

Autoreferat

Spis treści

1. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej
2. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych
3. Osiągnięcie stanowiące podstawę wszczęcia postępowania habilitacyjnego
4. Przebieg pracy naukowej
 - 4.1. Okres przed doktoratem
 - 4.2. Okres po doktoracie
 - 4.3. Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników prac stanowiących podstawę wszczęcia postępowania habilitacyjnego
 - 4.4. Szczegółowe omówienie celu naukowego poszczególnych prac oraz osiągniętych wyników
 - 4.5. Główne osiągnięcia naukowe
5. Podsumowanie działalności naukowej
 - 5.1. Autorstwo i współautorstwo w publikacjach naukowych
 - 5.2. Kierowanie międzynarodowymi lub krajowymi projektami badawczymi, lub udział w takich projektach
 - 5.3. Działalność dydaktyczna i popularyzatorska
 - 5.4. Staże i szkolenia zagraniczne
 - 5.5. Nagrody i wyróżnienia

1. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

- Dyplom doktora nauk technicznych w zakresie mechaniki, nadany uchwałą Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk z dnia 26 marca 2009 r. Tytuł rozprawy doktorskiej: „Dynamiczne właściwości układu hybrydowego poddanego ruchomym źródłom zaburzeń”. Promotor: prof. dr hab. inż. Czesław Bajer.
- Dyplom magistra inżyniera w zakresie pojazdów uzyskany w dniu 20 października 2004 r. na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej. Tytuł pracy magisterskiej: „Obliczenia wytrzymałościowe struktury nośnej pojazdu trójkołowego”. Promotor: prof. dr hab. inż. Jerzy Wicher.

2. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

2009 – obecnie adiunkt w Zakładzie Technologii Inteligentnych IPPT PAN

3. Osiągnięcie stanowiące podstawę wszczęcia postępowania habilitacyjnego

Osiągnięciem stanowiącym podstawę wszczęcia postępowania habilitacyjnego 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. nr 65, poz. 595 ze zm.) jest cykl publikacji powiązanych tematycznie pt.

„Adaptacyjne tłumienie drgań wybranych konstrukcji z wykorzystaniem nieklasycznych materiałów”

Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego:

[A1] **B. Dyniewicz**, Space-time finite element approach to general description of a moving inertial load, 2012, *Finite Elements in Analysis and Design*, 62, pp. 8-17.

Punktacja MNiSW: 30, JCR, IF=1,389 (2012).¹

[A2] **B. Dyniewicz (70%)**, C.I. Bajer, J. Matej, Mass splitting of train wheels in the numerical analysis of high speed train-track interactions, 2015, *Vehicle System Dynamics*, 53(1), pp. 51-67. **Punktacja MNiSW: 30, JCR, IF=1,306 (2015).**

[A3] **B. Dyniewicz**, Efficient numerical approach to unbounded systems subjected to a moving load, 2014, *Computational Mechanics*, 54(2), pp. 321-329.

Punktacja MNiSW: 40, JCR, IF=2,525 (2014).

[A4] **B. Dyniewicz** (65%), R. Konowrocki, C.I. Bajer, Intelligent adaptive control of the vehicle-span/track system, 2015, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 58-59, pp.1-14. **Punktacja MNiSW: 40, JCR, IF=2,771 (2015).**

[A5] **B. Dyniewicz** (50%), A. Pręgowska, C.I. Bajer, Adaptive control of a rotating system, 2014, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 43(1–2), pp. 90-102.

Punktacja MNiSW: 40, JCR, IF=2,256 (2014).

[A6] **B. Dyniewicz** (60%), J.M. Bajkowski, C.I. Bajer, Semi-active control of a sandwich beam partially filled with magnetorheological elastomer, 2015, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 60-61, pp. 695-705.

Punktacja MNiSW: 40, JCR, IF=2,771 (2015).

[A7] J.M. Bajkowski, **B. Dyniewicz** (50%), C.I. Bajer, Damping properties of a beam with vacuum-packed granular damper, 2015, *Journal of Sound and Vibration*, 341, pp. 74-85. **Punktacja MNiSW: 35, JCR, IF=2,107 (2015).**

[A8] J.M. Bajkowski, **B. Dyniewicz** (50%), C.I. Bajer, Semi-active damping strategy for beams system with pneumatically controlled granular structure, 2016, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 70-71, pp. 387-396. **Punktacja MNiSW: 40, JCR, IF=2,771 (2015).**

[A9] C.I. Bajer, **B. Dyniewicz** (25%), D. Pisarski, J.M. Bajkowski, *Vibration control with smart materials*, 2015, Biblioteka Mechaniki Stosowanej, Seria A. Monografie, IPPT PAN, 240p., ISBN 978-83-89687-92-0. **Punktacja MNiSW: 25.**

4. Przebieg pracy naukowej

4.1. Okres przed doktoratem

W ramach studiów doktoranckich zajmowałem się zagadnieniami związanymi z dynamiką układów pod wpływem ruchomego obciążenia. Jest to tematyka bardzo popularna od wielu lat. W literaturze możemy znaleźć pełne rozwiązania analityczne w przypadku układów obciążonych ruchomą siłą o stałej lub harmonicznie zmiennej

wartości. Również symulacje komputerowe tego typu obciążeń nie nastroczają problemów. Inaczej jest w przypadku ruchomych obciążeń inercyjnych. Uwzględnienie bezwładności ruchomej masy pociąga za sobą poważne konsekwencje matematyczne. Równanie ruchu uwzględniające inercję ruchomej masy staje się równaniem różniczkowym o zmiennych współczynnikach. Nie znamy pełnego rozwiązania analitycznego tej grupy problemów. Zaproponowana przeze mnie metoda półanalityczna ujawniła ciekawą własność rozwiązania różniczkowego równania ruchu struny oraz belki Timoszenki pod wpływem ruchomego obciążenia bezwładnościowego. Trajektoria ruchu jadącej masy jest nieciągła blisko końcowej podpory. Jest to własność równania różniczkowego, powszechnie stosowanego do opisu tego typu zagadnień. Została ona wykryta przeze mnie i opisana po raz pierwszy. Choć w naturze, z uwagi na wpływ choćby nieliniowych członów w bardziej złożonych modelach matematycznych, trudno jest mówić o faktycznej nieciągłości trajektorii masy, duże wzrosty przyspieszeń, a więc i sił, są obserwowane np. w drogownictwie. W przypadku struny bezmasowej analitycznie udowodniono tę własność rozwiązania oraz wykazano, że nieciągłość trajektorii masy występuje w całym zakresie jej prędkości. Wspomniane zagadnienia zostały przedstawione w pracach [13,16]². Odkrycie to wyjaśnia trudności występujące w rozwiązaniach numerycznych, szczególnie w miejscach uwzględniających warunki brzegowe. Możemy spodziewać się tam bardzo wolnej zbieżności szeregów opisujących rozwiązanie półanalityczne. Otrzymane wyniki obliczeń półanalitycznych posłużyły do weryfikacji modeli numerycznych zadań uwzględniających ruchomą, jadącą masę. W przypadku struny i belki Timoszenki znane z literatury metody modelowania numerycznego ruchomej masy zawodzą. Sposoby modelowania ruchomych obciążeń zaprezentowane zostały w pracy [14]. Zdobyte doświadczenie zaowocowało opracowaniem numerycznego opisu ruchomej punktowej masy poruszającej się po strunie z wykorzystaniem metody elementów czasoprzestrzennych [17]. Opracowano oryginalne elementy skończone, przenoszące poruszającą się cząstkę masową. Ponadto zbadano wpływ funkcji wirtualnych na dokładność numerycznego rozwiązania zagadnienia ruchomego obciążenia bezwładnościowego. Opracowano oryginalne czasoprzestrzenne elementy skończone, opisujące masę poruszającą się po belce Eulera. Otrzymane wyniki zamieszczono w pracy [15].

Część prac prowadziłem w ramach projektów realizowanych w Pracowni

Sterowania i Dynamiki Układów IPPT PAN, dotyczących oddziaływania pojazdów szynowych na otoczenie, finansowanych przez Komitet Badań Naukowych.

W okresie tym powstało 15 prac dotyczących wyżej wymienionej tematyki. Prace zostały opublikowane w międzynarodowych czasopismach z listy JCR (5), recenzowanych czasopismach zagranicznych i krajowych (7) oraz materiałach konferencyjnych (3).

4.2. Okres po doktoracie

Po obronie pracy doktorskiej, wraz ze zdobyciem projektu „Lider”, finansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, zająłem się zagadnieniem półaktywnego tłumienia drgań wywołanych ruchomymi obciążeniami. Celem projektu było opracowanie własności inteligentnego materiału tłumiącego, znajdującego się w torze kolejowym, pozwalającego znacząco zmniejszyć poziom drgań przenoszonych na otaczające budynki i infrastrukturę. W pierwszym etapie badań założono, że odpowiednio dobrana strategia półaktywnego tłumienia drgań będzie dużo skuteczniejsza od klasycznych rozwiązań pasywnych. W ramach projektu zaprojektowano oraz zbudowano prototypowe stanowisko, w którym tłumiki magnetoreologiczne symulują inteligentny materiał tłumiący. Skuteczność opracowanej adaptacyjnej strategii sterowania potwierdzono pomiarami eksperymentalnymi. Przeprowadzone symulacje komputerowe wykazały poprawę skuteczności proponowanego rozwiązania wraz ze wzrostem prędkości obciążenia. W dalszym etapie postulowano zastąpienie półaktywnych elementów podlegających sterowaniu, materiałem działającym pasywnie, charakteryzującym się własnościami reologicznymi pozwalającymi realizować opracowane uprzednio strategie. Założenia projektu oraz opracowane w ramach projektu własności materiału adaptacyjnego przedstawiłem m.in. w pracy [8]. Równoległe pracowałem nad uniwersalnym numerycznym opisem ruchomego obciążenia masowego. Opracowałem elementy skończone opisujące ruchomą masę, które można wykorzystać w dowolnych konstrukcjach inżynierskich. Wyniki przedstawiłem w rozdziałach monografii [2] wydanej nakładem wydawnictwa Springer oraz pracach [12,21]. Przedstawiłem tam uniwersalne macierze, opisujące chwilowe położenie masy poruszającej się po dowolnej trajektorii, zarówno w ujęciu klasycznym, jak i czasoprzestrzennym. Aby przetestować numerycznie interakcję między ruchomym obciążeniem a torem wyposażonym w materiał z opracowaną charakterystyką tłumiącą niezbędny był poprawny model komputerowy pojazdu szynowego. Skupiłem prace przede

wszystkim nad właściwym numerycznym symulowaniem przejazdu koła kolejowego po szynie, często błędnie zastępowanego w literaturze ruchomym oscylatorem prostym lub złożonym. Wykazałem, że w prawidłowym modelu dynamicznym część masy toczącego się koła powinna być stowarzyszona z szyną [9]. Pracowałem również nad numerycznym symulowaniem przebiegu zjawisk falowych wywołanych ruchomym obciążeniem w układach nieograniczonych. Skuteczna metoda obliczeniowa umożliwiłaby ograniczenie zadania, pierwotnie o bardzo dużej liczbie stopni swobody, do zadania znacznie mniejszego. Ze względu na istnienie rozwiązania analitycznego rozpatrzono przypadek stanu ustalonego nieskończonej belki Timoszenki na podłożu sprężystym, poddanej działaniu ruchomej siły rozłożonej. Zastosowano metodę czasoprzestrzennych elementów skończonych z czasoprzestrzennymi elementami skończonymi w kształcie sympleksów. Elementy tego typu umożliwiają propagację informacji w siatce dyskretyzowanego obszaru z ograniczoną prędkością. Stanowi to dodatkowo pewną poprawę własności rozwiązań numerycznych w układach opisywanych równaniami różniczkowymi hiperbolicznymi. Własności powszechnie stosowanych rozwiązań numerycznych opartych na schematach całkowania równań ruchu grupy Newmarka nabierają cech równań parabolicznych. Otrzymane wyniki zaprezentowałem w pracy [10].

