

Załącznik III do wniosku

Dr inż. Marek Magdziak

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza

Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

AUTOREFERAT

Autoreferat

1. Imię i nazwisko.

Marek Magdziak

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

- Stopień doktora

Dyplom doktora – załącznik nr 1

Dziedzina: nauki techniczne

Dyscyplina: Budowa i eksploatacja maszyn

Data uzyskania stopnia: 16.05.2012 r.

Tytuł pracy doktorskiej: Metoda pomiaru powierzchni swobodnych na obrabiarce sterowanej numerycznie

Podmiot nadający: Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

Promotor: dr hab. inż. Andrzej Kawalec

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Józef Gawlik, prof. dr hab. inż. Paweł Piotr Pawlus

Praca doktorska została wyróżniona (załącznik nr 1).

- Studia doktoranckie

Świadectwo ukończenia studiów doktoranckich – załącznik nr 2

Dziedzina: nauki techniczne

Dyscyplina: Budowa i eksploatacja maszyn

Okres odbywania studiów: 1.10.2004 r. – 22.09.2008 r.

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza

Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

- Studia magisterskie

Dyplom ukończenia studiów magisterskich – załącznik nr 3

Kierunek studiów: Mechanika i budowa maszyn

Specjalność: komputerowe wspomaganie procesów technologicznych

Okres odbywania studiów: 1.10.1999 r. – 11.05.2004 r.

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza

Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

- 2012 – do chwili obecnej

Adiunkt
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Katedra Technik Wytwarzania i Automatyzacji

- 2005 – 2012

Asystent
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Katedra Technik Wytwarzania i Automatyzacji

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy.

Jako osiągnięcie naukowe wskazuję jednotematyczny cykl publikacji zatytułowany „Wybrane zagadnienia planowania strategii stykowych pomiarów współrzędnościowych powierzchni krzywoliniowych wyrobów”, który składa się z następujących artykułów:

1. Magdziak M.: An Algorithm of Form Deviation Calculation in Coordinate Measurements of Free-Form Surfaces of Products. *Strojnicki vestnik – Journal of Mechanical Engineering* 2016, 62(1), 51-59. IF 0.914, MNiSW 20 pkt. (załącznik nr 4)
2. Magdziak M.: A Comparison of Selected Algorithms of Form Deviation Calculation. *Tehnički vjesnik* 2018, 25(5), 1389-1394. IF 0.644, MNiSW 20 pkt. (załącznik nr 5)
3. Magdziak M. (90 %), Kawalec A. (10 %): The accuracy of calculating form deviations of selected free-form surfaces. *Mechanik* 2017, 90(11), 1035-1037. MNiSW 11 pkt. (artykuł, oświadczenia habilitanta i współautora o wkładzie pracy – załącznik nr 6)
4. Magdziak M.: The influence of a number of points on results of measurements of a turbine blade. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology* 2017, 89(6), 953-959. IF 0.753, MNiSW 20 pkt. (załącznik nr 7)
5. Magdziak M.: Pomiary promieni krawędzi natarcia i spływu pióra łopatki. *Mechanik* 2016, 89(11), 1668-1669. MNiSW 11 pkt. (załącznik nr 8)
6. Magdziak M.: Selection of the Best Model of Distribution of Measurement Points in Contact Coordinate Measurements of Free-Form Surfaces of Products. *Sensors* 2019, 19(24), 5346. IF₂₀₁₈ 3.031, MNiSW 100 pkt. (załącznik nr 9)
7. Magdziak M.: A New Method of Distribution of Measurement Points on Curvilinear Surfaces of Products. *Sensors* 2019, 19(12), 2667. IF₂₀₁₈ 3.031, MNiSW 100 pkt. (załącznik nr 10)
8. Magdziak M. (70 %), Ziąja D. (30 %): Software Dedicated to Determining a Strategy of Coordinate Measurements. *Materials Science Forum* 2019, 957, 179-186. MNiSW 20 pkt. (artykuł, oświadczenia habilitanta i współautorki o wkładzie pracy – załącznik nr 11)
9. Kawalec A. (50 %), Magdziak M. (50 %): The selection of radius correction method in the case of coordinate measurements applicable for turbine blades. *Precision Engineering* 2017, 49, 243-252. IF 2.582, MNiSW 30 pkt. (artykuł, oświadczenia habilitanta i współautora o wkładzie pracy – załącznik nr 12)

Cykl publikacji tworzy dziewięć artykułów naukowych, które dotyczą współrzędnościowej techniki pomiarowej. Jestem jedynym autorem sześciu wymienionych artykułów oraz głównym współautorem dwóch publikacji. W przypadku jednego artykułu wkład dwóch współautorów w jego powstanie był równy. Sześć wymienionych artykułów jest indeksowanych w bazie Web of Science, a dodatkowo jedna z prac znajduje się także w bazie Scopus. W cykl publikacji wchodzi także dwa artykuły, które w roku ich opublikowania były na liście B wydanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego i każdy z nich posiadał 11 punktów.

Pomiary współrzędnościowe wyrobów charakteryzujących się zróżnicowanym kształtem geometrycznym są obecnie powszechnie stosowane w praktyce przemysłowej. Tego rodzaju pomiary są nieodłączną częścią nowoczesnego procesu wytwarzania wyrobów. Czas realizacji zadań pomiarowych wykonywanych z użyciem współrzędnościowych systemów pomiarowych jest częścią całkowitego czasu procesu produkcyjnego wyrobu. W związku z tym celem zwiększenia wydajności procesów wytwarzania wyrobów dąży się obecnie do minimalizacji czasu oraz wzrostu dokładności pomiarów współrzędnościowych produktów.

Pomiary współrzędnościowe mogą być przeprowadzane dla wyrobów składających się z powierzchni krzywoliniowych, bądź charakteryzujących się regularnymi kształtami geometrycznymi. Powierzchnie swobodne są bardzo często stosowane z uwagi na m.in. ich wysokie walory estetyczne. Przykładami mierzonych wyrobów, które posiadają powierzchnie swobodne są np. produkty przemysłu motoryzacyjnego, lotniczego, stocznioowego i medycznego. Pomiary tego rodzaju przedmiotów mogą być realizowane w trybach stykowym i bezstykowym za pomocą np. współrzędnościowych maszyn pomiarowych (WMP), ramion pomiarowych, systemów fotogrametrycznych i tomografów komputerowych. Najpopularniejszymi współrzędnościowymi systemami pomiarowymi są jednak wciąż WMP, które mogą być wyposażone zarówno w stykowe, jak i bezstykowe głowice pomiarowe, umożliwiające pomiary współrzędnościowe w dwóch wymienionych trybach pomiarów. W przypadku konieczności uzyskania małej niepewności pomiaru oraz podczas pomiarów wyrobów charakteryzujących się małymi tolerancjami zadania pomiarowe wykonywane za pomocą WMP są nadal realizowane w trybie stykowym, który zapewnia wyższą dokładność pomiarów w porównaniu do pomiarów bezstykowych. Głównymi zaletami współrzędnościowych maszyn pomiarowych są ich bardzo wysoka dokładność pomiarowa oraz uniwersalność, która umożliwia zastosowanie WMP w przypadku pomiarów współrzędnościowych realizowanych dla szerokiej gamy produktów cechujących się różnym poziomem złożoności geometrycznej.

Planując pomiary współrzędnościowe wyrobów należy zwrócić uwagę na szereg różnych czynników decydujących o finalnej dokładności tego rodzaju pomiarów. Przykładowo, użytkownik współrzędnościowej maszyny pomiarowej musi zaplanować właściwą strategię pomiarową w celu uzyskania wysokiej dokładności pomiarowej oraz przeprowadzenia pomiarów w możliwie jak najkrótszym czasie. Strategia pomiarów wyrobów jest definiowana przed rozpoczęciem rzeczywistego pomiaru współrzędnościowego, na etapie planowania zadań pomiarowych i jest ona nieodłącznym elementem każdego programu pomiarowego sterującego pracą współrzędnościowych maszyn pomiarowych.

Wiedza w zakresie planowania strategii stykowych pomiarów współrzędnościowych wyrobów stanowi podstawę do zwiększenia efektywności tego rodzaju pomiarów przez zmniejszenie niepewności pomiaru oraz skrócenie czasów realizacji zadań pomiarowych. Ponadto, umiejętność planowania właściwej strategii pomiarowej umożliwia programowanie pomiarów współrzędnościowych wyrobów już w początkowych etapach ich procesów wytwarzania, np. podczas tworzenia dokumentacji technologicznej, w tzw. trybie off-line

programowania WMP. Przyczynia się to do znacznego odciążenia współrzędnościowych maszyn pomiarowych w wyniku minimalizacji konieczności programowania zadań pomiarowych w trybie on-line.

Motywacją do podjęcia badań dotyczących strategii pomiarów współrzędnościowych wyrobów składających się z powierzchni krzywoliniowych jest: konieczność częstego przeprowadzania pomiarów złożonych geometrycznie powierzchni wyrobów w praktyce przemysłowej, istnienie bardzo dużego wpływu przyjętych parametrów strategii pomiarowej na ostateczne wyniki pomiarów współrzędnościowych oraz ciągłe dążenie do minimalizacji czasu realizacji zadań pomiarowych w celu ograniczenia czasu wytwarzania wyrobów. Zmniejszenie czasu przeprowadzania pomiarów współrzędnościowych oraz zwiększanie ich dokładności może przyczynić się do wzrostu produktywności procesów wytwarzania wyrobów.

Zaprezentowany jednotematyczny cykl publikacji dotyczy wybranych elementów strategii stykowych pomiarów współrzędnościowych powierzchni krzywoliniowych. W ramach wskazanego cyklu prac przeanalizowano różne metody obliczania odchyłek kształtu oraz współrzędnych skorygowanych punktów pomiarowych, które są generowane na podstawie ich zaobserwowanych odpowiedników w procesie korekcji promieniowej, i określono ich wpływ na końcowe rezultaty pomiarów współrzędnościowych powierzchni swobodnych. Ponadto, zwrócono także uwagę na istotny wpływ prędkości pomiarowej i liczby punktów pomiarowych, przyjętych podczas realizacji stykowych pomiarów skaningowych, na wyniki pomiarów współrzędnościowych powierzchni krzywoliniowych. Dodatkowo, we wskazanym cyklu artykułów zaprezentowano zupełnie nowe metody obliczania zarówno odchyłek kształtu, jak i definiowania lokalizacji punktów pomiarowych na powierzchniach krzywoliniowych mierzonych produktów.

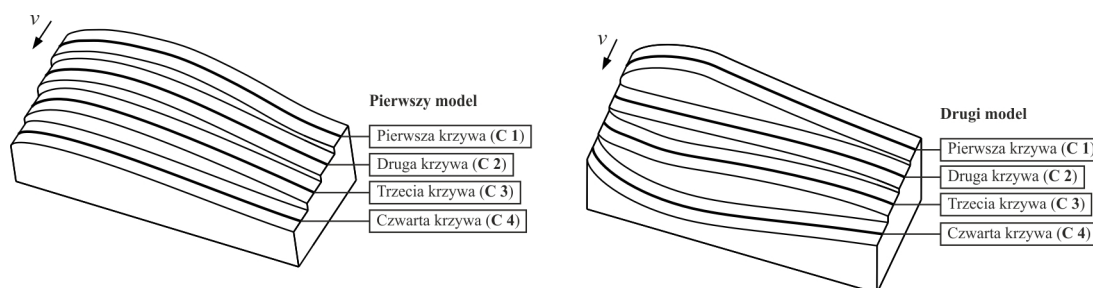
Pierwsze trzy artykuły [1-3] zaprezentowanego cyklu publikacji dotyczą głównie prezentacji nowej metody obliczania odchyłek kształtu, jej weryfikacji numerycznej i eksperymentalnej oraz porównania zaproponowanej metody do istniejących, komercyjnych metod oceny jakości wykonania wyrobów składających się z powierzchni swobodnych. Ponadto, w publikacjach [1-3] zwrócono także uwagę na istotny wpływ przyjętych parametrów stykowych skaningowych pomiarów współrzędnościowych, dotyczących np. zastosowanej prędkości pomiarowej, na finalne wyniki pomiarów powierzchni krzywoliniowych.

W pierwszym artykule [1] wskazanego cyklu publikacji przedstawiono przede wszystkim zupełnie nową metodę obliczania odchyłek kształtu, która może być stosowana w przypadku pomiarów współrzędnościowych powierzchni swobodnych wyrobów. Zaprezentowana metoda bazuje na interpolacji skorygowanych punktów pomiarowych, reprezentujących rzeczywisty kształt mierzonego przedmiotu, krzywymi Czebyszewa i Lagrange'a. Nowa metoda dzieli skorygowane punkty pomiarowe, będące wynikami pomiarów współrzędnościowych, na grupy składające się z pięciu punktów. Każda grupa punktów jest interpolowana krzywymi czwartego stopnia, które reprezentują rzeczywisty kształt mierzonego wyrobu w poszczególnych jego przekrojach. W kolejnym etapie zaproponowanej metody obliczane są odchyłki lokalne między punktami nominalnymi a punktami wynikającymi z przecięcia krzywych interpolujących skorygowane punkty pomiarowe z prostymi prostopadłymi do mierzonego profilu i przechodzącymi przez punkty nominalne.

