

Krzysztof Jemielniak

Automatyczna diagnostyka stanu narzędzia i procesu skrawania

Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej,

Warszawa, 2002

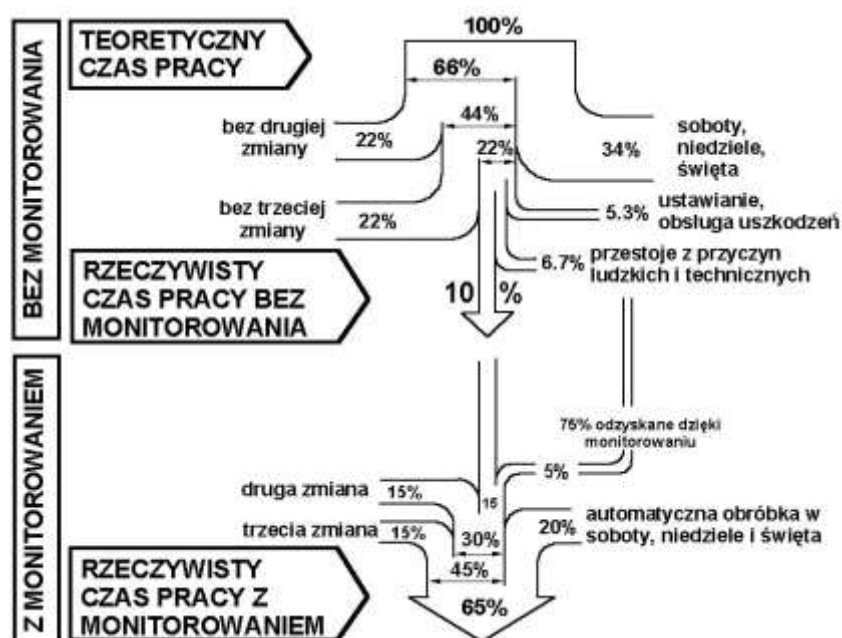
Spis treści

1. WPROWADZENIE	3
2. ZUŻYCIE I TRWAŁOŚĆ OSTRZA	9
2.1. Zużycie i stępienie ostrza	9
2.2. Okres trwałości ostrza	11
2.3. Zależność okresu trwałości ostrza od parametrów skrawania	12
2.4. Trwałość ostrza przy zmiennych parametrach skrawania	14
3. WIELKOŚCI FIZYCZNE WYKORZYSTYWANE W DNIPS.....	18
3.1. Bezpośrednie wskaźniki zużycia	18
3.2. Siły skrawania i wielkości pochodne.....	21
3.2.1. Przebieg sił skrawania w trakcie naturalnego stępienia ostrza	21
3.2.2. Przebieg sił skrawania w trakcie katastroficznego stępienia ostrza.....	34
3.2.3. Wykorzystanie pomiarów sił skrawania do wykrywania drgań samowzbudnych i kolizji	40
3.3. Emisja akustyczna	41
3.3.1. Źródła i przebieg emisji akustycznej w procesie skrawania.....	41
3.3.2. Zależność emisji akustycznej od zużycia ostrza	43
3.3.3. Emisja akustyczna w trakcie katastroficznego stępienia ostrza.....	50
3.3.4. Inne zastosowania emisji akustycznej	63
3.4. Drgania i hałas	64
3.4.1. Nadzorowanie stanu narzędzia	64
3.4.2. Wykrywanie nadmiernych drgań.....	67
4. CZUJNIKI STOSOWANE W UKŁADACH DNIPS	69
4.1. Czujniki sił skrawania i wielkości pochodnych.....	70
4.1.1. Czujniki prądu i mocy silnika.....	70
4.1.2. Czujniki odkształceń i przemieszczeń	73
4.1.3. Czujnik siły posuwowej	75
4.1.4. Czujniki sił skrawania	76
4.1.5. Czujniki momentu skręcającego.....	86
4.2. Czujniki emisji akustycznej.....	88
4.2.1. Metodyka badania charakterystyk czujników AE	88
4.2.2. Charakterystyki wybranych czujników AE dostępnych w Polsce	90
4.2.3. Ocena przydatności czujników ultradźwiękowych do diagnostyki stanu narzędzia	94
4.2.4. Przemysłowe czujniki AE	97
4.3. Czujniki drgania i ultradźwięków.....	99
4.4. Inne czujniki stosowane w DNIPS	101
5. WYBRANE ZAGADNIENIA OBRÓBKI SYGNAŁÓW W DNIPS	103
5.1. Analiza sygnałów z łożysk pomiarowych	103
5.2. Obróbka sygnałów AE pochodzących z procesu skrawania	111
5.2.1. Wstępna obróbka sygnałów AE	111

5. 2. 2. Zniekształcenia sygnału AE	115
5. 2. 3. Stała całkowania przy wyznaczaniu wartości skutecznej	120
5. 2. 4. Wpływ drogi sygnału AE na jego wartość i charakterystykę	121
5. 3. Aparatura do badania AE stosowana w ITM PW	123
5. 3. 1. Uniwersalny układ analogowej obróbki wstępnej sygnału AE	123
5. 3. 2. Laboratoryjny Monitor Stanu Narzędzia LMSN-2	126
6. STRATEGIE NADZORU STANU NARZĘDZIA I PROCESU SKRAWANIA	136
6. 1. Ocena zużycia ostrza	136
6. 2. Wykrywanie katastroficznego stopienia ostrza	138
6. 2. 1. Strategie oparte na stałych granicach	138
6. 2. 2. Rozpoznawanie przebiegu sił skrawania towarzyszącego KSO	141
6. 2. 3. Strategia wykrywania KSO przy toczeniu opracowana w ITM PW	144
6. 3. Nadzór procesu skrawania	154
6. 3. 1. Wykrywanie i przeciwdziałanie nadmiernym drganiom	154
6. 3. 2. Wykrywanie kolizji	155
6. 3. 3. Inne zadania układów DNIPS	157
7. METODY SZTUCZNEJ INTELIGENCJI W DNIPS	158
7. 1. Budowa i działanie sztucznych sieci neuronowych	158
7. 2. Zastosowanie sieci neuronowych do oceny zużycia ostrza	161
7. 2. 1. Wpływ inicjalizacji sieci na przebieg jej uczenia	161
7. 2. 2. Uczenie z zakłóceniami	164
7. 2. 3. Badanie efektywności wejść sieci neuronowej	168
7. 2. 4. Optymalizacja struktury sieci	174
7. 2. 5. Laboratoryjny a przemysłowy czujnik sił skrawania	176
7. 2. 6. Sieć cztero- czy trzywarstwowa?	180
7. 2. 7. Przyspieszenie uczenia sieci	184
7. 2. 8. Ograniczanie liczby wejść	185
7. 2. 9. Oszacowanie zużycia powierzchni przyłożenia w strefie środkowej	187
7. 3. Logika rozmyta	189
7. 3. 1. Wybrane aspekty logiki rozmytej	189
7. 3. 2. Tworzenie bazy wiedzy do oceny zużycia ostrza	191
7. 3. 3. Przewidywanie zużycia ostrza w oparciu o system logiki rozmytej	193
8. PRZEMYSŁOWE UKŁADY DNIPS	196
8. 1. Czujniki	197
8. 2. Przekazywanie i obróbka sygnału	197
8. 3. Budowa układów przemysłowych DNIPS	198
8. 4. Strategie monitorowania	202
9. RODZINA UKŁADÓW DNIPS BUDOWANA W ITM PW	206
9. 1. Podstawowe założenia rodziny układów ADONIS	206
9. 2. Prezentacja działania układu ADONIS 3	210
LITERATURA	218

1. WPROWADZENIE

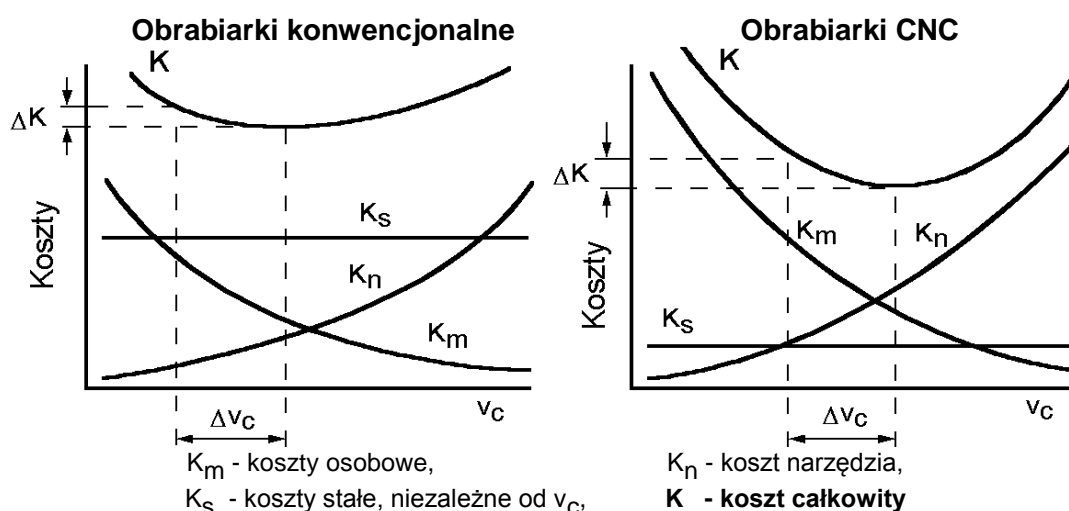
W ciągu ostatnich trzydziestu lat byliśmy świadkami dramatycznych zmian w przemyśle budowy maszyn. Dążenie do obniżenia kosztów, zwiększenia dokładności, skrócenia czasu wytwarzania doprowadziło do niemal wyparcia obrabiarek konwencjonalnych przez nowoczesne systemy produkcyjne (od linii automatycznych, przez obrabiarki NC, CNC do FMS), nasycone procesorami, często wyposażone w roboty. Zwiększająca się autonomia systemów produkcyjnych oznaczająca ograniczony nadzór operatora sprawia, że niezbędne staje się wyposażanie tych systemów w układy monitorujące i diagnozujące ich pracę, a w następnej kolejności automatycznie reagujące na powstające zakłócenia (układy nadzorujące). Te systemy produkcyjne są kosztowne, ważne jest zatem możliwie dobre wykorzystanie ich czasu pracy. Tymczasem jeśli by nie stosować układów monitorujących, postoje w czasie drugiej i trzeciej zmiany, w czasie weekendów i świąt, a także przestoje związane z usuwaniem awarii i inne sprawiają, że z całkowitego czasu (24 godziny * 365 dni w roku) wykorzystywane jest zaledwie ok. 10%. Wprowadzenie monitorowania umożliwia znaczne odzyskanie straconego czasu i zwiększenie wykorzystania czasu pracy maszyn do ok.. 65% ([220] rys. 1.1). Głównym celem układów monitorujących jest zatem zabezpieczenie obrabiarki, narzędzia i przedmiotu przed uszkodzeniami wynikającymi z nieprawidłowego przebiegu procesu skrawania realizowanego bez ciągłego nadzoru operatora. Pełne zabezpieczenie tego typu byłoby możliwe w przypadku, gdyby podsystem był w stanie z wyprzedzeniem wykrywać nieprawidłowości przebiegu obróbki lub stanu narzędzia i powodować określoną reakcję układu sterowania.



rys. 1.1. Wpływ zastosowania układów monitorujących na czas pracy maszyn wg. [220].

W czasie ostatnich dekad minionego stulecia wystąpił także (i postępuje nadal) istotny rozwój materiałów narzędziowych (np. ceramika Si₃N₄, CBN, diament polikrystaliczny), umożliwiających znaczne

zwiększenie wydajności obróbki. Do ich wykorzystania potrzebne jest stosowanie znacznie wyższych parametrów skrawania niż przy stosowaniu tradycyjnych materiałów narzędziowych. Ponadto pojawiło się szereg nowych materiałów konstrukcyjnych, trudniejszych do obróbki niż dotychczas stosowane. Nowe materiały narzędziowe jak i materiały obrabiane są stosunkowo słabo poznane pod względem skrawności i skrawalności. Powoduje to, iż proces skrawania, a zwłaszcza zużycie ostrza stały się znacznie trudniej przewidywalne. Przy ograniczonym nadzorze operatora trzeba uwzględnić możliwe losowo najbardziej niekorzystne właściwości materiału obrabianego, skrajne wymiary przedmiotu czy najkrótszy okresu trwałości ostrza, a także o ile to możliwe zabezpieczyć się przed katastroficznym stępieniem ostrza (KSO). Stępienie takie, polegające na gwałtownym przyroście zużycia, wykruszeniu lub wyłamaniu znacznych jego fragmentów może wystąpić nie tylko na końcu okresu trwałości lecz także niespodziewanie, nawet w początkowym okresie jego pracy. Niebezpieczeństwo to jest szczególnie duże przy trudnych warunkach skrawania (obróbka przerywana, powierzchnie surowe, materiały trudnoobrabialne). Wymienione czynniki powodują, że w praktyce przemysłowej często stosuje się konserwatywne, zaniżone parametry skrawania. Jednakże znacznie wyższy koszt nowoczesnych systemów produkcyjnych sprawia, że wykresy zależności kosztów maszynowych i narzędziowych od prędkości skrawania są znacznie bardziej strome niż przy stosowaniu obrabiarek konwencjonalnych ([220] rys. 1.2). Wzrost kosztów wytwarzania związany z zaniżeniem prędkości skrawania w stosunku do optymalnej, odpowiadającej minimalnym kosztom jest tu więc znacznie większy i trudny do zaakceptowania. Zastosowanie układów diagnostyki narzędzia i procesu skrawania (DNiPS), wykrywających stępienie ostrza i inne zakłócenia procesu, umożliwia stosowanie wyższych, optymalnych parametrów, a co za tym idzie pełniejszego wykorzystanie potencjalnych możliwości systemu obróbkowego. Układy takie mogą być również stosowane do wspomagania operatora obsługującego obrabiarkę pracującą z wysokimi prędkościami skrawania, z dużą ilością cieczy chłodząco-smarującej, gdy przestrzeń obróbkowa jest z reguły zamknięta osłonami. W takich warunkach bezpośredni nadzór operatora jest bardzo utrudniony lub wręcz niemożliwy.



rys. 1.2. Zależność kosztów produkcji od prędkości skrawania dla obróbki konwencjonalnej i na obrabiarkach CNC (wg [220]).

Kolejnym powodem, dla którego stosuje się układu diagnostyki procesu obróbki jest wzrost dokładności wymiarowo-kształtowej przedmiotu i zmniejszenie chropowatości obrabianej powierzchni. Osiąga się to poprzez eliminację nadmiernych drgań, obróbki niesprawnym narzędziem oraz zapewnienie stałości obciążenia i odkształceń struktury obrabiarki, przedmiotu i narzędzia.

Omówione wyżej względy spowodowały, że już w drugiej połowie lat osiemdziesiątych większość liczących się producentów obrabiarek oferowała zainstalowane układy DNiPS, a poza tym na rynku pojawiały się oddzielne układy, których producenci zapewniali o ich skuteczności. Stosunkowo wiele układów DNiPS zostało zainstalowanych w praktyce przemysłowej. Po kilku latach okazało się jednakże, iż ich użytkownicy coraz mniej chętnie kupują nowe układy, a większość już zainstalowanych przestaje być wykorzystywana przed upływem roku. Generalnie można powiedzieć, że poza nielicznymi wyjątkami, te wczesne układy DNiPS poniosły porażkę – były zbyt zawodne, zbyt drogie, zbyt trudne w obsłudze. Spowodowało to (poza innymi, niezależnymi czynnikami jak spadek koniunktury) wyraźne obniżenie zainteresowania użytkowników tymi układami. Oczywiście nie oznaczało to, bo oznaczać nie mogło, zniknięcia obiektywnej potrzeby automatycznej diagnostyki systemów wytwórczych. Zmusiło natomiast badaczy i producentów układów do gruntownej analizy przyczyn tego niepowodzenia oraz wytyczenia dróg rozwoju DNiPS. Duży wkład w tym zakresie miała grupa robocza zajmująca się DNiPS w ramach CIRP w latach 1992-1995 [25, 45, 141, 144, 145 i in.]. Mimo to, w dalszym ciągu trudno problem DNiPS uznać za rozwiązany – zaledwie 29% producentów obrabiarek i 38% ich użytkowników jest zadowolonych z tych układów [136]. Współcześnie intensywne prace zmierzające do zwiększenia wiarygodności działania układów nadzorujących stan narzędzia oraz przeniesienia osiągnięć uzyskanych w laboratoriach do praktyki przemysłowej prowadzone są w ramach światowego programu badawczego „Sensor Fused Intelligent Monitoring System for Machining” (SIMON) będącego częścią ogólniejszego programu „Intelligent Manufacturing Systems”.

Podstawowe zadania układu DNiPS to [89, 98]:

- diagnozowanie stanu narzędzi skrawających, w tym:
 - wykrywanie katastroficznego stopienia ostrza (KSO),
 - diagnostyka zużycia ostrza (wykrywanie końca okresu trwałości),
- wykrywanie nadmiernych drgań,
- wykrywanie kolizji
- inne (np. diagnostyka postaci wióra, wykrywanie narostu, powstawania zadziorów, wykrywanie brakującego przedmiotu lub narzędzia).

Pierwsze z wymienionych zadań – diagnostyka stanu narzędzia jest najważniejsze, i jemu głównie poświęcona jest ta monografia.

Podczas obróbki mogą występować drgania wymuszone, własne, parametryczne i samowzbudne. Drgania pierwszych trzech rodzajów mogą się pojawiać podczas biegu luzem i podczas obróbki, natomiast

drżania samowzbudne jedynie w czasie skrawania. Z punktu widzenia oddziaływania na efekty obróbki najistotniejsze są względne drżania narzędzia i przedmiotu obrabianego. Wpływają one na wzrost niedokładności wymiarowo-kształtowej, wzrost chropowatości powierzchni oraz zwiększenie zużycia narzędzia. Szczególnie niekorzystne są występujące podczas niestabilnej obróbki drżania samowzbudne, których amplitudy mogą rosnąć do znacznych wartości grożąc awaryjnym zniszczeniem narzędzia lub zespołów obrabiarki i praktycznie uniemożliwiając obróbkę. Ponieważ wykluczenie a priori pojawienia się drgań samowzbudnych jest trudne i z reguły związane z koniecznością ograniczenia wydajności obróbki, obrabiarki pracujące bez ciągłego nadzoru operatora powinny być zabezpieczone przed możliwością wystąpienia drgań samowzbudnych [68, 177, 197, 199, 217, 242, 249, 252].

Pod pojęciem kolizji rozumie się nieprzewidziane zderzenie zespołów obrabiarki, narzędzia lub przedmiotu spowodowanych ich wzajemnymi przemieszczeniami. Kolizje mogą występować podczas realizacji cykli automatycznych i ruchów ustawczych sterowanych ręcznie. Następstwem kolizji są często poważne awarie, z tego względu autonomiczne stacje obróbkowe muszą być wyposażone w układy zabezpieczające przed wystąpieniem i skutkami kolizji. Zgodnie z wynikami badań przeprowadzonych w TH Monachium średni koszt kolizji można ocenić na sumę ok. 18000 DM [173, 201]. Wagę tego problemu podkreśla fakt, że w 1982 roku ok. 75% wypłaconych w przemyśle RFN odszkodowań było związanych z kolizjami, a średni czas przestoju maszyny w celu usunięcia skutków kolizji wynosił od jednego do dwóch tygodni.

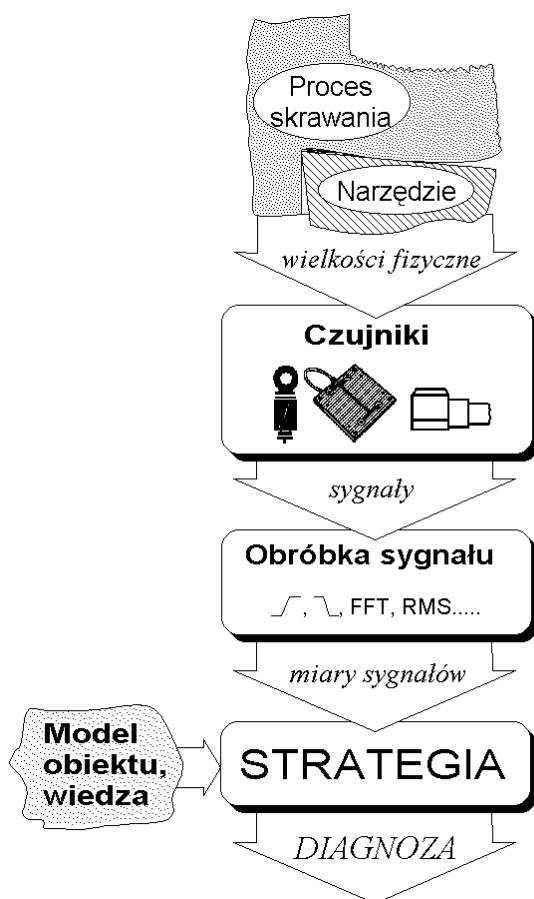
W pracy [173] zestawiono główne przyczyny kolizji. Są to:

➤ błędy w programie NC	13%
➤ ustawianie i zerowanie obrabiarki	21%
➤ błędy obsługi	20%
➤ wybór narzędzi i wprowadzanie wymiarów narzędzi	18%
➤ awarie układu sterowania NC i układu elektrycznego	26%
➤ nieprawidłowe wymiary przygotówki	3%

Widać, że pierwsze cztery grupy przyczyn, obejmujące w sumie 72% wszystkich kolizji są zawinione bezpośrednio przez człowieka: programistę lub operatora. Niebezpieczeństwo kolizji rośnie wraz ze wzrostem stopnia skomplikowania obrabiarki i obrabianego przedmiotu oraz z liczbą i różnorodnością obrabianych przedmiotów, co jest związane z częstotliwością uruchamiania nowych programów. Można więc stwierdzić, że autonomiczne stacje obróbkowe muszą być wyposażone w układy zabezpieczające przed niebezpieczeństwem wystąpienia kolizji lub jej skutkami.

Wymienione tu zagadnienia dotyczą jedynie diagnostyki (stanu) narzędzia i procesu skrawania – DNiPS. Nie wyczerpują one oczywiście całości problematyki monitorowania, nadzorowania i diagnostyki w procesach wytwarzania. Przegląd zagadnień związanych z diagnostyką obrabiarek i urządzeń technologicznych można znaleźć np. w [58, 152].

Ogólną strukturę układu diagnostyki stanu narzędzia i procesu skrawania przedstawiono na rys. 1.3 [89]. Proces skrawania może być opisywany za pomocą wielu różnych wielkości fizycznych. Odpowiednie czujniki przekształcają wybrane wielkości fizyczne (jako wielkości mierzone) w sygnał elektryczny, który może być poddany zarówno elektronicznemu przetwarzaniu jak i transmisji. Przetwarzanie sygnału może być mniej lub bardziej rozbudowane, począwszy od filtracji (dolno, górno i pasmowo przepustowej), poprzez analogowo-cyfrową konwersję A/C, szybką transformację Fouriera (FFT), obliczanie wartości skutecznej (RMS), odchyleń standardowych, wartości średniej, kurtozy, stosowanie analizy regresji oraz wielu innych. Wynikiem jest szereg miar reprezentujących mierzony sygnał. Wybierać należy takie miary, które są wrażliwe na zmiany parametrów badanego procesu. Mówimy wówczas o ekstrakcji cech z sygnału pomiarowego. Na podstawie tak uzyskanego wektora cech i odpowiedniej strategii, generowana jest decyzja o stanie monitorowanego procesu (zjawiska). Sama strategia powstaje na bazie wiedzy o procesie i doświadczeń dotyczących modelowania procesu.



rys. 1.3. Struktura układu diagnostyki (stanu) narzędzia i procesu skrawania - DNiPS.

W kolejnych rozdziałach tej książki omówione zostaną elementy struktury układu DNiPS przedstawione na rys. 1.3. Przedtem jednak, w rozdziale 2 przedstawione zostaną podstawowe zagadnienia związane ze zużyciem i trwałością ostrza oraz konwencjonalne metody rozwiązywania problemu określenia jego trwałości – bez zastosowania układu DNiPS [83].

W pracach badawczych dotyczących diagnostyki stanu narzędzia i procesu skrawania coraz częściej stosowane są metody sztucznej inteligencji. Mimo iż nie znalazły one dotychczas (do końca XX wieku) przemysłowego zastosowania, są z pewnością warte uwagi. Poświęcono im siódmy rozdział książki.

W rozdziale ósmym przedstawiono przegląd komercyjnych układów DNiPS, a ściślej te dotyczące ich informacje, które nie znalazły się w poprzednich rozdziałach.

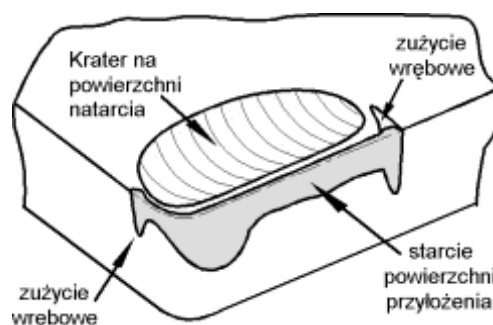
Ostatni rozdział książki omawia pokrótce pierwsze doświadczenia z budowanymi właśnie w Instytucie Technologii Maszyn Politechniki Warszawskiej (ITM PW) układami Automatycznej Diagnostyki Ostrzy Narzędzi Skrawających (ADONiS).

Niniejsza książka omawia przede wszystkim wyniki prac zespołu kierowanego przez autora. Niemniej jednak zawarto w niej podstawowy stan wiedzy w omawianej dziedzinie. Inne omówienia tego stanu wiedzy można znaleźć np. w [8, 25, 43, 58, 68, 99, 152, 181, 212, 217, 220].

2. ZUŻYCIE I TRWAŁOŚĆ OSTRZA

2. 1. Zużycie i stępienie ostrza

Obciążenie mechaniczne i cieplne, jakiemu podlega ostrze w czasie skrawania powoduje zmiany właściwości ostrza oraz ubytki jego materiału, co pogarsza jego zdolność do wykonywania obróbki skrawaniem. Tą postępującą w czasie utratę właściwości skrawnych ostrza nazywamy **zużyciem ostrza**. Należy podkreślić, iż zużycie ostrza jest procesem trwającym od początku jego pracy, czyli ostrze, które pracowało choćby kilkanaście sekund już jest w jakimś stopniu zużyte.



rys. 2.1. Typowe objawy zużycia ostrza

Typowe objawy zużycia ostrza przedstawiono na rys. 2.1. Są to: starcie powierzchni przyłożenia, krater na powierzchni natarcia oraz zużycie wrębowe na powierzchni natarcia i przyłożenia na końcach czynnej krawędzi skrawającej. Wraz ze wzrostem zużycia wyniki pracy ostrza są coraz gorsze, a wreszcie stają się niezadowalające. Ponadto zużycie ostrza może być na tyle duże, że grozi całkowitym zniszczeniem narzędzia i uszkodzeniem przedmiotu obrabianego, co jest nie do zaakceptowania. Stan ostrza, który czyni go nieprzydatnym do dalszej pracy nazywamy **stępieniem ostrza**. Tak więc o ile zużycie jest wielkością zmienną w czasie, stępienie jest określoną (maksymalną dopuszczalną) wartością tego zużycia.

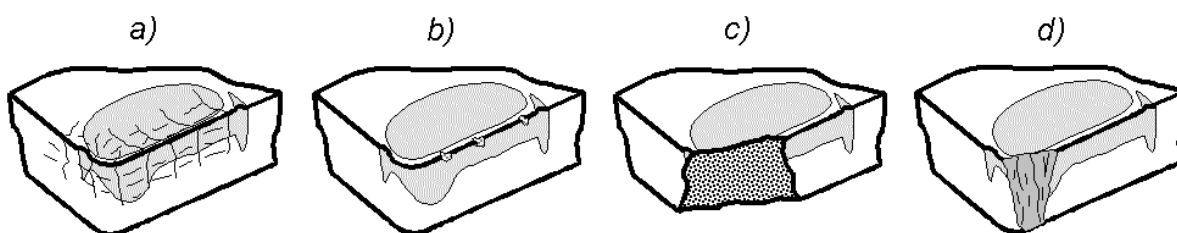
Obok wymienionych wyżej objawów zużycia narastających w sposób ciągły, występują wytrzymałościowe (dyskretne) formy zużycia ostrza. Zakończenie pracy narzędzia w taki sposób nazywa się katastroficznym stępieniem ostrza (KSO). Jest ono szczególnie niebezpieczne przy ograniczonym nadzorze operatora, może bowiem prowadzić do całkowitego zniszczenia narzędzia, uszkodzenia przedmiotu obrabianego, a w skrajnych przypadkach nawet do uszkodzenia obrabiarki. Zawsze powoduje nieplanowaną przerwę w produkcji.

Zużycie wytrzymałościowe może przyjmować następujące formy (rys. 2.2):

- a. Pęknięcia ostrza występują z reguły przy obróbce przerywanej (np. frezowanie głowicą) gdy ostrze narażone jest na wielokrotne, częste uderzenia mechaniczne i cieplne. Zmęczenie mechaniczne powoduje powstawanie pęknięć równoległych do krawędzi, zaś cieplne prostopadłych do niej. Z

biegiem czasu pęknięcia obu typów powiększają się, a ich połączenie prowadzi do wyłamania najpierw otoczonego przez nie segmentu, a chwilę później znacznego fragmentu ostrza.

- b. Drobne wykruszenia krawędzi (chipping) powstają w wyniku miejscowego przekroczenia wytrzymałości doraźnej ostrza. Geometria fragmentu ostrza, na którym wystąpiło wykruszenie ulega gwałtownym, niekorzystnym zmianom (znaczny ujemny kąt natarcia). Pociąga to za sobą wzrost obciążenia ostrza w tym rejonie, a więc zwiększoną podatność na zużycie oraz kolejne wykruszenia. W krótkim czasie prowadzić to może do zupełnej destrukcji ostrza jak na rys. 2.2d.
- c. Wyłamanie ostrza może mieć podobne przyczyny co wykruszenie, jest tylko znacznie większe, a więc oznacza natychmiastową utratę własności skrawnych ostrza. Wykruszenia i wyłamania często występują przy nadmiernym jego zużyciu. Jeśli pojawiają się od początku pracy ostrza świadczą o złe dobranych warunkach skrawania (zbyt kruchy materiał ostrza, zła jego geometria, niestabilna obróbka).
- d. W przypadku narzędzi ze stali szybko tnących wzrost temperatury skrawania spowodowany nadmiernym zużyciem ostrza prowadzi do odpuszczenia materiału ostrza i ścięcia wierzchołka, zwanego w tym przypadku „spaleniem ostrza”



rys. 2.2. Formy wytrzymałościowego zużycia ostrza - pęknięcia (a), wykruszenia (b), wyłamanie (c) i ścięcie wierzchołka (d).

Do oceny zużycia ostrza służą wskaźniki zużycia, przy czym mogą być one **bezpośrednie** lub **pośrednie**. Te pierwsze, to geometryczne miary zużycia ostrza przedstawione na rys. 2.1. Najważniejsze z nich to:

- głębokość zółbka K_T mierzona w najgłębszym miejscu prostopadle do powierzchni natarcia,
- szerokość starcia w strefie środkowej VB_B , o ile jest ono równomierne lub maksymalna szerokość starcia w strefie środkowej VB_{Bmax} , o ile jest ono nierównomierne,
- szerokość starcia w rejonie naroża VB_C - często bywa większe niż VB_B .

Należy podkreślić, że wymienione tu bezpośrednie wskaźniki zużycia choć podstawowe, nie muszą być jedynymi stosowanymi. Badając zużycie ostrza należy przyjmować te wskaźniki, które decydują o jego stopieniu, czyli końcu przydatności do pracy. Np. przy frezowaniu stosuje się liczbę i wielkość pęknięć.

Pośrednie wskaźniki zużycia to zmiany wielkości fizycznych spowodowane zużyciem ostrza, na podstawie których można ocenić to zużycie. Zaliczamy do nich chropowatość powierzchni obrobionej, kształt i kolor wióra, siły skrawania, drgania i hałas, emisję akustyczną, temperaturę w strefie skrawania i

szereg innych odpowiednich dla danych warunków skrawania. Układy DNiPS wykorzystują głównie wskaźniki pośrednie i im będzie poświęcony następny rozdział.

2. 2. Okres trwałości ostrza

Typy przebiegów bezpośrednich wskaźników zużycia w funkcji czasu przedstawiono na rys. 2.3. Po dotarciu ostrza można je ogólnie opisać równaniem:

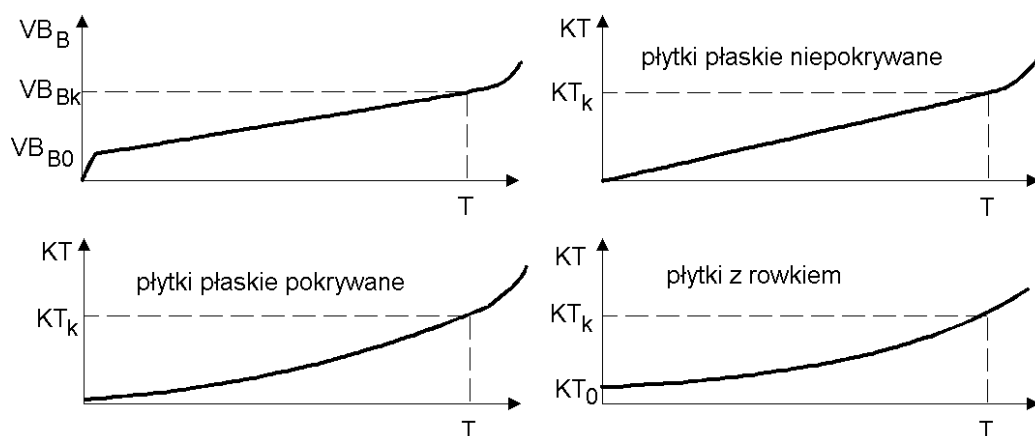
$$w' = C_w t^u \quad (2.1)$$

Z reguły czas docierania jest bardzo krótki i może być pominięty. Przyjmując to uproszczenie możemy całkowitą wartość zużycia zapisać jako:

$$w = w_0 + C_w t^u \quad (2.2)$$

gdzie w - całkowita wartość zużycia,

w_0 - wartość dotarcia (lub głębokość zwijacza wióra)



rys. 2.3. Typy przebiegów zużycia w funkcji czasu.

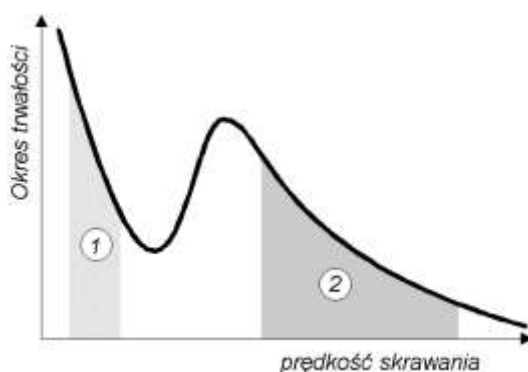
Okres trwałości ostrza jest to czas skrawania do jego stępienia, tj. do osiągnięcia maksymalnej dopuszczalnej wartości określonego wskaźnika zużycia lub np. wykruszenie krawędzi skrawającej czy wyłamanie znacznego fragmentu ostrza. Te ostatnie zjawiska nazywamy katastroficznym stępieniem ostrza. Dopuszczalną (krytyczną) wartość zużycia ostrza lub jego wykruszenie czy wyłamanie nazywamy **kryterium trwałości** ostrza.

Dobór kryterium trwałości zależy od dwu czynników. Po pierwsze powinno ono jak najlepiej charakteryzować stan nieprzydatności narzędzia do dalszej pracy. Po drugie musi być w danych warunkach możliwe do określenia. Ten drugi, praktyczny wzgląd jest z reguły dominujący. Możemy tu wyróżnić kilka sytuacji.