W latach 2009-12 uczestniczyłem w projekcie poświęconym budowie interaktywnego środowiska programistycznego do rozwiązywania zadań sterowania optymalnego – IDOS. Zespół nasz zaangażowany był w wydzieloną część projektu związaną z zadaniami opisanymi równaniami różniczkowymi cząstkowymi. Raport z prowadzonych prac przedstawiono w dwóch rozdziałach książki [3]. Zakres prac, koordynowanych przez Wydział Mechatroniki Politechniki Warszawskiej, obejmował opracowanie narzędzi programowych do rozwiązywania zadań optymalizacji z zastosowaniem m.in. pakietów DEAL II i IPOpt.

W ramach prac statutowych prowadzonych w IPPT zająłem się także półaktywnym tłumieniem drgań w układach wirujących. W praktyce, zmiana warunków pracy urządzenia pociąga za sobą wzrost niekorzystnych parametrów dynamicznych, prowadzących do uszkodzenia maszyny. Redukcja drgań skrętnych jest trudna, często urządzenie musi zostać przeprojektowane. Rozwiązania w postaci dołączanych klasycznych dynamicznych absorberów drgań wyposażonych w pasywne tłumiki okazują się w wielu przypadkach niewystarczające. Odpowiednio dobrana strategia sterowania tłumikiem w czasie pojedynczych cykli, pozytywnie wpływa na dynamikę układu, umożliwiając bardziej efektywną redukcję drgań

skrętnych. Zaproponowano dołączony, obrotowy, półaktywnie sterowany dynamiczny eliminator drgań. Udowodniono analitycznie i potwierdzono eksperymentalnie, że okresowe włączanie obrotowego tłumika magnetoreologicznego umożliwia znaczne zmniejszenie poziomu amplitud drgań w większym stopniu, niż rozwiązanie pasywne, polegające na tłumieniu ciągłym. Wyniki teoretyczne zostały potwierdzone eksperymentalnie na stanowisku badawczym. W praktyce półaktywny dynamiczny eliminator drgań powinien być okresowo przełączany z częstością równą podwójnej częstości wirowania wału. Efektem prowadzonych prac był artykuł [11].

W roku 2014 zdobyłem projekt „Sonata”, finansowany przez Narodowe Centrum Nauki. Istotą projektu jest połączenie w jedną całość dwóch elementów: struktury warstwowej elementów sprężystych, np. belek lub płyt, z rdzeniem o zmiennych własnościach, oraz koncepcji adaptacyjnego sterowania. Jak dotąd temat ten w literaturze praktycznie nie był podejmowany, prawdopodobnie z powodu multidyscyplinarności problemu i konieczności zastosowania teorii z pogranicza sterowania optymalnego oraz dynamiki konstrukcji. Inteligentny rdzeń stanowiony jest przez magnetoreologiczny elastomer, który pod wpływem zmiany pola magnetycznego zmienia swoje własności mechaniczne. Dzięki temu mamy możliwość sterowania sztywnością całej konstrukcji, co pozwala w istotny sposób wpływać na jej własności dynamiczne, umożliwiając jednocześnie w większym stopniu minimalizowanie amplitudy drgań. Zyskujemy możliwość zwiększenia nośności konstrukcji poddanej obciążeniom dynamicznym, a co za tym idzie zmniejszenia jej masy. Możliwości, jakie niesie półaktywne sterowanie rdzeniem w drgającej strukturze warstwowej z wymuszeniem wstępnym, przedstawiono w pracy [6].

W ostatnim okresie zajmowałem się także wykorzystaniem materiałów granulowanych w półaktywnym tłumieniu drgań. Absorber zbudowany jest z sypkiego granulatu zamkniętego w szczelnym rękawie. Własności dynamiczne takiego materiału możemy modyfikować za pomocą niewielkiego podciśnienia, przechodząc ze stanu sypkiego w stan stały. Własności tłumiące różnego typu materiałów granulowanych oraz ich uproszczony model reologiczny przedstawiono w pracy [7]. Skuteczność sterowanego półaktywnie układu dwóch belek sprzężonych absorberem wypełnionym granulatem sterowanym podciśnieniem zaprezentowano w pracach [4,5].

Prace prowadzone nad inteligentnym tłumieniem drgań z wykorzystaniem

elastomerów magnetoreologicznych oraz materiałów granulowanych są również częścią rozprawy doktorskiej dra Jacka M. Bajkowskiego, której byłem promotorem pomocniczym.

Rozpatrywane przeze mnie zagadnienia przedstawiłem na światowej konferencji tematycznej w Barcelonie [19]. Ostatecznym podsumowaniem prowadzonych dotąd prac jest monografia [1].

Wyniki prac zostały opublikowane w czasopismach z listy JCR (9), w monografiach w języku angielskim (2), rozdziałach w książce w języku angielskim (2), recenzowanych czasopismach zagranicznych i krajowych (9) oraz materiałach konferencyjnych (10).

4.3. Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników prac stanowiących podstawę wszczęcia postępowania habilitacyjnego

Stale rosnące wymagania stawiane konstrukcjom inżynierskim, takie jak zwiększenie odporności na obciążenia dynamiczne czy redukcja masy, wymuszają zastosowanie nowych rozwiązań technicznych. Rokujące spore nadzieje, a zarazem relatywnie tanie, okazują się być struktury adaptacyjne, które w sposób półaktywny dostosowują się do zaistniałych warunków, np. związanych ze zmiennym obciążeniem zewnętrznym. Pionierskie koncepcje integracji systemów półaktywnego sterowania z inżynierią konstrukcji, transportem i robotyką liczą sobie już kilka dekad. Układy oparte na działaniu półaktywnych tłumików elektro lub magnetoreologicznych są atrakcyjną alternatywą względem układów pasywnych i aktywnych. Przy trafnie opracowanych algorytmach sterowania systemy półaktywne dają lepsze rezultaty aniżeli pasywne układy tłumiące. Z kolei ze względu na niskie wymagania energetyczne stanowią mocną konkurencję wobec układów ze sterowaniem aktywnym. Z biegiem lat wyraźnie obserwujemy, jak półaktywne systemy wypierają układy pasywne i aktywne, a dzieje się tak również za sprawą pojawiania się coraz ciekawszych rozwiązań konstrukcji półaktywnych absorberów drgań. Dziś już nie tylko płyny reologiczne, ale także o wiele tańsze materiały granulowane sterowane niewielkim podciśnieniem mogą posłużyć za medium takich absorberów. Bogactwo własności elementów wykonawczych otwiera nowe możliwości przy projektowaniu algorytmów sterowania.

Przedstawiony cykl publikacji dotyczy wybranych grup problemów inżynierskich, skupionych wokół metody półaktywnego tłumienia drgań konstrukcji z wykorzystaniem nieklasycznych materiałów inteligentnych. Ze względu na

odmienne zewnętrzne wymuszenia drgań konstrukcji, każdy przypadek wymaga innej strategii sterowania.

Pierwsza grupa zagadnień dotyczy dynamiki konstrukcji poddanej ruchomemu obciążeniu. Prace te docelowo obejmowały swym zakresem przede wszystkim opracowanie koncepcji sterowania półaktywnego, pozwalającego na określenie własności reologicznych materiału tłumiącego, który realizowałby założoną strategię. W tym celu opracowano odpowiedni model numeryczny pojazdu szynowego. Wyprowadzono oryginalne elementy skończone, przenoszące poruszającą się cząstkę masową. Przewagą rozwiązania nad dotychczas stosowanym podejściem jest możliwa uniwersalność użycia. Macierze opisujące poruszającą się masę możemy zastosować do dowolnej konstrukcji poddanej w procesie obliczeniowym dyskretyzacji. Opis numeryczny przeprowadzono za pomocą metody czasoprzestrzennych elementów skończonych, a następnie uogólniono na klasyczną metodę elementów skończonych. Opracowany przeze mnie algorytm został wykorzystany do budowy uproszczonego modelu koła kolejowego, w którym część toczącego się koła stowarzyszona jest z szyną. Koncepcja ta została potwierdzona obliczeniami numerycznymi oraz pomiarami doświadczalnymi. Zajmowałem się także numerycznym badaniem zjawisk falowych zachodzących w nieograniczonych strukturach pod ruchomym obciążeniem. Aktualnie stosowane metody numeryczne prowadzą do zadań o dużej liczbie stopni swobody. Zaprezentowana przeze mnie metoda obliczeniowa znacznie zmniejsza rozmiary zadania, dzięki czemu stanowi mniejszy koszt w procesie optymalizacji. Na podstawie przygotowanych modeli numerycznych opracowano własności materiału inteligentnego, które pozytywnie zweryfikowano doświadczalnie na stanowisku badawczym za pomocą sterowanych w czasie tłumików magneto-reologicznych. W przypadku większych prędkości przejazdów weryfikację przeprowadzono w opracowanym programie komputerowym.

Kolejna grupa zagadnień dotyczy półaktywnego tłumienia drgań skrętnych w układach wirujących. W celu zmniejszenia amplitudy drgań w istniejącym urządzeniu mechanicznym zaproponowano dołączony do układu inteligentny dynamiczny eliminator drgań. Prowadziłem prace związane z opracowaniem strategii sterowania obrotowym tłumikiem magneto-reologicznym. Celem było osiągnięcie poziomu drgań w układzie na wyraźnie niższym poziomie niż w przypadku zastosowania pasywnego eliminatora drgań. Aby rozwiązać zadanie sterowania optymalnego, konieczne było opracowanie uproszczonego modelu analitycznego i numerycznego badanego problemu. Opracowana koncepcja półaktywnego

sterowania została pozytywnie zweryfikowana doświadczalnie na stanowisku badawczym.

