

Autoreferat

w języku polskim

1. Imię i Nazwisko: Dariusz Grzelczyk

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej:

2010: stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie mechanika,
Politechnika Łódzka,
Wydział Mechaniczny,
Łódź, Polska
Tytuł: Dynamika i procesy tribologiczne w układzie mechatronicznym ze sprzęgłem ciernym
Promotor: Profesor Jan Awrejcewicz

2005: tytuł zawodowy magistra inżyniera
kierunek Fizyka Techniczna, specjalność Fizyka Komputerowa,
Politechnika Łódzka,
Wydział Fizyki Technicznej, Informatyki i Matematyki Stosowanej,
Łódź, Polska

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:

X 2005 – II 2006: Instytut Inżynierii Materiałowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Łódzka (umowa zlecenie/dzieło)

X 2007 – XII 2010: Katedra Automatyki, Biomechaniki i Mechatroniki, Wydział Mechaniczny, Politechnika Łódzka (umowa na część etatu na stanowisku asystenta)

od XII 2010 - Katedra Automatyki, Biomechaniki i Mechatroniki, Wydział Mechaniczny, Politechnika Łódzka (umowa na cały etat na stanowisku adiunkta)

4. CV:

W 2005 roku ukończyłem jednolite studia magisterskie na Wydziale Fizyki Technicznej, Informatyki i Matematyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej, na kierunku Fizyka Techniczna specjalność Fizyka Komputerowa, z wynikiem bardzo dobrym. Po ukończeniu studiów magisterskich rozpocząłem studia doktorskie na Wydziale Mechanicznym tej samej uczelni, w Instytucie Inżynierii Materiałowej. W tym czasie uczestniczyłem jako wykonawca pomocniczy w pierwszym projekcie badawczym finansowanym przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, i wówczas zostałem współautorem pierwszego artykułu naukowego.

Następnie kontynuowałem studia doktorskie pracując w Katedrze Automatyki, Biomechaniki i Mechatroniki na Wydziale Mechanicznym tej samej uczelni. W grudniu 2010 roku uzyskałem stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie mechanika. Moja praca doktorska dotyczyła dynamiki i procesów tribologicznych w układzie mechatronicznym ze sprzęgłem ciernym.

Od 2007 roku pracowałem w Katedrze Automatyki, Biomechaniki i Mechatroniki Politechniki Łódzkiej na stanowisku asystenta, a od grudnia 2010 roku pracuję tam na stanowisku adiunkta. Moje zainteresowania naukowe obejmują mechanikę, biomechanikę, automatykę, robotykę oraz mechatronikę. Dla studentów studiów inżynierskich, magisterskich czy doktoranckich prowadziłem różne zajęcia dydaktyczne takie jak: Postawy automatyzacji i mechatroniki, Podstawy automatyki, Automatyka, Modelowanie i optymalizacja, Technologie informacyjne, Matematyczne metody mechatroniki, Seminarium dyplomowe, Kierunkowy projekt grupowy, Metody komputerowe w mechanice, jak również trzy krótkie kursy w języku angielskim dla studentów Centrum Kształcenia Międzynarodowego Politechniki Łódzkiej (tj. Dynamika układów mechatronicznych, Optymalizacja i Inżynieria biomechaniczna). Podczas tego nauczania pełniłem funkcję promotora (15) prac inżynierskich i (2) prac magisterskich oraz zrecenzowałem (18) prac inżynierskich i (8) prac magisterskich. Ponadto, pełniłem funkcję promotora pomocniczego w (3) przewodach doktorskich już zakończonych, a obecnie pełnię funkcję promotora w (1) przewodzie doktorskim, który jest w trakcie realizacji.

Od 2016 roku jestem członkiem Sekcji Dynamiki Układów Komitetu Mechaniki Polskiej Akademii Nauk, natomiast od 2018 roku jestem członkiem Polskiego Towarzystwa Biomechaniki. W mojej karierze naukowej uczestniczyłem w (8) grantach badawczych w charakterze wykonawcy, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, Fundację na Rzecz Nauki Polskiej oraz Narodowe Centrum Nauki.

Podczas pracy naukowej opublikowałem jako współautor (32) artykuły w czasopiśmie naukowych ((13) w czasopiśmie z listy Journal Citation Report), (13) rozdziałów w książkach, (14) prac w recenzowanych materiałach konferencyjnych oraz (39) krótkich komunikatów lub abstraktów. Jako Guest-Editor brałem udział w powstaniu (3) wydań specjalnych (w tym (2) w czasopiśmie posiadających wskaźnik Impact Factor) a obecnie jestem Co-Edytorem (1) książki publikowanej przez wydawnictwo IntechOpen (w trakcie realizacji). Ponadto, opracowałem (76) recenzji (62) artykułów naukowych, w większości dla czasopism znajdujących się na liście JCR, and za opracowane recenzje zostałem wyróżniony (8) certyfikatami.

Byłem członkiem komitetu organizacyjnego (8) konferencji międzynarodowych odbywających się w Łodzi, a osobiście uczestniczyłem w (36) międzynarodowych konferencjach naukowych lub seminariach (w tym w (8) zagranicznych), a także pełniłem funkcję chairmana (1) mini-symposium dotyczącego dynamiki nieliniowej, w jednej z konferencji zagranicznych. W czasie różnych okazji takich jak spotkania naukowe, konferencje czy seminaria, spędziłem krótkie okresy czasu w różnych ośrodkach naukowych lub laboratoriach takich jak: Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Podstaw Budowy Maszyn (jednodniowe wizyty w 2008, 2010, 2012, 2014 i 2018 roku); Riga Technical University, Instytut Mechaniki (8-12 września 2008, Ryga, Łotwa); Department of Applied Mechanics, FEMTO ST Institute (18-19 maja 2015, Besancon, Francja); "Politehnica" University of Timisoara, Faculty of Mechanical Engineering, Acoustics and Vibration Laboratory (28-29 maja 2015, Timisoara, Rumunia);

National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute" (27-30 września 2016, Charków, Ukraina); Higher Technical School of Engineering of the University of Seville (2-5 lipca 2017, Sewilla, Hiszpania); Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Zakład Technologii Inteligentnych oraz Zakład Mechaniki Doświadczalnej (25 maja 2018, Warszawa); Uniwersytet Zielonogórski, Zakład Inżynierii Biomedycznej (5-7 września 2018, Zielona Góra). Ponadto, aktywnie uczestniczę w pracach organizacyjnych Politechniki Łódzkiej, w tym jako członek kilku komisji dotyczących dydaktyki oraz przy opracowywaniu nowych programów kształcenia dla studentów studiów stacjonarnych i niestacjonarnych Wydziału Mechanicznego, jako opiekun praktyk studenckich na kierunku Mechatronika Wydziału Mechanicznego oraz sprawuję opiekę merytoryczną i/lub finansową nad raportami z grantów badawczych realizowanych w Katedrze, w której jestem zatrudniony.

5. Wskazanie osiągnięcia naukowego:

a) tytuł osiągnięcia naukowego

Dynamika biomechanicznych urządzeń kroczących sterowanych przy użyciu generatorów wzorca chodu

b) lista tematycznie powiązanych prac składających się na osiągnięcie naukowe

[H1] **D. Grzelczyk**, B. Stańczyk, J. Awrejcewicz (2015) On the hexapod leg control with nonlinear stick-slip vibrations, Applied Mechanics and Materials, 801, 12-24.

Mój udział: 70%

[H2] **D. Grzelczyk**, B. Stańczyk, J. Awrejcewicz (2015) Power consumption analysis of different hexapod robot gaits, in: Dynamical Systems - Mechatronics and Life Sciences, Eds. J. Awrejcewicz, M. Kaźmierczak, J. Mrozowski, P. Olejnik, TU of Lodz, Lodz, 2015, 197-206 (978-83-7283-707-3).

Mój udział: 60%

[H3] B. Stańczyk, **D. Grzelczyk**, J. Awrejcewicz (2012) Control of mobile walking robot (hexapod), Measurements Automation Robotics, 12, 157-159.

Mój udział: 30%

[H4] **D. Grzelczyk**, B. Stańczyk, J. Awrejcewicz (2016) Prototype, control system architecture and controlling of the hexapod legs with nonlinear stick-slip vibrations, Mechatronics, 37, 63-78. (IF = 2.496)

Mój udział: 70%

[H5] **D. Grzelczyk**, B. Stańczyk, J. Awrejcewicz (2016) Estimation on the contact forces between the hexapod legs and the ground during walking in the tripod gait, Vibrations in Physical Systems, 27, 107-114.

Mój udział: 70%

[H6] **D. Grzelczyk**, B. Stańczyk, J. Awrejcewicz (2017) Kinematics, dynamics and power consumption analysis of the hexapod robot during walking with tripod gait, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 17(5), 1740010-1 - 1740010-17. (IF = 2.082)
Mój udział: 70%

[H7] **D. Grzelczyk**, B. Stańczyk, O. Szymanowska, J. Awrejcewicz (2017) Simulation of the octopod robot controlled by different central patterns generators, in: *Engineering Dynamics and Life Sciences*, (Eds.) J. Awrejcewicz, M. Kaźmierczak, J. Mrozowski, P. Olejnik, DAB&M of TUL Press, Lodz, 2017, 229-238 (ISBN 978-83-935312-4-0).
Mój udział: 70%

[H8] **D. Grzelczyk**, O. Szymanowska, J. Awrejcewicz (2019) Kinematic and dynamic simulation of an octopod robot controlled by different central pattern generators, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 233(4), 400-417. (IF = 0.988)
Mój udział: 70%

[H9] **D. Grzelczyk**, O. Szymanowska, J. Awrejcewicz (2018) Gait pattern generator for control of a lower limb exoskeleton, *Vibrations in Physical Systems*, 29, 2018007 (10 pages).
Mój udział: 65%

[H10] **D. Grzelczyk**, J. Awrejcewicz (2018) Analysis of contact forces between the ground and hexapod robot legs during tripod gait, *Machine Dynamics Research*, 42(2) (w druku).
Mój udział: 80%

[H11] **D. Grzelczyk**, J. Awrejcewicz (2019) Modeling and control of an eight-legged walking robot driven by different gait generators, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 19(5), 1941009-1 - 1941009-23. (IF = 2.082).
Mój udział: 85%

[H12] **D. Grzelczyk**, J. Awrejcewicz (2019) Dynamics, stability analysis and control of a mammal-like octopod robot driven by different central pattern generators (DOI: 10.22059/JCAMECH.2019.278583.375).
Mój udział: 85%

[H13] **D. Grzelczyk** (2019) Control of the multi-legged robots on planar, unstable and vibrating ground (niepublikowany raport z grantu OPUS 9, styczeń-marzec 2019).
Mój udział: 100%