1. W pracach badawczych czy w trakcie opracowywania technologii produkcji wielkoseryjnej stosuje się bezpośrednie wskaźniki zużycia. Są one najbardziej obiektywne, mogą być zmierzone w najbardziej pewny sposób, wreszcie w sposób bezpośredni opisują zużycie ostrza. Kryterium trwałości jest więc w tym przypadku określoną wartością wybranego wskaźnika zużycia lub kombinacją takich wartości.
2. W produkcji jednostkowej czy remontowej, tam gdzie nadzór operatora obrabiarki jest stały i bezpośredni, kryteria trwałości ostrza wynikają z obserwacji strefy skrawania, czyli są oparte o pośrednie wskaźniki zużycia określane przez człowieka. Może to być kształt czy kolor wiórów, piski narzędzia (szczególnie wiertła), stan powierzchni obrobionej i inne wynikające z doświadczenia operatora.
3. W produkcji seryjnej nadzór operatora jest ograniczony. Dotyczy to zwłaszcza układów obróbkowych o zwiększonej autonomii jak linie automatyczne. W takich przypadkach w trakcie uruchamiania produkcji dobiera się właściwe warunki skrawania i określa możliwą do wykonania liczbę operacji. Należy przy tym uwzględnić losowy charakter okresu trwałości.
4. W najbardziej nowoczesnych układach zautomatyzowanych jak elastyczne systemy obróbkowe, stosowane są znów pośrednie wskaźniki zużycia i wynikające z nich kryteria trwałości. Tym razem jednak oparte są one nie na obserwacjach operatora lecz pomiarach wykonanych przez odpowiednie czujniki, opracowywanych następnie przez specjalistyczne układy diagnostyczne. Zagadnieniom tym poświęcona jest ta książka.

2. 3. Zależność okresu trwałości ostrza od parametrów skrawania

Zależność okresu trwałości ostrza od prędkości skrawania przedstawiono na rys. 2.4. Zaznaczono na nim dwa zakresy prędkości, którym odpowiadają opadające fragmenty krzywej. Z reguły wykorzystywany jest zakres 2. W niektórych przypadkach (gwintowanie, przeciąganie stali stopowych) wykorzystywany jest zakres pierwszy.



rys. 2.4. Zależność okresu trwałości ostrza od prędkości skrawania.

Taylor stwierdził, że opadające części wykresu $T-v_C$ w układzie podwójnie logarytmicznym można przedstawić w postaci prostej:

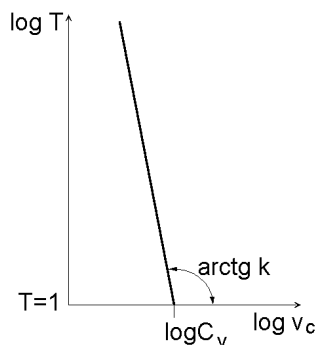
$$y = c + k x \tag{2.3}$$

gdzie $y = \log T$, $x = \log v_c$ $c = \log C_T$

czyli: $\log T = \log C_T + k \log v_c$

co po zdelogarytmowaniu daje:

$$T = C_T v_c^k \quad (2.4)$$



Stała C_T odpowiada (tylko matematycznie!) trwałości ostrza przy prędkości skrawania $v_c = 1$. Jej wartość jest bardzo duża, a przez to niewygodna. Zauważmy, że zależność $T - v_c$ przecina poziomą oś w punkcie ($T = 1$, $v_c = C_v$), czyli C_v jest (znowu tylko matematycznie) prędkością skrawania odpowiadającą okresowi trwałości $T = 1$. Zachodzi zatem:

$$k = -\frac{\log C_T}{\log C_v} \Rightarrow C_T = C_v^{-k} \quad (2.5)$$

rys. 2.5. Zależność Taylora.

Podstawiając powyższe do (2.4) otrzymamy :

$$T = C_v^{-k} v_c^k \quad (2.6)$$

a stąd równanie Taylora:

$$v_c T^{\frac{1}{k}} = C_v \quad (2.7)$$

Równanie to wykorzystywane jest w dwu postaciach użytkowych:

$$T = \left(\frac{v_c}{C_v} \right)^k \quad (2.8)$$

oraz

$$v_c = C_v T^{1/k} \quad (2.9)$$

Okres trwałości ostrza zależy nie tylko od prędkości skrawania lecz także od innych parametrów skrawania. Również posuw i głębokość skrawania powodują obniżenie okresu trwałości ostrza, jednakże w stopniu mniejszym niż prędkość skrawania. Równanie (2.15) można zatem rozszerzyć do postaci:

$$T = \left(\frac{v_c}{C_v} \right)^k f^{y_T} a_p^{x_T} \quad (2.10)$$

Wyznaczając prędkość skrawania z (2.10) otrzymamy rozszerzoną postać zależności (2.9):

$$v_c = C_v T^{1/k} \cdot f^{-y_T/k} \cdot a_p^{-x_T/k} = C_v T^{1/k} \cdot f^{y_v} \cdot a_p^{x_v} \quad (2.11)$$

gdzie: $y_v = -y_T/k$

$x_v = -x_T/k$

Ważne praktyczne zastosowanie ma okresowa prędkość skrawania, czyli taka prędkość, która pozwala na uzyskanie zadanego okresu trwałości ostrza. Opisana jest ona zależnością:

$$v_{cT} = C_{vT} f^{y_v} a_p^{x_v} \quad (2.12)$$

gdzie: $C_{vT} = C_v T^{1/k}$

W praktyce zamiast indeksu „ T ” wpisuje się okres trwałości ostrza. Mamy więc np. v_{c15} , v_{c60} itd. (piętnastominutową, godzinową itp) prędkość skrawania. W poradnikach doboru warunków skrawania podawane są tablice v_{cT} w funkcji a_p i f , przy czym każda tablica odpowiada określonemu materiałowi ostrza i grupie materiałów obrabianych. Wpływ innych warunków skrawania, jak geometria ostrza, uwzględniany jest przy pomocy współczynników poprawkowych zawartych w oddzielnych tablicach, jako że wpływają one głównie na wartość stałej Taylora, nie wpływając zasadniczo na wartości wykładników potęgowych.

2. 4. Trwałość ostrza przy zmiennych parametrach skrawania

Przypomnijmy, że ogólne równanie zużycia w funkcji czasu można zapisać jako (2.2):

$$w = w_0 + C_w t^u$$

Czas skrawania po którym zużycie ostrza w osiąga wartość równą wskaźnikowi stopienia w_k jest okresem trwałości ostrza T . Równanie (2.2) przyjmuje wtedy postać:

$$w_k = w_0 + C_w T^u \quad (2.13)$$

Przenosząc w równaniach (2.2) i (2.13) w_0 na lewą stronę i dzieląc je przez siebie otrzymamy:

$$\frac{w - w_0}{w_k - w_0} = \left(\frac{t}{T} \right)^u$$

Występujący w tym równaniu stosunek czasu skrawania do okresu trwałości ostrza jest wielkością bezwymiarową. Oznaczmy ją ΔT i nazwiemy wykorzystaną częścią okresu trwałości ostrza:

$$\Delta T = \frac{t}{T} = \left(\frac{w - w_0}{w_k - w_0} \right)^{1/u} \quad (2.14)$$

Wykorzystana część okresu trwałości ostrza przyjmuje z natury rzeczy wartości od 0 - dla ostrego narzędzia, do 1 - dla narzędzia stępionego. Zauważmy, że do wyznaczenia ΔT nie jest potrzebna znajomość dotychczasowego przebiegu pracy ostrza, a jedynie wartość zużycia. Będąc niezależna od parametrów skrawania i odpowiadającego im okresu trwałości ostrza ΔT jest wygodną ogólną miarą wykorzystanych możliwości ostrza.

Z zależności (2.13) wynika bezpośrednio wzór na współczynnik C_w :

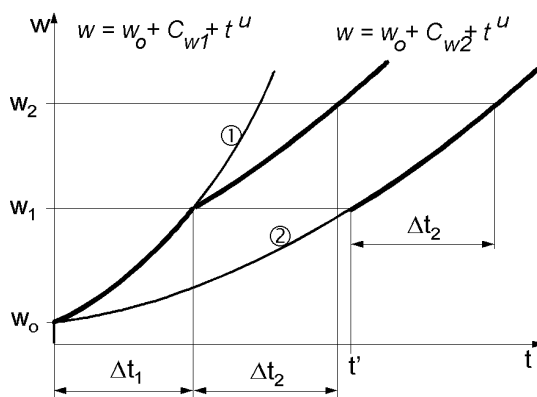
$$C_w = \frac{W_k - W_0}{T^u} \quad (2.15)$$

Podstawiając do niego rozszerzony wzór Taylora (2.10) wyznaczyć można:

$$C_w = (w_k - w_0) \cdot C_v^{uk} \cdot v_c^{-uk} \cdot f^{-uy_T} \cdot a_p^{-ux_T} \quad (2.16)$$

Jak widać, C_w jest funkcją wskaźnika stopienia i parametrów skrawania, a za pośrednictwem C_v także pozostałych warunków skrawania.

Ważnym zagadnieniem jest przewidywanie zużycia i trwałości ostrza pracującego z przemienne zmiennymi parametrami skrawania. Rozważmy przypadek, w którym ostrze pracuje przez czas Δt_1 z pierwszym zestawem parametrów skrawania, a następnie przez czas Δt_2 z drugim (rys. 2.6).



rys. 2.6. Zużycie ostrza przy zmiennych parametrach skrawania.

W czasie pierwszego odcinka czasu jego zużycie przebiegać będzie zgodnie z (2.2) według zależności:

$$w = w_0 + C_{w1} t^u \quad (2.17)$$

oznaczonej na rys. 2.6 jako ①, by na końcu tego czasu osiągnąć wartość:

$$w_1 = w_0 + C_{w1} \Delta t_1^u \quad (2.18)$$

Gdyby narzędzie od początku pracowało z drugim zestawem parametrów, jego zużycie przebiegałoby według zależności:

$$w = w_0 + C_{w2} t^u \quad (2.19)$$

oznaczonej jako ②, a zużycie równe w_1 osiągnięte zostałyby po czasie t' :

$$w_1 = w_0 + C_{w2} t'^u \quad (2.20)$$

który można wyznaczyć porównując ze sobą zależności (2.18) i (2.20):

$$t' = \left(\frac{C_{w1}}{C_{w2}} \right)^{1/u} \Delta t_1 \quad (2.21)$$

Zużycie po dalszym skrawaniu przez czas Δt_2 wyniesie zatem:

$$w_2 = w_0 + C_{w2} (t' + \Delta t_2)^u \quad (2.22)$$

Przesuwając poziomo krzywą ② tak aby jej punkt (t', w_1) pokrył się z punktem $(\Delta t_1, w_1)$ na krzywej ①, otrzymamy dalszy przebieg zużycia ostrza przy skrawaniu z drugim zestawem parametrów skrawania. Podstawiając (2.21) do (2.22) otrzymuje się wartość zużycia po skrawaniu z dwoma zestawami parametrów skrawania:

$$w_2 = w_0 + C_{w2} \left[\left(\frac{C_{w1}}{C_{w2}} \right)^{1/u} \Delta t_1 + \Delta t_2 \right]^u = w_0 + \left(C_{w1}^{1/u} \Delta t_1 + C_{w2}^{1/u} \Delta t_2 \right)^u \quad (2.23)$$

Wystarczy zauważyć, że zależność (2.18) można zapisać w postaci:

$$w_1 = w_0 + \left(C_{w1}^{1/u} \cdot \Delta t_1 \right)^u$$

by porównując ją z (2.23) dojść do wniosku, że ogólny wzór opisujący wartość zużycia ostrza po skrawaniu z m zestawami parametrów skrawania ma postać:

$$w = w_0 + \left[\sum_{i=1}^m \left(C_{wi}^{1/u} \cdot \Delta t_i \right) \right]^u \quad (2.24)$$

Wygodnie będzie do tego wzoru podstawić C_W z (2.15). Otrzymuje się wtedy:

$$w = w_0 + \left\{ \sum_{i=1}^m \left[\left(\frac{w_k - w_0}{T_i^u} \right)^{1/u} \Delta t_i \right] \right\}^u = w_0 + (w_k - w_0) \left(\sum_{i=1}^m \frac{\Delta t_i}{T_i} \right)^u \quad (2.25)$$

a pamiętając o wprowadzonej poprzednio wykorzystanej części okresu trwałości (2.14), którą tu oznaczmy jako ΔT_i otrzymuje się:

$$w = w_0 + (w_k - w_0) \left(\sum_{i=1}^m \Delta T_i \right)^u \quad (2.26)$$

Często stosowane parametry skrawania powtarzają się cyklicznie, np. przy wykonywaniu powtarzalnych operacji. Możemy wtedy wprowadzić pojęcie części okresu trwałości ostrza wykorzystanej w czasie jednej operacji ΔT_0 :

$$\Delta T_O = \sum_{j=1}^{m_O} \Delta T_j \quad (2.27)$$

gdzie m_O - liczba zestawów parametrów skrawania w ramach jednej operacji

Zachodzi oczywiście:

$$\sum_{i=1}^m \Delta T_i = n_O \sum_{j=1}^{m_O} \Delta T_j \quad m_O \cdot n_O = m$$

gdzie n_O - liczba operacji

Zależność opisująca wartość zużycia po wykonaniu n_O operacji przyjmie zatem postać:

$$w = w_0 + (w_k - w_0)(n_O \Delta T_O)^u \quad (2.28)$$

Interesujące będzie wyznaczenie liczby operacji n_T , możliwych do wykonania do stępienia ostrza.

Zauważmy, że po podstawieniu w zależności (2.28) w_k w miejsce w otrzymuje się ważne uproszczenie:

$$\frac{w_k - w_0}{w_k - w_0} = 1 = (n_T \cdot \Delta T_O)^u \quad (2.29)$$

co należy odczytać jako: „suma wykorzystanych części okresu trwałości ostrza do chwili jego stępienia równa jest jedności”. Wynika stąd bezpośrednio:

$$n_T = \left(\frac{1}{\Delta T_O} \right) = \left(\sum_{j=1}^{m_O} \frac{t_j}{T_j} \right)^{-1} \quad (2.30)$$

Oznacza to, że do obliczenia liczby operacji możliwych do wykonania danym ostrzem nie jest potrzebna znajomość równania opisującego przebieg zużycia ostrza (wartości C_w , w_0 i u). Wystarczą okresy trwałości ostrza odpowiadające poszczególnym zestawom parametrów skrawania czyli rozszerzona zależność Taylora. Znajomość zależności $w(t)$ potrzebna jest jedynie do wyznaczania przebiegu zużycia ostrza lub do określania wykorzystanej części okresu trwałości ostrza.

Na zakończenie należy mocno podkreślić, że przedstawione wyżej wywody oparte są na założeniu o addytywności i przemienności zużycia ostrza. W rzeczywistości po zmianie parametrów skrawania ostrze zużywa się nieco inaczej, w innych miejscach niż przed tą zmianą, a to oznacza, że przeskakiwanie z jednej krzywej zużycia na drugą nie jest zupełnie ścisłe. Rozbieżności między rzeczywistym przebiegiem zużycia ostrza, a obliczonym wg wzoru 2.36 zależą od rozpiętości parametrów skrawania. Ogólnie można jednak powiedzieć, że rzeczywiste zużycie jest mniejsze niż obliczone, dając dodatkowy margines bezpieczeństwa [109, 113, 114].

3. WIELKOŚCI FIZYCZNE WYKORZYSTYWANE W DNiPS

Jak stwierdzono w rozdziale 2.1 i 2.2, zużycie i trwałość ostrza określane są na podstawie wskaźników zużycia, które mogą być bezpośrednie (geometryczne miary zużycia) lub pośrednie (zmiany wielkości fizycznych spowodowanych zużyciem). Podobnie podzielić można metody oceny stanu narzędzia stosowane w DNiPS – na bezpośrednie i pośrednie. Spośród tych pierwszych część to metody laboratoryjne, opisywane we wczesnych pracach poświęconych DNiPS. Współcześnie nie są już stosowane, zostaną więc jedynie przypomniane ze względów porządkowych. Dokładniejszy ich opis można znaleźć w starszych przeglądach literatury dotyczącej DNiPS, np. [79, 172, 220]. Dość powszechnie są obecnie stosowane różne układy do zautomatyzowanego ustawiania i korekcyjnego położenia narzędzia lub wręcz jego obecności, a także do oceny dokładności przedmiotów obrabianych. Do pewnego stopnia mogą być one także wykorzystane do oceny stanu narzędzia. Spośród pośrednich metod oceny zużycia ostrza na szczególną uwagę zasługują oparte na pomiarach sił skrawania i wielkości pochodnych oraz emisji akustycznej – te stosowane są najczęściej w praktyce przemysłowej, a także poświęca się im najwięcej uwagi w prowadzonych aktualnie pracach badawczych. Znajdą one poczesne miejsce również w niniejszym opracowaniu. Pewne znaczenie ma wykorzystanie drgań – zwłaszcza do diagnostyki stanu wiertel i oczywiście do wykrywania nadmiernych drgań. Inne wielkości pojawiają się w literaturze sporadycznie i zostaną jedynie wspomniane.

3. 1. Bezpośrednie wskaźniki zużycia

Radioaktywność

Czujniki promieniowania znalazły zastosowanie do oceny ubytku masy ostrza. Możliwe są dwa rozwiązania [172]. W pierwszym ostrze jest aktywowane neutronami lub naładowanymi cząsteczkami. W czasie skrawania wióry unoszą materiał ostrza. Pomiar ich radioaktywności wskazuje wielkość ubytku tego materiału. Metoda jest kłopotliwa i stwarza szereg problemów BHP. Druga metoda (mikroizotopowa) polega na pokryciu radioaktywnymi cząsteczkami ostrza w strefie gdzie się ono zużywa. Mierzony jest spadek radioaktywności ostrza, wskazujący na jego zużycie. Odmianą tej metody jest nałożenie mikroskopijnej ilości substancji radioaktywnej w miejscu określającym dopuszczalną wartość zużycia powierzchni przyłożenia [164]. Zanik radioaktywności narzędzia oznacza tu jego stępienie. Promieniowanie pochodzące od narzędzia w drugiej metodzie nie stanowi zagrożenia - nie przewyższa promieniowania tła [133].

Opór elektryczny

Opór elektryczny jest zależny od właściwości przewodnika i pola jego przekroju. Zależność ta była wykorzystywana do oceny pola starcia powierzchni przyłożenia, będącego polem powierzchni styku narzędzia i przedmiotu obrabianego [164]. Opór tego styku zależy jednak nie tylko od zużycia ostrza lecz również od innych warunków skrawania (siły, temperatura), a przede wszystkim jest zakłócony przez powstawanie siły elektromotorycznej co utrudnia pomiary [133].

Stosowane także bywały oporniki nałożone na powierzchnię przyłożenia (tusz grafitowy lub napyłony na warstwę izolacyjną). Długość opornika zmniejsza się wraz ze wzrostem zużycia ostrza, a wraz z nią maleje opór będący miarą zużycia ostrza [172]. Konieczność specjalnego przygotowania narzędzia sprawia, iż metoda ta miała znaczenie wyłącznie laboratoryjne.

Temperatura skrawania i siła termoelektryczna

Zużycie ostrza powodując wzrost sił i mocy skrawania oraz tarcia narzędzia o przedmiot obrabiany pociąga za sobą wzrost temperatury skrawania. Termopara obca z reguły umieszczana jest pomiędzy płytką wymienną, a oprawką [127]. Ze względu na czas przechodzenia ciepła przez płytkę metoda ta użyteczna przy laboratoryjnych badaniach temperatury skrawania jest nieprzydatna w warunkach produkcyjnych.

Styk narzędzia z przedmiotem obrabianym tworzy termoparę naturalną. Pomiar siły elektromotorycznej wytworzonej przez tę termoparę jest najwygodniejszym sposobem określania temperatury skrawania i był przez wielu badaczy wykorzystywany przy podejmowaniu prób diagnozowania stanu narzędzia [164]. Metoda ma dwie główne wady: wpływ dodatkowych termopar utworzonych pomiędzy innymi elementami oraz trudne wzorcowanie. Przegląd innych laboratoryjnych metod pomiaru temperatury skrawania w celu nadzorowania stanu narzędzia można znaleźć w [40].

Wymiary przedmiotu obrabianego, odkształcenia i przemieszczenia

W wyniku zużycia narzędzia ulega zmianie głębokość skrawania, a co za tym idzie wymiar przedmiotu obrabianego lub odległość imaka narzędziowego od powierzchni obrobionej [40, 152, 183]. Stąd pomiary takie wykonywane ze względu na nadzór dokładności obróbki mogą być wykorzystane do oceny zużycia ostrza. Stosowane są metody dotykowe i bezdotykowe (elektryczne, ultradźwiękowe, pneumatyczne, laserowe i in.). Stosowane również bywa określanie położenia powierzchni obrobionej w stosunku do imaka tokarskiego (narzędzia). Podstawową wadą tych metod z punktu widzenia oceny zużycia ostrza jest fakt, że zmiana wymiaru przedmiotu obrabianego lub jego odległości od narzędzia pochodzić może nie tylko od tego zużycia, lecz również od rozszerzania termicznego narzędzia, odkształceń narzędzia pod wpływem sił skrawania czy niedokładności obróbki. Mięknienie i odkształcenia plastyczne ostrza powodować mogą wręcz zmniejszenie średnicy toczonego przedmiotu, co przez układy takie interpretowane będzie jako zużycie ujemne [20]. Wady te są istotne przy obróbce zgrubnej. Ponieważ nie są to dosłownie pomiary on-line, metody te nie nadają się do wykrywania KSO.

Zmieniające się pod wpływem zużycia ostrza siły skrawania powodują odkształcenia, czy zmiany wzajemnych położenia elementów obrabiarki. Również drgania samowzbudne powodują względne przemieszczenia narzędzia i przedmiotu obrabianego. Pomiar tych przemieszczeń może być utrudniony ze względu na ruch obrotowy przedmiotu lub narzędzia [117, 215]. Współcześnie oferowane czujniki pozwalają zmierzyć niewielkie odkształcenia elementów obrabiarki i wykorzystać je do wykrywania przynajmniej znaczących zmian sił spowodowanych katastroficznym stopniem ostrza [25, 52, 180].

Obraz narzędzia

Metody optyczne oparte są na analizie obrazu powierzchni ostrza, która ulega zużyciu. Stosowane bywają kamery telewizyjne przesyłające obraz na ekran lub do komputerowego analizatora obrazu, dzięki czemu możliwa jest ocena jego zużycia i rozpoznanie wykruszenia (wyłamania ostrza) [54, 164, 172]. Wspominane układy mają na razie charakter laboratoryjny. Przemysłowe zastosowanie znalazły natomiast mniej złożone urządzenia oparte na ocenie długości narzędzi trzpieniowych jak wiertła czy gwintowniki, przy pomocy fotokomórek lub kamer (patrz punkt 4.3) w czasie przerw w obróbce. Można w ten sposób wykryć złamanie narzędzia i nie dopuścić go do dalszej pracy.

Położenie krawędzi skrawającej

Współcześnie szeroko (znacznie szerzej niż układy diagnostyki stanu narzędzia) są rozpowszechnione laserowe lub dotykowe układy pomiarowe, służące do dokładnego określania położenia krawędzi skrawającej w układzie współrzędnych obrabiarki, w celu utrzymania dokładności wymiarowej obróbki. Przy okazji mogą one z powodzeniem wykrywać wyłamania tej krawędzi (lub całego narzędzia), a niektórzy ich producenci utrzymują, iż da się przy ich pomocy ocenić zużycie ostrza (freza). Trzeba jednakże zauważyć, że położenie krawędzi skrawającej w większym znacznie stopniu niż od zużycia ostrza zależy od innych zakłóceń, jak odkształcenia cieplne obrabiarki [213].

Istnieje szereg dostępnych handlowo czujników indukcyjnych, których sposób działania podobny jest do opisanego wyżej w czujnikach dotykowych, z tym że pomiar dokonywany jest tu bezdotykowo. Inaczej działa układ oferowany przez firmę Euchner wykrywający złamanie wiertła [70]. Nad tulejkami prowadzącymi w uchwycie wiertarskim umieszczone są pierścienie z cewkami, dla których wiertło jest rdzeniem. Przy rozpoczynaniu wiercenia układ stwierdza czy wiertło nie jest za krótkie (złamane podczas poprzedniego zabiegu), zaś po zakończeniu wiercenia sprawdza czy wiertło nie pozostało w otworze.

Chropowatości powierzchni obrobionej

Zużywaniu się narzędzia po jego naturalnym dotarciu towarzyszy wzrost chropowatości powierzchni obrobionej. Zjawisko to bywa wykorzystywane do kontroli zużycia ostrza w czasie obróbki [164]. Najczęściej stosowane są metody optyczne (lub laserowe). Pomiar chropowatości powierzchni może być celowy przy obróbce dokładnej, gdy chropowatość ta jest technologicznym wskaźnikiem zużycia. W innych przypadkach uzyskanie zadowalającej korelacji pomiędzy chropowatością a zużyciem ostrza w różnych warunkach obróbki jest na tyle kłopotliwe, że metoda jest nieprzydatna w warunkach przemysłowych.

Drgania samowzbudne odwzorowują się w charakterystyczny sposób na powierzchni skrawania i powierzchni obrobionej przedmiotu. Na podstawie ich śladów można określić częstotliwość i amplitudę drgań samowzbudnych [68,143] oraz otrzymać szereg informacji diagnostycznych na temat stanu obrabiarki i narzędzia [194]. Wykrywanie drgań samowzbudnych na podstawie oceny stanu powierzchni przedmiotu wydaje się być atrakcyjne ze względu na bezpośredni związek stanu powierzchni z drganiami

samowzbudnymi oraz możliwość uzależnienia dopuszczalnego granicznego poziomu tych drgań z dopuszczalną chropowatością powierzchni przedmiotu.

3. 2. Siły skrawania i wielkości pochodne

Zużycie narzędzia skrawającego polega na ubytkach materiału ostrza, a co zatem idzie - na zmianach jego geometrii. Zmiany te pociągają za sobą zmiany sił skrawania działających na ostrze, a obserwacja (pomiar) sił jest najczęściej wykorzystywana w diagnostyce stanu narzędzia [44, 79, 145, 164, 168, 217 i in.]. Z tego punktu widzenia należy wyróżnić wyraźnie dwa odrębne zagadnienia. Pierwsze to naturalne stępienie ostrza polegające na stosunkowo powolnym i równomiernym w czasie zużywaniu się ostrza aż do osiągnięcia wartości dopuszczalnej wskaźnika stępienia. Odrębnym problemem jest katastroficzne stępienie ostrza (KSO) polegające na nagłym wykruszeniu lub wyłamaniu ostrza (patrz punkt 2.1). Oba te zjawiska różnią się znacznie pod względem skali czasu, różne też są wymagania dotyczące czujników sił skrawania i strategii układów nadzorujących, stąd będą omawiane oddzielnie.

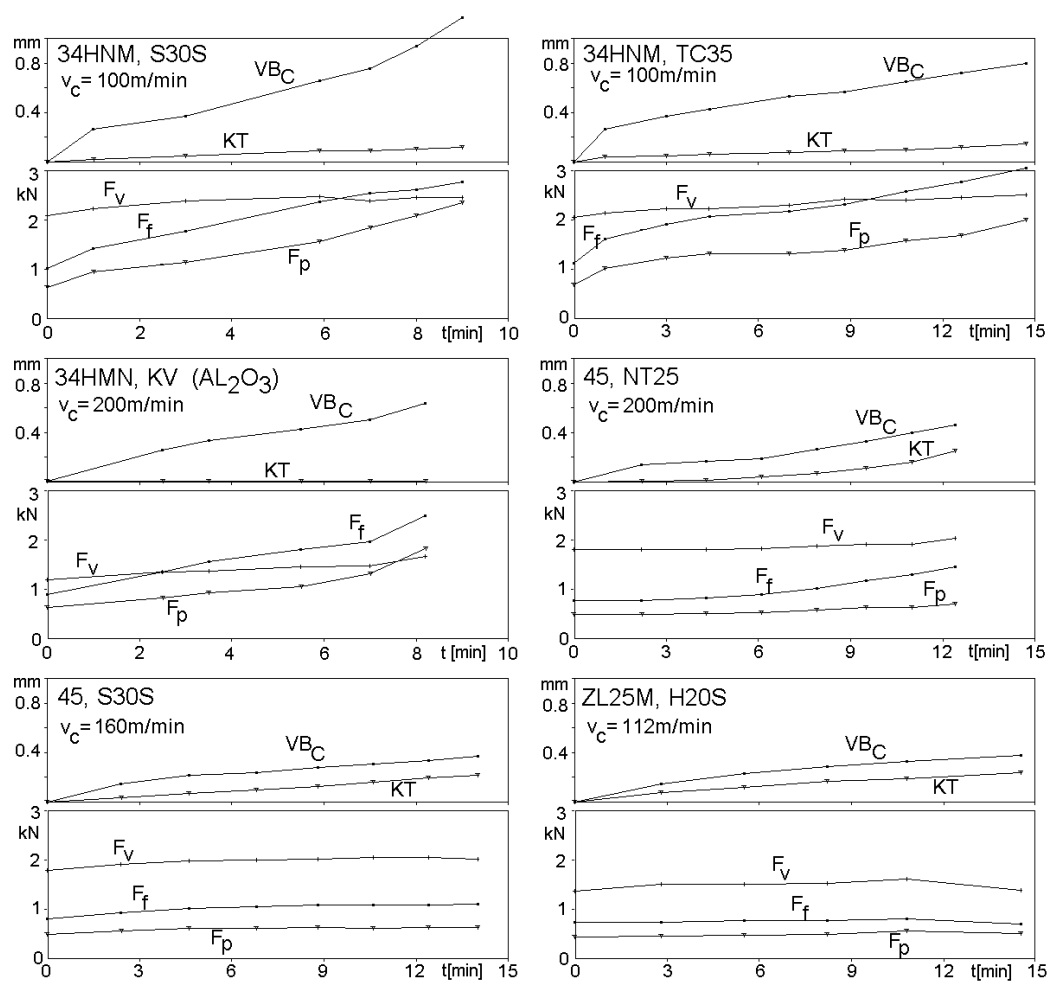
3. 2. 1. Przebieg sił skrawania w trakcie naturalnego stępienia ostrza

Na rys. 3.1 przedstawiono kilka przykładowych przebiegów zużycia ostrza (pomiaru wykonywano w czasie przerw w obróbce) i sił skrawania przy różnych materiałach obrabianych i materiałach ostrza [125].

Po trwającym nie dłużej niż jedną minutę naturalnym docieraniu ostrza, w trakcie którego intensywność zużycia powierzchni przyłożenia jest stosunkowo duża (na rysunku VB_C , lecz dotyczy to także zużycia pod prostoliniową częścią krawędzi skrawającej – VB_B patrz rys. 2.6), następuje okres równomiernego, powolnego wzrostu zużycia ostrza. Towarzyszy mu mniej lub bardziej równomierny wzrost sił skrawania. W niektórych próbach proces ten trwa aż do osiągnięcia przez zużycie ostrza nawet bardzo znacznych wartości, bez istotnych zmian intensywności zużycia czy sił skrawania. Takie stępienie ostrza można nazwać naturalnym. Jeżeli wartość graniczna wskaźnika stępienia ostrza (dopuszczalna wartość zużycia) ustalona jest odpowiednio nisko, a warunki skrawania nie są szczególnie trudne, większość ostrzy osiąga stępienie w ten właśnie sposób. Charakterystyczny jest znacznie większy wpływ zużycia ostrza na siły F_f (posuwową) i F_p (odporową) niż na F_c (obwodową) potwierdzany w wielu doniesieniach literaturowych, np. [6, 11, 31, 90, 93, 199, 217].

Na podstawie doświadczeń prowadzonych między innymi w laboratoriach WZL TH Aachen [148], Queen's University of Belfast [165], Instytucie Technologii Mechanicznej PW [81,125] oraz opisanych w innych pracach z tego zakresu (np. [30, 66, 79]), można wyróżnić kilka charakterystycznych sposobów poszukiwania pośrednich wskaźników zużycia ostrza, opartych na pomiarach sił skrawania. Najprostszym sposobem jest bezpośrednie korelowanie sił skrawania ze zużyciem ostrza. Jak wspomniano, szczególnie czuła na przyrost zużycia jest siła posuwowa F_f . Mimo wyraźnej korelacji tej siły ze zużyciem nietrudno zauważyć, że posługiwanie się bezpośrednio siłami lub ich przyrostami bezwzględny jest niewygodne,

ponieważ wielkości takie w bardzo dużym stopniu zależą od wszystkich warunków skrawania, wpływających na wartość sił. Wyrażone są one w jednostkach sił lub sygnałów reprezentujących siły (np. wolty). Sprawia to, iż zmiana jakichkolwiek warunków skrawania powoduje konieczność ponownego wyznaczania krytycznych wartości sił, przy których ostrze uznawane jest za stępione. Na rys. 3.2 przedstawiono przebiegi zużycia powierzchni przyłożenia w rejonie naroża (a) i siły posuwowej (b) w funkcji czasu uzyskane w dziewiętnastu próbach, w których stosowano zbliżone pod względem skrawności materiały obrabiane (40HNMG i 45) lecz różne parametry skrawania. Widoczne na rys. 3.2c zależności siły F_f od zużycia ostrza wyraźnie wskazują na niedogodność bezpośrednich wartości siły. Znaczne uogólnienie tych wartości osiągnąć można stosując względne przyrosty sił skrawania (rys. 3.2d):



rys. 3.1. Przebiegi zużycia ostrza i sił skrawania dla różnych materiałów obrabianych i materiałów ostrza .
Narzędzie: CSRNR 2525-12, SNUN; $a_p = 2.5$ mm, $f = 0.33$ mm/obr [125].

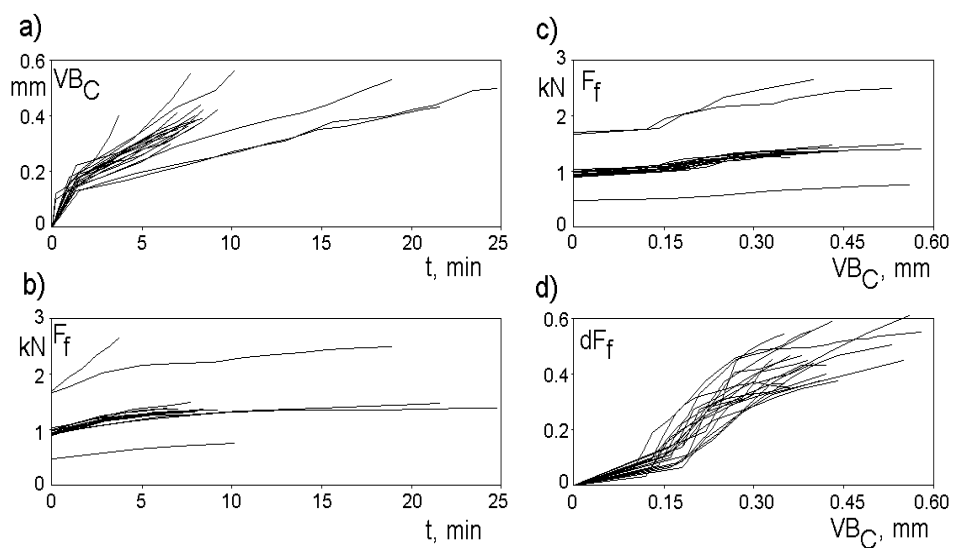
$$dF_f = \frac{F_f - F_{fo}}{F_{fo}} \quad (3.1)$$

gdzie F_{fo} - siła posuwowa na początku pracy ostrza.

