

Załącznik 2

Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych albo artystycznych, w szczególności osiągnięcia, o którym mowa w art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2018 r. poz. 1789)
(w języku polskim)

Autoreferat

1. Andrzej Piotr Koszewnik

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

06.07.2006 - magister inżynier, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, studia realizowane na kierunku Automatyka i Robotyka, temat pracy magisterskiej: *Programowanie regulatora PID w technologii FPGA*, promotor prof. dr hab. inż. Zdzisław Gosiewski

01.07.2011 - doktor nauk technicznych, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej, tytuł rozprawy: *Metoda szybkiego prototypowania układu aktywnego tłumienia drgań konstrukcji mechanicznych*, promotor prof. dr hab. inż. Zdzisław Gosiewski

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

od 01.10.2011 - adiunkt w Katedrze Automatyki i Robotyki, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka,

01.10.2006-30.09.2011 - asystent w Katedrze Automatyki i Robotyki, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka,

4. Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe, o którym mowa w 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. z 2018 r. poz. 1789)

Tytuł osiągnięcia naukowego

Aktywne układy sterowania drganiami oraz odzyskiwanie energii z drgań konstrukcji mechanicznych

A. Publikacje lub inne prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

Publikacje w czasopismach recenzowanych

1. Koszewnik A., 2019, *Analytical modeling and experimental validation of an energy harvesting system for the smart plate with an integrated piezo-harvester*, Sensors, Vol.19, No.4, JCR, IF(2017): 2.475; MNiSW: Lista A, 30 pkt.

2. **Koszewnik A.**, 2018, *The design of vibration control system for aluminum plate with piezo-strips based on residues analysis of model*, European Physical Journal Plus 133:405, **JCR, IF(2018):2.240, MNiSW: Lista A, 25 pkt.**
3. **Koszewnik A.**, Ołdziej D., 2019, *Performance assessment of an Energy harvesting system located on a six-rotor copter*, European Physical Journal- Special Topics, **JCR, IF (2017):1.947, MNiSW: Lista A, 30 pkt.** (zaakceptowany do druku - informacja uzupełniająca na końcu autoreferatu)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu przeglądu literaturowego, opracowaniu koncepcji badań, wstępnym napisaniu manuskryptu, wyznaczeniu elektromechanicznego modelu belki wraz z dołączoną do niej wstęgą piezoelektryczną (piezo-odzyskiwacz) z wykorzystaniem podejścia analitycznego, przeprowadzeniu pełnych badań numerycznych w środowisku Ansys w postaci: wyznaczeniu postaci i wartości drgań własnych konstrukcji, wyznaczeniu odkształceń giętnych belki w zależności od wypełnienia sygnału PWM podawanego na silnik, zaplanowaniu badań testowych, przeprowadzeniu badań eksperymentalnych, interpretacji wyników badań numerycznych i eksperymentalnych, opracowaniu wyników symulacji w formie graficznej i tabelarycznej w artykule, opracowaniu podsumowania i wniosków, napisaniu końcowej wersji manuskryptu.

Mój udział procentowy szacuję na 75%.

4. **Koszewnik A.**, Walendziuk W., Grześ P., 2015, *Mechanical and electrical impedance matching in a piezoelectric beam for energy harvesting*, European Physical Journal - Special Topics Vol.224, No.14, **JCR, IF (2015):1.417, MNiSW: Lista A, 30 pkt.**

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu przeglądu literaturowego, opracowaniu koncepcji badań, napisaniu wstępnej wersji manuskryptu, wyprowadzeniu modelu matematycznego belki piezoelektrycznej z dodatkową masą i bez niej, przeprowadzeniu badań symulacyjnych i eksperymentalnych, analizowaniu otrzymanych wyników badań przedstawionych na Rys.11 i Rys.12. Brałem także udział w interpretacji pozostałych wyników badań, opracowaniu podsumowania, wniosków a także spisaniu końcowej wersji manuskryptu.

Mój udział procentowy szacuję na 70%.

5. **Koszewnik A.**, Gosiewski Z., 2016, *Quasi-optimal locations of the piezo-elements on a rectangular plate*, European Physical Journal Plus, Vol.131:232, **JCR, IF (2016):1.753, MNiSW: Lista A, 25 pkt.**

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji badań, współopracowaniu przeglądu literaturowego i bibliografii, wstępnym napisaniu manuskryptu, wyprowadzeniu modelu dynamiki aktywnej płyty z dołączonymi do niej piezoelektrycznymi elementami pomiarowymi i wykonawczymi, analizie modelu numerycznego modalnej aktywnej płyty na podstawie wyznaczonych macierzy sztywności i bezwładności, zbadaniu wpływu lokalizacji i orientacji wstęgi piezoelektrycznej (wzbudnika) na uzyskiwane postacie drgań konstrukcji i generowanie modalnej siły sterującej, wyznaczeniu quasi-optymalnej lokalizacji i orientacji piezo-wzbudnika na płycie na podstawie badań numerycznych, zbadaniu wpływu lokalizacji i orientacji piezoelektrycznego elementu pomiarowego na generowane wartości odkształceń płyty i wyznaczeniu jego quasi-optymalnej lokalizacji na konstrukcji, zaplanowaniu badań identyfikacyjnych i eksperymentalnych, sporządzeniu wszystkich rysunków, tabel, interpretacja wyników, opracowaniu podsumowania i wniosków.

Mój udział procentowy szacuję na 65%.

- 6. Koszewnik A.,** Mystkowski A., 2016, Mu-synthesis robust control of 3D bar structure vibration with using piezo-stack actuators, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.78, pp.18-27, JCR, IF (2016):4.116, MNiSW: Lista A, 45 pkt.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współudziale przy opracowaniu przeglądu literatury, współopracowaniu koncepcji badań, opracowaniu struktury układu sterowania odpornego, opracowaniu rozdziału poświęconego opisowi obiektu sterownia oraz procesu identyfikacji eksperymentalnej (Rozdział 2 i 3), sporządzeniu Rys.2, autorskiemu zaplanowaniu badań doświadczalnych w dziedzinie czasu i częstotliwości, przeprowadzeniu badań eksperymentalnych i opracowaniu wyników w postaci graficznej przedstawionej na Rys.8-Rys.11. Brałem także udział w ocenie i spisaniu bibliografii.

Mój udział procentowy szacuję na 50%.

Sumaryczne wskaźniki dotyczące publikacji wchodzących w skład dzieła naukowego	
IF: 13,948	MNiSW:185 pkt.

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

Powstające nowoczesne konstrukcje mechaniczne są coraz lżejsze i smuklejsze. Prowadzi to do zwiększenia ich podatności na zewnętrzne wymuszenia, jak również na wewnętrzne zakłócenia. Wprowadzane zmiany konstrukcyjne i materiałowe w projektowanych i wytwarzanych konstrukcjach powodują, że pojawiające się drgania konstrukcji mechanicznych stają się podstawą do ich analizowania w dwóch obszarach badawczych. W jednym z obszarów badania ukierunkowane są na projektowanie aktywnych¹ lub pół-aktywnych² układów sterowania drganiami na potrzeby redukcji drgań, w drugim zaś, na opracowaniu układów odzyskujących energię z drgań konstrukcji mechanicznej^{3,4,5} na potrzeby zasilania niezbędnych elementów pomiarowych wykorzystywanych do monitorowania stanu technicznego konstrukcji mechanicznych.

W celu przeciwdziałania drganiom konstrukcji mechanicznej coraz częściej stosuje się aktywne metody redukcji drgań, w których elementem wykonawczym może być tłumik magnetoreologiczny⁶, łożysko magnetyczne⁷, element piezoelektryczny⁸ lub urządzenie z pamięcią kształtu⁹. Niezależnie od wybranego rodzaju elementu wykonawczego proces projektowania układu sterowania drganiami wymaga modelu matematycznego opisującego dynamikę konstrukcji w określonym paśmie częstotliwości. Wspomniany model matematyczny podatnej konstrukcji mechanicznej, wyposażonej na przykład w dodatkowe piezoelektryczne elementy pomiarowe i wykonawcze, może być uzyskany poprzez wykorzystanie dostępnych programów obliczeniowych lub poprzez eksperymentalną identyfikację jej parametrów. Jednakże zanim będzie on wyznaczany, z punktu widzenia sterowania drganiami, istotne jest przyjęcie stosownej lokalizacji piezoelektrycznych elementów pomiarowych i wykonawczych na konstrukcji. Lokalizacja ta będzie określać relację *wzbudzenie-pomiar* i to właśnie od niej zależeć będzie czy rozważany na etapie projektowania układu sterowania drganiami układ mechaniczny będzie posiadał cechy układu

¹ M. Sibiela, J. Kowal, W. Rączka, J. Konieczny, (2016), *Optimal Controller for Active Vehicle Suspension Disturbed by Sinusoidal Signals*, Solid State Phenomena, 248, 127-134

² T. Nabagło, A. Jurkiewicz, J. Kowal, (2016), *Semi-active Suspension System for 2SI Tracked Platform in Drive Comfort Improvement Application*, rozdział w książce *Innovative Simulation Systems*, Springer Publisher

³ S.P. Beeby, M.J. Tudor, N.M. White, (2006), *Energy harvesting vibration sources for microsystems applications*, Measurement Science and Technologies, Vol. 17, R175–R195.

⁴ J. Kaleta, K. Kot, R. P. Mech, P. K. Wiewiórski, (2014), *The use of magnetostrictive cores for the vibrations generation and energy harvesting from vibration in the selected frequencies of work*, Key Engineering Materials, Vol.598, pp.75-80.

⁵ S. Stoykov, G. Litak, E. Monoach, (2015), *Vibration energy harvesting by a Timoshenko beam model and piezoelectric transducer*, European Physical Journal Special Topics, Vol.224, 2755–2770.

⁶ B. Sapiński, (2011), *Experimental study of a self-powered and sensing MR damper-based vibration control system*, Smart Materials and Structures. Vol.20(10), 105007.

⁷ A. Mystkowski, E. Pawłuszewicz, (2017), *Nonlinear Position-Flux Zero-Bias Control for AMB System with Disturbance*, Applied Computational Electromagnetics Society Journal, Vol.32, No.8, pp.650-656

⁸ A. Preumont, (2002) *Vibration Control of Active Structures. An Introduction*, Kluwer Academic Publisher.

⁹ M. Sibiela, J. Kowal, W. Rączka, J. Konieczny, (2016), *Discrete Preisach Model of a Shape Memory Alloy Actuator*, Solid State Phenomena, 248, 227-234

kolokowanego (tj. punkty lub płaszczyzny działania odpowiednich elementów pomiarowych i wykonawczych są maksymalnie zbliżone do siebie) lub niekolokowanego (tj. punkty lub płaszczyzny działania odpowiednich elementów pomiarowych i wykonawczych są oddalone od siebie).

W przypadku zagwarantowanego dostępu do rzeczywistej konstrukcji mechanicznej lepszym podejściem do określenia modelu matematycznego jest przeprowadzenie eksperymentu identyfikacyjnego. Sytuacja ta znacząco się zmienia, gdy wyznaczany jest model dynamiki konstrukcji w odniesieniu do jeszcze nieistniejącej ale już projektowanej konstrukcji. Wówczas jednym możliwym rozwiązaniem jest wykorzystanie metody elementów skończonych i na bazie wyliczonych macierzy sztywności i bezwładności oraz przy założeniu odpowiednich warunków brzegowych można wyznaczyć poszukiwany model matematyczny. Niezależnie od wybranego podejścia, uzyskany model będzie modelem wysokiego rzędu i na potrzeby sterowania drganiami konstrukcji mechanicznej będzie wymagał redukcji. Opisane w literaturze metody redukcji rzędu modelu, z punktu widzenia projektowania układów sterowania drganiami, z jednej strony uproszczą proces projektowania prawa sterowania, z drugiej zaś spowodują, że zredukowany model badanej konstrukcji mechanicznej będzie scharakteryzowany pewną niepewnością modelu w postaci:

- braku informacji o poziomie tłumienia drgań przez poszczególne elementy rozważanej konstrukcji mechanicznej,
- posiadania w wyznaczonym zredukowanym modelu niedomodelowanych postaci drgań (ang. *Spillover effect*)¹⁰ przyczyniających się do ewentualnego destabilizowania układu sterowania.