Dużą zaletą zaproponowanej metody jest to, że może być ona zastosowana w warunkach przemysłowych w wyniku stosunkowo dużej łatwości jej implementacji w popularnych komercyjnych programach metrologicznych współpracujących z np. współrzędnościowymi maszynami pomiarowymi. Przykładowo, w przypadku oprogramowania Calypso, które jest

podstawowym programem metrologicznym firmy Carl Zeiss, zastosowanie zaproponowanej metody jest możliwe dzięki modułowi PCM (ang. parameter coded measurements) tego oprogramowania. Moduł ten umożliwia programowanie parametryczne stykowych pomiarów współrzędnościowych oraz uruchamianie zewnętrznych aplikacji niezbędnych podczas wykonywania dodatkowych obliczeń. Łatwość zastosowania utworzonej metody w praktyce przemysłowej wynika także z faktu, że nowa metoda obliczania odchyłek kształtu bazuje na danych pomiarowych, które mogą być wyeksportowane bezpośrednio z komercyjnego oprogramowania pomiarowego. Eksportowanymi danymi są współrzędne punktów nominalnych, zmierzonych oraz wektorów normalnych do krzywych w ich punktach nominalnych.

W pracy [1] przedstawiono wyniki zarówno badań symulacyjnych, jak i doświadczalnych wskazujące na duże zalety wynikające z zastosowania nowej metody określania odchyłek kształtu powierzchni krzywoliniowych. Badania numeryczne wykonano dla dwóch mierzonych wyrobów i łącznie ośmiu ich powierzchni swobodnych, które przedstawiono na rysunku 1, zamieszczonym w niniejszym autoreferacie. Ponadto, badania przeprowadzono z użyciem trzech metod obliczania odchyłek kształtu, z których dwie (oznaczone w pracy [1] symbolami N i R) są metodami komercyjnymi, dostępnymi w wybranym oprogramowaniu metrologicznym, a trzecia z nich jest nową metodą bazującą na wspomnianych krzywych czwartego stopnia opisujących rzeczywisty kształt mierzonego wyrobu. Szczegółowe wyniki zrealizowanych badań numerycznych zaprezentowano w tabelach 1 i 2 artykułu [1].

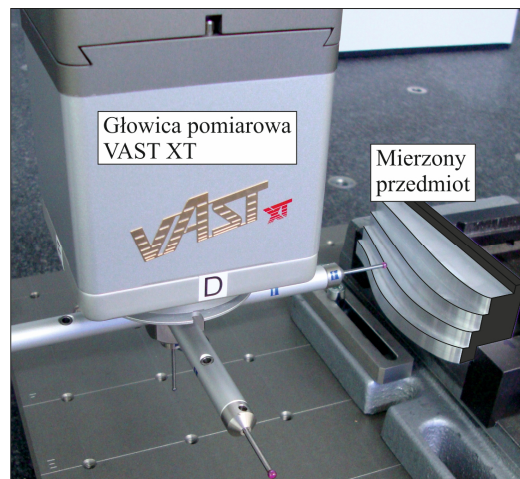


Rys. 1. Powierzchnie swobodne dwóch przedmiotów, dla których przeprowadzono badania symulacyjne

Badania symulacyjne zostały przeprowadzone dla różnych rozrzutów punktów pomiarowych względem profili nominalnych analizowanych powierzchni krzywoliniowych wyrobów oraz różnych odległości między skorygowanymi punktami pomiarowymi. W trakcie badań symulacyjnych punkty pomiarowe były generowane z różnymi wartościami rozstępów względem powierzchni nominalnych, które symulowały dokładność wytwarzania i niepewność pomiaru. Wyniki zrealizowanych badań numerycznych wskazują na brak wpływu przyjętych odległości między punktami pomiarowymi na wartości odchyłek kształtu, które uzyskano z użyciem zaproponowanej w artykule [1] metody. Ponadto, wartości odchyłek kształtu uzyskane z użyciem nowej metody są bardzo zbliżone do odchyłek obliczonych z użyciem wzorcowej metody, którą w artykule [1] oznaczono symbolem R. Wartości odchyłek kształtu, które obliczono z użyciem nowej metody przedstawiono w kolumnach CH i L tabel 1 i 2 artykułu [1]. Odchyłki kształtu obliczane z użyciem metody R charakteryzują się największą dokładnością, ponieważ odpowiadają rozrzutom punktów pomiarowych zastosowanym podczas badań symulacyjnych. Największą niedokładnością charakteryzowała się metoda bazująca na punktach nominalnych podczas obliczeń odchyłek lokalnych, którą w artykule [1] oznaczono symbolem N.

W związku z tym w artykule [1] zaproponowano także sposób poprawy dokładności metody N przez usunięcie występujących błędów nadmiernych. W wybranych przypadkach rozważanych krzywych swobodnych oraz parametrów pomiarów i symulacji odnotowano znaczącą poprawę dokładności pomiarowej w wyniku usunięcia błędów nadmiernych. Poprawa dokładności wynikała z przybliżenia odchyłek kształtu obliczonych za pomocą metody N do wartości rozstępów punktów pomiarowych zastosowanych podczas symulacji pomiarów. Wartości odchyłek kształtu obliczonych z użyciem metody N, po usunięciu błędów nadmiernych przedstawiono w kolumnach NC tabel 1 i 2 artykułu [1]. Tabele te zawierają wyniki zrealizowanych badań numerycznych.

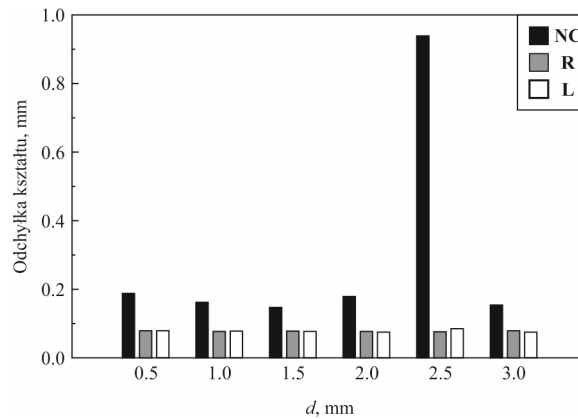
Artykuł [1], oprócz wyników badań symulacyjnych, zawiera także rezultaty badań eksperymentalnych. Badania doświadczalne polegały na stykowych pomiarach współrzędnościowych wybranej powierzchni krzywoliniowej z użyciem różnych parametrów pomiaru w zakresie zastosowanej prędkości pomiarowej v_s oraz odległości między punktami pomiarowymi d . Pomiary wykonano w trybie skanowania. Ponadto, badania doświadczalne zrealizowano korzystając z trzech rozważanych metod obliczania odchyłek kształtu (dwóch komercyjnych N i R oraz nowej metody, którą oznaczono symbolem L). Badania doświadczalne przeprowadzono z użyciem współrzędnościowej maszyny pomiarowej ACCURA II wyposażonej w głowicę pomiarową VAST XT. Zastosowane stanowisko pomiarowe przedstawiono na rysunku 2 autoreferatu. Wyniki badań eksperymentalnych potwierdzają rezultaty badań numerycznych. Odchyłki kształtu obliczone za pomocą zaproponowanej metody są mniejsze niż w przypadku zastosowania metody komercyjnej NC, nawet po usunięciu błędów nadmiernych. Ponadto, odchyłki te są bardziej zbliżone do odchyłek uzyskanych metodą referencyjną, oznaczoną symbolem R, za pomocą której uzyskano najdokładniejsze wyniki badań numerycznych. Pełne wyniki badań doświadczalnych przedstawiono na rysunkach 4-6 artykułu [1]. Ponadto, wybrane rezultaty badań zaprezentowano także na rysunku 3 niniejszego autoreferatu.



Rys. 2. Pomiary współrzędnościowe wybranego wyrobu

Podsumowując, rezultaty badań zaprezentowane w artykule [1] wskazują, że utworzona metoda obliczania odchyłek kształtu jest lepsza od metody N, dostępnej w komercyjnym oprogramowaniu metrologicznym współpracującym z WMP. Usunięcie błędów nadmiernych nie doprowadziło do tak istotnej poprawy dokładności pomiarowej, aby metoda N mogła z powodzeniem konkurować z zaproponowaną metodą obliczania odchyłek kształtu.

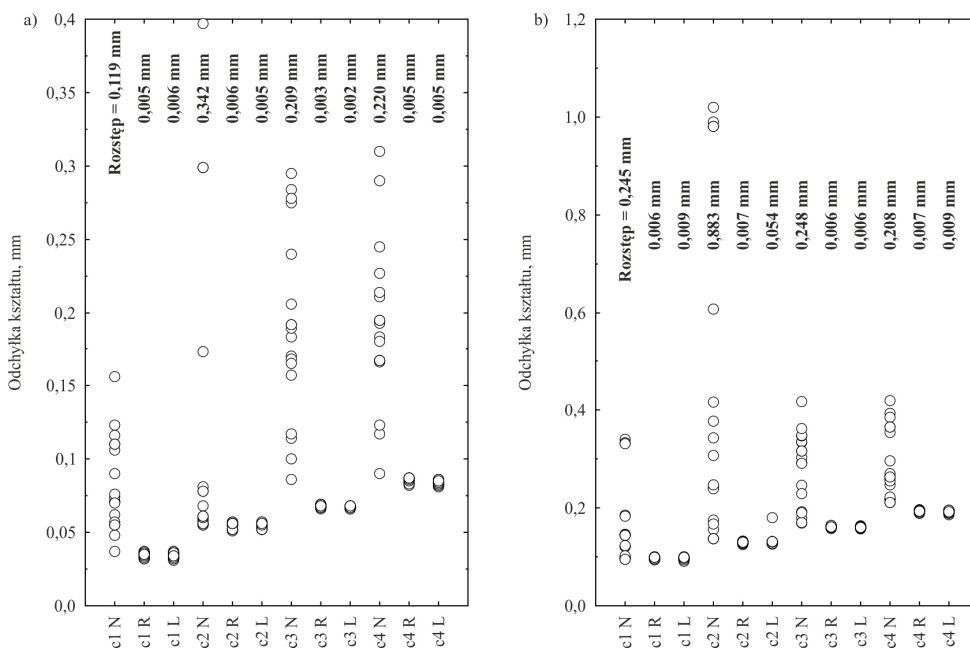
Utworzona metoda jest także zdecydowanie mniej wrażliwa na przyjętą wartość prędkości skanowania w porównaniu do metody N. Ponadto, dodatkową zaletą utworzonej metody, oprócz możliwości jej zastosowania w warunkach przemysłowych, jest istnienie opcji wyboru metod interpolacji punktów pomiarowych na etapie analizy danych pomiarowych, co w przypadku komercyjnych rozwiązań nie zawsze jest możliwe. Wyniki zrealizowanych badań statystycznych nie wskazują jednak na istotne różnice między odchyłkami kształtu, które uzyskano z użyciem dwóch, dostępnych w ramach nowej metody, metod interpolacji. Wyniki zrealizowanych badań potwierdzają możliwość zastosowania opracowanej metody we współrzędnościowej technice pomiarowej.



Rys. 3. Wybrane wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych dla prędkości pomiarowej równej 10 mm/s

Kolejny artykuł [2] z przedstawionego cyklu publikacji zawiera wyniki badań doświadczalnych, które stanowiły kontynuację prac, których rezultaty zaprezentowano w publikacji [1]. Ponadto, artykuł [2] uwzględnia zdecydowanie więcej wyników rzeczywistych pomiarów współrzędnościowych niż pierwszy artykuł zaprezentowanego cyklu publikacji. W artykule [2] przeanalizowano także trzy wybrane metody obliczania odchyłek kształtu powierzchni swobodnych wyrobów. W przypadku pierwszej metody odchyłka kształtu jest obliczana na podstawie lokalnych odchyłek kształtu rejestrowanych w punktach nominalnych. Odchyłki lokalne są mierzone wzdłuż wektorów normalnych zlokalizowanych w punktach nominalnych i obliczane jako odległości między punktami nominalnymi a punktami przecięcia krzywych interpolujących skorygowane punkty pomiarowe i reprezentujących rzeczywisty kształt mierzonego wyrobu z wektorami prostopadłymi do rozważanych krzywych swobodnych. Pierwsza z rozpatrywanych w artykule [2] metod, podobnie jak w przypadku artykułu [1], została oznaczona symbolem N. Druga rozważana metoda bazuje na odchyłkach lokalnych obliczanych w punktach zmierzonych. Na podstawie wyników badań przedstawionych w pracy [1], druga z analizowanych metod charakteryzuje się najwyższą dokładnością pomiarową. Drugą metodę oznaczono symbolem R. Artykuł [2] prezentuje także nową, trzecią metodę obliczania odchyłek kształtu powierzchni krzywoliniowych, która używa krzywych Czebyszewa i Lagrange'a interpolujących punkty pomiarowe do obliczenia odchyłek kształtu i którą po raz pierwszy przedstawiono w artykule [1]. W trakcie badań, których wyniki zaprezentowano w pracy [2], w przypadku nowej metody zastosowano jednak tylko krzywe Lagrange'a czwartego stopnia biorąc pod uwagę wyniki analizy statystycznej, które zaprezentowano w artykule [1]. Nową metodę obliczania odchyłek kształtu powierzchni krzywoliniowych wyrobów oznaczono w pracy [2] symbolem L.

Badania doświadczalne, których wyniki zaprezentowano w publikacji [2], zrealizowano dla dwóch wybranych wyrobów i łącznie ośmiu ich powierzchni swobodnych, które przedstawiono na rysunku 1 artykułu [2]. Mierzone przedmioty składały się z powierzchni o innych kształtach geometrycznych niż kształt powierzchni, dla której wyniki badań doświadczalnych zaprezentowano w pracy [1]. Podczas badań przeanalizowano wpływ przyjętych parametrów pomiarów współrzędnościowych (dotyczących prędkości pomiarowej i odległości między punktami pomiarowymi) na wartości odchyłek kształtu, które obliczono dla rozpatrywanych powierzchni krzywoliniowych za pomocą trzech wybranych metod obliczania odchyłek kształtu. Badania eksperymentalne zrealizowano z użyciem systemu pomiarowego, który przedstawiono na rysunku 2 autoreferatu. Z kolei wyniki zrealizowanych badań zaprezentowano na rysunku 4 niniejszego autoreferatu. Oznaczenia c1-c4 odnoszą się do mierzonych powierzchni swobodnych.



