

AUTOREFERAT
do wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego

1. Habilitant: **Paweł Leżański**

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe:

Mgr inż. mechanik o specjalności obrabiarki, narzędzia i technologia budowy maszyn, Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, 1974.

Dr n. t., Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, 1983 na podstawie pracy doktorskiej nt.: „Model procesu czołowego szlifowania płaszczyzn na szlifierce ze stołem obrotowym w aspekcie zastosowania sterowania adaptacyjnego”.

3. Przebieg zatrudnienia w jednostkach naukowych:

1974 – 1983 asystent, st. asystent, Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn, Zakład Automatykacji Obrabiarek.
1984 – adiunkt, Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn, do IX.2004 Zakład Automatykacji Obrabiarek, od X.2004 Zakład Robotyki i Automatykacji.
2001 – 2004 p.o. kierownika Zakładu Automatykacji Obrabiarek.

4. Jako osiągnięcie naukowe przedkładam monografię pt.:

„Automatyczne nadzorowanie procesu szlifowania wgłębnego kłowego”

Autor: **Paweł Leżański**,

Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Zeszyty Naukowe Nr 1120, Rozprawy Naukowe, Z. 427,

Rok wydania **2012**,

ISSN 0137-4834,

Stron 163.

Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników przekładanego osiągnięcia naukowego

Potrzeba automatyzacji procesów obróbkowych czyli eliminacji bezpośredniego udziału człowieka z ich nadzorowania jest obecnie jednym z najważniejszych czynników stymulujących rozwój technologii wytwarzania. Stwarza to konieczność budowy automatycznych systemów nadzorowania, które swoim działaniem obejmowałyby również wpływ zakłóceń rzadko występujących lub wolnozmiennych (w tym cyklicznych), takich np. jak awaria układu chłodzenia czy zużycie narzędzia. Uwzględniając te zakłócenia, automatyczny system nadzorowania zapewnia akceptowalny stan procesu obróbkowego, dążąc do stanu optymalnego w danych warunkach, przy czym nadrzędnym celem jest uzyskanie wymaganego poziomu jakości przedmiotu obrabianego i wydajności. Kierując się tymi założeniami, jako cel monografii pt. „Automatyczne nadzorowanie procesu szlifowania wgłębnego kłowego” przyjęto opracowanie ogólnych zasad i wytycznych do budowy strategii identyfikacji stanu procesu wgłębnego zewnętrznego szlifowania walcowego w kłach (w skrócie określanego również mianem wgłębnego szlifowania kłowego) opierających się na pomiarach sygnałów pośrednio charakteryzujących ten stan, mających na celu zastosowanie automatycznego nadzorowania tego procesu. Na przedmiot rozważań wybrano wgłębne zewnętrzne szlifowanie walcowe w kłach ponieważ jest ono jedną z najpowszechniej stosowanych odmian szlifowania i charakteryzuje się szeregiem specyficznych cech wynikających z uwarunkowań kinematyczno-geometrycznych. Zarówno przedmiot jak i

narzędzie w tej odmianie szlifowania wykonują ruch obrotowy. Zjawiska towarzyszące powstawaniu wióra w tych warunkach są przyczyną szybkiego rozwoju drgań samowzbudnych, mających istotny wpływ na dokładność geometryczną przedmiotu obrabianego i przebieg zużycia ściernicy. Wobec dużej losowości rozwoju tych zdarzeń, najkorzystniejszym sposobem prowadzenia procesu wydaje się być zastosowanie automatycznego nadzorowania. Warunki kinematyczne tej odmiany szlifowania stwarzają również istotne problemy z pomiarem wielkości charakteryzujących proces, a co za tym idzie, również ze znalezieniem odpowiednich metod przetwarzania sygnałów pomiarowych.

Cel monografii i wynikające z niego zadania do realizacji zostały sformułowane w taki sposób, aby możliwe było udowodnienie tezy mówiącej, że skuteczne nadzorowanie procesu szlifowania wymaga uzyskania danych charakteryzujących proces ze względu na różne ograniczenia i kryteria oceny, którym podlega. Dane te możliwe są do uzyskania z sygnałów pomiarowych charakteryzujących możliwie wszechstronnie stan i wyniki procesu. Jednak wobec losowego charakteru procesu szlifowania i trudności w realizacji pomiarów w warunkach przemysłowych, uzyskane dane o procesie są często niepewne, nieostre, niepełne, a nawet sprzeczne. Wynika z tego, że skuteczne nadzorowanie procesu szlifowania jest zadaniem z zakresu wielokryterialnego wspomaganie decyzji w warunkach niepewności. Automatyzacja tego zadania jest możliwa poprzez zastosowanie komputerowo wspomaganym metod odkrywania wiedzy z danych niepewnych i nieostrych.

Na wstępie podano znaczenie podstawowych pojęć z zakresu monitorowania, diagnostyki i nadzorowania jakie przyjęto w monografii. Zgodnie z nimi, automatyczny system nadzorowania obejmuje diagnostykę, która oprócz wykrywania nieprawidłowości w stanie procesu czyli jego monitorowania, ustala przyczyny tych nieprawidłowości, a to z kolei stanowi podstawę do doboru właściwego sterowania i optymalizacji procesu.

Istotnym elementem każdego procesu szlifowania jest obciążanie ściernicy. Decyduje ono o jej kształcie geometrycznym i o topografii jej powierzchni czynnej, a tym samym ma wpływ na wyniki szlifowania. Z tego względu monitorowanie obciążania ściernicy mające na celu nadanie jej odpowiednich parametrów powinno być objęte nadzorowaniem. W monografii tej nie jest ono jednak omawiane ponieważ temu zagadnieniu poświęconych jest bardzo wiele prac, a ponadto wpływ obciążania na przebieg omawianego w monografii procesu szlifowania w głębszym jest ograniczony do stosunkowo krótkiego, początkowego fragmentu okresu trwałości ściernicy. Dla realizacji automatycznego nadzorowania procesu szlifowania ważne są również takie zagadnienia jak:

- wykrywanie pierwszego kontaktu ściernicy z przedmiotem obrabianym,
- wykrywanie kolizji,
- monitorowanie poprawności zamocowania przedmiotu, dostarczania chłodziwa itp.

Są to zagadnienia ważne ale obecnie w większości rozwiązane już na poziomie technicznym i dlatego również nie są omawiane w tej monografii.

Następnie dokonano przeglądu stanu wiedzy w zakresie zagadnień związanych z problematyką nadzorowania procesów szlifowania. Omówiona została ogólna struktura stosowanych układów pomiarowych, przykłady realizacji pomiarów mocy szlifowania, składowych siły szlifowania, drgań, emisji akustycznej oraz innych wielkości procesowych wraz z analizą ich efektywności w nadzorowaniu. Dokonano również przeglądu stosowanych metod selekcji cech sygnałów pomiarowych oraz modelowania i klasyfikacji stanu procesu szlifowania. Ponadto omówiono ideę inteligentnego systemu szlifowania. W przeglądzie tym uwzględniono około 150 pozycji literatury.

Ustalono, że podstawą prowadzenia nadzorowania procesu powinien być tzw. akceptowalny obszar szlifowania. Obszar ten ograniczony jest możliwością powstania przypaleń i innych uszkodzeń cieplnych powierzchni obrabianej, utraty stabilności procesu spowodowanej efektem regeneracji drgań samowzbudnych oraz dopuszczalną chropowatością powierzchni. Dowolny punkt wewnątrz tego obszaru wyznacza parametry nastawne procesu spełniające wszystkie ograniczenia. Jednakże, głównie ze względu na ciągłą zmianę zdolności skrawnej ściernicy, proces szlifowania ma charakter losowy i niestacjonarny. Skutkuje to przemieszczaniem się granic zalecanego obszaru szlifowania w czasie pojedynczego okresu trwałości ściernicy. Wobec losowości tych zakłóceń,

najefektywniejszą metodą utrzymania procesu w stanie, w którym spełnione są wszystkie ograniczenia jest ciągłe monitorowanie stanu zużycia ściernicy oraz zjawisk ograniczających jego prawidłowy przebieg. Określa to parametry procesu i jakości przedmiotu szlifowanego, które powinny być objęte nadzorowaniem. Zaliczono do nich: makro- i mikrozużycie czynnej powierzchni ściernicy (CPS), drgania samowzbudne, uszkodzenia cieplne warstwy wierzchniej (WW) przedmiotu szlifowanego oraz chropowatość powierzchni szlifowanej. Wobec tego przeprowadzono analizę zjawisk i procesów powiązanych z tymi wielkościami, która pozwoliła ustalić warunki zrealizowania automatycznego nadzorowania procesu dotyczące układów monitorowania i zastosowania metod identyfikacji stanu i wyników procesu.

Z punktu widzenia automatyzacji szlifowania, zagadnienie wiarygodnego opisu zmian w zdolności skrawnej ściernicy zachodzących w następstwie użycia jej w procesie szlifowania ma zasadnicze znaczenie. Mikrogeometria CPS odnosi się do stanu poszczególnych ziaren ściernych i ich otoczenia (porów powietrza i mostków spoiwa). Zmiany mikrogeometrii związane są z tępieniem się ziaren, ich wykruszaniem i pękaniem, z wrywaniem ziaren i erozją spoiwa, a także z zalepianiem porów powietrza produktami szlifowania. Wszystkie te zjawiska wywierają znaczny wpływ na jakość warstwy wierzchniej przedmiotu szlifowanego, wydajność, energochłonność i koszty obróbki. Zmiany w mikrogeometrii CPS mogą być określone jako mikrozużycie ściernicy. Makrogeometria CPS odnosi się do kształtu bryły ściernicy i ma bezpośredni wpływ na odchyłki kształtowo-wymiarowe przedmiotu szlifowanego. Suma zmian zachodzących w mikrogeometrii ściernicy składa się na jej makrozużycie, czyli zmiany w jej makrogeometrii. Podczas szlifowania równolegle zachodzą oba wymienione procesy tzn. makro- i mikrozużycia ściernicy.

Makrozużycie ściernicy może być opisane wieloma wskaźnikami związanymi z jej zużyciem objętościowym i promieniowym. Wskaźniki związane ze zużyciem objętościowym ściernicy są istotne z punktu widzenia kosztów szlifowania. Natomiast dla osiągnięcia dokładności wymiarowo-kształtowej przedmiotu szlifowanego oraz dla zapewnienia stabilności procesu istotne znaczenie mają wskaźniki związane ze zużyciem promieniowym. Szczególną formą zużycia promieniowego ściernicy, mającą istotne znaczenie dla stabilności procesu szlifowania, jest rozwój falistości na obwodzie ściernicy. Falistość ściernicy, obok falistości przedmiotu, jest podstawową przyczyną regeneracji drgań samowzbudnych występujących w szlifowaniu walcowym, mających bezpośredni wpływ na jakość powierzchni szlifowanego przedmiotu. Rozwój drgań samowzbudnych może prowadzić do utraty stabilności procesu i uszkodzenia ściernicy lub przedmiotu. Z tego względu powinien być podstawowym kryterium oceny stopnia zużycia ściernicy. Ponieważ ta forma zużywania się ściernicy ma ścisły związek ze stabilnością procesu szlifowania to zagadnienie to zostało rozważone w oparciu o analizę dynamiki procesu szlifowania wgłębnego kłowego. Podstawą tych rozważań jest schemat blokowy struktury dynamicznej procesu zaproponowany przez R. Snoeys'a i D. Brown'a, o zmodyfikowanych przez autora monografii funkcjach współczynników interferencji falistości ściernicy i przedmiotu. Schemat ten uwzględnia sztywność szlifowania, opór zużycia ściernicy, sztywność strefy styku ściernicy z przedmiotem oraz odkształcenie sprężyste układu OUPN będące funkcją jego podatności dynamicznej i współczynnika sztywności statycznej. Ponadto uwzględniono efekt regeneracji drgań zarówno dla przedmiotu jak i dla ściernicy. Efekt ten jest modulowany zjawiskiem interferencji geometrycznej fal powstałych odpowiednio na przedmiocie i ściernicy.