Niepewności te spowodują pojawienie się dodatkowych problemów, które z punktu widzenia sterowania dynamiką konstrukcji mechanicznej wymagają także dodatkowej analizy:

- zdefiniowania optymalnej lub quasi-optymalnej lokalizacji elementów pomiarowych i wykonawczych na konstrukcji^{11,12} (szczególnie w odniesieniu do podatnych konstrukcji mechanicznych),
- zdefiniowania nowej górnej granicznej wartości pasma przenoszenia wynikającej z zastosowania elementów automatyki np. elementów piezoelektrycznych po stronie wykonawczej i pomiarowej oraz dedykowanych do nich wzmacniaczy napięcia lub wzmacniaczy ładunku¹³,
- poszukiwania wartości współczynnika tłumienia w poszczególnych elementach konstrukcji,
- w skrajnych przypadkach zastosowania wirtualnej re-kolokacji elementów pomiarowych i wykonawczych i ponownego przeprojektowania układu sterującego dynamiką całej konstrukcji mechanicznej¹⁴.

¹⁰ A. Preumont, (2013), *Twelve Lectures on Structural Dynamics*, Springer.

¹¹ A. Cavallo, et al., (2010), *Active Control of Flexible Structures, From Modelling to Implementation*, Springer.

¹² W. Gawroński, K.B. Lim, (1996), *Balanced Control of Flexible Structures*, Springer, London.

¹³ E.H. Maslen, G. Schweitzer, (2009), *Magnetic Bearings Theory, Design and Application to Rotating Machinery*, Springer Publisher, Dordrecht Heidelberg London

¹⁴ Z. Kulesza, (2015), *Virtual collocation method for a flexible rotor supported by active magnetic bearings*, Journal of Vibration and Control, Vol.21, No.8, 1522-1538.

Proces projektowania układów sterowania drganiami w sytuacji zagwarantowanego dostępu do rzeczywistej konstrukcji mechanicznej wymaga uwzględnienia tych problemów, które uwypukliły się w procesie identyfikacji eksperymentalnej obiektu. W wyniku zastosowania dekompozycji Hankela¹⁵ (ang. *Hankel Singular Value*) możliwe jest wyróżnienie, z punktu widzenia sterowania dynamiką konstrukcji mechanicznej, postaci mierzonych - sterowanych oraz mierzonych - niesterowanych. Wówczas odnosząc się do nich można, przy wykorzystaniu elementów piezoelektrycznych ulokowanych na konstrukcji, zaprojektować układ sterowania drganiami konstrukcji mechanicznej w zadanym zakresie częstotliwości.

W przykładowych pozycjach literaturowych, w których mamy dostęp do rzeczywistej konstrukcji^{16,17,18}, sterowanie drganiami realizowane jest z zastosowaniem klasycznych, optymalnych bądź odpornych regulatorów. W momencie rozważania podatnych konstrukcji mechanicznych z kolokowaną parą elementów pomiarowych i wykonawczych układ sterowania drganiami konstrukcji można zaprojektować z wykorzystaniem regulatorów od prędkości DVF (ang. *Direct Velocity Feedback*) lub od przemieszczenia (odkształcenia) PPF (ang. *Positive Position Feedback*). Wówczas, pożądaný efekt w postaci redukcji amplitudy drgań konstrukcji w określonym paśmie częstotliwości jest osiąganý, lecz proponowane rozwiązanie z punktu widzenia energetycznego jest wciąż rozwiązaniem wysokoenergetycznym.

Stąd też na potrzeby poprawy jakości układów sterowania i zaprojektowania niskoenergetycznych układów sterowania stwierdziłem, że należy w pierwszej kolejności określić optymalną lub quasi-optymalną lokalizację elementów pomiarowych i wykonawczych na konstrukcji, a następnie zaprojektować dla tego typu obiektu prawo sterowania.

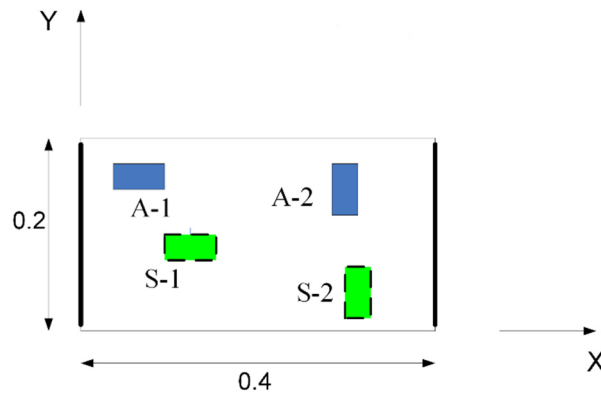
Te twierdzenie nadało moim dalszym działaniom naukowym nowy wymiar, którego efektem są badania przeprowadzone w odniesieniu do konstrukcji mechanicznej z ortogonalnie wyróżnionymi dwoma kierunkami drgań (2D) oraz z niekolokowanymi elementami piezoelektrycznymi. W odniesieniu do niej zainstalowałem w różnych płaszczyznach i miejscach na konstrukcji wstęgi piezoelektryczne tworząc w ten sposób, z punktu widzenia sterowania dynamiką, układ niekolokowany przedstawiony na Rys.1.

¹⁵ J.N. Juang, (1994), *Applied System Identification*. Prentice Hall, Inc., UK.

¹⁶ I. Postlethwaite, M.S. Tombs, (1987), *Truncated balance realization on the stable non-minimal state-space system*, International Journal of Control, 46, 1319-1330.

¹⁷ K. Ogata, (2002), *Modern Control Engineering*, Upper Saddle River : Prentice-Hall.

¹⁸ M. Sibiela, J. Kowal, W. Rączka, J. Konieczny, (2015), *Optimal control based on a modified quadratic performance index for systems disturbed by sinusoidal signals*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.46, 498-519.



Rys.1 Konstrukcja mechaniczna typu płytowego z niekolokowanymi elementami piezoelektrycznymi, w której A-1 i A-2 są elementami wykonawczymi, zaś S-1 i S-2 elementami pomiarowymi.

Proces modelowania dynamiki obiektu przedstawionego na Rys.1, w sytuacji braku dostępu do rzeczywistej konstrukcji mechanicznej, najczęściej realizowany jest z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Otrzymany w ten sposób model numeryczny projektowanej konstrukcji mechanicznej będzie opisywał zachodzącą relację pomiędzy wejściem a wyjściem układu w postaci *sila-przemieszczenie*. Proponowane podejście jest szczególnie istotne w przypadku, gdy projektowanymi konstrukcjami są kosztowane konstrukcje typu: podatne wały wirników, giętne układy giroskopowe, satelity, konstrukcje prętowe, a nawet wielkogabarytowe nowoczesne manipulatory przemysłowe. Wyliczone wówczas macierze sztywności i bezwładności projektowanej konstrukcji (podobnie jak ma to miejsce w przypadku układów kolokowanych) z wykorzystaniem metody elementów skończonych doprowadzą do wyznaczenia równania ruchu nietłumionej konstrukcji mechanicznej, a w dalszej kolejności, do rozwiązania problemu własnego i uzyskaniu w ten sposób parametrów modalnych w postaci częstotliwości i postaci drgań własnych projektowanej konstrukcji.

Model numeryczny projektowanej konstrukcji jest modelem bardzo wysokiego rzędu ze względu na rozpatrywanie w nim dużej ilości współrzędnych uogólnionych opisujących jej ruch. W wyniku zastosowania metody elementów skończonych, zadanie projektowania prawa sterowania w tak szerokim zakresie częstotliwości jest niezwykle trudnym przedsięwzięciem i z punktu widzenia realizacji sprzętowej praktycznie niewykonalnym. Aby poprawnie zaprojektować układ sterowania drganiami, uzyskany model matematyczny konstrukcji należy zredukować w oparciu o znane z literatury metody redukcji^{5,19}. W większości podejść inżynierskich podstawą przeprowadzonego procesu redukcji rzędu modelu konstrukcji mechanicznej jest analiza porównawcza otrzymanych charakterystyk amplitudowych. Określając wówczas zbieżność pomiędzy modelem zredukowanego rzędu a modelem estymowanym w określonym zakresie częstotliwości można wyznaczyć, z punktu widzenia

¹⁹ A. Quarteroni, R. Sacco, F. Saleri, (2007), *Numerical Mathematics, Approximation of Eigenvalues and Eigenvectors*, Part II, Springer, New York.

sterowania drganiami, najistotniejsze jej parametry i uzyskać w ten sposób model bazowy wykorzystywany w procesie projektowania prawa sterowania.

Wyznaczenie zredukowanego modelu konstrukcji dwuwymiarowej z niekolokowanymi wstępami piezoelektrycznymi szeroko przebadalem i opisałem w pracy [A.5]. Na potrzeby zaprojektowania niskoenergetycznego układu sterownia drganiami konstrukcji mechanicznej należało w pierwszej kolejności wyznaczyć optymalną lokalizację elementów pomiarowych i wykonawczych na konstrukcji. Zadanie to mogłem zrealizować z zastosowaniem metody związanej z wyznaczeniem Gramianu²⁰, jednakże z punktu widzenia konstrukcji będącej na etapie projektowania, lepszym rozwiązaniem było **zastosowanie autorskiego podejścia** bazującego na modelu numerycznym. W tym celu należało wyznaczyć wartości wskaźników jakości modalnych sił sterujących oraz modalnych odkształceń przy uwzględnieniu różnych lokalizacji i orientacji piezoelektrycznych elementów pomiarowych i wykonawczych oraz podziale postaci drgań na sterowane i niesterowane. W wyniku tak przyjętego kryterium, oba wskaźniki jakości zdefiniowałem w następujący sposób:

$$J_{F_odd} = \sum_{n=1}^{n=cm_odd} |F_X| - \sum_{m=1}^{m=ucm_even} |F_X| \quad (1)$$

$$J_{F_even} = \sum_{n=1}^{n=cm_even} |F_Y| - \sum_{m=1}^{m=ucm_odd} |F_Y| \quad (2)$$

$$J_{\varepsilon_odd} = \sum_{n=1}^{n=cm_odd} |\varepsilon_X| - \sum_{m=1}^{m=ucm_even} |\varepsilon_X| \quad (3)$$

$$J_{\varepsilon_even} = \sum_{n=1}^{n=cm_even} |\varepsilon_Y| - \sum_{m=1}^{m=ucm_odd} |\varepsilon_Y| \quad (4)$$

gdzie:

n - postaci drgań sterowane,

m - postaci drgań niesterowane,

cm_odd – liczba sterowanych nieparzystych postaci drgań,

ucm_even - liczba niesterowanych parzystych postaci drgań,

cm_even – liczba sterowanych parzystych postaci drgań,

ucm_odd - liczba niesterowanych nieparzystych postaci drgań,

ε_X – odkształcenie piezoelektrycznego elementu pomiarowego w kierunku wzdłużnym,

ε_Y – odkształcenie piezoelektrycznego elementu pomiarowego w kierunku poprzecznym,