[H14] **D. Grzelczyk** (2019) Modeling and control of human lower limb exoskeletons driven by linear actuators (niepublikowany raport z grantu OPUS 9, styczeń-marzec 2019).
Mój udział: 100%

c) cel osiągnięcia naukowego i krótkie omówienie treści prac składających się na osiągnięcie naukowe

Przedstawione osiągnięcie naukowe dotyczy modelowania, symulacji numerycznej i weryfikacji eksperymentalnej różnych inspirowanych biologicznie wielonożnych urządzeń kroczących sterowanych przy użyciu generatorów wzorca chodu (eng. Central Pattern Generators - CPGs). W przypadku tej metody sterowania, położenia kątowe w poszczególnych przegubach nóg robota wyznaczone są na podstawie zależności na kinematykę odwrotną. Kształt trajektorii zakreślonej przez końcówkę pojedynczej nogi robota (stopę) modelowany jest za pomocą pewnych funkcji okresowych. Wspomniane podejście może być traktowane jako pewnego rodzaju sieci, które generują rytmiczne sygnały

wyjściowe przy braku sygnałów wejściowych. Takie rodzaje rytmicznych ruchów wykryte zostały przez biologów w różnych biologicznych procesach zmieniających się okresowo takich jak pływanie, bieganie, oddychanie, latanie, żucie lub chodzenie. Aby zaimplementować taki sposób sterowania nogami robota, zastosowano różne, dobrze znane nieliniowe oscylatory pracujące jako modele CPG, a także zaproponowano kilka nowych modeli. Głównym celem przeprowadzonych badań było uzyskanie lepszych parametrów kinematycznych i dynamicznych badanych maszyn podczas procesu lokomocji, co ostatecznie doprowadziło do zwiększenia stabilności robota i możliwości jego sterowania.

Do stworzenia niektórych przedstawionych projektów robotów, wykorzystane zostało środowisko Inventor Professional. Z kolei, w celu przeprowadzenia wirtualnych eksperymentów dotyczących badanych maszyn krocących, przetestowano wiele modeli symulacyjnych robotów zaimplementowanych w środowiskach Scilab lub Mathematica. Stworzone modele symulacyjne pozwoliły mi na wizualizację procesu chodzenia badanych robotów oraz kontrolę poprawności uzyskiwanych wyników. W szczególności, byłem w stanie kontrolować położenia przestrzenne poszczególnych elementów robota oraz konfiguracje poszczególnych nóg. W konsekwencji, pozwoliło mi to lepiej zrozumieć uzyskane wyniki symulacji, tzn. różne kluczowe parametry kinematyczne i dynamiczne krocącego robota.

Należy zauważyć, że prezentowane badania mają charakter interdyscyplinarny, ponieważ łączą wiele zagadnień naukowych, w tym dynamikę nieliniową (rozwiązywanie nieliniowych równań różniczkowych zwyczajnych opisujących stosowane oscylatory pracujące jako modele CPG), kinematykę prostą, kinematykę odwrotną, dynamikę odwrotną, modelowanie różnych robotów w środowisku typu CAD, oryginalne trójwymiarowe symulacje procesu chodzenia maszyn krocących w środowiskach Scilab i Mathematica, programowanie mikrokontrolera, jak również pewne badania doświadczalne wykorzystane do weryfikacji wyników symulacyjnych. Wyłączając kilka modeli CAD robotów, budowę dwóch prototypów robotów i przygotowanie rzeczywistych obiektów do badań eksperymentalnych, byłem odpowiedzialny za wszystkie kwestie uwzględnione w prezentowanym osiągnięciu naukowym. W ogólności, proponowałem nowe pomysły, formułowałem wymagane zależności matematyczne (równania itp. zależności), implementowałem proponowane metody i modele symulacyjne, przeprowadzałem testy symulacyjne chodu robota, ale także koordynowałem badania eksperymentalne z wykorzystaniem rzeczywistych obiektów.

Motywacja podjętych badań

W ostatnich dziesięcioleciach roboty kroczące zyskały duże znaczenie w zastosowaniach inżynierskich i były szeroko badane w literaturze. W ogólności, każdy robot kroczący może być rozważany jako układ mechatroniczny z kończynami połączonymi z głównym korpusem robota (tj. tułowiem). W takiej konstrukcji maszyny kroczącej, nogi robota odpowiedzialne są za podpieranie korpusu i odgrywają kluczową rolę jeśli chodzi o proces chodzenia robota. Jeśli nogi robota są kontrolowane z pewną autonomią, robot może poruszać się w otaczającym go środowisku i wykonywać zaplanowane zadania. Interesujący stan wiedzy dotyczący najpopularniejszych robotów sześcionożnych o strukturze nóg podobnej do struktury kończyny owadów można znaleźć w wielu artykułach przeglądowych. Wśród dużej liczby robotów kroczących można również wyróżnić roboty posiadające strukturę nóg wzorowaną na anatomii nóg ssaków. W przedstawionym osiągnięciu naukowym zbadano roboty kroczące posiadające nogi wzorowane zarówno na owadach jak i ssakach.

Około pięćdziesiąt procent powierzchni Ziemi nie jest przystosowana do pojazdów kołowych. Jednakże dostęp do tych terenów mają ludzie i zwierzęta, które mogą poruszać się po takich trudnych i nieregularnych terenach. Dlatego też obecnie istnieje duże zainteresowanie różnymi rodzajami robotów, które poruszają się za pomocą nóg, a ich ruch jest inspirowany chodzącymi zwierzętami i ludźmi spotykanymi w naturze. Ten rodzaj ruchu umożliwia pokonywanie przeszkód, poruszanie się dookoła, umożliwia dostęp do nierównych terenów,

a także jest bardziej odporny na zakłócenia w porównaniu z pojazdami gąsienicowymi lub kołowymi. Niestety jednak, roboty kroczące są wciąż wyzwaniem jeśli chodzi o kontrolowanie ich ruchów. Z drugiej strony jednak mogą być wykorzystywane w terenach, gdzie maszyny kołowe nie mogą wykonywać swoich zadań. Dzieje się tak dlatego, że roboty kroczące mogą pokonać przeszkody o wysokości równej wysokości ich kończyn, podczas gdy roboty kołowe mogą pokonać przeszkody o wysokości nie większej niż połowa promienia koła. W przeciwieństwie do robotów kołowych, gdzie kontakt kół z podłożem ma zwykle charakter ciągły, w przypadku robotów kroczących kontakt między stopami robota a podłożem zwykle przybiera postać kontaktu punktowego. Wiadomo też, że duża amplituda siły reakcji podłoża działająca na stopy robota ma negatywny wpływ na jego dynamikę. Dlatego też siły te powinny być minimalizowane, jeśli to tylko jest możliwe. W związku z tym jednym z poruszanych problemów jest problem minimalizacji sił reakcji podłoża działających na nogi robota.

Obszerny przegląd literatury podsumowany w publikacjach, których jestem współautorem i które omówione są poniżej wskazuje, że badania różnych typów maszyn kroczących nadal stanowią wyzwanie i skupiają uwagę wielu badaczy. Dlatego też, również w przedstawionym osiągnięciu naukowym, kinematyczne i dynamiczne modele różnych wersji robotów z nogami podobnymi do kończyn krabów lub ssaków zostały zaproponowane i przetestowane, a które mogą być przydatne do oszacowania kluczowych parametrów robota podczas chodu i do oceny wykorzystywanych generatorów chodu. Ponadto, zaproponowany i przetestowany został algorytm odpowiedzialny za płynne przejścia między różnymi fazami chodu, tzn. między fazą początkową, fazą rozwiniętą i fazą końcową chodu robota. Na koniec rozwiązany został problem sterowania kierunkiem ruchu robota i orientacją przestrzenną jego korpusu w trakcie chodu. Może to być przydatne dla kroczącego robota, ponieważ kwestie związane z nawigacją jak i unikaniem przeszkód są szczególnie ważne przy poruszaniu się robotów kroczących w środowisku naturalnym.

Krótkie podsumowanie treści prac związanych z osiągnięciem naukowym

Badania numeryczne dotyczące analizy kinematycznej i sterowania sześcionożnym robotem kroczącym zainicjowane zostały w pracy [H1]. Do sterowania ruchem stopy robota zaproponowany i wykorzystany został oscylator nieliniowy opisujący drgania mechaniczne typu utwierdzenie-poślizg, pracujący jako wspomniany wcześniej generator wzorca chodu. Używając również trzech innych dobrze znanych oscylatorów mechanicznych (oscylatora Hopfa, oscylatora van der Pola i oscylatora Rayleigha), zilustrowano i omówiono zalety proponowanego modelu CPG, w tym możliwość sterowania nogą robota poprzez zmianę parametrów charakteryzujących zaproponowany oscylator. Zilustrowane i przedyskutowane zostały przebiegi czasowe kątów w poszczególnych przegubach nóg robota a także konfiguracje jego nóg w trakcie chodu, które wykazały pewne podobieństwa między ruchem symulowanego robota kroczącego a zwierzętami spotykanymi w przyrodzie. Na podstawie przeprowadzonych badań numerycznych i eksperymentalnych wykonanych przy użyciu zbudowanego prototypu pojedynczej nogi robota uzyskane zostały pewne ogólne wnioski. Prędkość ruchu robota może być zwiększona poprzez zwiększenie częstości drgań oscylatorów pracujących jako modele CPG lub poprzez zwiększenie amplitudy ruchu stopy robota w czasie konwersji trajektorii wykorzystywanego modelu CPG do przestrzeni roboczej nogi robota. Zakres ruchu stopy robota może być kontrolowany niezależnie poprzez proste skalowanie orbity modelu CPG do przestrzeni roboczej nogi. W związku z tym różne wartości współczynników wspomnianego skalowania na obu stronach robota mogą być wykorzystane do zmiany kierunku jego ruchu. Ponadto, wyniki uzyskane w tym artykule wskazują, że z punktu widzenia zapotrzebowania na energię, proponowany model CPG oparty na drganiach typu utwierdzenie-poślizg może być bardziej wydajny w porównaniu z innymi wcześniejszymi modelami CPG spotykanymi w literaturze.