Przyjęty schemat struktury dynamicznej procesu szlifowania wgłębnego umożliwia ustalenie wyrażenia określającego graniczne warunki stabilności tego procesu. Wynika z niego, że osiągnięciu stabilności procesu sprzyja jak największa sztywność statyczna szlifierki, natomiast wzrost sztywności szlifowania, oporu zużycia ściernicy, sztywności strefy styku oraz szerokości szlifowania powodują przybliżanie się do warunków procesu niestabilnego. Dla nadzorowania procesu szlifowania istotne znaczenie mają sztywność szlifowania oraz opór zużycia ściernicy ponieważ ich wpływ jest dodatkowo modulowany zjawiskiem interferencji geometrycznej fal, w wyniku którego może wystąpić ścinanie wierzchołów fal powstałych odpowiednio na przedmiocie lub na ściernicy. Stopień tego

ścinania wyraża współczynnik interferencji geometrycznej fal, który jest ilorazem wysokości fali pozostającej odpowiednio na powierzchni przedmiotu lub CPS do amplitudy generujących ją drgań samowzbudnych. Dla parametrów stosowanych w konwencjonalnym szlifowaniu częstotliwość progowa, powyżej której następuje ścinanie wierzchołków fal powstałych dla przedmiotu wynosi poniżej 500 Hz. Natomiast częstotliwość progowa dla ściernicy, ze względu na zalecany dla szlifowania stosunek prędkości ściernicy do przedmiotu jest do 100, a nawet więcej razy wyższa. Tłumaczy to, dlaczego prawie wszystkie procesy obwodowego szlifowania walcowego przebiegają w warunkach niestabilności z punktu widzenia efektu regeneracji falistości na ściernicy. Występujące w tych procesach częstotliwości drgań samowzbudnych, które są zbliżone do częstotliwości drgań własnych układu OUPN, mają zwykle wartości wyższe od częstotliwości progowej przedmiotu ale znacznie niższe od częstotliwości progowej ściernicy. Oznacza to, że falistość ściernicy podczas tych procesów może rozwijać się do bardzo dużych wartości. Z tego względu stan drgań samowzbudnych powinien być nadzorowany ponieważ jest ważnym symptomem stanu ściernicy. Jednocześnie drgania samowzbudne nie są wiarygodnym symptomem stanu falistości przedmiotu, ponieważ fale na przedmiocie są najczęściej ścinane przez ściernicę.

Korzystnym zjawiskiem jest fakt, że falistość na ściernicy rozwija się znacznie wolniej niż na przedmiocie. Powoduje to, że rozwój drgań jako kryterium trwałości ściernicy nabiera znaczenia w miarę upływu czasu szlifowania od ostatniego obciążania ściernicy. To, czy drgania należy traktować jako najważniejsze kryterium trwałości ściernicy zależy jeszcze od kombinacji zastosowanych parametrów obróbki i parametrów obciążania ściernicy. Dla wyższych wartości właściwej wydajności objętościowej szlifowania decydujące znaczenie dla okresu trwałości ściernicy może mieć zagrożenie uszkodzeniami cieplnymi lub przekroczenie dopuszczalnej wartości chropowatości powierzchni obrabianej. Dla mniejszych wartości właściwej wydajności objętościowej, o przydatności ściernicy decyduje przede wszystkim poziom drgań.

Stan mikrogeometrii CPS jest opisywany wieloma parametrami przy użyciu różnych metod pomiarowych. Ogólnie metody te można podzielić na metody bezpośrednie i pośrednie. Metody bezpośrednie oparte są na pomiarze zarysu profilu CPS i wyznaczeniu jego parametrów geometrycznych lub opisu rozkładów gęstości tych parametrów. Ogólnie można stwierdzić, że przydatność wszystkich metod bezpośredniego opisu mikrogeometrii CPS do automatycznego nadzorowania szlifowania ograniczona jest szeregiem niedoskonałości wynikających z istoty profilografowania. Podstawową wadą są jednak bardzo ograniczone możliwości wykonania pomiaru w warunkach przemysłowych oraz niejawną zależność pomiędzy tymi parametrami a wynikami szlifowania. Mimo tych wad, profilogram jest najobszerniejszym źródłem informacji na temat mikrogeometrii CPS i może być wykorzystany w warunkach laboratoryjnych do celów porównawczych. W taki sposób pomiar profilu CPS wykorzystano również w omawianej monografii.

Wobec wad bezpośrednich metod opisu stanu CPS, do wykorzystania w systemach nadzorowania pozostaje pośrednia ocena stanu CPS na podstawie mierzalnych w czasie szlifowania sygnałów pomiarowych wielkości procesowych skorelowanych ze zdolnością skrawną ściernicy. Takie podejście wymaga określenia zależności jakie występują pomiędzy mierzalnymi wielkościami procesowymi a parametrami CPS.

Ważnym wielkością procesową, powszechnie uważaną za dobrze skorelowaną ze zdolnością skrawną ściernicy jest siła szlifowania oraz wszystkie wielkości od niej pochodne. Jako podstawę rozważań zależności siły szlifowania od parametrów mikrogeometrii CPS przyjęto model siły opracowany przez L. Lichun'a i F. Jizai. Przeprowadzona analiza pokazuje, że parametry mikrogeometrii CPS istotnie wpływają na wartość składowych siły szlifowania. Nie oznacza to jednak, że monitorowanie siły szlifowania zapewnia wiarygodną diagnostyką zdolności skrawnej ściernicy. Wynika to z dwóch powodów.

Po pierwsze, przebieg zjawisk składających się na proces zużywania się ściernicy w okresie jej trwałości rzadko ma charakter monotoniczny. Bardzo często początkowa dominacja zużycia poprzez ścieranie się wierzchołków ziaren, na skutek wzrostu obciążenia pojedynczych ziaren lub zalepiania porów prowadzi do wykruszania i pęknięcia ziaren czyli

pojawienia się zjawiska samoostrzenia ściernicy. Każdemu mechanizmowi zużycia ściernicy odpowiada jednak inny przebieg składowych siły szlifowania. Ścieranie się wierzchołków ziaren powoduje wzrost powierzchni starcia ostrzy co decyduje o wzroście wartości składowych siły szlifowania. W przypadku wykruszania i pęknięcia ziaren, sumaryczna powierzchnia starcia ostrzy maleje, nowe, ostre ziarna stają się skuteczne w przestrzeni CPS, co w konsekwencji przyczynia się do spadku siły szlifowania. Po drugie, analizowane zależności nie uwzględniają wpływu na wielkość siły szlifowania szeregu zakłóceń związanych z dynamiką procesu oraz oddziaływaniem zjawisk cieplnych i chemicznych, a także wpływu zastosowanych parametrów nastawnych szlifowania i obciążania ściernicy.

Wnioskowanie zatem o stanie zdolności skrawnej ściernicy nie może odbywać się jedynie na podstawie pomiaru składowych siły szlifowania. W kolejnych cyklach roboczych w okresie trwałości ściernicy wartości poszczególnych składowych siły mogą losowo zmieniać swoją wartość w zależności od przewagi określonego mechanizmu zużycia ściernicy i wpływu innych zjawisk towarzyszących procesowi szlifowania. Konieczna jest więc ocena na podstawie większej liczby symptomów uzyskanych z różnych sygnałów pomiarowych. Wzięcie pod uwagę współzależności pomiędzy różnymi symptomami może ujawnić rzeczywistą przydatność poszczególnych symptomów, w tym związanych z siłą szlifowania.

Wyniki wielu badań doświadczalnych wskazują, że oprócz siły szlifowania, wybrane cechy sygnału emisji akustycznej są skorelowane z mikrogeometrią ściernicy. Brak jest jednak ustaleń jaki jest ilościowy wkład poszczególnych źródeł emisji akustycznej podczas szlifowania w ogólną wartość energii tego sygnału. Sygnał emisji akustycznej jest nieokresowy, zawiera wiele, często krótkotrwałych, składowych częstotliwościowych i nie daje się opisać żadną niewykłaną matematyczną zależnością. A zatem, jego przydatność do nadzorowania mikrogeometrii CPS można określić jedynie doświadczalnie.

Kolejną grupą wielkości zależnych od mikrogeometrii CPS są parametry warstwy wierzchniej i struktury geometrycznej powierzchni szlifowanej. Charakter tych zależności może być określony ogólną prawidłowością, która mówi, że większe grubości wiórów i spadek liczności skutecznych ostrzy powodują wzrost chropowatości powierzchni szlifowanej i zmniejszenie wartości maksymalnych naprężeń własnych w warstwie wierzchniej. Podobnie jak w przypadku siły szlifowania i emisji akustycznej, zależności te mają charakter pośredni i są określane na drodze empirycznej. Dodatkową trudnością jest fakt, że parametry warstwy wierzchniej i praktycznie również chropowatości są niemierzalne on-line.

Następnym ważnym ograniczeniem wymagającym nadzorowania, któremu podlega proces szlifowania jest możliwość powstania przypaleń i innych uszkodzeń cieplnych powierzchni obrabianej. Ciepło do przedmiotu w strefie kontaktu ze ściernicą powoduje lokalny wzrost temperatury jego warstwy przypowierzchniowej, co jest przyczyną zachodzących w niej odkształceń plastycznych, transformacji fazowych, mikropęknięć oraz innych zjawisk fizycznych i chemicznych. W konsekwencji dochodzi do zmiany rozkładu naprężeń własnych i mikrotwardości tej warstwy, a na powierzchni pojawiają się charakterystyczne barwne naloty nazywane przypaleniami szlifierskimi. Niestety bezpośrednia identyfikacja tych zjawisk w trakcie trwania procesu, a nawet tuż po jego zakończeniu, jest bardzo utrudniona. Oczywiście wykluczone jest stosowanie metod pomiarowych wymagających zniszczenia przedmiotu. Natomiast istniejące nieniszczące metody pomiarowe cechują się raczej niską dokładnością i nie nadają się do stosowania on-line w warunkach przemysłowych. W praktyce pozostaje stosowanie wskaźników skorelowanych z właściwościami warstwy wierzchniej, możliwych do wyznaczania w oparciu o wielkości nastawne procesu i pomiar wybranych wielkości procesowych.

Z przeprowadzonych w monografii rozważań wynika, że właściwości warstwy wierzchniej przedmiotu najlepiej opisuje wskaźnik będący iloczynem właściwej mocy szlifowania i czasu kontaktu dowolnego punktu na powierzchni przedmiotu ze ściernicą podczas jego jednego obrotu, powszechnie oznaczany jako B_p . Wskaźnik ten jest łatwy do wyznaczenia podczas szlifowania. W praktyce wymaga jedynie pomiaru składowej stycznej siły szlifowania ponieważ pozostałe wielkości to parametry nastawne, które można traktować jako stałe.

Do nadzorowania uszkodzeń cieplnych warstwy wierzchniej przedmiotu szlifowanego wykorzystywany jest również pomiar emisji akustycznej. Oparte jest to na ustaleniu, że sygnał emisji akustycznej generowany jest przez zjawiska związane z deformacją struktury materiału przedmiotu i ściernicy oraz tarcia w strefie tworzenia wióra. Z tego powodu jest dobrze skorelowany z warunkami kształtującymi powierzchnię po obróbce.

Chropowatość powierzchni przedmiotu po szlifowaniu jest jednym z najważniejszych wyników procesu, bardzo często stosowanym jako podstawowe kryterium oceny prawidłowości jego przebiegu. Z punktu widzenia nadzorowania procesu szlifowania szczególne znaczenie ma fakt, że w wielu pracach wykazano zależność między siłą szlifowania oraz wartością skuteczną emisji akustycznej a chropowatością powierzchni szlifowanej. Uzyskane doświadczalnie zależności nie wskazują jednak na dobrą korelację między badanymi wielkościami procesowymi a chropowatością i nie mogą być uogólniane. W zależności od zastosowanych parametrów nastawnych, znak współczynnika korelacji pomiędzy siłą szlifowania a chropowatością może się zmieniać w zależności od dominującego mechanizmu zużycia ściernicy. Trochę lepszą korelację chropowatość wykazuje z sygnałem emisji akustycznej. Wynika to z tego, że sygnał EA jest bezpośrednio związany z aktywnością poszczególnych ziaren na powierzchni CPS kształtujących topografię powierzchni przedmiotu. Mimo to, szacowanie chropowatości jedynie na podstawie wartości wybranej cechy jednego sygnału pomiarowego (np. wartości skutecznej) jest ryzykowne. W praktyce, chropowatość prawie zawsze rośnie wraz z upływem okresu trwałości ściernicy. Wynika to z tego, że chropowatość jest efektem kinematyczno-geometrycznego przenikania się topografii CPS i powierzchni przedmiotu, na który nakładają się drgania zachodzące pomiędzy ściernicą a przedmiotem. Drgania powodują spadek liczby ostrzy skutecznych, a tym samym wzrost przekroju wiórów przypadających na jedno ostrze i w konsekwencji wzrost chropowatości szlifowanej powierzchni. Wobec nieuchronnego rozwoju drgań samowzbudnych, w miarę upływu okresu trwałości ściernicy, mechanizm ten zaczyna dominować w kształtowaniu chropowatości przedmiotu.

Podsumowując przeprowadzoną analizę zjawisk i procesów mających wpływ na stan i wyniki procesu szlifowania kłowego wglębnego stwierdzono, że nadzorowanie procesu powinno opierać się na pomiarach parametrów procesu możliwych do zrealizowania w trakcie jego trwania, uzupełnionych pomiarami wymiaru i kształtu szlifowanego przedmiotu. Najczęściej stosowany jest pomiar mocy szlifowania, składowych siły szlifowania, drgań oraz emisji akustycznej. Układ monitorowania procesu to co najmniej jeden lub więcej przetworników pomiarowych generujących sygnały pozwalające na wyznaczenie wybranych wartości cech tych sygnałów, stanowiących potencjalne symptomy stanu procesu i zdolności skrawnej ściernicy.