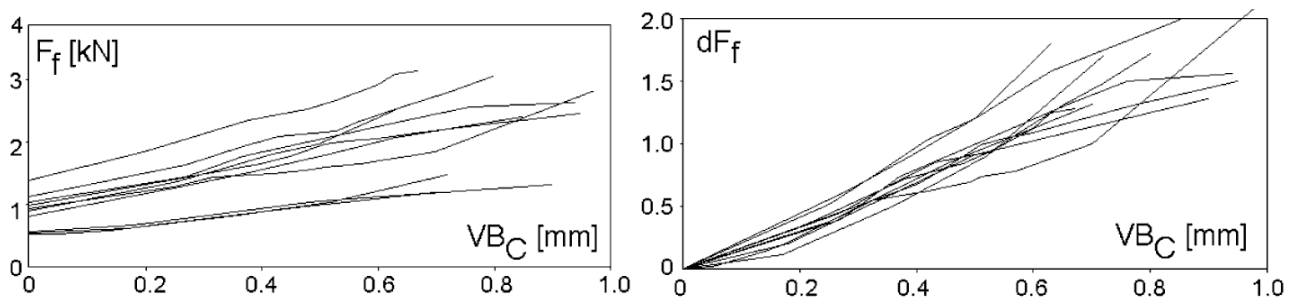
Mimo bardzo rozbieżnych wartości siły F_f , przebiegi dF_f są dość zgodne i powtarzalne. Obserwacja ta jest bardzo istotna, oznacza bowiem że przebieg dF_f w funkcji zużycia ostrza jest niezależny od

ustalonych (ale różnych) parametrów skrawania, a więc nie wymaga określania nowych wartości krytycznych dF_f po ich zmianie. Analogiczny wskaźnik zużycia ostrza można zbudować w oparciu o siłę odporową (dF_p).

Warto podkreślić, że wartości tych miar sił skrawania odpowiadające stopniowi ostrza zależą od zestawu materiał obrabiany - materiał ostrza. Wg [6, 140] mogą one przyjmować wartości z zakresu 0.3÷2.7. Powstawanie żłobka na powierzchni natarcia często powoduje obniżanie się wartości sił skrawania ze względu na zwiększenie kąta natarcia. Z drugiej strony, starcie na powierzchni przyłożenia zwykle pociąga za sobą wzrost sił. Stąd w niektórych przypadkach oba te wpływy niwelują się wzajemnie i przyrost sił skrawania spowodowany zużyciem ostrza jest nieznaczny. Wyższe przyrosty uzyskiwane są, gdy dominującą postacią zużycia ostrza jest starcie na powierzchni przyłożenia.



rys. 3.2. Przebiegi zużycia ostrza (a) i siły posuwowej (b) w funkcji czasu, oraz zależność F_f (c) i dF_f (d) od zużycia ostrza przy obróbce z różnymi parametrami skrawania.



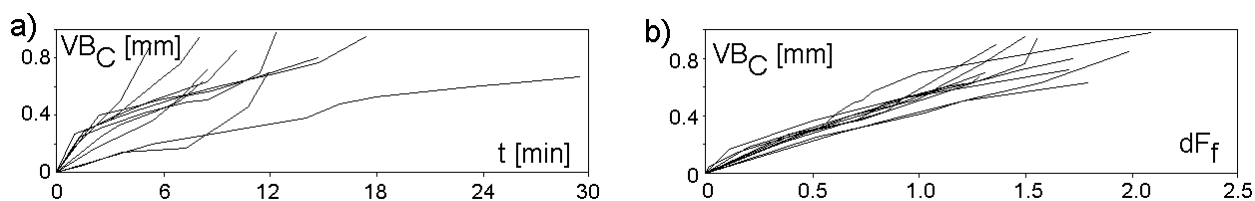
rys. 3.3. Zależność F_f (a) i dF_f (b) od zużycia ostrza przy obróbce w różnych warunkach skrawania, w których dominuje zużycie powierzchni przyłożenia.

Na rys. 3.3a zestawiono porównanie zależności F_f i dF_f od VB_C uzyskane w próbach prowadzonych przy dwu materiałach obrabianych (34HNM i ZL25M), dwu geometriach ostrza (płytki SNUN i TNMG) oraz czterech materiałach ostrza (TC35, KV, S30S i NT25). W próbach tych tworzenie się żłobka na

powierzchni natarcia było stosunkowo niewielkie. Jak widać, w tym przypadku wskaźnik dF_f osiąga znacznie wyższe wartości, a jego przebiegi w funkcji zużycia ostrza są dobrze skupione. Oznacza to, że jedna zależność $dF_f(VB_C)$ może być określona nie tylko dla różnych parametrów skrawania, ale także dla pewnego zakresu materiałów obrabianych oraz materiałów i geometrii ostrza. Ułatwia to znacznie jej zastosowanie w diagnostyce stanu narzędzia.

Korzyści z zastosowania tego wskaźnika w porównaniu ze zliczaniem czasu pracy ostrza ilustruje rys. 3.4, na którym przedstawiono wyniki tych samych prób co na rys. 3.3. Jak widać rozproszenie zużycia przebiegów zużycia ostrza jest znacznie mniejsze w funkcji względnego przyrostu siły posuwowej niż w funkcji czasu.

Dotychczas opisywano wyniki badań, w których poszczególne ostrza pracowały ze stałymi parametrami skrawania. W praktyce produkcyjnej zdarza się jednak często, że to samo ostrze wykonuje przemiennie zabiegi z różnymi parametrami skrawania. Należy zatem znaleźć taką miarę sił skrawania, która jest dobrze skorelowana ze zużyciem ostrza, a jednocześnie niewrażliwa (lub mało wrażliwa) na zmiany tych parametrów. Zmiany prędkości skrawania i posuwu są z natury rzeczy znane. Trudniejszy problem stanowią zmiany głębokości, które mogą być przypadkowe, wynikające ze zmienności nadatku półwyrobu.

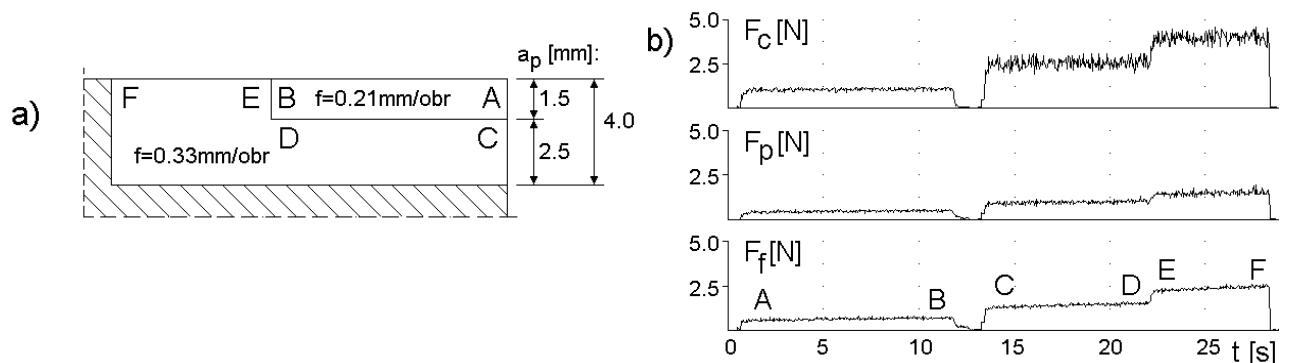


rys. 3.4. Porównanie przebiegów zużycia ostrza w funkcji czasu skrawania (a) i dF_f (b).

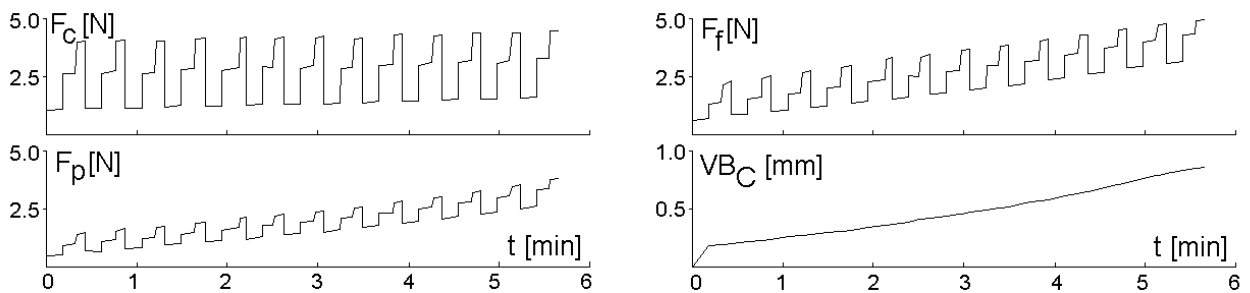
Niżej przedstawione zostały wyniki badań [125], w których warunki skrawania odpowiadały wykonywaniu dwu zabiegów (rys. 3.5). W pierwszym z nich posuw wynosił 0.21 mm/obr, a głębokość skrawania 1.5 mm. Drugi zabieg rozpoczynano w tym samym miejscu co pierwszy, z posuwem 0.33 mm/obr i głębokością 2.5 mm. Po przejściu narzędzia wzdłuż osi przedmiotu odcinka obrobionego w pierwszym zabiegu, napotykało ono zwiększoną do 4 mm. Drugi zabieg przebiegał zatem ze stałym posuwem i prędkością obrotową (w przybliżeniu ze stałą prędkością skrawania) oraz ze zmieniającą się w jego trakcie głębokością skrawania. Przypadek taki jest ważny z punktu widzenia nadzoru zużycia ostrza, a zwłaszcza katastroficznego stępienia ostrza, można bowiem przyjąć, że zmiana głębokości wystąpiła w sposób niekontrolowany.

Z całego przebiegu sił skrawania dla pojedynczego operacji dwuzabiegowej wybierano sześć punktów - na początku i na końcu każdego z trzech odcinków skrawania odpowiadających poszczególnym zestawom parametrów skrawania (litery A÷F na rys. 3.5). Na rys. 3.6 przedstawiono dla przykładu uzyskane w ten sposób wyniki próby oznaczonej numerem 250 (toczenie stali 34HNM nożem hR 110.16 z płytką

SNUN TN35, prędkości skrawania 125 i 100 m/min, czasy skrawania - pierwsze przejście 12 s, drugie 16 s) wraz z uzyskanymi w czasie przerw w skrawaniu wynikami pomiarów zużycia ostrza.



rys. 3.5. Posuwy (f) i głębokości skrawania (a_p) stosowane w próbach prowadzonych ze zmiennymi parametrami skrawania oraz przykładowy przebieg sił skrawania.



rys. 3.6. Przebiegi sił skrawania i zużycia ostrza w próbie D10.

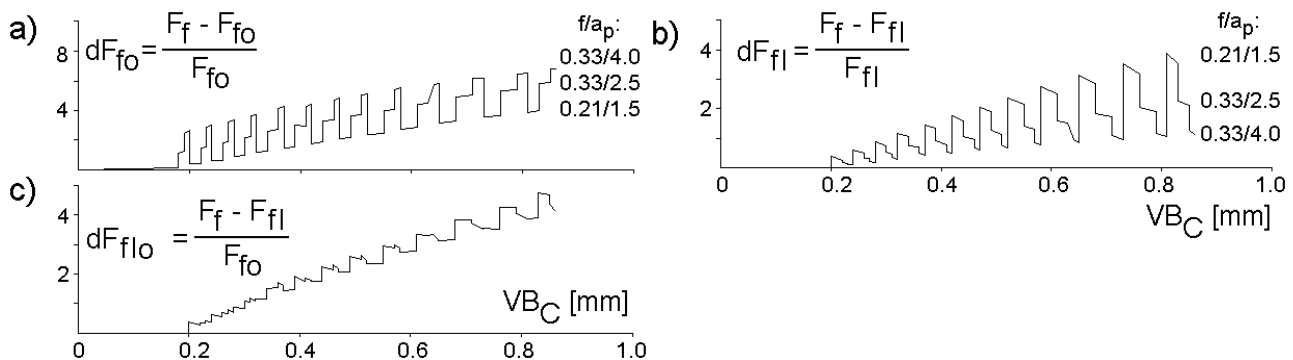
Założmy na początek, że parametry te są znane, co odpowiada obróbce przedmiotów wstępnie obrobionych. Z wielu analizowanych miar sił skrawania, które próbowaliśmy wykorzystać jako wskaźniki zużycia ostrza, tu zostaną przedstawione jedynie najbardziej charakterystyczne, ilustrujące sposób rozumowania, otrzymane dla próby D10.

Jak stwierdzono poprzednio, korzystną miarą sił skrawania, dobrze skorelowaną ze stanem narzędzia, był względny przyrost siły posuwowej (dF_f). Przed próbą jej zastosowania do nadzoru zużycia ostrza przy obróbce ze zmiennymi parametrami skrawania, należy ustalić, którą wartość siły F_f uznaje się za wartość początkową (F_{f_0} w zależności 3.1). Przyjmując, że jest to pierwsza zmierzona wartość siły posuwowej otrzymujemy wskaźnik dF_{f_0} :

$$dF_{f_0} = \frac{F_f - F_{f_0}}{F_{f_0}} \quad (3.2)$$

gdzie F_{f_0} - pierwsza zmierzona wartość siły posuwowej (tu w punkcie A w czasie obróbki pierwszego przedmiotu)

Jak można się było spodziewać, przebieg dF_{fo} w funkcji zużycia ostrza (rys. 3.7a) różni się od przebiegu siły jedynie bezwymiarową skalą, zachowując silną zależność od parametrów skrawania. Należy zatem inaczej zdefiniować wartość początkową.



rys.3.7. Zależności dF_{fo} , dF_{fl} i dF_{flo} od zużycia ostrza w próbie D10 uzyskane przy założeniu, że zmiany głębokości były znane.

Niezależność względnego przyrostu siły posuwowej dF_f od parametrów skrawania, gdy były one ustalone dla pojedynczego ostrza, (rys. 3.2) podsuwa odnośnienie bieżącego wyniku pomiaru siły do wartości uzyskanej w tym samym miejscu przedmiotu (przy tych samych parametrach skrawania) w czasie obróbki pierwszego przedmiotu. Otrzymana w ten sposób wskaźnik dF_{fl} ma postać:

$$dF_{fl} = \frac{F_f - F_{fl}}{F_{fl}} \quad (3.3)$$

gdzie: F_f - siła posuwowa w określonym punkcie przedmiotu (tu jest to jeden z punktów A÷F)

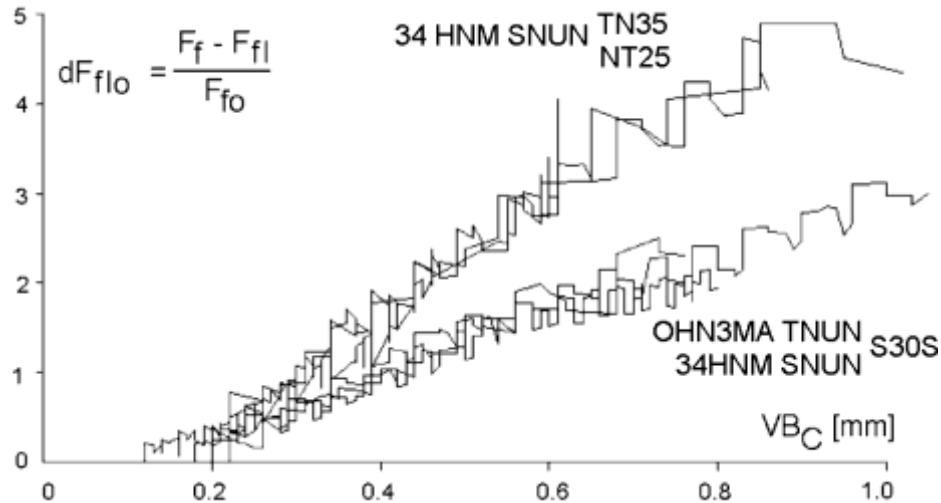
F_{fl} - siła F_f w tym samym punkcie w czasie obróbki pierwszego przedmiotu.

Na rys. 3.7b przedstawiono przebieg dF_{fl} w funkcji zużycia ostrza uzyskany w próbie D10. Jak widać jej zależność od parametrów skrawania jest bardzo silna. Wynika to z faktu, że przy obróbce z przemiennymi parametrami skrawania, przyrost sił wynikający ze zużycia ostrza nie jest proporcjonalny do siły początkowej dla tych parametrów (jak to było przy stałych dla ostrza parametrach skrawania - rys. 3.1a), lecz w przybliżeniu taki sam dla wszystkich stosowanych zestawów f/a_p (patrz rys. 3.6). A zatem w celu wyeliminowania wpływu zmienności parametrów należy od bieżącej wartości siły odejmować wartość, która wystąpiła w tym samym miejscu w czasie obróbki pierwszego przedmiotu. Bezwymiarowość dF_{fl} , zapewniającą jej pewną uniwersalność, uzyskać można przez dzielenie przez pierwszą zmierzoną wartość siły. Otrzymuje się w ten sposób dF_{flo} :

$$dF_{flo} = \frac{F_f - F_{fl}}{F_{fo}} \quad (3.4)$$

Na rys. 3.7c przedstawiono przebieg tego wskaźnika w funkcji zużycia ostrza uzyskany w próbie D10. Jak widać, jej zależność od parametrów skrawania jest niewielka, mniejsza niż spodziewany naturalny rozrzut wyników.

Na rys. 3.8 przedstawiono przebiegi $dF_{f_{lo}}$ uzyskane przy toczeniu stali OHN3MA i stali 34HNM narzędziami o dwu geometriach ostrza (płytki SNUN i TNUN) i różnych materiałach ostrza. Widoczne jest dobre skupienie przebiegów $dF_{f_{lo}}$, przy czym występuje wyraźne rozbieżenie na dwie grupy. Dla płytek pokrywanych (TN35 i NT25) nachylenie wykresów jest wyższe niż dla konwencjonalnych (S30S). Oznacza to jedynie tyle, że krytyczne wartości $dF_{f_{lo}}$ muszą być dobierane oddzielnie dla tych dwu grup materiałów ostrza.



rys. 3.8. Przebiegi $dF_{f_{lo}}$ w próbach prowadzonych w różnych warunkach skrawania.

Zajmijmy się obecnie zagadnieniem trudniejszym czyli obróbką półwyrobu o przypadkowo zmiennej głębokości. Przedstawione tu rozważania i wyniki badań traktować należy raczej jako wskazówkę czy propozycję wstępną niż gotowe rozwiązania. Przeprowadzone eksperymenty umożliwiają analizę takiego przypadku w dość skrajnej postaci - zmiana głębokości skrawania w drugim zabiegu z 2.5 do 4.0 mm jest blisko dwukrotna. Poszukując odpowiednich miar sił skrawania przyjęto, że nie będzie się wykorzystywać informacji o głębokości skrawania. Miary opisane w poprzednim punkcie nie spełniają tego warunku, ponieważ wykorzystywane w nich były wartości sił skrawania w czasie obróbki pierwszego przedmiotu z uwzględnieniem punktu pomiaru siły, a więc także głębokości skrawania.

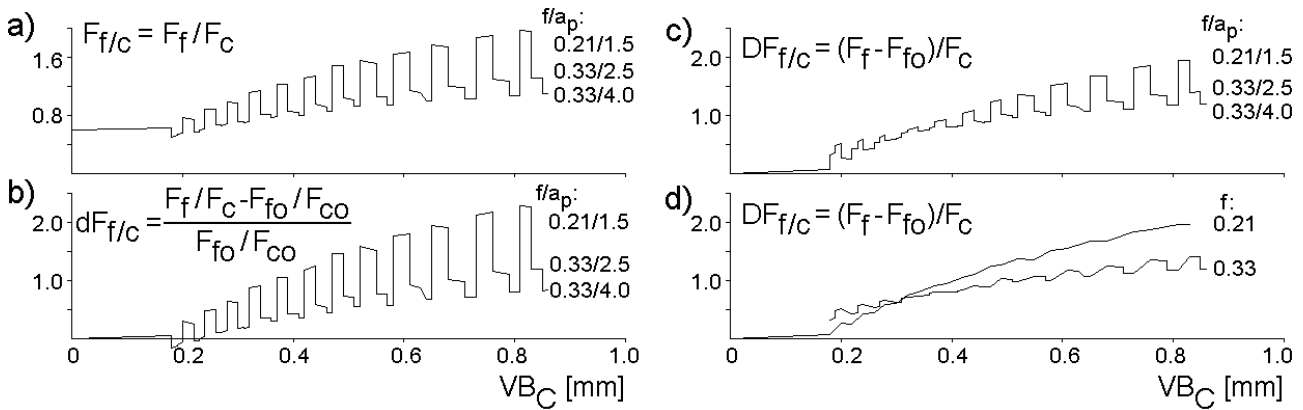
Ponieważ siła F_c w znacznie mniejszym stopniu niż pozostałe zależy od zużycia ostrza, w literaturze (np. [30, 158, 159, 165]) spotkać można sugestię, że dobre wyniki w rozpatrywanych warunkach można uzyskać dzięki stosunkowi siły posuwowej do głównej:

$$F_{f/c} = F_f / F_c \quad (3.5)$$

Na rys. 3.9a przedstawiono zależność $F_{f/c}$ od zużycia ostrza w próbie D10. Jak widać, dla $VB_C < 0.4$ mm stosunek ten mimo iż znacznie zależy od posuwu, prawie nie ulega zmianie wraz z głębokością skrawania. Przy większym zużyciu wzrost głębokości powoduje coraz większy spadek tego stosunku. Jest on jednakże mniejszy niż zmiany sił skrawania. Względny przyrost stosunku siły posuwowej do głównej:

$$dF_{f/c} = \frac{F_f/F_c - F_{fo}/F_{co}}{F_{fo}/F_{co}} \quad (3.6)$$

przebiega podobnie jak $F_{f/c}$, mając większą dynamikę i skalę względną (rys. 3.9b). Jeszcze korzystniejszy przebieg ma stosunek przyrostu siły posuwowej względem pierwszej zmierzonej wartości F_f (F_{fo}) do aktualnej siły głównej:

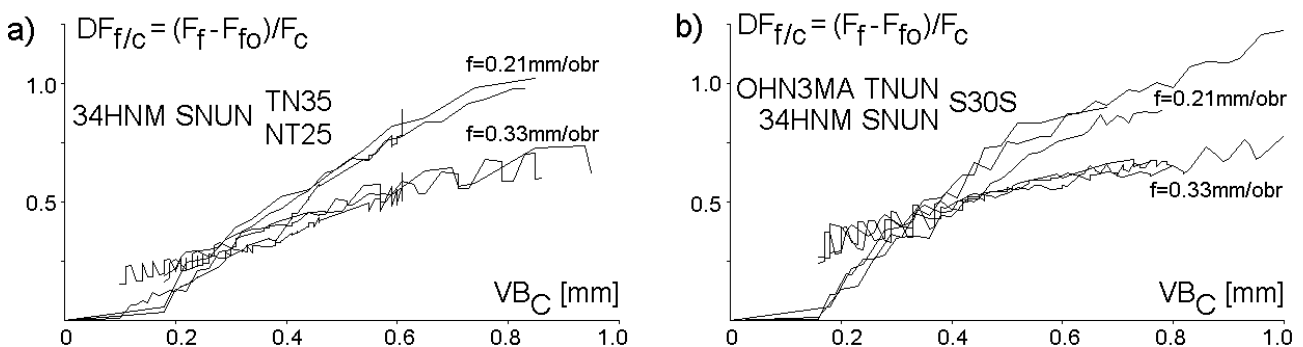


rys. 3.9. Zależności $F_{f/c}$, $dF_{f/c}$ i $DF_{f/c}$ od zużycia ostrza w próbie D10 uzyskane przy założeniu, że zmiany głębokości były nieznanne.

$$DF_{f/c} = \frac{F_f - F_{fo}}{F_c} \quad (3.7)$$

Wartość tej $DF_{f/c}$ (rys. 3.9c) reaguje wprawdzie na zmiany głębokości skrawania przy ostrym narzędziu (wzrost głębokości powoduje wzrost $DF_{f/c}$), jednakże reakcja ta maleje wraz ze zużyciem ostrza, ulegając odwróceniu dla $VB_C > 0.5$ mm. Dla VB_C ok. 0.8 (w końcu próby) zmiany $DF_{f/c}$ wywołane zmianami głębokości skrawania są znacznie mniejsze niż zmiany $dF_{f/c}$. Mimo iż $DF_{f/c}$ w wyraźnie mniejszym stopniu zależy od posuwu, zależność ta jest na tyle istotna, że nadzór należy prowadzić dla każdego posuwu oddzielnie, co przedstawiono na rys. 3.9d.

Na rys. 3.10 przedstawiono nałożone na siebie zależności $DF_{f/c}$ od VB_C uzyskane w próbach prowadzonych przy różnych materiałach obrabianych oraz materiałach i geometriach ostrza. Podobnie jak w przypadku dF_{fo} (rys. 3.8) przebiegi te mają dla płytek pokrywanych (rys. 3.10a) nachylenie większe niż dla płytek konwencjonalnych (rys. 3.10b).

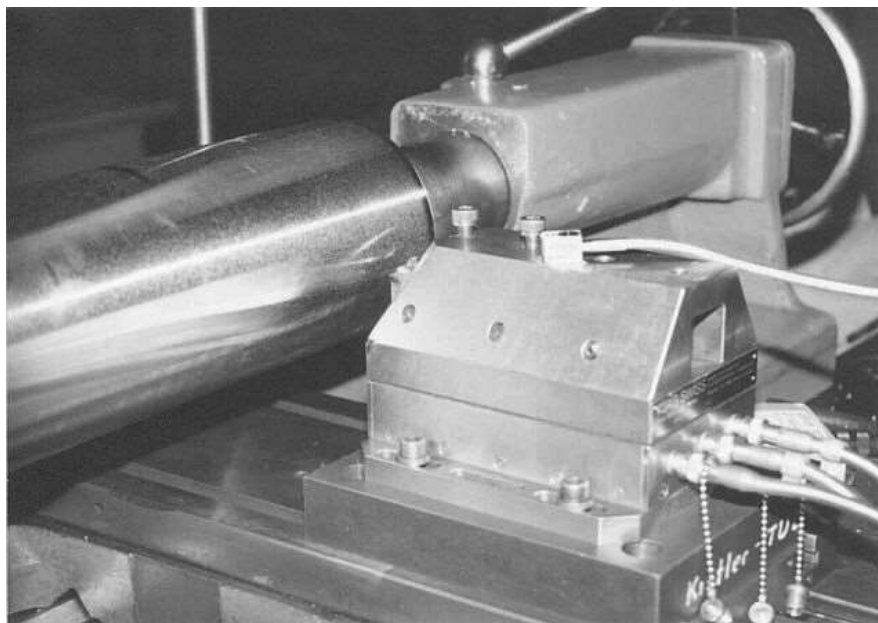


rys. 3.10. Przebiegi $DF_{f/c}$ w próbach prowadzonych w różnych warunkach skrawania.

Przedstawione wyniki potwierdzają przydatność $DF_{f/c}$ do nadzoru zużycia ostrza przy zmiennej przypadkowo głębokości skrawania. Warto podkreślić, że wskaźnik $DF_{f/c}$ nie stanowi konkurencji dla $dF_{f/c}$, który jest korzystniejszy dla warunków skrawania, w których zmiany głębokości są znane. Z porównania rysunków 3.7c i 3.9c (a także 3.8 i 3.10) wynika znacznie większy wpływ posuwu na $DF_{f/c}$ niż na $dF_{f/c}$. Ponadto warto zauważyć, że jeśli na okres trwałości ostrza przypada więcej niż ok. 10 przedmiotów obrabianych (operacji), nadzór zużycia ostrza można prowadzić w jednym miejscu przedmiotu, najkorzystniej dla najniższego posuwu.

Wszystkie omówione wyżej miary sił skrawania mogą być wykorzystane w diagnostyce stanu narzędzia, o ile siły te są zależne od zużycia ostrza. Tym niemniej, o ile w pewnych warunkach mogą one w wyniku stępienia ostrza wzrastać nawet o kilkaset procent, w innych warunkach wzrastają nieznacznie, czasem niewiele więcej niż rozproszenie wyników [81, 165]. Wybór miar, które dostarczają istotnych informacji o zużyciu ostrza i mogą być uznane za symptomy zużycia, nie jest zatem oczywisty. Temu właśnie zagadnieniu poświęcono niżej opisane eksperymenty [107,108, 126].

Badania sił skrawania przeprowadzono podczas toczenia wzdłużnego prętów ze stali 45 (180 HB) nożem oprawkowym CSRNR 2525-12 z płytką SNUN 120408 gatunku S30S lub NT35. Nóż był umieszczony w trójściłkowym siłomierzu tokarskim 9263 firmy Kistler (rys. 3.11).



rys. 3.11. Trójściłkowy laboratoryjny siłomierz tokarski 9263 firmy Kistler.

W celu zbadania zależności miar sił skrawania od stanu narzędzia, postanowiono przeprowadzić klasyczne próby trwałości ostrza. Wiadomo jednakże, iż miary te zależą nie tylko od zużycia ostrza lecz także od parametrów skrawania. Stąd też próby prowadzone z ustalonymi parametrami skrawania, oznaczonymi jako Z_0 , przerywano kilka razy w celu wykonania pomiarów zużycia ostrza oraz przeprowadzenia krótkich skrawań z zestawami parametrów, oznaczonymi jako Z_i (tablica 3.1). Pomiary

składowych sił skrawania prowadzono przez 0.5 s, a wyniki przekształcano na postać cyfrową z częstotliwością próbkowania 2000 Hz. Uzyskane 1000 próbek zapisywano w pliku w celu dalszej obróbki. Dla każdego zapisu określano następnie wartości średnie (F_c , F_f , F_p) i odchylenia standardowe (S_c , S_f , S_p).

Tablica 3.1. Parametry skrawania zastosowane w próbach S01÷S08.

Zestaw	S01 i S02		S03 i S04		S05 i S06		S07 i S08	
	S30S						NT35	
	f	v_c	f	v_c	f	v_c	f	v_c
Z ₀	0.33	200	0.33	200	0.33	220	0.33	240
Z ₁	0.33	180	0.33	180	0.20	220	0.30	200
Z ₂		200		200	0.24			240
Z ₃		240		240	0.33			280
Z ₄		240		280	0.37			315
Z ₅	0.24	200	0.24	280	0.42	180	0.37	315
Z ₆		180		240	0.42			280
Z ₇	----	----		200	0.37			240
Z ₈	----	----		180	0.20			200

Na rysunku 3.12 przedstawiono zależności między miarami sił skrawania a głębokością zębka na powierzchni natarcia dla prób S08 i S05, które są reprezentatywne odpowiednio dla ostrzy nie pokrywanych i pokrywanych. Wynika z nich, że dla każdego z materiałów ostrza inne miary sił wydają się być skorelowane ze zużyciem ostrza. Dla ostrzy pokrywanych (NT35) miarami tymi są zarówno wartości średnie sił posuwowej i odporowej jak i ich odchylenia standardowe. Siła główna zarówno dla płytek pokrywanych jak i niepokrywanych nie wykazuje istotnego powiązania ze zużyciem, co jest potwierdzeniem znanych wcześniej obserwacji, np. [165]. Zależność sił skrawania od zużycia ostrza dla płytek konwencjonalnych (S30S) jest wyraźnie odmienna. Wraz ze zużyciem wyraźnie rosną zmienne składowe siły posuwowej i odporowej. Pozostałe miary nie wydają się być skorelowane z KT . Zależność zmiennej składowej siły odporowej od zużycia jest wyraźnie silniejsza dla mniejszych posuwów. Duże posuwy wpływają stabilizująco na proces skrawania redukując wpływ zużycia ostrza na składową dynamiczną siłę.

Wartości średnie sił skrawania w decydującym stopniu zależą od przekroju warstwy skrawanej. Eliminację tego wpływu można uzyskać stosując względne przyrosty sił opisane wyżej (wzór 3.1)

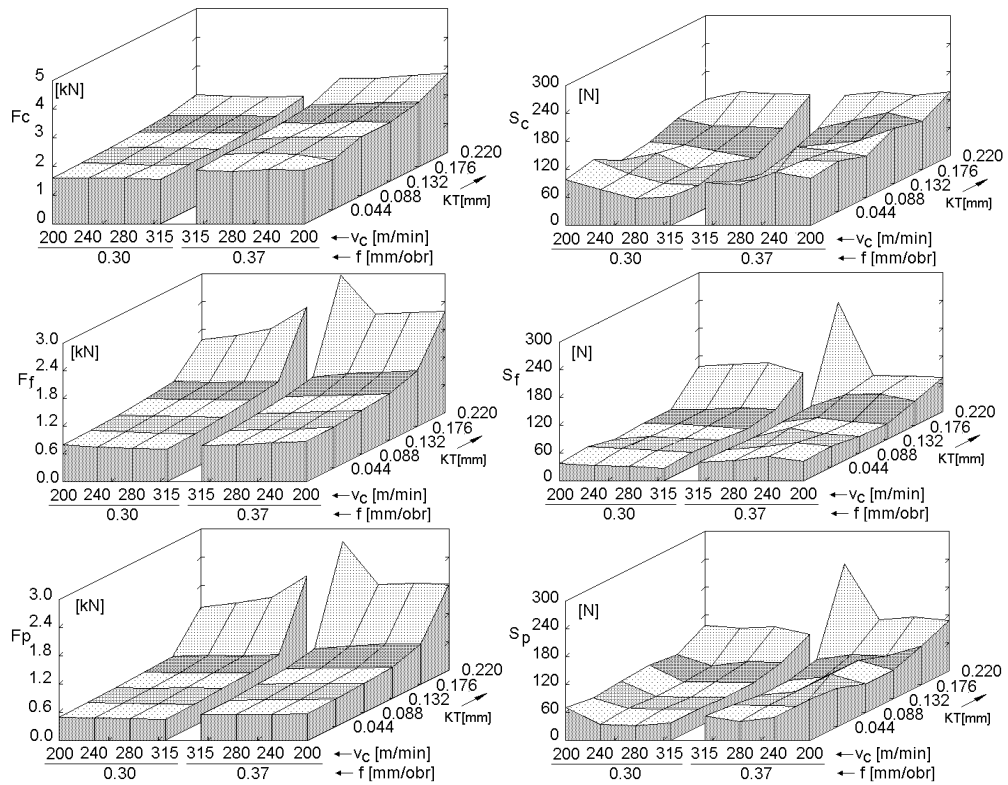
Miarę taką postanowiono wyznaczyć dla płytek pokrywanych (NT35). W przypadku S30S uznano to za niecelowe, jako że wartości średnie (statyczne) sił niezbyt zależą od stanu narzędzia. Jednakże jak już wspomniano, w tym przypadku bardzo wyrazista wydaje się być zależność składowej dynamicznej wyrażonej odchyleniem standardowym. Stąd też tu postanowiono zbadać współczynniki zmienności, będące względną miarą zmiennych składowych sił skrawania:

$$V = \frac{S}{F} \quad (3.8)$$

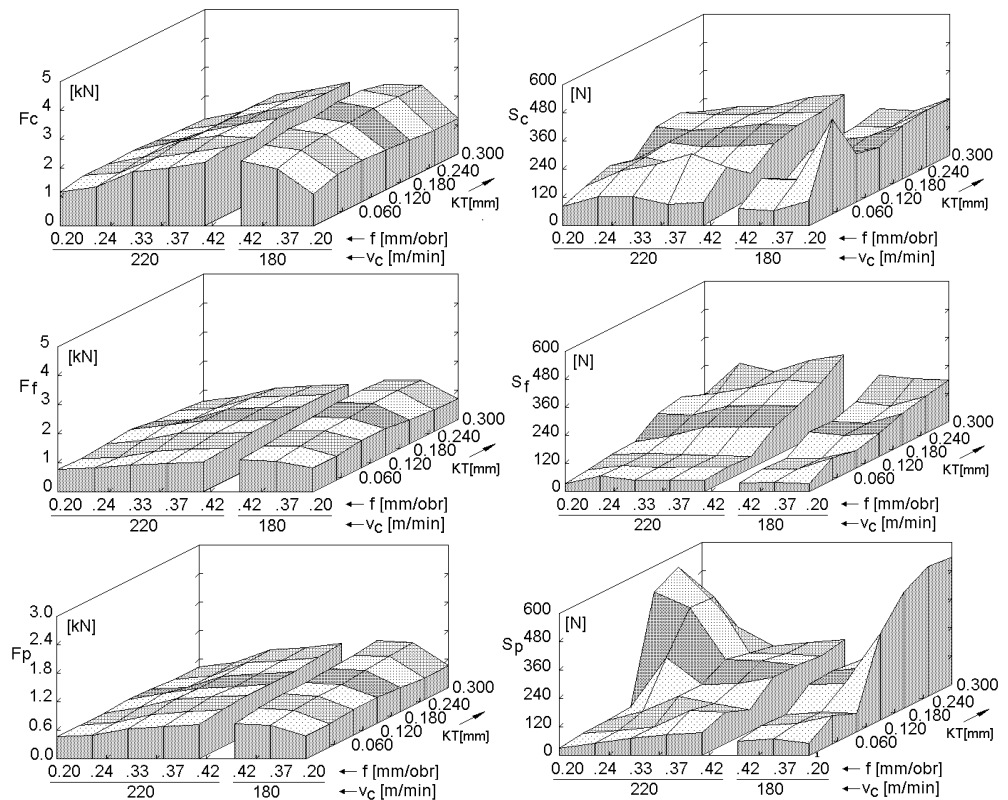
gdzie S - odchylenie standardowe siły,

F - wartość średnia siły.

materiał ostrza NT35

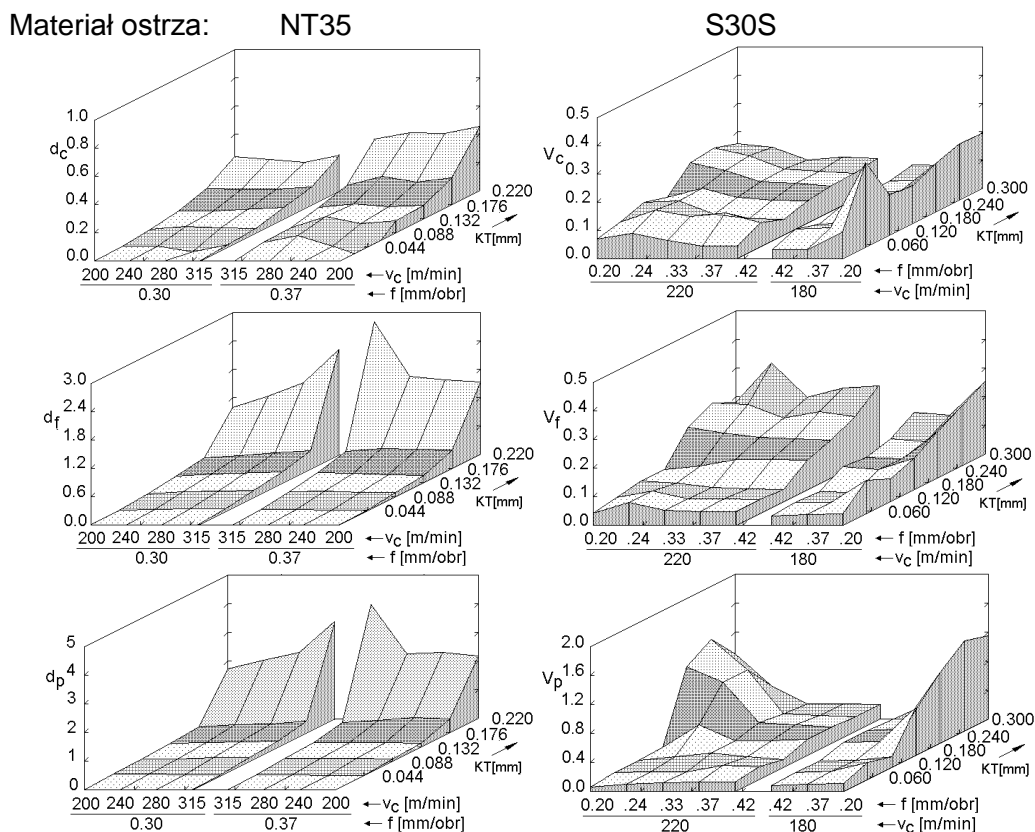


materiał ostrza S30S



rys. 3.12. Zależności między miarami sił skrawania a głębokością krateru KT .