W kolejnej pracy [H2], powyżej przedstawione badania kontynuowane były w aspekcie badań eksperymentalnych zużycia energii przy wykorzystaniu skonstruowanego robota hexapoda sterowanego za pomocą wcześniej przedstawionych modeli CPG. Wspomniany prototyp robot przedstawiony został dokładniej w pracy [H3], gdzie szczegółowo omówiona została jego konstrukcja mechaniczna oraz system sterowania robotem, który komunikował się za pośrednictwem bezprzewodowej sieci Bluetooth, z programem zainstalowanym na telefonie komórkowym. Praca [H2] koncentruje się głównie na analizie eksperymentalnej zapotrzebowania energetycznego robota. Pobór mocy elektrycznej przez skonstruowanego robota wyznaczany był na podstawie poboru prądu we wszystkich serwomechanizmach napędzających jego nogi. Wyniki eksperymentalne uzyskano za pomocą programu komputerowego stworzonego w środowisku LabView. Przeprowadzone badania wykazały różne zapotrzebowanie na energię, w zależności od zastosowanego modelu CPG. Porównując całkowite zapotrzebowanie na energię wszystkich serwomechanizmów zainstalowanych w robocie dla tych samych warunków ruchu udowodniono, że proponowany model CPG charakteryzuje się najniższym zapotrzebowaniem na energię. Ponieważ zużycie energii należy do jednego z głównych ograniczeń eksploatacyjnych nałożonych na autonomiczne maszyny kroczące, przeprowadzone badania wykazały, że dzięki wprowadzonemu modelowi CPG koszt energii można zmniejszyć, a czas misji robota można wydłużyć.

W porównaniu do wcześniej omówionych prac, w artykule [H4] przedstawiony został dokładniej prototyp skonstruowanego robota hexapoda w aspekcie jego zastosowania do różnych badań naukowych. W szczególności, przedstawiona została szczegółowa dyskusja dotycząca projektu i realizacji konstrukcji mechanicznej robota, elektronicznego systemu sterowania i różnych urządzeń zainstalowanych na jego korpusie. Zilustrowane i omówione zostały nowe wyniki symulacji numerycznych i wyniki badań eksperymentalnych uzyskane dla pojedynczej nogi jak i całego robota. Skonstruowany prototyp z zainstalowanym sprzętem może być wykorzystany do dalszych różnych badań lub zastosowań inspekcyjnych i operacyjnych w niedostępnych środowiskach. Na przykład, zainstalowane urządzenia mogą być używane do akwizycji audio i/lub wideo w różnych zastosowaniach inspekcyjnych, natomiast system sterowania jest w stanie niezależnie obsługiwać wszystkie zastosowane w robocie serwomechanizmy, generując w efekcie różne rodzaje chodu. Zilustrowane konfiguracje nóg robota i otrzymane numerycznie trajektorie zakreślane przez końcówki nóg wskazują na dobre podobieństwa pomiędzy symulowanymi ruchami nogi robota krocącego a ruchami nóg zwierząt występujących w przyrodzie. Również inne wyniki uzyskane numerycznie i zweryfikowane eksperymentalnie przy zastosowaniu skonstruowanego robota wykazały, że zastosowany nowy model CPG ma pewne zalety w porównaniu do innych modeli testowanych w tej pracy. W szczególności, zastosowany model typu utwierdzenie-poślizg pracujący jako CPG nie generuje zbędnych fluktuacji prędkości kierunku do przodu i w kierunku pionowym. Należy zaznaczyć, że modele CPG zastosowane w tej pracy są stosunkowo proste w porównaniu z zaawansowanymi metodami sterowania przedstawianymi w literaturze. Proponowany model CPG może być wystarczający podczas chodzenia robota po płaskich powierzchniach. W środowisku naturalnym owady mają znaczną elastyczność w ruchu, dlatego trajektoria zakreślana przez stopę nogi może być łatwo modyfikowana, gdy noga uderza w przeszkodę. Niestety, ten problem jest bardziej skomplikowany, jeśli chodzi o roboty kroczące do zastosowań inżynierskich. W pracy [H4] zaproponowano pewne rozwiązania dotyczące tego problemu sterowania. Mianowicie, gdy robot chodzi po nieregularnej powierzchni, problem ten można rozwiązać za pomocą odpowiedniego skalowania sygnału CPG w każdym cyklu kroku robota. Ta metoda może być przydatna w rzeczywistych sytuacjach i jest warta rozważenia w dalszych badaniach.

Omówione powyżej prace [H1,H2,H4] dotyczą badania kluczowych parametrów kinematycznych podczas chodu robota, z pominięciem parametrów dynamicznych. Dlatego też dalsze badania dotyczyły również dynamicznych właściwości robotów kroczących. W pracy [H5] wprowadzone zostało modelowanie dynamiczne badanego wcześniej robota

sześcionożnego chodzącego chodem trójpodporowym po płaskim i twardym podłożu. Wybór takiego właśnie typu chodu robota ma swoje uzasadnienie. Mianowicie, ten typ chodu jest często wykorzystywany przez rzeczywiste owady sześćonożne, jak i również przez sześćonożne maszyny kroczące spotykane w zastosowaniach technicznych. Podczas chodu trójpodporowego, na ogół w każdej chwili ruchu robota wielokąt podparcia stworzony jest tylko przez trzy kończyny. Dlatego siły reakcji podłoża są większe niż w przypadku innych rodzajów chodu robota sześćonożnego. Co więcej, wybór stosunkowo twardego podłoża ma również swoje uzasadnienie, ponieważ ten typ powierzchni wytwarza większą siłę reakcji i odpowiednio większe przeciążenie dynamiczne działające na nogi robota. Dlatego więc największych sił reakcji podłoża i dynamicznych przeciążeń dla robota sześćonożnego oczekiwać można podczas chodu trójpodporowego na twardej powierzchni. Korzystając z koncepcji dynamiki odwrotnej oraz wprowadzając pewne uproszczenia wynikające z symetrii robota, numerycznie oszacowane zostały składowe normalne siły reakcji podłoża działających na jego nogi. W rezultacie, w zależności od zastosowanego modelu CPG napędzającego nogi robota, uzyskane zostały różne przebiegi czasowe sił stykowych i przeciążeń dynamicznych. Należy zauważyć, że wyżej wymienione zagadnienia dotyczące sił stykowych działających na nogi robota są jedną z najważniejszych kwestii, które należy wziąć pod uwagę podczas planowania ruchu robota. Chociaż w przeprowadzonym badaniu numerycznym wprowadzono pewne założenia, to uzyskane wyniki symulacyjne można z powodzeniem wykorzystać do porównania testowanych modeli CPG. Wreszcie, uzyskane informacje mogą być wykorzystane do dalszej analizy wytrzymałościowej nóg robota, aby zapewnić bezproblemowe użytkowanie oraz wydłużenie żywotności i czasu jego pracy.

Artykuł [H6] stanowi kontynuację badań zainicjowanych w pracach omówionych powyżej. Mianowicie, badania przedstawione w tym artykule skupiają się na analizie kinematycznej, dynamicznej i poborze mocy robota sześćonożnego. W tym badaniu wykorzystano drugą wersję skonstruowanego prototypu robota, również chodzącego chodem trójpodporowym po płaskiej i twardej powierzchni. Do napędzania jego nóg wykorzystane zostały te same modele CPG. Zostały one przetestowane i porównane z punktu widzenia fluktuacji położeń i prędkości ciała robota, zarówno w kierunku do przodu, jak i w kierunku pionowym, sił reakcji podłoża (tylko składowych normalnych) pomiędzy nogami robota a podłożem, a także zużycia energii całego robota podczas chodu. Symulacje numeryczne kluczowych parametrów kinematycznych i dynamicznych zweryfikowane zostały eksperymentalnie. Z kolei, analiza zapotrzebowania robota na energię przeprowadzona została jedynie eksperymentalnie, na podstawie całkowitego zużycia prądu we wszystkich serwomechanizmach napędzających jego kończyny. Również w tej pracy wykryto, zilustrowano i omówiono niektóre zalety oscylatora typu utwierdzenie-poślizg pracującego jako model CPG. Jest to istotne, gdyż odpowiedni wybór ruchu nogi robota może mieć pozytywny wpływ na jego parametry lokomocyjne. W niektórych sytuacjach można uniknąć niepotrzebnego przyspieszania/zwalniania robota, zmniejszyć siły reakcji podłoża działające na jego nogi, a także zmniejszać jego zapotrzebowanie na energię.

We wszystkich omówionych powyżej artykułach zbadane zostały zarówno modele symulacyjne jak i skonstruowane prototypy robotów kroczących. We wszystkich wspomnianych przypadkach badany był robot napędzany czterema różnymi oscylatorami pracującymi jako modele CPG, tj. oscylatorem Hopfa, oscylatorem van der Pola, oscylatorem Rayleigha i oscylatorem typu utwierdzenie-poślizg. W przeciwieństwie do poprzednich artykułów, w pracy [H7] opracowany został nowy model robota ośmionożnego i zbadany został numerycznie w celu wyznaczenia najważniejszych parametrów kinematycznych podczas chodu. Również i w tym przypadku przeprowadzono symulacje numeryczne przy założeniu płaskiej i twardej powierzchni. Zastosowano również inny, dobrze znany model CPG (tj. model zbudowany na podstawie tzw. kraty Toda-Rayleigha). Jednak główną nowością tego artykułu jest propozycja nowego modelu CPG skonstruowanego przy wykorzystaniu funkcji sinus. Zaproponowany model chodu jest stosunkowo prosty w

porównaniu z innymi metodami sterowania dostępnymi w literaturze i może być szczególnie przydatny, gdy robot chodzi po płaskich/regularnych powierzchniach. W szczególności, niniejszy artykuł przedstawia symulację kinematyki robota ośmionożnego w trakcie chodu po płaskiej i twardej powierzchni (tak jak w poprzednich pracach), napędzanego za pomocą różnych, dobrze znanych nieliniowych oscylatorów pracujących jako modele CPG (jak również za pomocą nowo opracowanego modelu CPG). Obliczono, zilustrowano i omówiono zarówno przemieszczenia, jak i fluktuacje prędkości środka ciężkości robota w różnych kierunkach. Ostatecznie, przedstawione zostały pewne zalety zaproponowanego generatora chodu, w tym brak zbędnych przyspieszeń i opóźnień środka ciężkości robota. Przedstawione zalety mają pozytywny wpływ na dynamikę robota, zwłaszcza jeśli chodzi o minimalizację sił reakcji podłoża działających na jego nogi i niskie zużycie energii przez robota podczas chodzenia. Wykazano, że model CPG skonstruowany na podstawie oscylatora van der Pola wydaje się być najgorszy, ponieważ wykryto największe niepotrzebne przyspieszenia i opóźnienia, zarówno w kierunku ruchu, jak i w kierunku pionowym robota. W przeciwieństwie do tego, robot sterowany przez zaproponowany model CPG nie wykazuje niepotrzebnych wahań w kierunku ruchu ani w kierunku pionowym. Dlatego też generator chodu zaproponowany w tej pracy może być bardziej wydajny z punktu widzenia zapotrzebowania energetycznego robota w porównaniu z innymi modelami. Uzyskane w ten sposób informacje mogą być przydatne do dalszej analizy wytrzymałościowej i stabilności całego robota, bezawaryjnego jego użytkowania, jak również wydłużenia żywotności i czasu pracy robota.

