

Autoreferat

1. Osiągnięcia naukowe, dydaktyczne i organizatorskie przed uzyskaniem stopnia doktora

Studia magisterskie ukończyłem w 2003 r. na Wydziale Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Politechniki Gdańskiej na kierunku Automatyka i Robotyka, w specjalności Komputerowe Systemy Sterowania, z bardzo dobrymi wynikami.

Przed uzyskaniem stopnia doktora moja praca naukowa skupiona była na zagadnieniach związanych z nadzorowaniem drgań podczas procesu frezowania smukłymi narzędziami. Za najistotniejsze elementy pracy doktorskiej uważam: opracowanie niestacjonarnego modelu obliczeniowego systemu obrabiarka-proces skrawania przy frezowaniu smukłym frezem kulistym; zastosowanie energetycznego wskaźnika jakości do wyznaczania optymalnego sterowania prędkością obrotową wrzeciona w celu minimalizacji poziomu drgań samowzbudnych typu *chatter*; opracowanie procedur nadzorowania drgań, na które składają się między innymi symulacje procesu skrawania, generacja optymalnych programów zmiennej prędkości obrotowej oraz weryfikacja eksperymentalna; budowa stanowiska do prowadzenia badań eksperymentalnych. Przeprowadzone badania eksperymentalne potwierdziły skuteczność nadzorowania drgań podczas frezowania szybkościowego smukłymi narzędziami z wykorzystaniem zmiennej prędkości obrotowej wrzeciona. Wyniki prac przedstawiane były na kilkunastu konferencjach naukowych (łącznie 15 referatów) oraz zostały opublikowane w 15 artykułach naukowych (artykuły w czasopismach, rozdziały w monografiach, materiały konferencyjne). Praca doktorska, której promotorem był dr hab. inż. Krzysztof J. Kaliński (obecnie prof. dr hab. inż.), była także podstawą opublikowania monografii. Badania na potrzeby pracy doktorskiej prowadzone były w ramach 3 projektów badawczych, w których brałem czynny udział. Istotna część badań eksperymentalnych wykonana była we Francji, w Ecole Nationale d'Ingenieurs de Metz (ENIM) w Metz. Pracę doktorską obroniłem w 2007 r. z wyróżnieniem. Zostałem także nagrodzony nagrodą Rektora PG dla młodych pracowników nauki.

Ponieważ przed uzyskaniem stopnia doktora zatrudniony byłem na stanowisku techniczno-administracyjnym, nie prowadziłem wówczas zajęć dydaktycznych. Byłem jednak m.in. odpowiedzialny za techniczny nadzór i utrzymanie w ciągłej sprawności laboratoriów komputerowych Katedry Mechaniki i Wytrzymałości Materiałów (obecnie Katedra Mechaniki i Mechatroniki) na Wydziale Mechanicznym PG. Ponadto uruchomiłem kilka stanowisk dydaktycznych w laboratorium automatyki. Zajmowałem się również administracją strony internetowej Wydziału i brałem udział w przygotowaniu konferencji naukowej HOT-GO 2004.

2. Osiągnięcia naukowe, dydaktyczne i organizatorskie po uzyskaniu stopnia doktora

Po uzyskaniu stopnia doktora kontynuowałem prace badawcze związane z nadzorowaniem drgań typu *chatter*. Początkowo zająłem się próbą rozszerzenia stosowanej w pracy doktorskiej metodologii, zastosowanej z powodzeniem do frezowania przedmiotów sztywnych, na przypadki frezowania przedmiotów podatnych. Osiągnięte rezultaty nie były jednak zadowalające. W związku z tym zwróciłem swoją uwagę na metody doboru optymalnej prędkości obrotowej wrzeciona. Skuteczna okazała się metoda oparta na uogólnionym kryterium Liao-Younga. Dalszym etapem było określenie procedury pozwalającej na dobór optymalnych prędkości obrotowych dla poszczególnych obszarów skrawanego przedmiotu na podstawie jego parametrów modalnych. Dzięki temu powstaje

tz. „mapa” prędkości optymalnych. Kolejnym krokiem było zwrócenie się ku aktywnym metodom redukcji drgań. Algorytm sterowania bazuje w tym przypadku na koncepcji energetycznego wskaźnika jakości, który wcześniej zastosowałem w pracy doktorskiej. Badania nad proponowanym algorytmem wymagały zastosowania nowoczesnych technik eksperymentalnych i symulacyjnych. Na ich potrzeby konieczne było utworzenie odpowiednich narzędzi, w szczególności autorskiego oprogramowania do pomiarów, sterowania oraz symulacji w technice *Hardware-in-the-Loop* (HIL), w której część układu jest rzeczywista a część emulowana. W stosowanym rozwiązaniu rzeczywisty był układ sterowania, czujniki, wzбудniki oraz przedmiot obrabiany, a emulowany był proces skrawania. Przeprowadzone badania wykazały dobrą skuteczność proponowanej metody dla przypadku drgań wymuszanych impulsowo. W przypadku obróbki frezowaniem wymuszenia mają jednak charakter okresowy. Choć zaobserwowano skuteczność proponowanej metody także w tym przypadku, nie była ona jednak taka, jak oczekiwano. W związku z tym powrócono do koncepcji doboru optymalnej prędkości obrotowej wrzeczona z tą jednak różnicą, że o ile wcześniej prędkość ta była wyznaczana na podstawie parametrów modelu modalnego przedmiotu mocowanego w uchwycie sztywnym, o tyle w nowym podejściu prędkość jest zadawana arbitralnie (z pewnymi ograniczeniami), a modyfikowane są parametry uchwytu. Uchwyt jest przy tym podatny i ma regulowaną sztywność. Dzięki temu możliwe jest sprawienie, aby dowolna (w pewnym zakresie) prędkość obrotowa wrzeczona była prędkością optymalną z punktu widzenia kryterium Liao-Younga.

We wszystkich proponowanych podejściach do problemu nadzorowania drgań istotnym, a niekiedy wręcz kluczowym elementem stosowanych procedur jest analiza modalna badanego przedmiotu obrabianego. Rutynowo w tym celu w praktyce badawczej stosowane są pośrednie metody identyfikacji takie jak ITD (*Ibrahim Time Domain*), LSCE (*Least Square Complex Exponential*), p-LSCF(d) (*poly-reference Least Squares Complex Frequency-domain*), ERA (*Eigensystem Realization Algorithm*). Niestety, w pewnych przypadkach (zaszumienie danych, krótkie przebiegi czasowe) metody te zawodzą. Z tego powodu podjęto próby utworzenia alternatywnego algorytmu identyfikacji parametrów modelu modalnego. Uwagę zwrócono w kierunku algorytmów Sztucznej Inteligencji (SI) a w szczególności – ku algorytmowi *Particle Swarm Optimization* (algorytm optymalizacji roju cząsteczek - PSO). W wyniku tych prac opracowano algorytm smiPSO (*Spectrum-based Modal Parameters Identification with Particle Swarm Optimisation*), który w określonych przypadkach wykazuje przewagę nad klasycznymi metodami identyfikacji.

