

# AUTOREFERAT

opis dorobku i osiągnięć naukowych,  
w szczególności określonych  
w art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r.  
o stopniach naukowych i tytule naukowym

**Jarosław Latański**

Politechnika Lubelska  
Wydział Mechaniczny,  
Katedra Mechaniki Stosowanej  
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin  
tel. 81 538 4197, fax 81 538 4205  
e-mail: [j.latanski@pollub.pl](mailto:j.latanski@pollub.pl)



## 1. Imię i Nazwisko

Jarosław Latański

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

- |      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2002 | <p>stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie Mechanika<br/>Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk<br/>Tytuł rozprawy doktorskiej:<br/><i>„Tolerancje wykonania w optymalnym projektowaniu konstrukcji”.</i><br/>Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Witold Gutkowski<br/>Recenzenci: prof. dr hab. inż. Stefan Jendo<br/>prof. dr hab. inż. Krzysztof Dems</p> |
| 1993 | <p>magister inżynier<br/>Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny<br/>Tytuł pracy magisterskiej:<br/><i>„Wybrane zagadnienia optymalizacji dynamicznej silnika o zapłonie iskrowym”.</i><br/>Promotor pracy: prof. dr hab. inż. Krzysztof Wituszyński</p>                                                                                                                                     |
| 1991 | <p>studia na Technical University of Denmark, Lyngby-Kopenhaga (Dania) w ramach międzynarodowego projektu wymiany studenckiej Tempus (1 semestr)</p>                                                                                                                                                                                                                                            |
| 1988 | <p>I Liceum Ogólnokształcące im. Stanisława Staszica w Lublinie</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

## 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych

Miejsce zatrudnienia:

Katedra Mechaniki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska

Historia zatrudnienia:

- |       |                                                                                                                                    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2003– | <p>adiunkt w Katedrze Mechaniki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska</p>                                         |
| 1997  | <p>asystent w Katedrze Mechaniki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska</p>                                        |
| 1993  | <p>asystent w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska</p>                                  |
| 1992  | <p>asystent stażysta w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska (okres próbny 1/2 roku)</p> |

#### 4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.)

##### 4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Jednotematyczny cykl publikacji naukowych pod zbiorczym tytułem:

#### **Dynamika wirujących cienkościennych belek kompozytowych z wbudowanymi elementami aktywnymi**

##### 4.2. Wykaz prac naukowych wchodzących w skład osiągnięcia naukowego

Do osiągnięcia naukowego zaliczam dziewięć (9) prac naukowych stanowiących jednotematyczny cykl publikacji przygotowanych i opublikowanych po otrzymaniu stopnia doktora. W zamieszczonym poniżej krótkim komentarzu do każdej z prac opisałem swój udział w przygotowaniu publikacji. Podane zostały także wartości wskaźnika Impact Factor (IF) obowiązującego w roku wydania danej publikacji oraz liczby punktów przyznawane przez MNiSW według obowiązującego aktualnie wykazu.

Cykl składa się z siedmiu (7) artykułów zamieszczonych w czasopismach naukowych oraz z dwu obszernych rozdziałów w monografiach opublikowanych przez oficynę Springer w ramach serii wydawniczej *Advanced Structured Materials* (vol. 60) oraz serii *Springer Conference Proceedings in Physics* (vol. 199). Trzy prace (3) są moimi autorskimi opracowaniami [4,7,8]. Spośród pozostałych sześciu (6) prac w czterech (4) jestem pierwszym autorem [2,3,5,9], a w pozostałych dwu (2) jestem drugim autorem [1,6]. Wszystkie prace zawarte w przedłożonym zestawieniu są indeksowane w bazie Web of Science (WoS).

Kopie prac stanowiących jednotematyczny cykl publikacji zamieszczono w Załączniku nr 3. Oświadczenia określające indywidualny wkład współautorów w pracach zbiorowych stanowiących ww. cykl publikacji znajdują się w Załączniku nr 4. Zbiorczy wykaz wszystkich opublikowanych przeze mnie prac oraz innych osiągnięć naukowych, dydaktycznych, a także organizacyjnych i związanych z popularyzacją nauki zawiera Załącznik nr 5.

W skład wykazu stanowiącego jednotematyczny cykl publikacji zaliczam następujące prace naukowe (kolejność na podanej liście wynika z porządku ich cytowania w omówieniu celu naukowego i wyników osiągniętych w trakcie badań – punkt 4.3.):

- [1] Georgiades F., **Latański J.**, Warmiński J.: Equations of motion of rotating composite beams with a nonconstant rotation speed and an arbitrary preset angle. *Meccanica* (2014), 49(8): 1833–1858. doi:10.1007/s11012-014-9926-9, (IF 1.949; MNiSW 30 pkt; pozycja A12 w Załączniku 5).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na pełnym wyprowadzeniu wszystkich przedstawionych równań ruchu. Z uwagi na dużą zawartość przekształceń matematycznych i ostatecznych wzorów zdecydowaliśmy z pierwszym autorem publikacji, że równania będą wyprowadzane przez nas całkowicie niezależnie; będziemy natomiast porównywać uzyskane wyniki częściowe celem szybkiej eliminacji potencjalnych błędów. Jako swój wyłączny wkład w powstanie publikacji zaliczam także obliczenia wymaganych współczynni-

ków (Tabele 1, 2 oraz załączniki 2, i 3 do artykułu) oraz dyskusję wyników. Udział własny szacuję na 30%.

- [2] **Latański J.**, Warmiński J., Rega G.: Bending-twisting vibrations of rotating hub – thin-walled composite beam system. *Mathematics and Mechanics of Solids* (2017), 22(6): 1303–1325. doi:10.1177/ 1081286516629768, (IF 2.953; MNiSW 25 pkt; pozycja A4 w Załączniku 5).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wyprowadzeniu cząstkowych równań ruchu układu, dyskretyzacji tych równań do równań zwyczajnych - w tym także wykonaniu analizy doboru funkcji próbnych w metodzie Galerkina pod względem efektywności i dokładności obliczeń. Ponadto przekształciłem uzyskane równania do postaci bezwymiarowej i sformułowałem warunek ortogonalności dla uzyskanego układu równań. Przeprowadziłem także dyskusję części wyników oraz samodzielnie przygotowałem wstępną wersję tekstu końcowego pracy. Udział własny szacuję na 60%.