Rys. 4. Wpływ wybranych metod obliczania odchyłek kształtu na wartości odchyłek kształtu w przypadku: a) pierwszego przedmiotu, b) drugiego przedmiotu

Wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych potwierdzają znaczący wpływ przyjętej strategii pomiarowej w zakresie zastosowanej prędkości skanowania oraz liczby punktów pomiarowych na wartości odchyłek kształtu, które uzyskano za pomocą pierwszej rozważanej metody, oznaczonej symbolem N, bazującej na lokalnych odchyłkach kształtu obliczanych w punktach nominalnych. Ponadto, wyniki pomiarów współrzędnościowych obliczone z użyciem zaproponowanej, niekomercyjnej, trzeciej metody obliczania odchyłek kształtu są bardzo zbliżone do wartości odchyłek obliczonych z użyciem drugiej, referencyjnej metody, którą oznaczono symbolem R, podobnie jak w przypadku wyników badań zaprezentowanych w artykule [1]. W związku z tym, stosując metodę L uzyskano lepsze wyniki pomiarów niż w przypadku pomiarów wspomaganym komercyjną metodą N.

Dodatkowo, w artykule [2] zaproponowano sposób poprawy dokładności pierwszej rozważanej metody obliczania odchyłek kształtu, którą oznaczono symbolem N. Sposób ten polega na modyfikacji zbioru punktów nominalnych, w których obliczane są lokalne odchyłki kształtu, w związku z błędnym kształtem krzywej reprezentującej punkty pomiarowe,

który może wynikać m.in. z zastosowanego czasu maskowania punktów pomiarowych. Przykłady wpływu przyjętego czasu maskowania punktów pomiarowych na kształty krzywych reprezentujących punkty pomiarowe zaprezentowano na rysunku 4 artykułu [2]. Zaproponowany algorytm umożliwia identyfikację błędnie obliczonych lokalnych odchyłek kształtu, które nie powinny być brane pod uwagę podczas analizy wyników pomiarów współrzędnościowych. Identyfikacja odchyłek umożliwia ich późniejsze usunięcie z grupy zmierzonych odchyłek lokalnych celem poprawy dokładności stykowych pomiarów współrzędnościowych powierzchni swobodnych produktów realizowanych z użyciem metody N.

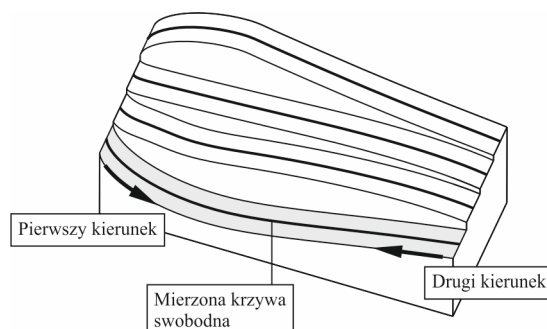
Zaproponowana metoda poprawy dokładności składa się z kilku etapów i uwzględnia analizę m.in. prędkości skanowania podczas oceny zmierzonych lokalnych odchyłek kształtu. Szczegółowy opis utworzonej metody zaprezentowano w rozdziale 6 artykułu [2]. Z kolei w tabeli 1 artykułu [2] i niniejszego autoreferatu przedstawiono wartości odchyłek kształtu obliczone z użyciem zaproponowanego algorytmu modyfikacji zbioru punktów nominalnych uzupełniającego pierwszą metodę N obliczania odchyłek kształtu, która w podstawowej swojej wersji doprowadziła do najgorszych wyników badań doświadczalnych zaprezentowanych w artykułach [1,2] oraz na rysunkach 3 i 4 autoreferatu. Wartości odchyłek kształtu zostały obliczone dla różnych czasów maskowania punktów pomiarowych. Ponadto, tabela 1, w celach porównawczych, zawiera także wartości odchyłek uzyskane z użyciem metody wzorcowej R oraz metody N bez modyfikacji zbioru punktów nominalnych. Wyniki zaprezentowane w tabeli 1 dotyczą pomiarów współrzędnościowych wybranej powierzchni krzywoliniowej, którą przedstawiono na rysunku 5 w niniejszym autoreferacie. Pomiary współrzędnościowe zrealizowano w dwóch kierunkach.

Tab. 1. Porównanie wyników pomiarów zrealizowanych z użyciem i bez zastosowania zaproponowanego algorytmu modyfikacji w przypadku pierwszej powierzchni drugiego analizowanego przedmiotu

Kierunek pomiarów	Czas maskowania punktów pomiarowych, s	Odchyłki kształtu obliczone z użyciem metody N i bez zastosowania algorytmu modyfikacji, mm	Odchyłki kształtu obliczone z użyciem metody N i algorytmu modyfikacji, mm	Liczba usuniętych punktów nominalnych	Odchyłki kształtu obliczone z użyciem metody R, mm
Pierwszy kierunek	0,1	0,0980	0,0980	3	0,0982
	0,2	0,4969	0,0982	4	0,0985
	0,3	1,1675	0,0983	8	0,0984
	0,4	1,7376	0,0969	11	0,0983
	0,5	2,3082	0,0937	14	0,0955
Drugi kierunek	0,1	0,0954	0,0918	2	0,0967
	0,2	0,0934	0,0917	3	0,0930
	0,3	0,0877	0,0850	5	0,0892
	0,4	0,0900	0,0876	6	0,0899
	0,5	0,1201	0,0873	7	0,0869

W wyniku zastosowania utworzonej metody modyfikacji uzyskano znaczącą poprawę wyników pomiarów współrzędnościowych, które obliczono z użyciem metody N. Wyniki te były bardzo zbliżone do wyników drugiej, referencyjnej metody obliczania odchyłek kształtu, oznaczonej symbolem R. Tym samym zaproponowany algorytm może wspomagać użytkownika współrzędnościowego systemu pomiarowego na etapie analizy wyników

pomiarów oraz poprawiać dokładność pomiarów współrzędnościowych w przypadku stosowania pierwszej z rozważanych metod obliczania odchyłek kształtu. Zaproponowana metoda modyfikacji, podobnie jak nowa metoda L obliczania odchyłek kształtu, może być stosunkowo łatwo zaimplementowana w komercyjnym oprogramowaniu pomiarowym i tym samym może być ona także zastosowana w przemyśle.



Rys. 5. Powierzchnia swobodna, na przykładzie pomiarów której zaprezentowano zaproponowaną metodę podwyższenia dokładności pomiarowej przez modyfikację zbioru punktów nominalnych

Potwierdzeniem wyników badań numerycznych i doświadczalnych przedstawionych w pracach [1,2] są wyniki badań zaprezentowane w artykule [3]. W pierwszej części tej pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych, które dotyczyły pomiarów współrzędnościowych czterech powierzchni swobodnych wybranego wyrobu, który zilustrowano na rysunku 1 w pracy [3]. Analizowane powierzchnie miały inne kształty geometryczne niż powierzchnie, dla których zaprezentowano wyniki badań numerycznych w pracy [1]. Badania numeryczne wykonano z użyciem trzech wymienionych metod obliczania odchyłek kształtu (tj. N, R i nowej metody, którą w artykule [3] oznaczono symbolem L-C). Ponadto, symulacje pomiarów współrzędnościowych zrealizowano dla dwóch wybranych rozstępów punktów pomiarowych, które generowano wzdłuż profili nominalnych analizowanego przedmiotu, oraz pięciu odległości między punktami pomiarowymi. Wyniki badań symulacyjnych zaprezentowano w pierwszej tabeli artykułu [3].

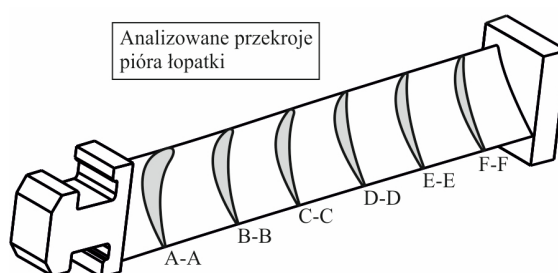
Na podstawie analizy uzyskanych wyników można stwierdzić, że najkorzystniejszą metodą jest metoda R, a najgorsze wyniki uzyskano w przypadku zastosowania metody N, co stanowi potwierdzenie wyników badań przedstawionych w pracach [1,2]. Ponadto, zaproponowana metoda obliczania odchyłek kształtu uzyskała zdecydowanie lepsze wyniki badań symulacyjnych niż metoda N. Praca [3] prezentuje także możliwą przyczynę występowania dużych błędów pomiarowych podczas stosowania metody N, która bazuje na odchyłkach lokalnych obliczanych w punktach nominalnych. Duże wartości odchyłek kształtu, które obliczono za pomocą metody N dla wybranych parametrów symulacji wynikają z błędnych kształtów krzywych reprezentujących punkty pomiarowe w początkowych fragmentach mierzonych powierzchni krzywoliniowych, co przedstawiono na rysunku 2 w artykule [3].

W celu weryfikacji rezultatów badań numerycznych przeprowadzono także badania doświadczalne. Zrealizowano je z użyciem stanowiska pomiarowego, które posłużyło także do uzyskania wyników pomiarów zaprezentowanych w artykułach [1,2]. Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone dla dwóch wybranych prędkości pomiarowych oraz czasu maskowania punktów pomiarowych po rozpoczęciu procesu skanowania wynoszącego 0.25 s. Czas maskowania punktów pomiarowych, podobnie jak prędkość skanowania i liczba

punktów pomiarowych, jest elementem strategii stykowych pomiarów współrzędnościowych i decyduje o ich końcowych rezultatach. Wybrane wyniki rzeczywistych pomiarów współrzędnościowych przedstawiono na rysunkach 3 i 4, które zamieszczono w artykule [3]. Krzywa zmierzona reprezentująca punkty pomiarowe i uzyskana z użyciem metody N różni się od krzywej otrzymanej za pomocą metody R. Różnice w kształtach analizowanych krzywych są widoczne przede wszystkim w skrajnych fragmentach rozważanych powierzchni swobodnych. Błędne kształty krzywych uzyskanych za pomocą metody N w początkowych regionach powierzchni swobodnych mogą wynikać z błędnej ekstrapolacji krzywych reprezentujących dane pomiarowe, która jest realizowana przez komercyjne oprogramowanie pomiarowe współpracujące z wybraną współrzędnościową maszyną pomiarową ACCURA II. Ekstrapolacja krzywych wynika z braku danych pomiarowych tuż po rozpoczęciu procesu skanowania wyrobu. Brak ten jest wynikiem zastosowania czasu maskowania punktów pomiarowych po rozpoczęciu skanowania mierzonych powierzchni.

Kolejne artykuły [4-7], wchodzące w skład przedstawionego jednotematycznego cyklu publikacji, dotyczą wpływu liczby i rozmieszczenia punktów pomiarowych na wyniki i czas pomiarów współrzędnościowych powierzchni krzywoliniowych. Ponadto, zawierają one także opisy nowych metod określania rozkładów punktów pomiarowych na powierzchniach mierzonych wyrobów. Metody te mogą przyczynić się do zwiększenia wydajności procesów wytwarzania wyrobów przez skrócenie czasów pomiarów współrzędnościowych i poprawę ich dokładności.

W artykule [4] przeanalizowano wpływ liczby i rozmieszczenia punktów pomiarowych na wyniki pomiarów współrzędnościowych wybranej powierzchni swobodnej. Analizowaną powierzchnią krzywoliniową była powierzchnia pióra łopatki. Artykuł [4] prezentuje wyniki badań symulacyjnych i doświadczalnych. Wyniki badań numerycznych mogą być bardzo pomocne podczas planowania rzeczywistych pomiarów współrzędnościowych piór łopatek na etapie określania parametrów pomiarów. Badania przeprowadzono dla łopatki zaprezentowanej na rysunku 6 autoreferatu. Badania symulacyjne zrealizowano dla sześciu przekrojów poprzecznych pióra łopatki (A-A – F-F), zwizualizowanych na rysunku 6.

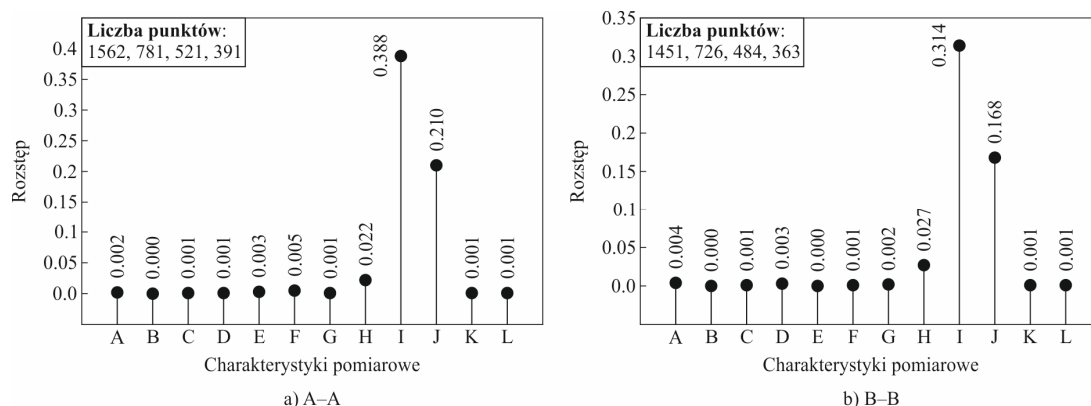


Rys. 6. Łopaska, dla której przeprowadzono badania symulacyjne i doświadczalne

Pomiary współrzędnościowe zostały zasymulowane dla różnej liczby skorygowanych punktów pomiarowych reprezentujących rzeczywiste punkty kontaktu końcówki głowicy pomiarowej z mierzoną powierzchnią wyrobu. Podczas realizacji badań numerycznych zastosowano rozrzut punktów pomiarowych względem powierzchni nominalnej analizowanego wyrobu. Wartość rozstępu punktów pomiarowych wynosiła 0.005 mm. Rozrzut punktów pomiarowych, podobnie jak w przypadku badań, których wyniki przedstawiono w pracach [1-3], reprezentował niedokładność procesu wytwarzania wyrobu i niepewność jego

pomiarów współrzędnościowych. Badania numeryczne podzielono na trzy etapy. W pierwszym z nich liczba punktów pomiarowych była określana przez zmianę odległości między nimi. Zastosowane odległości między punktami pomiarowymi przedstawiono w tabeli 1 w artykule [4]. Dla każdej zastosowanej odległości punkty pomiarowe były niezależnie generowane z założoną wartością rozstępu. W pierwszym etapie badań symulacyjnych analizowano wpływ odległości między punktami pomiarowymi na wartości odchyłek kształtu pióra łopatki. Obliczone wartości odchyłek kształtu powinny być równe dwukrotności wartości maksymalnej lokalnej odchyłki kształtu, wygenerowanej podczas badań numerycznych. W przypadku wybranych przekrojów rozważanego pióra łopatki i zastosowanych odległości między punktami pomiarowymi zaobserwowano, że obliczone w pierwszym etapie badań numerycznych odchyłki kształtu znacząco przewyższają dwukrotność maksymalnej lokalnej odchyłki kształtu, co może być związane z małą dokładnością krzywych aproksymujących punkty pomiarowe. To z kolei może być rezultatem użycia zbyt małej liczby punktów pomiarowych podczas badań. Szczegółowe wyniki pierwszego etapu badań symulacyjnych zaprezentowano w tabeli 1 artykułu [4].