Za działalność naukową uzyskałem jedną indywidualną nagrodę Rektora PG.

Wyniki prac prowadzonych po uzyskaniu stopnia doktora przedstawiane były na konferencjach naukowych (w większości międzynarodowych) - łącznie było to 29 referatów w tym 10 prezentowanych osobiście. Ponadto byłem członkiem komitetów organizacyjnych 4-ch konferencji naukowych: GAMM 2009 (około 700 uczestników z całego świata), Research-Education-Technology 2013, Sesja Naukowa Poświęcona Pamięci Prof. Kruszewskiego - 2014, International Conference Mechatronics (ICM) 2015. Przewodniczyłem także jednej z sesji podczas konferencji ICM-2015. Recenzowałem 8 artykułów naukowych, w tym 3 dla pism z listy JCR.

Moja działalność dydaktyczna obejmowała przygotowanie od podstaw (nie były wcześniej prowadzone na Wydziale) a następnie prowadzenie 9-ciu nowych, nie prowadzonych wcześniej na Wydziale przedmiotów dla kierunków Mechatronika oraz Inżynieria Mechaniczno-Medyczna. Jestem także autorem podręcznika dotyczącego programowania systemów wbudowanych.

Byłem promotorem 42 prac inżynierskich i 19 magisterskich. Pełnię również funkcję promotora pomocniczego w jednym przewodzie doktorskim. Przez cały czas pełnię także

różne funkcje na Wydziale Mechanicznym PG, m.in. sekretarza Komisji Wyborczej i sekretarza Rady Wydziału.

Ponadto, brałem aktywny udział w pracach na rzecz rozwoju bazy laboratoryjnej Wydziału m.in. poprzez przygotowanie i uruchomienie *Pracowni informatyki* oraz jej dalszą rozbudowę do pełnienia funkcji *Pracowni Systemów Wbudowanych*. Następnie opracowałem koncepcję, przygotowałem (aktywny udział w procedurach przetargowych) i uruchomiłem *Pracownię modelowania i informatyki w mechatronice* powstałą w ramach realizowanego na PG projektu Inżynier Przyszłości, finansowanego z funduszy UE (wartość zakupionego sprzętu i oprogramowania około 400'000 zł, wartość całego projektu 67 mln zł). Ponadto, dzięki współpracy z firmami z branży elektronicznej pozyskałem nieodpłatnie także inny sprzęt dydaktyczny o łącznej wartości około 20'000 zł.

Moja działalność znalazła uznanie w postaci wysokich ocen w ankietach studenckich oraz jednej nagrody Rektora PG za osiągnięcia organizacyjne i 3-ch za osiągnięcia dydaktyczne.

3. Opis osiągnięcia stanowiącego podstawę postępowania habilitacyjnego

3.1. Tytuł osiągnięcia

Rozwiązania mechatroniczne w nadzorowaniu drgań w procesie frezowania smukłymi narzędziami

3.2. Omówienie zakresu i celu naukowego w/w pracy oraz jej najważniejszych wyników

Prezentowany cykl prac dotyczy problemów nadzorowania drgań występujących podczas frezowania, a w szczególności drgań samowzbudnych typu *chatter*, oraz metod identyfikacji parametrów modelu modalnego, które są wykorzystywane w procedurach nadzorowania drgań. W pracy badawczej skupiono się na następujących problemach:

- Zastosowanie zmiennej prędkości obrotowej wrzeciona do nadzorowania drgań przedmiotów podatnych.
- Tworzenie mapy optymalnych prędkości obrotowych wrzeciona.
- Aktywna redukcji drgań przedmiotów podatnych, w tym wykorzystanie metod symulacji *Hardware-in-the-Loop* do prototypowania algorytmu sterowania.
- Modyfikacja własności dynamicznych przedmiotu obrabianego poprzez zmianę sztywności zamocowania przedmiotu w uchwycie.
- Opracowanie uniwersalnego kontrolno-pomiarowo-symulacyjnego systemu czasu rzeczywistego umożliwiającego realizację badań w w.w. zakresie.
- Identyfikacji parametrów modelu modalnego przedmiotu z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji.

Istotnym problemem spotykanym podczas obróbki mechanicznej jest możliwość wystąpienia drgań samowzbudnych typu *chatter*. Mają one negatywny wpływ na jakość obrabianej powierzchni, trwałość ostrzy skrawających, a w skrajnych przypadkach mogą mieć skutki destrukcyjne w postaci uszkodzenia narzędzia, bądź przedmiotu obrabianego. Jako główną przyczynę ich powstawania zidentyfikowano w latach 60-tych XX w. zjawisko regeneracji śladu oraz występowanie wewnętrznych sprzężeń w układzie obrabiarka-uchwyt-przedmiot obrabiany-narzędzie skrawające. Początkowo wysiłki badaczy skupiły się na modelowaniu tego zjawiska w celu wyznaczenia bezpiecznych parametrów obróbki, w których drgania typu *chatter* nie wystąpią. Później pojawiły się różnorodne metody mające

za zadanie zapobieganie powstaniu tychże drgań lub ich minimalizację w przypadku, gdy już one wystąpiły.

Zaproponowana w pracy doktorskiej metoda nadzorowania drgań przy frezowaniu szybkościowym smukłymi narzędziami polegająca na sterowaniu optymalno-liniowym prędkością obrotową wrzeczona podczas obróbki była skuteczna w przypadku przedmiotów sztywnych. Skuteczność tę stwierdzono na podstawie obniżenia wartości szczytów w widmie amplitudowym drgań oraz wartości skutecznej drgań w stosunku do skrawania ze stałą prędkością obrotową. W publikacjach, które ukazały się po obronie pracy doktorskiej wykazano dodatkowo, że proponowana metoda pozwala nie tylko obniżyć poziom drgań, ale także frezować w obszarze potencjalnie niestabilnym, tzn. takim, w którym zastosowanie stałej prędkości obrotowej narzędzia powodowałoby powstanie drgań samowzbudnych. Dotyczyło to frezowania przy zmiennej prędkości obrotowej w otoczeniu prędkości nominalnych niespełniających wymaganego warunku Liao-Younga (Y. S. Liao i Y. C. Young, 1996). Autorzy ci wykazali, że drganiom *chatter* można zapobiegać odpowiednio dopasowując kąt przesunięcia fazowego pomiędzy kolejnymi przejściami ostrzy skrawających przez identyczne położenia kątowe.