Badania numeryczne robota sześćcionożnego i nowego modelu chodu przeprowadzone w pracy [H7] zostały znacznie rozszerzone w artykule [H8]. Oprócz wyznaczania kluczowych parametrów kinematycznych robota, zilustrowane i omówione zostały także przebiegi czasowe parametrów dynamicznych robota podczas chodu. W celu oceny zastosowanych generatorów chodu przeanalizowane zostały przemieszczenia i prędkość środka ciężkości, siły reakcji podłoża działające na nogi robota, a także niektóre aspekty dotyczące zużycia energii. Uzyskane parametry dynamiczne potwierdziły zalety generatora chodu przedstawionego wcześniej w pracy [H7]. Podsumowując, należy wspomnieć, że zaproponowany generator chodu jest stosunkowo prosty w porównaniu z innymi metodami spotykanymi w literaturze. W szczególności, nie jest wymagane rozwiązywanie nieliniowych równań różniczkowych, w przeciwieństwie do wszystkich wcześniej przedstawionych modeli CPG. Szczegółowa analiza wyników wykazała, że dla oscylatorów Hopfa, van der Pola i kraty Toda-Rayleigha, zmiana parametru odpowiedzialnego za częstość drgań oscylatora, wpływa zarówno na częstość drgań jak i amplitudę oscylacji. W przypadku zaproponowanego modelu CPG, zmiana wartości tego parametru ma wpływ jedynie na częstość oscylacji, co ułatwia kontrolę parametrów kinematycznych robota kroczącego. Co więcej, proponowany model chodu nie generuje zbędnych wahań środka ciężkości robota ani przyspieszeń/opóźnień w kierunku ruchu robota. Należy wspomnieć, że chociaż wahania środka ciężkości robota były w tej pracy pomijalnie małe, to mogą wystąpić pewne odchylenia środka ciężkości od zakładanej trajektorii w przypadku rzeczywistego prototypu, co może być spowodowane, na przykład, przez błędy sterowania i dynamikę napędów zainstalowanych w poszczególnych przegubach robota.

W moich badaniach naukowych, jako promotor pomocniczy w jednym z przewodów doktorskich, byłem również zaangażowany w badania, które dotyczyły modelowania matematycznego, symulacji numerycznej i obserwacji eksperymentalnej upadku człowieka do przodu na wyciągnięte ramiona. Opracowany model upadku człowieka wymuszany był kinematycznie za pomocą przebiegów czasowych kątów w przegubach odpowiadających stawom barkowym człowieka. Wspomniane zależności kątowe obserwowane były za pomocą systemu przechwytywania ruchu Optitrack, zainstalowanego w Katedrze Automatyki, Biomechaniki i Mechatroniki Politechniki Łódzkiej. W pracy [H9] wykorzystałem zdobyte doświadczenie związane ze wspomnianym systemem Optitrack. Badania te dotyczyły przedstawienia i omówienia obserwacji eksperymentalnej chodu człowieka. W

rezultacie, generator chodu wprowadzony w dwóch wcześniej omówionych pracach zaproponowany został jako generator chodu do sterowania ruchem egzozszkieletu kończyny dolnej człowieka. W tym celu opracowano i wdrożono w środowisku Scilab model biomechaniczny ludzkiej kończyny dolnej. Jak wykazano w pracy [H9], poprzednio opracowany generator chodu dedykowany do sterowania nogami robota kroczącego, może być również zastosowany do sterowania egzozszkieletem kończyny dolnej człowieka i wspomagania różnych typów nieprawidłowości chodu u pacjentów z różnymi zaburzeniami ruchowymi, poprzez zmianę parametrów układu sterowania. Praca zawiera pewne informacje przydatne do sterowania egzozszkieletem kończyn dolnych, a wyniki symulacji numerycznych można traktować jako wytyczne do dalszego ulepszania proponowanego modelu chodu i jego zastosowania w systemie sterowania egzozszkieletem.

W kolejnym artykule [H10] opracowano i zaimplementowano w środowisku Mathematica inny kinematyczny/dynamiczny model symulacyjny robota sześcionożnego. W przeciwieństwie do poprzednich robotów sześcionożnych/ośmionożnych podobnych budową nóg do krabów, zastosowano inny model kinematyczny nogi robota, tj. taki sam jak uproszczony model kinematyczny ludzkiej kończyny dolnej przedstawiony w pracy [H9]. Model symulowany robota sześcionożnego kroczącego klasycznym chodem trójpodporowym po płaskiej powierzchni napędzany bym generatorem chodu przedstawionym w pracy [H9]. Aby ocenić zastosowaną metodę sterowania, wyznaczone zostały szeregi czasowe kinematycznych i dynamicznych parametrów robota, a siły reakcji podłoża i przeciążenia działające na nogi robota oszacowane zostały przy wykorzystaniu koncepcji dynamiki odwrotnej. Również w tej pracy wyraźnie podkreślono zalety proponowanego modelu CPG, zarówno w odniesieniu do parametrów kinematycznych (przemieszczenie i prędkość całego robota), a także parametrów dynamicznych (siły reakcji podłoża i przeciążenia działające na nogi robota). W pracy tej rozważono również problem planowania trajektorii położenia ciała robota podczas chodu. Możliwość zmiany pozycji pionowej korpusu robota wydaje się być przydatna. Dlatego w opracowanym modelu symulacyjnym można dokładnie kontrolować położenie robota w kierunku pionowym podczas chodu. Takie sterowanie jego ruchem może być przydatne w środowisku naturalnym, na przykład, gdy robot idzie pod lub nad przeszkodami. Uzyskane wyniki numeryczne można traktować jako wytyczne do dalszego doskonalenia zastosowanego modelu CPG i jego dalszych zastosowań w systemach sterowania innych robotów wielonożnych.

Oprócz licznych robotów podobnych budową nóg do krabów i spotykanych w literaturze, można również wyróżnić roboty o strukturze nóg wzorowanych na podstawie anatomii kończyn dolnych ssaków. W porównaniu z robotami o podobnej do kraba strukturze nóg, roboty kroczące wzorowane na ssakach charakteryzują się niższą stabilnością. Dlatego w pracy [H11] opracowano nowe modele kinematyczne i dynamiczne robota ośmionożnego podobnego do ssaka i przebadano go numerycznie. Aby sterować nogami robota, zastosowano i przetestowano również nowe proste generatory chodu zbudowane w oparciu o funkcję sinus. Proponowane modele CPG są stosunkowo proste w porównaniu z innymi generatorami spotykanymi w literaturze. W szczególności, nie jest wymagane rozwiązywanie nieliniowych równań różniczkowych. Zaleta ta jest pożądana przy wdrażaniu algorytmów sterowania w postaci programu napisanego dla mikrokontrolera o ograniczonej mocy obliczeniowej. Wykazano, że zastosowane generatory chodu mogą być przydatne do uzyskania lepszych właściwości kinematycznych i dynamicznych ruchu całego robota. Zalety proponowanych modeli wzorców chodu zostały wyraźnie podkreślone, zwłaszcza w odniesieniu do kluczowych parametrów kinematycznych (tj. przemieszczeń i prędkości całego robota) jak i parametrów dynamicznych (tj. sił reakcji podłoża działających na nogi robota). Kolejną nowością tego artykułu jest propozycja jednego modelu chodu zdolnego do kontrolowania początkowej, regularnej i końcowej fazy chodu robota, bez konieczności generowania dodatkowych sygnałów sterujących. Zostało to zrealizowane poprzez odpowiednią zmianę zarówno długości jak i wysokości pojedynczego kroku robota. Wyniki symulacji uzyskane w oprogramowaniu Mathematica zostały przedstawione w formie

szeregów czasowych najważniejszych parametrów kinematycznych i dynamicznych robota podczas chodu, jak i konfiguracji robota wykreślonych w regularnych odstępach czasu. Opracowany model symulacyjny robota pozwala również na precyzyjne sterowanie pozycją pionową. W rezultacie, zaobserwowano większą stabilność całego robota podczas chodu i wykonywania zaplanowanych zadań, także na terenach o stosunkowo małym współczynniku tarcia między podłożem a stopami robota.

Badania przedstawione w pracy [H12] stanowią znaczne rozszerzenie metody sterowania przedstawionej w pracy [H11]. Do sterowania nogami robota, jako centralny generator wzorca chodu, zastosowano inny nieliniowy oscylator (tzw. hybrydowy oscylator van der Pol-Rayleigha). Ponadto, zaproponowano i przetestowano kolejny, nowy i wydajny model wzorca chodu. Zaproponowany generator chodu jest przydatny do uzyskiwania lepszych parametrów kinematycznych i dynamicznych ruchu robota poruszającego się w różnych kierunkach. Zmieniając długość i wysokość pojedynczego kroku robota, uwzględnione zostały początkowe, rytmiczne i końcowe fazy chodu robota, jak w poprzednim artykule [H11]. Wykorzystując model symulacyjny opracowany w programie Mathematica, obliczono, przedstawiono i omówiono przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia środka ciała robota, fluktuacje punktu ZMP (Zero-Moment-Point) oraz siły reakcji podłoża działające na stopy robota. Otrzymane wyniki wykazały zalety zaproponowanego nowego modelu CPG jeśli chodzi o fluktuacje przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń ciała robota, stabilność dynamiczną oraz minimalną wartość współczynnika tarcia, która jest niezbędna, aby uniknąć poślizgu między podłożem a stopami robota podczas chodu. Co więcej, zaproponowany model chodu nie generuje niepotrzebnych wahań prędkości robota, zarówno w kierunku pionowym jak i poziomym robota (tzn. do przodu i na bok). W rezultacie ma to również pozytywny wpływ na jego parametry dynamiczne. Ponadto, tak jak niektóre z wcześniej omawianych modeli, proponowany generator chodu jest stosunkowo prosty w porównaniu z pozostałymi trzema testowanymi modelami CPG zbudowanymi na podstawie oscylatorów nieliniowych. W szczególności, wprowadzony w tej pracy model generatora chodu nie wymaga rozwiązywania nieliniowych równań różniczkowych, co jest szczególnie korzystne podczas implementacji tego modelu w postaci programu napisanego dla mikrokontrolera o ograniczonej mocy obliczeniowej. Zastosowany model chodu pozwolił również na precyzyjną kontrolę położenia pionowego robota podczas chodu w różnych kierunkach.

Ostatnio, w wyniku badań przeprowadzonych w ramach jednego z projektów badawczych, których jestem wykonawcą, znacznie rozszerzyłem metody kontroli maszynami kroczącymi. Ponadto kontynuowałem badania związane z problemem sterowania egzoszkieletem kończyn dolnych człowieka, po raz pierwszy wspomnianym w pracy [H9]. Prace [H13,H14] stanowią niedawno zredagowane raporty ze wspomnianego grantu jako moje osiągnięcia w tym projekcie w okresie od stycznia do marca 2019r. Materiały przedstawione w tych raportach zostaną rozszerzone i przygotowane w przyszłości jako prace badawcze do ewentualnej publikacji w czasopiśmie.