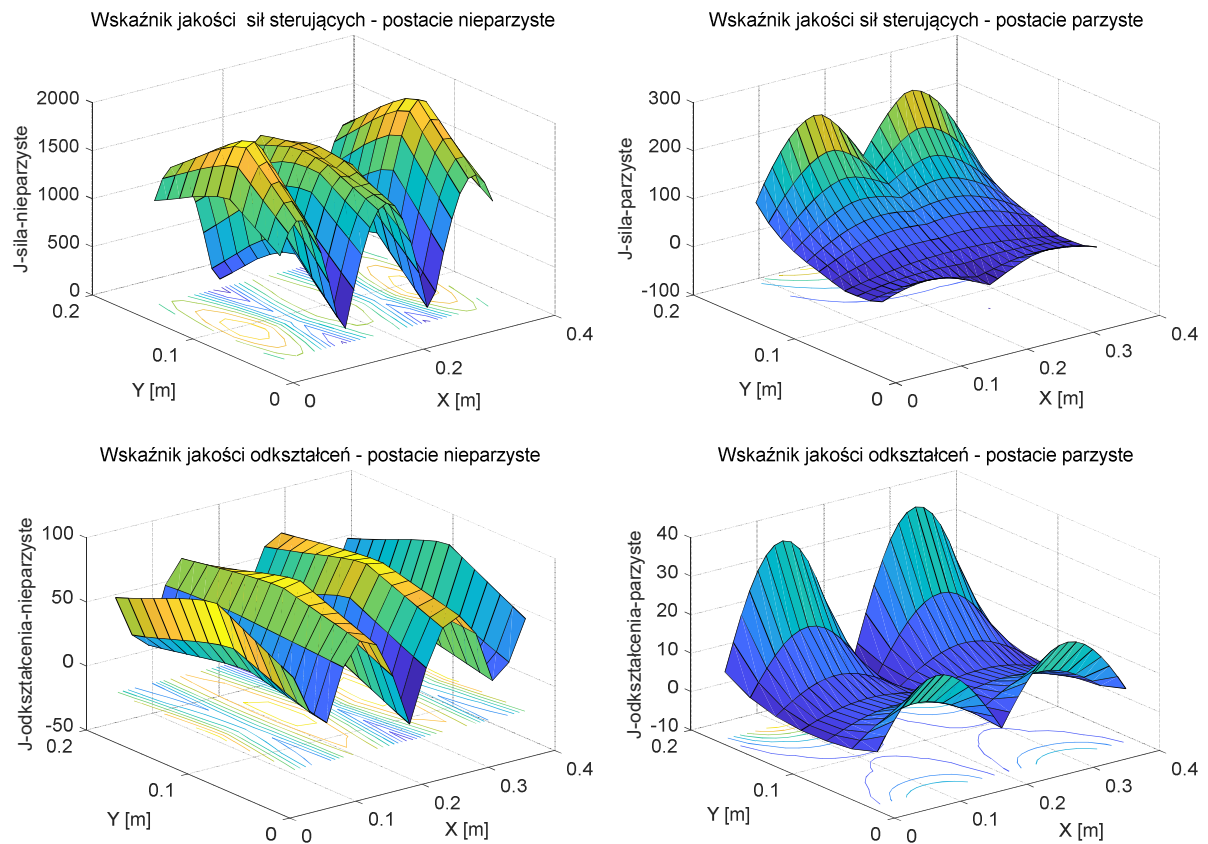
F_X – siła sterująca generowana przez piezoelektryczny element wykonawczy w kierunku wzdłużnym,

F_Y – siła sterująca generowana przez piezoelektryczny element wykonawczy w kierunku poprzecznym.

Wartości poszczególnych wskaźników jakości, zmieniające się wraz ze zmianą lokalizacji i orientacji poszczególnych piezoelementów na konstrukcji, zobrazowałem w postaci wykresów przedstawionych na Rys.2. Przeprowadzona analiza otrzymanych wskaźników jakości dla modalnych sił sterujących i modalnych odkształceń pod kątem uzyskiwania maksymalnych wartości pozwoliła na wskazanie optymalnego ich rozmieszczenia na konstrukcji. Te lokalizacje, są lokalizacjami quasi-optymalnymi pozwalającymi na rozpoczęcie

²⁰ A.M Sadri, J.R. Wright R.J. Wayne,(1991), Smart Material Structures, 8,521

projektowania niskoenergetycznego układu sterowania wpływającego na drgania konstrukcji a tym samym na jego dynamikę.



Rys.2. Wskaźniki jakości dla sił sterujących i odkształceń wyznaczone dla różnych orientacji piezogeneratora lub piezo-sensora na konstrukcji.

Przeprowadzona analiza modalna rozważanej konstrukcji mechanicznej wraz z wyliczonymi modalnymi wartościami sił sterujących generowanymi przez element wykonawczy i modalnymi odkształceniami otrzymanymi z elementu pomiarowego w rozpatrywanym zakresie częstotliwości została zweryfikowana badaniami eksperymentalnymi na rzeczywistej aktywnej konstrukcji mechanicznej. W nawiązaniu do otrzymanych wyników badań numerycznych, na potrzeby przetestowania układu sterowania dynamiką konstrukcji, oba rodzaje elementów piezoelektrycznych umieściłem na konstrukcji w wyznaczonych lokalizacjach i orientacjach.

Na potrzeby weryfikacji opracowywanej metody przeprowadziłem procedurę identyfikacji eksperymentalnej. Proces identyfikacyjny rozważanej konstrukcji mechanicznej (z wyróżnionymi ortogonalnie dwoma kierunkami drgań) przeprowadziłem niezależnie od rodzaju rozpatrywanych postaci drgań (nieparzyste, parzyste). W pierwszym etapie procedury identyfikacyjnej dobrałem rząd modelu estymowanego w taki sposób, by zbieżność charakterystyki amplitudowej modelu obiektu oraz charakterystyki częstotliwościowej obiektu w danym zakresie częstotliwości była jak największa. Rezultatem tych działań był transmitancyjny model matematyczny badanej konstrukcji mechanicznej, który niestety

charakteryzował się zbyt dużą liczbą biegunów i zer. Dlatego dalej na potrzeby sterowania drganiami konstrukcji, rząd modelu estymowanego zredukowałem z wykorzystaniem metody zrównoważonej realizacji modelu (ang. *balanced order reduction*)²¹. Otrzymane modele z punktu widzenia realizacji sprzętowej były wciąż zbyt wysokiego rzędu. W związku z tym w kolejnym etapie badań otrzymane modele poddałem dalszej redukcji rzędu, tak by rząd zredukowanego modelu nawiązywał do teorii podatnych konstrukcji mechanicznych. W wyniku zastosowania tej procedury, wyznaczyłem parametry modalne konstrukcji opisujące jej drgania względem rozpatrywanych oddzielnie postaci nieparzystych i parzystych w określonym paśmie częstotliwości. Na ich podstawie wyznaczyłem ostateczny model matematyczny konstrukcji.

Wyniki badań identyfikacyjnych przeprowadzonych w odniesieniu do konstrukcji dwuwymiarowej z niekolokowanymi elementami piezoelektrycznymi pozwoliły rozprząc dwuwymiarowy układ na podukłady jednowymiarowe. Tym samym otrzymane wyniki umożliwiły projektowanie układu sterowania drganiami metodami częstotliwościowymi na przykład przy wykorzystaniu metody linii pierwiastkowych. Spostrzeżenia z przeprowadzonych badań spowodowały, że w następnym etapie badań postanowiłem **opracować pełną metodę modelowania dynamiki jeszcze nieistniejących konstrukcji mechanicznych i projektowania dla nich niskoenergetycznych układów sterowania.**

Model matematyczny projektowanej dwuwymiarowej konstrukcji mechanicznej, jak już wspomniałem, na ogół wyznaczany jest z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Stosowana w tym zakresie metoda powoduje, w stosunku do rzeczywistych obiektów, minimalne zniekształcenia charakterystyki amplitudowej w zakresie niskich częstotliwości oraz zasadnicze zniekształcenia w zakresie wysokich częstotliwości.

Wiadomym jest, że pasmo częstotliwości projektowanej konstrukcji zostaje mocno ograniczone w wyniku wprowadzenia do rzeczywistego układu piezoelektrycznych elementów pomiarowych i wykonawczych jak również dedykowanych do nich odpowiednich wzmacniaczy napięcia lub ładunku. To sprawia, że wysokoczęstotliwościowe postacie drgań zostają mocno wytłumione i w dalszym etapie badań nie będą one brane pod uwagę. W rezultacie, po przeanalizowaniu wszystkich zakresów pasm przenoszenia częstotliwości stwierdziłem, że uzyskany model numeryczny może być modelem wystarczającym jedynie w pierwszej fazie projektowania układów sterowania.

W związku z tym na potrzeby projektowania niskoenergetycznego układu sterowania drganiami postanowiłem nietłumiony model numeryczny projektowanej konstrukcji wyrazić za pomocą modelu składającego się z członów oscylacyjnych nietłumionych. Wówczas, z punktu widzenia modelowania matematycznego, tego typu modele obiektów będą opisane biegunami i zerami transmitancji zlokalizowanymi na osi urojonej płaszczyzny zespolonej a ich charakterystyka fazowa będzie wahać się w przedziale $\langle -180^\circ, 0^\circ \rangle$. W rezultacie,

²¹ T. Penzl, Lyapack, (1999), *A Matlab Toolbox for Large Lyapunov and Riccati Equations, Model Reduction Problems, and Linear-quadratic Optimal Control Problems.*

wzmocnienie regulatora proporcjonalnego projektowanego dla konstrukcji zawierających kolokowane pary elementów pomiarowych i wykonawczych, będzie mogło teoretycznie osiągnąć wartość nieskończoną.

Powyżej wspomniany przypadek konstrukcji z kolokowaną parą piezoelektrycznych elementów pomiarowych i wykonawczych ukazał jedynie charakter projektowanego układu sterowania i stał się podstawą do dalszej analizy układów niekolokowanych. W ich przypadku element pomiarowy i wykonawczy może znaleźć się po przeciwnych stronach węzła określonej postaci drgań. Wówczas residuum modelu obiektu mechanicznego w odniesieniu do rozważanej postaci drgań może zmienić swój znak na ujemny, a projektowany dla niej układ sterowania może spowodować destabilizację. Wyszczególnione zjawisko jest szczególnie niebezpieczne w odniesieniu do układów lekko tłumionych, w których wspomniany już wpływ pominiętych postaci drgań w modelu obiektu (ang. *Spillover effect*) może także doprowadzać do destabilizacji całego układu sterowania. **W związku z tym, według mojej oceny, wskazane jest by residua układu otwartego osiągały możliwie największe wartości dodatnie.**

Elementy pomiarowe, a szczególnie elementy wykonawcze mają, jak już wspomniałem, ograniczone częstotliwościowe pasmo przenoszenia. Dlatego też w celu zaprojektowania prawidłowego układu sterowania dynamiką konstrukcji uwzględniłem dynamikę wszystkich elementów oraz ograniczyłem zakres częstotliwościowy obiektu w taki sposób, by poprzez odpowiednią filtrację sygnałów pomiarowych uzyskać jak najmniejsze wartości wzmocnienia krytycznego pętli sprzężenia zwrotnego. Na bazie tych rozważań stwierdziłem, że istotną rolę w tym zakresie powinien odgrywać wybór metody redukcji rzędu modeli matematycznych rozważanych konstrukcji mechanicznych, dla której wyliczona suma residuów modelu stanie się wskaźnikiem wyboruiskoenergetycznego układu sterowania.

Dodatkowo stwierdziłem, że przy projektowaniu układów sterowania drganiami i dynamiką konstrukcji mechanicznej, analiza sumy residuów układu otwartego będzie decydować o działaniach związanych z:

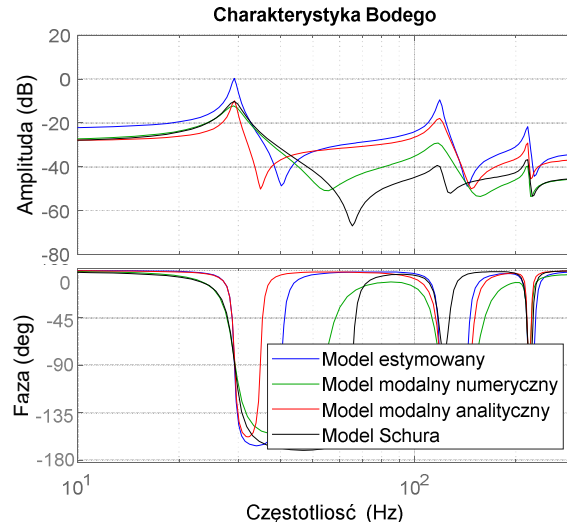
- analizowaniem niezmienności biegunów oraz analizowaniem przebiegu zredukowanej charakterystyki częstotliwościowej zbliżonej do charakterystyki rzeczywistego obiektu,
- projektowaniem układów sterowania dla konstrukcji o wyróżnionych dwóch kierunkach sterowania (2D). *Analiza residuów pozwoli na zbudowanie dwóch niezależnych podukładów sterowania co spowoduje zmniejszenie obciążenia mikroprocesorów jako sterowników.*
- wyznaczeniem odpowiedniej metody redukcji rzędu modelu, która zapewni odpowiedni poziom tłumienia drgań w zakresie niskich częstotliwości, a jednocześnie zaprojektowane prawo sterowania nie zdestabilizuje układu zamkniętego. *Analiza residuów pozwoli na zaproponowanie odpowiedniego filtra sterującego.*

Powyższe zagadnienia są opisane w pracy [A.2]. Zgodnie z przyjętymi założeniami sprawdziłem jaki wpływ na uzyskiwaną sumę residuów ma wybór metody ortogonalizacyjnej. W tym celu do badań wykorzystałem trzy najczęściej stosowane w teorii drgań metody ortogonalizacyjne: modalną analityczną, modalną numeryczną, dekompozycję Schura,

a uzyskane w ten sposób modele opisywały drgania poprzeczne konstrukcji 2D w określonym paśmie częstotliwości. Wspomniane badania przeprowadziłem w oparciu o wcześniej wyprowadzone modele matematyczne konstrukcji płytowej z uwzględnieniem podziału na postaci drgań nieparzyste lub parzyste [A.5].

