napędu elektryczno-hydrostatycznego, *TTS Technika Transportu Szynowego*, vol. 20, nr 10, 2013, ss. 887–894 (5 pkt MNiSW).
- [35] Makowski M.: Numeryczne badania drgań konstrukcji budowlanych ze sterowanymi tłumikami. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów* 4/2013, s. 115-124. ISSN 1642-347X (8 pkt MNiSW).
- [36] Makowski M., Knap L.: Badania sterowanych tłumików elektoreologicznych stosowanych do redukcji drgań układów mechanicznych, *TTS Technika Transportu Szynowego*, nr 10/2013, 2013, s. 2755–2762 (5 pkt MNiSW).
- [37] Grzesikiewicz W., Knap L., Makowski M.: BADANIA ORAZ MODELOWANIE WŁAŚCIWOŚCI STEROWANEGO TŁUMIKA PIEZOELEKTRYCZNEGO, *TTS Technika Transportu Szynowego*, nr 9/2012, 2012, s. 1243–1452 (4 pkt MNiSW).
- [38] Grzesikiewicz W., Knap L., Makowski M.: STUDIUM ENERGETYCZNE HYDROSTATYCZNEGO NAPĘDU AKUMULATOROWEGO, *TTS Technika Transportu Szynowego*, nr 9/2012, 2012, s. 1235–1242 (4 pkt MNiSW).
- [39] Grzesikiewicz W., Knap L., Makowski M.: SYMULACYJNE BADANIA NAPĘDU HYDROSTATYCZNEGO, *TTS Technika Transportu Szynowego*, nr 9/2012, 2012, s. 1243–1452 (4 pkt MNiSW).
- [40] Knap L., Mydłowski T., Dybała J., Makowski M.: Badanie właściwości sterowanego tłumika piezoelektrycznego, *Measurement Automation Monitoring*, nr 10/2012, 2012, s. 879–882 (7 pkt MNiSW)
- [41] Knap L., Makowski M., Grzesikiewicz W.: Identyfikacja uszkodzeń półaktywnego zawieszenia pojazdu, *Logistyka*, nr 3/2012, 2012, s. 1049–1056 (4 pkt MNiSW).

- [42] Makowski M., Grzesikiewicz W., Knap L.: Identyfikacja parametrów sterowanych tłumików MR I PZ, *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów / Politechnika Warszawska*, nr 3/2012, 2012, s. 89–100 (4 pkt MNiSW).
- [43] Makowski M., Grzesikiewicz W., Knap L.: Koncepcja stanowiska do badań wpływu sterowania tłumikami na drgania układu mechanicznego, *TTS Technika Transportu Szynowego*, nr 9/2012, 2012, s. 3335–3342 (4 pkt MNiSW).
- [44] Rutczyńska-Wdowiak K., Makowski M.: Analiza wpływu wybranych parametrów algorytmu genetycznego w problemie identyfikacji modelu tłumika MR. *Logistyka* 3/2012, s. 1935-1942, ISSN 1231-5478 (4 pkt MNiSW).
- [45] Rutczyńska-Wdowiak K., Makowski M.: Analiza wpływu metody selekcji w problemie identyfikacji modelu tłumika MR z zastosowaniem algorytmu genetycznego. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów* 4/2012, s. 103-110, ISSN 1642-347X (4 pkt MNiSW).
- [46] Rutczyńska-Wdowiak K., Makowski M.: Analiza wpływu operatora krzyżowania w problemie identyfikacji modelu tłumika MR z zastosowaniem algorytmu genetycznego. *Technika Transportu Szynowego* 9/2012, s. 2031-2038. ISSN 1232-3829 (4 pkt MNiSW).
- [47] Grzesikiewicz W., Makowski M., Pyrz M.: Estymacja parametrów modelu tłumika magneto-reologicznego z wykorzystaniem algorytmów genetycznych. *Pomiary Automatyka Kontrola*, Vol. 57, nr 9/2011, s. 1044-1047. ISSN 0032-4140 (10 pkt MNiSW).
- [48] Makowski M., Grzesikiewicz W.: Modelowanie zjawisk zachodzących w elementach pneumatycznego układu napędowego pojazdu. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów* 5/2011, Warszawa 2011, s. 103-112, ISSN 1642-347X (4 pkt MNiSW).
- [49] Makowski M., Knap L., Grzesikiewicz W.: Badania ograniczania zmian nacisku kół pojazdu z tłumikami magnetoreologicznymi, *Modelowanie Inżynierskie*, vol. 10, nr 41, 2011, s. 251–260 (4 pkt MNiSW).
- [50] Makowski M., Knap L., Grzesikiewicz W.: Identyfikacja parametrów sterowanego tłumika piezoelektrycznego, *Logistyka*, nr 6, 2011, s. 2419–2428 (4 pkt MNiSW).
- [51] Makowski M., Knap L., Grzesikiewicz W.: Modelowanie i identyfikacja parametrów sterowanych tłumików magnetoreologicznych, *Modelowanie Inżynierskie*, vol. 10, nr 41, 2011, s. 261–269 (4 pkt MNiSW).
- [52] Makowski M., Knap L., Grzesikiewicz W.: REDUCTION OF VEHICLE BODY VIBRATIONS WITH PIEZOELECTRIC DAMPERS, *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów / Politechnika Warszawska*, nr 5, 2011, s. 95–102 (4 pkt MNiSW).