Rysunek 3.13 przedstawia przebiegi odpowiednich przyrostów i współczynników zmienności w funkcji głębokości zółbka.



rys. 3.13. Zależności między względnymi miarami sił skrawania a głębokością krateru KT .

Tak więc wyróżniono łącznie po dziewięć miar sił skrawania dla każdego materiału ostrza. W celu racjonalnego wyboru jednej z nich jako symptomu stanu narzędzia, a przynajmniej redukcji liczby miar, należy przeanalizować ich powiązanie (korelację) ze zużyciem ostrza. Wpływ ten (lub jego brak) jest widoczny na przedstawionych wyżej rysunkach, niemniej jednak jest raczej trudny do opisu prostą funkcją, a ocena jego istotności “na oko” może być myląca. Pomińmy tu wpływ parametrów skrawania jako nie będący przedmiotem tego opracowania, skupiając się jedynie na wpływie stanu narzędzia na wybrane miary.

Do określenia stopnia powiązania między zmiennymi (tu miary sił skrawania i KT) przy pomocy współczynnika korelacji w zasadzie potrzebne jest założenie o postaci funkcji korelacyjnej. Czasem założenie o liniowej korelacji czynione jest nieświadomie. Rysunki 3.11÷3.13 świadczą dobitnie, iż tu założenie takie jest nie do przyjęcia. Znalezienie jednej funkcji, która dobrze oddawałaby zależność miar sił skrawania od głębokości żłobka wydaje się dość kłopotliwe, a ponadto zbędne. Rozważmy ogólnie korelację $y(KT)$ gdzie y jest dowolną miarą sił skrawania. Współczynnik korelacji można zdefiniować jako [238]:

$$r = \sqrt{\frac{S_c - S_r}{S_c}} \quad (3.9)$$

gdzie $S_c = \sum (y_i - y_{sr})^2$ – całkowita (pierwotna) suma kwadratów,

$$S_r = \sum (y_i - y_{osz,i})^2 \quad \text{– resztkowa suma kwadratów,}$$

$y_{sr}, y_{osz,j}$ – średnia i oszacowana na podstawie korelacji wartość y .

Jak widać problem sprowadza się do wyznaczenia wartości $y_{osz,j}$. W przypadku takim jak właśnie rozważany, gdy ogólna postać funkcji korelacyjnej $y(KT)$ jest trudna do zdefiniowania, a zależy nam jedynie na określeniu powiązania między miarami sił skrawania i głębokością żłobka, można wartości y pogrupować względem KT , a następnie $y_{osz,j}$ zastąpić średnimi w grupach. Grupowanie to wykonano w oparciu o podane wyżej przedziały wartości KT odpowiadające kolejnym, charakterystycznym etapom pracy ostrzy:

1. narzędzie ostre: $KT < \sim 0.1$ mm dla S30S i $KT < \sim 0.05$ mm dla NT35,
2. wyraźne ślady zużycia: $KT \approx 0.1 \div 0.2$ mm dla S30S i $KT \approx 0.05 \div 0.1$ mm dla NT35,
3. znaczne pogorszenie jakości powierzchni obrabianej:
 $KT \approx 0.2 \div 0.25$ mm dla S30S i $KT \approx 0.1 \div 0.15$ mm dla NT35,
4. niebezpieczeństwo wystąpienia katastroficznego stępienia ostrza:
 $KT > 0.25$ mm dla S30S i $KT > 0.15$ mm dla NT35.

Wyniki zestawione w tabelicy 3.2 w dużym stopniu, aczkolwiek nie całkowicie, potwierdzają poczynione obserwacje. Dla płytek pokrywanych wartości współczynników korelacji dla F_f, d_f, S_f, d_p i F_p zdecydowanie przewyższają pozostałe. Korelacja przyrostów względnych jest podobna lub trochę lepsza, jednak wynika to z małego zróżnicowania posuwów dla prób z ostrzami pokrywanyymi. Możliwość zastosowania przyrostów względnych jako symptomów zużycia jest w pewnym stopniu ograniczona koniecznością pamiętania wartości średniej siły dla nowego ostrza. Z kolei wyznaczanie zmiennych składowych sił skrawania wymaga większej częstotliwości próbkowania, a nade wszystko siłomierza o odpowiednio dobrych własnościach dynamicznych, co czyni S_f mniej atrakcyjną miarą. Za najlepsze miary można zatem uznać średnie wartości sił F_f i F_p , z uwzględnieniem sił skrawania.

Tabela 3.2. Współczynniki korelacji między miarami sił skrawania a KT

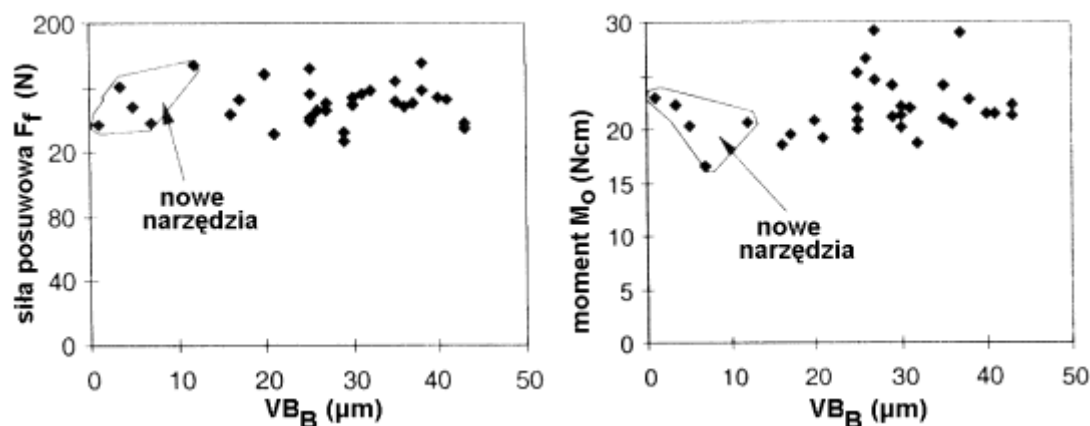
NT35	F_c	d_c	S_c	F_f	d_f	S_f	F_p	d_p	S_p
r	0.536	0.511	0.662	0.774	0.757	0.776	0.753	0.789	0.638

S30S	F_c	S_c	V_c	F_f	S_f	V_f	F_p	S_p	V_p
r	0.087	0.797	0.427	0.173	0.727	0.729	0.590	0.598	0.476

W przypadku ostrzy S30S silne skorelowanie z KT wykazują S_c, S_f . Odchylenie standardowe siły odporowej nie wykazało takiego skorelowania, jednakże bardzo silnie zależy ono od posuwu, co poprzez wzrost sum kwadratów odchylen wartości S_p od średnich w przedziałach powoduje gorszą korelację tej miary ze zużyciem ostrza. Współczynniki zmienności okazały się podobnie lub gorzej skorelowane ze zużyciem. Wartości średnie sił jako słabo skorelowane ze zużyciem, są w tym przypadku zupełnie nieprzydatne do jego oceny. Jako najkorzystniejsze miary można zatem wybrać odchylenia standardowe

składowych sił skrawania. Pamiętać należy, że niezbędne jest uwzględnienie parametrów skrawania, z którymi miary te są silnie związane.

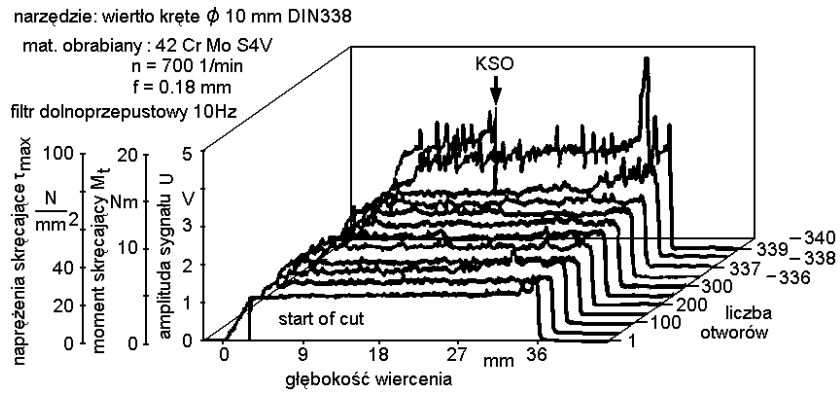
Zmiany sił skrawania związane ze stanem narzędzia są wykorzystywane oczywiście nie tylko przy toczeniu, lecz także przy innych sposobach obróbki. Ogólnie powiedzieć można, że zużycie ostrza powoduje wzrost sił skrawania, choć dość często jest on niezbyt jednoznaczny, jako że, na siły skrawania wpływa cały szereg innych poza zużyciem ostrza czynników, jak np. trudne do kontrolowania niewielkie zmiany geometrii wiertel, zwłaszcza o małych średnicach. Powoduje to, iż zmiany sił spowodowane zużyciem ostrza mogą być nie dość wyraźne by można było je wykorzystać w diagnostyce stanu narzędzi. W [137] przedstawiono wyniki porównania siły posuwowej i momentu skręcającego uzyskanych przy wierceniu wiertłami $\phi 2.6$ mm. Wykorzystano 6 wiertel ostrych i 30 uznanych w produkcji za stępione. Widoczny na rys. 3.14 bardzo duży rozrzut wartości starcia powierzchni przyłożenia VB_B świadczy o pewnej przypadkowości wycofywania narzędzi z produkcji, na podstawie arbitralnej oceny operatora. Ważniejszy jest brak istotnej różnicy między sygnałami otrzymanymi przy zastosowaniu narzędzi ostrych, a pochodzącymi od narzędzi stępionych. Rozrzut mierzonych wartości sił i momentu sięga kilkudziesięciu procent. Podobne wyniki otrzymano dla zużycia naroży i łysinek.



rys. 3.14. Siły osiowe i momenty obrotowe uzyskane przy użyciu wiertel ostrych i stępionych wg [137].

3. 2. 2. Przebieg sił skrawania w trakcie katastroficznego stępienia ostrza

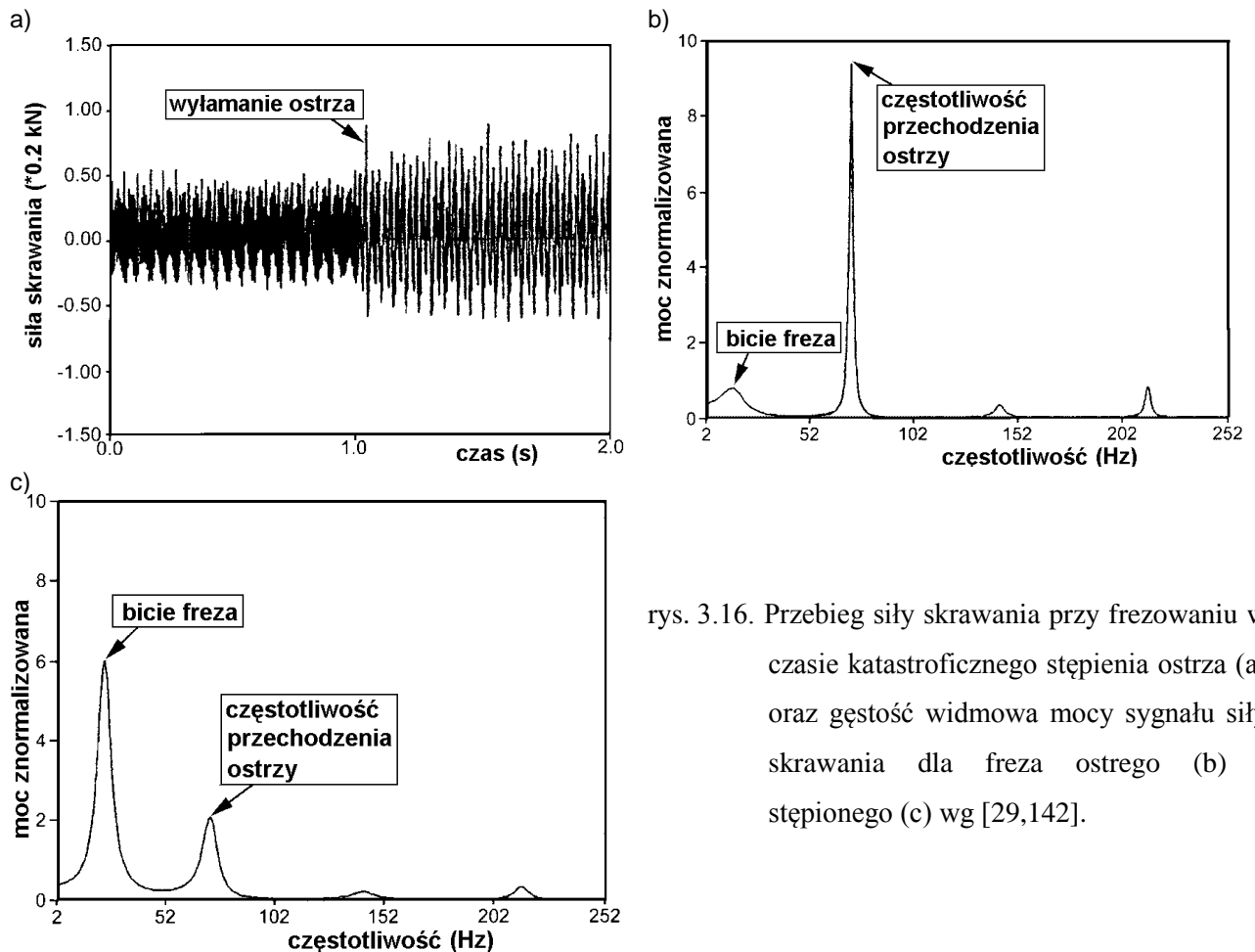
Katastroficzne stępienie ostrza (KSO) to jego wykruszenie lub wyłamanie czy wręcz (jak w przypadku narzędzi trzpieniowych) złamanie. Pogorszenie jakości krawędzi skrawającej najczęściej powoduje (w przypadku wykruszeń) wzrost sił skrawania. Np. na rys. 3.15 przedstawiono przebieg momentu skręcającego przy wierceniu wiertłem $\phi 10$ [219]. Jak widać, w czasie wiercenia 337 otworów moment ten zmieniał się nieznacznie. Pod koniec 338-go otworu wystąpił wyraźny wzrost, pogłębiony wyraźnie w czasie obróbki następnych otworów, co świadczy o uszkodzeniu krawędzi skrawającej. W trakcie wiercenia 340 otworu nastąpiło zniszczenie wiertła, którego można byłoby uniknąć, gdyby zastosowano układ śledzący pokazany tu moment skręcający.



Sygnał momentu skręcającego do stępienia ostrza

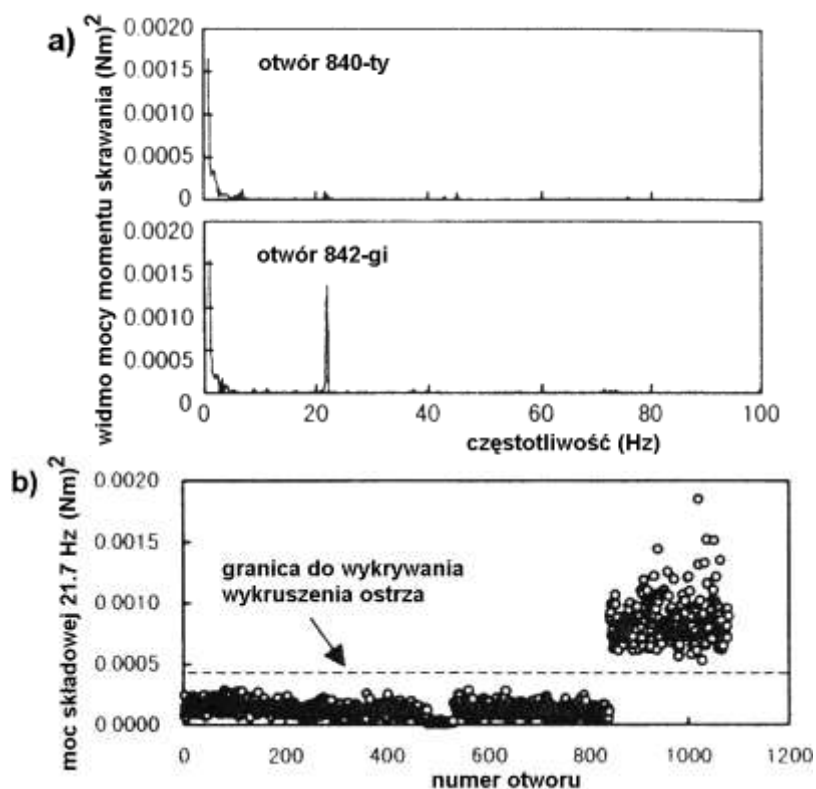
rys. 3.15. Przebieg momentu skręcającego przy wierceniu wiertłem ϕ 10 (DIN338) w stali 42CrMoS4V, $n = 700$ obr/min, $f = 0.18$ mm/obr [219].

Jeśli wyłamanie ostrza jest znaczne, siły skrawania w wyniku spadku pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej mogą spaść, nawet do zera. W przypadku narzędzi frezarskich, powoduje ono wyraźne zmiany cyklicznego przebiegu sił skrawania (rys. 3.16a), co pociąga za sobą zmiany różnych miar sygnału, np. jego widma amplitudowego, w którym po KSO znacznie wzrasta składowa związana z prędkością obrotową freza, maleje natomiast składowa związana z częstością wchodzenia poszczególnych zębów (rys. 3.16 b i c, [142]).



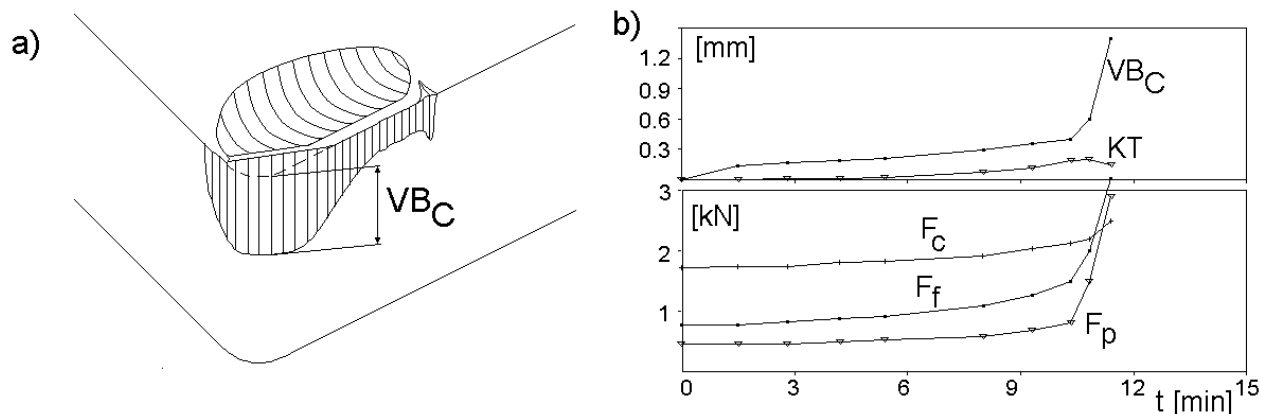
rys. 3.16. Przebieg siły skrawania przy frezowaniu w czasie katastroficznego stępienia ostrza (a) oraz gęstość widmowa mocy sygnału siły skrawania dla freza ostrego (b) i stępionego (c) wg [29,142].

Podobnie jak w przypadku monitorowania zużycia ostrza, alternatywą dla wartości siły skrawania może być jego składowa dynamiczna. Na rys. 3.17a przedstawiono widmo mocy sygnału momentu obrotowego tuż przed oraz po wykruszeniu ostrza wiertła [182]. Jak widać, wykruszenie spowodowało pojawienie się w sygnale momentu składowej o częstotliwości 21.7 Hz, zgodnej z prędkością obrotową wrzeciona. Przebieg tej składowej w trakcie wiercenia wszystkich otworów przedstawiono na rys. 3.17b. Jej jednoznaczny wzrost powyżej założonego poziomu progowego może być wykorzystany do wykrywania wykruszeń ostrza.



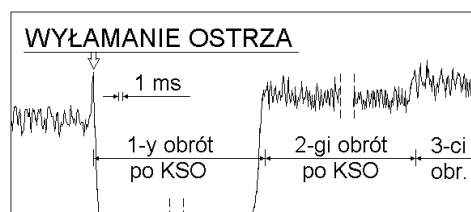
rys. 3.17. Widmo mocy sygnału momentu obrotowego przed i po wykruszeniu ostrza wiertła (a) oraz przebieg składowej 21.7 Hz (b); wiertło HSS $\phi 5$ mm, $n = 1300$ obr/min, $f = 0.1$ mm/obr, mat. obr. stal 45, $l = 10$ mm [182].

Znacznie łatwiejsze do śledzenia, a przez to lepiej poznane są przebiegi sił skrawania towarzyszące katastroficznemu stępieniu ostrza przy toczeniu. Może ono przyjmować trzy zasadnicze formy. Pierwsza z nich to przyspieszone stępienie ostrza, które polega na znacznym zwiększeniu intensywności jego zużycia i stosunkowo szybkim wzroście sił skrawania (rys. 3.18). W czasie kilkunastu - kilkudziesięciu sekund zużycie powierzchni przyłożenia w rejonie naroża przyrasta o kilka dziesiątych części milimetra, a przyrost sił skrawania (szczególnie siły posuwowej i odporowej) może przekraczać 100%. Często związane jest to z odkształceniem plastycznym ostrza co może wyrażać się w zmniejszeniu głębokości żłobka na powierzchni natarcia - jak na rys. 3.18b. W rezultacie VB_C osiąga wartość powyżej 1 mm, a kontynuowanie obróbki prowadzi do ścięcia naroża. Ten typ KSO różni się zatem od stępienia naturalnego jedynie skalą czasu. W obu przypadkach nie występują nagle (milisekundowe) zmiany średnich wartości sił skrawania.



rys. 3.18. Wygląd ostrza po jego przyspieszonym stępieniu (a) oraz przebiegi zużycia ostrza i sił skrawania czasie takiego stępienia wg [85, 125]; mat. obrabiany stal 45, ostrze SNUN NT25, $f=0.33$ mm/obr, $a_p=2.5$ mm, $v_c=200$ m/min

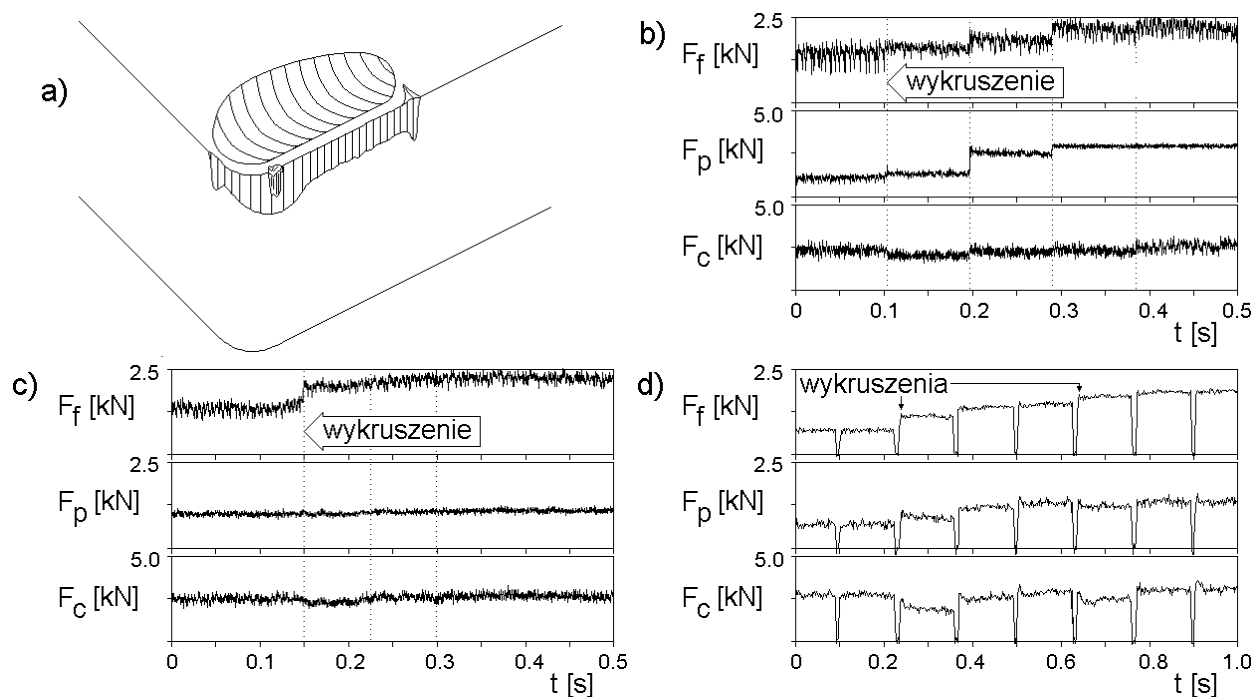
Dwa pozostałe typy KSO to wykruszenie ostrza i wyłamanie znacznego fragmentu ostrza. Według badań przeprowadzonych w WZL TH Aachen [6, 145, 148], wielokrotnie później cytowanych przez innych autorów np.: [79, 153, 200, 221], KSO towarzyszy chwilowy znaczny wzrost sił skrawania, a następnie spadek do zera w ciągu 1-3 ms (rys. 3.19). Ponowny wzrost sił skrawania występuje najwcześniej po jednym obrocie przedmiotu obrabianego, przy czym mogą one osiągnąć wówczas wartości kilkakrotnie wyższe niż przed KSO. Dzieje się tak przy bardzo znacznych uszkodzeniach ostrza. Gdy ubytek materiału ostrza jest mniejszy, spadek sił nie osiąga zera, a późniejszy wzrost nie jest tak znaczny. W zależności od rozmiarów KSO nowe wartości sił mogą być wyższe od 30 do 600 %. Chwilowy wzrost sił skrawania powodowany jest rozkruszaniem wyłamanego materiału narzędzia. Dotyczy to szczególnie ostrzy z węglików spiekanych. Przy ostrzach ceramicznych rozkruszanie to jest na tyle szybkie, że może nie występować wyraźny wzrost sił. Drobnym wykruszeniom krawędzi skrawającej towarzyszy skokowy niewielki wzrost sił skrawania.



rys. 3.19. Przebieg siły skrawania w czasie wyłamania ostrza wg WZL TH Aachen [6, 145, 148].

Obszerne badania przeprowadzone w ITM PW [78, 85, 92, 125, 179] potwierdziły w ogólnym zarysie przedstawiony charakter zmienności sił skrawania towarzyszącej KSO, uzupełniając i uściślając te informacje. Przykładowe wyniki tych badań przedstawiono na rys. 3.20 i 3.21. Stosowano w nich noże składane z kwadratowymi lub trójkątnymi płytkami wymiennymi (SNUN lub TNMG) przy posuwie $f = 0.33$ mm/obr i głębokości skrawania $a_p = 2.5$ mm. Materiał ostrza, materiał obrabiany i prędkości

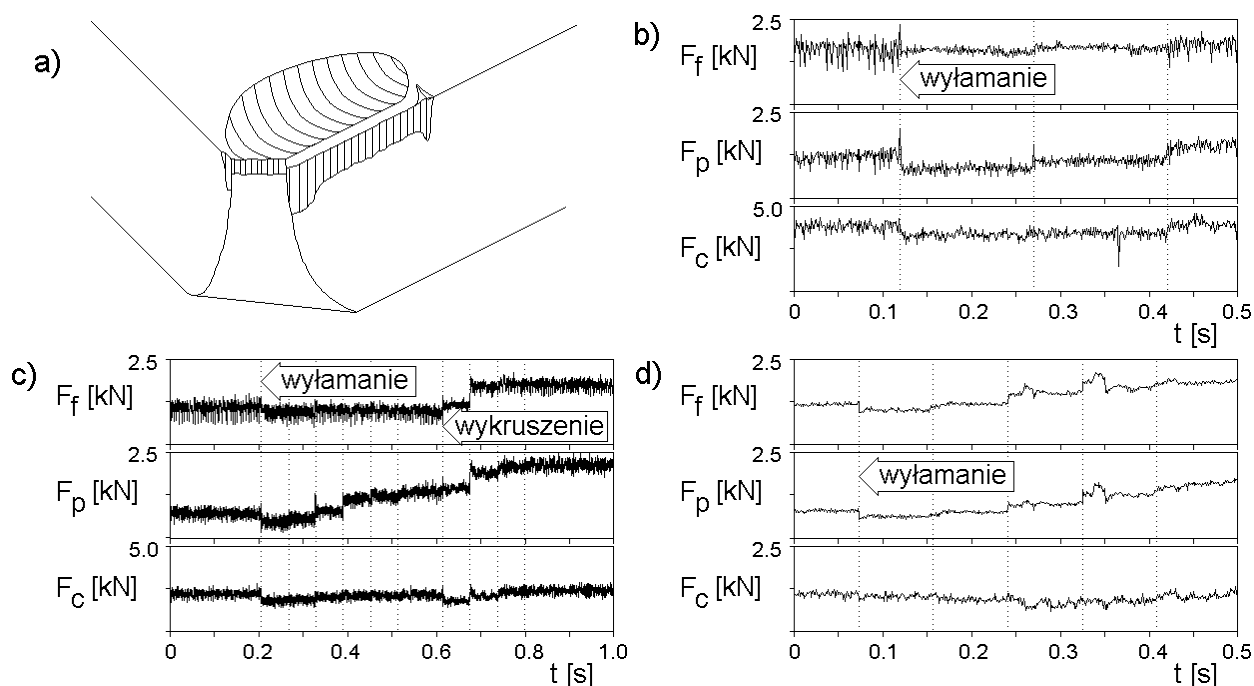
skrawania podano pod rysunkami. Na rysunkach tych kropkowymi liniami zaznaczono chwilę, w której wystąpiło KSO oraz kolejne obroty po KSO. Siły skrawania mierzone były siłomierzem Kistler 9263 (rys. 3.11), a częstotliwość próbkowania wynosiła 5 kHz.



rys. 3.20. Wygląd ostrza po jego wykruszeniu (a) oraz przykładowe przebiegi sił skrawania w czasie wykruszenia (b÷d) wg [85, 125], ($v_c=180$ m/min, mat. obrab: stal 45, ostrza: b i c SNUN S30S, d: TNMG NT25).

Wykruszeniom ostrza (rys. 3.20) towarzyszy skokowy wzrost siły posuwowej i (lub) odporowej - zależnie od miejsca, w którym ono wystąpiło - oraz niewielki spadek siły głównej. Siły skrawania utrzymują się na nowym poziomie przez 1 obrót przedmiotu obrabianego (PO). Po tym obrocie ostrze napotyka uskok pozostawiony na powierzchni skrawania w czasie wykruszenia. Usuwanie tego uskoku powoduje skokowy przyrost zużycia powierzchni przyłożenia pod wykruszeniem i pozostawienie kolejnego, tym razem mniejszego śladu na powierzchni skrawania. Towarzyszy temu skokowy wzrost sił F_f i F_p oraz powrót F_c do wartości sprzed wykruszenia. Zjawisko to powtarza się dokładnie co jeden obrót PO, aż do ponownego ustabilizowania się średnich wartości sił. Czas trwania tej stabilizacji (liczba obrotów PO, w których występują skokowe zmiany sił) może być różny. Np. w próbie przedstawionej na rys. 3.20b wartości sił ustabilizowały się po czterech obrotach, zaś w próbie z rys. 3.20c już po dwóch. Dalsza obróbka może być kontynuowana w miarę "normalnie", przy pogorszonej jakości powierzchni obrobionej lub nawet z niewielkim zwiększeniem średnicy PO. Należy jednakże podkreślić, iż siły F_f i F_p nie powracają do stanu sprzed wykruszenia. Osłabione ostrze jest zatem dodatkowo znacznie bardziej obciążone. Stąd najczęściej po upływie krótkiego czasu następuje kolejne wykruszenie, powodujące większe uszkodzenia ostrza. W próbie przedstawionej na rys. 3.20d (toczenie przerywane) drugie wykruszenie nastąpiło zanim ustabilizowały się siły po pierwszym.