Drugi etap badań numerycznych był związany z oceną wpływu liczby punktów pomiarowych na większą, w porównaniu do pierwszego etapu badań symulacyjnych, liczbę charakterystyk pomiarowych pióra łopatki. Analizowanymi charakterystykami były m.in. długość linii szkieletowej, maksymalna długość, maksymalna grubość, promień krawędzi natarcia i spływu pióra łopatki. Charakterystyki pomiarowe oznaczono symbolami A-L. Podczas drugiego etapu badań numerycznych zastosowano inne podejście do badań niż w pierwszym etapie ich realizacji. Dla każdego przekroju zastosowano cztery niezależne grupy punktów pomiarowych. W przypadku pierwszych grup punkty pomiarowe były generowane z założoną wartością rozstępu. Kolejne trzy grupy dla każdego przekroju poprzecznego powstały w wyniku modyfikacji liczb punktów pomiarowych wchodzących w skład pierwotnych zbiorów punktów. Wyniki drugiego etapu badań symulacyjnych dla wszystkich analizowanych przekrojów pióra łopatki przedstawiono na rysunkach 2-4 artykułu [4]. Ponadto, wyniki dla przekrojów A-A i B-B zaprezentowano na rysunku 7 autoreferatu. Wyniki drugiego etapu wskazują na bardzo znaczący wpływ przyjętej liczby punktów pomiarowych na wartości promieni krawędzi natarcia i spływu (charakterystyki I i J). Ponadto, stwierdzono duży wpływ liczby punktów na pole powierzchni pióra łopatki (charakterystyka H).



Rys. 7. Wyniki badań symulacyjnych dla dwóch wybranych przekrojów pióra łopatki

Trzeci etap badań numerycznych dotyczył analizy możliwości zastosowania wybranego oprogramowania komputerowego wspomaganego projektowania w przypadku oceny

dokładności pióra łopatki. Możliwość zastosowania oprogramowania, które jest używane w różnych etapach procesu produkcyjnego w trakcie oceny wyników pomiarów współrzędnościowych może przyczynić się do zmniejszenia kosztów produkcji. W ramach tego etapu porównano wyniki badań symulacyjnych uzyskane z użyciem specjalistycznego oprogramowania metrologicznego, utworzonego głównie z myślą o pomiarach piór łopatek, oraz programu komputerowego wspomagania projektowania, który jest powszechnie stosowany przez wiele firm np. przemysłu lotniczego oraz ośrodków badawczych podczas procesu wytwarzania produktów. Trzeci etap został zrealizowany z użyciem punktów pomiarowych zastosowanych w etapie wcześniejszym badań symulacyjnych. Na podstawie analizy uzyskanych wyników stwierdzono, że maksymalna różnica między odchyłkami kształtu obliczonymi z użyciem dwóch analizowanych programów wynosiła 3 μm .

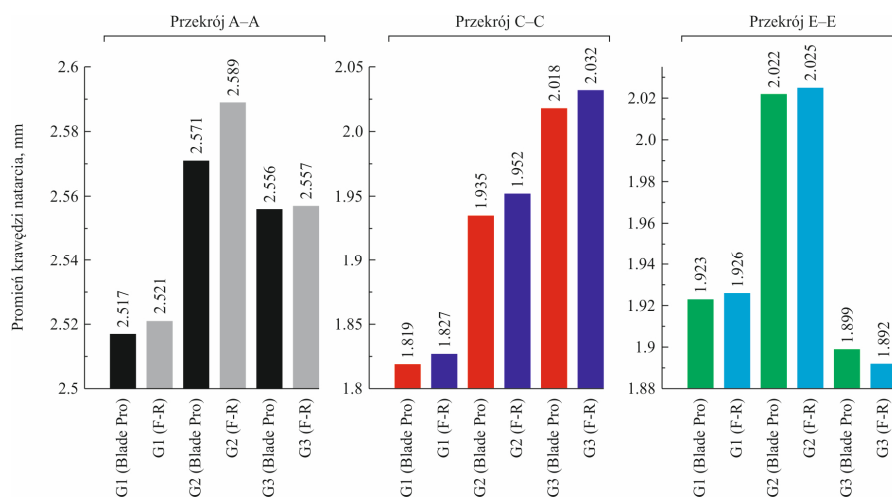
W celu weryfikacji wyników badań symulacyjnych przeprowadzono także badania doświadczalne, które zrealizowano z użyciem wybranej współrzędnościowej maszyny pomiarowej. Wyniki przeprowadzonych analiz w postaci rozrzutów wartości wybranych charakterystyk pomiarowych uzyskanych podczas symulacji pomiarów współrzędnościowych i badań doświadczalnych zaprezentowano na rysunku 5 w artykule [4]. W przypadku badań eksperymentalnych, analogicznie do badań numerycznych, zaobserwowano duży wpływ przyjętej liczby punktów pomiarowych na wartości promieni krawędzi natarcia i spływu. Ponadto, wyniki badań doświadczalnych potwierdzają rezultaty symulacji w zakresie małych rozrzutów wyników pomiarów w przypadku charakterystyk pomiarowych D, F i G.

Podsumowując, wyniki pierwszego etapu badań numerycznych mogą być przydatne podczas doboru właściwej liczby punktów pomiarowych w przypadku rzeczywistych pomiarów współrzędnościowych. Ponadto, na podstawie wyników drugiego etapu badań symulacyjnych można wywnioskować, że zastosowanie średnich promieni krawędzi natarcia i spływu (charakterystyki K i L) może przyczynić się do poprawy dokładności pomiarów współrzędnościowych. Wyniki zrealizowanych badań doświadczalnych potwierdzają wyniki przeprowadzonych symulacji. Tym samym zaproponowana metodologia badań symulacyjnych, zaprezentowana szczególnie w drugim ich etapie, może być stosowana celem oceny wpływu liczby punktów pomiarowych na wyniki pomiarów współrzędnościowych pióra łopatki. Rezultaty trzeciego etapu badań symulacyjnych potwierdzają także możliwość zastosowania oprogramowania komputerowego wspomagania projektowania podczas oceny dokładności wykonania łopatki, co z kolei, oprócz zmniejszenia kosztów procesów wytwarzania, może przyczynić się także do odciążenia działów kontroli jakości w wyniku przekazania części zadań, związanych np. z analizą wyników pomiarów, do innych jednostek.

Następny artykuł [5] ze wskazanego cyklu publikacji potwierdza wyniki badań, które zaprezentowano w artykule [4] w zakresie dużego wpływu przyjętej liczby i rozmieszczenia punktów pomiarowych na wartości promieni krawędzi natarcia i spływu pióra łopatki. W artykule [5] przedstawiono wyniki symulacji pomiarów współrzędnościowych, które dotyczą wartości promieni krawędzi natarcia i spływu wybranego pióra łopatki. Podczas badań zastosowano ten sam model pióra łopatki, dla którego rezultaty badań zaprezentowano w artykule [4]. Wartości promieni obliczono dla trzech losowo wybranych grup punktów (oznaczonych symbolami G1-G3), zróżnicowanych pod względem liczby punktów pomiarowych i tym samym ich rozmieszczenia na mierzonej powierzchni pióra łopatki. Ponadto, promienie obliczono za pomocą funkcji specjalistycznego oprogramowania metrologicznego Blade Pro oraz dopasowując okręgi do punktów pomiarowych pióra łopatki z użyciem elementu skojarzonego Gaussa oraz wybranej metody optymalizacji.

Możliwość zastosowania metody optymalizacji Fletcher'a-Reeves'a (F-R) w zakresie oceny promieni krawędzi pióra łopatki została zweryfikowana w pierwszym etapie badań

przez porównanie danych nominalnych pióra łopatki, które obliczono z użyciem oprogramowania Blade Pro, dedykowanego do pomiarów współrzędnościowych piór łopatek, oraz wybranej metody optymalizacji. Promienie nominalne obu krawędzi pióra łopatki obliczone z użyciem specjalistycznego oprogramowania metrologicznego oraz metody F-R były bardzo zbliżone, a największa różnica między nimi wynosiła 4 μm . W drugim etapie badań przeprowadzono symulacje pomiarów współrzędnościowych. Pełne wyniki badań symulacyjnych zaprezentowano na rysunkach 2 i 3 w artykule [5], a wybrane rezultaty przedstawiono także na rysunku 8 niniejszego autoreferatu. Zaprezentowane wyniki wskazują na konieczność starannego wyboru metody obliczeniowej celem uzyskania dokładnych wyników pomiarów krawędzi natarcia i spływu pióra łopatki. Niezależnie od zastosowanej metody różnice między rezultatami badań symulacyjnych uzyskanymi dla różnych grup punktów pomiarowych są znaczące.



Rys. 8. Wartości promieni krawędzi natarcia obliczone z użyciem programu Blade Pro i wybranej metody optymalizacji F-R dla trzech przekrojów pióra łopatki i trzech grup punktów pomiarowych

W kolejnym artykule [6], dotyczącym rozmieszczenia punktów pomiarowych, przedstawiono nową metodę definiowania rozkładu punktów na powierzchniach krzywoliniowych mierzonych przedmiotów. Poszczególne etapy nowej metody zaprezentowane są na rysunku 1 artykułu [6]. Podstawową zaletą zaproponowanej metody jest skrócenie czasu stykowych pomiarów współrzędnościowych powierzchni swobodnych, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej dokładności pomiarowej. Zaleta ta jest widoczna w przypadku konieczności pomiarów serii produktów.

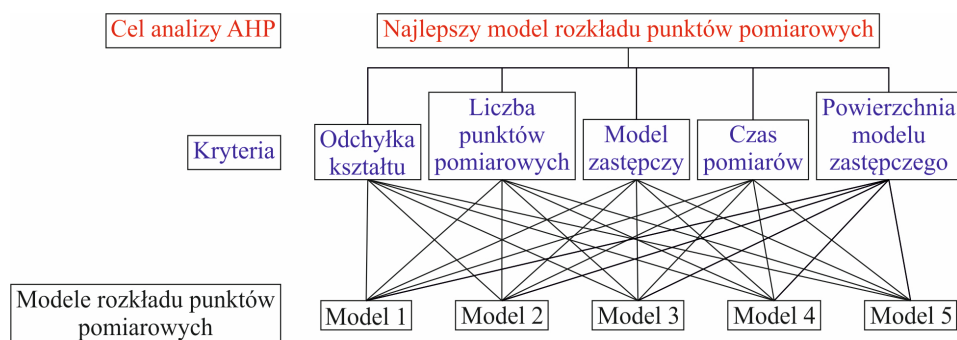
Pierwszy etap zaproponowanej metody polega na pomiarze pierwszego produktu z serii wyrobów za pomocą wzorcowego rozkładu punktów pomiarowych. Rozkład wzorcowy obejmuje największą liczbę punktów, która zwiększa szanse identyfikacji maksymalnych, rzeczywistych odchyłek kształtu mierzonych powierzchni. W drugim etapie metody tworzone są zmodyfikowane rozkłady punktów pomiarowych, które uwzględniają mniejszą liczbę punktów w porównaniu do rozkładu wzorcowego. Mniejsza liczba punktów pomiarowych w przypadku stykowych pomiarów współrzędnościowych prowadzi do skrócenia czasu pomiarów, co może przekładać się na zwiększenie wydajności całego procesu wytwarzania wyrobu. W drugim etapie metody pierwszy wyrób z danej serii produktów musi być także zmierzony z użyciem utworzonych zmodyfikowanych rozkładów punktów pomiarowych.

Trzeci etap zaproponowanej metody polega na przeprowadzeniu wielokryterialnej analizy problemów decyzyjnych (AHP), której celem jest wybór najlepszego, zmodyfikowanego na podstawie rozkładu wzorcowego, modelu rozmieszczenia punktów pomiarowych leżących na mierzonej powierzchni swobodnej produktu. Analiza AHP jest realizowana na podstawie założonych kryteriów: odchyłka kształtu, liczba punktów pomiarowych, dokładność modelu zastępczego, czas pomiarów i pole powierzchni modelu zastępczego. Po przeprowadzeniu analizy AHP pozostała część wyrobów z serii produktów powinna być zmierzona z użyciem wybranego zmodyfikowanego rozkładu punktów pomiarowych. Rozkład zmodyfikowany zawiera mniejszą liczbę punktów w porównaniu do rozkładu wzorcowego, co przyczynia się do skrócenia czasu pomiarów współrzędnościowych. Skrócenie czasu jest szczególnie widoczne w przypadku pomiarów realizowanych w trybie próbkowania punktowego, który jest wciąż często stosowany, np. podczas pomiarów przeprowadzanych z użyciem współrzędnościowej maszyny pomiarowej, czy obrabiarki sterowanej numerycznie wyposażonej w głowicę pomiarową.