Ostatnią grupą problemów stanowią zagadnienia inteligentnego tłumienia drgań układów wywołanych zaburzeniem początkowym. Adaptacyjną konstrukcję stanowi struktura warstwowa z rdzeniem o zmiennych własnościach mechanicznych. W pierwszym przypadku inteligentny rdzeń stanowi magnetoreologiczny elastomer, który pod wpływem zmiany pola magnetycznego zmienia swoje własności mechaniczne. Opracowałem odpowiednie modele fizyczne i matematyczne. Model belki warstwowej oparty został na układzie ciągłym. Reprezentacja powyższego modelu w języku matematyki ma postać zdyskretyzowanych równań dynamicznych, wyprowadzonych za pomocą metody elementów skończonych. Dysponując modelem dynamiki układu oraz funkcjonalem jakości sterowania sformułowano i rozwiązano zadanie sterowania optymalnego.

W drugim przypadku mamy do czynienia z materiałem granulowanym sterowanym podciśnieniem. Na podstawie uproszczonego modelu matematycznego materiału inteligentnego opracowano skuteczną koncepcję sterowania, pozwalającą zmniejszyć amplitudę drgań układu w stopniu znacznie wyższym, niż rozwiązanie pasywne. Dodatkowe badania prowadzone były w zakresie własności tłumiących materiałów granulowanych. Otrzymane strategie półaktywnego sterowania zostały pozytywnie zweryfikowane eksperymentalnie na stanowisku badawczym.

4.4. Szczegółowe omówienie celu naukowego poszczególnych prac oraz osiągniętych wyników

Pozycja [A1] w przedłożonym do oceny cyklu publikacji dotyczy uniwersalnego numerycznego opisu cząstki masowej poruszającej się bez utraty kontaktu po drgającej konstrukcji. Prowadzone w ramach pracy doktorskiej badania numeryczne dotyczące nieciągłości trajektorii ruchomego obciążenia inercyjnego poruszającego się wzdłuż struny wskazało drogę postępowania w opracowaniu czasoprzestrzennych elementów skończonych cząstki masowej, które można by użyć w dowolnych konstrukcjach. Warto wspomnieć, że na rynku komercyjnych pakietów obliczeniowych nie ma takich, które umożliwiałyby wprost dyskretyzację i symulowanie ruchomego obciążenia, zwłaszcza inercyjnego. Namiastkowo cel taki można uzyskać w pakietach obliczeniowych Adams/Rail lub Medina, opartych na modelach dynamiki ciał wielocłonowych (multibody). Te wyspecjalizowane programy do symulacji kolejowych służą do określenia zawieszenia pojazdu,

zestawów kołowych, kontaktu koło-szyna, a także innych istotnych cech konstrukcyjnych sparametryzowanych modeli pojazdów szynowych. Stosunkowo szybki czas obliczeń wymusza ograniczenie zadania poprzez zastosowanie sztywnego toru. Wiąże się to ze znacznymi ograniczeniami w symulacjach dynamicznych odpowiedzi konstrukcji poddanej ruchomemu obciążeniu. Celem pracy było opracowanie uniwersalnego macierzowego opisu ruchomej masy za pomocą metody czasoprzestrzennych elementów skończonych, który byłby skuteczny także w zadaniach falowych. W sformułowaniu czasoprzestrzennym dokonujemy dyskretyzacji zadania zarówno w czasie, jak i w przestrzeni. Zakładamy równowagę energetyczną w założonym przedziale czasu, a nie tylko w wybranych momentach, jak w klasycznej metodzie elementów skończonych. Umożliwia to jasną interpretację fizyczną otrzymanych formuł macierzowych opisujących badany obiekt. W pracy zastosowano wariant prędkościowy metody czasoprzestrzennej, czyli w procesie dyskretyzacji rozpatrujemy interpolację prędkości wartości węzłowych. W przypadku układów obciążonych ruchomą siłą symulacje komputerowe nie nastroczą problemów. Obliczenia dotyczące ruchomego obciążenia nieinercyjnego o stałej lub zmiennej w czasie amplitudzie są łatwe do przeprowadzenia i polegają na krokowej modyfikacji wektora obciążeń. Inaczej jest w przypadku ruchomych obciążeń inercyjnych. Z uwagi na trudności obliczeniowe badacze zwykle zastępują masę lub układ mas zestawem odpowiednio dobranych sił. W takim przypadku mamy jednak do czynienia z innym zadaniem, w przybliżony sposób opisującym problem pierwotny. Takie stałe obciążenie w istotny sposób zmienia jakościowo i ilościowo wyniki obliczeń. Numeryczny opis ruchomego obciążenia bezwładnościowego w przypadku zadań falowych wymaga dużej staranności matematycznej. W przeciwnym razie otrzymujemy rozwiązania błędne. Uwzględnienie bezwładności ruchomego obciążenia wymaga nie tylko modyfikacji wektora prawych stron, ale także wybranych fragmentów globalnych macierzy bezwładności, tłumienia i sztywności układu, w każdym kroku obliczeniowym. W literaturze możemy znaleźć prace poświęcone belce Eulera lub płycie Kirchhoffa, w których przemieszczenia oraz kąty węzłowe interpolowane są sześciennymi wielomianami hermitowskimi. Zastosowanie interpolacji wielomianem 3-go stopnia nie nastrocza problemów z wyprowadzeniem macierzy odpowiedzialnych za ruch punktu masowego. Proponowany opis ruchu masy jest skuteczny, ale ograniczony w zastosowaniu. Niestety, równanie belki Eulera nie jest równaniem falowym. Badanie zjawisk falowych jest możliwe dzięki zastosowaniu bardziej złożonego modelu belki

Timoszenki, w którym równanie drgań uwzględnia wpływ sił poprzecznych oraz momentów sił bezwładności obrotu na linię ugięcia belki. Niezależne liniowe interpolowanie przemieszczeń i kątów obrotu w belce Timoszenki wywołuje poważne trudności obliczeniowe, ponieważ liniowe funkcje kształtu, uniemożliwiają wyznaczenie przyspieszenia odśrodkowego ruchomej masy. W pracy zaprezentowałem rozwiązanie problemu całkowania energii związanej z przyspieszeniem odśrodkowym w przypadku liniowych funkcji kształtu. Dzięki przedstawieniu wzoru Renaudota opisującego przyspieszenie ruchomej masy w odpowiedniej formie matematycznej oraz zastosowaniu formuły różnicowej ustrzegłem się przed nie fizycznym zredukowaniem wpływu siły odśrodkowej na badany układ. Wyprowadziłem uniwersalne czasoprzestrzenne macierze ruchomej masy oraz czasoprzestrzenne macierze opisujące drgania struny, belki Eulera i belki Timoszenki. Przygotowane przeze mnie programy komputerowe posłużyły do weryfikacji wyprowadzonych macierzy. Otrzymane wyniki numeryczne porównałem z rozwiązaniami analityczno-numerycznymi zaczerpniętymi z literatury.

Do oryginalnych osiągnięć naukowych pracy należy wyprowadzenie oryginalnych czasoprzestrzennych elementów skończonych opisujących poruszającą się cząstkę masową. Przewagą proponowanego numerycznego opisu ruchomej masy nad dotychczas stosowanymi metodami jest możliwość zastosowania wyprowadzonych macierzy do dowolnej konstrukcji, także w zadaniach falowych.

W artykule [A2] zostały przedstawione zagadnienia dotyczące numerycznego modelowania dynamiki pojazdów szynowych. Gruntowne poznanie zjawisk falowych towarzyszących szybko poruszającym się obciążeniom jest niezbędne w konstruowaniu pojazdów oraz torów o jeszcze lepszych parametrach eksploatacyjnych. Opracowanie metody skutecznego tłumienia niekorzystnych drgań wymaga m.in. budowy poprawnego modelu numerycznego, symulującego możliwie wiernie badany układ, zachowując przy tym rozsądny czas obliczeń. Masa koła kolejowego poruszającego się po szynie powinna być poprawnie modelowana, tak aby przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia wybranych punktów referencyjnych były zgodne z wynikami pomiarów doświadczalnych. Celem pracy było opracowanie uproszczonego modelu koła kolejowego, który wystarczająco dokładnie odwzorowuje problem rzeczywisty, a przy tym nie wymagał zbyt dużych nakładów obliczeniowych. W praktyce inżynierskiej oraz w większości prac naukowych

dotyczących badania wpływu przemieszczających się obciążeń na dynamiczną odpowiedź konstrukcji stosuje się najłatwiejszą drogę postępowania. Zakłada się, że obiekt ruchomy, koło kolejowe, styka się z konstrukcją w sposób sprężysty. Mimo że mamy do czynienia z ciałem odkształcalnym, to sztywność koła kolejowego w jego płaszczyźnie jest znacznie większa niż usprężynowania wózka wagonowego. Masa koła wraz z częścią osi wynosi ok. 750 kg, a masa metra bieżącego szyny zaledwie 60 kg. Nawet po uwzględnieniu masy podkładów i części podtorza w oszacowaniu bezwładności toru zauważamy, że nie możemy zignorować udziału masy koła w drganiach pionowych toru. Nie możemy w prosty sposób zastąpić masy kół jedynie odpowiednimi siłami grawitacji. Stosowany dotąd w literaturze klasyczny uproszczony model koła kolejowego znacznie przeszacowuje wartości przyspieszenia pionowego toru. W pracy postuluje się, że poprawny uproszczony model numeryczny dynamiki koła kolejowego poruszającego się po szynie powinien zawierać parę mas, sprzężenie sprzęgniętych ze sobą. Jedną z mas stowarzyszona jest z szyną, podczas gdy druga masa traktowana jest klasycznie jako oscylator. Proponowany model rozdzielenia masy koła został opracowany na podstawie rozwiązania rzeczywistego modelu koła będącego w kontakcie z szyną, za pomocą metody elementów skończonych. Z powodu dużej złożoności problemu dynamicznego tylko pionowe drgania układu zostały rozpatrzone, bez uwzględniania ruchu poprzecznego oraz wzdłużnego koła (tj. oscylacji w kierunku jazdy i w kierunku poprzecznym do kierunku jazdy). Współczynnik rozdzielenia masy wyznaczono w zadaniu minimalizacji, w którym funkcja celu wyraża stopień dopasowania dwóch krzywych, przemieszczeń i przyspieszeń w czasie układu referencyjnego i zastępczego. Porównywano zarówno amplitudę, jak i okres drgań. Wykazano, że uproszczony model obliczeniowy koła kolejowego powinien uwzględniać rozdział masy, przy czym dolna część powinna zawierać ok. 23% masy całego koła. Aby zbadać skuteczność opracowanego modelu, wykonano symulacje numeryczne pojazdu szynowego poruszającego się z dużą prędkością po torze kolejowym, przy pomocy własnego programu komputerowego, opartego na opracowanym wcześniej uniwersalnym opisie ruchomego obciążenia bezwładnościowego. Otrzymane wyniki zweryfikowano z pomiarami eksperymentalnymi rzeczywistego pojazdu dostępnymi w literaturze oraz porównano z rozwiązaniami otrzymanymi przy pomocy komercyjnego pakietu obliczeniowego Adams/Rail.