Takie powtarzające się wykruszenia prowadzą do destrukcji krawędzi skrawającej - ścięcia wierzchołka noża do wielkości VB_C nawet do 2-3 mm (rys. 2.5d). Towarzyszy im wyraźne iskrzenie, a na powierzchni obrobionej pojawia się wyraźny ciemny ślad i uskok.



rys. 3.21. Wygląd ostrza po jego wyłamaniu (a) oraz przykładowe przebiegi sił skrawania w czasie wyłamania (b-d) wg [85, 125] (b, c: mat. obr. stal 45, $v_c=180$ m/min, SNUN S30S; d: mat. obr. 34HNM, $v_c=355$ m/min, ceramika Al_2O_3+TiC)

Groźniejszym typem KSO jest wyłamanie znacznego fragmentu naroża obejmującego całą wysokość płytki (rys. 3.21). Jest ono często „podcięte” dzięki czemu nowo utworzony fragment ostrza ma dodatni kąt przyłożenia. Takiemu KSO towarzyszy spadek sił skrawania trwający jeden obrót przedmiotu obrabianego. Podobnie jak w przypadku wykruszeń ostrza, wielkość zmian sił zależy od kształtu uszkodzenia ostrza. Warto podkreślić, że wśród kilkudziesięciu prób przeprowadzonych w ITM PW, w których wystąpiło KSO, ani razu nie zaobserwowano spadku sił do zera, opisywanego w [6, 148] jako charakterystyczny. Ponadto mimo znacznej częstotliwości próbkowania tylko w nielicznych próbach zaobserwowano wyraźny chwilowy wzrost sił w czasie wyłamania ostrza. W próbie przedstawionej na rys. 3.21b wyłamanie wystąpiło głównie od strony pomocniczej krawędzi skrawającej. Spowodowało to trwający ok 1 ms wzrost siły F_p od ok. 1300 N do ponad 2000 i następujący po nim spadek do ok. 900 N. Średnia wartość siły F_f zmieniła się nieznacznie. Silne zakłócenia przebiegu tej siły przed KSO pochodzą od wióra łamanego o powierzchnię przejściową. Wyłamanie naroża spowodowało zmianę sposobu kształtowania się wióra na czas trwania dwu obrotów PO. Utworzona w wyniku wyłamania ostrza krawędź skrawająca jest zawsze nierówna, bardzo ostra i podatna na zużycie. Ślad pozostawiony przez KSO na powierzchni przejściowej, reprodukowany w kolejnych obrotach PO, wywoływał skokowe przyrosty zużycia nowej krawędzi. Na wykresach sił objawiło się to kolejnymi, coraz łagodniejszymi wzrostami.

Nastąpiła stabilizacja stanu ostrza i sił skrawania, a obróbka została przerwana w kilka sekund później - natychmiast po zauważeniu KSO przez operatora.

Mimo iż w próbie przedstawionej na rys. 3.21b ostrze po wyłamaniu było w stanie wykonywać obróbkę, jeszcze przez kilka sekund chroniąc podkładkę i oprawkę narzędziową, nie zawsze można liczyć na tak szczęśliwy zbieg okoliczności. Na rys. 3.21c przedstawiono przebieg sił skrawania w innej próbie prowadzonej w podobnych warunkach skrawania. Przebieg wyłamania ostrza był podobny, jednakże po ok. 0.4 s nastąpiło wykruszenie nowej krawędzi skrawającej i dalsza destrukcja ostrza. W próbie prowadzonej ostrzem ceramicznym (rys. 3.21d) już w trakcie trzeciego obrotu po wyłamaniu pojawiły się kolejne wykruszenia niszczące płytkę.

Warto zwrócić uwagę na zakłócenia sił skrawania (dynamiczną składową sił) widoczne w większości prób przedstawionych na rys. 3.17 i 3.18. Często zmiana średniej wartości siły spowodowana przez KSO jest mniejsza niż te zakłócenia. Powinno to być brane pod uwagę przy analizowaniu strategii wykrywania KSO.

Podsumowując można stwierdzić, że katastroficzne stępienie ostrza zawsze prowadzi do zniszczenia narzędzia, często także przedmiotu obrabianego. Stanowi zatem poważne zakłócenie procesu produkcyjnego i jako takie musi być wykrywane możliwie szybko, przy toczeniu w zasadzie nie później niż przed upływem czasu potrzebnego na jeden obrót przedmiotu obrabianego.

3. 2. 3. Wykorzystanie pomiarów sił skrawania do wykrywania drgań samowzbudnych i kolizji

Między drganiami samowzbudnymi i zmienną składową siły skrawania zachodzi ścisła współzależność. Sygnały te mają tę samą częstość, a stosunek ich amplitud jest określony przez funkcję sztywności procesu skrawania. Z tego względu zmienna składowa siły, a także momentu skrawania mogą być stosowane do wykrywania drgań samowzbudnych. Pomiar sił skrawania może być realizowany od strony narzędzia lub od strony przedmiotu obrabianego. Warunkiem wykorzystania siłomierza do wykrywania drgań samowzbudnych jest odpowiednio wysoka częstotliwość rezonansowa, która decyduje o zakresie pomiarowym siłomierza. Dla typowych przypadków obróbki zakres ten powinien wynosić od 50 do ok.1000 Hz [217].

Kolizje, to niepożądane zetknięcia elementów obrabiarki (np. w czasie ruchów szybkich). Towarzyszą im oczywiście gwałtowny wzrost sił oddziaływujących na te elementy, a więc także na układu do pomiaru sił skrawania. Pomiar sił są więc podstawowym sposobem wczesnego wykrywania kolizji stosowanym od dawna [148,211].

3. 3. Emisja akustyczna

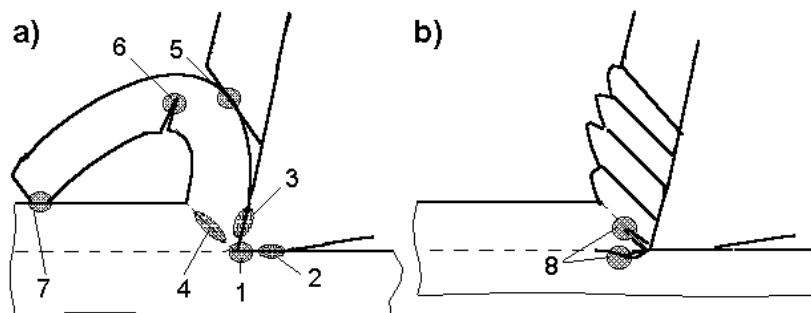
3. 3. 1. Źródła i przebieg emisji akustycznej w procesie skrawania

Emisja akustyczna (skrót AE od angielskiego Acoustic Emission) jest to powstawanie i rozchodzenie się fal sprężystych generowanych w materiale w wyniku wyzwania energii wiązań międzycząsteczkowych, spowodowanego przez odkształcenia, pękanie i przemiany fazowe. Nagromadzona energia wyzwala się w miejscu inicjacji naruszenia pierwotnych wiązań strukturalnych materiału. Zjawiska te wykorzystywane od dawna w badaniach zmęczenia i pęknięcia materiałów oraz w nadzorze niezawodności maszyn i konstrukcji, od szeregu lat coraz częściej są wykorzystywane w diagnostyce stanu narzędzi skrawających i procesu skrawania [85, 146, 162, 168, 217, 233 i in.]. Użyteczny zakres częstotliwości wynosi tu od 50 kHz do 2 MHz, a więc leży znacznie powyżej stosowanego przy badaniu drgań i hałasu [44].

Ponieważ widmo sygnału AE jest bardzo mocno zależne od toru przejścia sygnału i nastaw aparatury pomiarowej, uzyskiwane wyniki mają charakter jakościowy. Stąd też, mimo iż emisja akustyczna jest zjawiskiem mechanicznym, jej miary określone są w voltach, i nie mogą być ilościowo przenoszone pomiędzy różnymi stanowiskami [199]. Tak też należy traktować dane tu cytowane.

Na rys. 3.22 przedstawiono schematycznie źródła emisji akustycznej w strefie skrawania i jej sąsiedztwie przy formowaniu wiórów ciągłych (a) i segmentowych (b). Są to:

- ścinanie i plastyczna deformacja materiału obrabianego (3,4).
- pękanie materiału obrabianego i narzędzia (1,8).
- tarcie pomiędzy materiałem obrabianym, narzędziem i wiórem (2,3,5).
- uderzenia i pęknięcia wiórów (6,7).

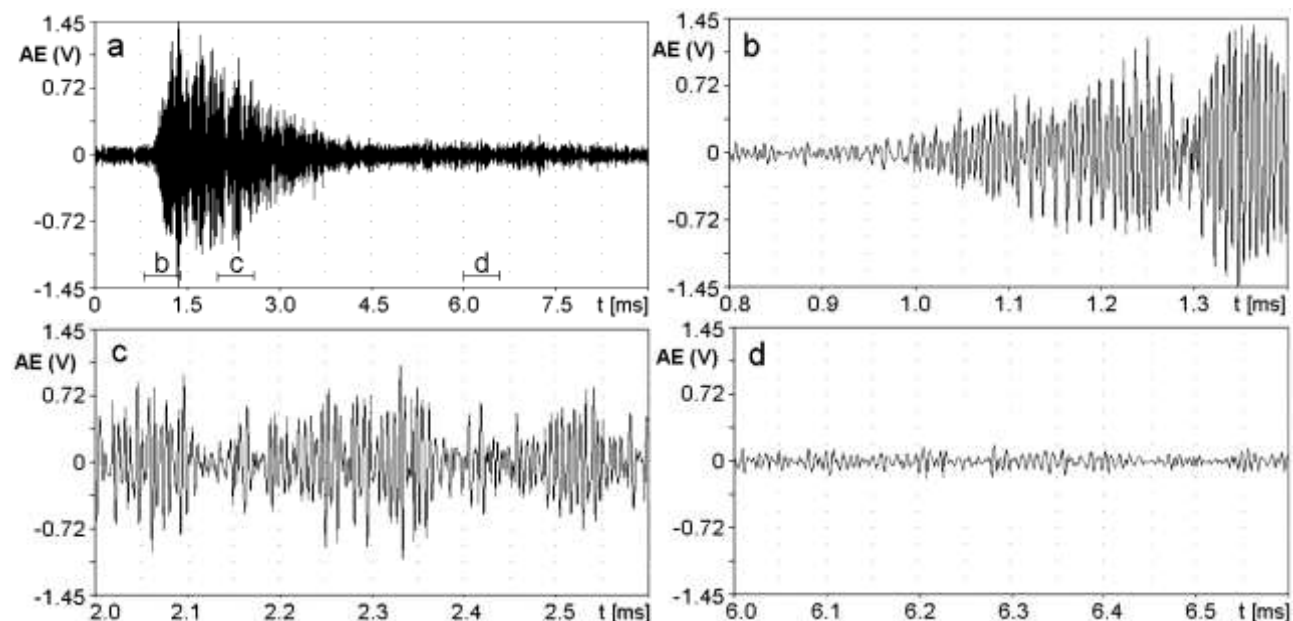


rys. 3.22. Możliwe źródła emisji akustycznej w procesie skrawania przy formowaniu wiórów ciągłych (a) i segmentowych (b) wg [175].

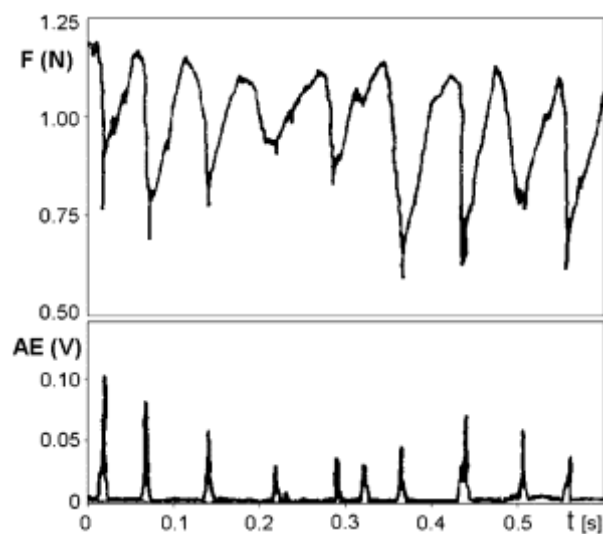
W procesie skrawania występują dwa podstawowe typy sygnału AE [69, 100, 101, 135, 164,175]:

- ciągły o niskiej amplitudzie, związany z odkształceniami plastycznymi materiału oraz tarcie w strefie skrawania,
- wybuchowy, związany z mikropęknięciami materiału obrabianego, wióra i narzędzia.

Na rys. 3.23a przedstawiono charakterystyczny pojedynczy wybuch AE (ang. burst, w języku polskim spotkać można także określenia “impuls”, “zdarzenie” [166]), otoczony sygnałem ciągłym [100, 101], a zaznaczone trzy fragmenty (b, c i d) w pełnej skali czasu pokazano odpowiednio na rys. 3.23b, c i d. Widoczne są na nim charakterystyczne cechy wybuchu AE: szybkie narastanie amplitudy sygnału (b) i znaczne wolniejsze, nieregularne jej opadanie (c). Cały wybuch trwa tu ok. 3 ms, jednak pamiętać należy o tym, że został on zarejestrowany w pewnej odległości od strefy skrawania, jest więc zniekształcony przez wielokrotne odbicia i załamania wewnątrz materiału, przez który przechodził. Do tego zagadnienia wrócimy później. Poza wybuchami amplituda sygnału jest znacznie niższa, w miarę jednostajna.



rys. 3.23. Sygnał emisji akustycznej w trakcie wybuchu wg [101].



rys. 3.24. Przebieg sił skrawania i sygnału AE podczas skrawania ortogonalnego utwardzonego staliwa ($v_c=0.46$ m/min) wg [175].

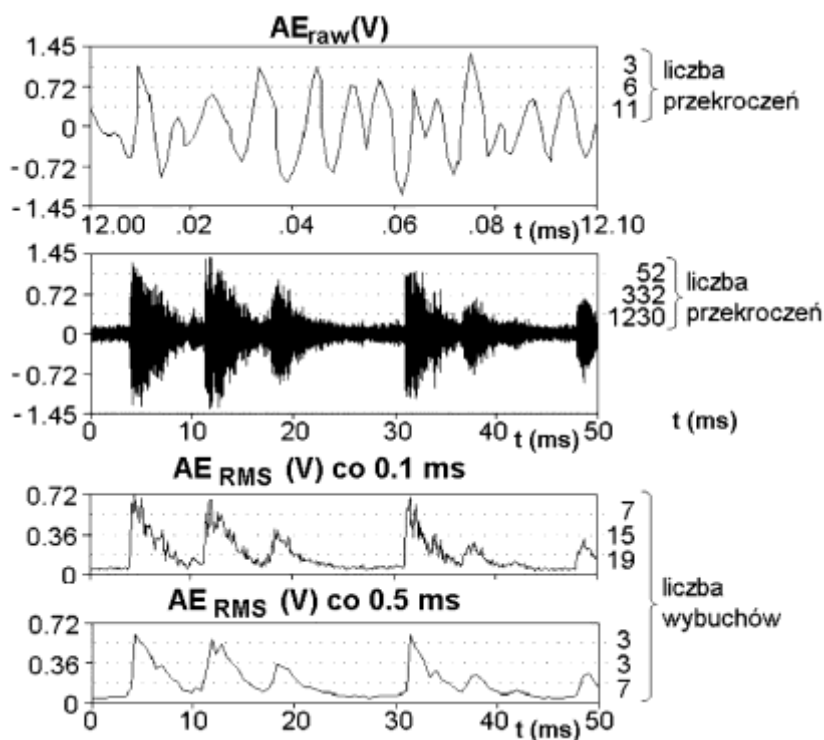
Na rys. 3.24 przedstawiono zdemodulowaną wartość sygnału AE zarejestrowaną przy toczeniu staliwa utwardzonego z prędkością 0.46 m/min, wraz z przebiegiem siły skrawania [175]. Pęknięcie materiału obrabianego i odrywanie wióra powoduje wyraźny spadek sił skrawania. W tej samej chwili pojawia się gwałtowny wzrost sygnału AE – jest to sygnał typu wybuchowego.

3. 3. 2. Zależność emisji akustycznej od zużycia ostrza

Do oceny zużycia ostrza w czasie obróbki najczęściej stosowane są dwie podstawowe metody:

- zliczanie przekroczeń lub wybuchów AE,
- śledzenie poziomu zdemodulowanej wartości sygnału AE

Pierwszą z nich objaśniono na rys. 3.25 [101]. Na najwyższym z zamieszczonych na nim przebiegów przedstawiono fragment (0.1 ms) oryginalnego („surowego”) przebiegu AE_{raw} wraz z trzema progami dyskryminacji. Niżej widoczny jest znacznie dłuższy fragment tej samej próby (50 ms). Zliczanie przekroczeń AE_{raw} polega na określaniu liczby przekroczeń przez wartość sygnału założonego progu. Liczba przekroczeń (zwana także „sumą zliczeń” [166]) zależy oczywiście od wielkości progu i czasu zliczania. Ponieważ liczba przekroczeń jest bezpośrednio zależna od czasu, wygodniej jest posługiwać się tempem przekroczeń czyli ich liczbą przypadającą na jedną sekundę. Wg [46, 72, 134, 175 i in.] suma przekroczeń AE_{raw} jest wyraźnie skorelowana ze zużyciem ostrza na powierzchni przyłożenia. Jest ona niezależna od parametrów skrawania, o ile próg dyskryminacji został dobrany właściwie.



rys. 3.25. Zliczanie przekroczeń oryginalnego sygnału AE oraz wybuchów sygnału zdemodulowanego [101].

Ponieważ sygnały AE mają stosunkowo dużą częstotliwość (zwykle powyżej 100 kHz), są trudne do zarejestrowania. Stąd najczęściej wykorzystywana jest jakaś forma ich demodulacji jak uśrednianie czy wyznaczanie wartości skutecznej. Odpowiednikiem zliczania przekroczeń jest w tym przypadku zliczanie wybuchów, które przebiega podobnie, jednak odnosi się do zdemodulowanej (skutecznej) wartości sygnału AE. Istotny przy tym jest właściwy dobór kroku uśredniania sygnału (wyznaczania RMS). Na dolnej części rys. 3.25 można zauważyć, że przy kroku wyznaczania AE_{RMS} równym 0.1 ms, w czasie każdego wybuchu poziomy dyskryminacji przekraczane są wielokrotnie, co sprawia iż liczba wybuchów jest zawyżona. Zastosowanie kroku 0.5 ms umożliwia wierne zliczanie. Bliżej zagadnienie to zostanie omówione w punkcie 5.2.3.

Podobnie jak w przypadku zliczania przekroczeń, wygodniej jest posługiwać się tempem wybuchów czyli ich liczbą przypadającą na jedną sekundę. Ponadto użyteczne może być określanie nasycenia wybuchów, czyli procentu czasu, w jakim wartość sygnału przekracza dany próg dyskryminacji. Wykorzystywane są także parametry rozkładu wartości skutecznej AE czyli wartość średnia $AE_{RMS,śr}$ (wartość skuteczna całego analizowanego przebiegu) i odchylenie standardowe $AE_{RMS}(S_{AE,RMS})$.

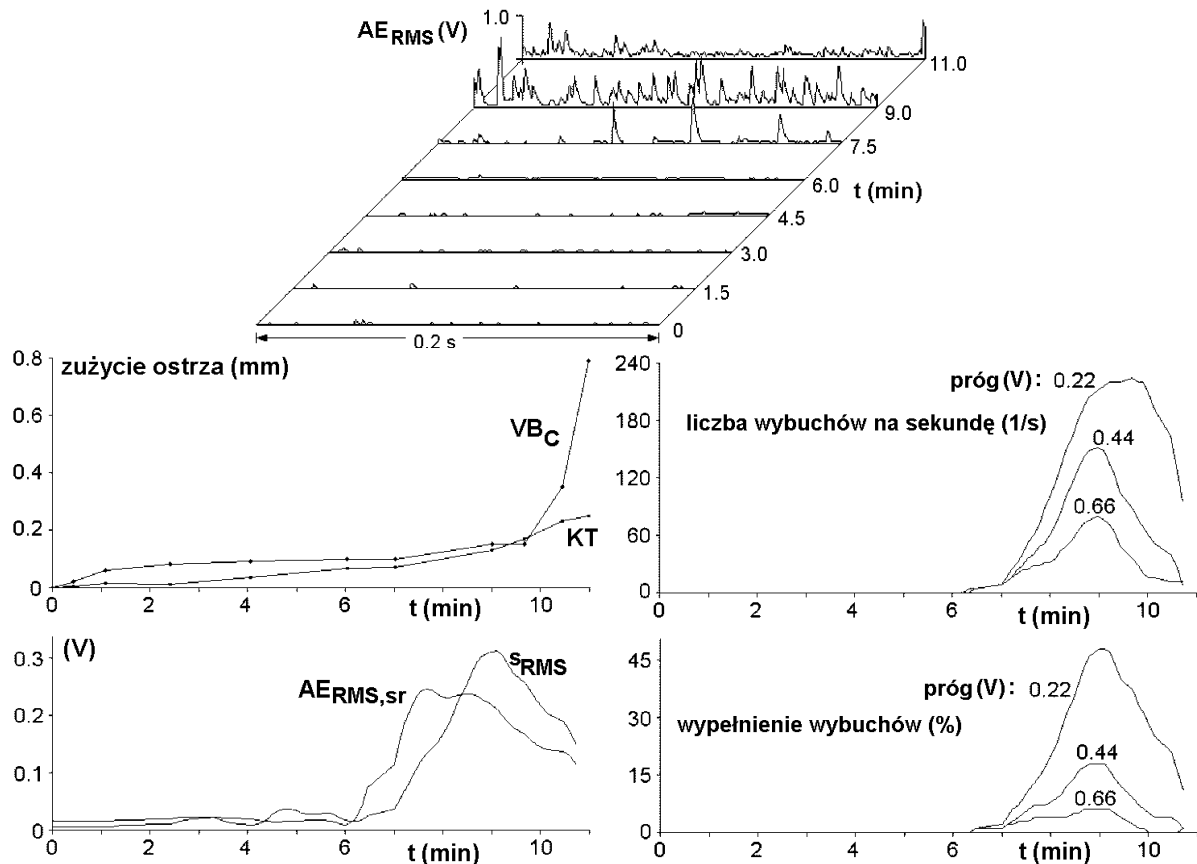
Według [69, 72,176] przy skrawaniu materiałów wiążkich, formujących wióry ciągłe, amplituda uśrednionego sygnału AE typu ciągłego rośnie liniowo wraz ze wzrostem zużycia powierzchni przyłożenia i prędkości skrawania nieznacznie zależąc od przekroju warstwy skrawanej. Zależy ona od materiału ostrza i sfazowania krawędzi skrawającej. Największa jest dla ostrzy cermetalicznych, mniejsza dla ceramiki i materiałów supertwardych (CBN), a najmniejsza dla ostrzy z węglików spiekanych.

Przy skrawaniu stali narzędziami z węglików spiekanych pokrywanych, sygnał AE nie jest tak liniowo zależny od zużycia. Wyniki próby przeprowadzonej ostrzem pokrywanym węglikiem i azotkiem tytanu (NT25) przedstawiono na rys. 3.26 [101].

Wartości wszystkich omawianych wyżej miar sygnału zdemodulowanego ($AE_{RMS,śr}$, $S_{AE,RMS}$, liczba wybuchów na sekundę i ich nasycenie) rosną gwałtownie po starciu pokrycia. Dalszemu przyrostowi zużycia ostrza towarzyszy spadek tych miar. Podobny wzrost wartości średniej obserwowany jest przy obróbce narzędziami z pokryciem ceramicznym [175]. Oznacza to, że sygnał AE trudno byłoby w takich warunkach wykorzystać do oceny zużycia ostrza, może on jednak dobrze służyć do wykrywania stopienia ostrza.

W celu bliższej oceny przydatności różnych miar AE do oceny zużycia ostrza w ITM PW przeprowadzono obszerniejsze badania sygnałów AE przy różnych parametrach skrawania [106,108,125]. Warunki skrawania w tych badaniach przedstawiono w punkcie 3.2.1 (tablica 3.1), jako że prowadzono je jednocześnie. Czujniki emisji akustycznej były umieszczone na górnej powierzchni siłomierza tokarskiego 9263 firmy Kistler (rys. 3.11). Były to – w próbach S01, S04, S06-S08 czujnik BK8313 (200 kHz) współpracujący ze zmodernizowanym przedwzmacniaczem BK2637 (o zmniejszonym wzmocnieniu ok. 10-razy) oraz zastosowany w próbach S02, S03 i S05 czujnik BK8314 (800 kHz) z oryginalnym przedwzmacniaczem BK2637. W obu przypadkach przedwzmacniacz był wyposażony w filtr oktawowy 200 kHz. Sygnały AE z przedwzmacniacza były odbierane przez Laboratoryjny Monitor Stanu Narzędzia

LMSN-2 [82, 101] i rejestrowane na dysku komputerowym w postaci cyfrowej. Aparatura do pomiaru AE zostanie bliżej omówiona w punkcie 5.3.



rys. 3.26. Przebieg zużycia ostrza oraz wartości skutecznej AE i miar na niej opartych ($AE_{RMS, sr}$, $s_{AE, RMS}$, tempo i nasycenie wybuchów) przy obróbce stali 45 ostrzem SNUN 120408 NT35; $v_c = 240$ m/min, $a_p = 2.4$ mm, $f = 0.3$ mm/obr; czujnik AE BK8313 (200 kHz) [101].

Zastosowanie przemiennych parametrów skrawania przedstawionych w tabelicy 3.1 umożliwiło uzyskanie łącznie 68 przebiegów miar sygnału AE w funkcji stanu narzędzia, przy czym wykonano łącznie 376 pomiarów emisji akustycznej. Procedura pomiarów AE była następująca. W ramach jednego pomiaru rejestrowano 750,000 próbek z częstotliwością próbkowania 1 MHz (0.75 s). Pierwsze 250 000 zapisywano na dysku w postaci oryginalnej AE_{raw} , zaś z kolejnych 500,000 wyznaczano wartość skuteczną (AE_{RMS}) z krokiem 500, i tak otrzymane wyniki (1000 próbek) zapisywano na dysku. Zarejestrowane przebiegi posłużyły następnie do wyznaczenia następujących miar sygnału AE:

dla sygnału oryginalnego (AE_{raw}):

- średnia wartość bezwzględna ($AE_{raw, sr}$) i odchylenie standardowe ($s_{AE, raw}$)
- tempo (t) i nasycenie (n_i) przekroczeń czyli liczba przekroczeń przez wartość oryginalnego sygnału AE trzech wybranych progów dyskryminacji na sekundę oraz procent czasu, w którym wartość sygnału przekraczała te progi dyskryminacji
- moc sygnału AE w wybranych pasmach częstotliwości: (m_i)

dla sygnału zdemodulowanego (AE_{RMS}):

- wartość średnia ($AE_{RMS,śr}$) i odchylenie standardowe wartości skutecznej ($S_{AE,RMS}$)
- liczba wybuchów na sekundę (I_j) i wypełnienie wybuchów (w_j)

Progi dyskryminacji do określania impulsowych miar sygnału AE wynosiły 1/64, 2/64 i 3/64 pełnego zakresu skali sygnału dobranego tak, by najsilniejsze sygnały nie powodowały przesterowania układu:

- dla czujnika BK8313: ok. 100, 200, 300 mV
- dla czujnika BK8314: ok. 20, 40, 60 mV

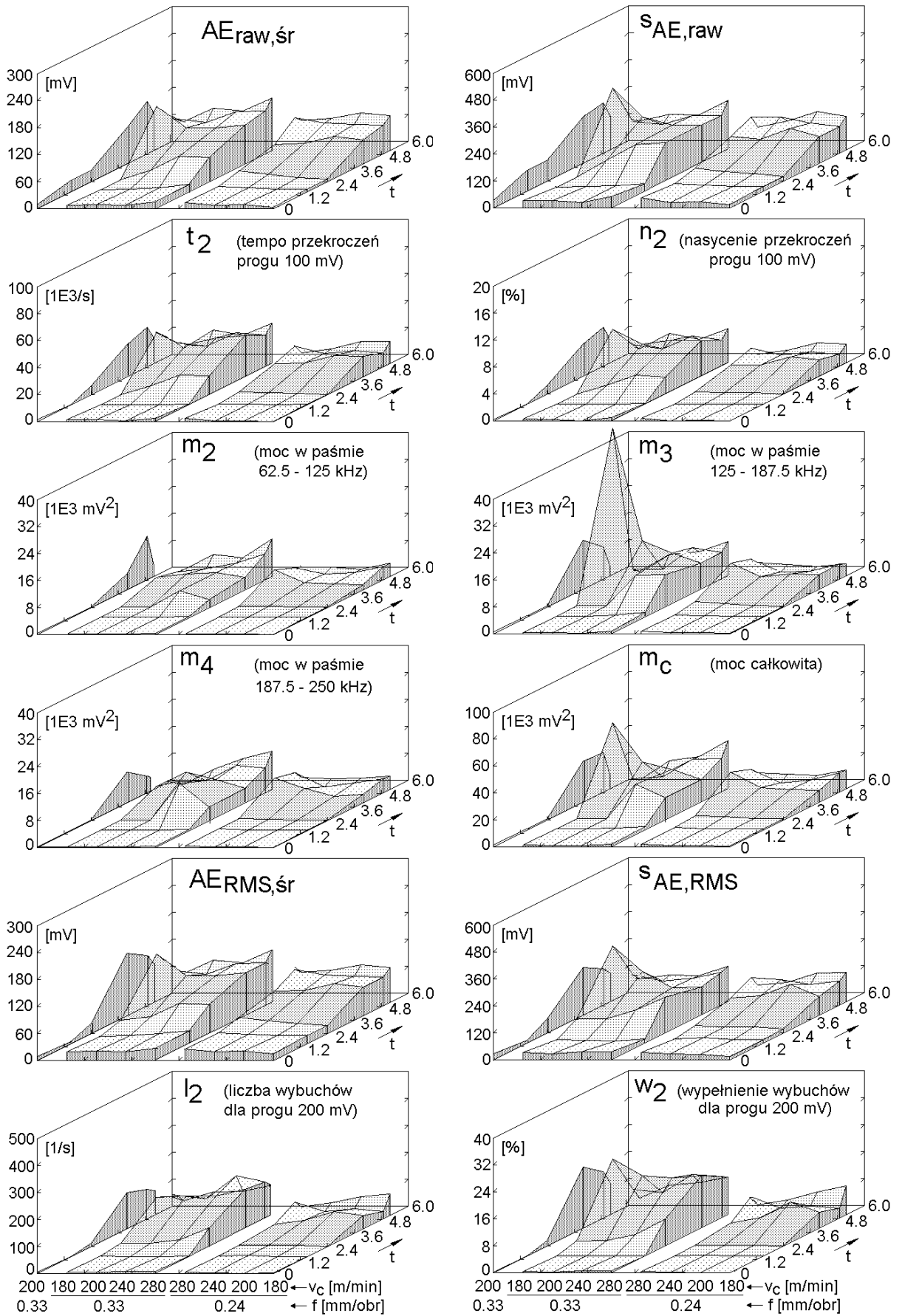
Przy częstotliwości próbkowania 1 MHz otrzymuje się widmo sygnału w zakresie 0÷500 kHz. Zakres ten podzielono na osiem pasm i analizie poddawano moc sygnału w pasmach 2÷6, czyli m_2 dla 62.5÷125 kHz, m_3 dla 125÷187.5 kHz, m_4 dla 187.5÷250 kHz, m_5 dla 250÷312.5 kHz oraz m_6 dla 312.5÷375 kHz. Ponadto wyznaczano całkowitą moc sygnału m_c .

Na rysunku 3.27 przedstawiono dla przykładu wyniki pomiarów większości miar AE, uzyskane w próbie S04. Widoczna jest znaczna zbieżność charakteru zmienności wszystkich miar, niezależnie od tego, że są one wyrażane w różnych jednostkach lub mają różne zakresy maksymalnych wartości. Na przykład wzrost wartości w czwartym przejściu i spadek w piątym dla pierwszego zestawu parametrów skrawania jest charakterystyczny dla wszystkich miar z wyjątkiem m_2 i m_4 . Spowodowany on został pojawieniem się kilku wybuchów o nietypowym (skupionym wokół częstotliwości 164 kHz) widmie i jest szczególnie dobrze widoczny w przebiegu m_3 . Zgodność przebiegu pozostałych miar AE jest zrozumiała - są związane z amplitudą sygnału, którego widmo z reguły bardziej oddaje charakterystykę rezonansowego czujnika niż samego sygnału. Podobną zgodność zaobserwowano we wszystkich próbach.

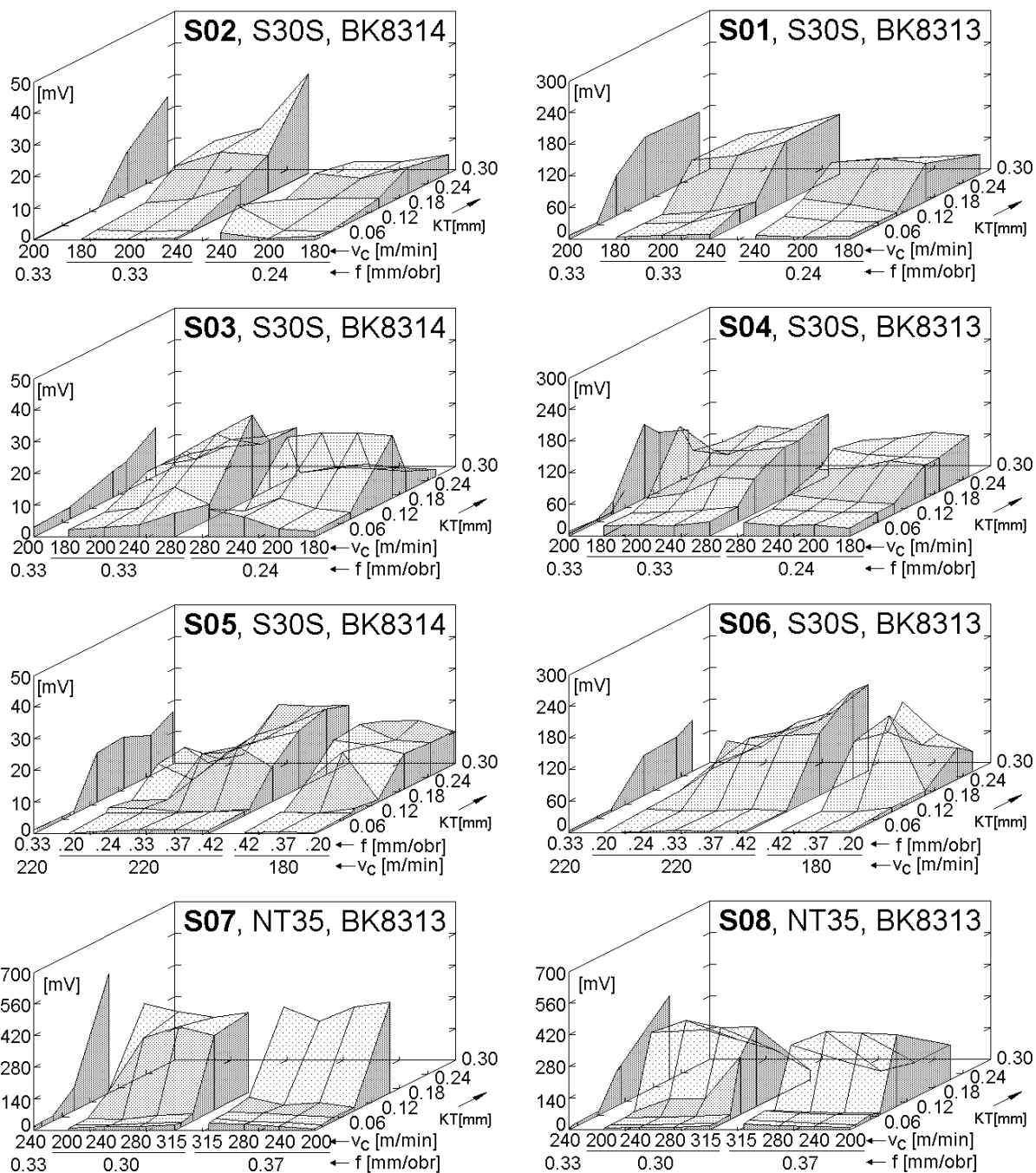
Dokładniejsze przeanalizowanie związku między pomiarami AE umożliwia wyznaczenie współczynników korelacji linowej między nimi w próbach, w których stosowano ten sam czujnik i materiał ostrza. W tabelicy 3.3 zestawiono dla przykładu te współczynniki dla miar sygnału oryginalnego uzyskane dla czujnika BK8313 przy skrawaniu ostrzem S30S. Jak widać miary AE są bardzo ściśle skorelowane - wszystkie współczynniki korelacji przekraczają 0.9. Dla mocy sygnału w pasmach oraz miar sygnału zdemodulowanego współczynniki te są niższe, jednakże w dalszym ciągu bardzo wysokie - powyżej 0.7.