- [3] **Latański J.**, Bocheński M., Warmiński J., Jarzyna W., Augustyniak M.: Modelling and simulation of 3 blade helicopter's rotor model. *Acta Physica Polonica A* (2014), 125(6): 1380–1383. doi:10.12693/APhysPolA.125.1380, (IF 0.530; MNiSW 15 pkt; pozycja A11 w Załączniku 5).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu modelu numerycznego MES badanego układu i wykonaniu symulacji. Opracowałem graficznie wyniki obliczeń numerycznych, przygotowałem ich dyskusję, opracowałem część tekstu pracy dotyczącą badań teoretycznych. Ponadto wykonałem końcową redakcję pełnego tekstu pracy. Udział własny szacuję na 35%.

- [4] **Latański J.**: Modelling of macro fiber composite piezoelectric active elements in ABAQUS system. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* (2011), 4(52): 72–78. (IF 0.333; MNiSW 25 pkt; pozycja A17 w Załączniku 5).

Jest to publikacja samodzielna, zatem mój wkład wynosi 100%

- [5] **Latański J.**, Bocheński M., Warmiński J.: Control of bending-bending coupled vibrations of a rotating thin-walled composite beam. *Archives of Acoustics* (2014), 39(4): 605–613. doi:10.2478/aoa-2014-0065, (IF 0.565; MNiSW 15 pkt; pozycja A10 w Załączniku 5).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na sformułowaniu cząstkowych równań różniczkowych ruchu, ich dyskretyzacji do równań zwyczajnych oraz transformacji do notacji bezwymiarowej. Wykonałem również część obliczeń numerycznych (analiza wartości współczynników modelu, obliczenia do wykresów Campbella). Ponadto samodzielnie zredagowałem tekst pracy. Udział własny szacuję na 60%.

- [6] Warmiński J., **Latański J.**: Nonlinear control of flexural–torsional vibration of a rotating thin-walled composite beam. *International Journal of Structural Stability and Dynamics* (2017), 17(5): 1740003-1–1740003-17. doi: 10.1142/S021945541740003X, (IF 1.617; MNiSW 25 pkt; pozycja A5 w Załączniku 5).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wyprowadzeniu cząstkowych równań różniczkowych dynamiki układu, redukcji tych równań do równań zwyczajnych, transformacji do zapisu bezwymiarowego i wyznaczeniu niezbędnych współczynników. Wykonałem także analizę parametryczną współczynników końcowego układu równań w zależności od wartości kąta ułożenia włókien kompozytowych. Przygotowałem także część wyników obliczeń numerycznych oraz ilustracji; samodzielnie opracowałem przegląd literatury i opis modelu. Udział własny szacuję na 40%.

- [7] **Latański J.:** Modelling of a rotating active thin-walled composite beam system subjected to high electric fields. W: *Advanced Methods of Continuum Mechanics for Materials and Structures*, K. Naumenko, M. Ałmus (eds.), seria Advanced Structured Materials, vol. 60. Springer, Singapore 2016, (ISBN 978-981-10-0958-7), s. 435–455. doi: 10.1007/978-981-10-0959-4\_24, (IF 0.0; MNiSW 15pkt; pozycja A6 w Załączniku 5).

Jest to publikacja samodzielna, zatem mój udział wynosi 100%

- [8] **Latański J.:** A coupled-field model of a rotating composite beam with integrated nonlinear piezoelectric active element. *Nonlinear Dynamics* (2017), **90**(3): 2145–2162. doi:10.1007/s11071-017-3791-8, (IF 3.464 - wartość za 2016 rok; MNiSW 40 pkt; pozycja A2 w Załączniku 5).

Jest to publikacja samodzielna, zatem mój udział wynosi 100%

- [9] **Latański J., Warmiński J.:** Dynamics and saturation control of rotating composite beam with embedded nonlinear piezoelectric actuator. W: *Recent Trends in Applied Nonlinear Mechanics and Physics*, M. Belhaq (ed.), seria wydawnicza Springer Conference Proceedings in Physics, vol. 199. Springer, Cham, Szwajcaria 2017, (ISBN 978-3-319-63937-6). doi: 10.1007/978-3-319-63937-6\_7, (seria wydawnicza indeksowana w WoS, pozycja będzie dostępna on-line na stronie wydawcy od 8 stycznia 2018), (IF 0.0; MNiSW 15 pkt; pozycja A1 w Załączniku 5).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wyprowadzeniu układu równań cząstkowych dynamiki układu, redukcji tych równań do równań zwyczajnych i wyznaczeniu niezbędnych współczynników. Przygotowałem także część wyników obliczeń numerycznych oraz przeprowadziłem ich dyskusję; samodzielnie opracowałem wstępną wersję tekstu końcowego pracy. Udział własny szacuję na 70%.

Całkowita suma wskaźnika IF prac wchodzących w skład jednotematycznego cyklu publikacji wynosi **IF=11.411**; suma punktów MNiSW ww. prac według aktualnej klasyfikacji **205 pkt**.

#### **4.3. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania**

Tematyka prac badawczych, które przedstawiam do oceny jako własne osiągnięcie naukowe dotyczy dynamiki wirujących cienkościennych belek kompozytowych, w tym również belek kompozytowych

o aktywnych własnościach. W ramach tej drugiej części badań analizowałem belki z osadzonymi piezoelektrycznymi elementami aktywnymi o liniowych i nieliniowych zależnościach konstytutywnych względem pola elektrycznego. Prowadzone badania miały przede wszystkim charakter teoretyczny, ale przeprowadziłem również symulacje numeryczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych, a także testy eksperymentalne na stanowisku badawczym w laboratorium Katedry Mechaniki Stosowanej Politechniki Lubelskiej.

Podstawowym celem naukowym przedstawionych prac było zdobycie wiedzy na temat dynamiki wirujących, cienkościennych belek wykonanych z włóknistych materiałów kompozytowych oraz podobnych struktur z osadzonym przetwornikiem piezoelektrycznym. Drugim celem naukowym moich badań była ocena możliwości sterowania drganiami wirujących belek kompozytowych z dodatkowym elementem aktywnym za pomocą wybranych algorytmów sterowania.

Tematyka prowadzonych badań naukowych dotyczących wirujących elementów belkowych wynika bezpośrednio z moich zainteresowań szeroko pojętą aeronautyką i techniką lotniczą. Wirujące belki są bowiem jednymi z podstawowych modeli matematycznych typowych elementów konstrukcyjnych statków powietrznych – śmigieł, łopat wirników nośnych i wirników ogonowych śmigłowców, łopat turbin silników lotniczych. Modele te znajdują także swoje zastosowanie w analizie innych konstrukcji inżynierskich, jak np. turbiny wiatrowe, ramiona robotów itp.