Punktem wyjścia było wyznaczenie modelu modalnego analitycznego, który opisywał jedynie nieparzyste drgania konstrukcji. Biorąc pod uwagę określone w pracy [A.5] rozmieszczenie elementów pomiarowych i wykonawczych na konstrukcji, w odniesieniu do rozważanych postaci drgań, obliczyłem modalne wartości momentów gnących generowanych przez piezoelementy wykonawcze oraz modalne wartości odkształceń piezoelektrycznego elementu pomiarowego. Uzyskane wartości stały się podstawą do wyznaczenia modelu matematycznego konstrukcji w przestrzeni stanu opisującego drgania w określonym paśmie częstotliwości. Otrzymany model, na potrzeby opracowania metody modelowania dynamiki konstrukcji, przekształciłem do modelu transmitancyjnego opisującego relację *przemieszczenie-napięcie* a, następnie do postaci umożliwiającej wyliczenie sumy residuów układu otwartego. W kolejnym kroku, badania symulacyjne powtórzyłem w odniesieniu do modelu modalnego numerycznego. Na potrzeby wyprowadzenia tego typu modelu matematycznego rozważanej konstrukcji, macierz stanu modelu obiektu określiłem na podstawie wyznaczonych wcześniej modalnych wartości macierzy sztywności bezwładności i tłumień, natomiast macierze wejść i wyjść na podstawie wyznaczonych wektorów postaci drgań własnych oraz odpowiadającym im wyliczonych modalnych momentów gnących i modalnych odkształceń. Uzyskany model ponownie przekształciłem do postaci transmitancyjnej, a następnie do postaci ułatwiającej wyliczenie sumy residuów układu otwartego.

Ostatnią rozważaną w pracy [A.2] metodą ortogonalizacyjną na potrzeby opracowania metody modelowania dynamiki konstrukcji mechanicznych była dekompozycja Schura. Model matematyczny rozważanej konstrukcji w określonym paśmie częstotliwości wyprowadziłem w podobny sposób jak miało to miejsce w przypadku rozważanej metody modalnej numerycznej. W tym celu dokonałem dekompozycji macierzy stanu modelu obiektu na dwie macierze reprezentujące odpowiednio macierz ortogonalną i macierz trójkątną, natomiast pozostałe macierze wejść i wyjść pozostawiłem niezmodyfikowane. W rezultacie wyprowadzony zredukowany model matematyczny rozważanej konstrukcji mechanicznej, na potrzeby opracowywanej metody, został finalnie przekształcony do postaci umożliwiającej wyliczenie sumy residuów układu otwartego.



Rys. 3. Zestawienie charakterystyk amplitudowych zredukowanych modeli uzyskanymi metodami ortogonalizacyjnymi i modelu estymowanego w rozważanym zakresie częstotliwości

Otrzymane zredukowane modele aktywnej konstrukcji dwuwymiarowej porównałem z modelem estymowanym uzyskanym na etapie procedury identyfikacyjnej. Na podstawie wykreślonych charakterystyk amplitudowych poszczególnych modeli zredukowanego rzędu przedstawionych na Rys.3 stwierdziłem, zgodnie z przewidywaniami, niezmiennosc częstotliwości rezonansowych ($f_1=29,2$ Hz, $f_3=119,1$ Hz, $f_5=217,2$ Hz) niezależnie od wyboru metody redukcji modelu oraz zmienność częstotliwości antyrezonansowych. Uzyskanie efektu przeplatania częstotliwości rezonansowych konstrukcji reprezentowanych przez bieguny modelu transmitancyjnego obiektu i częstotliwości antyrezonansowych reprezentowanych przez zera modelu obiektu dodatkowo utwierdziło mnie w przekonaniu, że za pomocą regulatora proporcjonalnego mogę sterować drganiami konstrukcji w określonym przez liczbę rozważanych postaci drgań zakresie częstotliwości.

Duża zbieżność pomiędzy poszczególnymi charakterystykami amplitudowymi i fazowymi rozważanych modeli zredukowanego rzędu a charakterystyką modelu estymowanego sprawiła, że układy sterowania drganiami mogłem zaprojektować w odniesieniu do poszczególnych ortogonalizacyjnych modeli na podstawie metody linii pierwiastkowych. Otrzymane w wyniku symulacji wartości krytyczne wzmocnienia pętli sprzężenia zwrotnego przyrównane do wartości wzmocnienia granicznego wyliczonego w odniesieniu do modelu estymowanego (Tab.1) wykazały przydatność stosowania poszczególnych metod ortogonalizacyjnych.

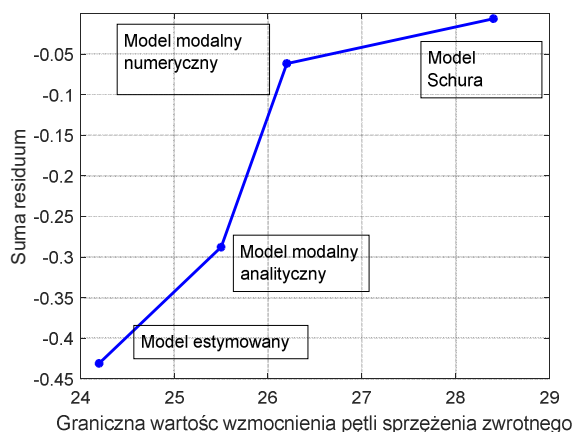
Tab.1 Wartości częstotliwości antyrezonansowych, wzmocnienia pętli sprzężenia zwrotnego oraz sumy residuów układu otwartego uzyskane w odniesieniu do rozważanych modeli zredukowanego rzędu

Model ortogonalizacyjny/ Model estymowany/	I częstotliwość antyrezonansowa [Hz]	III częstotliwość antyrezonansowa [Hz]	V częstotliwość antyrezonansowa [Hz]	Graniczne wzmocnienie	Suma residuów
				k_{kr}	Σ
Model	40.3	143	272.0	24.28	-0.4308

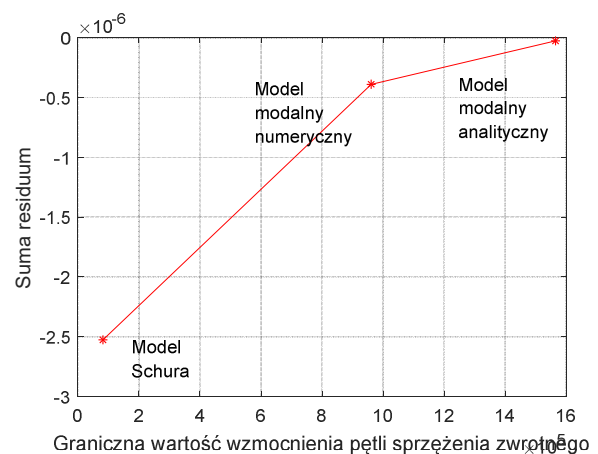
Estymowany					
Model modalny Analityczny	53.9	157	221.6	25.51	-0.2877
Model modalny Numeryczny	34.9	147	221.4	26.27	-0.0616
Model Schur'a	65.4	128	223.7	28.27	-0.0063

Wybór metody ortogonalizacyjnej został określony na podstawie wyliczeń wartości sumy residuów dla poszczególnych modeli zredukowanego rzędu i porównanie ich z wartością sumy residuów modelu estymowanego. W wyniku analizy wykresów przedstawionych na Rys.4a wykazałem, że wyliczona suma residuów modelu modalnego analitycznego jest najbardziej zbliżona do wartości sumy residuów modelu estymowanego (wartość referencyjna). Tym samym, wykazałem, że wyliczona suma residuów układu otwartego w odniesieniu do konstrukcji dwuwymiarowych (płyta prostokątna) może być wskaźnikiem wyboru metody ortogonalizacyjnej mającej bezpośredni wpływ na projektowany regulator proporcjonalny. Biorąc pod uwagę uzyskane krytyczne wartości wzmocnień pętli sprzężenia zwrotnego oraz wyliczone sumy residuów postanowiłem symulacyjnie sprawdzić poprawność działania opracowywanej metody w odniesieniu do układów lekko tłumionych. Na podstawie uzyskanych wyników badań przedstawionych na Rys.4b stwierdziłem, że proponowany przeze mnie wskaźnik wyboru metody redukcji modelu spełnia swoją rolę także w odniesieniu do konstrukcji mechanicznych lekko tłumionych. Wynikiem tego są wyliczone wartości sum residuów układu otwartego bliskie wartości zera traktowanej, w tym przypadku, jako wartości referencyjnej. Podsumowując tą część badań stwierdziłem, że najlepszym podejściem do uzyskania modelu matematycznego opisującego dynamikę rzeczywistej konstrukcji jest metoda modalna analityczna, a w przypadku dużych trudności obliczeniowych - metoda modalna numeryczna.

a)



b)



Rys.4. Porównanie wartości wyliczonych sum residuów modeli zredukowanego rzędu w odniesieniu do wyliczonej granicznej wartości wzmocnienia pętli sprzężenia zwrotnego a) w układzie niekolokowanym tłumionym, b) w układzie niekolokowanym lekko tłumionym.

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych opisanych w pracy [A.2] stwierdziłem, że wyliczona suma residuów modelu układu otwartego może być wskaźnikiem wyboru metody ortogonalizacyjnej. Na potrzeby testowania opracowanej metody skorzystałem z dostępnego na stanowisku laboratoryjnym procesora czasu rzeczywistego *Dspace*. Otrzymane wówczas eksperymentalne charakterystyki częstotliwościowe układu sterowania zarejestrowane podczas pomiarów poprawnie zweryfikowały wyniki badań symulacyjnych.

Reasumując, istotnym osiągnięciem naukowym w zakresie aktywnego sterowania drganiami konstrukcji mechanicznych było opracowanie nowej metody modelowania dynamiki podatnych jeszcze nieistniejących konstrukcji mechanicznych zawierających elementy piezoelektryczne. Na podstawie analizy sumy residuów układu otwartego stwierdziłem, że możliwe jest zaprojektowanie aktywnego niskoenergetycznego układu sterowania drganiami już na etapie projektowania konstrukcji.

Przeprowadzone badania symulacyjne i eksperymentalne wykazały poprawność przyjętych założeń i rozważań analitycznych. Tym samym warto podkreślić, że proponowana metoda może być użyteczna w szczególności do projektowania kosztochłonnych obiektów mechanicznych.

Kolejna publikacja [A.6] stanowi kontynuację badań związanych z aktywnym sterowaniem drganiami. Wspólnie z dr hab. inż. Arkadiuszem Mystkowskim zaprojektowaliśmy zaawansowany optymalny regulator odporny typu μ -synthesis do sterowania drganiami konstrukcji z dwoma wyróżnionymi kierunkami drgań. Zastosowany w badaniach regulator μ stanowi rozszerzenie regulatora H_∞ , który poprzez strukturalną wartość osobliwą układu SSV (ang. *Structured Singular Value*) pozwala określić warunki odpornej stabilności układu z niepewnością strukturalną.

We wspomnianej pracy, obiektem mechanicznym poddanym sterowaniu była przestrzenna konstrukcja prętowa z dwoma aktywnymi prętami (wbudowane piezo-stosy) zlokalizowanymi w quasi-optymalnym położeniu z punktu widzenia sterowania drganiami konstrukcji w określonym paśmie częstotliwości. Na podstawie badań numerycznych i identyfikacyjnych opisanych w pracy [Zał.3 II.A.1] stwierdziłem, że drgania całej konstrukcji mechanicznej całkowicie wyeliminuje w przypadku zaprojektowania układu sterowania drganiami w odniesieniu tylko i wyłącznie do wybranych podukładów sterowania. W rezultacie, rozważany wstępnie wielowymiarowy układ o dwóch wejściach i dwóch wyjściach (ang. *Two Input Two Output*) uprościłem do dwóch układów o jednym wejściu i jednym wyjściu. W dalszym etapie badań postanowiłem zaprojektować i przetestować układ sterowania dynamiką konstrukcji mechanicznej w odniesieniu do jednego z podukładów, w którym płaszczyzna sterowania i pomiaru pokrywały się ze sobą. Model matematyczny wybranego podukładu opisałem w pracy [Zał.3 II.A.1].