Tablica 3.3. Współczynniki korelacji między pomiarami AE w próbach S01, S04, S06

	$AE_{raw,śr}$	$S_{AE,raw}$	t_1	n_1	t_2	n_2	t_3	n_3
$AE_{raw,śr}$	1	0.968	0.967	0.972	0.957	0.952	0.947	0.934
$S_{AE,raw}$	0.968	1	0.931	0.947	0.945	0.951	0.949	0.949
t_1	0.967	0.931	1	0.991	0.974	0.949	0.942	0.907
n_1	0.972	0.947	0.991	1	0.992	0.980	0.974	0.950
t_2	0.957	0.945	0.974	0.992	1	0.993	0.990	0.970
n_2	0.952	0.951	0.949	0.980	0.993	1	0.998	0.991
t_3	0.947	0.949	0.942	0.974	0.990	0.998	1	0.993
n_3	0.934	0.949	0.907	0.950	0.970	0.991	0.993	1



rys. 3.27. Przebiegi miar AE uzyskane w próbce S04.



rys. 3.28. Zależność $AE_{RMA,sr}$ od zużycia ostrza i parametrów skrawania we wszystkich próbach.

Podobne wyniki uzyskano dla pozostałych dwu zestawów czujnik - materiał ostrza. Oznaczają one, iż wszystkie miary AE zawierają bardzo zbliżoną informację. W celu racjonalnego wyboru jednej z nich jako symptomu stanu narzędzia, a przynajmniej redukcji liczby miar, należy przeanalizować ich powiązanie (korelację) ze zużyciem ostrza. Na rysunku 3.28 zestawiono przebiegi $AE_{RMS,sr}$ uzyskane we wszystkich próbach. Można na nim prześledzić wpływ zużycia ostrza (tu głębokość zółbka na powierzchni natarcia) oraz prędkości skrawania i posuwu na wartość skuteczną sygnału. Wpływ ten wydaje się być ewidentny, bardzo wyraźny, niemniej jednak raczej trudny do opisu prostą funkcją. Pomińmy tu wpływ parametrów skrawania jako nie będący przedmiotem tej analizy.

Do określenia stopnia powiązania między miarami AE i *KT* przy pomocy współczynnika korelacji, posłużymy się metodyką opisaną w punkcie 3.2.1 przy analizie zależności miar sił skrawania od zużycia ostrza, stosując to samo co tam opisane grupowanie miar AE względem *KT*.

Wyniki zamieszczono w tablicy 3.4 pogrubieniem wyróżniając największe wartości. Jak widać, spośród miar oryginalnego sygnału AE najlepiej ze stanem ostrza skorelowana jest średnia wartość sygnału lub tempo impulsów dla pierwszego poziomu dyskryminacji. Jeszcze lepsze wyniki uzyskują analogiczne miary sygnału zdemodulowanego - uśredniona wartość skuteczna i liczba wybuchów na sekundę. Jeśli idzie o moc sygnału, wyraźnie korzystniejsze jest śledzenie pasm sąsiadujących z pasmem, w którym sygnał osiąga maksimum (tu 200 kHz, pasmo m_3) i wszystkie one mogą służyć jako symptomy stanu narzędzia.

Tablica 3.4. Współczynniki korelacji między miarami AE, a głębokością zółbka

czujnik, ostrze	$AE_{raw,śr}$	$S_{AE,raw}$	t_1	n_1	t_2	n_2	t_3	n_3
BK8313 NT35	0.894	0.876	0.669	0.661	0.652	0.647	0.643	0.636
BK8313 S30S	0.817	0.763	0.819	0.785	0.744	0.715	0.708	0.673
BK8314 S30S	0.636	0.566	0.668	0.653	0.611	0.602	0.584	0.574

czujnik, ostrze	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_c
BK8313 NT35	0.790	0.764	0.813	0.877	0.751	0.833
BK8313 S30S	0.897	0.506	0.648	0.742	0.830	0.633
BK8314 S30S	0.620	0.513	0.522	0.539	0.522	0.587

czujnik, ostrze	$AE_{RMA,śr}$	$S_{AE,RMS}$	l_1	w_1	l_2	w_2	l_3	w_3
BK8313 NT35	0.904	0.903	0.931	0.922	0.928	0.930	0.928	0.923
BK8313 S30S	0.752	0.687	0.570	0.547	0.663	0.632	0.627	0.581
BK8314 S30S	0.614	0.607	0.636	0.623	0.598	0.587	0.567	0.560

Z przedstawionych analiz wynika, że różnice między przeanalizowanymi miarami AE są niewielkie, a za symptom zużycia ostrza można przyjąć taką miarę, która jest w konkretnych warunkach sprzętowych najłatwiejsza do wyznaczenia.

Oryginalne podejście do oceny zużycia ostrza na podstawie pomiarów AE zaprezentowali Kannatey-Asibu i Dornfeld [135], którzy stwierdzili, iż wprawdzie wartość skuteczna AE jest skorelowana ze zużyciem ostrza, jednakże zależność ta „nasyca się”, a zatem jest mało czuła szczególnie dla wyższych wartości zużycia (rys. 3.29). Zaproponowali oni posłużenie się rozkładem β sygnału AE_{RMS} :

$$\beta(r, s) = \int_0^1 [AE_{RMS}^{r-1} (1 - AE_{RMS}^{s-1})] dAE_{RMS} \quad (3.10)$$

gdzie: r, s - parametry rozkładu beta :

$$r = \frac{AE_{RMS,śr}}{W} (AE_{RMS,śr} - AE_{RMS,śr}^2 - W) \quad (3.11)$$

$$s = \frac{1 - AE_{RMS,śr}}{W} (AE_{RMS,śr} - AE_{RMS,śr}^2 - W) \quad (3.12)$$

W - wariancja AE_{RMS} ,

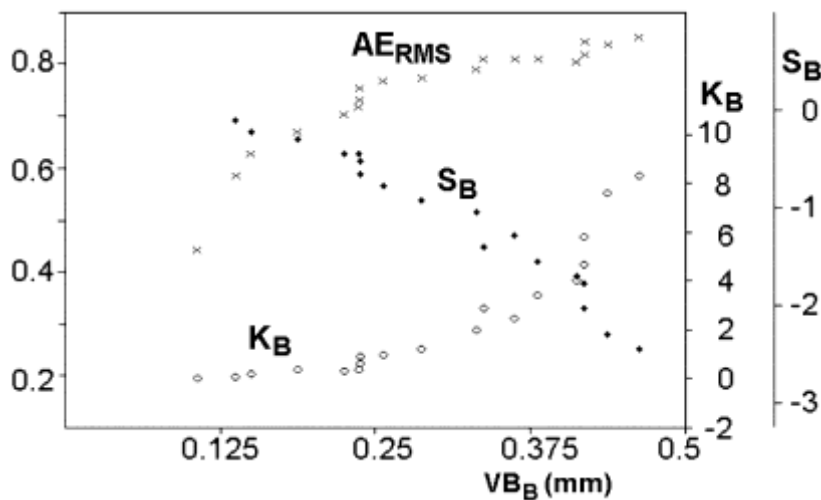
Skośność rozkładu beta opisana jest wzorem:

$$S_B = \frac{2 \cdot (s-r)}{r+s+2} \left(\frac{r+s+1}{rs} \right)^{0.5} \quad (3.13)$$

zaś kurtoza zależnością:

$$K_B = 6 \cdot \frac{(r-s)^2(r+s+1) - rs(r+s+2)}{rs(r+s+2)(r+s+3)} \quad (3.14)$$

Okazało się, że skośność i kurtoza rozkładu β wartości skutecznej AE są zależne od zużycia powierzchni przyłożenia, przy czym nachylenia tych zależności wzrastają wraz ze zużyciem (rys. 3.26).

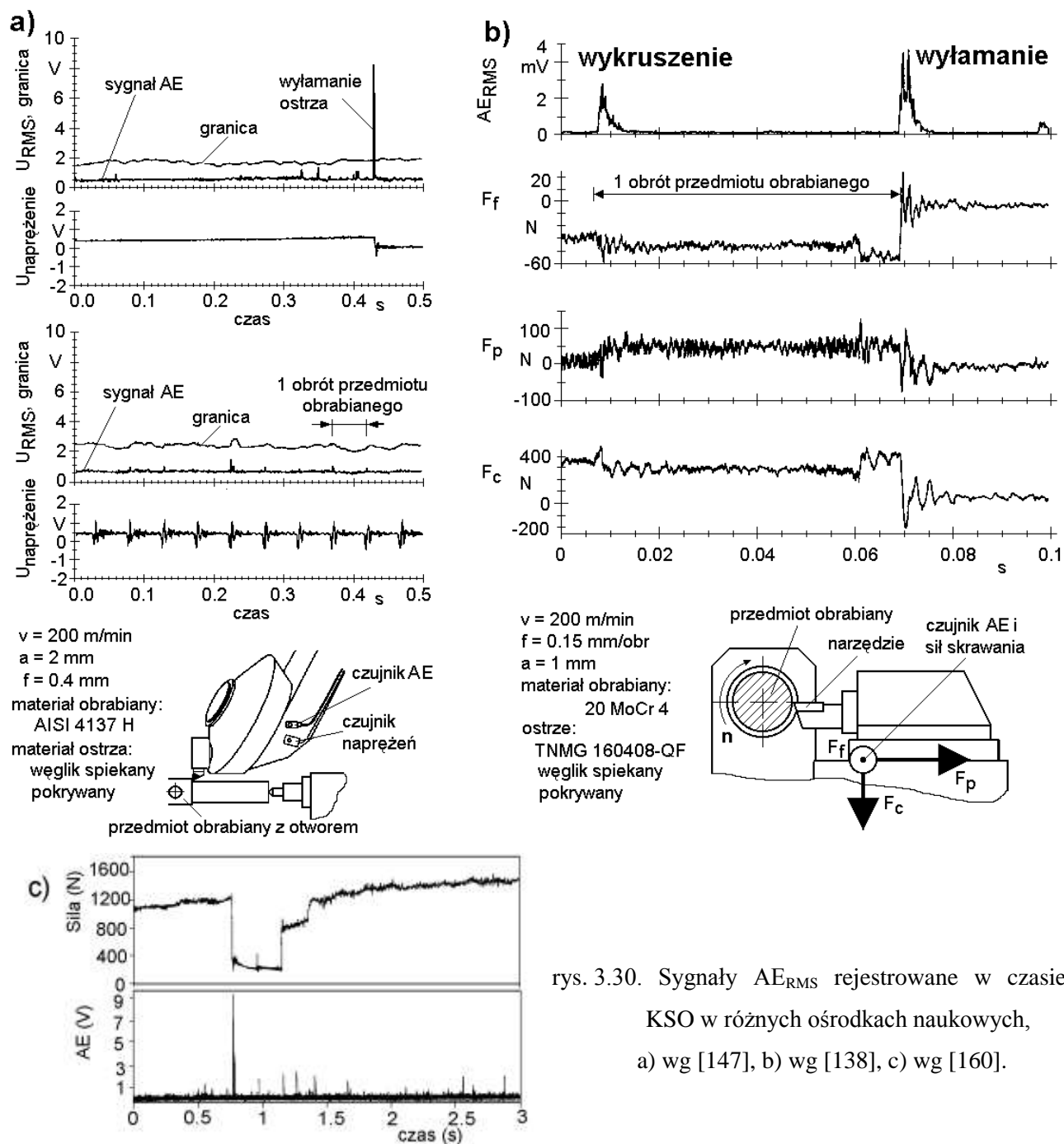


rys. 3.29. Zależność amplitudy skutecznej sygnału (AE_{RMS}) oraz skośności (S_B) i kurtozy (K_B) rozkładu AE_{RMS} od zużycia ostrza wg [135].

3. 3. 3. Emisja akustyczna w trakcie katastroficznego stępienia ostrza

Powstawaniu i rozszerzaniu się mikropęknięć materiału narzędzia towarzyszy wybuchowy wzrost (i wykładnicze opadanie) wartości sygnału AE, proporcjonalne do powierzchni pęknięcia [135]. Wielkość tego wzrostu nie zależy od szybkości obciążenia (prędkości skrawania) co wykazał Moriwaki [175] w badaniach wytrzymałościowych, w których próbki z węglika spiekanego P20 poddawane były zginaniu (do złamania) statycznemu i dynamicznemu.

Lan i Dornfeld [155], którzy badali przydatność sygnałów AE do wykrywania KSO stwierdzili, że wyłamanie lub wykruszenie ostrza powoduje silny wybuch AE, przy czym wartość AE_{RMS} jest proporcjonalna do pola powierzchni wyłamania. Podobne wyniki były otrzymywane później przez wielu badaczy (np. [138, 147, 160] rys. 3.30).

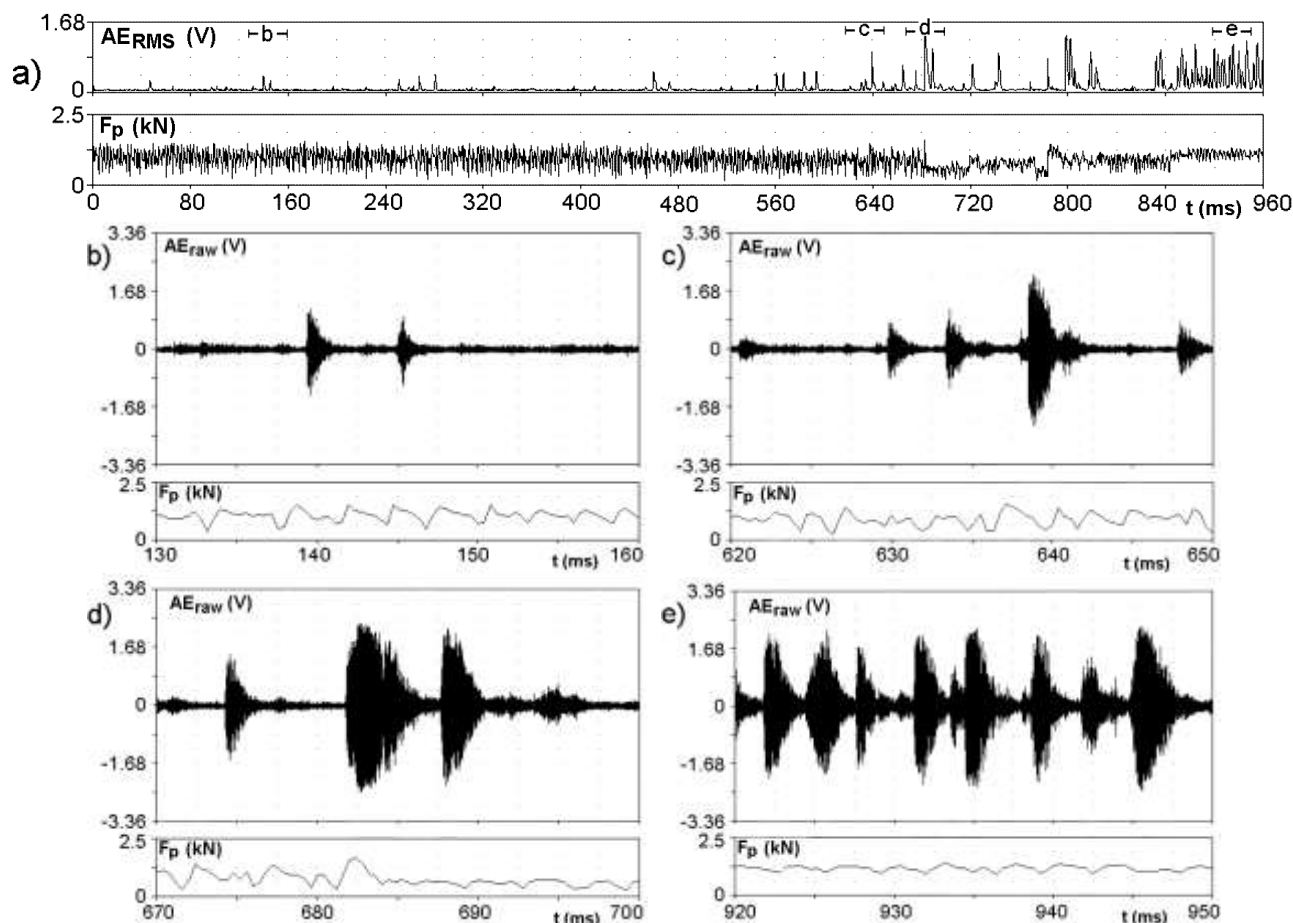


rys. 3.30. Sygnały AE_{RMS} rejestrowane w czasie KSO w różnych ośrodkach naukowych, a) wg [147], b) wg [138], c) wg [160].

Niezależnie od szeregu innych metod wykrywania KSO w oparciu o sygnały AE, opisanych w [111, 112, 185], w literaturze dominuje pogląd, że ta znaczna amplituda AE_{RMS} towarzysząca KSO może być wykorzystana jako symptom KSO [25, 69, 99, 175, 218].

Podobne wyniki otrzymywano także w niektórych badaniach prowadzonych w ITM PW. Na rys. 3.31a przedstawiono przebieg zdemodulowanego sygnału AE (AE_{RMS}) oraz siły odporowej F_p bezpośrednio przed i w trakcie wylamania ostrza (porównaj rys. 3.18a) [8,131]. Do pomiaru AE zastosowano tu czujnik firmy Brüel&Kjaer typu 8313 (BK8313) o częstotliwości rezonansowej 200 kHz. KSO było spowodowane nadmiernym zużyciem ostrza. Jak widać na tym rysunku, siła skrawania przed KSO była bardzo zakłócona. Fragment przebiegu tej siły wraz z przebiegiem oryginalnego sygnału AE pokazano na rys. 3.28b. Spadki i

wzrosty siły występowały co ok. 3 ms, co odpowiada (dla $v_c = 260$ m/min) ok. 12 mm drogi skrawania. Ponieważ występował tu wiór łukowy luźny łamany o powierzchnię przejściową o zbliżonej długości, można przyjąć, iż zakłócenia siły pochodziły właśnie od wiórów. Warto podkreślić, że sygnał AE nie był skorelowany z tymi zakłóceniami siły, co również widać na rys 3.31b. Wybuchy AE były dość nieregularne, a ich amplituda osiągała ok. 1.2 V (AE_{RMS} do ok. 0.5 V). W chwili odpowiadającej ok. 640 ms czasu rejestracji pojawił się znacznie silniejszy wybuch AE (rys. 3.31a i c). Towarzyszyło mu słabo widoczne zakłócenie siły skrawania. Około 40 ms później (rys. 3.31a i d) nastąpiło wyłamanie krawędzi skrawającej wyraźnie widoczne w przebiegu F_p . Tym razem amplituda AE wzrosła aż do ok. 2.5 V, a więc była dwukrotnie wyższa niż w czasie wybuchów poprzedzających KSO. W czasie obrotu przedmiotu obrabianego po wyłamaniu krawędzi skrawającej wystąpiły kolejne wykruszenia widoczne w sygnale AE i F_p . Dwa obroty PO później skrawanie wyłamanym ostrzem powodowało bardziej równomierną siłę skrawania (zmiana postaci wióra) lecz bardzo częste i silne wybuchy AE (rys. 3.31a i e).



rys. 3.31. Przebieg zdemodulowanego (a) i oryginalnego sygnału AE (b, c, d, e) oraz odporowej siły skrawania F_p bezpośrednio przed i w trakcie wyłamania ostrza z węglika spiekane S30S zarejestrowany w ITM PW [131].

Jak już stwierdzono, zbliżone wyniki uzyskano w wielu próbach prowadzonych w ITM PW. Jednakże zauważono także, iż w wielu przypadkach wybuch AE towarzyszący KSO nie jest tak wyraźny lub nie występuje wcale. Szczególnie w czasie obróbki przerywanej łatwo może on być „ukryty” przez zakłócenia związane z wejściem narzędzia w materiał. Stąd też postanowiono poświęcić temu zagadnieniu oddzielny etap badań i analiz [111, 112, 131, 185] opisany poniżej.

Materiałem obrabianym była stal 45 (200HB) w postaci wałków 150x700 z rowkiem wzdłużnym o szerokości 20 mm. W niektórych testach korzystano także z wałków bez rowków. Stosowano noże tokarskie z płytkami wymiennymi SNUN 120408 z węglików konwencjonalnych S30S (P30), pokrywanych TiC-TiN oraz z ceramiki Al_2O_3 , a także z płytkami TNMG 160408 pokrywanymi TiC-TiN. Stosowano następujące parametry skrawania: $v_c = 120 \div 300$ m/min, $f = 0.33 \div 0.54$ mm/obr, $a_p = 2.5 \div 4.0$ mm.

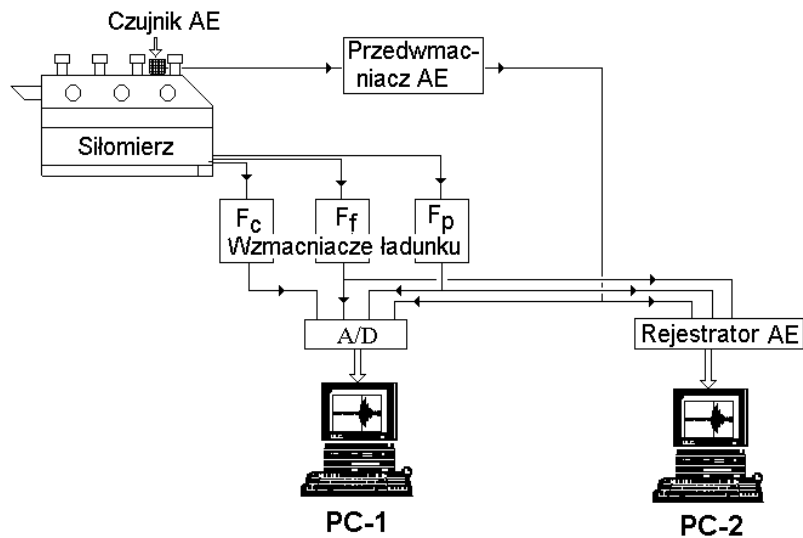
Przeprowadzono dwie serie prób. W pierwszej zastosowano szerokopasmowy (50÷400kHz) czujnik firmy Kistler typ 8152A1. Był on podłączony do wzmacniacza 5125A1 wyposażonego w filtr górnoprzepustowy 50 kHz i dolnoprzepustowy 1000 kHz oraz układ wyznaczania wartości skutecznej sygnału (AE_{RMS}) ze stałą całkowania 1.2 ms.

W drugiej serii pomiarów zastosowano czujnik rezonansowy (200 kHz) firmy Brüel&Kjær typ 8313 współpracujący z przedwzmacniaczem 2637 o stałym wzmacnieniu 40 dB [193]. W celu uniknięcia jego przesterowania (patrz rozdział 5.2), zostało one obniżone do 20 dB. Przedwzmacniacz był przystosowany do czujnika dzięki filtrowi oktawowemu 200 kHz. Surowy sygnał AE był następnie przekazywany do zbudowanego w ITM PW [131] wzmacniacza AE o wzmacnieniu regulowanym w zakresie 2÷100 dB (patrz rozdział 5.2). Umożliwiał on także uzyskanie wartości skutecznej ze stałą całkowania 0.03÷10ms – w tej serii pomiarów stosowano 0.1ms.

W celu umożliwienia rozpoznawania momentu, w którym występowało katastroficzne stępienie ostrza, w trakcie badań rejestrowano trzy składowe siły skrawania przy pomocy siłomierza firmy Kistler 9263. Schemat stanowiska badawczego stosowanego w tych badaniach przedstawiono na rys. 3.11.

Czujnik AE był mocowany na górnej powierzchni siłomierza przy pomocy uchwytu magnetycznego. W celu zapewnienia sprzężenia akustycznego, wszystkie powierzchnie stykowe były smarowane olejem.

Do rejestracji wyników pomiarów wykorzystano dwa niezależne układy akwizycji danych. Pierwszy z nich składał się z karty 12-bitowego przetwornika A/C zainstalowanej w komputerze osobistym. Umożliwiał on rejestrację sygnałów niskoczęstotliwościowych z częstotliwością próbkowania 2 kHz przez czas ok. 30 s. Przy jego pomocy rejestrowano przebiegi sił skrawania oraz wartości skutecznej AE (AE_{RMS}) i zapisywano je w plikach typu *.AC. Plik taki zawiera tekstowy nagłówek, szereg danych pomocniczych jak częstotliwość próbkowania, liczba kanałów, liczba próbek, oznaczenia zmiennych oraz kolejno kanałami wyniki pomiarów w postaci liczb całkowitych („integer”).



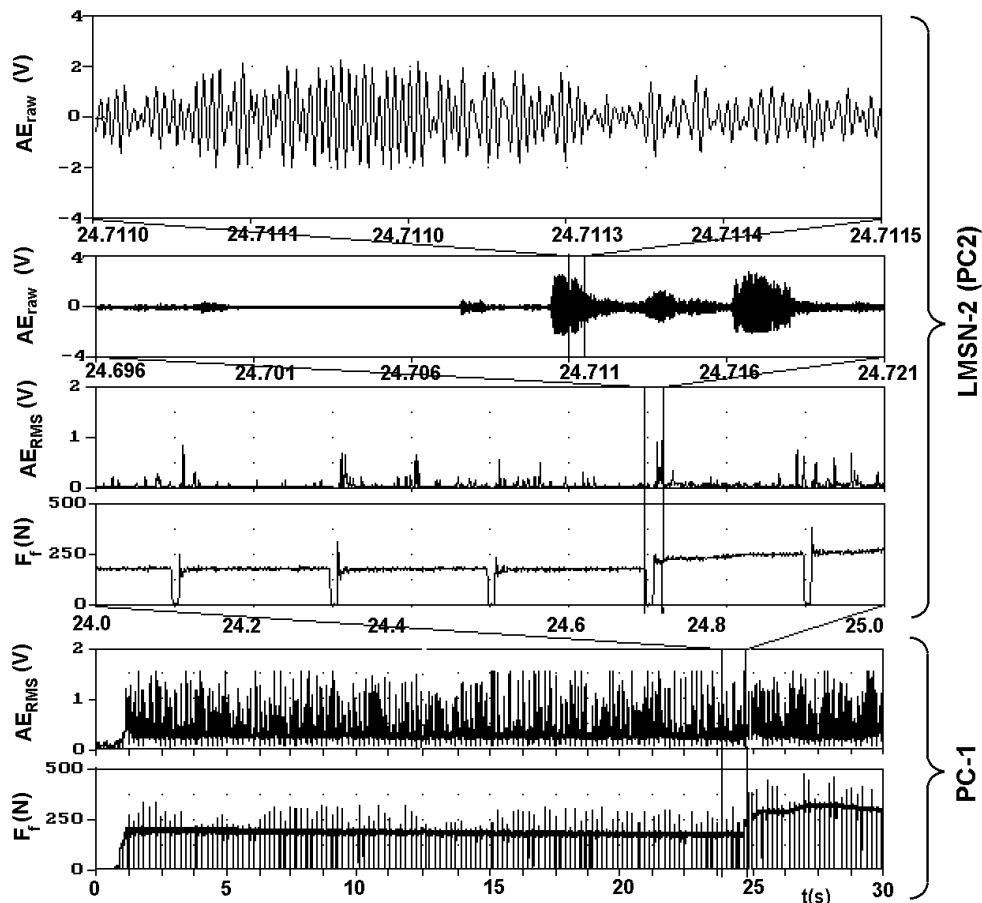
rys. 3.32. Schemat układu pomiarowego stosowanego w badaniach przebiegu sił skrawania i AE w czasie KSO.

Drugi układ akwizycji danych to Laboratoryjny Monitor Stanu Narzędzia LMSN-2 opisany w rozdziale 5.3 [37, 101, 82]. Składa się on z Rejestratora AE wyposażonego w trzy wejścia niskoczęstotliwościowe i jedno wysokoczęstotliwościowe (do 4MHz), komputera osobistego i oprogramowania. Pozwala on m.in. na wykrywanie katastroficznego stopnia ostrza w oparciu o pomiary sił skrawania (patrz rozdział 6.3). Wykruszenie lub wyłamanie ostrza trwa ok. 2 ms. Możliwy (ze względu na dostępną pamięć SRAM) czas rejestracji oryginalnego sygnału AE_{raw} wynosi 1 s przy częstotliwości próbkowania 1 MHz, nie jest więc możliwe uchwycenie momentu KSO przy ręcznym uruchamianiu rejestracji. Wykorzystanie sygnału wykrycia KSO do zatrzymania pracy bufora pierścieniowego umożliwiło zarejestrowanie przebiegu sił skrawania i AE przed, w trakcie i bezpośrednio po KSO – jak na rys. 3.31. Rejestrowano AE_{RMS} , F_p , F_f oraz AE_{raw} przez jedną sekundę czasu skrawania (0.75 s przed wykryciem KSO i 0.25 s po takim wykryciu). Wyniki były zapisywane w plikach typu *.RAE o strukturze nieco podobnej do *.AC, z tym że sygnały AE_{raw} były zapisane w formacie liczb ośmiobitowych („byte”).

Przykładowe wyniki pomiarów uzyskane w próbie B11 przy pomocy obu wspomnianych w poprzednim punkcie systemów akwizycji danych przedstawiono na rys. 3.33. W próbie tej katastroficzne stopnie ostrza wystąpiło po 24.9 s czasu skrawania. Górna część tego rysunku to wyniki zarejestrowane przy pomocy 2-go systemu w pliku B11.RAE bezpośrednio przed i po wykryciu KSO przez detektor zainstalowany w LMSN-2. Najwyższy wykres obejmuje zaledwie 0.5 ms czasu skrawania i przedstawia oryginalny sygnał AE_{raw} towarzyszący wykruszeniu ostrza, które spowodowało widoczny na niższych przebiegach skokowy wzrost siły posuwowej F_f . Rysunki niższe przedstawiają przebiegi sił skrawania i wartości skutecznej AE_{RMS} uzyskane w tej próbie, przy czym obejmują one coraz to większy zakres czasu skrawania. Dwa najniższe pochodzą z 1-go systemu akwizycji danych i zostały zarejestrowane w pliku

B11.AC obejmującego cały czas skrawania w przejściu. Mimo iż zarejestrowane były wszystkie trzy siły skrawania, tu przedstawiono jedynie składową F_f , w której przebiegu najbardziej uwidoczniło się KSO.

Jak widać, zastosowana technika pomiarowa umożliwiła zarejestrowanie wybuchów AE trwających nie więcej niż 0.5 ms i precyzyjne skorelowanie ich w czasie z przebiegiem sił skrawania trwającym 30 s.



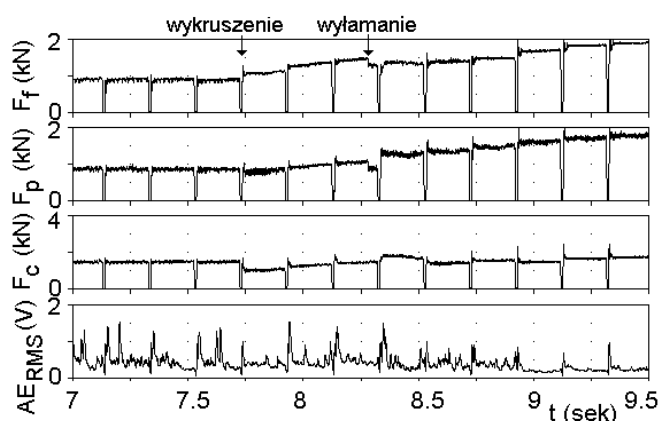
rys. 3.33. Przebiegi oryginalnego (AE_{raw}) i zdemodulowanego (AE_{RMS}) sygnału emisji akustycznej skorelowane z przebiegiem siły posuwowej, zarejestrowane dzięki detektorowi KSO (próba B11).

Wszystkie wykonane eksperymenty zajęły ok. 8 godzin czasu skrawania. Pojedyncza próba z założenia trwała 30 sekund (czas, jaki mógł być objęty próbkowaniem), jednakże w przypadku wystąpienia KSO próba była natychmiast przerywana. Zarejestrowane w postaci cyfrowej wyniki pomiarów AE i sił skrawania były wstępnie analizowane, a do dalszej analizy wybierano te próby, które były w jakiś sposób interesujące, tzn. spełniały jedno z poniższych kryteriów:

- wystąpiło katastroficzne stępienie (51 przypadków),
- nie wystąpiło katastroficzne stępienie ostrza lecz zostało wykryte (fałszywy alarm),
- KSO nie zostało ani wykryte, ani zaobserwowane w czasie próby, jednakże wstępna analiza wyników pomiarów wykazała istotne zakłócenia sił skrawania lub AE_{RMS} ,

W sumie wykonano blisko tysiąc prób skrawania, z czego do dalszej analizy wybrano 70. W czasie obróbki przerywanej siły skrawania spadają do zera w czasie przechodzenia ostrza przez przerwy (wzdłużny

rowek w toczonym wałku). Uderzenie towarzyszące ponownemu wejściu w materiał powodowało szybki wzrost sił skrawania, które po krótkich zakłóceniach powracały do wartości sprzed przerwy. Katastroficzne stępienie ostrza najczęściej występowało właśnie w czasie tego uderzenia. Objawiało się ono tym, że średni poziom sił skrawania był inny niż przed przerwą. Charakterystyczne było to, że w sile odporowej i posuwowej F_p i F_f bardziej uwidaczały się KSO niż w sile skrawania F_c . Jeśli ostrze ulegało wykruszeniu, siły wzrastały, jak to jest widoczne dla 7.7 s czasu skrawania na rys. 3.34 lub 24.7 s na rys. 3.33. Wyłamaniom krawędzi skrawającej towarzyszyły spadki sił skrawania trwające jeden obrót przedmiotu obrabianego, po czym następowały kolejne wzrosty jak po wykruszeniu ostrza. Przypadek taki widoczny jest na rys. 3.34 po 8.3 s czasu skrawania. Warto podkreślić, że także tu siła F_c niemal nie uległa zmianie. Opisanie tu zmiany sił skrawania były już opisane w punkcie 3.2.2, stąd tu tylko skrótowo je przypomniano.

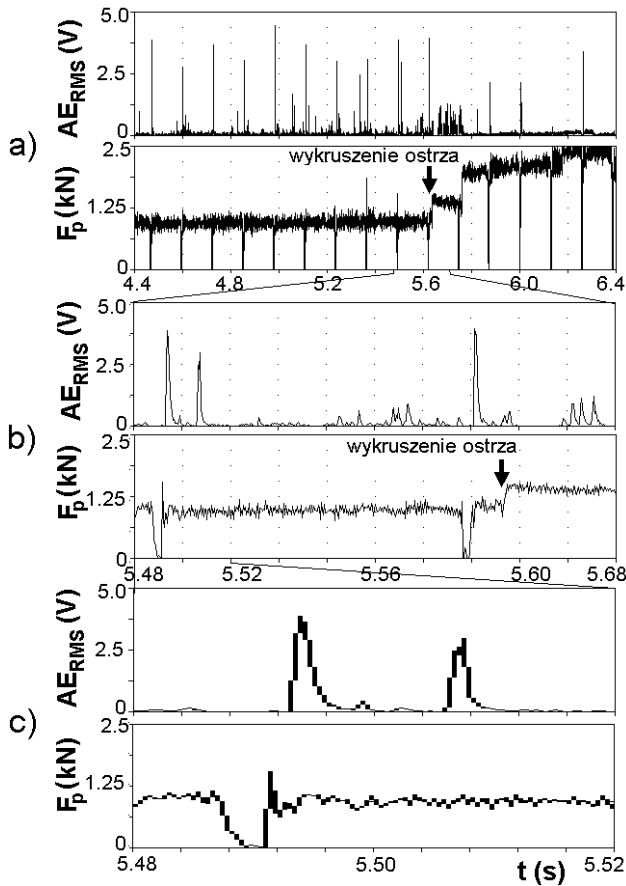


rys. 3.34. Zmiany sił skrawania towarzyszące wyłamaniom i wykruszeniom ostrza.