Do oryginalnych osiągnięć naukowych pracy należy przede wszystkim opracowanie uproszczonego modelu koła kolejowego, który w dużym stopniu

odzwierciedla własności dynamiczne rzeczywistego obiektu. W szczególności stwierdzono, że do uzyskanie poprawności wyników dynamicznych należy ok. $\frac{1}{4}$ masy koła stowarzyszyć w szynę. Potwierdzają to zgodności wyników pomiarów przemieszczeń oraz przyspieszeń otrzymanych eksperymentalnie. Stosowany dotąd uproszczony model koła kolejowego znacznie zawyżał wartości przyspieszeń w stosunku do wyników pomiarowych. Również obliczenia komputerowe wykonane powszechnie używanym komercyjnym pakietem obliczeniowym prowadzą do wyników bardzo odległych od oczekiwanych.

W artykule [A3] przedstawiłem zagadnienia związane z numerycznym symulowaniem zjawisk falowych wywołanych ruchomym obciążeniem w układach nieograniczonych. Analityczne rozwiązania zagadnień ruchomych obciążeń poruszających się po nieskończonych układach są powszechnie znane w literaturze. W przypadku rozwiązań numerycznych, za pomocą metody elementów skończonych, nieskończoność badanego układu musi zostać wprowadzona sztucznie. Najczęściej stosowane są obiekty o znacznych rozmiarach. Kosztem takiej operacji jest niepomiarowo wysoki czas obliczeń. Próbuje się również ograniczyć wpływ brzegów konstrukcji na rozwiązanie, za pomocą odpowiednio dobranych elementów tłumiących. Niestety, ta metoda postępowania jest skuteczna tylko w prostych zadaniach, w których znamy dokładnie kształt zaburzenia pojawiającego się na brzegu. Celem pracy było opracowanie skutecznej numerycznej metody obliczeniowej, umożliwiającej ograniczenie zadania pierwotnie o dużej liczbie stopni swobody do zadania znacznie mniejszego, w którym brzegi badanej konstrukcji nie wpływałyby na otrzymane rozwiązanie. Zaproponowana przeze mnie metoda obliczeniowa znacznie zmniejsza rozmiar zadania, dzięki czemu stanowi mniejszy koszt procesu numerycznego. Ze względu na istnienie rozwiązania analitycznego, które posłużyło do weryfikacji rozwiązań numerycznych, rozpatrzono przypadek stanu ustalonego nieskończonej belki Timoszenki spoczywającej na podłożu sprężystym oraz poddanej działaniu ruchomej siły rozłożonej. Rozwiązanie otrzymano przy założeniu, że mamy do czynienia z zadaniem stacjonarnym, którego układ odniesienia porusza się wraz z frontem obciążenia. Prezentowane w literaturze symulacje numeryczne układów dynamicznych opierają się na jawnych i niejawnym schematach całkowania w czasie. Ze względu na formę macierzy bezwładności, metody obliczeniowe mają istotne własności, które znacząco wpływają na rozwiązanie w zadaniach falowych. Decyduje o tym przepływ informacji

w czasoprzestrzennej siatce podczas obliczeń z kroku na krok. Rozprzestrzenianie informacji w siatce elementów jest rodzajem fali niezwiązanej z zadaniem fizycznym, ale związanej z procesem numerycznym. Kiedy macierz bezwładności jest konsystentna, informacja przekazywana jest z węzła do węzła w kolejnych krokach czasowych z nieskończenie dużą prędkością. Zaburzenie pojawiające się w jednym punkcie konstrukcji wpływa w następnym kroku na każdy węzeł układu, skutkując niezerowymi wartościami węzłowymi w całej czasoprzestrzennej siatce. Nieskończenie duża prędkość propagacji informacji w siatce występuje zarówno w metodach jawnych, jak i niejawnych. Własność ta jest charakterystyczna także dla metody czasoprzestrzennych elementów skończonych z typowymi elementami w kształcie multipleksów. Nieskończona prędkość przepływu informacji jest typową własnością fizyczną zadań parabolicznych, podczas gdy w zadaniach falowych, czyli hiperbolicznych charakterystyczna jest ograniczona prędkość przepływu informacji. Przedstawione numeryczne zachowanie klasycznych schematów całkowania równań ruchu traktować trzeba jako poważną wadę w zadaniach falowych nieskończonych układów, prowadzącą do niefizycznych odbić fal od brzegów siatki elementów skończonych, wpływających negatywnie na otrzymywane wyniki. Aby uniknąć powyższych wad, użyłem metody czasoprzestrzennych elementów skończonych, stosując siatkę podziału w kształcie sympleksów. Elementy tego typu mają interesującą własność, umożliwiającą przepływ informacji w jednym kierunku ze skończoną prędkością rozchodzenia się zaburzeń. Jest to możliwe dzięki trójkątnym macierzom rozpatrywanego układu równań algebraicznych. Własność jednokierunkowego przepływu informacji może być z powodzeniem wykorzystana w zadaniach z ruchomym obciążeniem. Jeśli użyjemy elementy symplektyczne z ukośnymi bokami pochylonymi w kierunku ruchu obciążenia oraz dobierzemy odpowiednio rozmiar czasoprzestrzennych elementów, spowodujemy zrównanie prędkości rozprzestrzeniania się informacji numerycznej w węzłach z prędkością ruchomego obciążenia. Odpowiednio przeprowadzona dyskretyzacja umożliwia propagację informacji w określonym kierunku ze zredukowaną prędkością. Węzły siatki znajdujące się przed ruchomym obciążeniem nie są zaburzone przez niefizyczne informacje w kolejnych krokach czasowych, jak to ma miejsce w konwencjonalnych metodach numerycznych. Tak więc informacja, a w konsekwencji odbite fale nigdy nie dogonią ruchomego obciążenia. Obszar zaburzenia powodowany przez ruchome obciążenie umożliwia nam ograniczenie obserwacji do obszaru zlokalizowanego w ścisłym otoczeniu pozycji obciążenia.

Wyodrębnienie podukładu elementów skończonych umożliwia w prosty sposób znaczące zmniejszenie rozmiaru rozpatrywanego zadania.

Do oryginalnych osiągnięć naukowych pracy należy wyprowadzenie oryginalnych macierzy opisujących drgania belki Timoszenki na podłożu sprężystym oraz rozłożone ruchome obciążenie. Opracowano programy komputerowe realizujące zaprezentowane zagadnienie, zarówno w przypadku czasoprzestrzennym z elementami symplektycznymi, jak i klasycznym całkowaniem metodą Newmarka. Własność zaproponowanej metody umożliwia redukcję zadania o dużym rozmiarze do układu znacznie mniejszego. Zredukowany nieskończony układ rozwiązany bez numerycznych sztuczek tłumiących fale, odbite od brzegów konstrukcji, wykazuje bardzo wysoką zgodność wyników obliczeń z rozwiązaniem analitycznym. Przeprowadzono również analizę stabilności zaproponowanej metody obliczeniowej. Anizotropia czasoprzestrzeni skutecznie wpływa na poprawność wyników numerycznych zadań falowych. Zdobyte doświadczenie umożliwia symulowanie bardziej złożonych układów, takich jak przejazd pojazdów szynowych. Stosunkowo szybki czas obliczeń pozwala znacznie przyspieszyć proces optymalizacji parametrów dynamicznych toru lub samego pojazdu szynowego.

W pracy [A4] zostały przedstawione zagadnienia dotyczące adaptacyjnego tłumienia drgań konstrukcji pod działaniem ruchomego obciążenia inercyjnego. Artykuł ten jest częściowo podsumowaniem kierowanego przeze mnie projektu badawczego. Celem pracy, jak i całego projektu, było opracowanie metody stabilizacji torowiska poprzez adaptacyjne tłumienie drgań wywołanych przejazdem pojazdów szynowych, z wykorzystaniem inteligentnego materiału dostosowującego się do zaistniałych warunków. Przejazd pociągu generuje w torze kolejowym fale sprężyste, których oddziaływanie wpływa negatywnie na tor i podtorze oraz może destabilizować toczenie się zestawów kołowych i ruch pociągu. Zależnie od tego, czy fala będzie dostrojona do częstotliwości pasma przenoszenia lub zanikania, będzie wzmagać lub osłabiać wibracje. Takie zaburzenie może zwiększyć poziom drgań zarówno pojazdu szynowego, jak i toru kolejowego. Wzbudzenie toru wywołuje drgania parasejsmiczne, które w postaci fali powierzchniowej, np. Rayleigha lub fal poprzecznych, wpływają na pobliską infrastrukturę. Prowadzone w naszej pracowni prace teoretyczne dawały nadzieję, że odpowiednio dobrana strategia półaktywnego tłumienia drgań jest dużo skuteczniejsza od klasycznych rozwiązań pasywnych. Idea inteligentnej redukcji drgań konstrukcji poddanej ruchomemu obciążeniu została

zaprezentowana w akademickim przykładzie, opartym na modelu belki Eulera, podpartej na dwóch podporach o możliwej zmianie parametrów tłumienia w czasie. W początkowej fazie zadania pierwsza podpora jest włączona, podczas gdy druga jest wyłączona i dzięki temu druga część belki zyskuje pewną nadwyżkę przemieszczeń. W końcowym etapie procesu drugi tłumik działa jako sztywna podpora, podczas gdy pierwszy tłumik wyłącza się, nie blokując podnoszenia pierwszej części belki. Strategia ta może zostać wykorzystana w przypadku układów o większej złożoności, składających się z serii podpór. W pracy przedstawiono symulacje komputerowe, które pozwoliły określić niekorzystną postać drgań kierowanych do gruntu oraz modyfikację parametrów toru kolejowego, by niekorzystne postaci drgań minimalizować. Na podstawie minimalizacji funkcji celu określono funkcje sterujące podporami. Układ dynamiczny został opisany przez układ liniowych równań różniczkowych, natomiast wskaźnik jakości, który ma być zminimalizowany, opisany jest funkcjonalem kwadratowym. Minimalizujemy przemieszczenia pionowe wybranych punktów belki oraz przemieszczenie pionowe pod ruchomym obciążeniem. Dodatkowo przyjęto skończony czas obserwacji. Jest to zadanie sterowania liniowo-kwadratowego, które, ze względu na niegładkie odpowiedzi układu dynamicznego, jest niezwykle trudne do rozwiązania. Funkcja celu ma lokalne minima, a konieczne jest poszukiwanie minimum globalnego. Dobrze znane narzędzia gradientowe w tym przypadku są nieskuteczne, ponieważ globalne minima mogą zmieniać swoje położenie przy nieznacznej nawet zmianie parametrów zadania. Mała zmiana sterowania może spowodować pogłębienie lokalnego minimum i jej przemianę w minimum globalne. Z tego powodu, mała zmiana w sterowaniu powoduje dużą zmianę zmiennych decyzyjnych. W takiej sytuacji nie możemy poruszać się wzdłuż gradientu funkcji celu. Ponieważ liczba zmiennych w rozpatrywanym zadaniu jest niska, możemy z powodzeniem użyć metod losowych. Metoda systematycznego przeszukiwania jest bezużyteczna z powodu jednak zbyt długiego czasu obliczeń. W pracy zastosowano własną metodę, będącą połączeniem metod genetycznych oraz metod gradientowych. Jest to metoda Monte Carlo ze zmienną liczbą zmiennych decyzyjnych w każdym kolejnym kroku obliczeniowym. Zmienne są losowane z okolicy najlepszego rozwiązania, pozwalając na jedno losowanie w szerszym zakresie. Szukamy rozwiązania w coraz mniejszej kostce, od czasu do czasu dopuszczając rozwiązania w znacznym oddaleniu od aktualnego minimum, w wybranych podprzestrzeniach. Metoda ta okazała się być skuteczna