Każda z omówionych wielkości procesowych posiada duży potencjał w zakresie przydatności do nadzorowania stanu zdolności skrawnej ściernicy oraz stanu procesu. Stosowanie jednak prostych, uzyskiwanych bezpośrednio z pomiaru (np. wartość średnia), miar sygnałów pomiarowych wielkości procesowych z reguły nie daje zadowalających rezultatów oceny stanu procesu. Ten duży potencjał przydatności poszczególnych pomiarów zawarty jest w miarach opisujących ich cechy dynamiczne. Ujawnienie tych cech wymaga zastosowania zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów. Wynika z tego, że podstawowe znaczenie ma dobór czujników wielkości procesowych i metod przetwarzania sygnałów pomiarowych, zapewniających najbardziej reprezentatywny zestaw miar opisujących nadzorowane zjawiska.

Klasyfikacja stanu procesu w oparciu o więcej niż jeden symptom wymaga posłużenia się modelem zależności pomiędzy nadzorowanymi wielkościami wyjściowymi procesu a wyznaczonymi symptomami. W systemach nadzorowania stosowane są prawie wyłącznie modele empiryczne, najczęściej oparte na metodach sztucznej inteligencji. O wyborze rodzaju zastosowanego modelu w pierwszym rzędzie decyduje jego pracochłonność oraz zdolność do uogólniania i aktualizacji.

Wnioski wypływające z analizy teoretycznej i literatury zweryfikowano doświadczalnie.

Badania doświadczalne wykonano na stanowisku zbudowanym w oparciu o uniwersalną szlifierkę do wałków SWF-25 firmy JOTES. Wprowadzone modyfikacje nadały

jej cechy typowe dla obecnie produkowanych szlifierek sterowanych numerycznie oraz umożliwiły monitorowanie procesu szlifowania.

Na układ monitorowania procesu składały się układy pomiaru wszystkich składowych siły szlifowania, drgań, emisji akustycznej oraz trzy specjalne przyrządy pomiarowe. Pierwszy z nich to przyrząd aktywnej kontroli szlifowanego przedmiotu pozwalający na jednoczesny pomiar jego średnicy i błędu kształtu, drugi to przyrząd do pomiaru makrogeometrii zarysu profilu CPS, a trzeci to przyrząd do pomiaru mikrogeometrii zarysu CPS.

Badania doświadczalne miały na celu jakościową ocenę przydatności wybranych do pomiaru wielkości procesowych do nadzorowania szlifowania wgłębnego kłowego. W tym celu, w oparciu o dokonane pomiary poszukiwano efektywnych metod przetwarzania sygnałów pomiarowych pozwalających na znalezienie dobrego zestawu miar sygnałów pomiarowych pozwalającego na wielokryterialną ocenę stanu i wyników procesu szlifowania. Miary te skonfrontowano z wynikami pomiarów wielkości bezpośrednio charakteryzujących wyniki szlifowania takich jak parametry profilu CPS oraz chropowatość i falistość powierzchni szlifowanej wykonanymi off-line. Pozwoliło to na ustalenie i zweryfikowanie związków zachodzących między obiema grupami wielkości oraz na jakościową ocenę przydatności wybranych miar do nadzorowania procesu. Ocenę ilościową i selekcję miar sygnałów przeprowadzono równolegle z klasyfikacją stanu procesu.

Do pomiaru EA zastosowano czujnik z transmisją bezprzewodową umiejscowiony na czole wrzeciona ściernicy umożliwiający pomiar EA w zakresie do około 1MHz w postaci sygnału oryginalnego lub jego wartości skutecznej. Pomiar drgań w zakresie do 10 kHz umożliwiał czujnik umiejscowiony na obudowie kła konika. Do pomiaru składowych siły szlifowania wykorzystywano pomiar różnicy ciśnień w komorach łożysk hydrostatycznych wrzeciona ściernicy.

Zmiany parametrów nastawnych podczas badań były realizowane poprzez zmiany właściwej wydajności objętościowej szlifowania Q'_w oraz stosunku prędkości obwodowej ściernicy do prędkości ości obwodowej przedmiotu q . W przeprowadzonych próbach szlifowano wgłębnie próbki ze stali 38HMJ o twardości 53 HRC ściernicą 38A80K5VBE z prędkością 40 m/s. Próby przeprowadzono dla Q'_w równej 1, 2 i 3 mm³/mms oraz dla q równego 60, 100 i 400 w seriach, dla których na początku ściernica była w pełni ostra tuż po obciążeniu, a na końcu w pełni zużyta. Szlifowano w cyklach roboczych składających się z dosuwu roboczego bez wyiskrzania i z szybkiego wycofania ściernicy, każdorazowo zbierając naddatek wielkości 150 μm.

W czasie prób rejestrowano cyfrowo sygnały pomiarowe składowych siły szlifowania, drgań oraz sygnał oryginalny emisji akustycznej i jego wartość skuteczną. Drgania oraz wartość skuteczną emisji akustycznej rejestrowano w pakietach po 2048 próbek, co 1 sekundę, z częstotliwością próbkowania 10 kHz. Sygnał oryginalny EA w postaci pakietu składającego się z 10000 próbek rejestrowano raz na co drugi cykl szlifowania z częstotliwością próbkowania 1 MHz. Siły szlifowania rejestrowano w sposób ciągły z częstotliwością próbkowania 500 Hz.

Pomiary parametrów zarysu i falistości CPS oraz błędów kształtu i falistości przedmiotu wykonywano po każdym dwóch cyklach roboczych, co dla szlifowania przedmiotów o średnicy około 100 mm jest równoznaczne z usunięciem 100 mm³ naddatku na 1 mm szerokości ściernicy.

Do sterowania układami napędowymi szlifiarki oraz rejestracji wszystkich danych pomiarowych w postaci binarnej, za wyjątkiem oryginalnego sygnału EA, wykorzystano oprogramowanie wykonane przez P. Lajmerta. Zarejestrowane sygnały pomiarowe w postaci binarnej były przetwarzane na pliki tekstowe za pomocą własnego oprogramowania wykonanego w języku BORLAND C++ . Do analizy spektralnej i statystycznej sygnałów wykorzystano własny pakiet programowy nazwany DAQSYSTEM wykonany w środowisku LabVIEW i pakiet STATISTICA.

Pakiet programowy DAQSYSTEM składa się z czterech modułów. Moduł DAQ służy do akwizycji danych przy użyciu trzech kart pomiarowych National Instruments: NI6221, NI6040E oraz NI5120. Moduł ten nie był wykorzystywany w omawianych badaniach doświadczalnych.

Moduł DATA VIEW służy do wstępnej analizy zarejestrowanych danych na podstawie ich wykresu i przewijanej tabeli wartości liczbowych kolejnych próbek wybranego do analizy sygnału. Moduł FFT jest programem służącym do analizy spektralnej sygnałów pomiarowych wybranej wielkości składających się na cały okres trwałości ściernicy za pomocą DFT. Moduł WA jest przeznaczony do przeprowadzenia pakietowej analizy falkowej sygnałów pomiarowych.

Pomiary parametrów zarysu topografii i falistości CPS wykonywano w celu bezpośredniej oceny stanu, odpowiednio - mikro- i makrogeometrii CPS. Umożliwiło to skorelowanie parametrów CPS z innymi parametrami stanu procesu szlifowania. Dla wyznaczania parametrów rozkładu ostrzy w przestrzeni roboczej CPS i falistości CPS stosowano pomiar zarysu CPS prostopadle do jej obwiedni w kierunku równoległym do wektora prędkości szlifowania czyli wzdłuż obwodu ściernicy.

Na każdy pomiar zarysu topografii CPS składało się co najmniej 2500 próbek pomiarowych wyznaczanych co 0,01 mm obwodu ściernicy, co daje długość odcinka pomiarowego równą co najmniej 25 mm. Rozdzielczość pomiaru wysokości profilu wynosiła 1/15 μm , a zakres pomiarowy 200 μm . Pomiary wykonywano z trzykrotnym powtórzeniem. Pomiar ten wykorzystano do opisu mikrogeometrii CPS za pomocą parametrów liniowego opisu krzywej udziału materiałowego. Opis ten dzieli całkowitą wysokość profilu na trzy charakterystyczne wielkości: głębokość rdzenia chropowatości R_k , zredukowaną wysokość wzniesień R_{pk} i zredukowaną głębokość wgłębień R_{vk} . Suma wszystkich tych trzech parametrów to zredukowana wysokość profilu R_{Ges} . Pomiar parametrów liniowego przedstawienia krzywej udziału materiałowego zarysu profilu CPS wykazał, że do oceny stanu mikrogeometrii CPS należy posługiwać się raczej trendem zmian tych parametrów niż ich bezwzględными wartościami. Pozwoli to na estymację zmian zachodzących w mikrogeometrii w wyniku zużywania się CPS.

Pomiary falistości CPS wykonywano podobnie jak pomiary zarysu jej profilu z tym, że na każdy pomiar składa się co najmniej 7500 próbek pomiarowych wyznaczanych z krokiem próbkowania 0,2 mm, co daje długość pełnego obwodu ściernicy. Analiza harmoniczna tych profili pozwala na ocenę falistości i błędów kształtu CPS. Składowe harmoniczne występujące w zarysach profili CPS odpowiadają różnym częstościom fal na obwodzie ściernicy. Największe amplitudy falistości odnotowano w zakresie od 10 do 50 fal/obwód. Dlatego jako miarę falistości CPS przyjęto średnią amplitudę widma mocy jej zarysu obwodowego w tym zakresie. Analizę wykonano za pomocą szybkiej transformaty Fouriera. Analiza ta wykazała, że falistość CPS będąca wynikiem rozwoju efektu regeneracyjnego drgań na ściernicy jest bardzo dobrym symptomem stanu makrogeometrii CPS.

W celu bezpośredniej oceny stanu jakości przedmiotu szlifowanego wykonywano pomiary chropowatości oraz kształtu i falistości powierzchni szlifowanej. Pomiary chropowatości przedmiotu po szlifowaniu wykazały, że zużycie ściernicy we wszystkich przypadkach powoduje wzrost chropowatości powierzchni przedmiotu nawet o około 40%. Dużo wyższe chropowatości zanotowano dla prób, dla których szlifowanie przebiegało w strefie uszkodzeń cieplnych. Tak jak w przypadku oceny falistości CPS, ocenę błędów kształtu i falistości zarysów profilu obwodowego przedmiotu po szlifowaniu wykonano w oparciu o ich analizę harmoniczną za pomocą DFT. W przeprowadzonej analizie jako miarę falistości przedmiotu przyjęto średnią amplitudę widma mocy jego zarysu obwodowego w zakresie od 10 do 500 fal/obwód. Analiza ta potwierdziła, że zmiana amplitudy falistości na przedmiocie nie jest wiarygodnym symptomem zużycia CPS dla szlifowania wgłębnego kłowego. Fale na przedmiocie są ścinane przez ściernicę i dlatego resztkowa falistość na przedmiocie jest zawsze mniejsza niż amplituda drgań samowzbudnych.

Jako przydatny do nadzorowania makrogeometrii CPS uznano sygnał drgań lub sygnał wartości skutecznej EA.

Rozwój falistości CPS jest ściśle związany z rozwojem drgań samowzbudnych i dlatego może być nadzorowany za pomocą analizy spektralnej drgań generowanych podczas szlifowania. Można przyjąć, że sygnał reprezentujący drgania mechaniczne generowane podczas szlifowania walcowego spełnia warunki liniowości i stacjonarności. W związku z tym do analizy tego sygnału zastosowano dyskretne przekształcenie Fouriera

(DFT). Badania doświadczalne wykazały, że drgania samowzbudne rozwijają się podobnie dla wszystkich zestawów parametrów nastawnych. We wszystkich przypadkach daje się zaobserwować wzrost amplitudy drgań w dwóch zakresach częstotliwości. Pierwszy z tych zakresów to 700– 900 Hz, a drugi to 1500–2000 Hz. Na podstawie wykonanych charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych ustalono, że częstotliwość własna przedmiotu szlifowanego wynosi około 800 Hz. Dla zespołu wrzeciennika ściernicy można wyróżnić dwie częstotliwości: 800 i 1600 Hz. Można je zinterpretować jako kolejne częstotliwości harmoniczne tego zespołu. W obu przypadkach te częstotliwości pokrywają się z zakresami częstotliwości, w których rozwijają się częstotliwości drgań samowzbudnych podczas przeprowadzonych badań. Potwierdza to zasadę mówiącą, że częstotliwość drgań samowzbudnych jest zbliżona do częstotliwości drgań własnych układu OPN. Należy zwrócić uwagę, że przy prędkości obrotowej ściernicy około 24 obr/s ta niższa częstotliwość stanowi wymuszenie dla falistości ściernicy w liczbie około 33 fal/obwód co potwierdza zakres najwyższych amplitud falistości CPS. Jednak w rozważanym przypadku, sprzężenie działania takich czynników jak kształt szlifowanego przedmiotu, miejsce wymuszenia ruchu drgającego przez proces szlifowania oraz wartości częstotliwości własnych przedmiotu i wrzeciennika ściernicy mogą powodować, że rozwój drgań samowzbudnych następuje także w zakresie drugiej częstotliwości własnej wrzeciennika, która jest również drugą harmoniczną drgań własnych przedmiotu. Oznacza to, że w praktyce monitorowanie drgań nie powinno ograniczać się tylko do zakresu częstotliwości obejmującego częstotliwość własną najmniej sztywnego elementu układu OUPN, ale również powinno być realizowane w zakresach obejmujących pozostałe częstotliwości własne układu OUPN.