Na potrzeby projektowania regulatora μ -synthesis wyznaczyłem nominalny model obiektu sterowania oraz model niepewności całej konstrukcji. W danej konstrukcji model elementu wykonawczego – piezo stosu stanowił wspomnianą wyżej niepewność. Zgodnie z przyjętymi założeniami, dr hab. inż. Arkadiusz Mystkowski przeprowadził szereg badań symulacyjnych w środowisku Matlab, mających na celu opracowanie układu sterowania drganiami rozważanej konstrukcji mechanicznej. Dokonana przeze mnie analiza otrzymanych charakterystyk częstotliwościowych układu zamkniętego wykazała najwyższą możliwą wartość osobliwą układu, która bezpośrednio wpływała na uzyskanie największej odporności układu zamkniętego na pojawiające się w nim zakłócenia.

Otrzymane wyniki badań symulacyjnych zweryfikowałem na zbudowanym przez siebie stanowisku laboratoryjnym. Badania eksperymentalne układu zamkniętego przeprowadziłem w dziedzinie czasu i częstotliwości w zakresie obejmującym rozważane w modelu obiektu częstotliwości rezonansowe układu. W tym celu, zaprojektowałem autorski układ sterowania w środowisku Simulink, a następnie z wykorzystaniem wbudowanego do procesora czasu rzeczywistego *Dspace* kodera kodu C wygenerowałem odpowiedni kod sterujący. Realizacja sprzętowa zaprojektowanego regulatora pozwoliła na przeprowadzenie badań testowych. Otrzymane charakterystyki czasowe i częstotliwościowe poprawnie zweryfikowały działanie aktywnego układu sterowania drganiami, zrealizowanego w oparciu o optymalny zaawansowany regulator μ -Synthesis.

Reasumując, przeprowadzając badania symulacyjne i eksperymentalne wykazałem, że przy odpowiednim rozprężeniu układu wielowymiarowego można uprościć proces projektowania zaawansowanego regulatora odpornego a tym samym uzyskać pożądany niskoenergetyczny układ sterowania dynamiką całej konstrukcji mechanicznej.

Rozwój technologii materiałowej sprawił również, że drgania powstających nowoczesnych inteligentnych konstrukcji mechanicznych stały się źródłem zasilania niskoenergetycznych elementów pomiarowych a tym samym źródłem informacji o jej stanie technicznym. Tym samym w obu przypadkach (tj. przy projektowaniu niskoenergetycznego aktywnego układu sterowania drganiami oraz przy dostarczaniu określonej ilości energii niezbędnej do zasilania dodatkowego elementu monitorującego drgania konstrukcji) niezwykle istotnym elementem wpływającym na osiągnięcie zamierzonego celu jest prawidłowe ułożenie elementów pomiarowych na konstrukcji. Z literatury poświęconej pozyskiwaniu energii z drgań wiadomym jest, że istnieje co najmniej pięć metod, które umożliwiają pozyskanie energii elektrycznej z otoczenia. Jedną z metod jest technika konwersji energii oparta o materiały

elektrostatyczne^{22,23}, drugą – poprzez wykorzystanie elementów elektromagnetycznych²⁴, trzecią – poprzez użycie materiałów magnetostrykcyjnych^{25,26}, czwartą zaś – z wykorzystaniem materiałów piezoelektrycznych²⁷. Odrębną techniką konwersji energii mechanicznej w elektryczną jest zastosowanie metod hybrydowych, które są także szeroko analizowane przez część badaczy. Pomimo istnienia tak szerokiego wachlarza możliwości zamiany energii mechanicznej w elektryczną, technika odzyskiwania energii oparta o efekty piezoelektryczne jest wciąż najczęściej używaną metodą w wielu zastosowaniach praktycznych.

Biorąc pod uwagę ten fakt, postanowiłem przeprowadzić badania naukowe mające na celu poszerzenie zakresu odzyskiwania energii mechanicznej z układów mechanicznych jednowymiarowych oraz dwuwymiarowych. Punktem wyjścia w obu przypadkach było wyznaczenie parametrów elektrycznych i mechanicznych, a następnie opracowanie układu elektromechanicznego generującego jak największą ilość odzyskiwanej energii z drgań.

Metoda wyznaczania parametrów mechanicznych i elektrycznych generatora piezoelektrycznego o dowolnym kształcie pracującego na potrzeby odzyskiwania energii z drgań została przedstawiona w pracy [A.4]. Przyjęta przeze mnie koncepcja badań zakładała uzyskanie modelu transmitancyjnego piezo-wstęgi w części mechanicznej na bazie znanych parametrów mechanicznych, a następnie wyznaczenie pozostałych parametrów układu na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych.

Biorąc pod uwagę właściwości elektromechaniczne czujnika piezoelektrycznego postanowiłem model wstęgi piezoelektrycznej przedstawić w postaci członu oscylacyjnego tłumionego. Uzyskana ten sposób transmitancja operatorowa piezoelektrycznego czujnika opisywała zachodzącą relację *odkształcenie wstęgi - przyłożona siła*. Pozostałe parametry układu elektromechanicznego oszacowałem na podstawie badań laboratoryjnych. W tym celu, przy współudziale Pawła Grzesia, przeprowadziłem szereg doświadczeń eksperymentalnych na stanowisku badawczym z wykorzystaniem wzbudnika drgań i aparatury pomiarowej. Podczas ich wykonywania za główny cel obrałem rejestrowanie wartości napięcia elektrycznego i natężenia prądu elektrycznego płynącego w układzie przy jednoczesnym obciążaniu układu rezystancją o zmiennej wartości. W wyniku tak przeprowadzonych badań, obliczyłem moc wyjściową układu i wskazałem wartość rezystancji, przy której układ generuje możliwie największą ilość energii z drgań układu mechanicznego.

²² Y. Chiu, V.S.G. Tseng, (2008), *A capacitive vibration-to-electricity energy converter with integrated mechanical switches*, J. Micromech. Microeng., Vol. 18, 104004

²³ C.H. Lee, Y.M. Lim, B. Yang, (2009), *Theoretical comparison of the energy harvesting capability among various electrostatic mechanisms from structure aspect*. Sens. Actuator A, Vol.156, pp.208–216.

²⁴ S. Naifar, S. Bradai, C. Viehweger, O. Kanoun, (2015), *Response analysis of a nonlinear magnetoelectric energy harvester under harmonic excitation*, European Physical Journal Special Topics, Vol.224, 2879–2908.

²⁵ L. Wang, F.G. Yuan, (2008), *Vibration energy harvesting by magnetostrictive material*, Smart Material Structures, Vol.17, 045009.

²⁶ J. Kaleta, D. Lewandowski, R. P. Mech, P. Wiewiórski, (2014), *Energy harvester based on Terfenol-D for low power devices*, Interdisciplinary Journal of Engineering Sciences, Vol. II, No.1

²⁷ P. Harris, M. Araffa, G. Litak, J. Iwaniec, C.R. Bowen, (2017), *Output response identification in a multistable system for piezoelectric energy harvesting*, European Physical Journal B, Vol. 90:20, pp.1-11.

Uzyskanie tej wartości stanowiło kluczowy etap badań. Na podstawie tak wyznaczonej rezystancji możliwe stało się z uwzględnieniem współczynnika sprzężenia elektromechanicznego, wyznaczenie pozostałych parametrów elektrycznych układu w postaci wartości indukcyjności cewki elektrycznej oraz wartości pojemności elektrycznej kondensatora.

Na potrzeby dalszych badań sprawdziłem poprawność opracowanej **autorskiej metody wyznaczania parametrów**, w odniesieniu do układu zawierającego dodatkową masę zlokalizowaną w okolicy swobodnego końca elementu piezoelektrycznego. Otrzymane wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych ukazały wpływ dodatkowej masy na uzyskiwane wartości częstotliwości własne elementu piezoelektrycznego jak również brak znaczącego wpływu na wartość wyznaczanych parametrów układu elektromechanicznego. Ostatecznie na podstawie przeprowadzonych badań stwierdziłem, że proponowana metoda może być użyteczna do wyznaczania elektromechanicznych parametrów dowolnego elementu piezoelektrycznego pracującego na potrzeby odzyskiwania energii z drgań konstrukcji mechanicznych.

Reasumując, istotnym osiągnięciem badawczym w zakresie odzyskiwania energii z drgań było opracowanie metody wyznaczania elektromechanicznych parametrów piezoczuwnika przy nieznanach jego wymiarach geometrycznych. Przeprowadzone badania wykazały, że znajomość wybranych parametrów mechanicznych badanego czujnika wraz ze znajomością wartości współczynnika sprzężenia elektromechanicznego może przyczynić się do wyznaczenia pozostałych parametrów elektrycznych czujnika na podstawie eksperymentalnego wyznaczania wartości natężenia prądu elektrycznego i napięcia elektrycznego. Tym samym wykazałem, że znając metodę wyznaczania parametrów elektromechanicznych piezoelektrycznego czujnika mogę dopasować jego charakterystykę częstotliwościową do charakterystyki pracy konstrukcji, z którą będzie zintegrowany.

Proces wyznaczania parametrów piezoelektrycznego czujnika zintegrowanego z rzeczywistą konstrukcją mechaniczną opisałem w pracy [A.3]. Obiektem badań, na którym umieszczono wstęgę piezoelektryczną pracującą na potrzeby odzyskiwania energii z drgań było ramię wielowirnikowego obiektu latającego. Wybór badanej konstrukcji związany był z przeanalizowaniem możliwości energetycznych układu na potrzeby zasilania niskoenergetycznych czujników pomiarowych dodatkowo zlokalizowanych na platformie bezpilotowego obiektu latającego. W celu zbadania efektywności **proponowanego autorskiego układu** rozważyłem następujące zagadnienia:

- określiłem optymalną lokalizację elementu piezoelektrycznego na konstrukcji celem uzyskiwania jak największej ilości energii z drgań konstrukcji mechanicznej,
- oszacowałem wartość wypełnienia impulsu sygnału PWM sterującego pracą silnika, tak by powstające drgania konstrukcji generowały przyrost napięcia przed układem kondycjonującym,

- określiłem wartość obciążenia rezystancyjnego dołączonego do układu kondycjonującego, by otrzymana wartość natężenia prądu elektrycznego była niezmienna w czasie.

Punktem wyjścia do badań było wyprowadzenie modelu elektromechanicznego układu *czujnik-ramię obiektu wielowirnikowego* na podstawie podejścia analitycznego. W tym celu, w pierwszej kolejności, wyprowadziłem równania opisujące drgania poprzeczne konstrukcji mechanicznej, wyliczyłem częstotliwości i postacie drgań własnych, a następnie na podstawie przekształceń równań opisujących zjawiska elektryczne wyznaczyłem równanie pozwalające określić wartość wygenerowanego napięcia z układu. Wspomniane wyliczenia przeprowadziłem przy różnych wartościach częstotliwości pobudzenia wynikających z wypełnienia impulsu sygnału PWM podawanego na układ napędowy obiektu wielowirnikowego.

Wspomniana szerokość wypełnienia impulsu sygnału PWM bezpośrednio wpływa na wartość generowanej siły ciągu, a pośrednio na generowane drgania konstrukcji mechanicznej. Uwzględniając ten fakt, postanowiłem na potrzeby dalszych badań, określić zakres częstotliwości pracy nowoprojektowanej konstrukcji mechanicznej przy użyciu oprogramowania *Ansys*. W tym celu, z wykorzystaniem metod numerycznych, zbudowałem model numeryczny ramienia wielowirnikowca z dołączoną dodatkową masą reprezentującą masę silnika, a następnie wygenerowałem jego charakterystykę częstotliwościową. W wyniku otrzymania charakterystyki amplitudowej modelu numerycznego proponowanego obiektu mechanicznego oraz w wyniku analizy przeliczonych wartości częstotliwości wynikających z wypełnienia impulsu sygnału PWM stwierdziłem, że badany układ pracuje w niskim zakresie częstotliwości. Wyznaczone w ten sposób pasmo częstotliwości zawierało jedynie pierwszą postać drgań własnych ramienia wielowirnikowca.