w prezentowanym zadaniu. Opracowane własności materiału inteligentnego zostały pozytywnie zweryfikowane doświadczalnie na zaprojektowanym i zbudowanym prototypowym stanowisku badawczym. Skuteczność strategii sterowania potwierdzono za pomocą sterowanych w czasie tłumików magnetoreologicznych symulujących poszukiwany materiał inteligentny. Okresowo działające tłumiki są bardziej skuteczne od tych włączonych na stałe. Amplitudy przemieszczeń w wybranych punktach belki oraz pod ruchomą masą na stanowisku badawczym, pozwalającym na realizację prób w mocno ograniczonym zakresie, zostały obniżone o ponad 10%. W przypadku większych prędkości przejazdów obciążenia, weryfikację strategii sterowania materiałem przeprowadzono w przygotowanym programie komputerowym. Symulacje komputerowe wykazały poprawę skuteczności proponowanego rozwiązania wraz ze wzrostem prędkości przejazdu, sięgającą 40%. Poza tym wykazano, że duża liczba tłumików dodatkowo poprawia skuteczność strategii półaktywnego tłumienia. Ze względów ekonomicznych dążymy do stworzenia rozwiązania taniego. Złożony układ dynamiczny, pozwalający na zewnętrzne półaktywne sterowanie jego parametrami, powinien zostać zastąpiony układem prostym, w którym czynnikiem decydującym o własnościach dynamicznych i w efekcie o skuteczności działania, będzie materiał inteligentny, o odpowiednio dobranych własnościach reologicznych.

Do oryginalnych osiągnięć naukowych pracy należy opracowanie metody postępowania pozwalającej podnieść skuteczność obniżania amplitud przemieszczeń konstrukcji oraz wyznaczenie własności reologicznych inteligentnego materiału tłumiącego, określonego na podstawie własnoręcznie wykonanych symulacji numerycznych oraz badań stanowiskowych układu wyposażonego w tłumiki magnetoreologiczne sterowane półaktywnie.

W artykule [A5] przedstawiono zagadnienia związane z półaktywnym tłumieniem drgań skrętnych w układach wirujących. Rosnące wymagania stawiane przed istniejącymi konstrukcjami inżynierskimi, na przykład w wyniku konieczności zwiększenia wydajności ich pracy, na ogół prowadzą do niekorzystnego wzrostu amplitudy drgań. Skutkuje to przyspieszonym zużyciem konstrukcji oraz możliwością nagłej awarii. Przystosowanie urządzenia do pracy w nowych warunkach eksploatacyjnych poprzez jej przeprojektowanie wiąże się z bardzo wysokimi kosztami. Dlatego też inżynierowie starają się zmniejszyć poziom drgań konstrukcji za pomocą znacznie tańszych, dołączanych do układu absorberów. Aby poprawić

parametry dynamiczne urządzenia możemy zastosować tzw. dynamiczny eliminator drgań, lecz nie zawsze przynosi to oczekiwane rezultaty. W pracy zaproponowano inteligentny dynamiczny eliminator drgań, oparty na sterowanym półaktywnie obrotowym tłumiku magnetoreologicznym. Celem było opracowanie odpowiedniej strategii sterowania tłumikiem w czasie, dzięki czemu możliwa jest bardziej efektywna redukcja drgań skrętnych badanego układu, w stosunku do rozwiązania pasywnego. Rozwiązanie postawionego problemu rozpoczęto od zadania uproszczonego. Rzeczywista konstrukcja została zastąpiona jednorodnym swobodnie podpartym wałem o stałym przekroju poprzecznym. W zadaniu uwzględniono okresowe wymuszenie drgań zadane funkcją sinus oraz układ dołączony, składający się z masy połączonej z wałem za pomocą tłumika. Rozpatrywane zadanie można opisać matematycznie za pomocą sprzężonego układu równań różniczkowych, hiperbolicznego równania różniczkowego cząstkowego, opisującego ruch w przypadku wirującego wału, oraz zwyczajne równanie różniczkowe, opisujące ruch układu dołączonego. A zatem mamy do czynienia ze sprzęgniętym układem równań różniczkowych liniowych z odpowiednimi warunkami początkowymi i brzegowymi. W rozwiązaniu zastosowano kosinusową transformację Fouriera, która spełnia założone warunki brzegowe. Rozwiązanie analityczne ograniczone zostało do pierwszego wyrazu rozwinięcia w szereg. Aby rozwiązać zredukowany układ zwyczajnych równań różniczkowych, zastosowano transformację całkową Laplace'a–Carsona. Przeprowadzona analiza matematyczna pozwoliła nam określić charakterystyczne własności rozwiązania i przetestować jego wrażliwość na zmianę parametrów zadania, takich jak wpływ bezwładności i tłumienia układu dołączonego. Zauważono, że zwiększenie tłumienia w tłumiku pociąga za sobą nieproporcjonalnie wolniejszy spadek amplitud drgań skrętnych. Wraz ze wzrostem tłumienia masa układu dołączonego zaczyna być mocniej związana z wałem i wibruje z tym samym okresem. Opracowane dokładne rozwiązanie półanalityczne umożliwiło badania ilościowe oraz posłużyło do weryfikacji modelu numerycznego, zbudowanego za pomocą metody elementów skończonych, które zostało użyte do rozwiązania zadania sterowania optymalnego. Na podstawie minimalizacji funkcji celu określono funkcję sterującą obrotowym tłumikiem magnetoreologicznym. Minimalizujemy kąt opisujący skręcenie przekroju w wybranym punkcie wału. Ze względu na przyjęty wskaźnik jakości opisany funkcjonałem kwadratowym, mamy do czynienia z zadaniem sterowania liniowo-kwadratowego w skończonym horyzoncie czasu obserwacji. Z powodu prawie płaskiego funkcjonału znajdujemy zazwyczaj

rozwiązania lokalne. W takiej sytuacji narzędzia gradientowe zawodzą, ponieważ są one dedykowane do zadań wypukłych, mających jedno rozwiązanie. W naszym przypadku metoda Monte Carlo lub algorytmy genetyczne dają znacznie lepsze rezultaty we wczesnym etapie obliczeń. Punkt startowy do dalszego etapu minimalizacji został określony za pomocą losowej metody Monte Carlo, a następnie użyto pakietu IPOpt do znalezienia rozwiązania dokładnego. IPOpt służy do nieliniowej optymalizacji wykonywanej metodą punktu wewnętrznego, wykorzystując pierwszą i drugą pochodną. Jeśli hesjany nie są wyznaczone, IPOpt przybliża je, używając metod numerycznych. Jest to bardzo wydajne narzędzie w szukaniu lokalnych rozwiązań w dużych zadaniach. Prowadzone badania dowiodły, że optimum jest zapewnione, jeśli funkcja tłumiąca przyjmuje prawie okresowy kształt z podwójną częstotliwością rozwiązania przedstawiającego wirujący wał. Ta gładka funkcja może być skutecznie zastąpiona dwustanową funkcją przełączeniową typu „bang-bang”. Numeryczne symulacje pokazały, że sterowanie tego typu prowadzi do obniżenia amplitudy drgań o 20-50%, w stosunku do rozwiązania pasywnego. Podczas badań eksperymentalnych na stanowisku badawczym uzyskano niższą skuteczność, na poziomie 10-15%. Powodem są niedokładności realizacji przełączania w rzeczywistym tłumiku magnetoreologicznym. Niemożliwe jest otrzymanie nagłych, ostrych przełączeń, które stosowano w modelu numerycznym. Opóźnienie w działaniu sterowanych tłumików nieco ogranicza stosowalność rozwiązania.

Do oryginalnych osiągnięć naukowych pracy należy opracowanie strategii półaktywnego sterowania tłumikiem, będącym składową inteligentnego dynamicznego eliminatora drgań. Udowodniliśmy, że okresowe włączanie obrotowego tłumika magnetoreologicznego umożliwia zmniejszenie poziomu amplitud drgań w większym stopniu, niż rozwiązanie pasywne, polegające na tłumieniu ciągłym. Problem sterowania optymalnego został sformułowany i rozwiązany za pomocą metody losowej Monte Carlo oraz pakietu do nieliniowej optymalizacji układów ciągłych IPOpt. Metoda elementów skończonych wraz z rozwiązaniem zadania sterowania pokazała, że tłumik powinien działać tylko podczas krótkiego okresu, kiedy występują największe wychylenia konstrukcji. Wyniki teoretyczne zostały potwierdzone eksperymentalnie na stanowisku badawczym.