Badania rozpocząłem od wyprowadzenia ogólnych postaci równań ruchu opisujących dynamikę konstrukcji składającej się ze sztywnej piasty i podatnej belki kompozytowej [1] (także Załącznik 5, pozycja A12). Wykorzystany w pracy model matematyczny cienkościennej belki kompozytowej bazuje na teorii opracowanej przez L. Librescu i O. Songa – monografia pt. *Thin-Walled Composite Beams. Theory and Applications* podsumowująca osiągnięcia autorów została opublikowana w 2006 r. przez wydawnictwo Springer.

Teoria L. Librescu i O. Songa jest teorią liniową, opisującą zachowanie cienkościennych belek kompozytowych w zakresie małych deformacji. W teorii tej uwzględniany jest m.in. efekt ścinania materiału opisany średnią wartością kąta odkształcenia postaciowego wzdłuż grubości ścianki elementu czy też niejednorodny rozkład gradientu kąta skręcenia wzdłuż długości belki. W rozważaniach uwzględniana jest także deplanacja przekroju poprzecznego belki zarówno jako efekt pierwszego rodzaju (związany z samym kształtem przekroju poprzecznego), jak i efekt drugiego rodzaju (wynikający z grubości ścianki). Do opisu mechaniki materiału kompozytowego ścianek belki wykorzystywana jest Klasyczna Teoria Laminatów. Oprócz wspomnianych założeń w teorii L. Librescu i O. Songa przyjmuje się także kilka silnych hipotez ograniczających jej uniwersalność. Dotyczą one m.in. nieodkształcalności przekroju poprzecznego belki w swojej płaszczyźnie, czy też dopuszczania jedynie niewielkich krzywizn ścianek profilu przekroju poprzecznego. Pomimo pewnych ograniczeń teoria ta jest rozwijana, zarówno przez O. Songa jak i przez innych badaczy. Potwierdzają to liczne publikacje w renomowanych czasopismach naukowych.

Elementem nowości w opublikowanej przeze mnie pracy [1] jest **uwzględnienie w opisie dynamiki badanego układu piasty jako wydzielonego elementu konstrukcji**. Dotychczasowe prace dotyczące wirujących belek kompozytowych uwzględniały najczęściej jedynie samą belkę, przyjmując tylko w wyprowadzonych równaniach różniczkowych ruchu warunki brzegowe wynikające ze sposobu jej zamocowania. Rozszerzenie sformułowania problemu o dynamikę piasty wprowadza do dotychczas

znanych układów równań różniczkowych ruchu dodatkową zależność na kąt obrotu konstrukcji (piasty) jako bryły sztywnej. **W omawianej pracy pokazałem, że równanie to jest sprzężone z układem równań różniczkowych belki poprzez wszystkie zmienne stanu łopaty** tj. poprzez trzy zmienne przemieszczenia, dwie zmienne opisujące deformację postaciową materiału (kąt Timoshenki) i poprzez kąt skręcenia belki. W ogólnym przypadku – tj. dla dowolnego profilu przekroju poprzecznego łopaty – **sprężenia te mają charakter zarówno bezwładnościowy, jak i sztywnościowy. Wykazałem również, że dodatkowe nieliniowe sprzężenie wspomnianych równań stanowi zmienna prędkość kątowa układu.**

Zaletą zaproponowanego w pracy [1] ujęcia zagadnienia modelowania konstrukcji piasta-łopata jest możliwość wprowadzenia do opisu dynamiki całego wirnika wymuszenia pochodzącego bezpośrednio od silnika napędowego. Wyniki badań w tym kierunku opublikowałem w późniejszych pracach.

**Kolejnym elementem nowości jest uwzględnienie w sformułowaniu problemu dowolnej wartości kąta nastawienia belki w piaście.** Pokazałem, że powoduje to pojawienie się w równaniach dynamiki łopaty dodatkowych członów sprzęgających poszczególne stopnie swobody belki; członów te nie występują natomiast w najczęściej analizowanych w literaturze przypadkach, gdy kąt nastawienia wynosi  $0^\circ$  bądź  $90^\circ$ . Dodatkowym atutem wyprowadzonych równań ruchu jest fakt, że mają one charakter ogólny i pozwalają uwzględnić w szczegółowej analizie dowolny sposób ułożenia (orientacji) warstw laminatu. Dotyczy to zarówno ich ułożenia w kierunku normalnym ścianki (tj. grubości) jak i wzajemnej orientacji poszczególnych warstw w naprzeciwległych ściankach przekroju poprzecznego. Część omówionych w tej pracy wyników była prezentowana w trakcie konferencji naukowych m.in. ENOC 2014 (pozycja H7 w Załączniku 5), Euromech Colloquium (pozycja H8 w Załączniku 5) i innych (np. pozycja H9 w Załączniku 5).

Bezpośrednią kontynuacją pracy omówionej powyżej jest publikacja [2] (także Załącznik 5, pozycja A4). W artykule tym rozpatrzono szczegółowo dynamikę wirnika składającego się ze sztywnej piasty i cienkościennej belki kompozytowej o asymetrycznej sztywności obwodowej (ang. *circumferentially asymmetric stiffness* – CAS). Przyjęty układ warstw laminatu powoduje, że ogólny układ sześciu wzajemnie sprzężonych dynamicznych równań równowagi belki upraszcza się do dwu niezależnych podukładów – jeden opisuje dynamikę sprzężonej deformacji skrętno-giętnej (w płaszczyźnie podatnej), drugi z nich opisuje dynamikę zginania w płaszczyźnie sztywnej w połączeniu z odkształceniem w kierunku osiowym belki.

Równania ruchu analizowanej konstrukcji zapisano na podstawie zależności wyprowadzonych w pracy [1]. Podane wcześniej relacje zostały jednak uzupełnione o dodatkowe człony wyższego rzędu występujące w wyrażeniu na względne odkształcenie osiowe próbki – zależność  $(5)_1$  w [2]. Uwzględnienie tych członów jest bowiem niezbędne do prawidłowego opisanie efektu usztywnienia belki w wyniku działania sił odśrodkowych bezwładności. Człony te nie zostały niestety zawarte w wyprowadzeniu przedstawionym w pracy [1].