- [53] Makowski M., Knap L., Grzesikiewicz W.: Vibration investigation of vehicle equipped with controlled piezoelectric dampers, *Journal of KONES*, vol. 18, nr 4, 2011, ss. 251-257 (7 pkt MNiSW).
- [54] Makowski M., Zając M., Pokorski J.: Ograniczenie zmian nacisku kół pojazdu patrolowego ze sterowanymi tłumikami magnetoreologicznymi. *Logistyka* 6/2011, s. 2429-2438, ISSN 1231-5478 (4 pkt MNiSW).
- [55] Makowski M., Zając M., Pokorski J.: Badanie wpływu sterowania tłumików magnetoreologicznych na zmniejszenie obciążeń dynamicznych kół pojazdu patrolowego, *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów* 3/2011, Warszawa 2011, s. 37-48, ISSN 1642-347X (4 pkt MNiSW).
- [56] Zając M., Grzesikiewicz W., Makowski M.: Wpływ sterowania tłumikiem MR na ograniczenie drgań pojazdu patrolowego. *Zeszyty Naukowe WSOWL*, Nr 1 (159) 2011, s. 294-301, ISSN 1731-8157.
- [57] Knap L., Grzesikiewicz W., Makowski M.: Modeling and Experimental Studies of Controlled Torsional Magnetorheological Damper, *Machine Dynamics Research*, vol. 34, nr 2, 2010, s. 70–77 (4 pkt MNiSW).
- [58] Makowski M., Grzesikiewicz W., Knap L.: Badania drgań pojazdu ze sterowanymi tłumikami piezoelektrycznymi, *Logistyka*, nr 6, 2010, s. 2111–2118 (4 pkt MNiSW).
- [59] Makowski M., Grzesikiewicz W., Knap L.: Ograniczenie drgań pojazdu za pomocą sterowanych tłumików piezoelektrycznych, *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechnika Warszawska*, vol. 3, nr 79, 2010, s. 75–82 (4 pkt MNiSW).
- [60] Makowski M., Grzesikiewicz W.: Die Untersuchung des Modells des Fahrzeugs mit den Dämpfern MR. *Engineering for Change Sustainability-Energy-Automotive, Wissenschaftliche Berichte der Fachhochschule Köln Scientific Reports of the Cologne University of Applied Sciences*, 1/2010, Köln, Germany, pp. 39-44.
- [61] Knap L., Grzesikiewicz W., Makowski M.: Experimental studies and modeling of mechanical systems with controlled torsional magneto-rheological damper. *Logistyka* 6/2009. ISSN 1231-5478 (4 pkt MNiSW).