W pracy [H13] opracowano i zbadano numerycznie ogólny model kinematyczny wielonożnego tzw. robota hybrydowego, tzn. robota wyposażonego w kończyny o strukturze podobnej do kończyn krabów i/lub ssaków. Do sterowania kończynami robota wykorzystano i przetestowano generator chodu opracowany w artykule [H12]. W przeciwieństwie do moich najnowszych opublikowanych badań, w tym raporcie omówiony został problem precyzyjnej kontroli położenia korpusu robota podczas chodzenia w różnych kierunkach. Zastosowane podejścia pozwalają na jednoczesne sterowanie wszystkimi sześcioma stopniami swobody ciała robota (tj. odpowiednio trzema odchyleniami i trzema obrotami wzdłuż i wokół trzech różnych osi), jak również jednoczesne sterowanie wszystkimi nogami robota. W rezultacie badany robot może zostać potraktowany i wykorzystany jako w pełni kontrolowana chodząca platforma Stewarta. Ponadto, zastosowany algorytm może być również z powodzeniem wykorzystany do koordynacji i kontroli wszystkich kończyn robota podczas stania na niestabilnym lub drgającym podłożu. Na przykład, przydatne może okazać się

ustabilizowanie położenia robota, gdy podłoże podpierające jest drgające lub niestabilne. Ponieważ najnowsze wersje oprogramowania Mathematica umożliwiają komunikację z różnymi mikrokontrolerami takimi jak Arduino Uno lub Raspberry Pi, opracowany i przedstawiony po raz pierwszy w tym raporcie algorytm można stosunkowo łatwo dostosować do sterowania rzeczywistymi konstrukcjami różnych robotów wielonożnych.

W raporcie [H14] zaproponowane zostały trzy projekty egzozszkieletów kończyn dolnych człowieka, napędzanych liniowymi siłownikami elektrycznymi. Aby lepiej przeanalizować kluczowe parametry kinematyczne takich urządzeń, w środowisku Mathematica stworzony został ogólny trójwymiarowy model symulacyjny egzozszkieletu. Jako zmienne przegubowe w poszczególnych stawach egzozszkieletu wykorzystane zostały szeregi czasowe kątów stawowych występujących podczas normalnego chodu, uzyskane na podstawie wcześniejszych badań eksperymentalnych z wykorzystaniem systemu przechwytywania ruchu, o czym była mowa w pracy [H9]. Opracowany został nowy generator chodu. Generuje on rytmiczne ruchy w dwóch najważniejszych stawach człowieka jeśli chodzi o proces chodzenia, tj. w stawach biodrowych i kolanowych obu kończyn. W celu zweryfikowania możliwości wykorzystania metod sterowania przedstawionych w tym raporcie, skonstruowano i przetestowano eksperymentalnie prototyp pojedynczej kończyny egzozszkieletu. Badanie dało obiecujące wyniki dotyczące proponowanych możliwości sterowania egzozszkieletem. W rezultacie, możliwe jest opracowanie stosunkowo taniej i wydajnej konstrukcji, a także stosunkowo prostych i tanich systemów sterujących takimi urządzeniami.

Literatura

- [H1] **D. Grzelczyk**, B. Stańczyk, J. Awrejcewicz (2015) On the hexapod leg control with nonlinear stick-slip vibrations, *Applied Mechanics and Materials*, 801, 12-24.
- [H2] **D. Grzelczyk**, B. Stańczyk, J. Awrejcewicz (2015) Power consumption analysis of different hexapod robot gaits, in: *Dynamical Systems - Mechatronics and Life Sciences*, Eds. J. Awrejcewicz, M. Kaźmierczak, J. Mrozowski, P. Olejnik, TU of Lodz, Lodz, 2015, 197-206 (978-83-7283-707-3).
- [H3] B. Stańczyk, **D. Grzelczyk**, J. Awrejcewicz (2012) Control of mobile walking robot (hexapod), *Measurements Automation Robotics*, 12, 157-159.
- [H4] **D. Grzelczyk**, B. Stańczyk, J. Awrejcewicz (2016) Prototype, control system architecture and controlling of the hexapod legs with nonlinear stick-slip vibrations, *Mechatronics*, 37, 63-78.
- [H5] **D. Grzelczyk**, B. Stańczyk, J. Awrejcewicz (2016) Estimation on the contact forces between the hexapod legs and the ground during walking in the tripod gait, *Vibrations in Physical Systems*, 27, 107-114.
- [H6] **D. Grzelczyk**, B. Stańczyk, J. Awrejcewicz (2017) Kinematics, dynamics and power consumption analysis of the hexapod robot during walking with tripod gait, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 17(5), 1740010-1 - 1740010-17.
- [H7] **D. Grzelczyk**, B. Stańczyk, O. Szymanowska, J. Awrejcewicz (2017) Simulation of the octopod robot controlled by different central patterns generators, in: *Engineering Dynamics and Life Sciences*, (Eds.) J. Awrejcewicz, M. Kaźmierczak, J. Mrozowski, P. Olejnik, DAB&M of TUL Press, Lodz, 2017, 229-238 (ISBN 978-83-935312-4-0).
- [H8] **D. Grzelczyk**, O. Szymanowska, J. Awrejcewicz (2019) Kinematic and dynamic simulation of an octopod robot controlled by different central pattern generators, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 233(4), 400-417.
- [H9] **D. Grzelczyk**, O. Szymanowska, J. Awrejcewicz (2018) Gait pattern generator for control of a lower limb exoskeleton, *Vibrations in Physical Systems*, 29, 2018007 (10 pages).
- [H10] **D. Grzelczyk**, J. Awrejcewicz (2018) Analysis of contact forces between the ground and hexapod robot legs during tripod gait, *Machine Dynamics Research*, 42(2) (in press).

- [H11] **D. Grzelczyk**, J. Awrejcewicz (2019) Modeling and control of an eight-legged walking robot driven by different gait generators, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 19(5), 1941009-1 - 1941009-23.
- [H12] **D. Grzelczyk**, J. Awrejcewicz (2019) Dynamics, stability analysis and control of a mammal-like octopod robot driven by different central pattern generators (DOI: 10.22059/JCAMECH.2019.278583.375).
- [H13] **D. Grzelczyk**, J. Awrejcewicz (2019) Control of the multi-legged robots on planar, unstable and vibrating ground (unpublished report for OPUS 9 for January-March 2019).
- [H14] **D. Grzelczyk**, J. Awrejcewicz (2019) Modeling and control of human lower limb exoskeletons driven by linear actuators (unpublished report for OPUS 9 for January-March 2019).

6. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Moje pozostałe osiągnięcia naukowe (po uzyskaniu stopnia doktora) opublikowane we współautorskich artykułach obejmują następujące tematy:

- a) procesy zużywania w mechanicznym sprzęgle ciernym
- b) zjawiska cieplne w mechanicznym sprzęgle ciernym
- c) dynamika nieliniowa wybranych układów mechanicznych
- d) dynamika układów napędowych z silnikiem krokowym
- e) modelowanie procesu upadku człowieka do przodu
- f) modelowanie procesu wymiany stawu biodrowego
- g) modelowanie zjawisk optycznych w ośrodkach dwójłomnych

Mój procentowy udział w powstaniu każdej z omówionych poniżej prac przedstawiony został w spisie literatury.

a) procesy zużywania w mechanicznym sprzęgle ciernym

Badania przedstawione w pracach [1-7] poświęcone są modelowaniu matematycznemu, analizie teoretycznej i numerycznej, symulacjom numerycznym oraz weryfikacji eksperymentalnej procesów zużywania zachodzących na powierzchni styku okładzin mechanicznego sprzęgła ciernego, jako kontynuacja rozpoczętych badań w ramach mojej pracy doktorskiej. W przeciwieństwie do niektórych wcześniejszych publikacji dostępnych w literaturze, uwzględnione zostały zarówno właściwości zużywania jak i elastyczność materiałów ciernych będących w kontakcie ciernym. Podczas szczegółowego modelowania matematycznego oraz dalszych symulacji numerycznych, wykorzystano i zbadano zarówno ogólny nieliniowy różniczkowy model zużycia, jak i model zużycia w postaci całkowitej. Rozwiązane zostały równania dotyczące nacisków stykowych, rozkładów zużycia poszczególnych okładzin ciernych, zmniejszenia odległości między tarczami sprzęgła oraz momentu tarcia przenieszonego przez sprzęgło, a uzyskane wyniki porównano z danymi doświadczalnymi. We wspomnianych artykułach szczegółowo przedstawiono opis matematyczny, analizę teoretyczną, bezwymiarową postać równań, algorytmy numeryczne, symulacje oraz zastosowane metody eksperymentalne. Aby przeprowadzić analizę badanego układu, zastosowano zarówno metody analityczne jak i numeryczne, w tym zastosowanie transformaty Laplace'a do równań różniczkowych zwyczajnych. Wykazano, że wyniki teoretyczne i symulacje numeryczne zgadzają się z danymi eksperymentalnymi. Ponieważ wyżej wymienione modele dobrze opisują rozważane zjawiska tribologiczne, proponowane modele wykorzystano w symulacjach numerycznych w szerszym zakresie parametrów przy użyciu własnych programów komputerowych. W obliczeniach numerycznych zbadano symetryczny układ składający się z dwóch identycznych okładzin ciernych sprzęgła i dla różnych wartości parametrów układu. Przedstawione modele umożliwiają jednak analizę ogólnego niesymetrycznego układu okładzin ciernych sprzęgła. Podczas symulacji numerycznych w szerszym zakresie zmian parametrów możliwe było wyznaczenie nierównomiernego rozkładu nacisku i zużycia na powierzchni styku materiałów ciernych sprzęgła. Uzyskane wyniki mogą być pomocne w lepszym zrozumieniu mechanizmów procesów zużycia okładzin ciernych sprzęgła i mogą być wykorzystane w analizie wytrzymałości takich układów. Ponadto, uwzględniając zmiany rozkładu nacisków stykowych, moment siły tarcia przenoszony przez sprzęgło można oszacować dokładniej. Należy zauważyć, że w prezentowanych badaniach przyjęto brak drgań skrętnych podczas styku obu okładzin. Wiadomo jednak, że w praktyce względny poślizg pomiędzy nimi jest często nieunikniony. Ponadto, chociaż badania omawiane w tych pracach zostały przeprowadzone dla warunków stacjonarnych, proponowane modele matematyczne mogą być również wykorzystane do analizy w warunkach niestacjonarnych (tj. dla zmiennej siły dociskającej tarczy sprzęgłowej czy też zmiennej w czasie względnej prędkości poślizgu

między okładzinami). Połączenie wszystkich rozważanych i omówionych powyżej zagadnień w jeden złożony układ tribologiczny powinno dać dokładniejsze wyniki, które lepiej będą się zgadzać z wynikami rzeczywistymi. Podsumowując, należy podkreślić, że w porównaniu do poprzednich artykułów związanych z moją pracą doktorską, w pracach omówionych powyżej odpowiednie modele matematyczne zostały rozszerzone i uogólnione, metodologia badań i interpretacja danych eksperymentalnych zostały dokładniej przedstawione, a ponadto dokładniejsza analiza teoretyczna jak i nowe wyniki numeryczne zostały zilustrowane i przedyskutowane.