Sformułowane równania ruchu zostały przekształcone do postaci bezwymiarowej, a następnie zdykretyzowane metodą Galerkina. **Na tym etapie prac wyprowadziłem warunek ortogonalności dla belek kompozytowych o asymetrycznej sztywności obwodowej.** Badanie dynamiki układu rozpocząłem od analizy parametrycznej wpływu kąta ułożenia włókien wzmacniających w laminacie na wartości poszczególnych sztywności łopaty, w tym także sztywności giętno-skrętnej  $a_{37}$  profilu. **Wykazałem,**

**że efekt maksymalnego sprzężenia obu postaci deformacji badanej belki CAS występuje dla kątów zbliżonych do  $74^\circ$**  (mierzonych od kierunku obwodowego przekroju;  $16^\circ$  od osi wzdłużnej belki; dokładna wartość tego kąta zależy od kształtu profilu oraz własności materiałowych kompozytu).

W dalszej części badań przeanalizowałem wpływ momentu bezwładności piasty na dynamikę układu. **Wykazałem, że jedynie dla bardzo dużych wartości względnego masowego momentu bezwładności piasty (tj. w odniesieniu do momentu bezwładności łopaty) częstość drgań własnych układu odpowiada częstości drgań własnych belek wysięgnikowych**; ściślej rzecz biorąc częstość ta zbliża się asymptotycznie od góry do częstości belek wysięgnikowych, gdy względny moment bezwładności piasty dąży do nieskończoności. Natomiast dla wirników składających się ze stosunkowo lekkiej piasty (względny moment bezwładności poniżej 3) różnica jest **bardzo istotna** i w granicznych przypadkach podstawowa częstość drgań własnych układu może być nawet ponad dwukrotnie większa od częstości belki wysięgnikowej. Wspomniany efekt jest najbardziej zauważalny w przypadku pierwszej częstości własnej układu; w przypadku wyższych częstości wpływ bezwładności piasty jest stosunkowo niewielki, zaobserwowane różnice nie przekraczają bowiem 4%. W kolejnym etapie badań analizowałem drgania układu wymuszone okresowo zmiennym momentem napędowym przyłożonym do piasty. **Wykazałem, że dla częstości wymuszenia układu równej częstości drgań własnych belki wysięgnikowej następuje całkowite wytłumienie drgań piasty**; w przypadku tym belka pełni rolę dynamicznego eliminatora drgań. Wykazałem również, że efekt ten występuje zawsze przy tej samej częstości wymuszenia, niezależnie od wartości względnego momentu bezwładności piasty.

Ponadto w omawianej pracy przeprowadziłem szczegółową analizę doboru funkcji próbnych poszczególnych stopni swobody giętno-skrętnej deformacji belki wykorzystywanych w metodzie dyskretyzacji Galerkina. Analiza była przeprowadzona pod kątem efektywności (czasu) obliczeń oraz dokładności wyników. Ustaliłem, że w dyskretyzacji przemieszczenia poprzecznego belki najkorzystniejszym jest stosowanie zmodyfikowanych wielomianów Duncana lub wielomianów Czebyszewa nieparzystego stopnia; kąt deformacji postaciowej najlepiej przybliżać funkcjami sinus, zaś kąt skręcenia belki za pomocą jednomianów.

Część wyników badań przedstawionych w tej pracy była również prezentowana w trakcie konferencji naukowych, m.in. Euromech Colloquium (pozycja J18 w Załączniku 5) oraz konferencji *Eurodyn 2014* (pozycja A14 w Załączniku 5).

Kolejnym etapem moich badań naukowych dotyczących belek kompozytowych było rozszerzenie dotychczasowych zainteresowań na układy tzw. elektro-aktywne. W szczególności zajmowałem się modelowaniem belek kompozytowych z wbudowanymi piezoelektrycznymi elementami aktywnymi. Badałem również możliwości wykorzystania wybranych algorytmów sterowania do redukcji drgań tego typu struktur.

Do opracowania modelu analitycznego zintegrowanej struktury składającej się z belki kompozytowej i przetwornika piezoelektrycznego wykorzystałem wyprowadzone w poprzednich pracach [1, 2] równania. Wprowadzone modyfikacje dotyczyły sposobu wyznaczania współczynników sztywności i bezwładności układu. Polegały one na uwzględnieniu w obliczeniach dodatkowej warstwy materiału piezoceramicznego o innej gęstości i innych własnościach konstytutywnych. W analizie struktury ścianki składającej się z warstw laminatu i piezoceramiki wykorzystałem, podobnie jak w analizie samego materiału kompozytowego, założenie o płaskim stanie naprężeń.

Opracowany model struktury kompozytowej z osadzonym elementem aktywnym został zweryfikowany doświadczalnie na stanowisku badawczym, a także numerycznie z wykorzystaniem metody elementów skończonych [3]. W tym celu na belki wykonane z jednokierunkowej taśmy prepregu szklano-epoksydowego zostały naklejone piezoelektryczne elementy aktywne typu MFC. W ramach testów stanowiskowych badałem ugięcia statyczne wytworzonych struktur oraz przeprowadziłem analizę modalną. Testy obejmowały badanie belek zamocowanych w nieruchomym utwierdzeniu, jak również i belek mocowanych do piasty wirnika napędzanego silnikiem prądu stałego, z możliwością płynnej regulacji prędkości obrotowej [3]. Eksperymenty zostały przeprowadzone na dedykowanym stanowisku badawczym Katedry Mechaniki Stosowanej Politechniki Lubelskiej. Do weryfikacji numerycznej modelu analitycznego przygotowałem model analizowanej struktury w oprogramowaniu ABAQUS. W opracowaniu wykorzystałem wyniki swoich wcześniejszych prac badawczych opublikowane w artykule [4] (także Załącznik 5, pozycja A17) oraz prezentowane na konferencjach naukowych (np. pozycja J25 w Załączniku 5). W pracy tej **zaproponowałem sposób efektywnego modelowania przetworników piezoelektrycznych typu MFC** (ang. *macro fibre composite*), a także przedstawiłem **autorski sposób weryfikacji opracowanych modeli numerycznych tych struktur**. Uzyskane wyniki testów laboratoryjnych i symulacji numerycznych oraz wyniki obliczeń modelu analitycznego wykazały dużą zgodność. Potwierdzona została zatem poprawność zaproponowanego modelu cienkościennej belki wykonanej z kompozytu włóknistego ze zintegrowanym elementem piezoelektrycznym.

W dalszych swoich badaniach wykorzystałem opracowany model analityczny struktury elektromechanicznej do badań symulacyjnych efektywności wybranych algorytmów sterowania drgań wirujących belek kompozytowych. Wynikiem tej części badań są publikacje [5,6].