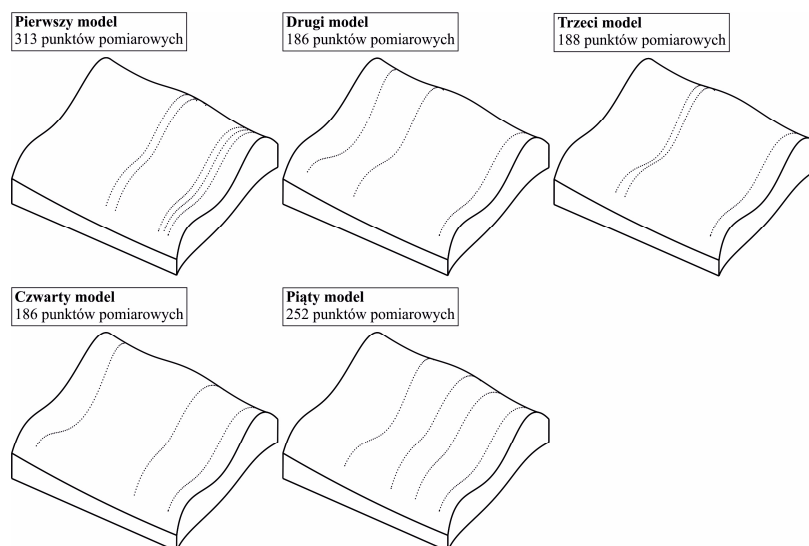
Najważniejszym etapem zaproponowanej metody lokalizacji punktów pomiarowych jest etap trzeci, który zakłada przeprowadzenie analizy AHP. Struktura analizy AHP, zastosowana w nowej metodzie, została zaprezentowana na rysunku 9 autoreferatu. Pierwsze kryterium rozważanej analizy jest związane z odchyłkami kształtu powierzchni krzywoliniowej obliczonymi z użyciem rozpatrywanych modeli rozkładów punktów pomiarowych. Pierwsze kryterium pomaga użytkownikowi współrzędnościowej maszyny pomiarowej ocenić czy w wyniku zastosowania danego rozkładu punktów pomiarowych istnieje możliwość wykrycia maksymalnej wartości odchyłki kształtu. Kolejne zastosowane kryterium analizy AHP dotyczy czasu pomiarów współrzędnościowych realizowanych z użyciem współrzędnościowych maszyn pomiarowych. Czas pomiarów współrzędnościowych wpływa na całkowity czas procesu wytwarzania produktu. W związku z tym, w przypadku drugiego kryterium, najlepszy rozkład punktów pomiarowych zapewnia model, dla którego czas pomiarów jest najkrótszy. Trzecim rozważanym kryterium jest liczba punktów pomiarowych. Duża liczba punktów zwiększa prawdopodobieństwo wykrycia maksymalnych odchyłek kształtu charakteryzujących jakość mierzonych produktów. Jednak w przypadku pomiarów realizowanych w trybie próbkowania punktowego liczba punktów pomiarowych nie może być za duża, aby zbyt nie zwiększać czasu pomiarów współrzędnościowych. Czwarte kryterium jest związane z dokładnością modelu zastępczego reprezentującego powierzchnię krzywoliniową oraz punkty pomiarowe na niej rozmieszczone. Dokładność modelu zastępczego musi być analizowana, aby ocenić jak rozważane modele rozmieszczenia punktów pomiarowych reprezentują mierzoną powierzchnię swobodną wyrobu biorąc pod uwagę jej złożoność geometryczną. Ostatnim kryterium analizy AHP jest pole powierzchni modelu zastępczego, który jest tworzony na podstawie punktów pomiarowych. Punkty rozłożone na większym obszarze mierzonej powierzchni zwiększają szanse identyfikacji maksymalnych odchyłek kształtu. Tym samym model rozkładu punktów zlokalizowanych na największym fragmencie mierzonej powierzchni krzywoliniowej jest modelem najlepszym w przypadku piątego kryterium.

W artykule [6] przedstawiono wyniki badań numerycznych i doświadczalnych. Badania dotyczyły trzech etapów utworzonej metody definiowania rozmieszczenia punktów pomiarowych, które mają na celu wybór najlepszych położeń punktów spośród rozważanych modeli rozkładów. Celem badań była weryfikacja możliwości przeprowadzania pomiarów współrzędnościowych dla serii wytwarzanych produktów z użyciem strategii pomiarowej, która uwzględnia mniejszą liczbę punktów w porównaniu do rozkładu wzorcowego punktów pomiarowych. Badania zostały przeprowadzone dla powierzchni swobodnej przedstawionej na rysunku 3 artykułu [6]. Najlepszy rozkład punktów pomiarowych został wybrany z grupy

pięciu różnych modeli rozkładów punktów, które przedstawiono na rysunku 10 niniejszego autoreferatu.



Rys. 9. Struktura analizy AHP zastosowana do wyboru najlepszego rozkładu punktów pomiarowych

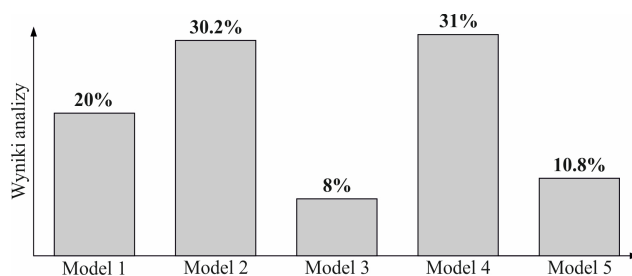


Rys. 10. Analizowane modele rozkładu punktów pomiarowych

Przeprowadzone badania numeryczne dotyczyły dwóch kryteriów analizy AHP związanych z analizą dokładności modeli zastępczych oraz ich polami powierzchni. Wyniki badań numerycznych zaprezentowano w tabelach 1 i 2 w artykule [6]. Badania doświadczalne zrealizowano z użyciem wybranej współrzędnościowej maszyny pomiarowej. Wyniki badań doświadczalnych dotyczące odchyłek kształtu zmierzonych za pomocą rozważanych modeli rozkładów punktów oraz czasów trwania pomiarów współrzędnościowych przedstawiono w tabeli 3 artykułu [6]. W kolejnym etapie badań przeprowadzono analizę AHP rozpatrywanych modeli rozmieszczeń punktów. Końcowy rezultat przeprowadzonych analiz przedstawiono na rysunku 7 artykułu [6] oraz na rysunku 11 w autoreferacie. Na podstawie uzyskanych wyników najlepszy rozkład punktów pomiarowych był reprezentowany przez model czwarty.

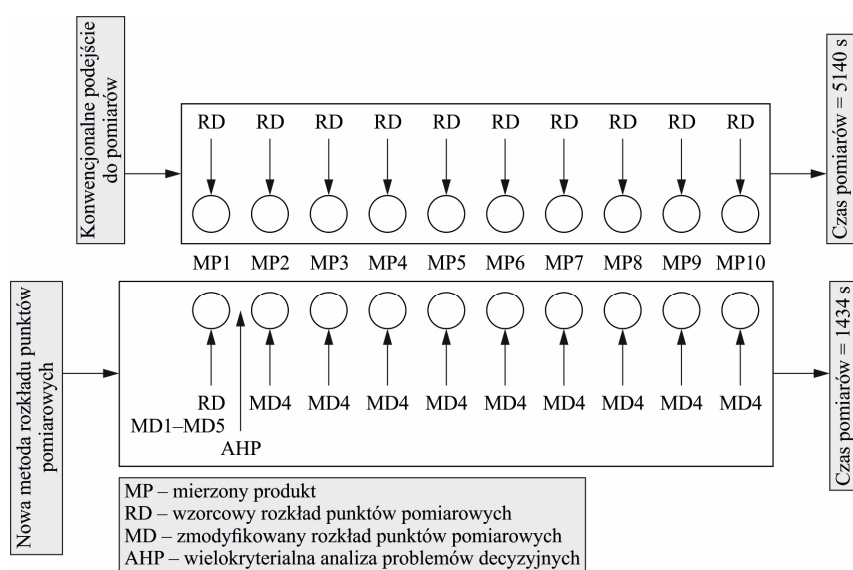
Ponadto, w artykule [6] zaprezentowano porównanie czasów pomiarów współrzędnościowych serii wyrobów mierzonych za pomocą opracowanej metody definiowania rozkładu punktów pomiarowych i z użyciem równomiernego, wzorcowego rozmieszczenia punktów. Równomierny rozkład punktów pomiarowych jest powszechnie stosowany w praktyce

przemysłowej podczas pomiarów powierzchni krzywoliniowych. W wyniku zastosowania opracowanej metody zredukowano czas pomiarów serii produktów niemal czterokrotnie (rys. 12 autoreferatu) bez obniżenia dokładności pomiarów. Brak obniżenia dokładności wynikał z wzięcia pod uwagę różnych kryteriów, np. odchyłki kształtu i czasu pomiarów, podczas analizy AHP. Dodatkowymi zaletami zaproponowanej metody jest wzrost poziomu automatyzacji określania pozycji punktów pomiarowych oraz możliwość jej zaimplementowania w komercyjnym oprogramowaniu pomiarowym, przez co istnieje możliwość zastosowania opracowanej metody w przemyśle.



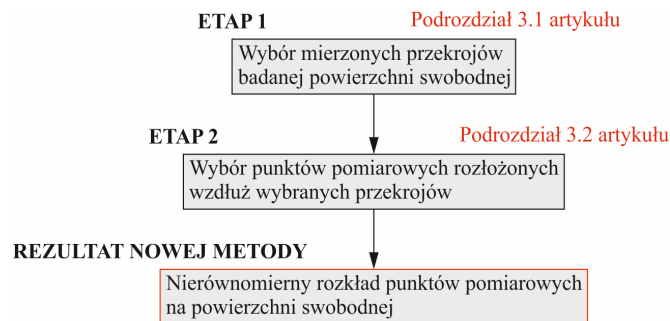
Rys. 11. Wyniki przeprowadzonej analizy AHP

Następną nową metodę rozmieszczenia punktów pomiarowych na powierzchniach swobodnych wyrobów zaprezentowano w artykule [7]. Prace nad kolejną metodą definiowania lokalizacji punktów pomiarowych wynikały z potrzeby realizacji pomiarów współrzędnościowych z użyciem możliwie jak najmniejszej liczby punktów pomiarowych, które umożliwiają uzyskanie wymaganej informacji o jakości wykonania mierzonego wyrobu. Zaproponowana metoda rozmieszczenia punktów pomiarowych składa się z dwóch głównych części i jest ona dedykowana przede wszystkim do pomiarów wykonywanych za pomocą głowic pomiarowych pracujących w trybie próbkowania punktowego, który wciąż jest używany podczas pomiarów przeprowadzanych z użyciem współrzędnościowych maszyn pomiarowych. Ogólny schemat metody przedstawia rysunek 13 autoreferatu.



Rys. 12. Wizualizacja zalety użycia nowej metody polegająca na skróceniu czasu pomiarów serii wyrobów

Pierwszy etap metody polega na określeniu pozycji linii skanowania, wzdłuż których powinny być przeprowadzane pomiary współrzędnościowe. W drugim etapie metody podejmowana jest decyzja dotycząca liczby punktów pomiarowych rozmieszczonych wzdłuż, wybranych w pierwszym etapie, mierzonych przekrojów rozważanej powierzchni krzywoliniowej. Algorytm pierwszego etapu metody, dotyczącego wyboru linii skanowania, przedstawiono na rysunku 2 w artykule [7]. W początkowym etapie algorytmu na analizowanej powierzchni krzywoliniowej generowane są punkty losowe z użyciem metody Latin Hypercube Sampling. W dalszym etapie algorytmu tworzone są przekroje powierzchni swobodnej, które przebiegają przez losowo wybrane punkty. W kolejnych etapach algorytmu obliczane są: średnie krzywizny wygenerowanych przekrojów powierzchni swobodnej, ich długości oraz odchyłki przekrojów od tzw. krzywych 2D, których wektory normalne są zlokalizowane w jednej płaszczyźnie. W przypadku zaproponowanej metody, linie skanowania są wybierane spośród utworzonych przekrojów powierzchni za pomocą systemu bazującego na logice rozmytej.



Rys. 13. Etapy nowej metody lokalizacji punktów pomiarowych

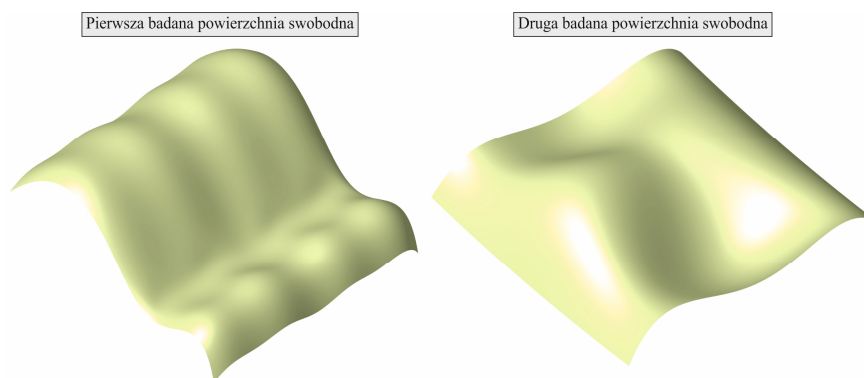
Uzależnienie wyboru linii skanowania od ich długości wynika z konieczności rozłożenia punktów pomiarowych wzdłuż możliwie największych fragmentów mierzonej powierzchni swobodnej. To z kolei zwiększa szanse na identyfikację największych odchyłek wykonania wyrobu. Ponadto, zaproponowana metoda zapewnia rozkład punktów pomiarowych w miejscach mierzonej powierzchni, które charakteryzują się dużą wartością krzywizny. Analiza przekrojów powierzchni krzywoliniowej pod kątem ich odchyłek od krzywej 2D, podczas procesu wyboru linii skanowania, jest wynikiem rodzaju metod korekcji promieniowej, które są przeznaczone dla krzywych 2D i które zastosowano w drugim etapie zaproponowanej metody.