b) zjawiska cieplne w mechanicznym sprzęgle ciernym

W pracach [6-10] również kontynuowałem badania dotyczące procesów cieplnych zachodzących między okładzinami ciernymi mechanicznego sprzęgła ciernego. Wiadomo, że zjawiska cieplne występujące na obszarze styku okładzin ciernych w sprzęgle mechanicznym lub w układach hamulcowych mają ogromny wpływ zarówno na wytrzymałość elementów tych układów, jak i na ich dynamikę. Wspomniane zagadnienia kontaktowe występujące w takich układach uwzględniają ciepło wytwarzane na styku powierzchni ciernych. Ogólnie rzecz biorąc, zjawiska zachodzące na powierzchni styku sprzęgła ciernego zależą od wielu parametrów układu, co zwróciło uwagę wielu badaczy zajmujących się analizą tych zjawisk w różnego rodzaju układach mechanicznych, takich jak sprzęgła, hamulce itp. We wspomnianych artykułach przedstawiono model matematyczny opisujący procesy wytwarzania ciepła i jego rozchodzenia się w mechanicznym sprzęgle ciernym, który następnie został przebadany numerycznie i zweryfikowany eksperymentalnie. Proponowany model uwzględnia nierówny rozkład gęstości strumienia ciepła wytwarzanego w sprzęgle, przewodność cieplną materiałów okładzin ciernych, oraz wymianę ciepła między okładzinami ciernymi i otoczeniem. Rozważany obiekt badań opisany został za pomocą układu liniowych równań jednorodnych i niejednorodnych, które zostały rozwiązane przy użyciu własnego algorytmu komputerowego. Opisano i omówiono kilka interesujących wyników numerycznych i eksperymentalnych. Ponadto, przeprowadzona została prosta jakościowa weryfikacja eksperymentalna proponowanego modelu, która wykazała stosunkowo dobrą zgodność jakościową symulacji numerycznych z wynikami eksperymentalnymi uzyskanymi za pomocą kamery na podczerwień. Stosunkowo prosty eksperyment wykazał, że proponowany model matematyczny opisuje zjawiska cieplne występujące w prawdziwych sprzęgłach ciernych wystarczająco dobrze. W efekcie, przedstawiony model można wykorzystać do dalszych badań numerycznych w szerszym zakresie zmian parametrów, co również zostało przedstawione w omawianych artykułach.

c) dynamika nieliniowa wybranych układów mechanicznych

W pracy [11] przedstawiono badania numeryczne modelu układu mechanicznego o czterech stopniach swobody z tarciami suchymi i drganiami typu utwierdzenie-poślizg, które mogą wyjaśniać nieregularne drgania układów liniowych prowadnic mechanicznych. Wspomniane drgania typu utwierdzenie-poślizg są wynikiem występowania w układzie ruchomego pasa, który porusza się ze stałą prędkością jako podłoże badanego układu. Rozważany problem jest ważny z praktycznego punktu widzenia, ponieważ zjawisko tarcia i drgania typu utwierdzenie-poślizg występujące w rzeczywistych układach mechanicznych mają ogromny wpływ na wytrzymałość ich elementów, jak również na ich dynamikę. Rozważany układ mechaniczny opisany jest układem równań ruchu otrzymanymi z równań Lagrange'a drugiego rodzaju, a analiza numeryczna przeprowadzona została z wykorzystaniem jakościowych i ilościowych teorii nieliniowych równań różniczkowych. W szczególności, dynamika rozważanego układu monitorowana była za pomocą standardowych portretów fazowych. W rezultacie, wykryto, zilustrowano i omówiono pewne interesujące drgania nieregularne.

Aby uzyskać pełniejszą analizę jakościową dynamiki rozpatrywanego układu, w pracy [12] wyznaczono diagram bifurkacyjny z prędkością pasa jako parametrem kontrolnym. Dodatkowo, obliczono wykładniki Lapunowa odpowiadające rozwiązaniom pokazanym na wykresie bifurkacyjnym. Obliczone wykładniki Lapunowa potwierdziły okresowe i chaotyczne zachowanie układu pokazane za pomocą trajektorii fazowych i wspomnianego diagramu.

Podobny model układu o czterech stopniach swobody przeanalizowany został również w pracy [13]. Dwa układy mechaniczne o czterech stopniach swobody, identyczne jak te przedstawione we wspomnianej pracy [13] i połączone sprężyną o charakterystyce liniowej, zbadano numerycznie w pracy [14]. W obu wyżej wymienionych artykułach zastosowano podobne narzędzia numeryczne do badania dynamiki tych układów. Układ mechaniczny o ośmiu stopniach swobody z tarciem suchym rozważany w pracy [14], składa się z dwóch identycznych układów mechanicznych o czterech stopniach swobody, które są wymuszane za pomocą dwóch osobnych pasów stanowiących podłoże cierne i poruszających się ze stałą prędkością. W rezultacie, w rozważanym układzie zaobserwowane zostały drgania typu utwierdzenie-poślizg. Przykładowo, fizyczna interpretacja rozważanego modelu może być ilustracją dwóch wózków umieszczonych na prowadnicach poruszających się ze stałą prędkością względem prowadnic, i sprzężonymi za pomocą sprężystego wału. W pracy tej wykryto interesującą dynamikę nieliniową przy użyciu portretów fazowych i map Poincaré'go uzyskanych w oprogramowaniu Mathematica. Ponadto, przedstawiono i omówiono widma mocy uzyskane za pomocą szybkiej transformaty Fouriera. Wyniki obliczeń wykazały okresowe, quasi-okresowe i chaotyczne zachowanie analizowanego układu dynamicznego. Ponadto, rozważono również wpływ synchronizacji pomiędzy sprzężonymi układami.

Praca [15] przedstawia badania dynamicznego zachowania układu składającego się z dwóch sprzężonych oscylatorów mechanicznych z wahadłami sprężystymi, napędzanych drganiami typu utwierdzenie-poślizg. Każdy oscylator składa się z korpusu umieszczonego na ruchomym pasie jako podstawa napędowa, sprzężenia mechanicznego związanego z obciążeniem korpusu naciskającego na pas w zależności od ruchu ciała oraz podwieszonego wahadła sprężystego. Ponadto, uwzględnione zostały dodatkowe siły elektryczne/elektromagnetyczne działające na wahadła sprężyste. Najpierw, stabilne i niestabilne punkty stałe układu zostały wyznaczone analitycznie i numerycznie. Następnie, opisano i omówiono zachowania dynamiczne w pobliżu punktów stałych, stosując standardowe numeryczne metody jakościowe i ilościowe dedykowane dla układów nieliniowych, a także wykorzystując oryginalne animacje w środowisku Mathematica, ukazujące dynamikę rozważanego układu. Zrozumienie roli i istoty sprzężenia układów, przejścia między punktami stałymi jak i przepływ energii w układzie może mieć potencjalnie stosowane w innych podobnych układach, zwłaszcza w rzeczywistych układach elektromechanicznych. Należy podkreślić, że przedstawione obliczenia numeryczne zostały przeprowadzone dla wybranego zestawu parametrów i warunków początkowych. W rezultacie, niektóre nieliniowe zjawiska występujące w wąskim zakresie parametrów z pewnością nie zostały wykryte. Oczywiście, nie można uzyskać dokładnego rozwiązania analitycznego lub pół-analitycznego z powodu nieliniowości, nieciągłości i sprzężeń w równaniach ruchu rozpatrywanego układu. Dlatego potrzebne są dalsze badania, w tym analiza rozpatrywanego układu w postaci bezwymiarowej, zjawiska rezonansu i synchronizacji, przepływ energii między oscylatorami, różne scenariusze przejścia od ruchu regularnego do chaotycznego, diagramy bifurkacyjne, wykładniki Lapunowa, widma gęstości mocy itp.

W pracy [16] przedstawiono nieliniową dynamikę podwieszonego wahadła sprężystego i umieszczonego w polach grawitacyjnym i elektrycznym. Najpierw wyznaczone zostały analitycznie i numerycznie, zarówno stabilne jak i niestabilne punkty stałe układu. Następnie przedstawione i omówione zostały zachowania dynamiczne układu w pobliżu punktów stałych. Ze względu na złożoność matematyczną rozpatrywanego układu, został on zbadany numerycznie w środowisku Mathematica. W efekcie, wykryto i omówiono kilka interesujących

zachowań nieliniowych. Ruch układu dla różnych wartości parametrów badany był przy zastosowaniu standardowych metod numerycznych dedykowanych dla układów nieliniowych, w tym zarówno za pomocą metod jakościowych i ilościowych, jak i własnych oryginalnych animacji dynamiki układu, stworzonych w środowisku Mathematica. Obliczenia numeryczne wykonane zostały dla pewnego zestawu parametrów i warunków początkowych. Dlatego też prawdopodobnie nie wykryto niektórych nieliniowych zjawisk zachodzących dla wąskiego zakresu parametrów. Dlatego też interesująca jest perspektywa dalszych badań w tym obszarze, włączając zagadnienia rezonansu i synchronizacji, różne scenariusze przejścia od ruchu regularnego do chaotycznego, diagramy bifurkacyjne, wykładniki Lapunowa, widma gęstości mocy itp. Badanie zjawiska przepływu energii innych nieliniowych zjawisk może być potencjalnie zastosowane do innych podobnych układów tego typu, takich jak na przykład rzeczywiste układy elektromechaniczne.

d) dynamika układów napędowych z silnikiem krokowym

W pracy [17] badana była dynamika układu składającego się z hybrydowego silnika krokowego obciążonego wirującą masą cylindryczną. Ten rodzaj silników synchronicznych jest powszechnie stosowany w wielu przemysłowych i domowych urządzeniach mechatronicznych, na przykład jako systemy pozycjonujące w skanerach, drukarkach, aparatach cyfrowych, napędach optycznych i innych. Jednakże należy podkreślić, że dla wyższych prędkości ten typ silnika może zachowywać się nieprzewidywalnie. Te niestabilności występują tylko w określonych przedziałach częstotliwości wzbudzenia. Dlatego też w niniejszej pracy zbadano dynamikę takich układów na podstawie równań różniczkowych zwyczajnych opisujących zachowanie rozważanego silnika krokowego, a także przeprowadzono badania eksperymentalne. Przeprowadzony eksperyment pozwolił badać zachowanie systemu w szerokim zakresie częstotliwości wzbudzenia. Zarówno wstępne testy eksperymentalne jak i symulacje numeryczne wykryły kilka regionów niestabilności w zakresie średnich i wysokich częstotliwości. Utrata prędkości synchronicznej była związana z nagłą zmianą jakościową trajektorii fazowej. Niestety nie osiągnięto pełnej zgodności ilościowej między testami symulacyjnymi i doświadczalnymi, ponieważ niektóre parametry modelu numerycznego nie zostały oszacowane z wymaganą dokładnością.