Kierując się wnioskami wpływającymi z analizy częstotliwości własnych układu OUPN, wyznaczono przebiegi zmian średniej mocy widma drgań w zakresie 600–1000 Hz i 1200–2000 Hz dla wszystkich przeprowadzonych prób szlifowania. Otrzymane wyniki potwierdziły, że stan makrogeometrii CPS jest bardzo silnie skorelowany z rozwojem drgań samowzbudnych. Z tego powodu zmiany średniej wartości widma mocy drgań w zakresach częstotliwości obejmujących kolejne częstotliwości harmoniczne drgań własnych układu OUPN są dobrymi miarami stanu makrogeometrii CPS.

Nieliniowość i niestacjonarność sygnału drgań ma większe znaczenie w przypadku emisji akustycznej. Wynika to z charakteru zjawisk będących źródłem tego sygnału. Z tego względu, w analizie sygnału EA, ale także sygnału drgań zastosowano wielorozdzielczą analizę czasowo-częstotliwościową opartą na transformacie falkowej, która dopuszcza niestacjonarność i nieliniowość analizowanych sygnałów. W przypadku obu analizowanych sygnałów użyto pakietowej analizy falkowej stosując falkę Symlet 8 i poziom rozdzielczości 3. Parametry te ustalono doświadczalnie. Jako miarę energii współczynników falkowych dla poszczególnych składowych przyjęto entropię określoną jako $\sum \log(w_i)^2$, gdzie w_i – współczynniki falkowe. Otrzymane wyniki wskazują, że wykrywanie makrozuzycia CPS może odbywać się w oparciu o analizę sygnału drgań również za pomocą transformaty falkowej. Przeprowadzona szczegółowa analiza miar stosowanych w obu transformatach wykazała jednak ich zróżnicowaną zależność od objętości usuniętego materiału i zastosowanych wielkości nastawnych. Dlatego byłoby najkorzystniej aby proces podejmowania decyzji o stanie makrogeometrii CPS był procesem wielokryterialnym, uwzględniającym wszystkie omawiane miary.

W celu wyznaczenia siły powiązania pomiędzy amplitudą falistości CPS a wybranymi miarami stanu jej makrogeometrii wyznaczono współczynniki korelacji liniowej Pearsona między zmiennymi reprezentującymi te wielkości w funkcji właściwego ubytku materiału obrabianego. Większość wyznaczonych współczynników przekracza wartość 0,9. Najwyższe wartości korelacji z falistością CPS odnotowano dla średniej mocy widma drgań w zakresie 1200 – 2000 Hz oraz dla entropii współczynników falkowych sygnału wartości skutecznej emisji akustycznej w zakresie 625 – 1250 Hz. Wyniki te dodatkowo potwierdzają dużą przydatność zastosowanych miar stanu makrogeometrii CPS do jego nadzorowania.

Jako przydatne do nadzorowania mikrogeometrii CPS i chropowatości przedmiotu uznano siłę szlifowania i sygnał EA.

Jako miary stanu mikrogeometrii CPS związane z wielkością składowych siły szlifowania zastosowano wartości składowej normalnej i stycznej, ich stosunku oraz współczynnika zdolności skrawnej K_z (rozumianego jako stosunek wydajności objętościowej szlifowania w jednostce czasu do wartości składowej normalnej). Zależność analizowanych miar stanu procesu związanych z siłą szlifowania od objętości właściwej zeszlifowanego materiału nie jest jednoznaczna. Potwierdza to wcześniej opisane wnioski z analizy modelu siły. Miary te mogą być wykorzystane w diagnostyce stanu procesu szlifowania w powiązaniu z innymi symptomami. Natomiast zastosowanie oryginalnego sygnału EA do nadzorowania mikrogeometrii CPS można podsumować w następujący sposób:

- Charakterystyka oryginalnego sygnału EA jest skorelowana z parametrami mikrogeometrii CPS.
- Zmiany zachodzące w rozkładzie ziaren na CPS mogą być ujawnione za pomocą współczynnika kurtozy sygnału EA.
- Analiza amplitudowo-częstotliwościowa sygnału AE za pomocą DFT nie daje zadowalających rezultatów ze względu na niestacjonarność i nieliniowość tego sygnału. Bardziej odpowiednia jest analiza czasowo-częstotliwościowa za pomocą transformaty falkowej.
- Efektywność zastosowania współczynnika kurtozy może być zwiększona poprzez wyznaczenie jego wartości dla współczynników falkowych składowych sygnału EA w zakresie częstotliwości, dla których sygnał wykazuje największą moc.
- Kurtoza sygnału EA nie jest dobrą miarą zużycia CPS w przypadku wystąpienia uszkodzeń cieplnych lub przypaleń powierzchni przedmiotu.

Doświadczalnie zweryfikowano również przydatność sygnału emisji akustycznej do estymacji chropowatości powierzchni przedmiotu szlifowanego. Jako miary tego sygnału wykorzystano średnią arytmetyczną, rozstęp i współczynnik zmienności jego wartości skutecznej. Analiza wyników doświadczalnych przebiegu zmian miar statystycznych wartości skutecznej EA w okresie trwałości ściernicy oraz brak korelacji tych zmian z chropowatością przedmiotu wskazują na brak możliwości wiarygodnego nadzorowania chropowatości wyłącznie na podstawie tych miar. Jednak podobnie jak w przypadku mikrogeometrii CPS, cechy sygnału wartości skutecznej EA w połączeniu z innymi miarami wielkości procesowych oraz wielkościami nastawnymi mogą być przydatne jako składowe wektora wejściowego empirycznego modelu chropowatości powierzchni zbudowanego w oparciu o metody sztucznej inteligencji.

Analiza wartości wskaźnika B_p uzyskanych w przeprowadzonych badaniach doświadczalnych potwierdziła jego przydatność do nadzorowania skutków zjawisk cieplnych podczas szlifowania węgelnego stali. Możliwe jest stosunkowo szybkie doświadczalne wyznaczenie wartości B_p (np. poprzez zastosowanie odpowiednio małej prędkości obwodowej przedmiotu), dla której pojawiają się przypalenia powierzchni szlifowanej. Ta wartość odpowiednio obniżona (np. dwukrotnie) może następnie służyć jako wartość graniczna w nadzorowaniu uszkodzeń cieplnych. Ponieważ B_p praktycznie nie zależy od zużycia ściernicy, to jej wartość graniczna może być jednorazowo wyznaczona jako stała dla ustalonego zestawu wielkości wejściowych procesu.

Wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych wykorzystano do budowy klasyfikatora stanu procesu węgelnego szlifowania kłowego. Wybór metody budowy klasyfikatora wynika z cech procesu technologicznego jakim jest proces szlifowania. Ocena stanu takiego procesu może przyjmować wartości dyskretne, opisane zarówno liczbowo jak i symbolicznie, z predefiniowanego zbioru, np. {1, 2, 3} lub {dobry, zły}. Powoduje to, że wielokryterialny problem decyzyjny w automatycznym nadzorowaniu procesu szlifowania sprowadza się do problemu klasyfikacji stanów i wyników procesu do zdefiniowanych klas. Możliwe wówczas jest, jak we wszystkich metodach wielokryterialnego wspomaganie decyzji, wkomponowanie w procedurę oceny wiedzy eksperta, stworzenie modelu jego preferencji odnośnie oceny poszczególnych stanów procesu. Ponadto, jeśli decyzje o przypisaniu stanu procesu do konkretnej klasy są podejmowane na podstawie reguł jawnie opisujących zależność poszczególnych stanów od wartości symptomów tego stanu, to możliwa jest diagnostyka przyczyn powstania tego stanu. Klasyfikator powinien również spełniać szereg wymagań

związanych z rodzajem i jakością danych wejściowych oraz ze sposobem i możliwością interpretacji generowanych wyników.

Uznano, że wszystkie te uwarunkowania spełnia metoda wielokryterialnego wspomaganie decyzji oparta na modelowaniu zależności pomiędzy poszczególnymi stanami procesu a wartościami symptomów tych stanów w postaci reguł, które wyprowadzane są z danych o procesie za pomocą nowej metody zwanej w skrócie DRSA (ang. Dominance-based Rough Set Approach), która jest rozszerzeniem teorii zbiorów przybliżonych (TZP). W metodzie tej, podobnie jak w przypadku sztucznych sieci neuronowych, wiedza indukowana jest z danych będących przykładami realizacji procesu i w danych tych mogą występować braki oraz niespójności. Jednakże w przeciwieństwie do sieci neuronowych ma ona postać reguł o postaci czytelnej dla użytkownika. W stosunku do systemów logiki rozmytej, zaletą DRSA jest brak konieczności dyskretyzacji dziedzin zmiennych systemu i wprowadzania dodatkowych założeń np. dotyczących rozkładu rozmytości danych. Natomiast podobnie jak dla systemów rozmytych, analiza danych tą metodą dostarcza efektywnych narzędzi do poszukiwania ukrytych cech analizowanych danych oraz algorytmów podejmowania decyzji. Wyniki analizy danych za pomocą DRSA mogą być wykorzystane do minimalizowania potrzebnego zbioru symptomów stanu procesu, do grupowania symptomów podobnych, do detekcji zależności niedeterministycznych, preselekcji obserwacji wykorzystywanych do budowy różnego typu modeli, a także do optymalizacji procesów decyzyjnych dotyczących diagnostyki nadzorowanego procesu. A zatem DRSA, przynajmniej częściowo, eliminuje wady sztucznych sieci neuronowych i systemów rozmytych zachowując przy tym ich zalety.

W TZP, w porównywaniu obiektów opisanych za pomocą pewnych atrybutów używana jest relacja rozróżnialności. Relacja ta jest podstawą ustanowienia zbioru przybliżonego reprezentującego pojęcie klasy decyzyjnej (np. klasy stanu mikrogeometrii CPS) poprzez rozróżnienie jego dolnego i górnego przybliżenia. Obiekty, które bez żadnej wątpliwości należą do rozważanej klasy decyzyjnej tworzą dolne przybliżenie tego zbioru natomiast obiekty, których przynależności do tej klasy nie można wykluczyć tworzą górne przybliżenie tego zbioru. Dzięki temu, TZP umożliwia analizę danych niespójnych i niejednoznacznych.

Główna różnica pomiędzy klasyczną TZP a DRSA polega na zastąpieniu relacji rozróżnialności relacją dominacji. Z punktu widzenia zastosowania DRSA do zadań klasyfikacji najważniejsze są jej możliwości w zakresie odkrywania wiedzy dziedzinowej z danych z uwzględnieniem porządku preferencyjnego w dziedzinie atrybutów i semantycznej korelacji istniejącej między atrybutami czyli przestrzeganie zasady dominacji. Korelacja taka wymaga, żeby przypadek x , którego wartości wszystkich atrybutów warunkowych są co najmniej tak dobre jak dla przypadku y , był oceniony co najmniej tak dobrze jak przypadek y czyli, żeby dominował y . Jest to obiektywna zasada wielokryterialnego porównywania obiektów, zwana zasadą dominacji. DRSA, podobnie jak teoria klasyczna, dokonuje klasyfikacji Y zbioru U na pewną liczbę rozłącznych klas decyzyjnych Y_n , ale klasy decyzyjne Y_n są klasami przypadków uporządkowanymi w ten sposób, że im wyższy numer klasy, tym lepsza klasa czyli według preferencji. Powoduje to, że w DRSA idea pojedynczej klasy decyzyjnej zastępowana jest złożeniem klas decyzyjnych. Zbiór przypadków należących z pewnością do danego złożenia klas stanowi jego dolne przybliżenie, natomiast zbiór przypadków być może należących do tego złożenia klas stanowi jego górne przybliżenie. Klasyczna teoria zbiorów przybliżonych oparta na relacji nierozróżnialności generuje reguły decyzyjne, które używają wyłącznie relacji „=” . Reguły generowane przez DRSA mają bogatszą składnię ponieważ stosują relacje typu „ \geq ”, „ \leq ” i „=” . Z tego względu reprezentacja wiedzy w regułach wygenerowanych za pomocą DRSA jest bardziej syntetyczna. Ponadto, w przeciwieństwie do teorii klasycznej, DRSA nie wymaga dyskretyzacji atrybutów ilościowych.