Dalsze prowadzone badania wykazały jednak, że zastosowanie zmiennej prędkości obrotowej jest nieskuteczne w przypadku przedmiotów podatnych. W związku z tym skupiono się na metodach doboru optymalnej, stałej prędkości obrotowej. W tym celu ponownie posłużono się kryterium Liao-Younga. W pracy [C1] wykazano, że dla przypadku, gdy w układzie występują drgania własne o jednej, dominującej postaci, kryterium Liao-Younga, w formie uogólnionej można zapisać jako:

$$\frac{zn_{\alpha}}{60} = \frac{f_{\alpha}}{0,25 + m}, \text{ dla } m = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

gdzie:

- f_{α} – częstotliwość drgań *chatter*,
- n_{α} – optymalna prędkość obrotowa [obr/min],
- z – liczba ostrzy skrawających.

Na tej podstawie można więc łatwo wyznaczyć ciąg optymalnych prędkości obrotowych. W przypadku, gdy w widmie drgań obserwowanych jest wiele dominujących amplitud, zaproponowano podejście zmodyfikowane polegające na poszukiwaniu takiej prędkości obrotowej, dla której reszta z dzielenia całkowitego częstotliwości f_{α} przez częstotliwość $f_i = nz/60$ (częstotliwość wchodzenia ostrzy w materiał) dąży do 0,25. W tym celu opisano funkcję celu $F(n)$, zawierającą sumę ważoną kwadratów tych reszt pomniejszonych o 0,25, którą następnie minimalizowano ze względu na prędkość obrotową n . Czyli:

$$F(n) = \sum_{\alpha=0}^{M-1} w_{\alpha} \left(\frac{60f_{\alpha}}{nz} - \text{Ent} \left(\frac{60f_{\alpha}}{nz} \right) - 0,25 \right)^2 = \min \quad (2)$$

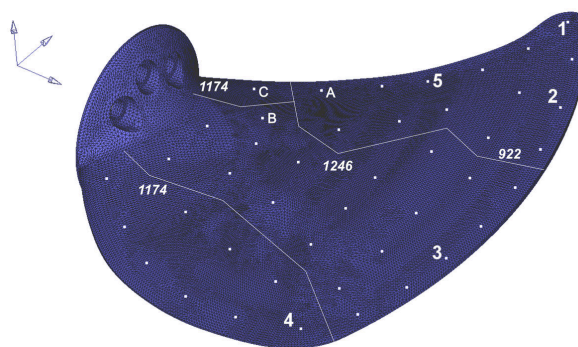
W obu przypadkach wykorzystano dyskretny model układu narzędzie – przedmiot obrabiany – proces skrawania. Składał się on z podukładu modalnego (stacjonarny model podatnego przedmiotu obrabianego), podukładu strukturalnego (niestacjonarny model freza) oraz podukładu łączącego (modelujący proces skrawania z wykorzystaniem proporcjonalnego modelu opisującego siły skrawania). Był więc to model hybrydowy. W pracy [C1] wykazano, że zastosowanie optymalnej prędkości obrotowej pozwala zmniejszyć poziom drgań a co za tym idzie, poprawić jakość obrabianej powierzchni. Jednocześnie stwierdzono, że dobór jednej, uniwersalnej i optymalnej prędkości może być trudny w przypadku występowania w widmie drgań procesu skrawania wielu częstotliwości o dominujących amplitudach. W praktyce, przedmioty obrabiane mają zwykle złożone kształty geometryczne, co oznacza,

że w różnych obszarach powierzchni przedmiotu mogą dominować różne postacie drgań. Biorąc to pod uwagę zaproponowano utworzenie dla przedmiotu obrabianego „mapy” zawierającej optymalne prędkości w poszczególnych obszarach przedmiotu, z punktu widzenia spełnienia warunków (1) lub (2). W pracach [C2] i [C3] zaproponowano następującą procedurę tworzenia mapy optymalnych prędkości obrotowych.

1. Utworzenie modelu dyskretnego MES (Metoda Elementów Skończonych) podatnego przedmiotu obrabianego i wyznaczenie częstotliwości i postaci drgań własnych.
2. Identyfikacja parametrów modelu modalnego przedmiotu z wykorzystaniem metod eksperymentalnej analizy modalnej.
3. Weryfikacja modelu obliczeniowego poprzez ocenę zgodności postaci drgań własnych otrzymanych z modelu obliczeniowego i w drodze identyfikacji eksperymentalnej.
4. Wybór punktów na powierzchni przedmiotu, dla których wyznaczana będzie mapa optymalnych prędkości obrotowych.
5. Wyznaczenie częstotliwościowych funkcji przejścia (FRF) dla wybranych punktów na powierzchni przedmiotu obrabianego.
6. Wybór częstotliwości dla dominujących postaci drgań (na podstawie wartości FRF) w poszczególnych punktach mapy
7. Wyznaczenie optymalnych prędkości obrotowych dla poszczególnych punktów mapy.
8. Zastosowanie wyznaczonych prędkości podczas obróbki przedmiotu.

Przykład wyznaczania mapy wg proponowanej procedury dla podatnego przedmiotu obrabianego – płyta śruby steru strumieniowego – pokazano w pracy [C2] oraz na rys 1.

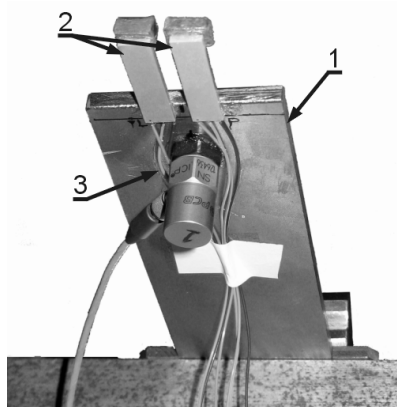
Skuteczność proponowanej metody potwierdziły zarówno badania symulacyjne (nie publikowane) jak i eksperymentalne [C3].



Rys. 1. Płat śruby steru strumieniowego z zaznaczonymi punktami wybranymi na potrzeby tworzenia mapy optymalnych prędkości (białe punkty) oraz wyznaczonymi obszarami stałej, optymalnej prędkości obrotowej (wartości oznaczone kursywą [obr/min]), punkty 1-5 oznaczają miejsca mocowania akceleratorów podczas testów modalnych.