Otrzymanie zakresu częstotliwości pracy układu było kluczowym etapem do przeprowadzenia kolejnych badań symulacyjnych prowadzących do określenia lokalizacji elementu piezoelektrycznego na konstrukcji. Biorąc pod uwagę zmienną szerokość impulsu PWM, a tym samym zmienną częstotliwość sygnału podawanego na układ napędowy obiektu latającego, określiłem jego wpływ na odkształcenia zginające konstrukcji. Szczegółowa analiza tego zagadnienia ukazała pojawienie się największych wartości odkształcenia zginającego w okolicy mocowania ramienia do jego podstawy. Ekstremum tych wartości uzyskane przy podawaniu napięcia o częstotliwości bliskiej pierwszej częstotliwości rezonansowej układu potwierdziło konieczność ulokowania piezoelektrycznego elementu pomiarowego w tej lokalizacji.

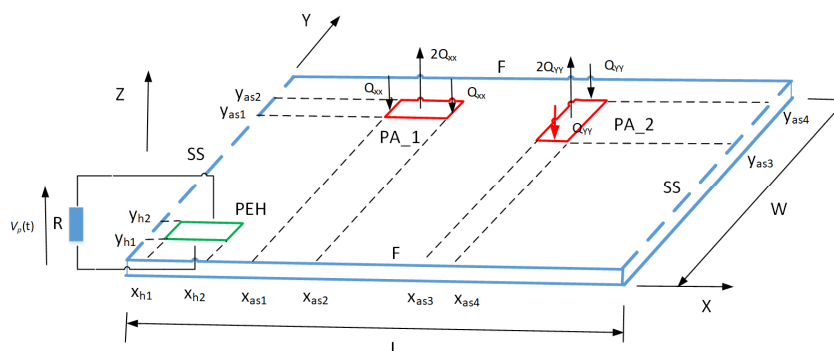
Badania symulacyjne proponowanego układu zakończyłem wyznaczeniem wartości mocy wyjściowej generowanej przez układ z uwzględnieniem zmiennej szerokości wypełnienia impulsu PWM mieszczącego się w zakresie 20-50%. Głównym powodem ograniczenia współczynnika wypełnienia impulsu sygnału PWM było bezpieczeństwo osoby wykonującej testy laboratoryjne. Ten fakt sprawił, że największy przyrost mocy wyjściowej z układu *czujnik-ramię* w trakcie wykonywania badań symulacyjnych został uzyskany jedynie

w przypadku zasilania układu napędowego napięciem o częstotliwości odpowiadającej 40-to procentowemu wypełnieniu impulsu sygnału PWM i częstotliwości bliskiej pierwszej częstotliwości rezonansowej układu.

Badania eksperymentalne weryfikujące wyniki badań symulacyjnych i numerycznych przeprowadziłem na stanowisku laboratoryjnym. Korzystając z nabytego doświadczenia stanowisko badawcze doposażyłem w kartę pomiarową *myRIO* umożliwiającą pomiar generowanych napięć z układu. W tym celu przy wykorzystaniu środowiska LabView zaprojektowałem układ rejestrujący, a następnie zaimplementowałem go do procesora zlokalizowanego na karcie pomiarowej. Pozytywne wyniki badań eksperymentalnych otrzymane na stanowisku laboratoryjnym pozwoliły mi rozszerzyć badania, w których sprawdziłem wpływ dołączonej impedancji układu na pozyskiwane wartości natężenia prądu i napięcia elektrycznego. Tym samym możliwe stało się zbadanie sprawności elektrycznej proponowanego układu pod kątem ewentualnych zastosowań praktycznych.

Reasumując, istotnym osiągnięciem naukowym w zakresie aplikacyjnym układów odzyskiwania energii z drgań było zbadanie wydajności prądowej proponowanego rozwiązania technicznego. Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych i eksperymentalnych stwierdziłem, że proponowane rozwiązanie może stać się alternatywą do zasilania wybranych komponentów ulokowanych na platformie.

Otrzymane wyniki badań opisane w artykule [A.3] były podstawą do **zbadań wydajności prądowej układu odzyskiwania energii z drgań zamocowanego na dwuwymiarowej konstrukcji mechanicznej [A.1].** Mając na uwadze wcześniejsze badania związane z opracowywaniem metody modelowania dynamiki nieistniejących konstrukcji mechanicznych dwuwymiarowych postanowiłem rozważyć w pracy [A.2] konstrukcję doposażyć w dodatkowy element piezoelektryczny. W rezultacie oznaczone na Rys.5 elementy wykonawcze PA_1 i PA_2 potraktowałem jako wzbudniki drgań reprezentujące przykładowo interakcję pomiędzy pojazdem a konstrukcją mostową, zaś element piezoelektryczny PEH jako źródło napięcia niezbędne do zasilania pozostałych niskoenergetycznych elementów pomiarowych.



Rys.5. Konstrukcja mechaniczna płytowa z dwoma wyróżnionymi kierunkami drgań zawierająca zintegrowane z nią elementy wykonawcze PA_1 i PA_2 oraz piezoelektryczny generator napięcia PEH.

Punktem wyjścia do badań było wyznaczenie parametrów piezo wstęgi zintegrowanej z dwuwymiarową konstrukcją. W tym celu wyprowadziłem równanie drgań poprzecznych płyty z uwzględnieniem oddziaływania dodatkowych momentów zginających generowanych przez oba elementy wykonawcze na konstrukcję, określiłem postacie i częstotliwości drgań własnych, a następnie w oparciu o równania prądu elektrycznego płynącego w układzie i uwzględnieniu sprzężenia elektromechanicznego wyznaczyłem wartość generowanego napięcia z układu. Otrzymane w ten sposób wartości stały się podstawą do wyprowadzenia wielomodowego modelu elektromechanicznego układu *czujnik-płyta* w rozpatrywanym zakresie częstotliwości drgań.

Z punktu widzenia odzyskiwania energii z drgań konstrukcji mechanicznych kluczowym zagadnieniem w tej pracy było odpowiednie ulokowanie dodatkowej wstęgi piezoelektrycznej na konstrukcji. Problem ten rozwiązałem poprzez wyliczenie modalnych wartości odkształcenia zginającego czujnika zintegrowanego z płytą przy zmiennej lokalizacji i orientacji czujnika piezoelektrycznego na konstrukcji. Badania przeprowadziłem w dwóch wariantach. W pierwszym rozważałem wzdłużną orientację czujnika piezoelektrycznego względem dłuższej krawędzi konstrukcji bazowej, w drugim zaś - orientację poprzeczną. W wyniku przeprowadzonych badań symulacyjnych wyznaczyłem określoną liczbę modalnych postaci odkształcenia zginającego czujnika zintegrowanego z płytą nawiązującą do ilości rozpatrywanych w danym zakresie częstotliwości drgań własnych. Z otrzymanych postaci odkształcenia zginającego odrzuciłem te obszary, w których pojawiły się linie węzłowe. Podobne badania przeprowadziłem w odniesieniu do piezoelektrycznego elementu wykonawczego, ze względu na bezpośredni wpływ siły generowanej ze wzbudnika na wartość odzyskiwanego napięcia z drgań układu. W wyniku przeprowadzonych badań symulacyjnych i przeprowadzonej analizie modalnych sił sterujących określiłem pożądaną orientację elementu wykonawczego na konstrukcji. W obu przypadkach piezoelektryczny element pomiarowy i wykonawczy należałoby zorientować wzdłużnie względem dłuższej krawędzi prostokątnej konstrukcji płytowej.

Badania eksperymentalne układu mechanicznego z tak zorientowanymi elementami piezoelektrycznymi na konstrukcji mechanicznej poprawnie zweryfikowały wyniki badań symulacyjnych. Zarejestrowane przebiegi sygnałów napięciowych uzyskane z proponowanego układu połączonego z konstrukcją mechaniczną i układem kondycjonującym ukazały jego możliwości energetyczne. Tym samym wykazałem, że proponowany układ zintegrowany z dwuwymiarową konstrukcją mechaniczną może być źródłem zasilania niskoprądowych urządzeń elektronicznych lub źródłem informacji o jej stanie technicznym.

Reasumując, istotnym osiągnięciem naukowym w zakresie aplikacyjnym układów odzyskiwania energii z drgań było zbadanie wydajności napięciowych proponowanego układu zamontowanego na konstrukcji z dwoma wyróżnionymi kierunkami drgań. Tym samym wykazałem, że aplikacja proponowanego układu na tego typu konstrukcjach może

prorowadzić do zasilania niskoprądowych urządzeń elektrycznych lub może być źródłem informacji o stanie technicznym badanej konstrukcji.

Podsumowując moje osiągnięcia naukowe stwierdzam, że:

- **opracowałem pełną metodę modelowania dynamiki jeszcze nieistniejącej i będącej na etapie projektowania podatnej konstrukcji mechanicznej z wyróżnionymi ortogonalnie dwoma kierunkami drgań i z niekolokowanymi elementami piezoelektrycznymi i projektowania dla niej niskoenergetycznego układu sterowania drganiami w oparciu o analizę sumy residuów układu otwartego,**
- **opracowałem pełną metodę wyznaczania elektrycznych i mechanicznych parametrów elementu piezoelektrycznego dowolnego kształtu pracującego na potrzeby odzyskiwania energii z drgań,**
- **ukazałem interdyscyplinarne podejście do projektowania nowoczesnych podatnych dwuwymiarowych konstrukcji mechanicznych, w których stan techniczny będzie monitorowany przy wykorzystaniu wstęp piezoelektrycznych,**
- **przeprowadzone badania aplikacyjne układów odzyskujących energię z drgań konstrukcji z jednym wyróżnionym kierunkiem drgań i dwoma wyróżnionymi kierunkami drgań ukazały wydajności prądowe proponowanych układów na potrzeby zasilania innych niskoenergetycznych układów pomiarowych,**
- **wymiernym efektem proponowanego podejścia będzie redukcja nakładów finansowych związanych z wykonaniem niezbędnych prototypów i przeprowadzaniem testów laboratoryjnych.**

Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

W dniu 16 czerwca 2011 r. przed Komisją Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie odbyła się publiczna obrona mojej rozprawy doktorskiej zatytułowanej *Metoda szybkiego prototypowania układu aktywnego tłumienia drgań konstrukcji mechanicznych*. Promotorem pracy był prof. dr hab. inż. Zdzisław Gosiewski (Politechnika Białostocka), a recenzentami prof. dr hab. inż. Janusz Kowal (Akademia Górniczo-Hutnicza) oraz dr hab. inż. Marek Pawełczyk (profesor nadzwyczajny Politechniki Śląskiej). W dniu 1 lipca 2011r. Rada Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki uchwaliła nadanie mi stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie *automatyka i robotyka*.

Praca doktorska poświęcona była problemom modelowania, identyfikacji eksperymentalnej i projektowaniu układów sterowania konstrukcji jednowymiarowych z kolokowaną parą elementów piezoelektrycznych i dwuwymiarowej konstrukcji przestrzennej. Przykładem rozważanej konstrukcji 2D była konstrukcji prętowa zbudowana z 126 metalowych prętów pasywnych oraz 2 aktywnych połączonych ze sobą 44 aluminiowymi węzłami. Na potrzeby zaprojektowania prawa sterowania drganiami konstrukcji mechanicznej wyznaczyłem metodami numerycznymi postacie i częstotliwości drgań własnych konstrukcji, a następnie w oparciu o przeprowadzoną procedurę identyfikacyjną wyprowadziłem jej modele matematyczne. Przeprowadzone badania eksperymentalne na zbudowanych przeze mnie stanowiskach laboratoryjnych związanych z belką konsolową z kolokowaną parą elementów piezoelektrycznych i przestrzenną konstrukcją prętową ukazały poprawne działanie układu sterowania z regulatorami PD.

Wyniki swoich prac z zakresu modelowania, wyznaczania modelu matematycznego z zastosowaniem podejścia eksperymentalnego oraz projektowania aktywnego układu sterowania drganiami przestrzennej konstrukcji prętowej zamieściłem w dwóch publikacjach [Zał.3 poz.II.A.1 i II.A.2]. W pracy (Zał.3 poz.II.A.2) opisałem szczegółowo proces identyfikacyjny konstrukcji. Proces ten przeprowadziłem w dwóch etapach w zależności od generowanego momentu zginającego poprzez piezo-stosy wbudowane w aktywne pręty. Informację o drganiach poprzecznych konstrukcji uzyskałem z dwóch czujników wiropędowych zlokalizowanych w okolicy swobodnego ustroju konstrukcji i skierowanych prostopadle do siebie. Tym samym uzyskałem dwa niezależne sygnały pomiarowe opisujące drgania konstrukcji w dwóch niezależnych płaszczyznach pomiarowych w odniesieniu do rozpatrywanego w pracy rodzaju pobudzenia konstrukcji do drgań.