W pracy [18] przedstawiono modelowanie matematyczne i skonstruowany prototyp jednostki napędzanej hydraulicznie, przekształcającej ruch obrotowy w liniowy. Ze względu na prostotę konstrukcji, urządzenie to może być alternatywą dla istniejących drogich urządzeń medycznych stosowanych w sterowaniu protezami ręki, manipulatorami chirurgicznymi i innymi urządzeniami, których działanie opiera się na ruchu liniowym. Proponowane urządzenie składa się z dwóch siłowników hydraulicznych napędzanych silnikiem krokowym, a głównym celem tego badania było uzyskanie stosunkowo wysokiej precyzji i powtarzalności ruchu liniowego. Pierwsze testy dały obiecujące wyniki, zarówno pod względem precyzji jak i sztywności urządzenia. Po wdrożeniu kolejnych zmian, przedstawione urządzenie może być potencjalnie wykorzystane do napędzania różnych urządzeń takich jak manipulatory przemysłowe, manipulatory chirurgiczne lub protezy zarówno górnych, jak i dolnych kończyn człowieka. Przedstawiona koncepcja ma pewne zalety. Mianowicie, konstrukcja jednostki pozwala umieścić siłownik napędowy w pożądanej odległości od wykonującego siłownika. Oznacza to, że można je rozdzielić w taki sposób, że siłownik napędowy jest umieszczony na zewnątrz ciała pacjenta, podczas gdy wykonujący siłownik - wewnątrz. W celu dalszego wdrożenia urządzenia w sprzęcie medycznym materiał, z którego wykonane są siłowniki, należy zamienić na stal chirurgiczną, która może być stosowana w bezpośrednim kontakcie z płynami ustrojowymi. Wreszcie, dalsze zmiany w konstrukcji tego urządzenia powinny obejmować minimalizację wielkości jednostki, aby można ją było wykorzystać do celów medycznych.

e) modelowanie procesu upadku człowieka do przodu

Artykuły [19, 20] dotyczą problemu upadku człowieka w kierunku do przodu. Aby oszacować krytyczną wartość siły działającej na dłoń podczas kontaktu z podłożem, zaproponowano stosunkowo prosty model mechaniczny z klasycznym prawem uderzenia. Parametry układu zostały zidentyfikowane za pomocą komputerowego modelu skanowania ciała ludzkiego oraz danych eksperymentalnych z literatury. Za pomocą symulacji numerycznych otrzymano i przedstawiono kilka interesujących wyników. W szczególności wykazano, że uzyskane wyniki dość dobrze pasują do wyników eksperymentalnych przedstawionych w literaturze, zarówno pod względem jakościowym jak i ilościowym. Model pozwala na wyznaczenie największej siły uderzenia dłońmi o podłoże i pozwala symulować różne scenariusze upadków.

W pracach [21,22] również rozważone zostały modele upadku człowieka do przodu na wyciągnięta ramiona, jako najgorszy scenariusz upadku w przód. Kontakt między podłożem a dłońmi zamodelowany został przy wykorzystaniu nieliniowego modelu uderzenia. Przedstawiony model upadku pozwala oszacować przebiegi czasowe sił reakcji podłoża w różnych scenariuszach upadku, a uzyskane symulacje numeryczne zgadzają się jakościowo i ilościowo z innymi wynikami przedstawionymi w literaturze. Uzyskane przebiegi czasowe siły reakcji podłoża zostały wykorzystane jako zmienne w czasie obciążenia w modelu numerycznym kończyny górnej człowieka utworzonej za pomocą oprogramowania Mimics, na podstawie danych z tomografii komputerowej. W rezultacie, przeprowadzono analizę wytrzymałościową kości promieniowej za pomocą dwóch różnych kryteriów wytrzymałościowych, a przeprowadzona analiza numeryczna wykazała, że kryterium odkształcenia wydaje się być bardziej przydatne do oszacowania miejsca złamania promienia w porównaniu z kryterium naprężeniowym.

W pracy [23] zaproponowano i zbadano nowy 3-członowy model biomechaniczny człowieka symulujący upadek do przodu. Zaprezentowany model jest rozszerzeniem modeli upadków zaproponowanych w pracach [19-22]. Model zaimplementowany w środowisku Mathematica opracowany został jako mechaniczny układ płaski z nieliniowym prawem uderzenia modelującym kontakt między dłońmi a podłożem. Parametry modelu uzyskano w oparciu o trójwymiarowy zeskanowany model ludzkiego ciała utworzony w programie Inventor, podczas gdy jego kinematyka (przebiegi czasowe kątów w stawach biodrowych i barkowych) została uzyskana z obserwacji eksperymentalnej z wykorzystaniem optoelektronicznego systemu analizy ruchu Optitrack. Walidacja modelu została przeprowadzona poprzez porównanie siły uzyskanej z symulacji numerycznych z siłą uderzenia uzyskaną z platformy dynamometrycznej. Zaproponowany model upadku pozwala oszacować wartość składowej normalnej siły reakcji podłoża działającej na dłoń podczas uderzenia w podłoże dla różnych wartości prędkości tuż przed potknięciem o przeszkodę. W rezultacie, uzyskane siły reakcji podłoża mogą być wykorzystane do dalszych badań jako warunki obciążenia dla modelu numerycznego kończyny górnej człowieka.

W pracy [24] zaproponowano i przetestowano 4-członowy model człowieka do symulacji upadku w przód. Model został zaimplementowany w programie Mathematica a opracowany został na bazie płaskiego układu mechanicznego z nieliniowym prawem uderzenia modelującym kontakt nadgarstek-ziemia. Opracowany model jest dalszym rozszerzeniem modelu 3-członowego przedstawionego w pracy [23]. Wszystkie cztery główne segmenty ludzkiego ciała zamodelowane zostały jako ciała sztywne połączone elementami obrotowymi, które odpowiadają ludzkim stawom. Jak wszystkie poprzednio prezentowane modele upadków do przodu, proponowany model pozwala oszacować wartość składowej normalnej siły reakcji podłoża działającej na dłoń osoby upadającej podczas uderzenia w podłoże dla różnej prędkości człowieka tuż przed potknięciem się o przeszkodę. Uzyskane siły reakcji podłoża mogą być przydatne do analizy modelu numerycznego kończyny górnej człowieka za pomocą elementów skończonych.

f) modelowanie procesu wymiany stawu biodrowego

W pracy [25] badano numerycznie stan naprężeń protezy kości udowej i trzonu kości udowej za pomocą metody elementów skończonych, dla różnych typów mocowania protezy w kanale szpikowym kości udowej i pod wpływem różnych obciążeń. Aby uzyskać zadowalające rezultaty, zbudowano odpowiedni model numeryczny, zarówno kości udowej jak i endoprotezy o rzeczywistych rozmiarach, kształtach i właściwościach fizyko-mechanicznych materiału. Przeprowadzona analiza numeryczna wykazała, że jeśli obszar kontaktu między powierzchnią trzonu a kością jest zbyt mały, to może to doprowadzić do zwiększenia naprężeń i w efekcie nawet złamania kości. Ponadto pokazano, że możliwa jest takie zamocowanie endoprotezy stawu biodrowego, dla którego uzyskać można równomiernie rozłożony rozkład naprężeń w kości. Z kolei wartości naprężeń w implantach nie przekraczają granicy wytrzymałości materiału, z którego wykonane są implanty, co zapewnia odpowiedni margines bezpieczeństwa. Metoda numeryczna przedstawiona w tej pracy może być również wykorzystana do badania wpływu zmian strukturalnych i różnych technik klinicznych mocowania endoprotez w kanale udowym na trwałość implantów.

W pracy [26] opracowano model adaptacji kości do badań numerycznych oparty na teorii Stanforda. Zmiana właściwości mechanicznych tkanki kości udowej otaczającej endoprotezę stawu biodrowego w okresie pooperacyjnym należy do jednej z najczęstszych przyczyn niestabilności implantu. Wyniki przedstawione w tej pracy pokazują, że dla grubości płaszczka cementu w zakresie 1–1,5 mm maksymalna wartość naprężenia w bliższej części płaszczka przekracza granicę trwałości cementu kostnego. Z drugiej strony, zaobserwowano wysoką redukcję gęstości kości regionów dystalnych i proksymalnych dla grubości płaszczka cementu w zakresie 1–3 mm. Nie wykryto natomiast istotnych zmian gęstości kości w badanych regionach dla większej grubości płaszczka cementu. Wyniki przedstawione w tej pracy mogą być wykorzystane do poprawy wyników operacji wymiany stawu biodrowego.

g) modelowanie zjawisk optycznych w ośrodkach dwójłomnych

Praca [27] dotyczy obliczania wartości zarówno współczynnika odbicia jak i transmitancji różnych optycznych sieci dwójłomnych umieszczonych między dwoma ośrodkami izotropowymi. Zjawiska optyczne modelowane są za pomocą metody macierzy 4×4 , która uwzględnia efekt załamania i wielokrotnych odbić fal zwyczajnych i nadzwyczajnych, które występują w dwójłomnych ośrodkach optycznych. W rezultacie, uzyskane zostały ciekawe zależności w postaci widma odbicia i transmitancji, jak również zależności współczynników odbicia i transmisji światła w postaci wykresów biegunowych. Przedstawione wyniki mogą być przydatne do zrozumienia zjawisk optycznych w różnych ośrodkach optycznych, w tym: propagacji światła w jednorodnym ośrodku izotropowym umieszczonym między innym ośrodkiem izotropowym, propagacji światła w planarnej strukturze ciekłego kryształu, propagacji światła w homeotropowej strukturze ciekłego kryształu lub propagacji światła w zakręconej strukturze ciekłego kryształu, czyli tzw. ciekłym kryształem cholesterolowym.