Opisana metoda bazuje na analizie własności modelu modalnego próbki i doborze odpowiedniej prędkości obrotowej narzędzia, która ma zapobiegać wystąpieniu drgań, w szczególności drgań typu *chatter*, podczas obróbki. Nie daje to możliwości aktywnego przeciwdziałania drganiom, w przypadku gdy one już występują. W związku z tym zainteresowania zwrócono w stronę metod aktywnej redukcji drgań. W przypadku metod aktywnych w układzie pojawia się pętla sprzężenia zwrotnego, a co za tym idzie, musi się pojawić także element realizujący zadane wymuszenie zależne od sygnału sterującego. W ramach podjętych prac jako obiekty badań przyjęto przedmioty podatne w postaci płaskich, cienkościennych płytek wykonanych z brązu CC331G o wymiarach (140x50x5 mm). Na

swobodnym końcu przedmiotu podatnego mocowano wzbudnik lub dwa wzbudniki piezoelektryczne typu płytkowego (*bending plate*) wraz z masą sejsmiczną. Przykład konfiguracji stanowiska badawczego w wersji z dwoma wzbudnikami działającymi synchronicznie pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Widok próbki w uchwycie, 1) próbka, 2) wzbudniki, 3) akcelerometr.

Kluczowym elementem w układach aktywnej redukcji drgań jest algorytm wyznaczania sygnału sterującego, który spowoduje redukcję drgań. W prowadzonych badaniach powrócono do wykorzystania koncepcji energetycznego wskaźnika jakości w układzie hybrydowym. Równanie dynamiki sterowanego podukładu modalnego, po transformacji do współrzędnych modalnych, można zapisać jako:

$$\ddot{\mathbf{a}} + 2\mathbf{Z}\Omega\dot{\mathbf{a}} + \Omega^2\mathbf{a} = \mathbf{f}_\Psi + \mathbf{B}_{u\Psi}\mathbf{u}, \quad (3)$$

gdzie:

- $\mathbf{a}$ – wektor współrzędnych modalnych,
 - $\mathbf{u}$ – wektor sygnałów sterujących,
 - $\mathbf{Z}$ – macierz bezwymiarowych współczynników tłumienia,
 - Ω – macierz częstości kołowych drgań własnych,
 - $\mathbf{f}_\Psi = \Psi^T \mathbf{f}$ – wektor sił “modalnych”
 - $\mathbf{B}_{u\Psi} = \Psi^T \mathbf{B}_u$ – macierz sterowań podukładu modalnego,
 - Ψ – $\mathbf{M}$ -ortonormalna macierz wektorów postaci drgań własnych,
- gdzie $\mathbf{M}$ jest macierzą bezwładności podukładu modalnego.

Energetyczny wskaźnik jakości we współrzędnych modalnych opisany jest zależnością:

$$J(t) = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{a}}^T \mathbf{Q}_1 \dot{\mathbf{a}} + \frac{1}{2} \mathbf{a}^T \mathbf{Q}_2 \Omega^2 \mathbf{a} + \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}, \quad (4)$$

gdzie:

- $\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2$ – macierze bezwymiarowych współczynników wagowych,
- $\mathbf{R}$ – macierz wpływu sygnału sterującego.

Wskaźnik ten opisuje energię kinetyczną, potencjalną oraz energię sygnału sterującego w układzie i jest minimalizowany ze względu na sygnał sterujący:

$$\mathbf{u} = -\mathbf{R}^{-1} \left\{ \mathbf{B}_u^T \Psi \left[\mathbf{S}(t-t_0) \mathbf{Q}_1 \dot{\mathbf{a}} + \mathbf{C}(t-t_0) \Omega^{-2} \mathbf{Q}_2 \mathbf{a} \right] \right\}, \quad (5)$$

gdzie:

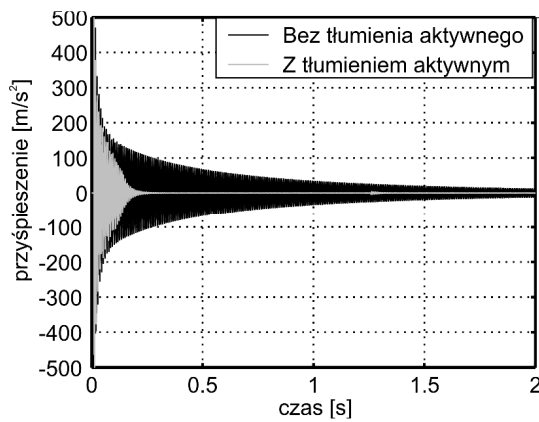
$$\mathbf{S}(t-t_0) = \text{diag} \left[\frac{1}{\omega_{0i}} \sin(\omega_{0i}(t-t_0)) \right], i = 1, \dots, i_{mod},$$

$$\mathbf{C}_m(t-t_0) = \text{diag} [1 - \cos(\omega_{0i}(t-t_0))], i = 1, \dots, i_{mod}.$$

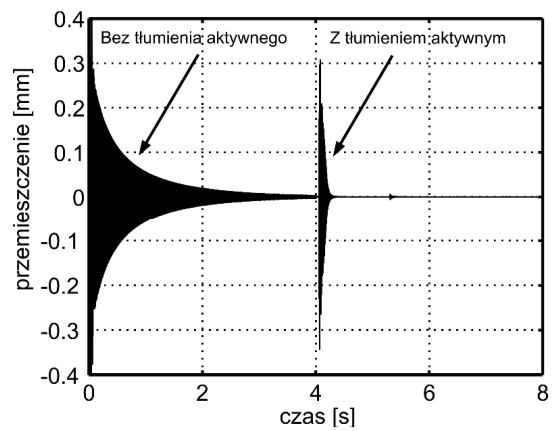
Ponieważ wpływ energii potencjalnej drgań na wartości sygnału sterującego jest pomijalny oraz przyjmuje się, że $t_0=0$ – równanie (5) można zapisać w uproszczonej postaci [C4]:

$$\mathbf{u} = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}_u^T \Psi \Omega^{-1} \text{diag} [\sin(\omega_{0i} t)]_{i_{mod} \times i_{mod}} \mathbf{Q}_1 \dot{\mathbf{a}}. \quad (6)$$

Weryfikacja eksperymentalna proponowanej metody polegała na wzbudzeniu drgań własnych przedmiotu podatnego (rys. 2) i aktywnej ich redukcji. Na rys. 3 i 4 pokazano przykładowe wyniki badań, które potwierdziły, że proponowana metoda pozwala uzyskać znaczącą redukcję drgań. Bezwymiarowy współczynnik tłumienia wzrastał od 10 do 13 razy po włączeniu układu aktywnego.



Rys. 3. Przyspieszenia swobodnego końca próbki dla przypadku z i bez aktywnego tłumienia drgań.



Rys. 4. Przesunięcia swobodnego końca próbki dla przypadku bez (pierwsze uderzenie) i z aktywnym tłumieniem drgań (drugie uderzenie).