W artykule [A6] zostały przedstawione zagadnienia związane z półaktywnym

tłumieniem drgań za pomocą struktur warstwowych, które odpowiednio zaprojektowane, umożliwiają znaczną poprawę własności dynamicznych układu względem ich odpowiedników pasywnych. Po pierwsze, struktura zyskuje większą nośność przy tej samej wadze, a po drugie, poprawiamy wytrzymałość zmęczeniową, zwiększając bezpieczeństwo konstrukcji. Synergia struktury warstwowej oraz półaktywnie sterowanego materiału inteligentnego stanowiącego jej rdzeń pozwoli w wielu przypadkach obniżyć masę konstrukcji. Odpowiedni dobór strategii sterowania umożliwi zastosowanie tego typu rozwiązań w wielu innowacyjnych gałęziach przemysłu. Znane z literatury elastomery opracowane na bazie cieczy magnetoreologicznej, które pod wpływem pola magnetycznego zmieniają swoje własności mechaniczne, można wykorzystać jako inteligentny materiał rdzenia. Celem pracy było opracowanie strategii półaktywnego optymalnego sterowania strukturą warstwową elementów nośnych konstrukcji z inteligentnym rdzeniem o zmiennych w czasie własnościach dynamicznych. Lokalna zmiana sztywności magnetoreologicznej warstwy wewnętrznej wpływa na dynamikę całej konstrukcji. W wyniku modyfikacji parametrów fizycznych rdzenia, konstrukcja zaczyna drgać z wyższymi modami i dzięki tłumieniu materiałowemu poszczególnych warstw elementów konstrukcyjnych, drgania układu są szybciej tłumione. Problem sterowania rdzeniem w konstrukcjach warstwowych ogranicza się w literaturze do kilku opublikowanych prac, głównie eksperymentalnych. Podejmowano również teoretyczne próby stabilizacji o charakterze suboptymalnym, ze względu na minimalizację wskaźnika jakości sterowań przy wyrowadzaniu reguł przełączeń. Należy zwrócić jednak uwagę na brak ścisłości przy formułowaniu i rozwiązaniu zadania minimalizacji. Dostępność stanowiska badawczego skierowała nasze badania w kierunku drgań swobodnych belki warstwowej wspornikowej wywołanych wychyleniem początkowym. W pracy rozpatrzono model trójwarstwowej belki, w której warstwy zewnętrzne są sprężyste, natomiast rdzeń jest lepkosprężysty określony modułem ścinania. Przyjęty model matematyczny belki obejmował przemieszczenia wzdłużne oraz poprzeczne. Wprowadzone uproszczenia pomijają ścinanie w warstwach zewnętrznych oraz naprężenia wzdłużne w rdzeniu. Poprzeczne odkształcenia w każdej warstwie również zostały pominięte, co skutkuje stałym przemieszczeniem poprzecznym w całym przekroju belki. Ostatecznie, w wyniku przekształceń otrzymano układ dwóch sprzęgniętych równań różniczkowych cząstkowych. Rozwiązanie analityczne drgań belki wspornikowej jest matematycznie dużo bardziej skomplikowane niż w przypadku swobodnego

podparcia. Ponieważ rozkład momentu gnącego belki wspornikowej jest identyczny z połową belki swobodnie podpartej, krzywizny obu linii ugięcia są takie same. Dlatego zdecydowano się rozwiązać analitycznie odpowiednio dostosowaną belkę swobodnie podpartą. Jedyną różnicą między modelem teoretycznym i eksperymentalnym jest rozkład warstwy wewnętrznej. W analizie teoretycznej elastomer jest warstwą ciągłą, podczas gdy w badaniach eksperymentalnych jest on umieszczony jedynie na swobodnym końcu belki wspornikowej. Układ dwóch sprzęgniętych równań różniczkowych cząstkowych możemy rozwiązać za pomocą transformacji przy określonej bazie funkcji ortogonalnych, realizujących założone warunki brzegowe. Przemieszczenia poprzeczne i wzdłużne belki rozwinięto w szereg Fouriera, odpowiednio w szereg sinusów i kosinusów. Otrzymany układ równań różniczkowych zwyczajnych, zapisany w formie macierzowej, rozwiązano numerycznie za pomocą metody niejawnej Newmarka. Zauważono, że pierwszy wyraz szeregu opisującego interesujące nas przemieszczenia poprzeczne daje wystarczająco dokładne wyniki. Dlatego w dalszym etapie prac zdecydowano się na ograniczenie rozwiązania analitycznego tylko do pierwszego wyrazu rozwinięcia w szereg. Uproszczony układ równań różniczkowych zwyczajnych rozwiązano za pomocą transformacji całkowej Laplace'a–Carsona. Rozwiązanie analityczne posłużyło do opracowania strategii sterowania rdzeniem. Dobrana funkcja celu, będąca miarą stabilności oraz jakości założonego zadania sterowania optymalnego, została opisana funkcjonalem kwadratowym. Ze względu na liniowy model układu dynamicznego mamy do czynienia z zadaniem sterowania liniowo-kwadratowego w skończonym horyzoncie czasu obserwacji. Minimalizujemy przemieszczenia poprzeczne w połowie swobodnie podpartej belki warstwowej, natomiast parametrem sterującym jest zmienna w czasie sztywność ścinania materiału warstwy wewnętrznej. Rozwiązanie tego typu problemu jest kłopotliwe z powodu niegładkiej odpowiedzi układu sterowanego. Znajdujemy zazwyczaj rozwiązania lokalne, wykazujące dużą wrażliwość na parametry sterujące. W tym przypadku metody gradientowe są nieskuteczne. Pierwsze próby wykazały skuteczność metod losowych. Niestety metoda Monte Carlo jest niewydajna, ponieważ wzrost liczby zmiennych dramatycznie zmniejsza tempo zbieżności rozwiązania. Algorytmy genetyczne również zawodzą. Ograniczoną skuteczność znanych algorytmów można wyjaśnić szczególnymi cechami rozpatrywanego zadania. W przypadku drgań swobodnych sterowanych parametrem materiałowym każda modyfikacja rdzenia wpływa na formę drgań w kolejnym cyklu. Zarówno okres drgań, jak

i amplituda przemieszczeń zmieniają się w czasie. Z tego powodu pod uwagę bierzemy kilka kolejnych cykli. Zaproponowana metoda iteracyjna doprowadziła do rozwiązania w postaci funkcji sterującej o charakterze przełączeniowym typu „bang-bang”. Modyfikowana sztywność ścinania warstwy wewnętrznej w analizie teoretycznej wykazuje wysoką skuteczność tłumienia drgań. Weryfikacja eksperymentalna wykazała nieco mniejszą skuteczność prawdopodobnie dlatego, że sterowany elastomer umieszczony jest tylko na końcu belki. Mimo założonych uproszczeń modelu matematycznego zgodność pomiędzy wynikami teoretycznymi i eksperymentalnymi jest na zadowalającym poziomie.

Do oryginalnych osiągnięć naukowych pracy należy analityczne rozwiązanie zadania drgań swobodnych belki warstwowej swobodnie podpartej. Zdefiniowano problem sterowania rdzeniem struktury warstwowej oraz zastosowano rozwiązanie analityczne do opracowania strategii sterowania półaktywnego. Rozwiązanie numeryczne problemu minimalizacji wykazało periodyczny, przełączeniowy charakter funkcji sterującej. Skuteczność sterowania sięgająca 20-50% w stosunku do rozwiązania pasywnego została potwierdzona badaniami eksperymentalnymi na stanowisku badawczym i zależy od sztywności wybranego typu elastomeru magnetoreologicznego.

W artykule [A7] zaprezentowano eksperymentalną metodę badania własności dynamicznych elementu tłumiącego, opartego na materiale granulowanym aktywowanym podciśnieniem. Element tłumiący stanowiła elastyczna szczelna otoczka wypełniona granulatem. Zmiana wartości ciśnienia w otoczce umożliwia zmianę mechanicznych własności układu. Dzieje się to za sprawą przejścia materiału ze stanu sypkiego w stan stały i odwrotnie. W wyniku ściskania materiału wzrastają siły kontaktowe między ziarnami. Interakcja cząstek w stanie zablokowanym może być słabsza lub mocniejsza w zależności od przyjętej wartości podciśnienia. Celem pracy było zbadanie możliwości użycia sterowanych materiałów granulowanych w półaktywnym tłumieniu drgań. Właściwy model struktury granulowanej sterowanej podciśnieniem oraz identyfikacja jego parametrów są konieczne, aby odpowiedzieć na pytanie, czy możliwe jest skuteczne użycie tych układów w półaktywnym tłumieniu drgań, jako interesujący alternatywny materiał inteligentny, charakteryzujący się niskim kosztem produkcji. W celach eksperymentalnych użyto dwóch belek wspornikowych z umieszczoną między nimi na wolnym końcu otoczką wypełnioną granulatem, podłączoną do pompy próżniowej. Przebadano cztery typy materiału

granulowanego, różniące się rozmiarami, kształtem oraz zastosowanym materiałem, w celu znalezienia tego, który wykazuje najlepsze własności tłumiące. Z użyciem każdego materiału rejestrowana była amplituda przemieszczeń, aby zbadać wpływ stałego podciśnienia na odpowiedź całego układu. Na podstawie zmiany wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia oraz naturalnych częstości drgań względem podciśnienia, do dalszych badań został wybrany materiał granulowany w kształcie wałeczków. Na podstawie badań eksperymentalnych opracowano fenomenologiczny model wybranego materiału granulowanego. Ze względu na złożoność zachowań materiału zblokowanego, takich jak tarcie i poślizgi między ziarnami, skoncentrowaliśmy się na parametrach pozwalających opisać całą strukturę w sposób bardziej ogólny, prosty, za pomocą współczynnika sztywności i tłumienia. Z tego względu rozpatrzono modele lepkosprężyste Zenera, Kelvina-Voigta oraz Maxwella. Zaproponowane zadanie minimalizacji umożliwia identyfikację parametrów materiałowych w podobny sposób do metody najmniejszych kwadratów. Błąd oszacowania parametrów został obliczony jako norma euklidesowa różnicy pomiędzy numerycznie obliczonym przemieszczeniem a przemieszczeniem eksperymentalnym. Porównano pierwsze 30 sekund drgań z poszczególnym modelem mechanicznym. Wszystkie trzy modele dają dobre przybliżenie wyników eksperymentalnych. Okazuje się, że w tym przypadku model Zenera redukuje się do modelu Maxwella. Dokładność dopasowania przemieszczeń w czasie wszystkich modeli względem danych eksperymentalnych jest podobna. Model Kelvina-Voigta wykazuje najlepsze przybliżenie krzywych, a błąd estymacji w przypadku większego podciśnienia jest najmniejszy. Zbadano również doświadczalnie zdolność układu do półaktywnej zmiany parametrów, poprzez periodycznie przełączane podciśnienie: aktywowane w momencie maksymalnego wychylenia, kiedy znika energia kinetyczna w układzie oraz wyłączane, kiedy belka przecina punkt równowagi. Kombinacja wydajnej pompy oraz szybkiej odpowiedzi elektrozaworu pozwalała przełączać podciśnienie pomiędzy zerem a maksymalną wartością do ośmiu razy na sekundę, utrzymując pożądaną kształt sygnału podciśnienia. Z tego względu materiały granulowane preferowane są w tłumieniu drgań w układach o niskiej częstotliwości drgań.