Algorytm drugiego etapu utworzonej metody definiowania pozycji punktów pomiarowych, związanego z wyborem punktów pomiarowych wzdłuż wyselekcjonowanych w etapie wcześniejszym linii skanowania, przedstawiono na rysunku 4 artykułu [7]. W pierwszym etapie drugiego algorytmu tworzony jest równomierny rozkład punktów pomiarowych wzdłuż wybranych linii skanowania. Decyzja odnośnie akceptacji wybranego rozkładu punktów, podobnie jak w przypadku pierwszego etapu metody, jest podejmowana z użyciem logiki rozmytej oraz na podstawie analizy dokładności procesu korekcji promieniowej i dokładności krzywych zastępczych reprezentujących mierzoną powierzchnię oraz jej punkty pomiarowe. W drugim etapie metody weryfikowana jest dokładność dwóch metod korekcji promieniowej bazujących na krzywych Béziera. Korekcja promieniowa polega na obliczaniu współrzędnych skorygowanych punktów pomiarowych i jest ona podstawowym etapem stykowych pomiarów współrzędnościowych. Z kolei analiza krzywych zastępczych pozwala ocenić jak dokładnie wstępnie wybrane rozkłady punktów rozmieszczonych wzdłuż linii

skanowania reprezentują postaci geometryczne poszczególnych przekrojów mierzonej powierzchni krzywoliniowej.

Struktury dwóch systemów ekspertowych, odpowiadających dwóm etapom zaproponowanej metody, ich funkcje przynależności dla parametrów wejściowych i wyjściowych oraz zastosowane w nich reguły szczegółowo przedstawiono w rozdziale czwartym artykułu [7]. Przykładowo, w przypadku pierwszego systemu ekspertowego, odpowiedzialnego za wybór linii skanowania, parametrami wejściowymi są m.in. średnia krzywizna i długość rozważanego przekroju powierzchni swobodnej i odpowiadają one parametrom obliczanym w pierwszym etapie zaproponowanej metody definiowania rozkładu punktów pomiarowych.

W artykule przedstawiono także wyniki badań symulacyjnych, które dotyczyły wyboru linii skanowania i liczb punktów pomiarowych rozmieszczonych wzdłuż wybranych przekrojów, dla dwóch przykładowych powierzchni swobodnych, które przedstawiono na rysunku 14 autoreferatu.

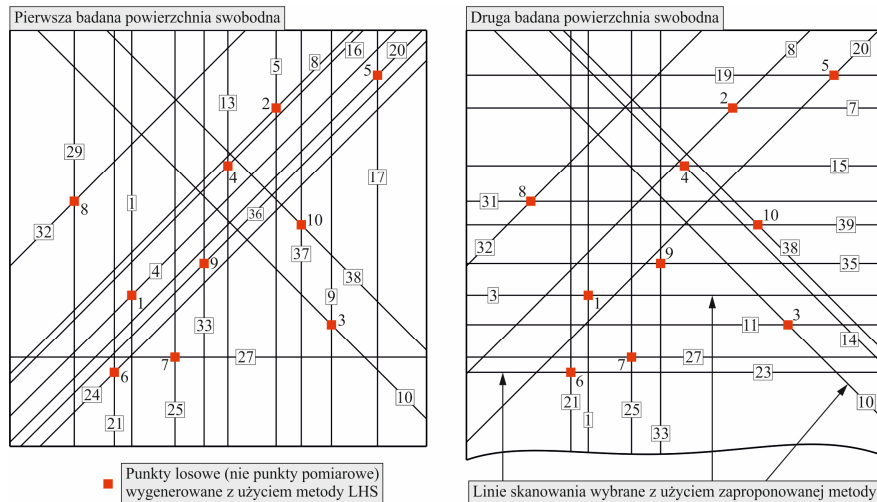


Rys. 14. Powierzchnie krzywoliniowe analizowane podczas badań numerycznych, których wyniki przedstawiono w artykule [7]

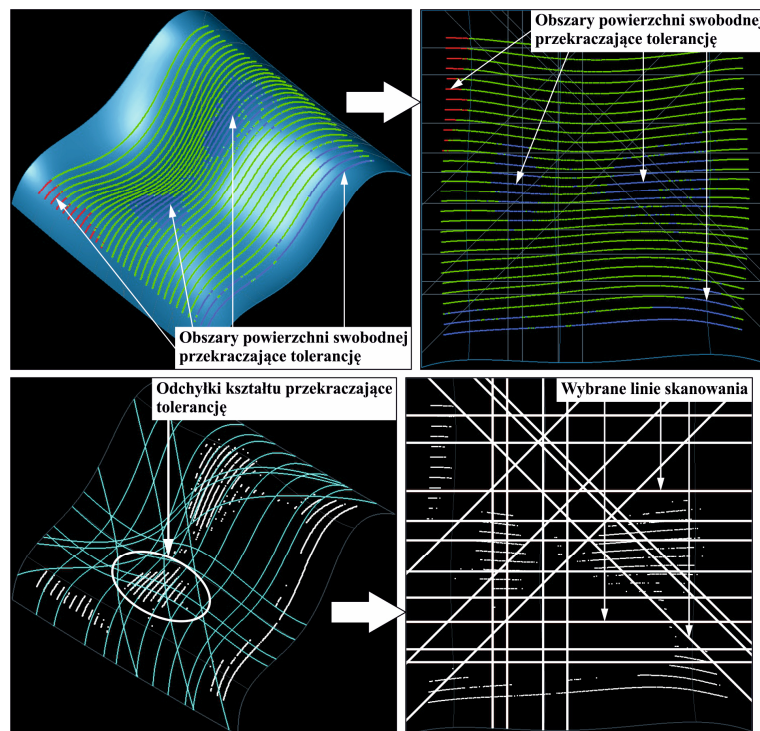
Linie skanowania dla obu rozważanych powierzchni, wybrane spośród przekrojów przedstawionych na rysunku 12 artykułu [7], zaprezentowano na rysunku 15 niniejszego autoreferatu. Z kolei efekty drugiego etapu zaproponowanej metody, dotyczące rekomendacji liczby punktów pomiarowych rozmieszczonych wzdłuż przyjętych linii skanowania przedstawiono w tabelach 5 i 6 w artykule [7].

Nowa metoda została także zweryfikowana w trakcie badań doświadczalnych pod kątem poprawności określania pozycji punktów pomiarowych na powierzchni swobodnej. Zastosowane stanowisko pomiarowe przedstawiono na rysunku 14 artykułu [7]. Badania eksperymentalne dotyczyły pierwszego etapu zaproponowanej metody, który jest związany z określeniem położenia linii skanowania. Celem badań było sprawdzenie w jakim stopniu wygenerowane linie skanowania odzwierciedlają najgorzej wykonane fragmenty wybranej mierzonej powierzchni krzywoliniowej. W pierwszej fazie badań pomiary współrzędnościowe zrealizowano na podstawie równomiernego rozkładu linii skanowania oraz bardzo dużej liczby punktów pomiarowych celem jak najdokładniejszego odwzorowania najmniej dokładnie wykonanych części wybranej powierzchni swobodnej. W drugiej fazie badań na wyniki pomiarów nałożono linie skanowania, które wygenerowano z użyciem utworzonej metody. Analizując ich położenie, można zauważyć, że linie skanowania przebiegają m.in. wzdłuż miejsc powierzchni charakteryzujących się odchyłkami kształtu przekraczającymi przyjętą wartość tolerancji (rys. 16 autoreferatu). W przypadku zastosowania niektórych komercyjnych metod określania lokalizacji punktów pomiarowych istnieje duże

prawdopodobieństwo niewykrucia najgorzej wykonanych fragmentów powierzchni, co zilustrowano na rysunku 16 artykułu [7]. Artykuł ten prezentuje także sposób implementacji utworzonej metody lokalizacji punktów pomiarowych w wybranym komercyjnym oprogramowaniu metrologicznym. To z kolei umożliwi zastosowanie nowej metody w przemyśle.



Rys. 15. Wybrane linie skanowania dla obu rozpatrywanych powierzchni krzywoliniowych

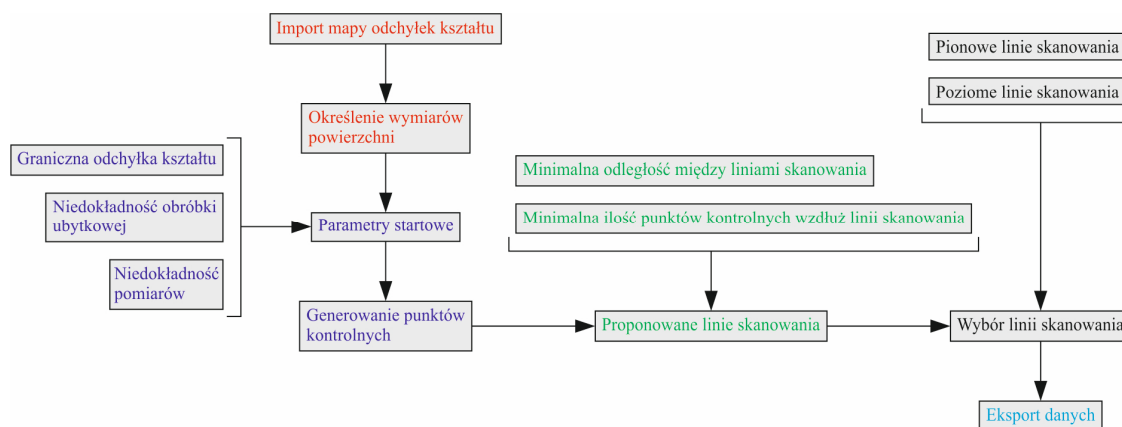


Rys. 16. Rozkłady odchyłek kształtu na wybranej powierzchni swobodnej i wygenerowanych liniach skanowania

Zaletą zaproponowanej metody jest możliwość określenia lokalizacji punktów pomiarowych na powierzchniach krzywoliniowych mierzonych wyrobów biorąc pod uwagę różne aspekty stykowych pomiarów współrzędnościowych. Nowa metoda daje użytkownikowi np. współrzędnościowej maszyny pomiarowej możliwość indywidualnego podejścia do

pomiarów podczas planowania strategii pomiarowej. Użytkownik może decydować który aspekt pomiarów jest bardziej istotny. W niektórych przypadkach będzie nim tylko dokładność pomiarów, z kolei w innych także czas ich realizacji. Ponadto, zaletą metody jest wysoki poziom automatyzacji podczas określania lokalizacji punktów pomiarowych na powierzchniach swobodnych mierzonych wyrobów. Metoda umożliwi definiowanie strategii pomiarowej w trybie off-line, tj. bez udziału współrzędnościowej maszyny pomiarowej, co może być realizowane również przez inne jednostki danej firmy, a nie tylko przez jej działy kontroli jakości.

Artykuł [8] dotyczy trzeciej opracowanej metody lokalizacji punktów pomiarowych na powierzchniach krzywoliniowych wyrobów. Metoda ta umożliwi określenie pozycji linii skanowania, wzdłuż których powinny być przeprowadzane pomiary współrzędnościowe i jest ona przeznaczona głównie dla głowic pomiarowych pracujących w trybie skanowania. Linie skanowania są lokalizowane na podstawie analizy odchyłek procesu kształtowania ubytkowego wyrobu, które są uzyskiwane w procesie komputerowej symulacji obróbki ubytkowej. Linie skanowania powinny znajdować się w miejscach powierzchni charakteryzujących się największymi odchyłkami. Wynikiem symulacji jest mapa odchyłek wykonania powierzchni swobodnej, której postać zależy od m.in. przyjętej geometrii narzędzi skrawających i zastosowanej strategii kształtowania ubytkowego. Artykuł [8] wskazuje na poszczególne etapy zaproponowanej metody przez prezentację modułów utworzonego, na bazie nowej metody, oprogramowania dedykowanego do określania strategii pomiarów współrzędnościowych. Prezentację oprogramowania przeprowadzono dla dwóch wybranych powierzchni swobodnych przedstawionych na rysunku 1 artykułu [8]. Poszczególne moduły opracowanego oprogramowania zilustrowano na rysunku 17 autoreferatu.