Realizacja aktywnej redukcji drgań z wykorzystaniem proponowanej metody wymaga całkowania sygnału przyspieszeń pochodzącego z akcelerometrów. Napotyka się przy tym na pewne trudności związane m.in. w wprowadzaniu przesunięć w czasie filtrowania i całkowania sygnału. W związku z tym zmodyfikowano wykorzystywane zależności tak, aby możliwe było bezpośrednie wykorzystanie sygnału przyspieszeń drgań [C5]:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{u}_{t+\Delta t} &= -(\mathbf{R}_{t+\Delta t} + \mathbf{R}_{t+\Delta t}^T)^{-1} \mathbf{B}_{t+\Delta t}^T \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{A}_{t+\Delta t}^T \frac{\Delta t^{(k+2)}}{k!} \cdot (\mathbf{Q}_{t+\Delta t} + \mathbf{Q}_{t+\Delta t}^T) \cdot \dot{\mathbf{x}}_t = \\ &= -\underbrace{(\mathbf{R}_{t+\Delta t} + \mathbf{R}_{t+\Delta t}^T)^{-1} \mathbf{B}_{t+\Delta t}^T \cdot \overline{\Phi}_{t+\Delta t}^T}_{\mathbf{K}_C} \cdot (\mathbf{Q}_{t+\Delta t} + \mathbf{Q}_{t+\Delta t}^T) \cdot \dot{\mathbf{x}}_t \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie:

$$\overline{\Phi}_{t+\Delta t}^T = \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{A}_{t+\Delta t}^T \frac{\Delta t^{(k+2)}}{k!},$$

$\mathbf{A}$ – macierz stanu,

$\mathbf{R}$ – macierz wpływu sygnału sterującego,

$\mathbf{Q}$ – macierz bezwymiarowych współczynników wagowych,

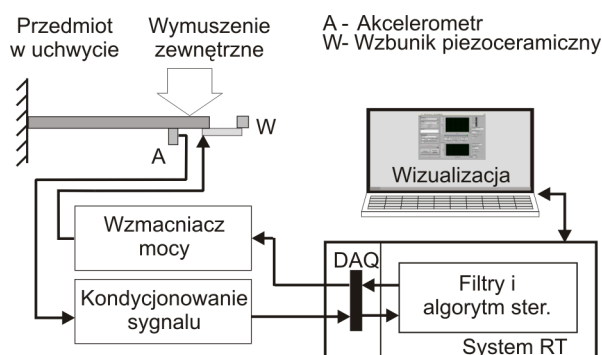
t – czas,

Δt – okres próbkowania,

$\mathbf{K}_C$ – macierz wzmocnień sterownika.

Eksperymentalną weryfikację rezultatów proponowanej metody rozpoczęto od przypadku redukcji drgań wymuszonych impulsowo, tj. dla konfiguracji analogicznej jak poprzednio (rys. 2). Uzyskano również podobne rezultaty (tj. m.in. około 13-krotne zwiększenie wartości bezwymiarowego współczynnika tłumienia układu).

Zasadniczym celem prowadzonych prac badawczych było opracowanie metod redukcji drgań podczas frezowania. W przypadku opisywanej metody aktywnej redukcji drgań wykazano jej skuteczność przy pobudzeniach impulsowych. Kolejnym, naturalnym krokiem było więc jej zastosowanie dla przypadku obróbki podatnego przedmiotu. Zanim podjęto badania eksperymentalne w warunkach rzeczywistego frezowania, przeprowadzono obszernie badania z wykorzystaniem techniki symulacji *Hardware-in-the-Loop* (HIL) prowadzonych w czasie rzeczywistym. Technika symulacji *Hardware-in-the-Loop* charakteryzuje się tym, że w czasie symulacji przynajmniej część struktury mechanicznej lub kontrolowanego procesu jest emulowana. Dzięki takiemu podejściu możliwe jest przyspieszenie procesu implementacji oprogramowania i algorytmu sterującego oraz dostrajania ich parametrów. Możliwa jest także szybka i tania weryfikacja wpływu poszczególnych parametrów układu sterowania na rezultaty jego działania. Metoda pozwala także zredukować koszty badań, np. ze względu na brak potrzeby uzyskania dostępu do frezarki, brak zużycia materiału, mniejsze prawdopodobieństwo uszkodzenia wzbudników piezoelektrycznych itp. W prezentowanych badaniach rzeczywistymi komponentami systemu był układ kontrolno-pomiarowy (system czasu rzeczywistego), przedmiot, czujnik (akcelerometr) i wzbudniki piezoelektryczne. Narzędzie oraz proces skrawania były emulowane. Schemat systemu pokazano na rys. 5.



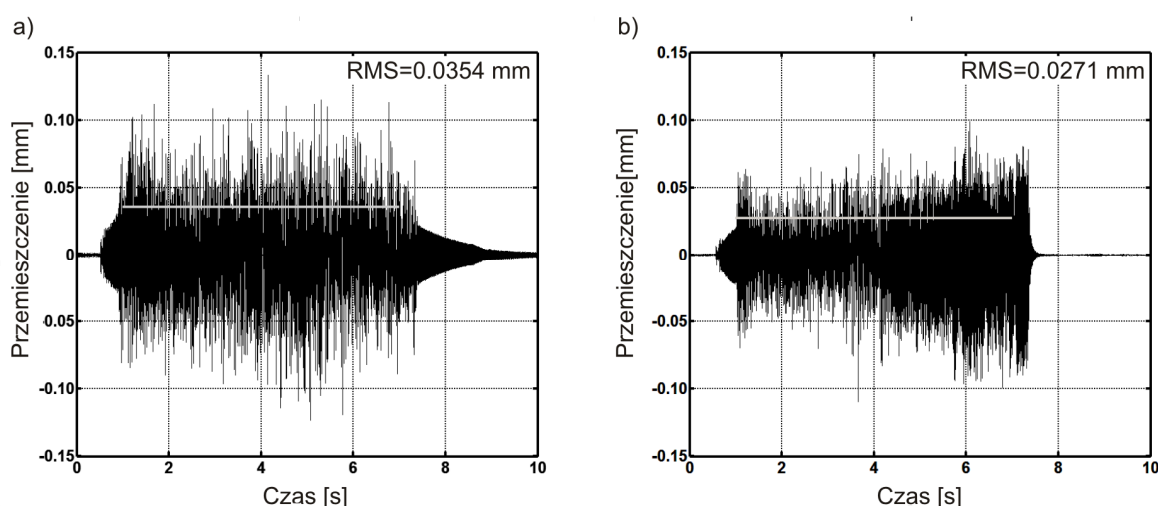
Rys. 5. Schemat systemu kontrolno-pomiarowo-symulacyjnego czasu rzeczywistego do badań metod aktywnej redukcji drgań [C6].