Pierwszym krokiem w zastosowaniu DRSA do nadzorowania dowolnego procesu jest przygotowanie danych o tym procesie w postaci tzw. tablicy decyzyjnej. W kolumnach tej tablicy umieszczone są wartości atrybutów (miar opisujących proces szlifowania) dla kolejnych jego realizacji (przypadków). Atrybuty są podzielone na warunkowe (miary wielkości procesowych) i decyzyjne (kryteria oceny procesu). Wiersze tej tablicy reprezentują kolejne przypadki szlifowania.

Tablica decyzyjna została utworzona z danych uzyskanych podczas badań doświadczalnych. Dane te zawierają 78 przypadków realizacji procesu zróżnicowanych ze względu na właściwą wydajność objętościową szlifowania Q'_w , stosunek prędkości obwodowej ściernicy do prędkości obwodowej przedmiotu q oraz stan zdolności skrawnej ściernicy reprezentowany przez właściwy ubytek materiału obrabianego od ostatniego obciążenia ściernicy V'_w . Każdy przypadek szlifowania został oceniony za pomocą 17 atrybutów warunkowych tworzących zbiór atrybutów warunkowych C . Zestawienie atrybutów warunkowych podaje poniższa tabela.

Atrybut	Opis atrybutu warunkowego
C_1	właściwa wydajność objętościowa szlifowania Q'_w
C_2	stosunek prędkości q
C_3	właściwy ubytek materiału obrabianego V'_w
C_4	składowa normalna siły szlifowania F_n
C_5	składowa styczna siły szlifowania F_t
C_6	stosunek składowej stycznej do składowej normalnej siły szlifowania μ
C_7	wskaźnik gęstości strumienia ciepła działającego na przedmiot B_p
C_8	współczynnik zdolności skrawnej ściernicy K_z
C_9	współczynnik kurtozy sygnału EA
C_{10}	kurtoza składowych PWT sygnału EA w zakresie 125-187,5 kHz
C_{11}	średnia moc widmowa drgań w zakresie 600-1000 Hz
C_{12}	średnia moc widmowa drgań w zakresie 1200-2000 Hz
C_{13}	entropia składowych PWT sygnału drgań w zakresie 1875-2500 Hz
C_{14}	entropia składowych PWT sygnału EA_{RMS} w zakresie 625-1250 Hz
C_{15}	średnia wartość sygnału EA_{RMS}
C_{16}	rozstęp sygnału EA_{RMS}
C_{17}	współczynnik zmienności sygnału EA_{RMS}

Jako kryteria decyzyjne tworzące zbiór atrybutów decyzyjnych D przyjęto 5 wielkości należących do wyników procesu. Zestawiono je w tabeli poniżej.

Atrybut	Opis atrybutu decyzyjnego
D_1	forma zużywania się ściernicy
D_2	stan makrogeometrii CPS
D_3	stan mikrogeometrii CPS
D_4	stan uszkodzeń cieplnych WW przedmiotu szlifowanego
D_5	klasa chropowatości powierzchni szlifowanej wg parametru R_a

Klasy decyzyjne dla poszczególnych atrybutów decyzyjnych zostały określone w sposób przedstawiony w następującej tabeli.

Atrybut	Klasa	Opis klasy decyzyjnej
D_1	{T, S}	T = zużywanie się CPS z przewagą tępienia, S = zużywanie się CPS z przewagą samoostrzenia,
D_2	{1, 2}	1 = stan makrogeometrii CPS dobry, 2 = stan makrogeometrii CPS niedopuszczalny,
D_3	{1, 2}	1 = stan mikrogeometrii CPS dobry, 2 = stan mikrogeometrii CPS niezadawalający,
D_4	{1, 2, 3}	1 = brak uszkodzeń cieplnych WW, 2 = zagrożenie uszkodzeniami cieplnymi WW, 3 = wystąpienie przypaleń WW,
D_5	{1, 2, 3}	1 = R_a niski, 2 = R_a średni, 3 = R_a wysoki.

Zasady przydziału atrybutów decyzyjnych do klas syntetycznie wyrażono w tabeli poniżej.

Atrybut	Zasady przydziału do klasy
D_1	T dopóki przyrost R_{Ges} dla kolejnych 100 mm ³ /mm ≤ 10% S po przekroczeniu przyrostu R_{Ges} dla kolejnych 100 mm ³ /mm o > 10%
D_2	1 jeśli śr. amplituda falistości CPS w zakresie 10-50 fal/obwód < 0,025 V_{rms} 2 jeśli śr. amplituda falistości CPS w zakresie 10-50 fal/obwód ≥ 0,025 V_{rms}
D_3	1 jeśli bieżący $R_{pk} \geq R_{pk}$ po obciążeniu lub dla kolejnych 100 mm ³ /mm 2 jeśli bieżący $R_{pk} < R_{pk}$ po obciążeniu lub dla kolejnych 100 mm ³ /mm
D_4	1 jeśli $B_p \leq 0,8$; 2 jeśli $0,8 < B_p \leq 1,6$; 3 jeśli $B_p > 1,6$
D_5	1 jeśli $R_a \leq 0,83 \mu m$, 2 jeśli $0,83 < R_a \leq 1,25 \mu m$, 3 jeśli $R_a > 1,25 \mu m$

Określono również kierunki preferencji dla wszystkich atrybutów. W DRSA atrybuty nie wymagają dyskretyzacji. Muszą one jednak być kryteriami tzn. atrybutami o preferencji wzrastającej (typu zysk) lub malejącej (typu koszt) ze względu na przyjęte kryterium. Np. składowa normalna siły jest atrybutem warunkowym o malejącej preferencji (czyli typu koszt) z punktu widzenia mikrogeometrii ściernicy (im większa siła tym gorsza mikrogeometria). Kierunki preferencji zarówno dla atrybutów warunkowych jak i decyzyjnych określono zgodnie z dostępną wiedzą w zakresie szlifowania. Są one odmienne dla poszczególnych atrybutów. Kiedy jednoznaczne określenie kierunku preferencji było niemożliwe bądź niepewne wtedy stosowano zarówno preferencję typu zysk jak i koszt. Taka procedura nazywana jest dublowaniem atrybutów. Otrzymany wynik indukcji reguł decyzyjnych pokazuje wówczas, który kierunek preferencji jest prawidłowy. Dla większości atrybutów warunkowych (szczególnie dla D_1 , D_3 i D_4) przyjęto kierunek preferencji jako nieznan. Dla atrybutów decyzyjnych, z wyjątkiem formy zużywania się ściernicy (preferencja nieznan), przyjęto preferencje typu koszt.

Reguły decyzyjne były indukowane za pomocą algorytmu VC-DomLEM dedykowanego dla DRSA i generującego minimalny zbiór reguł pokrywających wszystkie przypadki z tablicy decyzyjnej. Usunięcie z takiego zbioru dowolnej reguły powoduje, że nie wszystkie przypadki będą mogły być sklasyfikowane. Wszystkie obliczenia związane z indukcją reguł decyzyjnych oraz analizę i weryfikację reguł przeprowadzono za pomocą programu JMAF opracowanego przez zespół prof. Romana Słowińskiego z Politechniki Poznańskiej.

Zbiory minimalnych reguł decyzyjnych dla wszystkich kryteriów decyzyjnych mogą być wyznaczane z wykorzystaniem pełnego zbioru atrybutów warunkowych zawartych w tablicy decyzyjnej lub z wykorzystaniem jedynie podzbiorów tych atrybutów zwanych reduktami, ustalonych dla poszczególnych atrybutów decyzyjnych. Reduktem zbioru atrybutów nazywamy taki jego podzbiór, który klasyfikuje przypadki dokładnie w taki sam sposób i z taką samą jakością klasyfikacji przypadków, w jaki zostałyby one sklasyfikowane przy wykorzystaniu wszystkich atrybutów. Wyselekcjonowanie takich podzbiorów powinno być elementem przeprowadzenia procedury zapewniającej znalezienie zbiorów reguł decyzyjnych możliwie najlepiej klasyfikujących stan procesu. Wtedy klasyfikacja stanu procesu służy jednocześnie przeprowadzeniu ilościowej oceny przydatności wyznaczonych cech sygnałów czyli atrybutów warunkowych w tablicy decyzyjnej. Podstawowym kryterium selekcji cech sygnałów jest minimalizacja ryzyka podjęcia błędnej decyzji o stanie procesu. Takie ogólne kryterium oceny skuteczności cech uwzględnia także wpływ zastosowanego algorytmu klasyfikacji oraz współzależności zachodzące między zastosowanymi miarami.

Proces indukcji oraz analizy reguł decyzyjnych, kolejno dla wszystkich kryteriów oceny stanu procesu (atrybutów decyzyjnych), rozpoczynano z zastosowaniem wszystkich wyznaczonych 17 atrybutów warunkowych. Następnie stosowano podzbiór atrybutów wyselekcjonowanych przez tzw. eksperta dziedzinowego, nazywany podzbiorem eksperckim. Rolę eksperta dziedzinowego pełnił autor tej monografii. W dalszej kolejności stosowano redukt zbioru eksperckiego lub nadzbiory tych reduktów czyli reduktu uzupełnione o wybrane przez eksperta atrybuty warunkowe. Procedura była powtarzana aż możliwie najwyższa trafność klasyfikacji została osiągnięta. Otrzymane reguły decyzyjne

zweryfikowano poprzez wyznaczenie dla każdego wygenerowanego zbioru wskaźnika trafności klasyfikacji oraz macierzy pomyłek klasyfikacji. Zastosowano w tym celu metodę walidacji krzyżowej typu leave-one-out.

W wyniku przeprowadzonej za pomocą DRSA klasyfikacji wyselekcjonowano 5 kompletnych, minimalnych zbiorów reguł decyzyjnych, które pozwalają na dokładną reklasyfikację zbioru wszystkich przypadków realizacji procesu do oryginalnych klas określonych dla formy zużywania się ściernicy, stanu makro- i mikrogeometrii CPC, stanu uszkodzeń cieplnych WW przedmiotu szlifowanego i chropowatości powierzchni szlifowanej. Reguły mają postać wyrażeń logicznych, które w sposób jawny reprezentują wiedzę o procesie i posiadają zdolność objaśniania proponowanych decyzji. Otrzymany regułowy model makro-geometrii CPS podano przykładowo w tabeli poniżej.

Nr	Stan atrybutów warunkowych	Decyzja
1	$(C_{11} \leq 0.000052003) \& (C_{12} \leq 0.000057067)$	co najmniej kl. 1
2	$(C_{11} \leq 0.00006174) \& (C_{17} \leq 7.29041)$	co najmniej kl. 1
3	$(C_2 = 400) \& (C_{13} \leq -3709.354539)$	co najmniej kl. 1
4	$(C_1 = 2) \& (C_2 = 100) \& (C_{11} \leq 0.000212465) \& (C_{12} \leq 0.000278944)$	co najmniej kl. 1
5	$(C_{12} \geq 0.000281637)$	co najwyżej kl. 2
6	$(C_{11} \geq 0.000219779)$	co najwyżej kl. 2
7	$(C_1 = 3) \& (C_{11} \geq 0.000123433)$	co najwyżej kl. 2
8	$(C_2 = 60) \& (C_{11} \geq 0.000083852)$	co najwyżej kl. 2
9	$(C_{12} \geq 0.000063081) \& (C_{17} \geq 7.67326)$	co najwyżej kl. 2

Podsumowanie procedury budowy regułowego modelu procesu szlifowania kłowego wglębnego z podaniem wartości podstawowych wskaźników klasyfikacji na kolejnych etapach tej procedury podaje tabela poniżej.

Wskaźnik	Atrybuty decyzyjne				
	Forma zużywania się CPS	Stan makro-geometrii CPS	Stan mikro-geometrii CPS	Stan uszkodzeń cieplnych WW	Chropowatość przedmiotu R_a
Liczność klas	S – 54 T – 24	1 – 46 2 – 32	1 – 62 2 – 16	1 – 58 2 – 12 3 – 8	1 – 40 2 – 22 3 – 16
TK z uwzględnieniem wszystkich atrybutów war.	93.59%	76.92%	58.97%	98.72%	83.33%
Eksperski podzbiór atrybutów warunkowych	C1, C2, C3, C4, C5, C6, C8, C9, C10, C15, C16, C17	C1, C2, C3, C11, C12, C13, C14, C17	C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C10, C15, C16, C17	C1, C2, C3, C4, C8, C9, C10, C15, C16, C17	C1, C2, C3, C7, C8, C11, C12, C15, C16, C17
Liczba reduktów	324	23	643	197	66
TK dla EPA	91.03%	80.77%	62.82%	97.44%	75.64%
Wyniki końcowe					
Podzbiór atrybutów	C1, C2, C3, C8	C1, C2, C11, C12, C13, C17	C1, C2, C3, C6	C1, C3, C15	C1, C2, C3, C7
TK	98.72%	89.74%	80.77%	92.31%	96.15%
Liczba reguł	6	9	14	9	14

TK – trafność klasyfikacji, EPA – ekspercki podzbiór atrybutów.