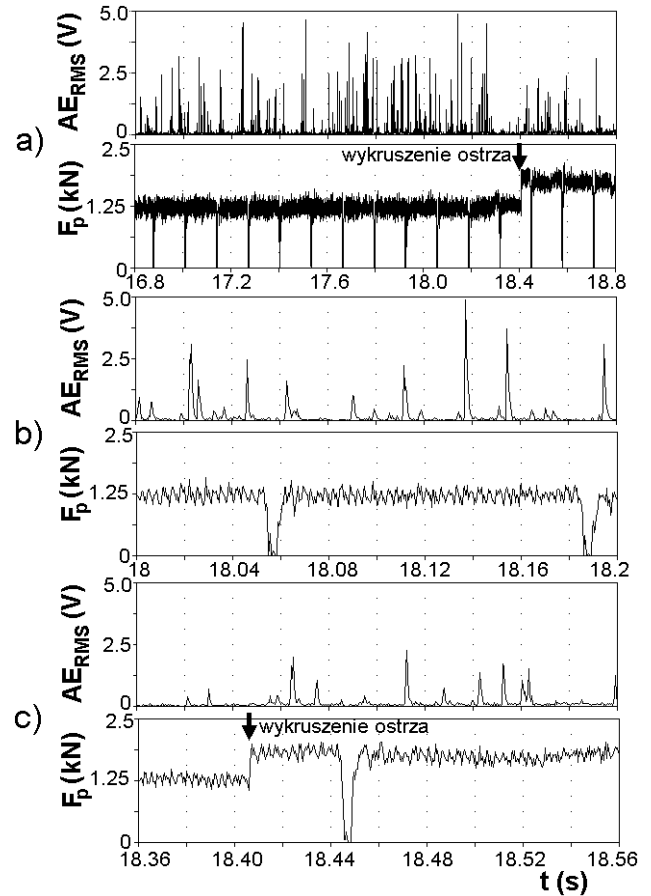
Wejściu narzędzia w materiał po przerwie w obróbce z reguły towarzyszyły wyraźne wybuchy AE (rys. 3.35). Należy przy tym podkreślić, iż maksimum sygnału AE_{RMS} pojawiało się już po wejściu w materiał, nie było więc związane z uderzeniem lecz raczej z kształtowaniem się nowego wióra po uderzeniu (patrz rys. 3.35). Te wybuchy AE były często większe niż towarzyszące katastroficznemu stępieniu ostrza, a nade wszystko te pierwsze mogły „zamaskować” drugie. Ciekawy przypadek zarejestrowano w teście P10-4 (rys. 3.35), kiedy to wykruszenie ostrza wystąpiło ok. 14 ms po jego wejściu w materiał po kolejnej przerwie, co wyraźnie jest widoczne w przebiegu sił skrawania. Wybuch AE towarzyszący temu wykruszeniu jest niewielki, znacznie słabszy niż związany z wejściem w materiał i trudno w ogóle przypisywać go KSO. W próbie P10-9 (rys. 3.36) również wykruszenie nastąpiło między kolejnymi uderzeniami. W tej próbie jednakże wybuchy AE_{RMS} były częstsze, a te związane z wejściami narzędzia w materiał nie były wcale największe (patrz rys. 3.36b). Podobnie jak w próbie P10-4, tu również KSO nie spowodowało wybuchu AE.

Warto podkreślić, że często sygnał AE po KSO zmniejszał się. Było tak we wszystkich przedstawionych wyżej przypadkach. Szczególnie wyraźnie zjawisko to wystąpiło w próbie P-19 (rys. 3.37)

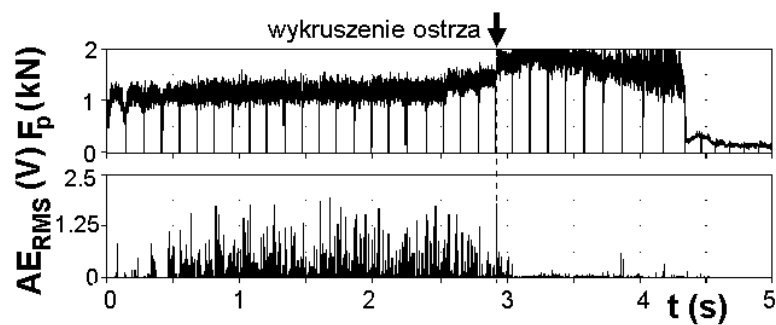
Tak więc już pobieżne obserwacje otrzymanych wyników wskazywały, że bezpośrednia amplituda sygnału AE_{RMS} jest w przypadku skrawania przerywanego nieprzydatna do wykrywania KSO. Niemniej jednak kształt sygnału AE_{RMS} ulegał widocznym zmianom po KSO. Znalezienie miar sygnału AE wrażliwych na te zmiany było celem analiz opisanych niżej.



rys. 3.35. Wybuchy AE towarzyszące wejściom narzędzia w materiał i wykruszeniom ostrza (próba P10-4).



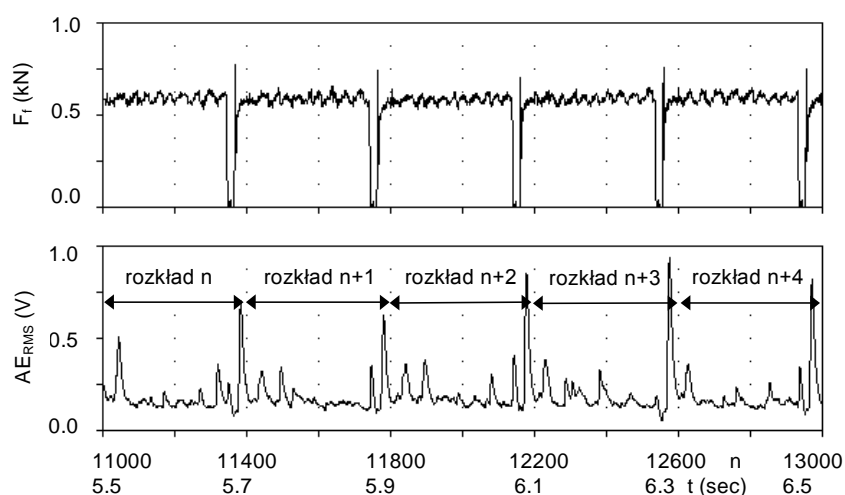
rys. 3.36. Wybuchy AE towarzyszące wejściom narzędzia w materiał i wykruszeniom ostrza (próba P10-9).



rys. 3.37. Osłabienie sygnału AE po wykruszeniu ostrza (próba P10-10).

Chwilowa wartość AE_{RMS} ma w dużej mierze charakter losowy, co wiąże się z losowym charakterem zjawisk w strefie skrawania powodujących wybuchy AE. Obserwowane zmiany kształtu przebiegu sygnału mają również charakter w dużej mierze przypadkowy. Stąd też za właściwe uznano zastosowanie metod statystycznych do poszukiwania miar sygnału wskazujących na KSO. Tu postanowiono wypróbować, zaproponowane przez Kannatey-Asibu i Dornfelda [135] do diagnostyki naturalnego zużycia ostrza, skośność i kurtozę rozkładu AE_{RMS} przy założeniu, że jest to rozkład β (patrz wyżej, wzory 3.10 ÷ 3.14).

Istotnym zagadnieniem był wybór liczby próbek branych do wyznaczania rozkładu. Z jednej strony powinna być ona na tyle duża, by była reprezentatywna, z drugiej zaś jak najkrótsza, ponieważ dopiero po zebraniu całej liczby można wyznaczyć poszukiwane parametry i otrzymać informację na temat ewentualnego KSO. Przy obróbce przerywanej, omówione poprzednio zakłócenia sygnału AE_{RMS} związane z wejściem narzędzia w materiał powodują, że liczba próbek jest określona przez czas trwania obrotu przedmiotu obrabianego. Dzięki temu w każdym rozkładzie jest jedno i tylko jedno wspomniane zakłócenie AE - rys. 3.38.

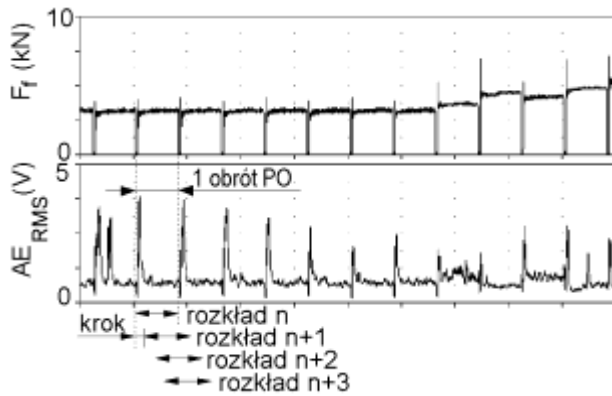


rys. 3.38. Niezbędna przy obróbce przerywanej liczba próbek w zestawie, obejmująca co najmniej jeden obrót przedmiotu obrabianego (próba B26-1).

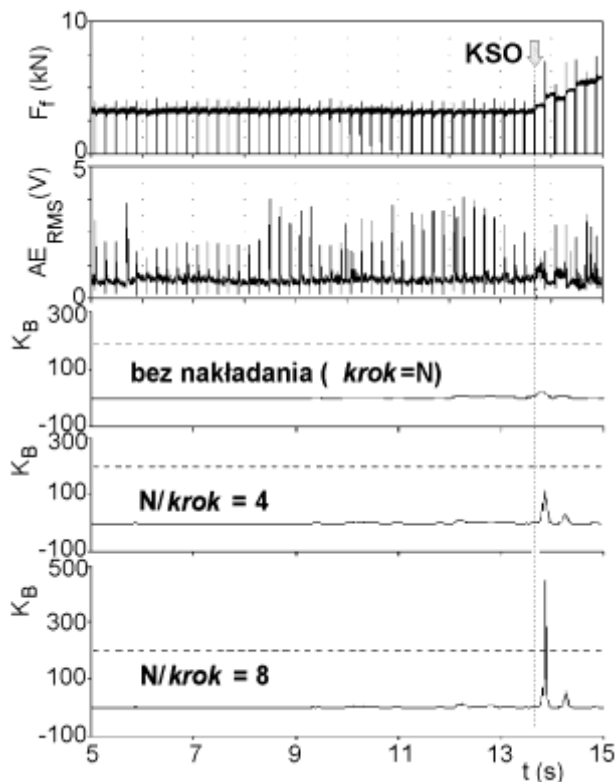
A zatem liczba próbek w zestawie branych do wyznaczania parametrów rozkładu jest iloczynem czasu trwania obrotu (czasu między kolejnymi przerwami w obróbce) i częstotliwości próbkowania. W przykładzie przedstawionym na rys. 3.38 prędkość obrotowa wynosiła 300 obr/min, czas między kolejnymi przejściami 0.2 s, częstotliwość próbkowania 2 kHz, a więc liczba próbek w zestawie równa była 400.

W celu zwiększenia częstotliwości uzyskiwania wyników, a przez to zwiększenia ich liczby i skuteczności wykrywania KSO postanowiono wyznaczać parametry rozkładu β z nakładających się zestawów próbek. Zasadę tę przedstawiono na rys. 3.39. Liczba próbek brana do obliczeń podobnie jak poprzednio odpowiada czasowi jednego obrotu wrzeciona, jednakże początki kolejnych zestawów próbek są od siebie odległe o *krok*. Parametrem charakterystycznym jest tu stosunek liczby próbek N w zestawie do

kroku. Przeanalizowano szereg wartości tego stosunku i jej wpływ na skuteczność wykrywania KSO. Okazało się, że wystarczające zagęszczenie otrzymywanych wyników oszacowania parametrów rozkładu AE_{RMS} uzyskano przy stosunku $N/krok$ równym 8. Dalsze zwiększanie tego stosunku mimo zwiększonej liczby niezbędnych obliczeń nie poprawiało ostatecznego rezultatu.



rys. 3.39. Nakładające się zestawy próbek brane do obliczania parametrów rozkładu (próba B20_1)

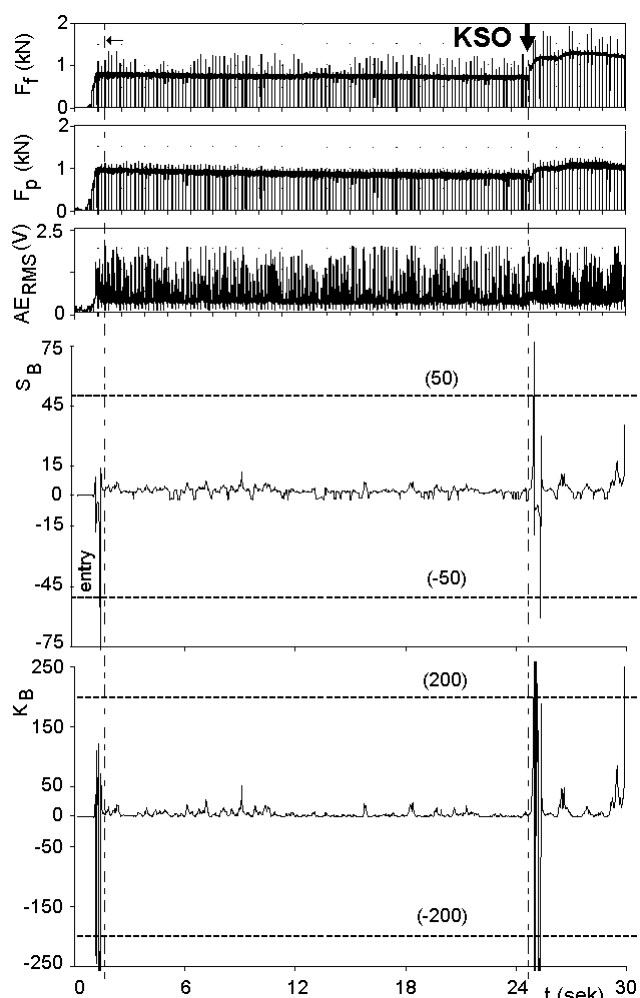


rys. 3.40. Wpływ stosunku N , do *kroku* z jakim określano początek zestawu, na przebieg kurtozy rozkładu β (K_B) w próbie B20_1.

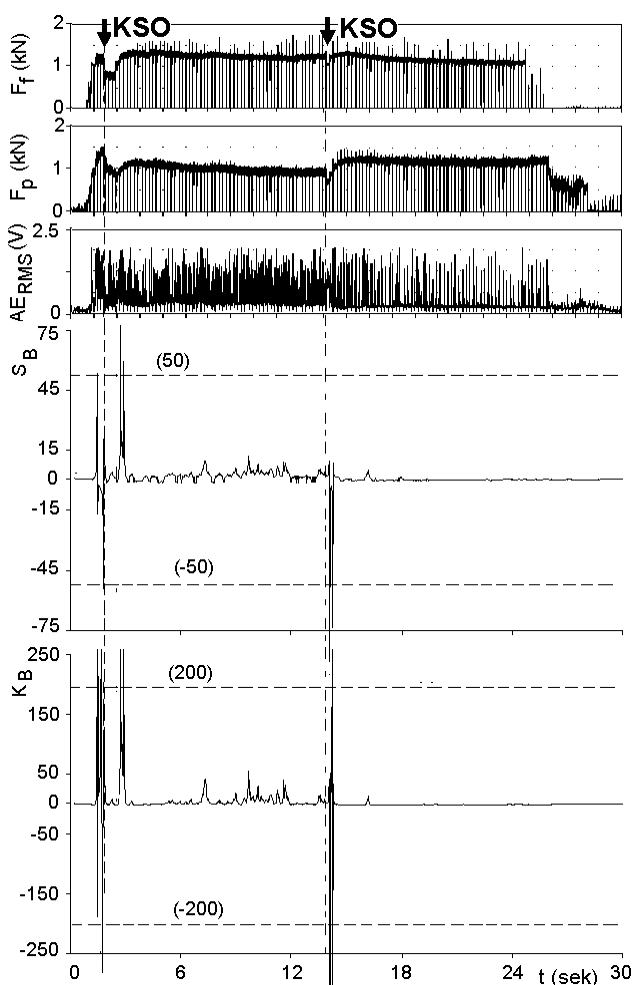
Na rysunku 3.40 przedstawiono przykładowe wyniki badania wpływu tego stosunku na skuteczność wykrywania KSO. Dla wszystkich wybranych prób wyznaczono przebiegi skośności i kurtozy rozkładu β w sposób opisany wyżej. Tu przedstawione zostaną jedynie przykładowe. Na wszystkich rysunkach zaznaczono poziomy ± 50 dla skośności i ± 200 dla kurtozy. Dobrano je oczywiście po przeanalizowaniu wszystkich prób. Przekroczenie któregoś z tych progów oznacza alarm KSO.

Na rys. 3.41 przedstawiono wyniki uzyskane w próbie B11, dość charakterystyczne dla większości prób. Mimo bardzo niejednostajnego przebiegu AE_{RMS} , zmienność skośności i kurtozy przez prawie cały czas trwania próby jest bardzo ograniczona, daleka od założonego dopuszczalnego pasma zmian ($S_B \pm 50$ i $K_B \pm 200$). KSO spowodowało bardzo duże zakłócenie zarówno skośności jak i kurtozy rozkładu β . W tym przypadku także początek skrawania pociągnął za sobą znaczne zakłócenia tych parametrów rozkładu. Oznacza to, że w celu uniknięcia fałszywych alarmów nadzór powinien być rozpoczynany kilka obrotów przedmiotu po rozpoczęciu skrawania.

W próbie B14b (rys. 3.42) poważne uszkodzenie krawędzi skrawającej nastąpiło kilka obrotów przedmiotu po rozpoczęciu skrawania, a zakłócenia S_B i K_B związane z tym początkiem zlewają się z pochodzącymi od KSO. Taki przypadek może więc oznaczać brak wykrycia przy rozpoczynaniu nadzoru w jakiś czas po rozpoczęciu skrawania. Zauważmy jednakże, iż zaraz potem nastąpiły kolejne zakłócenia śledzonych parametrów spowodowane wykruszeniami krawędzi skrawającej, a więc wykrycie można uznać za udane. Po ok. 14 sek. skrawania nastąpiło kolejne wyłamanie fragmentu ostrza, widoczne w przebiegu obu parametrów.



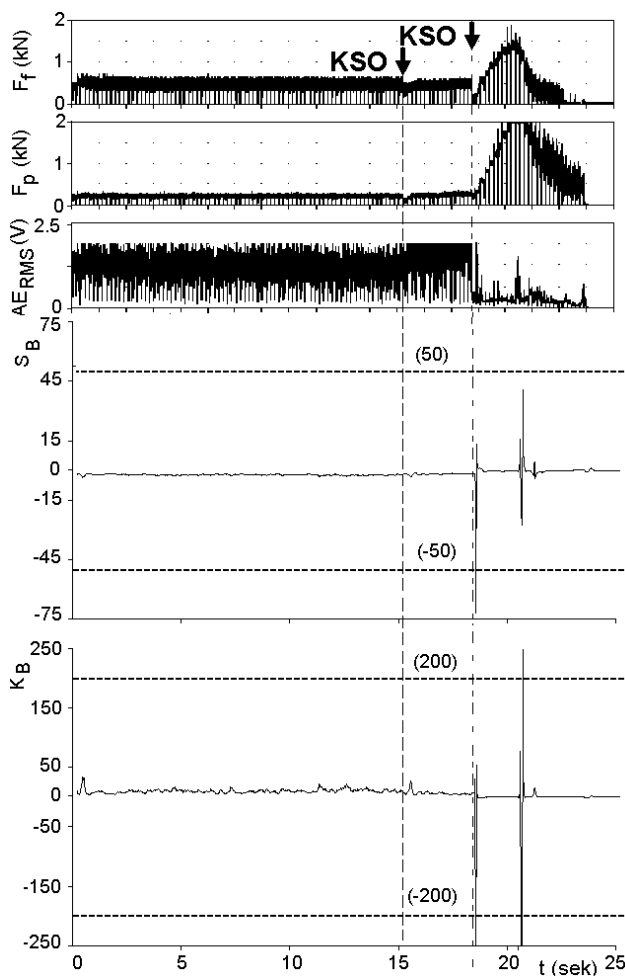
rys. 3.41. Przebieg sił skrawania, AE_{RMS} , skośności i kurtozy rozkładu AE_{RMS} w próbie B11



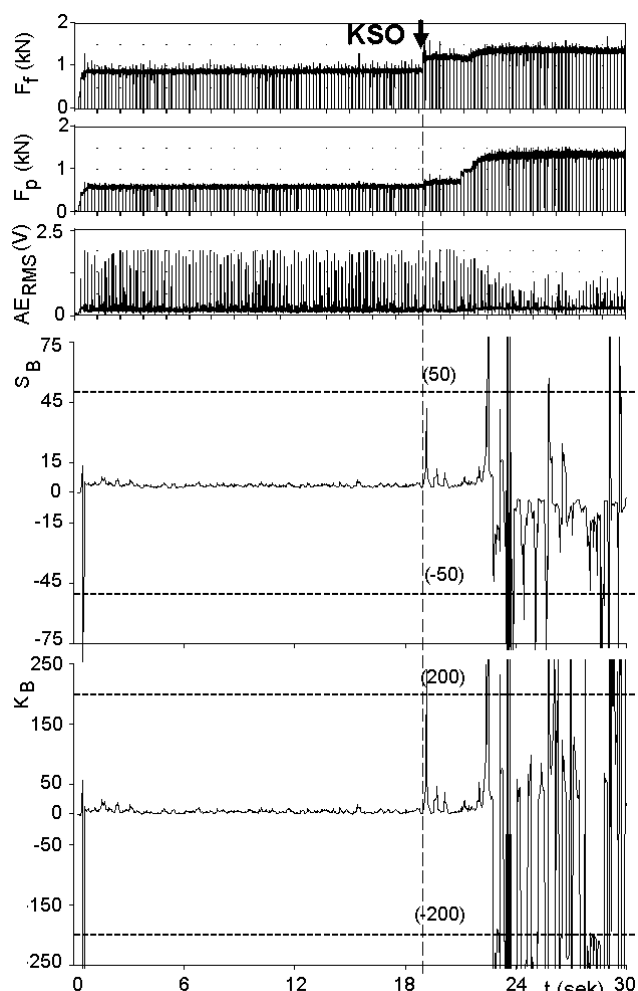
rys. 3.42. Przebieg sił skrawania, AE_{RMS} , skośności i kurtozy rozkładu AE_{RMS} w próbie B14b

W próbie B24-1 (rys. 3.43) sygnał AE_{RMS} był wyraźnie zniekształcony (nasycony) przez przesterowanie wzmacniacza. Taka sytuacja łatwo może się zdarzyć w praktyce, i detektor KSO powinien być na nią odporny. Jak widać na rysunku, to zniekształcenie sygnału AE_{RMS} nie odbija się na S_B i K_B . Pierwsze niewielkie uszkodzenie krawędzi skrawającej (ok. 15 sek) nie zostało wykryte, jednakże następne, znacznie poważniejsze spowodowało przekroczenie założonych progów. Wynik omawianego testu jest więc dość zachęcający.

W próbie B26-11 (rys. 3.44) wykruszenie ostrza zostało wykryte w przebiegu K_B natychmiast po jego wystąpieniu. Dalsza destrukcja ostrza spowodowała odpowiednio znaczne zakłócenia obu śledzonych symptomów, jednakże zmiany K_B były znacznie silniejsze, co przemawia za wyborem właśnie kurtozy.



rys. 3.43. Przebieg sił skrawania, AE_{RMS} , skośności i kurtozy rozkładu AE_{RMS} w próbie B24-1.

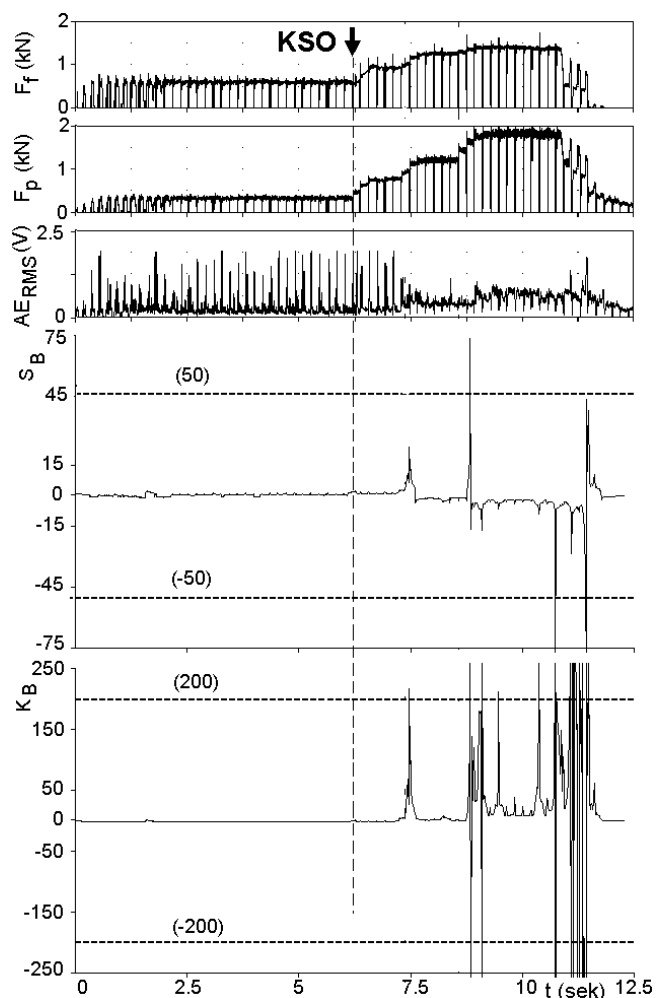


rys. 3.44. Przebieg sił skrawania, AE_{RMS} , skośności i kurtozy rozkładu AE_{RMS} w próbie B26-11

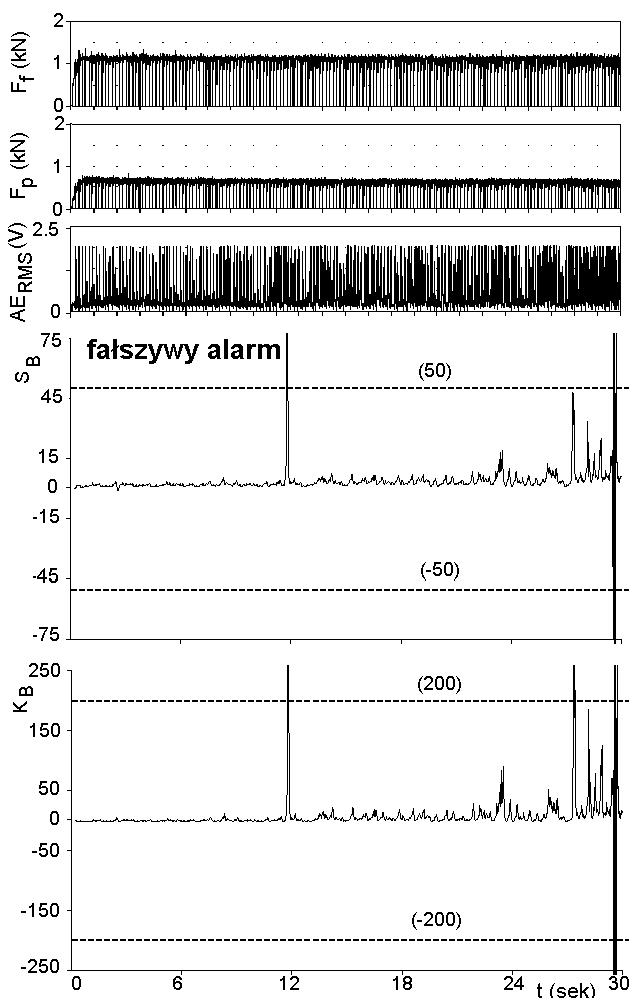
W próbie B27-2 (rys. 3.45) wykruszenie ostrza nie zostało wykryte bezpośrednio po wystąpieniu. Dopiero następne wykruszenie, które nastąpiło 7 obrotów wrzeciona później, spowodowało wykrywalne zakłócenia K_B , a po kolejnych kilku obrotach dalsza destrukcja krawędzi pociągnęła za sobą wykrywalne zakłócenie S_B i szereg bardzo znacznych zakłóceń K_B . Zważywszy, że nie wykryte wykruszenie było dość

nieznaczne (ostrze zachowało zdolność do skrawania), można wynik tej próby również uznać za sukces proponowanej strategii. Ponownie K_B okazało się nieco bardziej korzystne niż S_B .

Wynik próby B29-2 (rys. 3.46) to przykład fałszywego alarmu – oba śledzone symptomy przekroczyły dopuszczalne granice, mimo iż nie wstąpiły uszkodzenia ostrza. Z fałszywymi alarmami należy liczyć się zawsze, jednakże winny być one możliwie nieliczne.



rys. 3.45. Przebieg sił skrawania, AE_{RMS} , skośności i kurtozy rozkładu AE_{RMS} w próbie B27-2.



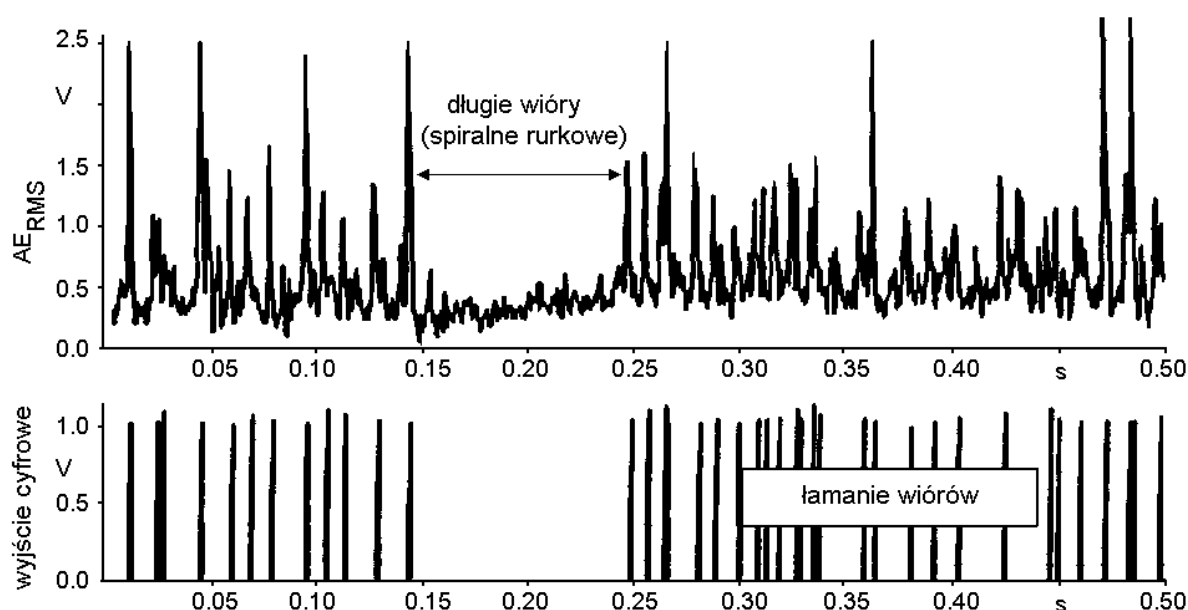
rys. 3.46. Przebieg sił skrawania, AE_{RMS} , skośności i kurtozy rozkładu AE_{RMS} w próbie B29-2

Po analizie wyników wszystkich siedemdziesięciu prób stwierdzono, że nieco bardziej wiarygodne wyniki można uzyskać na podstawie przebiegu kurtozy niż skośności. Za wartości progowe, których przekroczenie należy uznać za wykrycie KSO postanowiono przyjąć ± 200 (zaznaczone na rysunkach). Przy takim założeniu, wykryto 45 spośród 51 katastroficznych stępień, nie wykryto 6, ponadto wystąpiło 6 fałszywych alarmów.

3.3.4. Inne zastosowania emisji akustycznej

Interesującym przykładem innego niż diagnozowanie stanu narzędzia zastosowania emisji akustycznej w diagnostyce procesu skrawania jest monitorowanie postaci wióra za pomocą emisji akustycznej (rys. 3.47 [145]). Analogowa wartość skuteczna AE_{RMS} sygnału jest przekształcana do postaci cyfrowej, która wyraźnie identyfikuje zakłócenia w łamaniu wióra.

prędkość skrawania: $v_c = 350$ m/min materiał obrabiany: 20 MoCr 4
posuw: $f = 0.16$ mm materiał ostrza: węgiel pokrywany, DNMG 150612
głębokość skrawania: $a_p = 2$ mm czujnik AE mocowany na obudowie głowicy rewolwer.
obróbka sygnału: filtr pasmowy 80 - 150 kHz, RMS, TPF Hz



rys. 3.47. Monitorowanie postaci wióra z wykorzystaniem sygnałów emisji akustycznej [145].

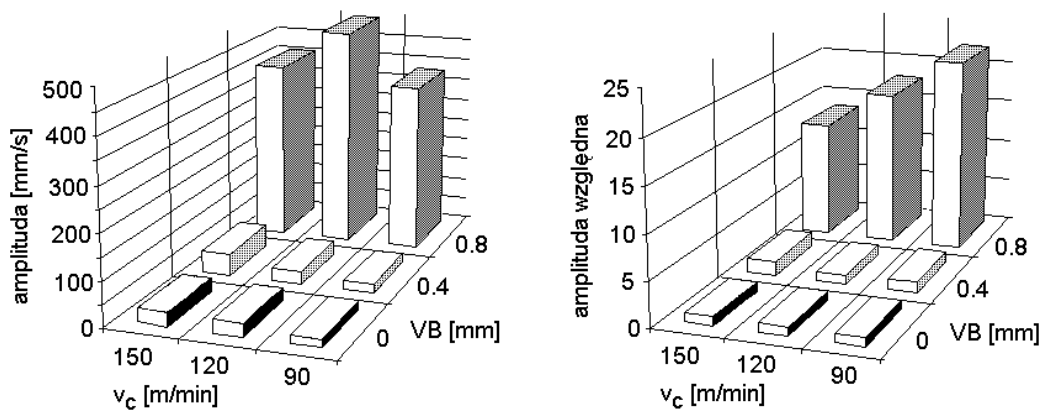
Pomiary emisji akustycznej znalazły również zastosowanie przy szlifowaniu. Energia sygnału AE okazała się dobrze skorelowana z obciążeniem ściernicy zależnym od głębokości szlifowania. Pozwoliło to na wykrywanie początku pracy ściernicy oraz zakończenia szlifowania (wyiskrzania) znacznie dokładniejsze niż przy wykorzystaniu pomiaru sił skrawania [46]. Wraz ze wzrostem zużycia ściernicy i pojawianiem się przypaleń na powierzchni przedmiotu obrabianego maleje moc sygnału AE o częstotliwości ok. 10 kHz, zaś moc sygnału w paśmie 100-300 kHz rośnie. Stosunek tych dwu sygnałów wykazuje dobrą korelację z powiększającymi się przypaleniami przedmiotu, co umożliwiło wykrywanie tych przypaleń [48]. Z kolei pojawiające się wraz ze wzrostem zużycia ściernicy pęknięcia termiczne powierzchni szlifowanej powodują występowanie znacznych wybuchów AE w paśmie 600 - 800 kHz. Występują one zarówno podczas szlifowania jak i bezpośrednio po wyjściu ściernicy z kontaktu z przedmiotem obrabianym. Pozwala to na odrzucenie przedmiotów z wadami powierzchni oraz racjonalny dobór warunków szlifowania [47].

3. 4. Drgania i hałas

3. 4. 1. Nadzorowanie stanu narzędzia

Wprawny operator potrafi rozpoznać stopień narzędzia na podstawie dźwięków emitowanych przez układ OUPN. Stąd od dawna prowadzone są próby zmierzające do skorelowania hałasu oraz drgań obrabiarki lub narzędzia ze stanem ostrza np. [65, 149,164,165, 199, 204, 208, 245] i in. Wyniki badań opartych na analizach widmowych 30-to sekundowych pomiarów przyspieszeń drgań [167] wskazują na liniową zależność mocy sygnału przyspieszeń od parametrów skrawania i zużycia ostrza.