W początkowych pracach dotyczących sterowania [5] (także Załącznik 5, pozycja A10) analizowałem kompozytowe belki cienkościenne o stałej sztywności obwodowej (ang. *circumferentialy uniform stiffness – CUS*), które wykazują sprzężenie obu wzajemnie prostopadłych deformacji giętych. Badałem możliwość sterowania własnościami tych belek za pomocą elementów aktywnych osadzonych na całej długości belki. Analizowałem kontroler proporcjonalny, którego moment sterujący zależy od dwu zmiennych stanu belki – tj. od wartości momentu gnącego w punkcie zamocowania oraz od kąta obrotu swobodnego końca belki. W pracy wyprowadziłem zależności matematyczne wyrażające moment gnący wytwarzany przez element aktywny w funkcji wartości wektora pola elektrycznego w tym elemencie. Analizowałem efektywność działania zaproponowanego kontrolera w warunkach rezonansu wewnętrznego 1:1 układu przy zrównaniu częstości drgań własnych giętych belki w obu płaszczyznach (ang. *cross-over frequency*). Analizy zostały przeprowadzone dla różnego stopnia sprzężenia obu deformacji wynikającego z różnych wartości kąta ułożenia włókien wzmacniających w materiale kompozytowym. Na podstawie uzyskanych wyników wykazałem, że zaproponowany kontroler może służyć do zmiany częstości rezonansu wewnętrznego badanej belki. **Efektywność tego kontrolera jest największa dla stosunkowo niedużych wartości sprzężeń, odpowiadających ułożeniom włókien kompozytu w kierunku zbliżonym do obwodu belki.** Wraz ze wzrostem wartości kąta ułożenia włókien (tj. zbliżaniu się do kierunku wzdłużnego belki) efektywność kontrolera wyraźnie spada. Związane jest to z nierównomiernym wzrostem obu sztywności giętych układu, co powoduje przesunięcie częstości rezonansu wewnętrznego w kierunku wyższych wartości ruchu obrotowego belki. To z kolei powoduje wzrost oddziaływania sił odśrodkowych bezwładności, które również prowadzą do zwiększenia sztywności belki. Część

wyników badań przedstawionych w tej pracy była prezentowana m.in. w trakcie konferencji Forum Acusticum w 2014 roku (pozycja J19 w Załączniku 5).

W kolejnej pracy [6] (Załącznik 5 pozycja A5) analizowałem możliwość redukcji drgań wirującej belki kompozytowej za pomocą kontrolera nasyceniowego. Kontroler tego typu został opracowany przez A. Nayfehgo i wsp. i wykorzystany pierwotnie do stabilizacji kołysania wzdłużnego i boczno statków. W późniejszych pracach tego zespołu oraz innych badaczy omawiany kontroler był wykorzystywany do tłumienia drgań innych konstrukcji. Nie były natomiast publikowane w znanej mi literaturze naukowej prace dotyczące jego zastosowania do sterowania drganiami wirujących belek kompozytowych.

Podobnie jak w pracy [2] obiektem moich badań była belka wykonana z kierunkowego materiału kompozytowego o asymetrycznej sztywności obwodowej (CAS) profilu i zamocowana do sztywnej piastry wymuszanej okresowo zmiennym momentem napędowym. W ramach przeprowadzonych badań rozważałem przypadek zerowej wartości średniej momentu wymuszenia (tj. drgań wokół położenia zerowego układu), jak również i zakładając pełny ruch obrotowy belki i piastry wynikający z różnej od zera wartości średniej momentu wymuszenia.

Badania symulacyjne działania kontrolera przeprowadziłem dla różnych przypadków wzajemnego sprzężenia deformacji skrętnej i giętnej belki wynikających z różnych wartości kąta ustawienia włókien wzmacniających w materiale kompozytowym.

Wykreślone charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe układu oscylującego wokół położenia spoczynkowego wskazują, że uruchomienie kontrolera w bezpośrednim otoczeniu częstości rezonansowej układu prowadzi do wystąpienia niestabilnych gałęzi rozwiązań drgań zarówno belki jak i piastry; rozwiązania stabilne zaś są efektywnie tłumione. **Wykazałem, że przy częstości rezonansowej drgania belki są tłumione zawsze do tej samej amplitudy bez względu na sztywność belki wynikającą z różnego kąta ułożenia włókien wzmacniających w materiale kompozytowym.** Analizując dynamikę układu w pełnym ruchu obrotowym **dowiodłem, że wzrost prędkości obrotowej prowadzi do znaczącego zawężenia obszaru efektywnego działania badanego kontrolera nasyceniowego.** Niezależnie jednak od tego faktu, drgania belki w bezpośrednim otoczeniu częstości rezonansowej są tłumione do tej samej amplitudy jaką wyznaczono w przypadku ruchu oscylacyjnego bez pełnego obrotu. Opisany efekt nie znajduje natomiast potwierdzenia w przypadku piastry. Przeprowadzone symulacje wskazują, że kontroler nasyceniowy jest w stanie skutecznie **tłumić drgania piastry jedynie w przypadkach niewielkich prędkości kątowych ruchu obrotowego.** Przy wyższych prędkościach kątowych kontroler wpływa na amplitudę drgań piastry w bardzo niewielkim stopniu. Z tego punktu widzenia kontroler jest więc nieefektywny. Oprócz wskazanej publikacji [6] przedstawione wyniki były prezentowane m.in. na konferencjach: DSTA 2015 (pozycja J15 w Załączniku 5), ICOVP 2015 (pozycja J16 w Załączniku 5) oraz DYMAMESI 2017 (pozycja J8 w Załączniku 5) oraz częściowo w pracy A8.

W omawianych powyżej publikacjach [5,6] przyjęto uproszczony model analityczny materiału piezoelektrycznego. Model ten, wyprowadzony na podstawie teorii cienkich płyt piezoceramicznych, jest najczęściej spotykanym w literaturze naukowej podejściem w modelowaniu matematycznym piezoelektrycznych układów wykonawczych. Istotą tego ujęcia jest uwzględnienie w rozważaniach jedynie wpływu zadanego pola elektrycznego na deformację przetwornika (odwrotny efekt piezoelektryczny) i pominięcie wtórnego pola elektrycznego powstającego w elemencie aktywnym w wyniku jego od-

kształcenia (prosty efekt piezoelektryczny). Przyjęcie powyższego uproszczenia prowadzi do stwierdzenia, że wartość funkcji pola elektrycznego powstającego w piezoelektrycznym elemencie aktywnym podczas deformacji jest stała wzdłuż jego grubości i długości, czyli jednakowa w każdym punkcie piezoceramiki. Jednakże w przypadku stanów deformacji, w których odkształcenia zmieniają się wzdłuż długości i/lub grubości elementu (np. zginanie) analiza równania konstytutywnego piezoceramiki wskazuje, że wartość wektora indukcji elektrycznej (ang. *electric displacement*) musi się zmieniać wzdłuż grubości/długości piezoelementu. A zatem przyjęcie wspomnianego uproszczenia skutkuje w konsekwencji naruszeniem zasady zachowania ładunku. Ponadto należy zaznaczyć, że wspomniane uproszczenie pomija także m.in. wartość pola elektrycznego indukowanego w płaszczyźnie przetwornika.