Opracowany regułowy model zależności pomiędzy obserwowalnymi miarami sygnałów pomiarowych oraz wielkościami wejściowymi procesu a wielkościami wyjściowymi stanowi gotową regułową bazą wiedzy o procesie szlifowania wglębnego kłowego, która może być

podstawą systemu eksperckiego tego procesu służącego do oceny i diagnostyki jego nowych realizacji, a także do ustalania wartości wybranych wielkości procesowych w celu osiągnięcia założonych wyników procesu.

Zastosowanie DRSA zapewnia rozwiązanie jednego z najtrudniejszych problemów w budowie systemów eksperckich, jakim jest pozyskiwanie wiedzy od eksperta. W DRSA do wiedzy dochodzi się metodami uczenia maszynowego z danych dostarczonych w postaci przykładów, którymi są kolejne realizacje procesu lub przykłady decyzji eksperta. Następnie metodą indukcji odkrywane są z tych przykładów reguły decyzyjne. Systemy charakteryzujące się taką właściwością mogą być określone jako inteligentne nie tylko ze względu na stosowane procedury ale ze względu na naturę swego działania. DRSA dokonuje również selekcji istotnych miar oceny stanu i wyników procesu, dla których uzyskiwano najwyższe wskaźniki trafności klasyfikacji. Dzięki temu ustalono, że dla trafnej klasyfikacji stanów procesu szlifowania wgłębnego kłowego wystarczający jest pomiar składowej normalnej i stycznej siły szlifowania, drgań i wartości skutecznej EA oraz rejestracja bieżącej wartości właściwego ubytku materiału szlifowanego od ostatniego obciążania ściernicy. W omawianej monografii, proces selekcji miar przeprowadzono z udziałem eksperta. Udział eksperta w procesie klasyfikacji może jednak stanowić przeszkodę w przypadku chęci wykorzystania DRSA w budowie w pełni zautomatyzowanego systemu klasyfikacji. Wskazuje to kierunek dalszych badań nad wykorzystaniem tej metody. Na przykład zastosowanie algorytmów genetycznych do wyznaczania optymalnych z punktu widzenia jakości klasyfikacji reduktów zbiorów atrybutów warunkowych może okazać się efektywną metodą rozwiązania tego problemu.

Konkludując mogę stwierdzić, że monografia formułuje praktyczne podstawy automatycznego inteligentnego nadzorowania procesu szlifowania wgłębnego kłowego. Dalsze prace powinny być skierowane na doskonalenie metod pomiarowych i poszukiwanie nowych algorytmów przetwarzania sygnałów pozwalających na ustalenie bardziej wiarygodnych symptomów stanu procesu. Ponadto konieczne jest ciągle rozszerzanie doświadczalnej bazy danych o procesie o nowe materiały szlifowane, stosowane ściernice i parametry szlifowania co umożliwi budowę bardziej uniwersalnych i możliwych do przemysłowego wykorzystania klasyfikatorów stanu procesu.

Przedstawione podsumowanie i wnioski płynące z monografii upoważniają do stwierdzenia, że założone cele monografii zostały osiągnięte i postawione tezy udowodnione.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Pracę nauczyciela akademickiego rozpocząłem bezpośrednio po ukończeniu studiów w 1974 roku. Od początku moja działalność naukowo-badawcza skierowana była na problematykę automatyzacji procesów obróbki mechanicznej. Były to zagadnienia związane ze sterowaniem numerycznym obrabiarek, a następnie zagadnienia dotyczące sterowania adaptacyjnego procesu szlifowania. Podsumowaniem tych zainteresowań badawczych była ukończona w 1983 roku praca doktorska poświęcona modelowi procesu czołowego szlifowania płaszczyzn w aspekcie zastosowania sterowania adaptacyjnego. Był to model fizyczno-empiryczny oparty o zastosowanie analizy regresji danych doświadczalnych.

5.1. Prace badawcze w Arizona State University i University of California w Berkeley

W styczniu 1987 roku wyjechałem na stypendium Fulbrigh'a do Stanów Zjednoczonych. Pierwsze 15 miesięcy pracowałem w Arizona State University w zespole prof. M. C. Shaw. Zajmowałem się zagadnieniem temperatury skrawania podczas frezowania z dużymi prędkościami skrawania.

Celem moich badań było eksperymentalne ustalenie czy prawdziwa jest teza mówiąca, że maksymalna temperatura ostrza skrawającego podczas frezowania czołowego może maleć w wyniku zwiększenia prędkości skrawania przy stałej długości łuku kontaktu pojedynczego zęba freza z przedmiotem obrabianym. Taka teza była stawiana wcześniej

przez wielu badaczy. Ponieważ zmiana temperatury ostrza podczas pierwszych ułamków sekundy rozpoczęcia toczenia odpowiada przebiegowi zmian temperatury pojedynczego ostrza freza to zmiany temperatury podczas rozpoczęcia toczenia symulują zmiany temperatury ostrzy podczas frezowania czołowego. Dzięki temu, badania mogły być przeprowadzone na tokarce z zastosowaniem szerokiego zakresu parametrów skrawania oraz z użyciem wielu materiałów narzędzi i przedmiotów obrabianych. W celu przeprowadzenia prób toczenia z pomiarem temperatury ostrza, zbudowałem przyrząd pomiaru tej temperatury za pomocą termopary, w której elementem pomiarowym jest styk ostrza z przedmiotem obrabianym. Zbiornik z rtęcią na końcu wrzeczona, w której zanurzona jest tarcza połączona z obracającym się przedmiotem umożliwia zamknięcie obwodu elektrycznego i rejestrację zmian napięcia w obwodzie termopary. Przeprowadzone badania eksperymentalne wykazały fałszywość badanej tezy. W żadnym z badanych przypadków nie wystąpił spadek temperatury ostrza na jego wyjściu z kontaktu z materiałem obrabianym w wyniku zwiększenia prędkości skrawania. Wyniki tych badań zostały opublikowane w artykule [AZ1] (oznaczenia zgodne z załączonym wykazem publikacji).

Równoległe prowadziłem intensywne studia literaturowe, w wyniku których zainteresowałem się metodami sztucznej inteligencji i ich wykorzystaniem do monitorowania i diagnostyki procesów obróbczych. Prof. D. A. Dornfeld w Univesiry of California w Berkeley był jednym z niewielu badaczy, którzy wtedy prowadzili badania w tej dziedzinie. Nawiązałem z nim kontakt i on zaprosił mnie do siebie celem prowadzenia badań w tym zakresie w zastosowaniu do szlifowania. W związku z tym przez ostatnie 3 miesiące stypendium przebywałem w UC Berkeley. Niestety ten czas okazał się zbyt krótki na zbudowanie odpowiedniego stanowiska badawczego. Pobyt w Berkeley wykorzystałem więc na wykonanie wstępnych badań laboratoryjnych nad wykorzystaniem emisji akustycznej do monitorowania i diagnostyki procesów skrawania i zastosowania do tego celu sztucznych sieci neuronowych. Prace te okazały się jednak niewystarczające dla powstania publikacji.

Doświadczenia zdobyte w USA wykorzystałem w swoich dalszych pracach w Politechnice Łódzkiej.

5.2. Prace badawcze z zakresu nadzorowania procesu szlifowania wałków – budowa stanowiska badawczego

Zbudowanie właściwego układu sprzętowego jest podstawą zrealizowania wszystkich potrzebnych funkcji zautomatyzowanego systemu nadzorowania procesu szlifowania. System taki zdecydowano się zbudować w oparciu o uniwersalną szlifierkę do wałków JOTES SWF-25. Ponieważ była to szlifierka konwencjonalna wyposażona jedynie w hydrostatyczne prowadnice stołu i wrzeciennika ściernicy oraz łożyska hydrostatyczne wrzeczona ściernicy to wymagała wprowadzenia szeregu modyfikacji. W napędzie dosuwu ściernicy zastosowano silnik krokowy, bezłuzową przekładnię ślimakową i śrubę toczną. Do pomiaru położenia wrzeciennika ściernicy zastosowano induktosyn. Te zmiany pozwoliły na wdrożenie cyfrowego sterowania prędkości i położenia wrzeciennika ściernicy. Napęd hydrauliczny stołu został wyposażony w zawór proporcjonalny pozwalający na sterowanie dyskretnie stołu. Na system monitorowania procesu szlifowania składały się działające on-line układy pomiaru składowych siły szlifowania, drgań, emisji akustycznej oraz przyrząd aktywnej kontroli średnicy i błędów kształtu szlifowanego przedmiotu.

Do pomiaru składowych siły szlifowani wykorzystano pomiar różnicy ciśnień w komorach łożysk hydrostatycznych wrzeczona ściernicy za pomocą przetworników ciśnienia OT-24. Czujnik B&K4384 ze wzmacniaczem B&K2511 zostały zastosowane do pomiaru drgań, natomiast czujnik B&K8312 ze wzmacniaczem B&K2638 do pomiaru emisji akustycznej. Układ składający się z silnika krokowego z przekładnią harmoniczną, induktosyna i głowic pomiarowych ELKAN zastosowano w przyrządzie aktywnej kontroli średnicy i błędów kształtu przedmiotu. Do przetwarzania danych pomiarowych i sterowania w tym przyrządzie użyto mikroprocesora MERA-80, natomiast modułowy system komputerowy MSK z mikrokomputerem PSPD-90 został zastosowany do zapisywania danych sygnałów pomiarowych i sterowania dosuwem.

Wszystkie te modyfikacje zostały wykonane przez zespół, którego byłem członkiem. Mój udziałem było wykonanie projektu i nadzór wykonawczy napędu dosuwu oraz układów pomiarowych składowych siły, drgań i emisji akustycznej. Te pierwsze prace związane z budową stanowiska badawczego były wykonane i wykorzystane dla realizacji projektów [P3, P4, P6] (oznaczenia projektów zgodne z p. 5.9). Wyniki tych prac opisano i opublikowano w [RK2, RK3, RK5, RK6, AP3, AZ2].

Po roku 1998 stanowisko zostało przebudowane. Przede wszystkim system komputerowy MSK z mikrokomputerem PSPD-90 został zastąpiony komputerem klasy PC wyposażonym w kartę sterownika ruchu UCNC5 i karty DAQ National Instruments [P7, P8]. Silnik krokowy w napędzie dosuwu został zastąpiony bezszczotkowym silnikiem DC z linią optycznym do pomiaru położenia wrzeciennika. Rekonstrukcja tego napędu odbyła się z moim udziałem w ramach projektów [P7, P8]. Byłem autorem dodatkowego wyposażenia układu monitorowania w bezprzewodowy czujnik emisji akustycznej firmy Dittel zamontowany na powierzchni czołowej wrzeciona ściernicy. Czujnik ten mógł jednocześnie mierzyć sygnał oryginalny i jego wartość skuteczną [P7]. Zmiany te zostały opisane w [AP9, AP10, RM3, RM6, RM7].

Następne modyfikacje wykonano w latach 2001-2007. Między innymi szlifierka została wyposażona w układ pomiaru zarysu profilu czynnej powierzchni ściernicy działający w trybie off-line. W przyrządzie tym została wykorzystana głowica pomiarowa i wzmacniacz chropowatościomierza Carl Zeiss JenaME-10. Głowica została zamontowana na specjalnym suporcie przymocowanym do obudowy ściernicy. Suport ten pozwalał na precyzyjne pozycjonowanie igły pomiarowej na powierzchni ściernicy. Podczas pomiarów, bardzo powolny ruch obrotowy ściernicy był rezultatem ciernego napędu ściernicy przez przedmiot obrabiany. Byłem odpowiedzialny za opracowanie części mechanicznej tego przyrządu. Te ostatnie modyfikacje zostały omówione w [AP14].

Software służący do rejestracji i przetwarzania danych używany w tamtym czasie również wymagał unifikacji i modernizacji. Z tego powodu, w ramach projektu [P9] został wykonany pod moim kierownictwem i z moim udziałem pakiet DAQSYSTEM, który w skrócie opisano w monografii przedłożonej jako moje osiągnięcie naukowe. Pakiet ten opisano szczegółowo w sprawozdaniu z projektu [P9]. Jest on także wykorzystywany przeze mnie w dydaktyce.