Rys. 17. Moduły utworzonego oprogramowania przeznaczonego do określania położenia linii skanowania

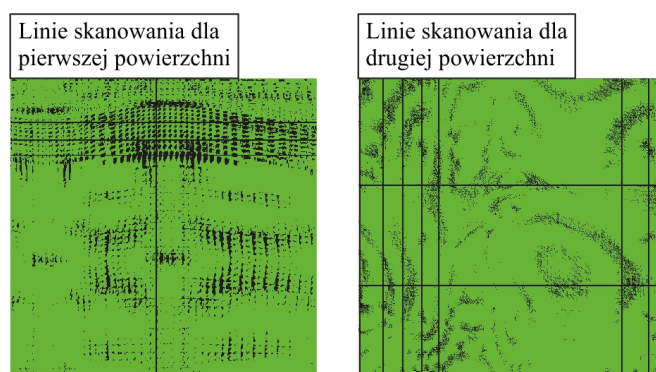
Moduły utworzonego oprogramowania umożliwiają:

- zaimportowanie mapy odchyłek będącej wynikiem symulacji kształtowania ubytkowego,
- określenie parametrów startowych w zakresie m.in. granicznej odchyłki kształtu. Odchyłki równe lub większe od przyjętej wartości granicznej są wizualizowane na mapie odchyłek. Po zdefiniowaniu parametrów startowych generowane są punkty kontrolne, które wskazują na obszary powierzchni wymagające stykowych pomiarów współrzędnościowych,

- wygenerowanie sugerowanych linii skanowania, które są tworzone na podstawie minimalnej odległości między nimi oraz minimalnej liczby punktów kontrolnych znajdujących się wzdłuż linii skanowania,
- wybór linii skanowania, których położenia mają być wyeksportowane z programu jako wynik działania opracowanej metody. Użytkownik oprogramowania może wybrać pionowe lub/i poziome linie skanowania, wzdłuż których powinny być realizowane pomiary współrzędnościowe.

Zaproponowana metoda i utworzone na jej bazie oprogramowanie mogą być łatwo zaimplementowane w komercyjnych programach metrologicznych i tym samym zastosowane w przemyśle. Ponadto, podobnie jak w przypadku wcześniej prezentowanych metod, utworzone oprogramowanie umożliwia planowanie strategii pomiarowej w trybie off-line przez nie tylko pracowników działów kontroli jakości, bez udziału współrzędnościowych systemów pomiarowych.

Utworzona metoda została zweryfikowana podczas badań symulacyjnych, które zrealizowano dla dwóch wybranych powierzchni krzywoliniowych. Wynikami przeprowadzonych symulacji były linie skanowania zlokalizowane na rozważanych powierzchniach swobodnych w miejscach charakteryzujących się najgorszą jakością wykonania. Wygenerowane linie skanowania, wzdłuż których powinna przemieszczać się skaningowa głowica pomiarowa współrzędnościowej maszyny pomiarowej przedstawiono na rysunku 18 autoreferatu.



Rys. 18. Linie skanowania wygenerowane za pomocą trzeciej opracowanej metody określania lokalizacji punktów pomiarowych

W artykule [9] zwrócono uwagę na kolejny element strategii stykowych pomiarów współrzędnościowych, który ma istotny wpływ na ich dokładność. Artykuł dotyczy korekcji promieniowej, której zadaniem jest obliczenie współrzędnych skorygowanych punktów pomiarowych na podstawie ich zaobserwowanych odpowiedników, które reprezentują punkty środka końcówki trzpienia głowicy pomiarowej w trakcie jej kolejnych położań podczas stykowych pomiarów współrzędnościowych wyrobów. W artykule [9] przedstawiono wyniki symulacyjnych pomiarów współrzędnościowych pióra łopatkki. Podczas badań numerycznych porównano dwie wybrane metody korekcji promieniowej, które bazują na krzywych Béziera. W przypadku pierwszej rozpatrywanej metody grupy punktów pomiarowych składające się z trzech zaobserwowanych punktów są interpolowane krzywymi drugiego stopnia. Z kolei w przypadku drugiej rozważanej metody pięć kolejnych zaobserwowanych punktów pomiarowych jest interpolowanych krzywymi Béziera czwartego stopnia.

Najważniejsza część artykułu [9] dotyczy wyników przeprowadzonych badań numerycznych, które zrealizowano dla modelu pióra łopatki zbudowanego z czterech łuków okręgowych reprezentujących poszczególne części pióra, tj. krawędzie natarcia i spływu oraz części wklęsłą i wypukłą, w jego przekrojach poprzecznych. Analizowane części pióra łopatki w jej przekrojach poprzecznych były połączone z zachowaniem klasy ciągłości G^2 . Zastosowany model pióra łopatki umożliwił łatwe obliczenie krzywych offset reprezentujących zaobserwowane punkty pomiarowe. Badania symulacyjne wykonano dla różnych kombinacji promieni krzywizn poszczególnych części pióra łopatki.

Badania numeryczne podzielono na dwa etapy. W pierwszym etapie badań symulacyjnych współrzędne zaobserwowanych punktów pomiarowych zostały niezależnie zmodyfikowane przez wprowadzenie błędów procesu wytwarzania oraz niepewności pomiarów współrzędnościowych. W drugim etapie badań numerycznych zaobserwowane punkty pomiarowe zostały zmodyfikowane wzdłuż kierunków odpowiadających promieniom krzywizn poszczególnych fragmentów pióra łopatki. Na podstawie zaobserwowanych punktów pomiarowych, wygenerowanych w obu etapach symulacji, obliczono współrzędne skorygowanych punktów pomiarowych oraz w dalszym etapie badań odchyłki lokalne między obliczonymi skorygowanymi punktami pomiarowymi a punktami reprezentującymi nominalne profile rozważanego modelu pióra łopatki.

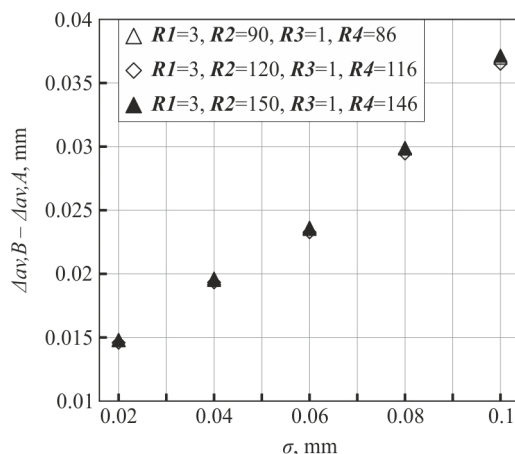
Wyniki pierwszego etapu badań symulacyjnych, w postaci różnic między średnimi odchyłkami obliczonymi z użyciem rozważanych metod korekcji promieniowej, dla różnych wariantów geometrycznych pióra łopatki przedstawiono na rysunkach 2-7 artykułu [9]. Ponadto, w tabeli 1 artykułu [9] przedstawiono wybrane odchyłki średnie obliczone z użyciem dwóch metod korekcji promieniowej w pierwszym etapie badań. Zaprezentowane wyniki wskazują m.in., że w przypadku rozpatrywanych punktów pomiarowych rozmieszczonych wzdłuż poszczególnych części pióra łopatki metoda korekcji promieniowej bazująca na krzywych Béziera drugiego stopnia jest korzystniejsza niż metoda korekcji stosująca krzywe interpolujące czwartego stopnia.

Rezultaty drugiego etapu badań symulacyjnych zaprezentowano na rysunku 19 niniejszego autoreferatu oraz na rysunku 8 i w tabeli 2 artykułu [9]. W przypadku drugiego etapu badań metoda bazująca na krzywych drugiego stopnia także uzyskała lepsze wyniki. Ponadto, zaletą używania krzywych Béziera drugiego stopnia podczas korekcji promieniowej jest możliwość zastosowania prostszych, w porównaniu do krzywych czwartego stopnia, formuł matematycznych niezbędnych do obliczenia współrzędnych skorygowanych punktów pomiarowych. Dodatkowo, w przypadku drugiego etapu badań symulacyjnych zaobserwowano mniejszy, niż w pierwszym etapie, wpływ zmian kształtu rozważanego modelu pióra łopatki na różnice między odchyłkami obliczonymi za pomocą analizowanych metod korekcji promieniowej.

Zaproponowana w artykule procedura badań symulacyjnych uwzględnia różne formy modyfikacji lokalizacji zaobserwowanych punktów pomiarowych. Zastosowane dwie metody zmian współrzędnych zaobserwowanych punktów pomiarowych wpływają na wartości odchyłek średnich obliczonych z użyciem dwóch rozważanych metod korekcji promieniowej. To potwierdza konieczność uwzględnienia różnych metod symulacji błędów wytwarzania i pomiarów podczas realizacji badań numerycznych. Ponadto, dużą korzyścią wynikającą z przeprowadzonych analiz, których wyniki zaprezentowano w artykule [9], jest zaproponowany model pióra łopatki umożliwiający zastosowanie różnych jej wariantów geometrycznych podczas badań symulacyjnych. Charakteryzuje się on dużą prostotą opisu matematycznego, przez co może być z powodzeniem stosowany podczas realizacji badań

numerycznych dotyczących różnych metod korekcji promieniowej stosowanych we współrzędnościowej technice pomiarowej.

Dodatkowo w artykule [9] zaprezentowano algorytm implementacji rozważanych metod korekcji promieniowej w komercyjnym oprogramowaniu metrologicznym współpracującym ze współrzędnościowymi maszynami pomiarowymi. Zaproponowany algorytm uwzględnia etapy realizowane jedno- i wielokrotnie. Algorytm ten umożliwia zastosowanie rozważanych metod w przemyśle i jest uniwersalny, tzn. dopuszcza zastosowanie także innych, niż rozpatrywanych w artykule, metod korekcji promieniowej.



Rys. 19. Różnice między odchyłkami obliczonymi z użyciem dwóch metod korekcji promieniowej dla różnych wartości odchylenia standardowego σ reprezentującego np. niepewność pomiaru i różnych odmian geometrycznych pióra łopatkki

Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć zaprezentowanych we wskazanym cyklu publikacji można zaliczyć:

- opracowanie nowej metody obliczania odchyłek kształtu w przypadku pomiarów współrzędnościowych powierzchni swobodnych wyrobów oraz sprawdzenie jej dokładności (artykuły nr 1 i 3),
- porównanie utworzonej metody do wybranych istniejących metod obliczania odchyłek kształtu (artykuły nr 1-3),
- opracowanie metody poprawy dokładności wybranej istniejącej, komercyjnej metody obliczania odchyłek kształtu oraz jej weryfikacja doświadczalna (artykuł nr 2),
- analizę wyników pomiarów współrzędnościowych powierzchni krzywoliniowych dla różnych wartości prędkości pomiarowej, liczb punktów pomiarowych i czasów maskowania punktów pomiarowych (artykuły nr 1-3),
- określenie wpływu liczby i rozmieszczenia punktów pomiarowych na wyniki pomiarów współrzędnościowych różnych charakterystyk pomiarowych pióra łopatkki (artykuły nr 4 i 5),
- opracowanie nowej metody lokalizacji punktów pomiarowych bazującej na wielokryterialnej analizie problemów decyzyjnych (artykuł nr 6),

- utworzenie nowej metody rozmieszczania punktów pomiarowych na powierzchniach krzywoliniowych wyrobów, która bazuje na logice rozmytej (artykuł nr 7),
- opracowanie metody rozkładu linii skanowania na powierzchniach swobodnych opartej o wyniki symulacji kształtowania ubytkowego wyrobów (artykuł nr 8),
- weryfikacja numeryczna i doświadczalna trzech utworzonych metod definiowania rozmieszczania punktów pomiarowych (artykuły nr 6-8),
- opracowanie metodologii badań symulacyjnych dotyczących korekcji promieniowej (artykuł nr 9),
- wybór najlepszej metody korekcji promieniowej w przypadku pomiarów współrzędnościowych pióra łopatki (artykuł nr 9),
- opracowanie algorytmu implementacji wybranych metod korekcji promieniowej w komercyjnym oprogramowaniu metrologicznym (artykuł nr 9).

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

W 2018 roku odbyłem dwa wyjazdy badawcze do University of Stavanger (UiS), Faculty of Science and Technology, Department of Mechanical and Structural Engineering and Materials Science (Stavanger, Norwegia). Oba wyjazdy badawcze odbyto w ramach projektu pt. „Ocena nowej metody określania lokalizacji punktów pomiarowych na powierzchniach krzywoliniowych” realizowanego w latach 2018 – 2019 i finansowanego z programu MINIATURA I przez Narodowe Centrum Nauki. Potwierdzeniem zrealizowanych wyjazdów są załączniki nr 13 i 14.

Wyjazdy badawcze trwały łącznie dwa tygodnie i odbyły się w miesiącach maju i wrześniu 2018 roku. W trakcie pobytu w Department of Mechanical and Structural Engineering and Materials Science UiS opracowano dwie niezależne metody określania rozkładu punktów pomiarowych na powierzchniach swobodnych przedmiotów. Prace nad algorytmami określania lokalizacji punktów pomiarowych i analizą wyników przeprowadzonych badań numerycznych realizowano wspólnie z Profesorem R. M. Chandima Ratnayake posiadającym dorobek naukowy w zakresie m.in. logiki rozmytej, planowania eksperymentów oraz systemów ekspertowych.

Dodatkowo, podczas dwóch wizyt badawczych w UiS wykonano analizę wyników badań doświadczalnych dotyczących wpływu różnych strategii pomiarowych na wyniki pomiarów wybranych powierzchni krzywoliniowych. Analizowanymi elementami strategii pomiarowych były: czas maskowania punktów pomiarowych po rozpoczęciu skanowania, prędkość pomiarowa oraz odległość między punktami pomiarowymi. Przeanalizowane składniki strategii pomiarowej mają istotny wpływ na postać rozmieszczenia punktów pomiarowych na powierzchniach swobodnych przedmiotów.