Procedurę identyfikacyjną każdego modelu przeprowadziłem w oparciu o wyznaczone charakterystyki częstotliwościowe. Jako metodę estymacji modelu wybrałem metodę LMFD (ang. *Left Matrix Fraction Description*) bazującą na metodzie autoregresji liniowej. W wyniku jej zastosowania otrzymałem model zapisany w przestrzeni stanu. Na podstawie analizy uzyskanych amplitud drgań konstrukcji z czujników ukierunkowanych prostopadle niż

płaszczyzna pobudzenia stwierdziłem, na potrzeby sterowania drganiami, że rozważany układ dwuwymiarowy mogę rozprząc na układy jednowymiarowe. Tym samym proces projektowania regulatora mogłem uprościć do zaprojektowania jedynie dwóch niezależnych podrzędnych regulatorów, których zadaniem było redukowanie drgań konstrukcji jedynie w płaszczyznach pobudzania. W przypadku dwóch pozostałych podukładów proces ten został pominięty z racji pojawiania się nisko-amplitudowych drgań konstrukcji.

Kolejne prace naukowo-badawcze wynikały z mojego udziału w konsorcjum realizującym projekt rozwojowy *Autonomiczny, zintegrowany system rozpoznania wykorzystujący autonomiczne platformy klasy mikro*. Celem projektu było opracowanie prototypu taniego, łatwego w użyciu i odpornego na zakłócenia systemu rozpoznawczego, wykorzystującego miniaturowe, autonomiczne, bezzałogowe statki powietrzne jako platformy do przenoszenia czujników. W początkowym etapie realizacji projektu skoncentrowałem się na opracowaniu koncepcji sterowania mikrosamolotem z wykorzystaniem elementów piezoelektrycznych. W tym celu dokonałem przeglądu literatury oraz opracowałem koncepcję sterowania obiektem latającym. Opracowana koncepcja na potrzeby generowania wirów krawędziowych zakładała zastosowanie w okolicach krawędzi natarcia skrzydła piezo-mikro dysz. Wydajność proponowanego rozwiązania zbadałem poprzez wykonanie badań symulacyjnych pojedynczej piezo-mikro dyszy w środowisku *Ansys Workbench* z wykorzystaniem dodatkowego pakietu *Ansys CFX*. Uzyskane wyniki badań numerycznych umożliwiły mi opracowanie układu zasilania niezbędnego do sterowania pracą piezo mikro-dyszy.

Na dalszym etapie prac byłem odpowiedzialny za zaprojektowanie regulatora ślizgowego na potrzeby sterowania wirami krawędziowymi mikrosamolotu z wysuwającymi się barierami mechanicznymi. Punktem wyjścia do realizacji tego zadania było wyprowadzenie modelu matematycznego rozważanego samolotu na podstawie wyznaczonych już momentów aerodynamicznych (wynik prac współwykonawców projektu). Etap prac związany z opracowaniem układu sterowania obiektu latającego klasy mikro rozpocząłem od wydzielenia z modelu samolotu dwóch podukładów opisujących ruch wzdłużny i ruch poprzeczny. Biorąc pod uwagę do dalszej analizy tylko i wyłącznie ruch wzdłużny, na bazie wyprowadzonego już modelu obiektu sterowania określiłem postacie drgań typu długookresowego i krótkookresowego. W kolejnym etapie wyznaczyłem wektor płaszczyzny ślizgowej oraz dokonałem obliczeń niezbędnych do uzyskania wektora wzmocnień regulatora ślizgowego. Zaprojektowany układ sterowania przebadalem symulacyjnie w dziedzinie czasu i częstotliwości. Otrzymane wyniki badań układu zamkniętego wykazały pojawienie się dodatkowego silnego tłumienia szczególnie w okolicach częstotliwości związanej z postacią długookresową. Tym samym ukazały one poprawność zaprojektowanego algorytmu sterowania stabilizującego lot mikrosamolotu. Otrzymane wyniki zamieściłem w jednym z rozdziałów monografii *Elementy autonomii lotu bezzałogowych aparatów* opracowanej pod redakcją profesora Zdzisława Gosiewskiego. Wspomniana publikacja została uwzględniona w załączniku 3 [II.E.1].

Kolejne moje prace naukowo-badawcze związane były z udziałem w projekcie *Wzmocnienie potencjału kadr uczelni nauki i biznesu poprzez transfer wiedzy w regionie*. W ramach projektu odbyłem 6-miesięczny staż w przedsiębiorstwie Komunalne Przedsiębiorstwo Komunikacyjne Sp.z.o.o w Białymstoku, w którym odpowiedzialny byłem za opracowanie modelu matematycznego pasywnego układu zawieszenia siedziska kierowcy autobusu komunikacji miejskiej. Prowadzone na tym etapie badania były badaniami wstępnymi, gdyż zasadniczym celem spółki było opracowanie zmodyfikowanego systemu zawieszenia siedziska z zamontowanymi w konstrukcji dodatkowymi elementami wykonawczymi i pomiarowymi. Zaprojektowane do niej prawo sterowania niwelowałoby niskoczęstotliwościowe drgania konstrukcji korespondujące w bezpośredni sposób z częstotliwościami własnymi niektórych organów wewnętrznych człowieka. Biorąc pod uwagę te założenia: dokonałem pomiaru drgań konstrukcji, zbudowałem jego model symulacyjny z wykorzystaniem oprogramowania Matlab/Simulink oraz określiłem właściwości wibroizolacyjne badanego układu. Tym samym na podstawie uzyskanych informacji i posiadanego modelu mogłem już we wstępnej fazie zaprojektować filtr Butterwortha, którego zadaniem było wyeliminowanie częstotliwości powiązanych z częstotliwościami niektórych organów wewnętrznych człowieka. Wyniki badań wraz z ich opisem przedstawiłem w pracy [Zał.3 II.E.5].

W tym samym okresie zająłem się także tematyką związaną z opracowaniem algorytmu stabilizacji kuli na platformie *Stewart*. Wynikiem prowadzonych badań była praca [Zał.3 II.E.3], w ramach której opracowałem autorski algorytm stabilizacji ruchu kuli przemieszczającej się na górnej platformie konstrukcji mechanicznej. Na podstawie badań symulacyjnych wyznaczyłem nastawy dwóch regulatorów PID stabilizujących ruch kuli w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach (odpowiednio X i Y). Wyznaczone przeze mnie regulatory zostały przez współautorów pracy zaimplementowane na sterownik Arduino i przetestowane na rzeczywistym obiekcie.

Kolejne prace naukowo-badawcze związane były z moim udziałem w konsorcjum realizującym projekt rozwojowy pod tytułem *Sieciocentryczny system wsparcia rozpoznania i dowodzenia sytuacjami kryzysowymi na terenach zurbanizowanych z autonomicznymi bezzałogowymi aparatami latającymi*. Celem projektu było zaprojektowanie i wykonanie demonstratora technologii taniego, łatwego w użyciu i odpornego na zakłócenia, sieciocentrycznego systemu wsparcia rozpoznania i dowodzenia sytuacjami kryzysowymi na terenach zurbanizowanych, wykorzystującego autonomiczne, bezzałogowe aparaty latające, jako platformy przenoszące sensory, precyzyjne kamery IR, a także radary oraz inne czujniki. Mój udział w projekcie sprowadzał się do realizacji zadania polegającego na wyznaczeniu momentów bezwładności obiektu latającego typu *Pingwin* ze spalinowym układem napędowym. W pierwszym etapie badań dokonałem pomiarów geometrycznych skrzydła samolotu na rzeczywistym obiekcie, a następnie z wykorzystaniem odpowiednich narzędzi inżynierskich zbudowałem model numeryczny oparty o profil skrzydła typu NACA 0012. W kolejnym etapie, opracowany model bryłowy skrzydła samolotu zaimportowałem do

programu XFLR5, w którym przeprowadziłem badania symulacyjne przy założonym profilu kadłubu samolotu. Obliczone wartości momentów bezwładności badanego samolotu na potrzeby projektu wykorzystałem do wyprowadzenia modelu matematycznego samolotu. Brakujące parametry modelu samolotu zidentyfikowałem podczas prób w locie.

Kontynuacją badań związanych z bezzałogowymi obiektami latającymi był odbyty **zagraniczny staż naukowy** w jednym z fińskich instytutów naukowo-badawczych (*VTT Technical Research Centre of Finland*) mieszczących się w Oulu. Podczas 3-tygodniowego pobytu w Dziale *Industrial Machine to Machine Systems* przydzielono mi dwa zadania: opracowanie modelu matematycznego komercyjnego bezpilotowego obiektu mechanicznego typu *Parrot* oraz zaprojektowanie układu sterowania stabilizującego lot bezzałogowego statku powietrznego. Wyszczególnione zadania dotyczyły głównie przeprowadzenia badań wstępnych mających na celu opracowanie algorytmu sterowania aparatem latającym lecącym w formacji i monitorującym stan upraw roślin na obszarach rolniczych. Wykorzystując zdobytą wiedzę oraz nabyte doświadczenie wyprowadziłem równania ruchu opisujące dynamikę klasycznego cztero-wirnikowego obiektu latającego, a następnie na tej podstawie zbudowałem jego model matematyczny w środowisku Matlab/Simulink.

Na dalszym etapie badań opracowany model symulacyjny platformy *Parrot* wymagał przekształcenia do postaci ułatwiającej przeprowadzenie procesu projektowania regulatora. Po wnikliwej analizie zaprojektowałem z wykorzystaniem regulatora PID cztery pętle sterujące stabilizujące odpowiednio: wysokość (ang. *altitude*), kąt pochylenia (ang. *pitch angle*), kąt przechylenia (ang. *roll angle*) oraz kąt odchylenia (ang. *yaw angle*). Otrzymane wyniki badań zostały zawarte w pracy [Zał.3 II.E.4] oraz uwzględnione przez stronę fińską podczas opracowywania systemu komunikacji pomiędzy poszczególnymi platformami latającymi z wykorzystaniem systemu radiokomunikacyjnego UWB.

Wymiernymi efektami odbycia stażu było:

- złożenie przez stronę fińską wspólnego projektu badawczego w ramach ścieżki *Sustainable Food Security, Assessing soil-improving cropping systems* programu H2020 nt. *Hyper-spectral imaging assisted precision farming* - zarejestrowanego pod numerem *SFS-02b-201*,
- pełnienie roli pełnomocnika koordynatora Wydziału ds. organizacji planu pracy pomiędzy dwoma ośrodkami naukowo-badawczymi na lata 2013-2017.

Kolejne prace naukowo-badawcze związane były z problemem pozyskiwania energii z drgań konstrukcji mechanicznych. Po przeprowadzeniu badań przedstawionych w artykule (Zał.3 I.B.4), do dalszej analizy tego zjawiska wybrałem stalową belkę aluminiową, na której zamocowałem element wykonawczy w postaci wstęgi piezoelektrycznej QP20N oraz element pomiarowy w postaci wstęgi piezoelektrycznej V21BL (*piezo-harvester*). W pierwszym etapie badań, na podstawie wyznaczonych parametrów mechanicznych i elektrycznych oraz przeprowadzonej analizy dynamiki układu mechanicznego wyprowadziłem model elektromechaniczny elementu pomiarowego zintegrowanego z konstrukcją mechaniczną.

Właściwości proponowanego układu pod kątem generowania odpowiednich napięć wyjściowych z układu określiłem w kolejnych dwóch etapach związanych z: badaniami numerycznymi przeprowadzonymi w środowisku *Ansys* oraz badaniami eksperymentalnymi. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdziłem, że przy odpowiednim pobudzeniu częstotliwościowym konstrukcji do drgań, istnieje możliwość określenia wydajności prądowej urządzenia niezbędnej do zasilania niskoenergetycznych czujników pomiarowych. Uzyskane wyniki zostały opublikowane w pracy [Zał.3 II.E.2].

Dalsza praca nad pozyskiwaniem energii z drgań wybranych konstrukcji mechanicznych owocowała także udziałem w dwóch warsztatach *The Workshop in Devices, Materials and Structures for Energy Harvesting* odbywających się w Polsce (Lublin 2015) oraz Finlandii (Oulu 2017). Moje uczestnictwo we wspomnianych wydarzeniach przyczyniło się do napisania w roli *Secondary Proposer* trzech projektów unijnych związanych tematycznie z badaniem nieliniowości elementów stosowanych w układach do odzyskiwania energii z drgań. Tytuły złożonych projektów zostały określone w załączniku nr 4 w punkcie Q.7.