5.3. Prace badawcze z zakresu nadzorowania procesu szlifowania wałków – struktura systemu nadzorowania

Do zbudowania niezawodnego systemu nadzorowania procesu szlifowania konieczne jest określenie odpowiedniej struktury funkcjonalnej takiego systemu. Struktura ta zależy od rodzaju funkcji, które mają być przez system realizowane i od metod przyjętych do ich realizacji. Mając to na względzie, zaproponowałem i stosowałem różne struktury systemów. Różnią się one w zależności od zastosowanych metod modelowania procesu i klasyfikacji jego stanu. Funkcje realizowane przez system są zawsze takie same. Ogólnie przyjąłem założenie, że powinien to być inteligentny, elastyczny, oparty na pomiarach wielkości procesowych system, który zapewnia wiarygodne monitorowanie i diagnostykę procesu szlifowania wałków. W tym celu system powinien być wyposażony w niezawodne, odporne na warunki przemysłowe układy pomiarowe. Mierzone sygnały powinny być poddane przetwarzaniu z wykorzystaniem różnorodnych metod. System powinien mieć zdolność ekstrakcji cech sygnałów pomiarowych skorelowanych ze stanem procesu oraz zdolność selekcji cech najbardziej istotnych ze względu na możliwość dokonania prawidłowej oceny stanu procesu. Wymaga to zastosowania strategii samouczących się budowy modelu zależności pomiędzy wyselekcjonowanymi cechami sygnałów pomiarowych i monitorowanymi parametrami stanu procesu. Ponadto, cenną właściwością systemu byłaby jego zdolność do prezentowania zgromadzonej przez system wiedzy o procesie w sposób zrozumiały dla człowieka.

Pierwsze zaproponowane rozwiązanie w zakresie struktury systemu zostało zaprezentowane w [RK1, RK4, RK6, RK7, AP2]. Następne rozwiązanie było oparte na

założeniu, że funkcje realizowane przez system są zróżnicowane dla kolejnych faz cyklu szlifowania i zależą od ograniczeń działających w tych fazach.

Rdzeniem systemu jest matryca decyzyjna. Kolumny tej tablicy reprezentują sygnały pomiarowe zastosowane do oceny procesu, natomiast jej wiersze to działania sterujące, możliwe do podjęcia w celu utrzymania procesu w stanie pożądanym. Elementami matrycy są wskazania stanu procesu wyrażone za pomocą wartości odpowiednich cech sygnałów pomiarowych dla każdej z przewidzianych akcji sterujących. Wartość graniczna każdej cechy sygnału pomiarowego dla każdej akcji sterującej musi być ustalona w procesie uczenia systemu opartym o wiedzę dziedzinową i wyniki doświadczalne. Podczas ustalania wartości cech sygnałów odpowiednie kryterium oceny stanu procesu musi być wzięte pod uwagę. Taka struktura funkcjonalna została zastosowana w systemach opisanych w [AP2] następnie, po pewnych modyfikacjach w [AP3, AP5, AZ2, RK8, P4]. Jest ona najbardziej odpowiednia dla systemów regułowych. Zmodyfikowana jej wersja została zastosowana w mojej monografii.

Inne podejście do zagadnienia struktury systemu nadzorowania zostało zaprezentowane w [AZ3, RM1, RM2, RM3, RM7, RK12, RK13, RK14, P6]. Struktura ta została wykorzystana w systemie nadzorowania jedynie pojedynczego parametru stanu procesu jakim jest zużycie ściernicy. W takim przypadku, selekcja cech sygnałów pomiarowych, budowa modelu oraz ocena stanu procesu są wykonywane automatycznie przez kolejne procedury technik sztucznej inteligencji.

Następne podejście, zaprezentowane w [AP9, AP11, RM3, RM6, RM7, P7], jest rozszerzeniem poprzedniej struktury do wielopoziomowego systemu monitorowania, diagnostyki i sterowania, łącznie ze sterowaniem adaptacyjnym i początkową optymalizacją parametrów prowadzenia procesu. Poprzednia struktura może być elementem tej struktury wielopoziomowej.

W [RM7] zaproponowałem hybrydowy system optymalizacji procesu. Został on wykorzystany do realizacji kierowanego przeze mnie projektu [P9]. System posiada cztery źródła wiedzy. W module opartym o wnioskowanie na przypadkach, zbudowana baza wiedzy o procesie szlifowania wałków dokonuje wyboru początkowych parametrów szlifowania. W następnym module, cykl szlifowania jest optymalizowany ze względu na parametry jakości przedmiotu i wydajność za pomocą sieci neuronowej. Kolejny moduł to sterowanie adaptacyjne geometryczne. Ostateczna weryfikacja warunków szlifowania może być przeprowadzona przez użytkownika systemu.

5.4. Prace badawcze z zakresu nadzorowania procesu szlifowania wałków – zastosowanie sieci neuronowych i logiki rozmytej

W ramach projektu [P6] opracowałem system neuro-fuzzy, w którym sieć neuronowa wykonuje zadanie selekcji najbardziej przydatnych cech sygnałów pomiarowych a moduł neuro-fuzzy wykonuje zadanie budowy modelu rozmytego będącego podstawą klasyfikacji stanu zużycia ściernicy za pomocą algorytmu wnioskowania rozmytego. System składa się z kilku modułów funkcjonalnych.

Moduł akwizycji danych rejestruje dane doświadczalne z pomiarów on-line drgań, emisji akustycznej i składowych siły szlifowania.

Moduł selekcji cech sygnałów pomiarowych redukuje liczbę cech za pomocą jednokierunkowej sieci neuronowej. Struktura tej sieci jest optymalizowana poprzez zastosowanie metody „pruningu” wag połączeń w sieci. Z punktu widzenia procedury budowy modelu rozmytego, redukcja liczby cech, czyli redukcja liczby wejść do modelu ma bardzo istotne znaczenie. Pozwala ona na zbudowanie modelu składającego się z umiarkowanej liczby reguł rozmytych reprezentujących wiedzę o procesie w bardziej przejrzystej postaci. Automatyczne generowanie reguł rozmytych oraz optymalizacja ich parametrów stają się wtedy również bardziej efektywne. Sieć neuronowa użyta do selekcji cech sygnałów pomiarowych w tym systemie może być jednocześnie wykorzystana do budowy modelu zużycia ściernicy.

Następny moduł buduje model rozmyty zużycia ściernicy w postaci zbioru reguł rozmytych o zoptymalizowanych parametrach ich zmiennych lingwistycznych. W tym celu został zastosowany algorytm neuro-fuzzy. W algorytmie tym, procedura wnioskowania rozmytego ma strukturę sieci neuronowej, która pozwala na użycie algorytmu wstecznej propagacji błędu do zoptymalizowania parametrów modelu rozmytego. Struktura i parametry takiego modelu mają znaczenie fizyczne, stąd wiedza typu *a priori* może być wprowadzona do systemu w postaci jego początkowych parametrów.

Moduł wnioskowania rozmytego realizuje funkcję diagnostyki zużycia ściernicy. Stan tego zużycia jest rozpoznawany poprzez aktywację reguł rozmytych modelu dla danych ostrych wartości parametrów wejściowych.

Do budowy i optymalizacji sieci neuronowej został zastosowany pakiet NEURALWARE, natomiast do modelowania neuro-fuzzy wykorzystano oprogramowanie opracowane przez P. Lajmerta na podstawie algorytmu zaproponowanego przez Wanga i Mendela.

Wyniki zastosowania algorytmu neuro-fuzzy pokazały, że może on być efektywnym narzędziem systemów logiki rozmytej, w których występuje duża liczba wielkości wejściowych, tak jak w przypadku procesu szlifowania. Jednakże należy nadmienić, że trafność klasyfikacji takiego systemu może być niższa niż dla systemu opartego wyłącznie na sieci neuronowej. Ponadto jego potencjał w zakresie ekstrakcji wiedzy o procesie jest ograniczony.

Cechy i wyniki zastosowania opracowanego systemu neuro-fuzzy do diagnostyki zużycia ściernicy zostały zaprezentowane w [AZ3, RM1, RM3, RK12, RK13].

W badaniach nad zastosowaniem automatycznego nadzorowania procesu szlifowania wałków, kilka prac poświęciłem ocenie przydatności sygnału emisji akustycznej do monitorowania tego procesu. Wyniki tych prac zostały opublikowane w [AP4, AP7, AP8].

5.5. Prace badawcze z zakresu nadzorowania procesu szlifowania wałków – zastosowanie systemów regułowych

Diagnostyka techniczna jest jednym z obszarów zastosowań opartych na wiedzy systemów ekspertowych. Są one bardzo użyteczne w zadaniach diagnostycznych, które mogą być łatwo sprowadzone do zadań przetwarzania zbioru reguł o postaci: JEŚLI (warunek) TO (działanie). Jednakże wiedza wyrażona jedynie za pomocą definicji, twierdzeń, reguł i formuł matematycznych często okazuje się niewystarczająca do rozwiązywania problemów na poziomie eksperckim. W przypadku systemów diagnostyki technicznej często dodatkowym problemem są ograniczone możliwości uzyskania odpowiedniej jakości danych. Biorąc pod uwagę te uwarunkowania, w pracy [AP6] opracowałem i zaprezentowałem system ekspertowy do diagnostyki off-line wyników procesu szlifowania wałków. W przypadku diagnostyki off-line dane nie pochodzą z pomiarów wykonywanych podczas trwania procesu. Dlatego celem tego systemu było uzupełnienie systemu opartego na pomiarach wielkości procesowych w trybie on-line.

Głównym źródłem wiedzy eksperckiej w omawianym systemie była tablica typowych wad przedmiotów po szlifowaniu i ich przyczyn. Taka wiedza może być przetransformowana na zbiór reguł. Taki zbiór jest jednak zwykle niekompletny i wnioskowanie systemu jedynie w oparciu o logiczną analizę tych reguł nie przynosi dobrych rezultatów. Z tego powodu, mechanizm wnioskowania systemu powinien stosować procedury wnioskowania przybliżonego. W zaproponowanym systemie mechanizm ten jest realizowany poprzez kolejne sprawdzanie prawdopodobnych warunków dla wystąpienia określonej wady powierzchni.

Najpierw zaprezentowano koncepcję bazy wiedzy odpowiedniej dla systemu budowanego wyłącznie za pomocą uniwersalnych języków programowania. Nie wprowadza to żadnych ograniczeń w procesie projektowania bazy wiedzy ale jest bardzo czasochłonne. Następnie omówiono system zbudowany za pomocą pakietu szkieletowego PC-SHELL. W podsumowaniu porównano oba zaprezentowane podejścia do budowy systemu.

W przypadku zastosowania systemu PC-SHELL, wiedza musiała być reprezentowana za pomocą zbioru wielu jasno sprecyzowanych reguł i dodatkowe pytanie wyjaśniające nie mogły być zadawane użytkownikowi. Efektywność zastosowania pakietu PC-SHELL byłaby wyższa gdyby w regułach mogła być zastosowana operacja logiczna LUB. Wtedy liczba potrzebnych reguł mogłaby być znacznie niższa. W obu przypadkach, zasadnicze znaczenie dla jakości systemu ma poprawność wartości granicznych zamieszczonych w module wyjaśnień.

Jak wspomniano wcześniej, w latach 2004-2007 byłem kierownikiem projektu [P9], którego celem było zbudowanie hybrydowego systemu sztucznej inteligencji do optymalizacji procesu szlifowania wałków. W ramach tego projektu, pod moim kierownictwem i z moim udziałem została opracowana baza wiedzy przeznaczona do wyboru charakterystyki ściernicy, początkowych parametrów szlifowania i parametrów obciążania ściernicy dla szlifowania wałków. Baza ta może być udostępniana użytkownikom lokalnie lub za pośrednictwem sieci. Wobec braku dostępu do źródeł danych z odpowiednio szerokim zakresem przypadków obróbczych, do budowy prezentowanej bazy wykorzystano dostępne katalogi norm, raporty badawcze, poradniki i materiały producentów ściernic. Użytkownik wybiera początkowe parametry szlifowania odpowiadając na pytania stawiane przez system. Wybór tych parametrów jest dokonywany na podstawie wielu kryteriów. Ściernica jest dobierana ze względu na: cechy materiału obrabianego, wymagane parametry jakości przedmiotu po szlifowaniu, wielkość naddatku, rodzaj operacji szlifierskiej, wielkość powierzchni styku ściernicy z przedmiotem obrabianym, sposób chłodzenia, prędkość obwodową ściernicy oraz rodzaj i parametry techniczne szlifierki. Algorytm doboru parametrów szlifowania składa się z: określenia szlifowalności materiału przedmiotu, określenia wielkości naddatków na poszczególne przejścia, doboru prędkości obwodowej przedmiotu, doboru wielkości posuwu osiowego i poprzecznego, doboru parametrów wyiskrzania i doboru parametrów obciążania ściernicy. Ponadto baza zawiera poradnik postępowania w przypadku wystąpienia typowych problemów związanych z realizacją procesu szlifowania.

Do budowy omawianej bazy wiedzy został wykorzystany powszechnie znany, bezpłatny software taki jak serwer APACHE, język PHP i MySQL. Baza została opisana w [RM8].

Doświadczenia zdobyte przeze mnie podczas opracowywania omówionych baz wiedzy zostały wykorzystane w mojej monografii. Zastosowanie DRSA pozwoliło na zbudowanie modeli regułowych szlifowania wgłębnego wałków dających możliwość dokonania oceny stanu tego procesu ze względu na 5 różnych wielkości wyjściowych. Modele zostały wyindukowane automatycznie z danych reprezentujących 78 przykładów realizacji procesu i mogą być wykorzystane jako baza wiedzy o procesie w systemie ekspertowym do oceny stanu i diagnostyki on-line tego procesu. DRSA dokonała również selekcji cech sygnałów pomiarowych, na podstawie których, w możliwie najlepszy sposób, można ocenić stan i wyniki procesu. Dzięki temu zaproponowano nowe, efektywne rozwiązanie w zakresie wykorzystania baz wiedzy w systemach nadzorowania procesu szlifowania.