d) Patenty:

- [62] Knap L., Makowski M.: Sonda drogowa, Wynalazek, Zaakceptowany, Numer zgłoszenia: P-401084, Numer patentu/prawa: ZRPat/2161/17. Data zgłoszenia: 07-10-2012. Data udzielenia: 10-07-2017.

e) Raporty z projektów badawczych:

- [63] Makowski M., Grzesikiewicz W., Zbiciak A., Knap L., Pokorski J.: Redukcja drgań maszyn i konstrukcji budowlanych za pomocą sterowanych dyssypatorów. Sprawozdanie merytoryczne - raport z realizacji projektu N N 502 1492 39. Politechnika Warszawska, Instytut Pojazdów, Warszawa 2014.
- [64] Knap L., Grzesikiewicz W., Makowski M., Pokorski J.: Wykorzystanie technologii materiałów piezoelektrycznych w aktywnej kontroli drgań pojazdu. Sprawozdanie merytoryczne - raport z realizacji projektu N N 509 403 036. Politechnika Warszawska, Instytut Pojazdów, Warszawa 2013.
- [65] Grzesikiewicz W., Makowski M., Knap L., Pokorski J.: Badania napędów elektryczno-hydraulicznych z odzyskiem energii hamowania. Sprawozdanie merytoryczne - raport z realizacji projektu 2011/01/B/ST8/06822. Politechnika Warszawska, Instytut Pojazdów, Warszawa 2013.
- [66] Zając M., Grzesikiewicz W., Makowski M., Knap L., Pokorski J.: Badanie wpływu sterowania systemów w zawieszeniu wojskowego pojazdu patrolowego na bezpieczeństwo jazdy. Sprawozdanie merytoryczne - raport z realizacji projektu O N 509 0027 35. Politechnika Warszawska, Instytut Pojazdów, Warszawa 2012.

f) Opis zagadnień naukowych poruszanych w publikacjach:

W ramach wymienionych w tej części publikacji znaczny nacisk położono na projektowanie, budowę oraz badania numeryczne i doświadczalne związane z półaktywnymi systemami tłumienia drgań. Przedstawione zostały wyniki prowadzonych prac badawczych realizowanych zespołowo lub samodzielnie, w wyniku których uzyskano wiele rodzajów sterowanych tłumików drgań, modeli pojazdów oraz maszyn, algorytmów sterowania oraz aplikacji sterowanych systemów tłumienia drgań w konstrukcjach inżynierskich:

- opracowano projekty, zbudowane zostały konstrukcje oraz przeprowadzono badania doświadczalne sterowanych tłumików magneto-reologicznych oraz hydraulicznych z zaworem piezoelektrycznym, które służyły do badań właściwości tych tłumików oraz do zabudowy sterowanych tłumików w zawieszeniach pojazdów – zagadnienia związane z tą tematyką zostały przedstawione w pracach [16], [32-33], [37], [40], [42], [49], [51], [60];

- opracowano model sterowanego tłumika oraz przeprowadzona została identyfikacja parametrów na podstawie zaproponowanej metody – zagadnienia przedstawiono w pracach [33], [39], [42], [44-47], [50-52], [57], [60-61];
- badania doświadczalne tłumików elektro-reologicznych oraz możliwości aplikacji do redukcji drgań konstrukcji budynków – zaprezentowano w pracach [35-37], [43], [63];
- opracowane algorytmy sterowania oraz wyniki badań symulacyjnych i doświadczalnych, gdzie do redukcji drgań zastosowane zostały półaktywne systemy redukcji drgań wyposażone w sterowane tłumiki MRD lub PZD – przedstawiono w pracach [3], [7], [10], [13], [15], [20], [53-56], [58-59], [65-66];
- opracowana została „Sonda drogowa” pozwalająca na dynamiczny pomiar nacisków kół przejeżdżających pojazdów – zagadnienie te omówiono w pracy [62];
- opracowane zostały modele pojazdów służące do badań wpływu zużycia eksploatacyjnego elementów zawieszenia na drgania nadwozia, gdzie przeprowadzone zostały badania numeryczne oraz identyfikacja parametrów przyjętego do badań modelu – zagadnienia te przedstawiono w pracach [2], [7], [41], [57], [61];
- opracowano modele pojazdów oraz przeprowadzono identyfikację przyjętych parametrów służące do badań drgań pojazdów poruszających się po łukach – tematyka ta została przedstawiona w pracach [14], [22-23];
- opracowany został model pojazdu wyposażony w sterowane tłumiki drgań z materiałów granulowanych – zagadnienia to zaprezentowano w pracy [6];