Efektom wyjazdów badawczych do University of Stavanger są trzy publikacje naukowe:

- Magdziak M., Ratnayake R.M.C. (2019) Optimal Prioritization of the Model of Distribution of Measurement Points on a Free-Form Surface in Effective Use of CMMs. In: Diering M., Wiczorowski M., Brown C. (eds) Advances in

Manufacturing II. MANUFACTURING 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. (załącznik nr 15)

- Magdziak M., Ratnayake R.M.C.: Contact Coordinate Measurements of Free-form Surfaces: A FIS for Optimal Distribution of Measurement Points. 2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Bangkok 2018, 1068-1072. (załącznik nr 16)
- Magdziak M., Ratnayake R.M.C.: Investigation of best parameters' combinations for coordinate measuring technique. Procedia CIRP 2018, 78, 213-218. (załącznik nr 17)

W 2015 roku odbyłem także trzydniowy wyjazd badawczy do Norwegian University of Science and Technology, Department of Mechanical and Industrial Engineering (Trondheim, Norwegia). W trakcie wyjazdu współpracowałem z Profesorem Knut Sørby w zakresie współrzędnościowej techniki pomiarowej oraz procesu kształtowania ubytkowego. Potwierdzeniem odbytego wyjazdu badawczego jest załącznik nr 18.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

▪ Osiągnięcia dydaktyczne

W 2008 roku opublikowałem skrypt uczelniany pt. „*CATIA V5 – Podstawy*” (Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, 153 strony, załącznik nr 19), za który w 2008 roku otrzymałem nagrodę Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza.

Pracując w Politechnice Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza w latach 2005 – 2020 prowadziłem zajęcia dydaktyczne z następujących przedmiotów:

- Engineering metrology (zajęcia w języku angielskim dla studentów odbywających część studiów w ramach programu Erasmus +),
- Podstawy metrologii (wykład),
- Metrologia (wykład),
- Miernictwo i systemy pomiarowe (laboratorium, wykład),
- Metrologia techniczna i systemy pomiarowe (wykład),
- Współrzędnościowa technika pomiarowa (laboratorium, wykład),
- Metrologia warsztatowa (laboratorium, wykład, studia podyplomowe),
- Nowoczesna metrologia warsztatowa (laboratorium, studia podyplomowe),
- Systemy pomiarowe (laboratorium, wykład, studia dualne),
- Obliczenia inżynierskie i statystyczne (laboratorium),
- Podstawy MES (laboratorium),
- Systemy CAM (laboratorium),
- Zaawansowane programowanie maszyn CNC (laboratorium),
- Automatyczne programowanie obrabiarek CNC (wykład, laboratorium),
- Obróbka skrawaniem i narzędzia (laboratorium),
- Seminarium dyplomowe.

W trakcie mojej pracy w Politechnice Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza byłem promotorem:

- 25 prac inżynierskich,
- 28 prac magisterskich.

Ponadto, zrecenzowałem:

- 36 prac inżynierskich,
- 5 prac magisterskich.

W 2012 roku opracowałem koncepcję kształcenia w języku angielskim na kierunku Mechanika i budowa maszyn na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza (załącznik nr 20).

W 2013 roku przeprowadziłem szkolenia pt. „*Współrzędnościowe maszyny pomiarowe 3D*” w ramach projektu pt. „*NANO – Nowoczesna Atrakcyjna oferta edukacyjna Nowo Otwartej kierunku Inżynieria materiałowa*” dla studentów Wydziału Matematyczno-Przyrodniczego Uniwersytetu Rzeszowskiego. Szkolenia składały się łącznie z 60 godzin (załącznik nr 21).

W latach 2013 – 2019 przeprowadziłem także szereg wykładów w języku angielskim dotyczących metrologii wielkości geometrycznych, współrzędnościowej techniki pomiarowej, analizy dokładności pomiarów oraz pomiarów powierzchni krzywoliniowych w następujących uczelniach zagranicznych:

- 2013 r.

Norwegian University of Science and Technology
Department of Mechanical and Industrial Engineering
Trondheim, Norwegia
Zajęcia dydaktyczne w ramach programu Erasmus (5 godzin).
Wizyta w uczelni zagranicznej trwała 7 dni.
Potwierdzeniem wizyty jest załącznik nr 22.

- 2014 r.

Vienna University of Technology (TU Wien)
Wiedeń, Austria
Zajęcia dydaktyczne w ramach programu Erasmus (5 godzin).
Wizyta w uczelni zagranicznej trwała 7 dni.
Potwierdzeniem wizyty jest załącznik nr 23.

- 2016 r.

University of Stavanger (UiS)
Faculty of Science and Technology
Department of Mechanical and Structural Engineering and Materials Science
Stavanger, Norwegia
Zajęcia dydaktyczne w ramach Funduszu Stypendialnego i Szkoleniowego (8 godzin).
Wizyta w uczelni zagranicznej trwała 5 dni roboczych.
Potwierdzeniem wizyty jest załącznik nr 24.

- 2017 r.

National Technical University of Athens
School of Mechanical Engineering

Ateny, Grecja

Przeprowadzenie wykładu pt. „*Coordinate measurements of free-form surfaces of products*”.

23.05.2017 r.

Potwierdzeniem przeprowadzonego wykładu jest załącznik nr 25.

- 2018 r.

University of Oviedo

Department of Construction and Manufacturing Engineering

Gijón, Hiszpania

Zajęcia dydaktyczne w ramach programu Erasmus + (8 godzin).

Wizyta w uczelni zagranicznej trwała 5 dni roboczych.

Potwierdzeniem wizyty jest załącznik nr 26.

- 2019 r.

Ivan Franko National University of Lviv

Lwów, Ukraina

Zajęcia dydaktyczne w ramach programu Erasmus + (8 godzin).

Wizyta w uczelni zagranicznej trwała 5 dni roboczych.

Potwierdzeniem wizyty jest załącznik nr 27.

- 2019 r.

Vilnius Gediminas Technical University

Wilno, Litwa

Zajęcia dydaktyczne w ramach programu Erasmus + (8 godzin).

Wizyta w uczelni zagranicznej trwała 5 dni roboczych.

Potwierdzeniem wizyty jest załącznik nr 28.

Dodatkowo, w latach 2016 – 2017 odbyłem dwie wizyty studyjne w uczelniach zagranicznych mające na celu nawiązanie współpracy w zakresie prowadzonych badań naukowych i realizacji projektów badawczych. Wizyty odbyły się w:

- 2016 r.

University of Iceland

School of Engineering and Natural Sciences

Reykjavik, Islandia

Wizyta studyjna zrealizowana w ramach Funduszu Stypendialnego i Szkoleniowego.

Wizyta w uczelni zagranicznej trwała 5 dni roboczych.

Potwierdzeniem wizyty jest załącznik nr 29.

- 2017 r.

University of Stavanger (UiS)

Faculty of Science and Technology

Department of Mechanical and Structural Engineering and Materials Science

Stavanger, Norwegia

Wizyta studyjna zrealizowana w ramach Programu Polsko-Norweska Współpraca Badawcza (Narodowe Centrum Badań i Rozwoju).

Wizyta w uczelni zagranicznej trwała 5 dni roboczych.
Potwierdzeniem wizyty jest załącznik nr 30.

Efektom współpracy z pracownikami wymienionych uczelni zagranicznych jest obecnie realizowany międzynarodowy projekt dydaktyczny:

- DIG-MAN: Integration of digital tools into product development and manufacturing education (załącznik nr 31)

09.2019 – obecnie

Projekt finansowany w ramach programu Erasmus +.

Nr 2019-1-EE01-KA203-051585

Call 2019 Round 1 KA2 – Cooperation for innovation and the exchange of good practices.

KA203 – Strategic Partnerships for higher education,

w ramach którego jestem wykonawcą.

W latach 2016 – 2017 pełniłem także opiekę nad sekcją Metrologia Wielkości Geometrycznych w ramach koła naukowego Programowanie i Automatyzacja Obróbki na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza (załącznik nr 32). Biorę także udział w pracach koła naukowego Formuła Student (załącznik nr 33).

Ponadto, w latach 2018 – 2020 pełniłem funkcję kierownika praktyk studenckich dla kierunku Mechanika i budowa maszyn Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa (WBMiL) Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza (załącznik nr 34). Będąc kierownikiem byłem odpowiedzialny m.in. za organizowanie i koordynowanie praktyk na WBMiL, nawiązywanie kontaktów z firmami w sprawie przyjęcia studentów na praktyki oraz współpracę z kierownictwem firm w zakresie realizacji programu praktyk.

▪ **Osiągnięcia organizacyjne**

- W latach 2007, 2010 i 2011 byłem członkiem Komisji Rekrutacyjnej ds. studiów niestacjonarnych na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza (załącznik nr 35).
- W latach 2013 – 2018 byłem członkiem Wydziałowej Komisji ds. Zapewniania Jakości Kształcenia na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza (załącznik nr 36).
- W latach 2016 – 2019 byłem egzaminatorem egzaminu kompetencyjnego przeprowadzanego na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza (załącznik nr 37).
- Jestem członkiem Komisji Prac Dyplomowych na studiach stacjonarnych drugiego stopnia na kierunku Mechanika i budowa maszyn na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza – specjalność: Komputerowe wspomaganie wytwarzania (załącznik nr 38).

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

W latach 2008 – 2019 otrzymałem następujące nagrody:

- 2019 r.

Indywidualna nagroda 3-go stopnia Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza za cykl publikacji dotyczących metrologii wielkości geometrycznych (załącznik nr 39).

- 2018 r.

Indywidualna nagroda 3-go stopnia Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza za cykl publikacji dotyczących pomiarów współrzędnościowych powierzchni swobodnych i dokładności wykonania wyrobów ceramicznych (załącznik nr 40).

- 2013 r.

Zespołowa nagroda 2-go stopnia Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza za cykl publikacji dotyczących współrzędnościowej techniki pomiarowej (załącznik nr 41).

- 2013 r.

Indywidualna nagroda 2-go stopnia Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza za uzyskanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych z wyróżnieniem (załącznik nr 42).

- 2008 r.

Indywidualna nagroda 3-go stopnia Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza za publikację skryptu uczelnianego pt. „*CATIA V5. Podstawy*” (załącznik nr 43).

W latach 2010 – 2011 byłem stypendystą w ramach projektu pn. „*Podkarpacki Fundusz Stypendialny dla Doktorantów*” (załącznik nr 44). Projekt był skierowany do osób, które posiadały otwarty przewód doktorski, a ich dysertacje i badania naukowe sprzyjały rozwojowi jednego z sektorów gospodarki kluczowych dla rozwoju województwa podkarpackiego, określonych w Regionalnej Strategii Województwa Podkarpackiego na lata 2005 – 2013.

Ponadto, w latach 2014 – 2015 otrzymywałem stypendium z projektu pt. „*Kształcenie innowacyjnych kadr GOW w Politechnice Rzeszowskiej*”. Projekt był realizowany w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki.

Dodatkowo, posiadam następujące certyfikaty będące potwierdzeniem odbytych szkoleń:

- ISO 9001:2015 Nr 424194 QM15

Tytuł szkolenia: Obsługa oprogramowania Zeiss Reverse Engineering.

Organizator szkolenia: Carl Zeiss Sp. z o.o.

Załącznik nr 45

- ISO 9001:2015 Nr 424194 QM15

Tytuł szkolenia: Obsługa bezstykowej głowicy pomiarowej LineScan.

Organizator szkolenia: Carl Zeiss Sp. z o.o.
Załącznik nr 46

- DOE-P-2014/11/04-01-PL

Tytuł szkolenia: Planowanie eksperymentu – szkolenie podstawowe.
Organizator szkolenia: TQMsoft Sp. z o.o. Sp. k.
Załącznik nr 47

- GDT-2013/11/15-06-PL

Tytuł szkolenia: Wymiarowanie i tolerowanie geometryczne wg normy ISO oraz ASME.
Organizator szkolenia: TQMsoft Sp. z o.o. Sp. k.
Załącznik nr 48

- MSARR-2013/08/30-01-PL

Tytuł szkolenia: Analiza systemów pomiarowych – metoda R&R.
Organizator szkolenia: TQMsoft Sp. z o.o. Sp. k.
Załącznik nr 49

- UG-P-2013/03/12-03-PL

Tytuł szkolenia: Niepewność pomiaru – metodyka szacowania.
Organizator szkolenia: TQMsoft Sp. z o.o. Sp. k.
Załącznik nr 50

- ISO 9001:2008 Nr 424173 QM08

Tytuł szkolenia: Obsługa modułu PCM oprogramowania Calypso.
Organizator szkolenia: Carl Zeiss Sp. z o.o.
Załącznik nr 51

W 2011 roku wziąłem także udział w wielu kursach specjalistycznych z zakresu obsługi współrzędnościowej maszyny pomiarowej ACCURA II firmy Carl Zeiss wyposażonej w głowice pomiarowe VAST XT, VAST XXT, stół obrotowy i oprogramowania Calypso, Blade Pro, Gear Pro i Holos (załączniki 52-59).

Pracując w Politechnice Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza brałem udział także w następujących szkoleniach i konferencjach:

- Komercjalizacja wiedzy oraz ochrona własności intelektualnej w przedsiębiorstwie

Szkolenie było zorganizowane w ramach projektu pt. „*Staż Sukcesem Naukowca – II Edycja*”.
Termin szkolenia: 19 – 20.02.2015 r.
Załącznik nr 60

- XI International Scientific Conference Coordinate Measuring Technique

Szczyrk, Polska
Termin konferencji: 2 – 4.04.2014 r.

- Sniffer Dog – Animator Innowacji

Szkolenie trwało trzy miesiące i było zorganizowane dla pracowników sektora B+R przez Rzeszowską Agencję Rozwoju Regionalnego S.A.

Program szkolenia obejmował kompetencje menedżerskie (16 godzin), zarządzanie projektami innowacyjno-badawczymi (24 godziny), finanse dla innowacji (16 godzin), komercjalizacja badań, marketing usług badawczych (24 godziny), zarządzanie i ochrona własności intelektualnej (12 godzin).

Termin szkolenia: 1.10 – 31.12.2013 r.

Załącznik nr 61

- ISMQC 2013 – 11th International Symposium on Measurement and Quality Control

Kraków, Kielce, Polska

Termin konferencji: 11 – 13.09.2013 r.

- Seminarium dla użytkowników maszyn pomiarowych Zeiss – Forum praktyków 2012

Spała, Polska

Termin seminarium: 5 – 7.09.2012 r.

Załącznik nr 62

Marek Magdziak

.....
(podpis wnioskodawcy)