Do oryginalnych osiągnięć naukowych pracy należy zbadanie wpływu rozmiaru, kształtu oraz zastosowanego materiału granulowanego na skuteczność tłumienia drgań. Na podstawie wyników pomiarów eksperymentalnych opracowano fenomenologiczny reologiczny model materiału granulowanego modyfikowanego

podciśnieniem. Badania eksperymentalne wykazały, że przełączeniowe aktywowanie materiałów granulowanych umieszczonych w specjalnej szczelnej otoczce może być efektywniejsze w tłumieniu drgań. Z powodu prostej budowy, niskich kosztów oraz skuteczności proponowanego rozwiązania, struktury granulowane sterowane podciśnieniem są interesującą alternatywą wobec klasycznych układów tłumiących, a nawet drogich materiałów inteligentnych. Zakres stosowalności i ograniczenia proponowanego rozwiązania zostały zaprezentowane w pracy, podobnie jak korzyści z potencjalnych zastosowań.

W pracy [A8] przedstawiono zagadnienia dotyczące półaktywnej redukcji drgań za pomocą sterowanej struktury granulowanej. Wcześniej wyselekcjonowany materiał granulowany umieszczony ściśle w cienkiej silikonowej błonie za pomocą podciśnienia przechodzi ze stanu sypkiego w stan zamrożenia, zmieniając swoje parametry mechaniczne takie jak sztywność oraz tłumienie. Zastosowanie struktury tego typu umożliwia sterowanie dynamiką rozpatrywanego układu w wybranych chwilach. Metody tłumienia drgań za pomocą materiałów granulowanych są szeroko prezentowane w literaturze. W większości rozwiązań mamy jednak do czynienia z układem pasywnym, opartym na dyssypacyjnej naturze oddziałujących ze sobą cząstek. Jest to względnie prosta koncepcja, w której cząstki małych rozmiarów umieszczone są w pojemniku dołączonym do rozpatrywanej konstrukcji. Znane są również rozwiązania wykorzystujące zjawisko zblokowania ziaren w tłumieniu drgań przy stałej wartości częściowej próżni. Celem pracy było opracowanie strategii półaktywnego sterowania podciśnieniem, tak aby skuteczność tłumienia drgań za pomocą materiałów granulowanych była na znacznie wyższym poziomie niż w przypadku znanych rozwiązań pasywnych. Model mechaniczny zagadnienia oparty był na dwóch wspornikowych belkach Eulera sprzęgniętych na swobodnym końcu strukturą granulowaną. Aby otrzymać analityczne rozwiązanie postawionego zadania, zastosowano uproszczenia polegające na pominięciu bezwładności belek, natomiast sztywność giętą każdej z nich została zastąpiona sprężyną. Dzięki temu postawiony problem został zredukowany do zadania o dwóch stopniach swobody, w którym sterowany granulata opisany był modelem lepko-sprężystym Kelvina-Voighta. Parametry modelu fenomenologicznego materiału granulowanego zostały zidentyfikowane we wcześniejszych pracach. Model matematyczny stanowiły dwa sprzęgnięte równania różniczkowe zwyczajne, które zostały rozwiązane za pomocą transformacji Laplace'a-Carsona. Zamknięte rozwiązanie, prezentujące

przemieszczenia obu stopni swobody, umożliwia natychmiastowe obliczenie odpowiednich pochodnych, takich jak prędkości i przyspieszenia. Na podstawie otrzymanych formuł analitycznych rozwiązano zadanie sterowania optymalnego. Rozpatrzono dwa przypadki. W pierwszym zadaniu sztywność była jedyną zmienną modyfikowaną w czasie, natomiast w drugim przypadku sterowano jednocześnie sztywnością oraz współczynnikiem tłumienia. Założona funkcja celu była proporcjonalna do sumy kwadratów wartości amplitud przemieszczeń. Proces optymalizacji udowodnił, że zmiana sztywności jest głównym parametrem, który znacząco przyczynia się do redukcji drgań, a dodatkowy wpływ tłumienia jest raczej marginalny. Otrzymany sygnał sterujący może zostać uproszczony poprzez wyróżnienie jego dominującej formy. Opracowana strategia sterowania wymaga aktywacji sygnału sterującego w chwili maksymalnego wychylenia układu. Musi on pozostać włączony do momentu, gdy belka przekroczy punkt równowagi statycznej. Krótco po tym sygnał sterujący powinien być wyłączony aż do osiągnięcia przez belkę kolejnego maksimum, przy czym należy pamiętać, że chwile przełączeń zmieniają się w czasie. Odpowiednie przełączanie parametrów zadania umożliwia przeskok układu na trajektorię pozwalającą na dużo szybszą zbieżność rozwiązania do globalnego, asymptotycznie stabilnego punktu równowagi, niż w przypadku układu działającego z ustalonymi na stałe parametrami. Otrzymana funkcja sterująca ma prostokątny przełazeniowy kształt, łatwy do zastosowania w klasycznych układach elektromechanicznych i pneumatycznych. Przyjazny dla środowiska inteligentny materiał granulowany posiada wiele potencjalnych perspektyw aplikacyjnych przede wszystkim dzięki niskim kosztom wytwarzania. Może znaleźć zastosowanie głównie w tłumieniu drgań o niskiej częstotliwości, ponieważ materiał granulowany w wyniku zmiany ciśnienia w układzie potrzebuje czasu do reorganizacji położenia ziaren.

Do oryginalnych osiągnięć naukowych pracy należy zaprezentowanie możliwości użycia układów granulowanych sterowanych pneumatycznie w półaktywnym tłumieniu drgań. Periodyczne przełączanie wartością podciśnienia umożliwia zwiększenie efektywności minimalizacji amplitudy przemieszczeń w badanym układzie. Opracowana strategia została zweryfikowana eksperymentalnie. Badania dowiodły, że odpowiednie periodycznie przełączanie parametrów rozpatrywanej struktury umożliwia redukcję drgań bardziej efektywnie niż rozwiązania pasywne.

Monografia [A9] stanowi podsumowanie prowadzonych przeze mnie badań

poświęconych półaktywnemu tłumieniu drgań wybranych konstrukcji inżynierskich z wykorzystaniem inteligentnych materiałów. W książce przedstawiono szeroki przegląd literatury przedmiotu. Zaprezentowano materiały inteligentne stosowane w tłumieniu drgań oraz ich potencjalne zastosowania w wielu nowoczesnych gałęziach przemysłu czy transportu. W kolejnych rozdziałach przedstawiono sposoby modelowania wybranych konstrukcji oraz rozwiązano stowarzyszone z nimi zadania sterowania optymalnego w przypadku układów półaktywnych. Zagadnienia obejmują drgania konstrukcji wywołane ruchomym obciążeniem, wymuszeniem harmonicznym oraz wymuszeniem początkowym. Na koniec zaprezentowano skuteczność opracowanych strategii sterowania za pomocą badań eksperymentalnych na dedykowanych stanowiskach badawczych. Wybrane rozdziały, bądź ich fragmenty przedstawiają moje osiągnięcia naukowe w tej dziedzinie po otrzymaniu stopnia doktora.

4.5. Główne osiągnięcia naukowe

Do oceny przedłożono dziewięć prac naukowych, stanowiących cykl publikacji pod wspólnym tytułem: **„Adaptacyjne tłumienie drgań wybranych konstrukcji z wykorzystaniem nieklasycznych materiałów”**. Realizacja postawionych celów znajduje odbicie w uzyskanych wynikach, które zostały przedstawione poniżej. Do swoich głównych osiągnięć naukowych zaliczam:

- Wyprowadzenie charakterystycznych macierzy oryginalnych, uniwersalnych czasoprzestrzennych elementów skończonych, przenoszących poruszającą się po dowolnej trajektorii i z dowolną prędkością cząstkę masową.
- Opracowanie uproszczonego numerycznego modelu koła kolejowego, który w znacznym stopniu odzwierciedla własności dynamiczne rzeczywistego obiektu.
- Zastosowanie czasoprzestrzennych elementów skończonych o kształcie sympleksów w numerycznej symulacji zjawisk falowych w układach o obszarach nieograniczonych.
- Opracowanie własności inteligentnego materiału tłumiącego do stabilizacji drgań konstrukcji, wywołanych przejazdem ruchomego obciążenia.
- Opracowanie strategii półaktywnego sterowania hamulcem magnetoreologicznym, będącym elementem inteligentnego dynamicznego eliminatora drgań skrętnych.
- Zastosowanie elastomeru magnetoreologicznego w formie inteligentnego

rdzenia w półaktywnym tłumieniu drgań konstrukcji warstwowej.

- Opracowanie, na podstawie wyników pomiarów eksperymentalnych, fenomenologicznego modelu materiału granulowanego aktywowanego podciśnieniem.
- Zbadanie i dowiedzenie skuteczności użycia sterowanych podciśnieniem materiałów granulowanych w półaktywnym tłumieniu drgań.

W prowadzonych badaniach wykorzystano trzy różne materiały inteligentne odpowiednio dobrane do charakterystycznych typów konstrukcji i obciążeń wywołujących drgania. Przedstawione prace obejmowały zagadnienia związane z analitycznym i numerycznym modelowaniem zagadnień dynamicznych, jednak nadrzędnym celem wszystkich prowadzonych badań było opracowanie na ich podstawie strategii półaktywnego sterowania inteligentnym materiałem. Dzięki temu możliwa jest znacznie bardziej efektywna redukcja drgań badanego układu, w stosunku do znanych z literatury rozwiązań pasywnych. Opracowane strategie sterowania zostały pozytywnie zweryfikowane badaniami eksperymentalnymi. Rezultaty prowadzonych prac można z powodzeniem wykorzystać w wielu dziedzinach przemysłu czy transportu.

5. Podsumowanie działalności naukowej

5.1. Autorstwo i współautorstwo w publikacjach naukowych

Dorobek naukowy obejmuje **46** oryginalnych prac, w tym **31** po uzyskaniu stopnia doktora.