Druga grupa publikacji związana była z zaprezentowaniem wyników badań związanych z ograniczaniem zużycia energii w pojazdach. W opracowaniach zostały przedstawione modele symulacyjne oraz aplikacje inżynierskie uzyskane rozwiązania w wyniku realizowanych prac badawczych. Na podstawie prowadzonych zespołowo prac stworzono:

- opracowano projekt oraz zbudowano model hybrydowego napędu elektryczno-hydrostatycznego pojazdu dostawczego, który umożliwia zmniejszenie zużycia energii służącej do napędu – zagadnienie to został omówiono w pracach [1], [4], [8], [11-12], [17-19], [24-31], [34], [38-39], [63];
- opracowano model oraz przeprowadzono identyfikację parametrów akumulatora energii do pneumatycznego napędu pojazdu – tematyka została zaprezentowana w pracy [48];

- opracowane zostały modele oraz przeprowadzona została identyfikacja układów do redukcji tarcia suchego w układach mechanicznych – zagadnienie to zostało przedstawione w pracach [5], [9];
- opracowano projekt i zbudowano dysze natryskowe o obniżonej emisji akustycznej – zagadnienie to przedstawiono w pracy [21];

Przeprowadzone prace badawcze związane z opracowaniem półaktywnych systemów redukcji drgań pojazdów oraz prace związane z układami o zmniejszonym zużyciu energii wpisują się w obszar światowej nauki związanej z niskoenergetycznymi układami tłumienia drgań oraz układami z ograniczonym zużyciem energii. Przykładowo w przypadku zastosowania systemów redukcji drgań w pojazdach uzyskano ograniczenie drgań przy zastosowaniu oryginalnych półaktywnych tłumików magneto-reologicznych oraz tłumików hydraulicznych z zaworem piezoelektrycznym. Unikalnym w skali światowej było opracowanie hybrydowego napędu elektryczno-hydrostatycznego, który umożliwił zwiększenie zasięgu pojazdu elektrycznego do ok. 40%, przy ograniczeniu obciążenia prądowego akumulatora.

Zaprezentowane w pracach wyniki badań uzupełniają ogólną tematykę badawczą związaną z układami o ograniczonym zużyciu energii w konstrukcjach inżynierskich.

## 5.2. Zestawienie dorobku naukowego:

Liczba publikacji (po doktoracie):

- Monografie: 1
- Rozdziały w monografiach: 2
- Publikacje w czasopismach z listy JCR: 5
- Publikacje w czasopismach WoS: 4
- Publikacje w czasopismach na liście B: 45
- Publikacje w materiałach konferencyjnych zagranicznych i krajowych: 4
- Łączna liczba publikacji (po doktoracie): 62

Statystyki:

- Sumaryczna wartość Impact Factor: 11,03  
 Publikacja [3] – rok publikacji elektronicznej 2018 – IF 0,83  
 Publikacja [4] – rok publikacji elektronicznej 2018 – IF 2,26  
 Publikacja [5] – rok publikacji elektronicznej 2016 – IF 2,95  
 Publikacja [6] – rok publikacji elektronicznej 2015 – IF 0,63  
 Publikacja [7] – rok publikacji elektronicznej 2013 – IF 4,36

- Liczba cytowań oraz indeks Hirscha wg. bazy Web of Science (w oparciu o opcję *Cited Reference Search*)
  - Liczba cytowań: 22
  - Liczba cytowań (bez autocytowań): 17
  - H-index: 2
  