Wyniki szczegółowych prac porównawczych przedstawionych m.in. w pracach opublikowanych w *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* (doi: 10.1106/50V9-519W-QVUV-AL7L) oraz w *Computers & Structures* (doi:10.1016/j.compstruc.2007.04.023) wskazują, że wspomniane modele uproszczone zaniżają rzeczywistą sztywność układu z elementem aktywnym. Należy także zauważyć, że według tego opisu równania stanu układu elektro-mechanicznego redukują się tylko do równań mechanicznych, w których nie występuje osobne równanie opisujące elektryczny stopień swobody układu. A w szczególnym przypadku, gdy element aktywny jest rozmieszczony na całej rozpiętości struktury, wymuszenie elektryczne układu występuje jedynie jako dodatkowy człon niejednorodny w warunku brzegowym zadania; np. w omawianej pracy [5] jako człon w warunku brzegowym równania momentów – por. równanie (9)<sub>2</sub> oraz (12).

Wskazane powyżej niedoskonałości uproszczonych modeli matematycznych przetworników PZT skłoniły mnie do dalszych prac zmierzających do dokładniejszego opisu elektro-dynamiki materiałów piezoelektrycznych. W literaturze naukowej dostępnych jest już kilka bardziej zaawansowanych modeli analitycznych tego typu materiałów. Można wyróżnić wśród nich m.in. modele uwzględniające niejednorodności rozkładu pola elektrycznego w objętości elementu aktywnego (np. doi: 10.1016/S0020-7683(03)00307-X). Modele te umożliwiają prawidłowe opisanie dwustronnego wzajemnego sprzężenia elektromechanicznego struktury z wbudowanym elementem piezoceramicznym. Osobną grupę modeli reprezentują prace, w których uwzględnienia się w opisie matematycznym układu elektro-mechanicznego efekty nieliniowe. Najczęściej dotyczy to nieliniowości geometrycznych wynikających z dużych przemieszczeń konstrukcji, bądź też efektu histerezy związanego ze zmianą polaryzacji elementu aktywnego. Wyniki innych badań wskazują z kolei na konieczność uwzględnienia w modelu matematycznym członów odkształceń wyższego rzędu. Opublikowane zostały również prace, w których podkreśla się występowanie efektów nieliniowych związanych z polem elektrycznym w przetwornikach piezoelektrycznych pracujących w obszarze częstości okołorezonansowych (np. doi: 10.1023/A:1022093428599).

W świetle powyższych studiów literaturowych w pracy [7] (także Załącznik 5, pozycja A6) **zapropo-**  
**nowałem własny model matematyczny przetwornika piezoelektrycznego zintegrowanego ze struk-**  
**turą belki kompozytowej** mocowanej do wirującej piasty. W sformułowaniu uwzględniony został m.in. niejednorodny rozkład wartości pola elektrycznego wzdłuż elementu aktywnego osadzonego na belce. Przyjęcie tego założenia pozwoliło na prawidłowe opisanie efektu dwustronnego sprzężenia elektro-mechanicznego i jednocześnie umożliwiło zapisanie dodatkowego równania dynamiki opisującego elektryczny stopień swobody układu. Równanie to, po uzupełnieniu o dodatkowe człony m.in.

pojemnościowe i indukcyjne, może być wykorzystane do opisu dynamiki obwodu elektrycznego połączonego z przetwornikiem PZT. Dodatkowo w opracowanym modelu matematycznym zaproponowałem wprowadzenie do równania konstytutywnego piezoceramiki członów drugiego i trzeciego stopnia względem wartości pola elektrycznego. Koncepcja ta wynika z faktu, że opracowany model struktury elektromechanicznej jest przeznaczony do badania własności dynamicznych konstrukcji w okolicach częstości rezonansowych, w tym także i badania efektywności wybranych kontrolerów do tłumienia drgań belki. Jak wykazałem w ramach późniejszych badań własnych [9] przyjęcie tej tezy było jak najbardziej uzasadnione.

Chciałbym podkreślić, że nie są mi znane prace naukowe, w których oba wspomniane efekty zostałyby uwzględnione jednocześnie. Dlatego też uważam **opracowanie modelu matematycznego przetwornika piezoelektrycznego uwzględniającego dwustronny efekt sprzężenia elektro-mechanicznego oraz nieliniowość równania konstytutywnego piezoceramiki za swoje autorskie i oryginalne osiągnięcie naukowe.**

Wyprowadzone w pracy [7] dynamiczne równania ruchu mają charakter ogólny, tzn. pozwalają na analizę ruchu belki o dowolnym – w ramach przyjętych założeń wstępnych – kształcie przekroju poprzecznego, a także o dowolnej wzajemnej orientacji poszczególnych warstw laminatu w naprzeciwległych ściankach profilu belki. Szczegółową analizę sformułowanych zależności przeprowadziłem dla belki o asymetrycznej sztywności obwodowej (CAS). Jak wspomniano wcześniej ten układ warstw laminatu powoduje sprzężenie deformacji skrętnej oraz zginania i deformacji postaciowej w płaszczyźnie podatnej. **Pokazałem, że otrzymane równania mechaniczne oraz równanie elektryczne dynamiki układu są wzajemnie sprzężone poprzez kąt odkształcenia postaciowego materiału** (kąt Timoszenki). Ponadto same równania mechaniczne są dodatkowo wzajemnie ze sobą sprzężone poprzez członny wynikające z prędkości kątowej układu.

Opracowany w publikacji [7] model matematyczny posłużył do zbadania dynamiki wirnika składającego się z piasty i belki ze zintegrowanym przetwornikiem piezoelektrycznym o nieliniowych własnościach względem pola elektrycznego. Wyniki przeprowadzonych badań zostały przedstawione w pracy [8] (Załącznik 5, pozycja A2). W pierwszej kolejności analizowałem drgania własne belki wysięgnikowej wydzielonej z układu wirnika (tj. przyjmując założenie, że moment bezwładności piasty dąży do nieskończoności). Wyznaczyłem częstości drgań oraz kształty postaci własnych belki, a także rozkłady wartości pola elektrycznego w warstwie materiału piezoceramicznego. Symulacje przeprowadziłem analizując układ nieruchomy, jak również przyjmując kilka różnych wartości prędkości kątowej ruchu unoszenia. Otrzymane wyniki wskazały na **istotne różnice w rozkładzie wartości pola elektrycznego w zależności od prędkości kątowej ruchu unoszenia oraz od kształtu deformacji giętno-skrętnej materiału kompozytowego belki**. Największe różnice zaobserwowałem dla pierwszej postaci własnej, natomiast w przypadku wyższych postaci własnych rozkład pola elektrycznego jest bardziej jednorodny.