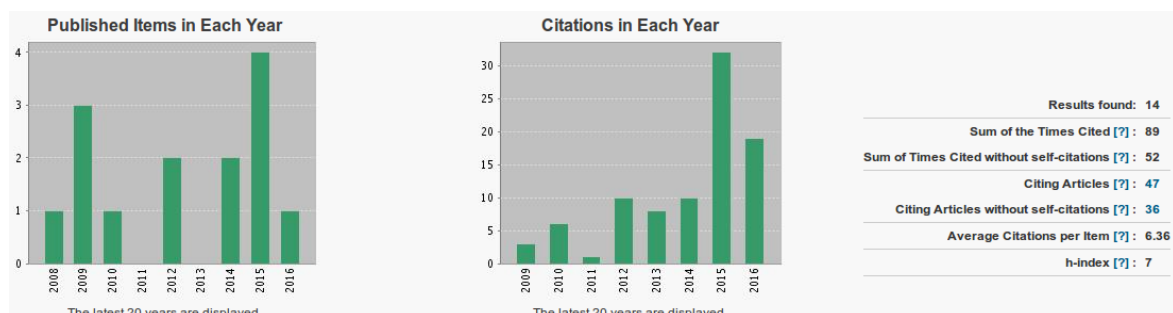
Według Bazy ISI Web of Science w dniu **03.07.2016**

indeks Hirscha wynosi **H=7**

całkowita liczba publikacji **14 (w tym 9 po uzyskaniu stopnia doktora)**

liczba cytowań:

- Web of Science Basic Search: **89 (52 bez autocytowań)**
- Web of Science Cited Reference Search: **107**



Według Google Scholar w dniu **30.06.2016**
indeks Hirscha wynosi **H=9**
ilość cytowań: **214**

Sumaryczny *impact factor* według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania:

Tytuł czasopisma	<i>impact factor</i>
<i>Mechanical Systems and Signal Processing</i>	2,256 x 1 2,771 x 3
<i>Journal of Sound and Vibration</i>	2,107 x 2
<i>Vehicle System Dynamics</i>	1,306
<i>Computational Mechanics</i>	2,525
<i>Finite Elements in Analysis and Design</i>	1,389
<i>Archives of Mechanics</i>	0,469
<i>Archive of Applied Mechanics</i>	0,993 x 2
<i>Computers & Structures</i>	1,440
<i>International Journal for Numerical Methods in Engineering</i>	2,229
Sumaryczny <i>impact factor</i>	26,127

Liczba punktów najistotniejszych prac według listy MNiSW zgodnie z rokiem opublikowania: **461**

5.2. Kierowanie międzynarodowymi lub krajowymi projektami badawczymi lub udział w takich projektach

- „Półaktywne tłumienie drgań z wykorzystaniem struktur warstwowych z inteligentnym rdzeniem”, 2014-2017, Narodowe Centrum Nauki, kierownik.
- „Rozproszona metoda adaptacji konstrukcji poddanych ruchomym obciążeniom”, 2014-2015, Fundacja na rzecz Nauki Polskiej, wykonawca.
- „Ochrona budynków metodą adaptacyjnego tłumienia drgań wywołanych pojazdami szynowymi z wykorzystaniem materiałów inteligentnych”, 2011-2014, Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, kierownik.
- „Interaktywne środowisko programistyczne do rozwiązywania zadań

sterowania optymalnego – IDOS”, 2009-2012, Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, wykonawca.

- „Monitorowanie stanu technicznego konstrukcji i ocena jej żywotności MONIT”, 2008-2012, Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka, projekt ramowy UE, wykonawca.
- „Dynamiczne oddziaływania pojazdów szynowych na otoczenie”, 2008-2011, Komitet Badań Naukowych, wykonawca.
- „Oddziaływania parasejsmiczne ruchomych źródeł drgań na obiekty”, 2005-2008, Komitet Badań Naukowych, wykonawca.

5.3. Działalność dydaktyczna i popularyzatorska

- Opieka naukowa nad doktorantem w charakterze promotora pomocniczego: Jacek M. Bajkowski, „Vibrations of sandwich beams controlled by smart materials”, IPPT PAN, 2014.
- J.M. Bajkowski, **B. Dyniewicz**, C.I. Bajer, 2016, Smart materials in semi-active controlled structures, Emerging Trends in Applied Mathematics and Mechanics, Perpignan (Francja).
- D. Pisarski, J.M. Bajkowski, C.I. Bajer, **B. Dyniewicz**, T. Szmidt, 2015, Vibration control in smart buildings subjected to earthquake excitation, Adaptive Impact Absorption AIA'15 Workshop, Warszawa.
- **B. Dyniewicz**, 2015, Drgania konstrukcji poddanych ruchomym źródłom zaburzeń, Posiedzenie Komitetu Mechaniki PAN, Warszawa.
- D. Pisarski, C.I. Bajer, **B. Dyniewicz**, 2015, Semi-active stabilization of smart structures subjected to impact excitation, 3rd Polish Congress of Mechanics and 21st Computer Methods in Mechanics, Gdańsk.
- D. Pisarski, **B. Dyniewicz**, 2015, Optimal control methods for structures subjected to dynamic loads, 23rd French-Polish Seminar of Mechanics, Besancon (Francja).
- **B. Dyniewicz**, J.M. Bajkowski, C.I. Bajer, 2014, Smart control in vibrations of structures, 6th World Conference on Structural Control and Monitoring, Barcelona (Hiszpania).
- C.I. Bajer, **B. Dyniewicz**, 2014, Smart control in vibrations of structures, 22nd French-Polish Seminar of Mechanics, Warszawa.
- J.M. Bajkowski, **B. Dyniewicz**, C.I. Bajer, 2014, Experimental study on

a semi-active damping of a beam with underpressure granular structure, 53 Sympozjon "Modelowanie w mechanice", Ustroń.

- **B. Dyniewicz**, C.I. Bajer, 2013, Train/track dynamic inertial interaction at medium and high speed, 20th International Conference on Computer Methods in Mechanics, Poznań.
- **B. Dyniewicz**, 2013, Infinite domain under a moving load, 21st French-Polish Seminar of Mechanics, Perpignan (Francja).
- **B. Dyniewicz**, R. Konowrocki, C.I. Bajer, 2013, Reduction of vibrations induced by a moving load, 21st French-Polish Seminar of Mechanics, Perpignan (Francja).
- **B. Dyniewicz**, C.I. Bajer, 2012, General numerical description of a mass moving along a structure, 25th Symposium on Vibrations in Physical Systems, Będlewo-Poznań.
- **B. Dyniewicz**, C.I. Bajer, 2012, Non-hertzian contact model in wheel/rail or vehicle/track system, 25th Symposium on Vibrations in Physical Systems, Będlewo-Poznań.
- **B. Dyniewicz**, D. Pisarski, R. Konowrocki, 2012, Semi-active control of track subjected to an inertial moving load, 25th Symposium on Vibrations in Physical Systems, Będlewo-Poznań.
- C.I. Bajer, **B. Dyniewicz**, D. Pisarski, 2011, Smart vibration elimination in moving mass system, 19th French-Polish Seminar of Mechanics, Perpignan (Francja).
- D. Pisarski, **B. Dyniewicz**, C.I. Bajer, 2010, Travel control of guideways, 7th German-Greek-Polish Symposium on Recent Advances in Mechanics, Poznań.
- **B. Dyniewicz**, C.I. Bajer, 2010, Numerical methods for vibration analysis of Timoshenko beam subjected to inertial moving load, 24th Symposium on Vibrations in Physical Systems, Będlewo-Poznań.
- **B. Dyniewicz**, C.I. Bajer, 2009, The influence of inertia in moving load problems, 17th International Conference on Theoretical Foundations in Civil Engineering, Warszawa.
- **B. Dyniewicz**, C.I. Bajer, 2008, String-beam under moving inertial load, 23rd Symposium on Vibrations in Physical Systems, Będlewo-Poznań.
- C.I. Bajer, **B. Dyniewicz**, 2008, Moving inertial load and numerical modelling, 23rd Symposium on Vibrations in Physical Systems, Będlewo-Poznań.

- **B. Dyniewicz**, C.I. Bajer, 2008, Inertial Moving Loads, 36th Solid Mechanics Conference, Gdańsk.
- **B. Dyniewicz**, C.I. Bajer, 2008, General approach to problems with moving mass, 16th International Conference on Theoretical Foundations in Civil Engineering, Warszawa.
- **B. Dyniewicz**, C.I. Bajer, 2007, Discontinuous trajectory of the mass particle moving on a string or a beam, 10th German-Polish Workshop on Dynamical Problems in Mechanical Systems, Goslar (Niemcy).
- C.I. Bajer, **B. Dyniewicz**, 2007, Numerical modelling of structure vibrations under inertial moving load, 6th German-Greek-Polish Symposium on Recent Advances in Mechanics, Alexandroupolis (Grecja).
- **B. Dyniewicz**, C.I. Bajer, 2007, Inertial loading moving on a string – discontinuous solution, 15th International Conference on Theoretical Foundations in Civil Engineering, Warszawa.
- **B. Dyniewicz**, C.I. Bajer, 2006, Moving loads – analytical and numerical approaches, 14th International Conference on Theoretical Foundations in Civil Engineering, Warszawa.

5.4. Staże i szkolenia zagraniczne

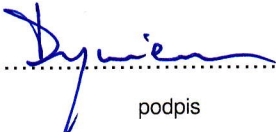
- Uniwersytet w Montpellier (Francja), 2008 – 2009, program współpracy Polonium

5.5. Nagrody i wyróżnienia

- Zespołowa nagroda 2-go stopnia za osiągnięcia naukowe, 2016, IPPT PAN.
- Wyróżnienie dyrektora Instytutu, 2015, IPPT PAN, osiągnięcia naukowe, w szczególności publikacje w najwyższej punktowanych czasopismach.
- Nagroda naukowa 1-go stopnia Komitetu Mechaniki PAN im. profesora Michała Życzkowskiego, 2015, KM PAN, nagroda za prace opublikowane przed ukończeniem 34 roku życia.
- Imienne zaproszenie na część otwartą posiedzenia Komitetu Mechaniki PAN, 2015, wykłady laureatów Nagrody Naukowej Komitetu.
- Nagroda naukowa 3-go stopnia, 2015, IPPT PAN.
- Wyróżnienie dyrektora Instytutu, 2014, IPPT PAN, osiągnięcia naukowe, w szczególności publikacje w najwyższej punktowanych czasopismach.

- Wyróżnienie dyrektora Instytutu, 2013, IPPT PAN, osiągnięcia naukowe, w szczególności publikacje w najwyżej punktowanych czasopismach.
- Stypendium dla wybitnych młodych naukowców, 2011-2014, Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, wyróżnienie najzdolniejszych młodych uczonych.
- Stypendium START, 2011, Fundacja na rzecz Nauki Polskiej, wyróżnienie najzdolniejszych młodych uczonych.
- Wyróżnienie dyrektora Instytutu, 2011, IPPT PAN, osiągnięcia naukowe, w szczególności publikacje w najwyżej punktowanych czasopismach.
- Young Researcher Award, 2010, The Visegrad Group Academies V4, badania z wykorzystaniem nowoczesnych materiałów.
- Imienne zaproszenie do udziału w forum prezesów, wiceprezesów i innych wysokich rangą przedstawicieli Akademii Nauk krajów Grupy Wyszehradzkiej V4 w Trest (Czechy), 2010.
- Stypendium START, 2010, Fundacja na rzecz Nauki Polskiej, wyróżnienie najzdolniejszych młodych uczonych.
- Wyróżnienie dyrektora Instytutu, 2010, IPPT PAN, osiągnięcia naukowe, w szczególności publikacje w najwyżej punktowanych czasopismach.
- Imienne zaproszenie na 10-te Niemiecko-Polskie warsztaty „Dynamical Problems in Mechanical Systems” w Goslar (Niemcy), 2007, zaprezentowanie własnych osiągnięć w zakresie ruchomych obciążeń inercyjnych.

Warszawa, 04.07.2016


.....
podpis