- Liczba cytowań oraz indeks Hirscha wg. bazy Google Scholar (na podstawie *Publish or Perish v6*):
  - Liczba cytowań: 92
  - Liczba cytowań (bez autocytowań): brak danych
  - H-index: 4

### 5.3. Udział w projektach badawczych

#### a) Projekty realizowane w roli kierownika projektu:

- [1] Aktywny system tłumienia drgań pojazdu. Projekt badawczy PBS3/B6/34/2015, 2015–2019.
- [2] Redukcja drgań maszyn i konstrukcji budowlanych za pomocą sterowanych dyssypatorów. Projekt badawczy MNiSW N N 502 1492 39, 2010 – 2013.

#### b) Projekty realizowane w roli wykonawcy

- [3] Autonomiczny robot polowy do siewu i pielęgnacji upraw szerokokorzędowych. Projekt badawczy PBS3/B9/32/2015, 2015 - 2018.
- [4] Technologie autonomicznej rekonfiguracji materiałów w pojazdach. Projekt badawczy PBS3/A9/30/2015, 2015 – 2018.
- [5] Poprawa jakości życia człowieka przez zmniejszenie drgań i hałasu sprzętu gospodarstwa domowego, Projekt badawczy NCBiR PBS2/B6/20/2013, 2013 – 2015.
- [6] Badania napędów elektryczno-hydraulicznych z odzyskiem energii hamowania. Projekt badawczy NCN 2011/01/B/ST8/06822, 2011-2013.
- [7] Wykorzystanie technologii materiałów piezoelektrycznych w aktywnej kontroli drgań pojazdów. Projekt badawczy MNiSW N N 509 40 30 36, 2009 – 2012.
- [8] Badanie wpływu sterowania systemów w zawieszeniu wojskowego pojazdu patrolowego na bezpieczeństwo jazdy. Projekt badawczy MNiSW O N 509 0027 35, 2008 – 2012.



- [9] Teoria struktur reologicznych oraz jej wykorzystanie do modelowania charakterystyk konstytutywnych ośrodków ciągłych i urządzeń mechanicznych. Projekt badawczy MNiSW N N501 119036, 2009 – 2011.

#### Opis projektów

W ramach realizowanych projektów badawczych prace w głównej mierze koncentrowały się na opracowywaniu układów służących do redukcji drgań pojazdów, maszyn oraz konstrukcji budynków z wykorzystaniem technologii materiałów tzw. inteligentnych. Przeprowadzone zostały prace teoretyczne związane z opisem matematycznym zjawisk zachodzących w sterowanych strukturach tłumienia drgań. Przeprowadzone zostały badania symulacyjne modeli układów fizycznych oraz badania eksperymentalne przeprowadzone na pojazdach. Zrealizowano wiele prac doświadczalnych oraz symulacyjnych w zakresie opracowania półaktywnego systemu redukcji drgań pojazdów i maszyn. Opracowane półaktywne układy tłumienia drgań mogą zostać wykorzystane na pojazdach klasycznych i autonomicznych, maszynach roboczych oraz do ograniczenia drgań urządzeń codziennego użytku. W wyniku realizacji zadań badawczych powstały oryginalne rozwiązania, które zostały zaprezentowane na licznych konferencjach krajowych oraz międzynarodowych, jak również zostały opublikowane w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym. Przeprowadzone prace zaowocowały powstaniem unikatowych stanowisk laboratoryjnych oraz mobilnych, ale również ogromnym doświadczeniem zespołu badaczy realizującego te projekty.

#### 5.4. Nagrody dotyczące działalności naukowej:

- [1] Nagroda zespołowa stopnia III JM Rektora Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia naukowe w roku 2011.
- [2] Nagroda zespołowa stopnia I JM Rektora Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia naukowe w roku 2012.
- [3] Nagroda zespołowa stopnia III JM Rektora Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia naukowe w latach 2015/16.



Michał Makowski