Następnie badałem drgania układu wymuszone okresowo zmiennym momentem napędowym przyłożonym do piasty. Przeprowadzona analiza wykazała, obserwowany także przez innych badaczy, **efekt zmiękczenia charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej układu spowodowany nieliniową charakterystyką materiału piezoceramicznego**. Sporządziłem także wykresy przebiegów czasowych drgań oraz wykresy bifurkacyjne, które potwierdziły występowanie dwu różnych rozwiązań w określonym zakresie częstości wymuszenia. Porównując bezpośrednio wyniki przeprowadzonych

obliczeń liniowego i nieliniowego modelu materiału piezoelektrycznego **wykazałem, że amplituda drgań belki ze zintegrowanym przetwornikiem o nieliniowych własnościach konstytutywnych jest większa zarówno w okresie przejściowym, jak również i w zakresie drgań ustalonych**. W toku przeprowadzonych symulacji badałem również odpowiedź układu na inne typy wymuszeń, np. na wymuszenie impulsem jednostkowym. Część uzyskanych wyników badań prezentowałem w czasie seminarium DYMAMESI 2017 w Krakowie (Załącznik 5, pozycja H3)

Podsumowując rezultaty powyższych badań mogę stwierdzić, że nieliniowy model piezoceramiki uwzględniający dwukierunkowe sprzężenie zwrotne pola elektrycznego i pola deformacji mechanicznej daje istotnie różne wyniki w porównaniu do powszechnie stosowanych uproszczonych modeli liniowych bez sprzężeń.

Powyższy wniosek skłonił mnie do szerszej analizy porównawczej z wykorzystaniem opracowanego modelu nieliniowego i oceny wpływu nieliniowości materiału piezoelektrycznego nie tylko na belkę, ale również i na dynamikę piasty wirnika. Zbadałem także wpływ rozważanych nieliniowości na efektywność tłumienia drgań wirnika za pomocą analizowanego wcześniej kontrolera nasyceniowego. Rezultaty tych badań zostały przedstawione w pracy [9] (także Załącznik 5, pozycja A1).

Przeprowadzone symulacje wykazały, że nieliniowości materiału piezoelektrycznego prowadzą do, podobnie jak w przypadku belki, zmiękczenia charakterystyki rezonansowej piasty. Ponadto, bezpośrednie porównanie charakterystyk wirnika z liniowym i nieliniowym modelem materiału piezoelektrycznego dowiodło, że w badanym zakresie parametrów **nieliniowości materiałowe mają charakter dominujący wobec nieliniowości układu wynikających z działania siły Coriolisa oraz siły odśrodkowej bezwładności**. Efekt ten został także potwierdzony na wykresach bifurkacyjnych odpowiedzi układu w zależności od stałego składnika okresowo zmiennego momentu napędowego. W kolejnych symulacjach badałem wpływ wartości momentu bezwładności piasty na dynamikę wirnika z nieliniowym elementem aktywnym. Na podstawie wykresów bifurkacyjnych wykazałem, że **wraz ze wzrostem momentu bezwładności piasty następuje usztywnienie charakterystyki odpowiedzi zarówno belki, jak i piasty**. Ponadto na podstawie sporządzonych wykresów ustaliłem, że dla niewielkich wartości momentu bezwładności piasty system staje się niestabilny.

W omawianej pracy przeprowadziłem także symulacje numeryczne, w których badałem zachowanie wirnika z nieliniowym przetwornikiem piezoelektrycznym w sytuacji, gdy kontroler nasyceniowy nie jest prawidłowo dostrojony do częstości drgań własnych układu piasta-belka. Uzyskane wyniki dowodzą, że nawet **niewielkie rozstrojenie częstości kontrolera prowadzi do pojawienia się obszarów rozwiązań niestabilnych na charakterystyce drgań belki, piasty oraz kontrolera**, co może prowadzić do potencjalnie niebezpiecznych reakcji układu. Fakt ten wskazuje na konieczność bardzo precyzyjnego doboru nastaw kontrolera, gdyż tylko w bezpośrednim sąsiedztwie częstości własnej układu drgania belki są tłumione bardzo efektywnie.

Prace nad modelowaniem dynamiki belek kompozytowych ze zintegrowanymi przetwornikami piezoelektrycznymi będą kontynuowane w najbliższej przyszłości. Wyniki dotychczasowych badań posłużyły bowiem do przygotowania części wniosku o projekt badawczy NCN pt. „Nieliniowa dynamika sprzężonych elektro-mechanicznych modeli belek kompozytowych w strukturach wirujących”. Złożony wniosek uzyskał pozytywne recenzje oraz został zakwalifikowany do finansowania. W projekcie tym pełnię rolę wykonawcy (załącznik 5, pozycja G1).

Podsumowując, do **najważniejszych i oryginalnych osiągnięć naukowych** zdobytych w toku prowadzonych badań mogą zaliczyć:

- opracowanie modelu matematycznego przetwornika piezoelektrycznego o nieliniowych własnościach konstytutywnych względem pola elektrycznego oraz dwustronnym wzajemnym sprzężeniu zwrotnym pola elektrycznego i pola deformacji mechanicznej
- implementację wyżej wymienionego modelu matematycznego materiałów aktywnych do analizy dynamiki wirującej cienkościennej belki kompozytowej z osadzonym piezoelektrycznym elementem aktywnym
- kompleksowe ujęcie dynamiki wirnika składającego się ze sztywnej piasty i podatnej łopaty wykonanej z kompozytów włóknistych uwzględniające wzajemne oddziaływania obu tych elementów
- implementację kontrolera nasyceniowego do redukcji drgań łopat z osadzonymi piezoelektrycznymi elementami aktywnymi o liniowych i nieliniowych własnościach konstytutywnych względem pola elektrycznego
- opracowanie sposobu efektywnego modelowania w programach opartych na metodzie elementów skończonych przetworników piezoelektrycznych typu MFC (ang. *macro fibre composite*)

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

W ramach mojej pracy doktorskiej zajmowałem się tematyką związaną z optymalizacją odpornościową konstrukcji (ang. *reliability-based structural optimization*). W szczególności interesowałem się konstrukcjami kratownicowymi, w których analizowałem wpływ niedokładności wykonania poszczególnych elementów na uzyskiwane rozwiązania optymalne (pozycje A18, A20, B8 oraz C4 w Załączniku 5). Prowadziłem również badania nad statecznością wielowarstwowych płyt laminowanych z uwzględnieniem zaburzeń kąta ułożenia włókien wzmacniających (publikacje m.in. A19, B6, B7 w Załączniku 5).