W pracy [28] wspomniany ciekły kryształ cholesterolowy umieszczony został między dwoma izotropowymi ośrodkami optycznymi i parą polaryzatorów optycznych. Rozważono wpływ orientacji zastosowanych polaryzatorów na natężenie przepuszczanego światła przez badany ciekły kryształ cholesterolowy. W rezultacie, również uzyskano interesujące widma odbicia/transmisji światła oraz zależności współczynników odbicia i transmisji w postaci wykresów biegunowych. Przedstawione wyniki symulacji numerycznych mogą być przydatne do zrozumienia bardziej zaawansowanych współczesnych systemów optycznych, zwłaszcza wyświetlaczy ciekłokrystalicznych. W przedstawionych pracach wyniki uzyskane były dla kryształów optycznie dodatnich. Zaimplementowany algorytm można jednakże stosować również do kryształów optycznie ujemnych. Ponadto, rozważając różne rozkłady kierunku osi optycznej (tzw. directora) badanego ciekłego kryształu, obliczać można także widma odbicia i transmitancji dla zdeformowanych ciekłych kryształów spowodowanych przez zastosowane

zewnątrznego pola elektrycznego, zewnętrznego naprężenia mechanicznego lub występowaniem defektów wewnątrz kryształu. Przedstawione widma odbicia i transmitancji światła mogą być przydatne do analizy bardziej zaawansowanych współczesnych systemów optycznych, takich jak kryształy fotoniczne. Jest to ważne z punktu widzenia inżynierii, ponieważ oferują one unikalne właściwości optyczne (w tym możliwość kontrolowania propagacji światła) i mogą być w przyszłości wykorzystane jako podstawowe elementy w pełni optycznych układów scalonych.

Literatura (pozostałe osiągnięcia)

1. J. Awrejcewicz, D. Grzelczyk, Modeling and analytical/numerical analysis of wear processes in a mechanical friction clutch, *International Journal of Bifurcation and Chaos* 21(10), 2011, 2861-2869.
Mój udział: 70%
2. D. Grzelczyk, J. Awrejcewicz, Wear processes in a mechanical friction clutch: theoretical, numerical and experimental studies, *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, ID725685, 28 pages.
Mój udział: 85%
3. J. Awrejcewicz, D. Grzelczyk, Contact phenomena and wear processes in a mechanical friction clutch: analytical, numerical and experimental investigations, *Proceedings of the 7th European Nonlinear Dynamics Conference (ENOC 2011)*, Rome, Italy, July 24-29, 2011 (2 pages).
Mój udział: 50%
4. J. Awrejcewicz, D. Grzelczyk, Modelling and analysis of the dynamics and contact phenomena in the mechanical clutch/brake systems, *Proceedings of the 10th International Conference on Vibration Problems (ICOVP 2011)*, Prague, Czech Republic, September 5-8, 2011, 413-416.
Mój udział: 50%
5. J. Awrejcewicz, D. Grzelczyk, Modelling and numerical/experimental investigations of contact phenomena and wear processes in a mechanical friction clutch, *Proceedings of the X International Conference Brake and Safety*, Łódź-Rogów, November 3-4, 2011, 14 pages.
Mój udział: 50%
6. J. Awrejcewicz, D. Grzelczyk, Modelling and numerical and experimental investigations of contact phenomena and wear processes in a mechanical friction clutch, *The Archives of Automotive Engineering (Archiwum Motoryzacji)*, 55(1), 2012, 5-22.
Mój udział: 50%
7. J. Awrejcewicz, D. Grzelczyk, Numerical simulations and experimental investigations of contact phenomena in mechanical friction clutch, *Proceedings of the Eleventh International Conference on Computational Structures Technology*, Dubrovnik, Croatia, September 4-7, 2012, 10 pages.
Mój udział: 70%
8. J. Awrejcewicz, D. Grzelczyk, Modelling and analysis of thermal processes in mechanical friction clutch: numerical and experimental investigations, *Dynamical Systems - Nonlinear Dynamics and Control (Proceedings of the 11th Conference on Dynamical Systems - Theory and Applications)*, Eds. J. Awrejcewicz, M. Kaźmierczak, P. Olejnik, J. Mrozowski, Łódź, Poland, December 5-8, 2011, 379-384.
Mój udział: 60%
9. D. Grzelczyk, J. Awrejcewicz, Modeling of thermal phenomena in a mechanical friction clutch, *Machine Dynamics Research*, 36(3), 2012, 23-28.
Mój udział: 80%
10. J. Awrejcewicz, D. Grzelczyk, Modeling and analysis of thermal processes in mechanical friction clutch – numerical and experimental investigations, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 13(7), 2013, 1340004-1 - 1340004-18.
Mój udział: 70%
11. J. Awrejcewicz, D. Grzelczyk, Non-regular dynamics of the 4-DOF mechanical linear sliding guideways system with dry friction, in: 'Dynamical Systems - Applications', Eds. J. Awrejcewicz, M. Kaźmierczak, P. Olejnik, J. Mrozowski, TU of Lodz Press, 2013, 483-496 (ISBN 978-83-7283-589-5).
Mój udział: 60%
12. D. Grzelczyk, J. Awrejcewicz, G. Kudra, Dynamics of mechanical sliding system with dry friction, *Machine Dynamics Research*, 38(3), 2014, 61-70.
Mój udział: 70%

13. A. Kosińska, J. Awrejcewicz, D. Grzelczyk, Regular and chaotic dynamics of a 4-DOF mechanical system with dry friction, *Vibrations in Physical Systems*, 27, 2016, 195-202.
Mój udział: 25%
14. A. Kosińska, D. Grzelczyk, J. Awrejcewicz, 'Dynamics of two coupled 4-DOF mechanical linear sliding systems with dry friction', in: 'Dynamical Systems - Control and Stability', Eds. J. Awrejcewicz, M. Kaźmierczak, J. Mrozowski, P. Olejnik, TU of Lodz, Lodz, 2015, 327-340 (978-83-7283-708-0).
Mój udział: 30%
15. D. Grzelczyk, J. Awrejcewicz, Resonances and synchronization in two coupled oscillators with stick-slip vibrations and spring pendulums', *Proceedings of the 5th International Conference on Nonlinear Dynamics*, Kharkov, Ukraine, September 27-30, 2016, 100-107.
Mój udział: 90%
16. A. Kosińska, D. Grzelczyk, J. Awrejcewicz, Non-linear dynamics of flexibly suspended spring pendulum embedded in gravity and electric fields, in: *Vibration, Control and Stability of Dynamical Systems*, (Eds.) J. Awrejcewicz, M. Kaźmierczak, J. Mrozowski, P. Olejnik, DAB&M of TUL Press, Lodz, 2017, 215-222 (ISBN 978-83-935312-5-7).
Mój udział: 40%
17. R. Kępiński, J. Awrejcewicz, D. Grzelczyk, J. Gajek, Analysis of a mid- and high-frequency instability in a hybrid stepper motor, *10th International Conference Mechatronic Systems and Materials*, 7 - 10 July, 2014, Opole, Poland.
Mój udział: 20%
18. O. Szymanowska, G. Szymkiewicz, D. Lewandowski, D. Grzelczyk, J. Awrejcewicz, Hydraulically driven unit converting rotational motion into linear one, in: *Springer Proceedings in Mathematics and Statics - 'Dynamical Systems: Modelling'*, Ed. J. Awrejcewicz, Springer, 2016, 361-373 (978-3-319-42401-9).
Mój udział: 15%
19. P. Biesiacki, J. Mrozowski, D. Grzelczyk, J. Awrejcewicz, Modelling of forward fall on outstretched hands and a system with ground contact, in: *Springer Proceedings in Mathematics and Statics - 'Dynamical Systems: Modelling'*, Ed. J. Awrejcewicz, Springer, 2016, 61-72 (978-3-319-42401-9).
Mój udział: 25%
20. P. Biesiacki, D. Grzelczyk, J. Mrozowski, J. Awrejcewicz, (Numerical model of the human upper extremity and its analysis related to forward fall), *Aktualne Problemy Biomechaniki (Actual Problems of Biomechanics)*, 12, 2017, 5-14.
Mój udział: 30%
21. P. Biesiacki, D. Grzelczyk, J. Mrozowski, J. Awrejcewicz, A novel human "broomstick" forward fall model and its application in the strength analysis of the human upper extremity, in: *Engineering Dynamics and Life Sciences*, (Eds.) J. Awrejcewicz, M. Kaźmierczak, J. Mrozowski, P. Olejnik, DAB&M of TUL Press, Lodz, 2017, 65-72 (ISBN 978-83-935312-4-0).
Mój udział: 35%
22. D. Grzelczyk, P. Biesiacki, J. Mrozowski, J. Awrejcewicz (2018) Dynamic simulation of a novel "broomstick" human forward fall model and finite element analysis of the radius under the impact force during fall, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 56(1), 239-253.
Mój udział: 40%
23. D. Grzelczyk, P. Biesiacki, J. Mrozowski, J. Awrejcewicz, A 3 link model of a human for simulating a fall in forward direction, in: *Dynamical Systems in Applications*, (Ed.) J. Awrejcewicz, Springer, 2018, 135-146 (ISBN 978-3-319-96601-4).
Mój udział: 60%
24. D. Grzelczyk, P. Biesiacki, J. Mrozowski, J. Awrejcewicz, A 4-link model of a human for simulating a forward fall, *Vibrations in Physical Systems*, 2018, 29, 2018008 (10 pages).
Mój udział: 70%
25. I. Levadnyi, D. Grzelczyk, J. Awrejcewicz, O. Loskutov, Influence of the fixation region of a hip stem on the behaviour of the "bone-implant" system, in: *Engineering Dynamics and Life Sciences*, (Eds.) J. Awrejcewicz, M. Kaźmierczak, J. Mrozowski, P. Olejnik, DAB&M of TUL Press, Lodz, 2017, 321-328 (ISBN 978-83-935312-4-0).
Mój udział: 15%
26. I. Levadnyi, J. Awrejcewicz, O. Szymanowska, D. Grzelczyk, J.E. Gubaua, J.T. Pereira, G.W.O. Dicati, Biomechanical rationale for choice of cement mantle thickness around a femoral stem, *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 18(6), 2018, 1850064, 1850064-1 -- 1850064-13.
Mój udział: 10%

27. D. Grzelczyk, J. Awrejcewicz, Calculation of reflectance and transmittance of optical birefringent networks based on cholesteric liquid crystals, Latin American Journal of Solids and Structures, 16(1 Thematic Section), 2019, e105, 20 pages.

Mój udział: 90%

28. D. Grzelczyk, J. Awrejcewicz, Reflectance and transmittance of cholesteric liquid crystal sandwiched between polarizers, in: Dynamical Systems in Applications, (Ed.) J. Awrejcewicz, Springer, 2018, 147-158 (ISBN 978-3-319-96601-4).

Mój udział: 90%

Dariusz Grzelczyk

.....
Podpis