Kolejnym obszarem mojej działalności naukowo-badawczej były zagadnienia związane z projektowaniem regulatorów ułamkowego rzędu. Celem tych badań było zaprojektowanie regulatora o właściwościach zbliżonych do klasycznego regulatora PID, jednakże charakteryzującego się większą odpornością na pojawiające się w układzie zamkniętym zakłócenia.

Badania związane z tą działalnością naukową przeprowadziłem na jednym ze stanowisk, które wprowadziłem do dydaktyki. Wybrane stanowisko dydaktyczne (Festo MPS-PA) oferowało możliwość projektowania czterech odrębnych pętli regulacyjnych związanych z regulacją: poziomu cieczy w zbiorniku, natężenia przepływu cieczy przepływającego przez pompę, ciśnienia sprężonego powietrza w zbiorniku lub temperatury cieczy w zbiorniku. Do dalszych badań wybrałem proces regulacji cieczy w zbiorniku, w którym czynnikiem decydującym o ilości cieczy w zbiorniku było napięcie przykładane do elementu wykonawczego.

Proces projektowania regulatora ułamkowego rzędu najczęściej realizowany jest z wykorzystaniem metody CRONE. W odniesieniu do omawianej pracy, proces ten przeprowadziłem z wykorzystaniem metody bazującej na idealnej charakterystyce Bodego modelu układu otwartego. W rezultacie model układu otwartego opisany był transmitancją operatorową członu całkującego, a uzyskana na potrzeby projektowania charakterystyka amplitudowa układu otwartego była traktowana jako charakterystyka referencyjna. W celu wyznaczenia parametrów regulatora ułamkowego rzędu głównie skupiłem się na analizie zapasu amplitudy i zapasu fazy projektowanego układu zamkniętego. Otrzymane w wyniku badań symulacyjnych wartości ukazały właściwości układu zamkniętego.

W dalszych etapach swoje rozważania skupiłem na regulatorze ułamkowego rzędu typu TID (ang. *Tilted-Integral-Derivative Controller*), który z racji swojej struktury (podwójna akcja całkująca) pozwalał na całkowite wyeliminowanie uchybu statycznego z projektowanego układu regulacji. W tym przypadku postanowiłem projektowany regulator

przebadać w odniesieniu do procesu regulacji objętościowego natężenia cieczy przepływającej przez element wykonawczy. W wyniku takiego założenia, prace badawcze ukierunkowałem na przebadanie układu regulacji w środowisku symulacyjnym, dokonaniu analizy jakościowej układu regulacji i przeprowadzeniu badań laboratoryjnych na rzeczywistym obiekcie. Opracowany układ sterowania z uwzględnieniem wszystkich wartości granicznych napięć zrealizowałem w środowisku LabView (współpraca z współautorem artykułu dr inż. Michałem Ostaszewskim), a następnie zaimplementowałem na układ FPGA.

Poszerzeniem mojej działalności naukowo-badawczej było połączenie ze sobą dwóch obszarów badań: projektowanie regulatorów ułamkowego rzędu oraz modelowanie układów odzyskującego energię z drgań. **Proponowane autorskie podejście** miało przyczynić się do uzyskania polepszonych właściwości układu odzyskującego energię. Badania związane z tym układem przeprowadziłem w odniesieniu do konstrukcji opisanej w pracy (Zał.3 I.B.3). Biorąc pod uwagę znany mi liniowy model elektromechaniczny czujnika zintegrowanego z konstrukcją rurową (1D) wprowadziłem do modelu ułamkowy rząd w części związanej z działaniem kondensatora. Tym samym wprowadziłem operator różnicowy ułamkowego rzędu typu Grunwalda-Letnikova. W wyniku zastosowanej aproksymacji dyskretny model opisujący proces stał się podstawą do przeprowadzenia badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych z wykorzystaniem układu FPGA. Przy tej okazji nadmienię, że badania symulacyjne związane z wyliczeniem wartości generowanego napięcia z układu wymagały utworzenia autorskiego algorytmu iteracyjnego.

Otrzymane wyniki badań zamieściłem w pracach [Zał.3: II.L1; II.L.5] stanowiących materiały konferencyjne indeksowane w bazie Web of Science.

Kolejne moje osiągnięcia naukowo-badawcze wynikają z mojego udziału w konsorcjum realizującym projekt badawczy nt. *Badania aplikacyjne w obszarze technologii nawigacji, sterowania, komunikacji i wymiany danych pomiędzy autonomicznym statkiem pływającym i statkiem powietrznym*. Celem projektu na potrzeby Żeglugi Morskiej jest zaprojektowanie technologii sterowania, komunikacji i wymiany danych pomiędzy autonomicznym statkiem pływającym i statkiem powietrznym. Mój udział w projekcie sprowadzał się do opracowania układu sterowania obiektu latającego typu płatewiec VTOL (ang. *Vertical Take Off and Landing*) podczas przechodzenia z fazy pionowego startu w lot poziomy oraz przetestowania tego sterowania w środowisku HIL (ang. *Hardware-In-The-Loop*). W pierwszym etapie badań opracowałem model matematyczny samolotu na bazie wyliczonych momentów bezwładności w środowisku XFLR5 oraz na podstawie parametrów udostępnionych przez innych wykonawców projektu. Proces wyznaczania modelu matematycznego pławca VTOL przeprowadziłem w środowisku Matlab/Simulink, w którym również zaprojektowałem poszczególne pętle regulacyjne. W celu ustabilizowania lotu rozważanego obiektu latającego zaprojektowałem odpowiednio najwolniejszą pętlę sterującą odpowiedzialną za nawigację samolotu według globalnego punktu odniesienia, szybszą pętlę związaną ze sterowaniem

orientacji pionowzlotu w przestrzeni oraz najszybszą pętlę sterującą dynamiką pionowzlotu. W kolejnym etapie badań przeprowadziłem badania symulacyjne HIL z wykorzystaniem autopilota typu *Pixhawk 2.1*. Na potrzeby realizacji zadania zintegrowałem ze sobą środowisko symulacyjne *Gazebo* oraz fizyczne urządzenie w postaci autopilota *Pixhawk* przy pomocy protokołu komunikacyjnego MAVLINK. Uzyskane wyniki badań ukazały poprawność działania zaprojektowanego układu sterowania. Tym samym możliwe stało się testowanie opracowanego algorytmu sterowania w warunkach zbliżonych do rzeczywistości (badania poligonowe na zbiornikach wodnych zamkniętych). Decyzją konsorcjum wyniki z przeprowadzanych badań na tym etapie są utajnione.

Wyniki moich osiągnięć naukowo-badawczych powiązanych z aktywnym sterowaniem drganiami wybranych konstrukcji mechanicznych zostały także opublikowane w pracach [Załącznik 3: II.L.4; II.L.6; II.L.8 oraz II.L.10]. We wskazanych pracach obiektem mechanicznym poddanym sterowaniu była konstrukcja mechaniczna z jednym wyróżnionym kierunkiem drgań (1D) lub konstrukcja z dwoma wyróżnionymi kierunkami drgań (2D) z niekolokowanymi piezo-elementami pomiarowymi i wykonawczymi. Uzyskane w ten sposób konstrukcje mechaniczne stały się podstawą do badania właściwości układów niekolokowanych jak również podstawą do projektowania układów sterowania. Prace [Załącznik 3: II.L.4; II.L.6] przedstawiają **autorskie podejście** sterowania płytową konstrukcją mechaniczną przy wykorzystaniu optymalnych regulatorów LQR (*ang. Linear-Quadratic Regulator*) i LQG (*ang. Linear-Quadratic Gaussian*). Na potrzeby opracowania optymalnego sterowania drganiami konstrukcji mechanicznej w pracy [Załącznik 3: II.L.4] zastosowałem podejście dwuetapowe.

W pierwszym etapie dobrałem odpowiednie wartości macierzy wagowych wektora zmiennych stanu i wektora sterowania minimalizujące określoną funkcję celu. W drugim zaś na ich podstawie wyznaczyłem wektor wzmocnień pętli sprzężenia zwrotnego. Tym samym wyznaczyłem autorskie prawo sterowania, które redukuje drgania konstrukcji w określonym paśmie częstotliwości. Zaprojektowany optymalny regulator zaimplementowałem do procesora czasu rzeczywistego *Dspace* i przeprowadziłem badania eksperymentalne. Uzyskane wyniki badań laboratoryjnych poprawnie zweryfikowały wyniki badań symulacyjnych.

W pracy [Załącznik 3: II.L.4] opisałem badania symulacyjne i eksperymentalne związane z projektowaniem regulatora LQG. W związku z tym badania opisane w pracy [Załącznik 3: II.L.6] poszerzyłem o dodatkowo projektowany filtr Kalmana. Podobnie jak miało to miejsce w pracy [Załącznik 3: II.L.6] badania symulacyjne układu sterowania przeprowadziłem w odniesieniu do rozprężonego układu wielowymiarowej konstrukcji płytowej. Zaprojektowane w ten sposób prawa sterowania drganiami konstrukcji mechanicznej z wydzielonymi postaciami drgań typu nieparzystego lub parzystego zaimplementowałem na układ mikroprocesorowy dostępny na stanowisku laboratoryjnym. Przeprowadzone przeze mnie testy ukazały poprawne działanie układu sterowania i redukcję drgań konstrukcji w badanym zakresie częstotliwości.

Moja działalność naukowo-badawcza w zakresie projektowania aktywnych układów sterowania drganiami przyczyniła się do napisania wniosków projektowych unijnych

realizowanych w ramach 7 Programu Ramowego Unii Europejskiej i programu Horyzont 2020. Tematy wniosków projektowych realizowanych przy udziale konsorcjum naukowego zostały zamieszczone w załączniku 4 poz. Q.8 i Q.9. W obu wnioskach byłem współautorem części poświęconej modelowaniu dynamiki wybranych konstrukcji mechanicznych oraz projektowaniu aktywnych układów sterowania drganiami. Przy tej okazji nadmienię, że w przypadku projektu składanego w roku 2013, pełniłem także rolę osoby koordynującej prace związane z pisanem projektu oraz wymianę informacji pomiędzy poszczególnymi członkami konsorcjum.

Odrębnym wynikiem mojej aktywnej działalności naukowo-badawczej w tej tematyce było **kierowanie pracą zleconą realizowaną** na potrzeby firmy Novismo. Biorąc pod uwagę zakres prowadzonych prac badania przeprowadziłem w dwóch etapach. W pierwszym etapie dokonałem pomiaru drgań przedniej ściany zmywarki w dwóch konfiguracjach: z zamontowanym wytłumieniem bitumicznym oraz bez wytłumienia bitumicznego. W drugim zaś, na podstawie zmierzonych i zarejestrowanych sygnałów pomiarowych opracowałem z wykorzystaniem regulatora PD **autorski układ sterujący drganiami** przedniej ściany zmodyfikowanej zmywarki. Głównym zadaniem układu sterowania było zmniejszenie amplitud drgań przedniej ściany zmywarki na potrzeby zmiany klasyfikacji energetycznej urządzenia. Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych opisałem w raporcie końcowym sporządzonym wspólnie z dr hab. inż. Arkadiuszem Mystkowskim. Decyzją firmy wyniki badań na tym etapie są utajnione.

Andrzej Piotr Koszewnik

Informacja uzupełniająca do poz.A.3 z dn.(30.03.2019)

Our Ref.: epjst1800128

by Andrzej Koszewnik, Daniel Oldziej

Title: Performance assessment of an energy harvesting system located on a six-rotor copter

Dear Andrzej,

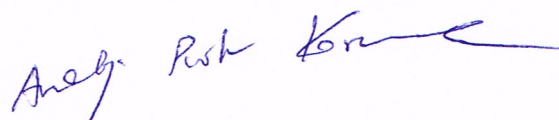
As one of the editors of the relevant special issue of European Physical Journal - Special Topics

I confirm that the final manuscript epjst1800128 has been approved for publication and will be entered into production.

Yours sincerely,

EPJST Editorial Office - VC on behalf of

Dr Vikram Pakrashi

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Vikram Pakrashi', with a stylized flourish at the end.