Po uzyskaniu stopnia doktora kontynuowałem badania dotyczące optymalizacji odpornościowej laminatów. Koncentrowałem się głównie na badaniu wpływu zaburzeń grubości warstw poszczególnych warstw laminatu na stateczność wielowarstwowych prostokątnych płyt kompozytowych. Efektem tych prac są trzy samodzielne publikacje, wyszczególnione w Załączniku nr 5 jako pozycje A15 oraz B2 i B5.

Wyniki tych prac oraz sformułowane wnioski dotyczące dużej wrażliwości własności mechanicznych kompozytów włóknistych na zaburzenia wybranych parametrów geometrycznych laminatu skłoniły mnie do dalszej kontynuacji tych badań. Opracowane dotychczas modele opisu niedokładności wykonawczych zostały zaimplementowane do analizy wirników wielołopatowych, w których jedna z łopat nieznacznie różni się od pozostałych – np. w wyniku błędów wykonawczych laminatu. Fakt ten prowadzi do znanego i dobrze udokumentowanego w literaturze zjawiska desynchronizacji układu. Prace w ramach tej tematyki prowadzę wspólnie z prof. dr hab. J. Warmińskim oraz mgr Z. Szmit, której jestem promotorem pomocniczym w przewodzie doktorskim. Wstępne wyniki tych badań zostały przedstawione na konferencji ENOC 2017 w Budapeszcie w b.r. (pozycja J4

w Załączniku 5) oraz będą prezentowane w trakcie konferencji DSTA 2017 w grudniu b.r. w Łodzi (Szmit Z., Warmiński J., Latański J.: *Synchronisation analysis of a de-tuned three-blades rotor* – przesłane 12 stronicowe streszczenie otrzymało rekomendację recenzentów 'excellent article, important contribution').

Oprócz wspomnianej wyżej tematyki zajmuję się również problematyką drgań nieliniowych kabli. Badania te są prowadzone we współpracy z prof. G. Regą oraz prof. D. Zullim. Efektem jest wspólna publikacja (Załącznik 5, pozycja A9). W opracowaniu tym analizowano drgania parametryczne kabli wzbudzanych wymuszeniem zewnętrznym w postaci siły o rozkładzie ciągłym oraz ruchem postępowo-zwrotnym suportu w płaszczyźnie pionowej układu. Badano przypadki symetrycznych oraz wzajemnie antysymetrycznych przemieszczeń obu punktów mocowania kabla w otoczeniu głównej częstości rezonansowej. Zagadnienie rozwiązano analitycznie oraz drogą symulacji numerycznych. Bezpośrednie porównanie uzyskanych wyników z obu metod wykazało dużą zgodność w zakresie małych i średnich amplitud drgań.

Poza głównymi tematami badawczymi, które są przedmiotem niniejszego autoreferatu zajmuję się również badaniami dotyczącymi modelowania materiałów z pamięcią kształtu (ang. *shape memory alloys* – SMA) oraz możliwościami ich zastosowań w biomedycynie. Badania te prowadzę we współpracy z dr hab. inż. Rafałem Rusinkiem z Politechniki Lubelskiej. Współpraca ta jest realizowana w ramach projektu NCN – Smart-Ear (DEC-2014/13/B/ST8/04047), w którym jestem wykonawcą (Załącznik 5, pozycja G2). Efektem tych prac jest wspólna publikacja naukowa zamieszczona w czasopiśmie *European Physical Journal Plus* i opublikowana w 2017 r. (tytuł indeksowany w bazie JCR, Załącznik 5, pozycja A3).

W obszarze biomedycyny prowadzę także badania nad sposobami wspomagania leczenia chorób układu kostnego dzieci (kończyny dolne oraz kręgosłup). Prace te są realizowane we współpracy z zespołem naukowym Katedry Ortopedii Dziecięcej Uniwersytetu Medycznego w Lublinie oraz pracownikami Uniwersyteckiego Szpitala Dziecięcego w Lublinie. Badania dotyczą m.in. leczenia choroby Schumana. W ich wyniku zgłosiliśmy i otrzymaliśmy patent na gorset dynamiczno-stymulujący wspomagający leczenie tej choroby (Załącznik 5, pozycja F2). Z zespołem Katedry Ortopedii Dziecięcej Uniwersytetu Medycznego w Lublinie prowadzę również prace nad metodami całościowej oceny prawidłowości budowy anatomicznej układu kostnego dzieci na podstawie zdjęć RTG wydzielonych fragmentów ciała oraz pomiarów antropometrycznych. Wstępne doniesienia z tych badań zostały przedstawione w czasie kongresu krajowego (pozycja J5 w Załączniku 5), pełny tekst publikacji jest w przygotowaniu.

Ponadto, w ramach prowadzonych badań naukowych współpracuję z przedsiębiorstwami i otoczeniem biznesowym nauki. Brałem czynny udział m.in. w realizacji projektu UE „Wsparcie Regionalnej Sieci Współpracy” koordynowanego przez Urząd Marszałkowski Województwa Lubelskiego w Lublinie, Departament Gospodarki i Innowacji (Załącznik 5, pozycja L1). Prowadzone prace polegały na przeprowadzeniu symulacji numerycznych MES wytrzymałości zmęczeniowej zaczepu oraz zawiesia szyn kolejek podwieszanych stosowanych w górnictwie. Badania te pozwoliły na określenie bezpieczeństwa i trwałości zmęczeniowej analizowanych podzespołów. Należy zaznaczyć, że według obecnie obowiązujących regulacji nie ma określonych normatywnie standardów do prowadzenia obliczeń zmęczeniowych elementów kolejek podwieszanych przeznaczonych dla górnictwa i zaproponowane w omawianym opracowaniu podejście do zagadnienia jest moim pomysłem.

W ramach współpracy z pracownikami Katedry Technologii i Przetwórstwa Tworzyw Polimerowych Politechniki Lubelskiej jestem współautorem patentu na głowicę urządzenia do formowania powierzchni wyrobów z materiałów plastycznych (Załącznik 5, pozycja F1).