Głównym elementem systemu jest komputer przemysłowy w standardzie PXI, który wyposażony został w kartę przetworników A/C i C/A i działa pod kontrolą systemu LabView RealTime. Programowanie systemu odbywa się w środowisku LabView. Dodatkowo, do celów programowania oraz wizualizacji procesu pomiaru i sterowania wykorzystywany jest komputer PC połączony z komputerem PXI poprzez sieć ethernet. Sterowanie systemem realizowane jest z wykorzystaniem dwóch autorskich aplikacji. Pierwsza z nich uruchomiona jest na komputerze PXI i odpowiedzialna jest za obsługę akwizycji danych (karty A/C), realizację algorytmu sterowania, wysłanie sygnału sterującego do karty C/A i rejestrację danych. Drugi z programów, uruchomiony jest na komputerze PC i służy do konfiguracji pomiaru, zdalnego sterowania pracą programu uruchomionego na komputerze PXI oraz do bieżącej obserwacji przebiegu procesu. Organizacja całego systemu opisana została w publikacji [C6]. Warto przy tym zaznaczyć, że na potrzeby systemu utworzono oryginalne oprogramowanie autorskie dostosowane do specyfiki prowadzonych badań. Jednocześnie uzyskano znaczną uniwersalność całego systemu. Wielokrotnie wykazał on swoją dużą

przydatność w różnorodnych zadaniach pomiarowych, także niezwiązanych bezpośrednio z prowadzonymi przez autora badaniami. Potwierdza to słuszność przyjętej koncepcji jego budowy oraz zastosowanych rozwiązań sprzętowych i programistycznych.

W celu przetestowania i dostrojenia parametrów algorytmu aktywnej redukcji drgań, przeprowadzono z wykorzystaniem techniki HIL szereg różnorodnych symulacji. Polegały one na pobudzaniu przedmiotu kilkoma rodzajami sygnałów, np. różne rodzaje szumu i sygnały złożone z sygnałów sinusoidalnych odwzorowujących dominujące pobudzenia w czasie obróbki skrawaniem przedmiotu. Badania te miały między innymi na celu dobranie optymalnych nastaw całego toru pomiarowego i algorytmu sterowania (np. rodzaje i rzędy filtrów, współczynniki w algorytmie, wzmocnienia sygnałów), sprawdzenie możliwych do uzyskania rezultatów redukcji drgań, sprawdzenie, czy występują obszary częstotliwości sygnałów, dla których (ze względu na wprowadzane podczas przetwarzania sygnałów przesunięcia fazowe) występuje wzmocnienie drgań zamiast ich redukcji, itp. Rezultaty tych badań zawarte są m.in. w publikacjach [C4, C5, C6].

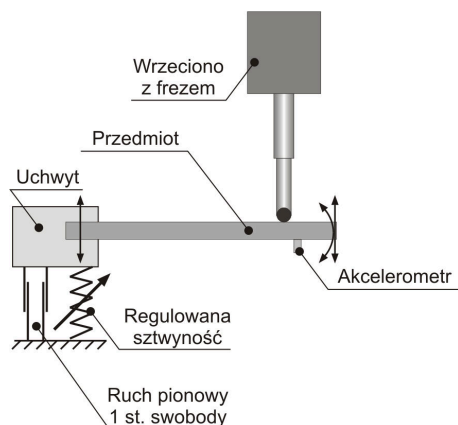
Proponowana metoda redukcji drgań została zastosowana i zweryfikowana eksperymentalnie. W tym celu system kontrolno-pomiarowy (ten sam, który wykorzystywano podczas symulacji HIL) zainstalowano wraz z przedmiotem obrabianym na frezarskim centrum obróbkowym i wykonano próby podczas rzeczywistego procesu obróbkowego. W rezultacie zaobserwowano ponad 30% redukcji wartości skutecznej przemieszczeń swobodnego końca przedmiotu obrabianego [C4, C5, C6]. Przykładowy wynik pokazano na rys. 6.



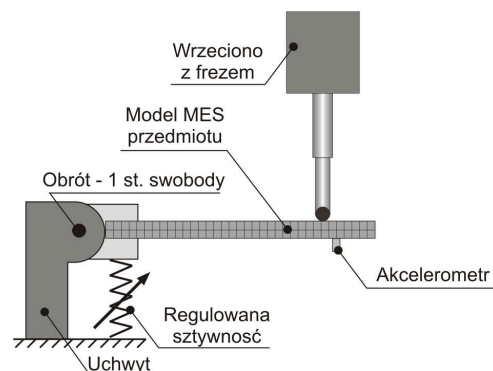
Rys. 6. Drgania przedmiotu podanego podczas obróbki w przypadku a) braku sterowania b) z włączonym układem aktywnej redukcji drgań.

Zastosowanie metod aktywnej redukcji drgań, choć obiecujące, okazało się przysparzać wielu problemów. Przede wszystkim, prowadzenie badań eksperymentalnych skutkowało ponoszeniem relatywnie wysokich kosztów, ze względu na częste awarie wzbudników piezoelektrycznych. Ponadto, konieczność mocowania wzbudników i czujników do obrabianych elementów mogłaby być problematyczna w warunkach przemysłowych, np. uniemożliwiałaby obróbkę fragmentów powierzchni przedmiotu. Ze względu na okablowanie utrudnione byłoby też operowanie przedmiotem i prowadzenie narzędzia w jego pobliżu. W związku z tym powrócono do koncepcji wykorzystania optymalnej prędkości obrotowej bazującej na wykorzystaniu kryterium Liao-Younga. Jak już wspomniano, wykazano skuteczność tego podejścia i opracowano procedury pozwalające je efektywnie wykorzystać (np. poprzez tworzenie map optymalnej prędkości obrotowej). Założeniem nowej koncepcji była eliminacja jednej z niedogodności polegającej na tym, że w wyniku