5.6. Inne prace badawcze z zakresu nadzorowania procesu szlifowania wałków

W trakcie przygotowywania monografii opublikowałem wyniki prac dotyczące następujących zagadnień:

- Zastosowania krzywej udziału materiałowego do oceny stanu zużycia ściernicy [AP12].
- Monitorowanie stanu ściernicy z zastosowaniem analizy falkowej [RM9].
- Wykorzystanie pomiaru drgań do nadzorowania makrogeometrii CPS [RM10].
- Ocena przydatności wybranych wielkości procesowych do nadzorowania stanu procesu szlifowania wgłębnego [AP13, RK15].

Wyniki tych prac są omówione w monografii.

5.7. Prace badawcze z zakresu nadzorowania procesu szlifowania wzdłużnego wałków

W latach 1998-2000 byłem kierownikiem projektu [P7], którego tematem był automatyczny nadzór procesu szlifowania wzdłużnego wałków. W ramach tego projektu wykonałem analizę modelu makrozużycia ściernicy w kierunku osiowym dla tego rodzaju szlifowania zaproponowanego przez Verkerk'a. Celem tej analizy było ustalenie możliwości oceny szybkości rozwoju takiego zużycia poprzez monitorowanie wybranych wielkości procesowych, a szczególnie siły szlifowania. Wyniki tej analizy zostały opublikowane w [RM4, RM5, RK11].

5.8. Prace badawcze z zakresu planowania trajektorii robotów mobilnych

W latach 1993-1994 uczestniczyłem w projekcie europejskim MESSINA (Mobile Execution and Surveillance Systems Intended for Nuclear Application), którego tematem było planowanie trajektorii autonomicznych robotów mobilnych z ograniczeniami holonomicznymi i bez takich ograniczeń [P5]. Głównym celem tego projektu było znalezienie metody kompleksowego planowania manewrów i przemieszczania się robota w zagraconej przestrzeni z uwzględnieniem odpowiedniego poziomu jego autonomii. Wyniki prac nad tym zagadnieniem zostały opublikowane w [RK9, RK10]. Moim wkładem w te prace było wykonanie przeglądu i analizy literatury, planowanie przestrzeni roboczej robota oraz edycja publikacji.

5.9. Kierowanie międzynarodowymi i krajowymi projektami oraz udział w takich projektach

- P1 - Projekt celowy dla Łódzkich Zakładów Wyrobów Metalowych WIZAMET
„Opracowanie dokumentacji technicznej prototypu oraz 5 sztuk automatycznych maszyn do pakowania nożyków do golenia”
Wykonawca, 1985 -1986.
- P2 - Projekt celowy dla Fabryki Szlifierek FUM-PABIANICE
„Automatyzacja przesuwu poprzecznego sań i dosuwu ściernicy szlifiarki do płaszczyzn SP-30”
Wykonawca, 1985 -1986.
- P3 - Projekt badawczy CPBP 02.04.
„Diagnostyka procesu szlifowania kłowego wałków (w tym ACO)”
Wykonawca, 1986 – 1991 (z przerwą 1987 -1988).
- P4 - Projekt badawczy KBN nr PB 0446/S1/92/03
„Diagnostyka wielosygnałowa i minimalizacja błędów kształtu w procesie szlifowania kłowego wałków”
Wykonawca, 1992 – 1994.
- P5 - Projekt badawczy Komisji Europejskiej MESSINA (Mobile Execution and Surveillance Systems Intended for Nuclear Application) nr F12T-CT92-0029/ERBCIPDCT930444
„Complex Motion Generation for Multibody Mobile Robots”
Wykonawca, 1994 -1995.
- P6 - Projekt badawczy KBN Nr 7 T07D 047 08
„Zastosowanie teorii zbiorów rozmytych w sterowaniu i diagnostyce procesu szlifowania”
Wykonawca, 1995 – 1998.

- P7 - Projekt badawczy KBN nr PB 242 T07 98 14,
"Automatyczny nadzór procesu szlifowania wzdłużnego wałków",
Kierownik , 1998 - 2000.
- P8 - Projekt celowy KBN - umowa badawcza nr 18 I8 187 18 99 B,
"Sterowany numerycznie napęd ruchów posuwowych w szlifierkach",
Wykonawca, 1998 – 2000.
- P9 - Projekt badawczy KBN nr PB 4 T07D 014 27
„Hybrydowy system sztucznej inteligencji do optymalizacji warunków szlifowania
kłowego wałków”
Kierownik, 2004 – 2007.
- P10 - Projekt kluczowy programu operacyjnego innowacyjna gospodarka współfinansowany
przez UE z Europejskiego Funduszu Rozwoju,
„Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”
Zadanie ZB1.1 „Inteligentny system szlifowania trudnoobrabialnych stopów lotniczych”
Wykonawca, 2009 - 2013 (planowane ukończenie).

5.10. Udział w międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych

1. Międzynarodowa Konferencja „Sterowanie adaptacyjne w technologii maszyn AC’85”, Rydzyna, październik 1985, referat RK1.
2. Konferencja “Advances in tool materials for high speed machining”, Scottsdale, Arizona, USA, marzec 1987.
3. X Doroczna Konferencja Współpracy Uniwersytet-Przemysł, College of Engineering, University of California, Berkeley, USA, marzec 1988.
4. X Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Wrocław, wrzesień 1987, referat RK2.
5. XII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Poznań 1989, referat RK3, RK4 i RK5.
6. II Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining Systems, Karpacz, marzec 1990, referat AP1.
7. Międzynarodowa Konferencja „Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing - AC’95”, Rydzyna, wrzesień 1990, referat RK6.
8. VI Konferencja nauk.-tech. “Obróbka Ściera. Technologia, obrabiarki, Narzędzia, Pomiar”, Łódź, listopad 1991, referat RK7.
9. Konferencja „Podstawy Technologii Maszyn” Wrocław, 1991, referat AP2.
10. III Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining Systems, Karpacz, marzec 1993, referat nr AP4.
11. CIRP General Assembly, Edynburg, Wielka Brytania, sierpień 1993, referat AZ2.
12. Międzynarodowa Konferencja „Computer Integrated Manufacturing”, Zakopane, maj 1994, referat AP5.
13. Międzynarodowa Konferencja „Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing - AC’95”, Warszawa, wrzesień 1995.
14. VII Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining Systems „Thermal Behaviour, Intelligent Diagnostics and Supervising of Machining Systems”, Karpacz, marzec 1996, referat AP6.
15. Międzynarodowa Konferencja „Computer Integrated Manufacturing”, Zakopane, maj 1996, referat RK9.
16. Sympozjum podsumowujące wyniki projektu TELEMANN/MESSINA, Karlsruhe, Niemcy, czerwiec 1996, referat sprawozdawczy z grantu „Complex Motion Generation for Multibody Mobile Robots” (niepublikowany).
17. XIX Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Łódź, wrzesień 1996, referat RK8.
18. XX Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Poznań – Błazejewko, wrzesień 1997.
19. Konferencja „Automatyzacja produkcji 1997: innowacje w technice i zarządzaniu”, Wrocław, grudzień 1997.

20. IX Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining Systems „Manufacturing Simulation for Industrial Use”, Karpacz, marzec 1998, referat AP7.
21. Międzynarodowa Konferencja “Advances in Production Engineering – APE’98”, Warszawa, czerwiec 1998, referat nr RK13.
22. Międzynarodowa Konferencja „Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing - AC’98”, Warszawa, sierpień 1998, referat RM1.
23. XXI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Warszawa, wrzesień 1998, referat RK12.
24. Sympozjum Projektów Badawczych KBN, Radom, grudzień 1998, referat RK11.
25. Międzynarodowa Konferencja ”Computer Integrated Manufacturing CIM’99”, Zakopane, marzec 1999, referat RM2.
26. XXII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Gdańsk – Jurata, wrzesień 1999.
27. Sympozjum Projektów Badawczych KBN, Warszawa, styczeń 2000.
28. XI Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining Systems „Design and Optimization of Intelligent Machine Tools”, Karpacz, marzec 2000, referat AP9.
29. XXIII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Rzeszów – Myczkowce, wrzesień 2000, referat RM3.
30. Konferencja „Automatyzacja produkcji 2000: wiedza – technika – postęp”, Wrocław, grudzień 2000, referat AP10.
31. XXIV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej. Kraków. Wrzesień 2001, referat RM5.
32. Konferencja naukowo-techniczna „MANUFACTURING M’01”. Współczesne Problemy Wytwarzania.. Poznań, listopad 2001, referat RM4.
33. Międzynarodowa Konferencja „Computer Integrated Manufacturing”, Zakopane, marzec 2001, referat RM6.
34. European Commission FP6 Workshop on “New Production Processes and Machine Tool Technologies”, Leuven, Belgium, October 2002. Prezentacja ”Expression of Interest – An intelligent system for grinding process control and optimization” jako propozycji tematu badawczego do programu Integrated Project in FP6 (niepublikowana).
35. II Międzynarodowa Konferencja CAMT “Modern Trends in Manufacturing”. Wrocław, luty 2003, referat RM7.
36. Konferencja „Automatyzacja Produkcji 2003. Nauka - Wiedza – Innowacje”, Wrocław, grudzień 2003, referat AP11.
37. XXVII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Koszalin, wrzesień 2004, referat AP12.
38. XXXI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Bochnia, wrzesień 2008, referat RM8 i RM9.
39. Okresowa Konferencja Sprawozdawcza zadania ZB1 projektu kluczowego [P10], Warszawa, listopad 2009, referat "Teoretyczne i doświadczalne podstawy inteligentnego nadzoru procesu szlifowania" (niepublikowany).
40. XXXIII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Łódź, wrzesień 2010, referat RM10.
41. Okresowa Konferencja Sprawozdawcza zadania ZB1 projektu kluczowego [P10], Lublin, listopad 2010, referat "Wykorzystanie pomiaru drgań do nadzorowania makrogeometrii CPS" (niepublikowany).
42. 3rd Międzynarodowa Konferencja Manufacturing 2010. Contemporary Problems of Manufacturing and Production Management, Poznań, listopad 2010, referat RK15.
43. Okresowa Konferencja Sprawozdawcza zadania ZB1 projektu kluczowego [P10], Łódź, czerwiec 2011, referat „Zastosowanie teorii zbiorów przybliżonych do nadzorowania procesu szlifowania” (niepublikowany).

5.11. Udział w programach europejskich

Projekt badawczy Komisji Europejskiej MESSINA (Mobile Execution and Surveillance Systems Intended for Nuclear Application) nr F12T-CT92-0029/ERBCIPDCT930444
 ”Complex Motion Generation for Multibody Mobile Robots”
 Wykonawca, 1994 -1995.

Projekt współfinansowany przez UE z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego, „Dostosowanie infrastruktury edukacyjnej Wydziału Mechanicznego Politechniki Łódzkiej do prognozowanych potrzeb i oczekiwań rynku pracy województwa łódzkiego poprzez zakup wyposażenia przeznaczonego do nowoczesnych metod nauczania” Wykonawca, 2009 – 2011.

Projekt kluczowy programu operacyjnego innowacyjna gospodarka współfinansowany przez UE z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego, „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym” Zadanie ZB1.1 „Inteligentny system szlifowania trudnoobrabialnych stopów lotniczych” Wykonawca, 2009 – 2013 (planowane zakończenie).

Projekt współfinansowany przez UE z Europejskiego Funduszu Społecznego „Automatyk – robotyk – kluczowy zawód XXI wieku”, kierunek zamawiany na Wydziale Mechanicznym PŁ. Tutor, 2011- 2014.

5.12. Zagraniczne i krajowe stypendia oraz staże

Arizona State University, Phoenix, USA
Stypendium Fulbright’a
01.1987-02.1988

University of California, Berkeley, USA
Stypendium Fulbright’a
03.1988-05.1988

Universite Libre de Bruxelles, Belgia,
Realizacja projektu badawczego Unii Europejskiej MESSINA
4 kilkudniowe wizyty robocze w latach 1994-1995

5.13. Wykonanie ekspertyz

Udział w programie Foresight Technologiczny dla Regionu Łódzkiego LORIS WIZJA w charakterze eksperta w zakresie mechatroniki, 2007 – 2011.

5.14. Otrzymane nagrody i wyróżnienia

Srebrny Krzyż Zasługi – 2003.

Srebrna Honorowa Odznaka Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Mechaników Polskich – 2010.

Złoty Medal za Długoletnią Służbę – 2011.

Nagroda Rektora PŁ za osiągnięcia w działalności naukowej, dydaktycznej, organizacyjnej – około 20 nagród.



Łódź, dn. 10.09.2012