zastosowania zależności (1) otrzymuje się pewien ciąg optymalnych prędkości obrotowych. Zwykle wartości dwóch pierwszych prędkości różnią się dość znacznie od siebie (np. 10000 i 2000 obr/min dla $f_a = 83$ Hz i $z = 2$). W takim przypadku może się okazać, że jeśli nie można uzyskać na dostępnym centrum obróbkowym pierwszej z wyznaczonych prędkości (w tym przypadku 10000 obr/min), druga, choć optymalna (w tym przypadku 2000 obr/min), może nie pozwalać wykorzystać w pełni możliwości operacyjnych frezarki. Biorąc to pod uwagę zaproponowano skonstruowanie uchwytu podatnego o regulowanej sztywności zamocowania. Częstotliwość drgań typu *chatter* jest zwykle bliska częstotliwości pierwszej dominującej postaci drgań własnych układu. Wprowadzając dodatkowy element podatny do systemu „dodawana” jest nowa postać jego drgań. Jest to jednak w tym przypadku postać, której częstotliwość można w pewnym zakresie zmieniać poprzez zmiany sztywności podparcia uchwytu. Dzięki temu możliwe jest takie dopasowanie tej sztywności, a co za tym idzie częstotliwości drgań własnych układu, aby dowolna (w zakresie ograniczonym możliwościami regulacji uchwytu) prędkość obrotowa była optymalna z punktu widzenia kryterium Liao-Younga. Dzięki temu możliwe jest zadanie arbitralnie wybranej prędkości obrotowej wrzecionu i spowodowanie, aby była ona prędkością optymalną. Początkowo zaproponowano uchwyt o konstrukcji, w której ruchomy jego fragment może wykonywać ruch w kierunku pionowym. Schemat ideowy rozwiązania pokazano na rys. 7. Wyniki symulacji [C7] potwierdzają możliwość uzyskania zamierzonych efektów w postaci doboru sztywności optymalnej dla przyjętej wcześniej prędkości obrotowej narzędzia. Po przeprowadzeniu dalszych symulacji (m.in. zastąpiono prosty model przedmiotu w postaci belki Eulera-Bernoulliego modelem MES złożonym z przestrzennych elementów izoparametrycznych) zaproponowano inną wersję uchwytu z ruchomym fragmentem wykonującym ruch obrotowy. Schemat ideowy rozwiązania pokazano na rys. 8. Symulacje wykazały także, że wybór prędkości zadanej nie może być w pełni dowolny zwłaszcza w przypadku, gdy w układzie występuje więcej niż jedna istotna postać drgań własnych. Ponadto, częstotliwość obrotów narzędzia oraz jej częstotliwości harmoniczne nie mogą być bliskie częstotliwościom drgań własnych tych postaci, ponieważ następuje wówczas wzbudzenie drgań wymuszonych.



Rys. 7. Schemat ideowy uchwytu podatnego - wersja z ruchem w kierunku pionowym [C7].



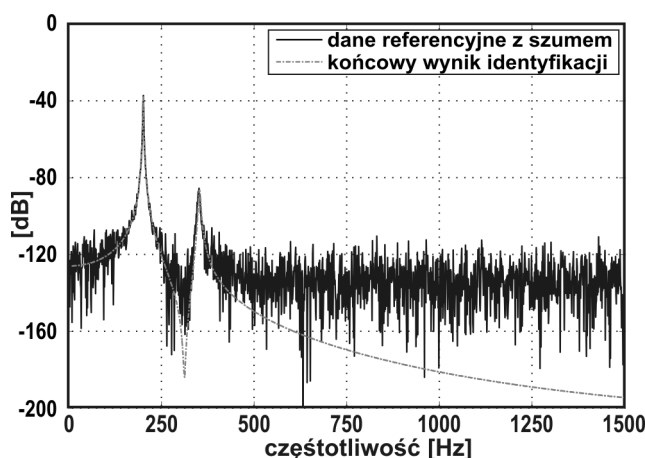
Rys. 8. Schemat ideowy uchwytu podatnego - wersja z ruchem obrotowym.

We wszystkich prezentowanych dotychczas metodach konieczne lub zalecane było zidentyfikowanie częstotliwości i współczynnika tłumienia drgań własnych przedmiotu obrabianego. W tym celu wykorzystywane były metody pośrednie eksperymentalnej analizy modalnej. Standardowo stosowane były np. metody: ERA (*Eigensystem Realisation Algorithm*), p-LSCF(d) (*poly-reference Least Squares Complex Frequency domain*, znana także, jako *PolyMAX*), LSCE (*Least Squares Complex Exponential*), ITD (*Ibrahim Time*

Domain). W pewnych sytuacjach (np. w obecności niektórych rodzajów zakłóceń oraz przy krótkim czasie trwania użytecznego, rejestrowanego sygnału drgań) niektóre z tych metod (np. LSCE) nie pozwalały na uzyskanie poprawnych wyników. Ponadto, metoda LSCE wykazywała dużą czułość na zmianę parametrów identyfikacji (np. wybór przedziału czasu obserwacji drgań), której rezultatem były istotne rozbieżności w wynikach przy niewielkiej zmianie wartości tych parametrów. Z tego powodu podjęto próby utworzenia alternatywnego algorytmu identyfikacji wybranych parametrów modelu modalnego. Uwagę zwrócono przy tym w kierunku algorytmów Sztucznej Inteligencji (SI), a w szczególności na algorytm *Particle Swarm Optimization* (algorytm optymalizacji roju cząsteczek - PSO). Podyktowane to było chęcią wykorzystania własności typowo wykazywanych przez algorytmy SI, tj. m.in. odporności na zakłócenia i niepewność danych, a także ze względu na prostotę algorytmu PSO i jego przewagę nad niektórymi algorytmami SI, np. algorytmem genetycznym. Jednocześnie warto zaznaczyć, że chociaż algorytmy SI znalazły zastosowanie np. w identyfikacji strukturalnej, to w literaturze nie ma przykładów zastosowania ich do identyfikacji parametrów modelu modalnego. W takich zadaniach pełnią niekiedy co najwyżej rolę pomocniczą, np. w automatycznej analizie diagramów stabilizacyjnych wyznaczonych innymi metodami.

Proponowana metoda, oparta na algorytmie PSO, polega na zastosowaniu dwuetapowego algorytmu identyfikacji. W pierwszym etapie identyfikowana jest częstotliwość drgań własnych, zwykle z bardzo dobrym przybliżeniem, natomiast bezwymiarowy współczynnik tłumienia identyfikowany jest z dużym błędem. Wyniki końcowe pierwszego etapu zostają następnie wykorzystane do lepszego oszacowania współczynnika tłumienia. Wyniki identyfikacji są poprawiane w drugim etapie identyfikacji. Na jego końcu otrzymuje się zidentyfikowaną częstotliwość drgań własnych (z bardzo małym błędem) oraz wartość bezwymiarowego współczynnika tłumienia (z małym błędem). Początkowo algorytm przetwarzał dane pomiarowe w dziedzinie czasu [C8]. Jednym z najważniejszych elementów podczas tworzenia algorytmu było zdefiniowanie odpowiedniej funkcji celu pozwalającej na ocenę jakości potencjalnych rozwiązań znajdujących w czasie działania algorytmu (kluczowym elementem jest tu wykorzystanie funkcji korelacji) oraz opracowanie metody wykorzystania wstępnych wyników identyfikacji z pierwszego etapu algorytmu do przygotowania poprawionych oszacowań wyników dla etapu drugiego (przegrupowanie cząsteczek). O ile sama idea przegrupowania jest znana z literatury, o tyle wykorzystanie przy tym fizycznych własności badanego obiektu jest rozwiązaniem autorskim [C8, C9]. Istotnym ograniczeniem algorytmu była jednak możliwość jego stosowania do systemów z jedną dominującą postacią drgań. W dalszym etapie prac nad algorytmem podjęto próbę jego rozszerzenia tak, aby możliwa była identyfikacja wielu częstotliwości drgań własnych. Okazało się jednak, że realizacja tego zadania w dziedzinie czasu napotkała na istotne trudności. W związku z tym zaproponowano nowy algorytm nazwany smiPSO (*Spectrum-based Modal Parameters Identification with Particle Swarm Optimisation*), w którym pierwszym etapem jest identyfikacja jednej z dominujących częstotliwości drgań własnych w dziedzinie częstotliwości. Następnie sygnał pomiarowy, rejestrowany w dziedzinie czasu, jest filtrowany i odbywa się szacowanie współczynnika tłumienia dla zidentyfikowanej częstotliwości. Procedura jest powtarzana dla kolejnych częstotliwości drgań. Końcowym etapem algorytmu jest wspólna identyfikacja wszystkich częstotliwości drgań, bezwymiarowych współczynników tłumienia oraz amplitud poszczególnych postaci drgań własnych [C9]. Na rys. 9 pokazano przykładowy wynik identyfikacji dla danych zakłóconych znacznym szumem. W widmie sygnału wygenerowanego na podstawie zidentyfikowanych parametrów modelu modalnego widoczne są dwa szczyty nakładające się na szczyty widma sygnału odniesienia. Średnie wartości zidentyfikowanych przez algorytm parametrów nie odbiegają od wartości referencyjnych (tj. wynikających z sygnału odniesienia) o więcej niż

2,5% w przypadku częstotliwości i więcej niż 10% w przypadku tłumienia. Są to błędy mniejsze, niż w przypadku innych porównywanych metod identyfikacji. Warto dodać, że w prezentowanym przykładzie niektóre z tych metod ogóle nie były w stanie w miarodajny sposób oszacować parametrów drugiej postaci drgań.



Rys. 9. Przykładowy wynik identyfikacji algorytmem miPSO dla danych zakłóconych szumem.

Proponowany algorytm może być stosowany, jako alternatywny lub uzupełniający do innych algorytmów analizy modalnej, w przypadku prostych układów z wyraźne odseparowanymi częstotliwościami drgań własnych (ze względu na ograniczenia wynikające z wymagań w zakresie filtrowania sygnałów). Jego zaletą jest większa odporność na wybór parametrów identyfikacji i zakłócenia występujące w sygnale pomiarowym w porównaniu z innymi, wybranymi algorytmami, co wykazano w pracach [C8, C9]. Ograniczeniem algorytmu w jego obecnej wersji jest brak możliwości identyfikacji postaci drgań. Jednakże, algorytm wyznacza amplitudy drgań, co po jego uzupełnieniu o detekcję kąta fazowego pozwoli także na identyfikację tej postaci. Planowane jest także rozwinięcie sposobu łączenia podczas identyfikacji danych pochodzących z wielu kanałów. Zaproponowany algorytm, chociaż wykorzystuje algorytm PSO, jest wynikiem badań autorskich.

Za najistotniejszy autorskie osiągnięcia w dziedzinie nauk technicznych uważam:

- potwierdzenie skuteczności nadzorowania procesu frezowania przedmiotów podatnych z wykorzystaniem optymalnej prędkości obrotowej wrzeciona, dobieranej na bazie uogólnionego oraz zmodyfikowanego kryterium Liao-Younga;
- współdział w opracowaniu metody tworzenia mapy optymalnych prędkości obrotowych podczas frezowania przedmiotów podatnych, oraz eksperymentalnej weryfikacji jej przydatności;
- modyfikację metody sterowania optymalnego przy energetycznym wskaźniku jakości ze sprzężeniem od przyspieszeń, opracowanie metody symulacji HIL w celu prototypowania algorytmu wykorzystującego zmodyfikowaną metodę sterowania, a także – praktyczną implementację tego algorytmu wraz z jego weryfikacją eksperymentalną;
- opracowanie i budowę uniwersalnego systemu kontrolno-pomiarowo-symulacyjnego czasu rzeczywistego, umożliwiającego realizację badań doświadczalnych metod redukcji drgań;
- opracowanie metody identyfikacji parametrów modelu modalnego przedmiotu podatnego z wykorzystaniem algorytmu optymalizacji roju cząsteczek.

3.3. Wykaz publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego

- [C1] Kaliński K., **Galewski M.**, 2015, Optimal Spindle Speed Determination for Vibration Reduction During Ball-End Milling of Flexible Details, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 92, ss. 19-30
- [C2] Kaliński K., Mazur M., **Galewski M.**, 2013, Optimal Spindle Speed Map for Chatter Vibration Reduction During Milling of Bow Thruster Blade, Solid State Phenomena, Vol. 198, ss. 686-691
- [C3] Kaliński K., **Galewski M.**, Mazur M., 2014, High Speed Milling vibration surveillance with optimal spindle speed based on optimal speeds map, Key Engineering Materials, vol. 597, ss. 125-130
- [C4] Kaliński K., **Galewski M.**, 2014, Vibration Surveillance Supported by Hardware-In-the-Loop Simulation in Milling of Flexible Workpieces, Mechatronics, vol. 24, ss. 1071-1082
- [C5] Kaliński K., **Galewski M.**, 2015, A Modified Method of Vibration Surveillance with a Use of the Optimal Control at Energy Performance Index, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 58-59, ss. 41-52
- [C6] **Galewski M.** 2012, System kontrolno-pomiarowo-symulacyjny czasu rzeczywistego do badań metod aktywnej redukcji drgań, Pomiar Automatyka Kontrola, Vol. 58, ss. 840-843
- [C7] Kaliński K. J., Chodnicki M., Mazur M. R., **Galewski M. A.**, 2014 Vibration surveillance system with variable stiffness holder for flexible details milling, W: Applied Non-Linear Dynamical Systems, Springer Proceedings in Mathematics and Statistics, vol. 93, ss. 175-184
- [C8] **Galewski M.**, 2014. Modal parameters identification with Particle Swarm Optimization, Key Engineering Materials, vol. 597, ss.119-124
- [C9] **Galewski M.A.**, 2015/16 (planowane), Spectrum-based Modal Parameters Identification with Particle Swarm Optimisation, Mechatronics, (przyjęty do publikacji, DOI: 10.1016/j.mechatronics.2015.11.006)