W Politechnice Śląskiej wykorzystywano amplitudę drgań w wybranym paśmie, w celu diagnozowania zużycia ostrza [206, 209, 210]. Podobnie jak dla przyrostu siły skrawania (patrz rys. 3.2), względny przyrost amplitudy drgań wydaje się być korzystniejszy i lepiej skorelowany z prędkością skrawania (rys. 3.48).

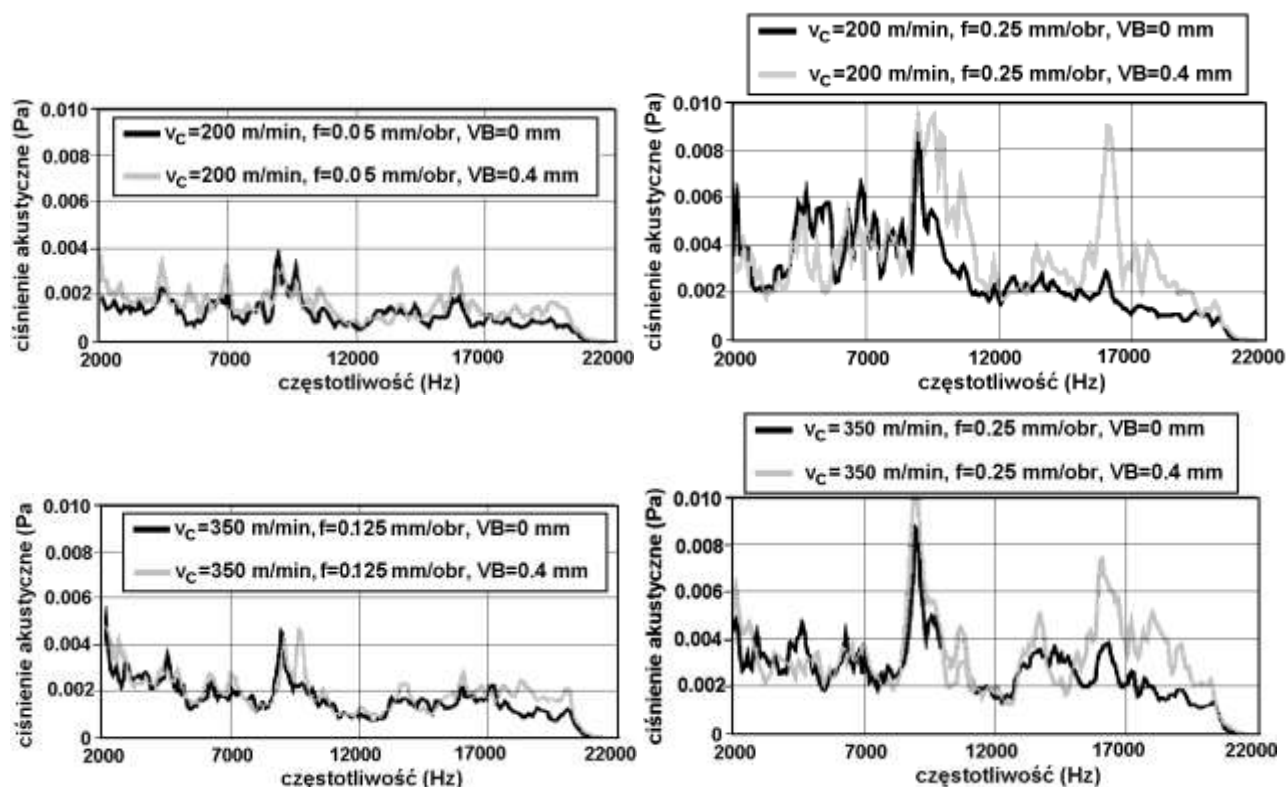


rys. 3.48. Zmiany amplitudy drgań w funkcji zużycia ostrza dla trzech prędkości skrawania [206]

Kopac i Sali podjęli próbę wykorzystania pomiarów hałasu pochodzącego ze strefy skrawania przy toczeniu do oceny zużycia ostrza [149]. Stwierdzili oni, że zużycie to powoduje wzrost ciśnienia akustycznego w stosunkowo szerokim zakresie częstotliwości (rys. 3.49). Zakres ten zależy zarówno od prędkości skrawania jak i posuwu, z tym że posuw na znacznie większy wpływ na poziom mierzonego sygnału. Stąd zalecali stosowanie takich pomiarów przy stosunkowo dużych zmianach prędkości skrawania i niewielkich zmianach posuwu.

Częstotliwość pasma drgań lub ciśnienia akustycznego, w którym poziom sygnału ulega zmianom wraz z rosnącym zużyciem ostrza zależy w znacznym stopniu od konstrukcji narzędzia i warunków jego zamocowania. Po wymianie narzędzia zmienić się może zarówno częstotliwość jego drgań własnych (dominująca w widmie) jak i poziom sygnału. Niedogodnościom tym można zapobiec stosując strategię zaproponowaną w [245]. Na podstawie badań przyspieszeń drgań imaka nożowego w kierunku pionowym i posuwowym stwierdzono tamże, iż wraz ze wzrostem zużycia ostrza rośnie udział energii drgań o wysokich częstotliwościach. Po przekroczeniu pewnej wartości zużycia stosunek energii drgań w paśmie 4-8 kHz do

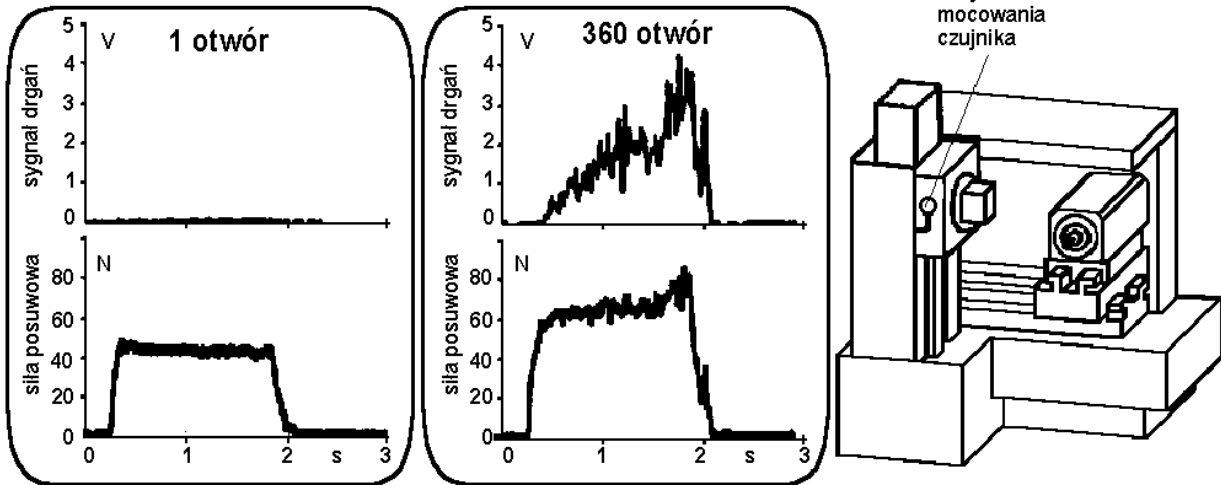
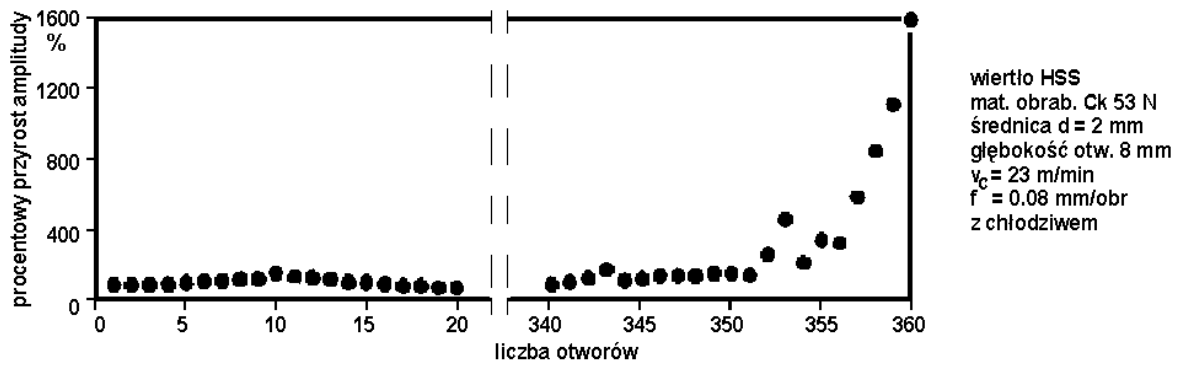
energii w paśmie 0-4 kHz gwałtownie wzrasta co może być interpretowane jako koniec okresu trwałości ostrza. Metoda ta pozwala na pominięcie poszukiwania częstotliwości o największej amplitudzie drgań.



rys. 3.49. Wpływ zużycia ostrza i parametrów skrawania na ciśnienie akustyczne przy toczeniu wg [149]

Pomiary drgań są szczególnie chętnie wykorzystywane do nadzorowania zużycia wiertel. Np. procentowy przyrost sygnału drgań był stosowany dla monitorowania okresu trwałości małych wiertel ze stali szybko tnącej (rys. 3.50 [145]). Na rys. 3.50 obok przebiegu procentowego przyrostu amplitudy drgań przedstawiono także przebiegi drgań i siły posuwowej. Warto zauważyć, że o ile siła posuwowa również mogłaby być wykorzystana do diagnostyki stanu wiertła, jej pomiar zwłaszcza dla małych wiertel jest kłopotliwy, a ponadto dynamika sygnału drganiowego jest znacznie większa.

Interesującą, wartą omówienia alternatywą dla elektronicznych układów monitorujących jest układ nasłuchu procesu oferowany przez firmę Prometec [190], rys. 3.51. Zwykle strefa obróbki jest zamknięta osłonami w celu ochrony operatora przed hałasem, chłodziwem, wiórami i zagrożeniami mechanicznymi procesu skrawania. To jednakże odcina go od strefy obróbki uniemożliwiając jej obserwację. Specjalny wzmacniacz przystosowuje sygnał z czujnika drgań i ultradźwięków (100÷80 000 Hz) do ucha ludzkiego (50÷15 000 Hz). Dzięki temu operator może słyszeć proces obróbki w swoich słuchawkach. Obok nasłuchowego nadzorowania stanu narzędzia i procesu skrawania układ może być wykorzystany do ustawiania maszyny – wykrywania kontaktu narzędzia z przedmiotem i zerowania.



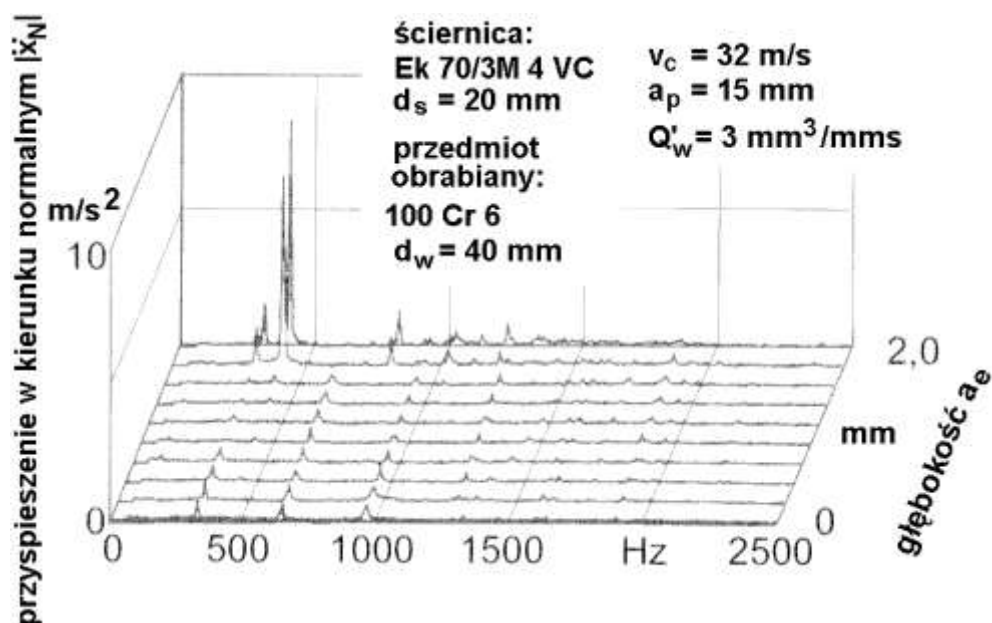
rys. 3.50. Monitorowanie trwałości wiertel małej średnicy z zastosowaniem sygnałów wibroakustycznych [145].



rys. 3.51. System nasłuchu procesu skrawania firmy Prometec [190].

3. 4. 2. Wykrywanie nadmiernych drgań

Oczywiście pomiar drgań (najczęściej przyspieszeń czujnikami bezwładnościowymi, patrz punkt 4.3) jest najbardziej naturalnym sposobem wykrywania nadmiernych drgań tak samowzbudnych jak i wymuszonych. Możliwa jest analiza mierzonych sygnałów w dziedzinie czasu lub częstotliwości [58]. W metodach czasowych symptomem może być np. zwiększenie amplitudy sygnału, zmiana jego cech charakterystycznych lub pojawienie się okresowości. W metodach częstotliwościowych obserwuje się zwykle pojedyncze składowe lub wybrane pasma widma drgań lub hałasu. Pewną trudność stanowi fakt, że praktycznie niemożliwy jest bezpośredni pomiar drgań samowzbudnych (względnych drgań narzędzia i przedmiotu obrabianego). Możliwy jest jedynie pomiar drgań wybranego zespołu obrabiarki, mniej lub bardziej odległego od strefy skrawania. Wiąże się to z koniecznością wyboru najkorzystniejszego miejsca i kierunku pomiaru drgań. Zależnie od rodzaju obróbki, kształtu i masy przedmiotu czy geometrii narzędzia amplituda drgań mierzona na danym zespole może być znacznie mniejsza od amplitudy drgań samowzbudnych. Wybór miejsca i kierunku pomiaru drgań powinien być poprzedzony zbadaniem wrażliwości sygnału na drgania samowzbudne, dla typowych przypadków obróbki. Np. dla szlifowania jedną z najbardziej korzystnych lokalizacji jest wrzeciennik [68]. Na rys. 3.52 przedstawiono wyniki pomiarów przyspieszeń wykonane w tym miejscu przy szlifowaniu otworów. Jak widać, po wzroście głębokości szlifowania do ok. 2 mm, pojawiają się drgania samowzbudne, dobrze widoczne w widmie sygnału.



rys. 3.52. Przyspieszenia drgań w kierunku normalnym mierzone na obudowie wrzeciona w czasie szlifowania wewnętrznego otworów [68].

Drgania samowzbudne powodują generację hałasu. Pomiar hałasu mikrofonem usytuowanym w odległości 1 m prostopadle do osi wrzeciona wykazał przy wytaczaniu otworu wzrost poziomu o 10-20 dB i dobrą zgodność rozkładu widmowego z widmem drgań skrętnych i giętnych wytaczadła [28]. Pomiar hałasu emitowanego przy obróbce na tokarce kłowej wykazały duży poziom zakłóceń generowanych przez

koła zębate wrzeciennika. Zakłócenia te mają jednak częstotliwości znacznie wyższe od częstotliwości drgań samowzbudnych, co umożliwia ich odfiltrowanie. W pracy [24] przedstawiono wyniki pomiarów hałasu emitowanego podczas stabilnej i niestabilnej obróbki z głowicy pionowej na frezarce uniwersalnej. Rejestrowano i poddawano analizie sygnały mierzone przy pomocy mikrofonów umieszczonych w sześciu położeniach. Stwierdzono dobrą korelację sygnałów hałasu z mierzonymi jednocześnie sygnałami przyspieszeń drgań. Dla uniezależnienia się od mogących wystąpić zakłóceń zewnętrznych oparto działanie projektowanego układu diagnostycznego na jednoczesnym pomiarze i analizie sygnału hałasu i sygnału drgań.

4. CZUJNIKI STOSOWANE W UKŁADACH DNIPS

Wielkości fizyczne zależne od stanu narzędzia i procesu skrawania są mierzone przy pomocy odpowiednich czujników. Zanim przejdziemy do ich omówienia, zwróćmy uwagę na zestawienie możliwości zastosowania różnych czujników przedstawione przez firmę Montronix (tablica 4.1, [1, 64]).

Tablica 4.1. Zalecane zastosowania czujników w układach DNIPS wg [1, 64].

CZUJNIK:		mocy	momentu skręcającego	odkształcenia elementu obrabiarki	sił - jednoosiowy	sił - trójosiowy	drgań	emisji akustycznej
TYP OBRABIARKI	Tokarka	○	○	●	●	●	⊙	⊙
	Tokarka z narzędziami obrotowymi	●	⊙	●	●	●	⊙	⊙
	Centrum obróbkowe	●	⊙	○	⊙	○	⊙	⊙
	Szlifierka	●	○	○	⊙	○	⊙	●
	Prasa	○	○	○	●	○	●	⊙
	Wiercenie/ frezowanie (duże średnice)	●	⊙	⊙	⊙	○	●	⊙
	Wiercenie/ frezowanie małe średnice)	●	●	○	○	○	⊙	●
	Gwintowanie *	⊙	●	○	○	○	⊙	⊙
	Wiercenie /rozwiercanie *(wielowrzecion.)	⊙	●	○	○	○	○	⊙
	gwintowanie *(wielowrzecionowe)	○	●	○	○	○	○	●
Nacinanie uzębień	●	⊙	○	○	○	●	○	
INSTALACJA	Nowe obrabiarki	●	●	⊙	●	●	●	●
	Istniejące obrabiarki	●	⊙	●	⊙	○	●	●
ZDOLNOŚĆ WYKRYWANIA	Kolizji	○	⊙	●	●	●	●	●
	Przeciążenia	⊙	●	●	●	●	○	○
	KSO	⊙	●	⊙	●	●	●	●
	Zużycia	●	●	○	○	●	⊙	○
	Zetknięcia narzędzia z materiałem	⊙	○	⊙	●	⊙	⊙	●
	Brakującego narzędzia	●	●	●	●	●	⊙	●

* W tych zastosowaniach monitorowanie mocy, drgań lub AE zwykle daje mierne rezultaty, jeśli stosuje się je oddzielnie. Jednakże kombinacja mocy z drganiami lub AE znacznie poprawia wyniki.

- Zalecane zastosowanie
- ⊙ Możliwe zastosowanie, może być nie najlepsze
- Niezwykle, raczej nie zalecane zastosowanie. Może być do przyjęcia w szczególnych przypadkach

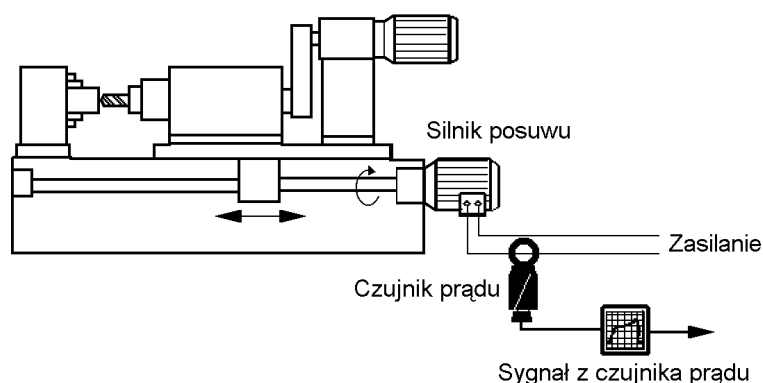
Jak widać dominują tu czujniki sił skrawania i wielkości pochodnych, co wynika z omówionej w poprzednim rozdziale wysokiej przydatności sił jako symptomu stanu narzędzia. Drugie miejsce pod względem częstotliwości przemysłowych zastosowań zajmują czujniki emisji akustycznej. Inne czujniki stosowane są stosunkowo rzadko w szczególnych przypadkach technologicznych, jednakże przekonamy się, iż mogą być niezwykle użyteczne.

4. 1. Czujniki sił skrawania i wielkości pochodnych

Siły skrawania i wielkości pochodne są najczęściej wykorzystywane tak w badaniach laboratoryjnych jak w przemysłowo stosowanych układach nadzorujących stan narzędzia i proces skrawania. Z tego powodu na rynku dostępnych jest wiele czujników tych wielkości. Zarówno producenci jak i użytkownicy stoją przed wyborem pomiędzy dwoma przeciwstawnymi wymaganiami. Z jednej strony niezbędna jest wysoka dokładność pomiarów zarówno statyczna jak i dynamiczna, co pociąga za sobą konieczność umieszczania czujnika jak najbliżej strefy skrawania. Z drugiej strony, czujnik powinien być łatwy do zainstalowania, bez konieczności istotnych zmian w konstrukcji obrabiarki i bez wyraźnego zmniejszenia sztywności statycznej i dynamicznej.

4. 1. 1. Czujniki prądu i mocy silnika

Na wcześniejszych etapach rozwoju systemów DNIPS producentom obrabiarek zależało na wyposażeniu ich wytworów w jakiegokolwiek układy monitorujące. Z tego powodu pomiar prądu silnika był bardzo popularny [181, 89, 98]. Pojedynczy przewód zasilający silnik np. posuwu jest przewleczony przez pierścieniowy czujnik prądu (czujnik Halla), jak to pokazano na rysunku 4.1 [223].



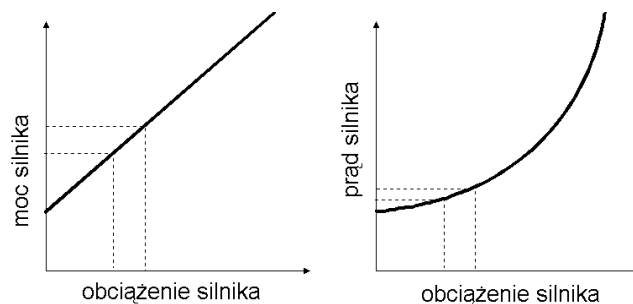
rys. 4.1. Czujnik prądu [223].

W czujniku tym indukowane jest napięcie (sygnał napięciowy) proporcjonalne do posuwowej składowej siły [226]. Czujnik taki jest łatwy do zamontowania we wszystkich typach obrabiarek, nie wymaga praktycznie żadnych zmian w konstrukcji obrabiarki, stanowiąc składnik systemu monitorującego o względnie niskiej cenie w porównaniu z nowymi lub istniejącymi już systemami. Należy jednak podkreślić, że taki czujnik znajduje się daleko od źródła sygnału, tj. od strefy skrawania, co decyduje o jego niskich właściwościach dynamicznych i małej czułości na zmiany siły skrawania spowodowane zużyciem ostrza.

Jeżeli ponadto, czujnik jest zainstalowany na silniku głównym np. tokarki lub frezarki, to jego wrażliwość jest jeszcze mniejsza, ponieważ mierzony jest wówczas prąd zależny od głównej składowej siły, a ta jest najmniej wrażliwa na zmiany zużycia ostrza (patrz punkt 3.2). Układy monitorujące pracujące na takiej zasadzie trudno uznać za udane [181].

We współczesnych układach DNiPS najczęściej stosowane są czujniki mocy [77, 86, 136]. Czujnik taki mierzy moc silnika napędu głównego lub posuwowego [189, 98] bezpośrednio na podstawie napięcia i natężenia. Natężenie prądu mierzone jest przy pomocy 1÷3 czujników Halla [188] opisanych wyżej. Wykorzystanie trzech takich czujników (patrz rys. 4.3) eliminuje duże błędy przesunięcia fazowego [189]. Przy dwóch czujnikach, wartość natężenia prądu w trzeciej fazie można wyznaczyć z dwóch znanych, dzięki czemu bierze się pod uwagę wahania sieci między fazami [178].

Pomiar mocy ma tę przewagę nad pomiarem samego natężenia prądu [223], (którego obecnie nie oferuje żaden producent układów DNiPS), że moc jest liniową funkcją obciążenia silnika (momentu na wrzecionie powiększonego o straty mechaniczne i elektryczne), podczas gdy natężenie prądu przy małym obciążeniu zmienia się nieznacznie [189] (rys. 4.2). Czujnik mocy może być wykorzystany do wykrywania brakującego narzędzia, a w pewnych przypadkach także do oceny jego zużycia [1]. Zastosowanie dodatkowego wzmacniacza logarytmicznego umożliwi wykorzystanie tego czujnika także do nadzorowania małych narzędzi [178, 231].

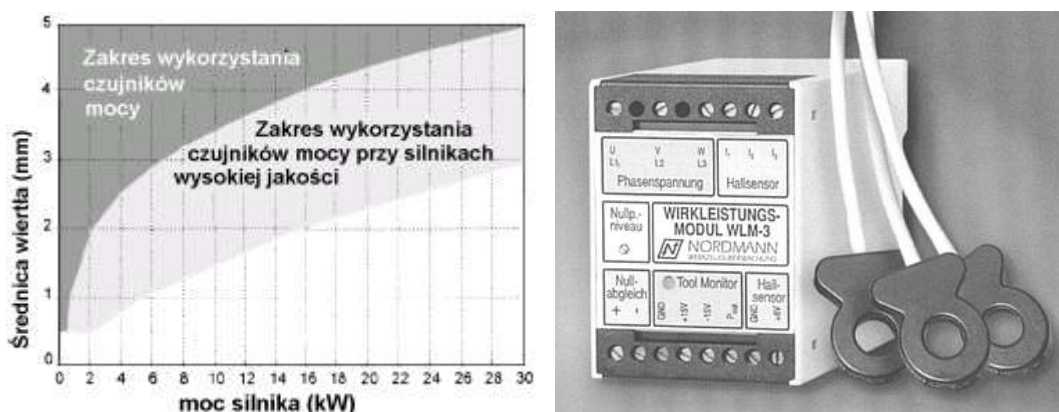


rys. 4.2. Wpływ obciążenia silnika na moc i natężenie prądu [189].

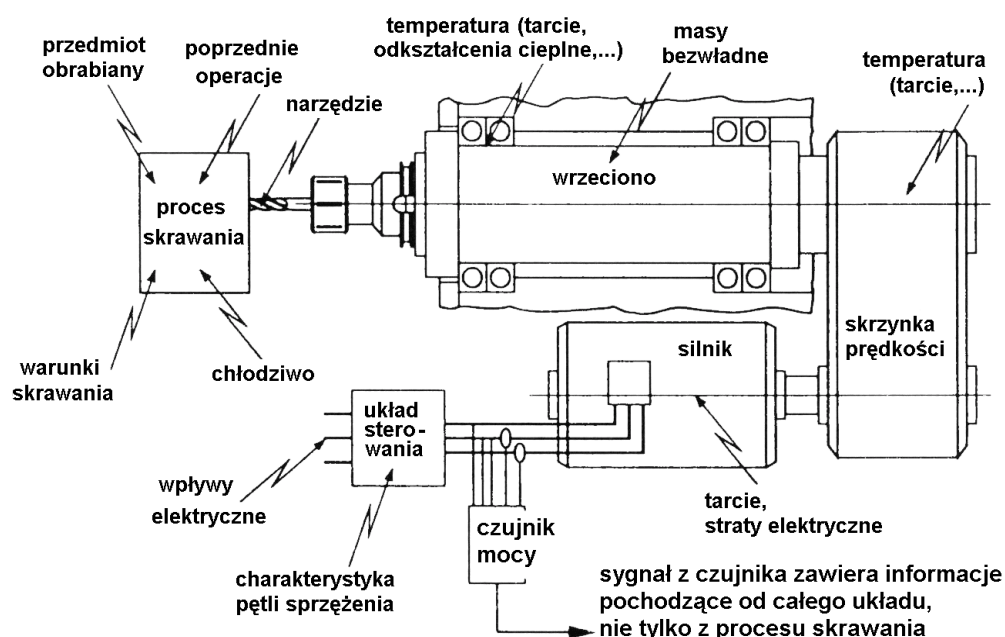
Zdaniem producenta układu nadzoru [180] nawet znaczne zakłócenia sygnału z czujnika mocy: fale, składowe o wysokiej częstotliwości, piki czy krótkotrwałe (<1s) zaniki sygnału, mogą być wygładzone. Jakość monitorowania zależy głównie od stosunku mocy skrawania do nominalnej mocy silnika. Oznacza to, że małe narzędzia (jak wiertła o średnicy mniejszej niż 1 mm), które są napędzane indywidualnie przez silniki o stosunkowo dużej mocy mogą być monitorowane tylko przy wysokiej jakości silników – patrz przykład przedstawiony na rys. 4.3 odnoszący się do małych wiertel krętych stosowanych do wiercenia w stali lub aluminium z przeciętnymi parametrami skrawania.

Z drugiej strony, podobnie jak w przypadku czujników prądu sygnał z czujnika zależy nie tylko od procesu skrawania lecz także od szeregu wielkości i zakłóceń występujących w całym układzie. Zostały one schematycznie przedstawione na rys. 4.4 [137]. Np. bezwładność układu napędowego działa na sygnał z czujnika mocy jak filtr dolnoprzepustowy. Stąd katastroficzne stępienie ostrza nie jest wykrywane

natychmiast, lecz po pewnym czasie, gdy nastąpi dalsze uszkodzenie narzędzia. Pamiętając ponadto o niekoniecznie jednoznacznej zależności sił skrawania od stanu narzędzia przy wierceniu, omówionej punkcie 3.2.1 (rys. 3.14) należy chyba uznać zapewnienia producentów (rys. 4.3) za nieco przesadne. Generalnie uważa się, iż czujniki mocy mogą być wykorzystane jedynie gdy moc skrawania stanowi istotną część mocy silnika [25, 171].



rys. 4.3. Zakres zastosowania czujników mocy wg firmy Nordmann i czujników trójfazowy [180].



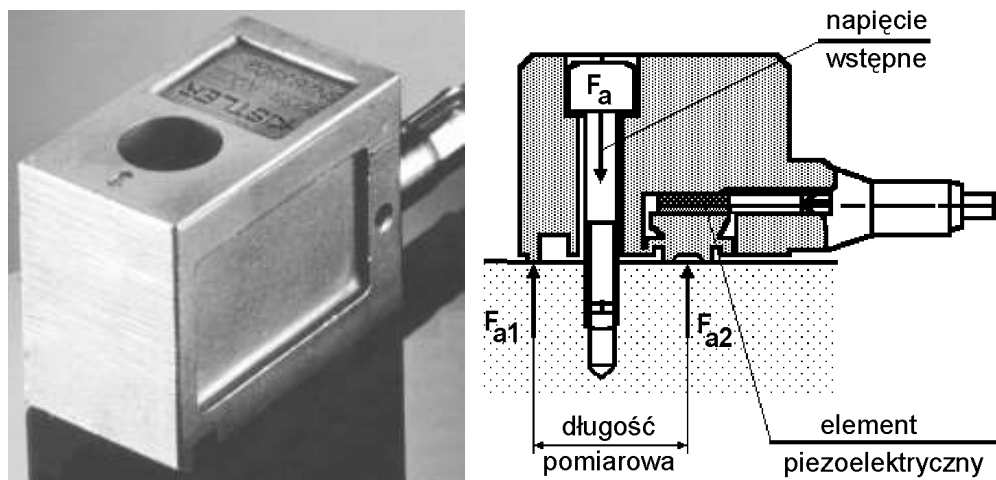
rys. 4.4. Zakłócenia wpływające na sygnał czujnika mocy [137].

Nowoczesne obrabiarki coraz częściej są wyposażone w napędy cyfrowe. Do sterowania nimi wykorzystywane są pomiary prądu i momentu obrotowego. Sygnały te po nieznacznym przetworzeniu mogą być bezpośrednio wykorzystane do diagnostyki stanu narzędzia i procesu skrawania.

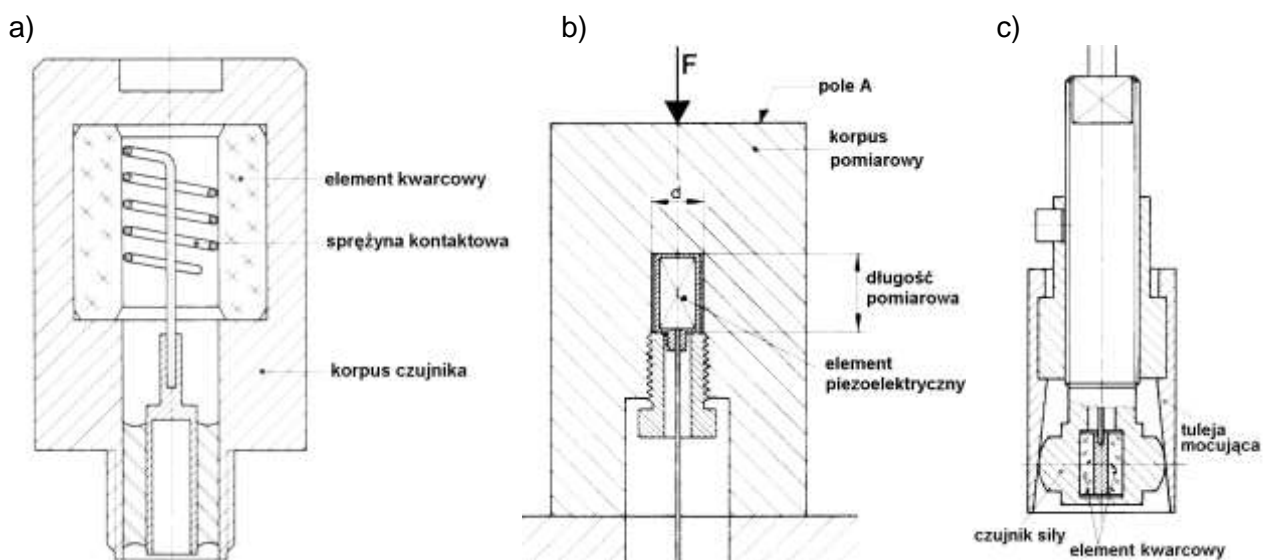
Przypomnijmy raz jeszcze, iż niezależnie od tego jaki czujnik zostanie zastosowany pomiar mocy napędu głównego często nie umożliwi uzyskania zadowalających wyników, ponieważ moc ta jest proporcjonalna do głównej siły skrawania – mało wrażliwej na zużycie ostrza [25].

4. 1. 2. Czujniki odkształceń i przemieszczeń

Stosunkowo łatwe do zainstalowania na istniejących obrabiarkach są różne czujniki odkształceń korpusu oraz wynikających z nich przemieszczeń [89, 77, 99]. Podstawową zasadą jest tu pośredni pomiar sił. Kvarcowy czujnik odkształceń powierzchni (rys. 4.5 [52]) jest mocowany na możliwie wystarczająco mocno obciążonym elemencie obrabiarki, przy czym obciążenie to powinno być bezpośrednio zależne od siły skrawania i mało zakłócone. Czujnik taki wykrywa siłę skrawania za pośrednictwem pomiaru odkształceń elementów obrabiarki przenoszących tę siłę. Pomimo stosunkowo łatwego montażu proces instalowania jest czasochłonny, ponieważ najkorzystniejsze położenie czujnika określane jest metodą prób i błędów. Czujnik taki znalazł przemysłowe zastosowanie, zwłaszcza dla wykrywania kolizji [247].



rys. 4.5. Powierzchniowy czujnik odkształceń elementów obrabiarki [52].

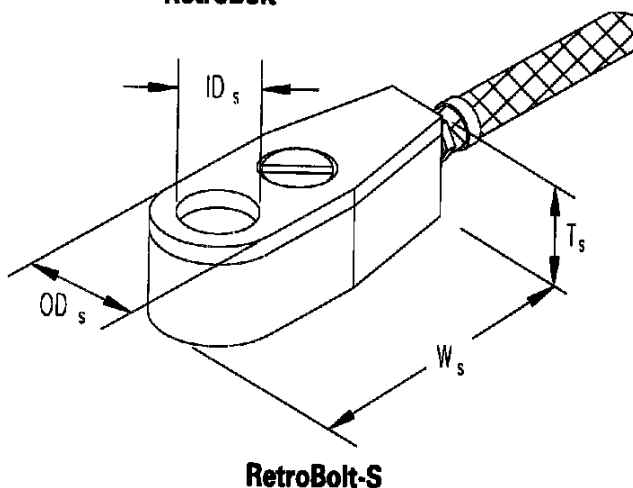
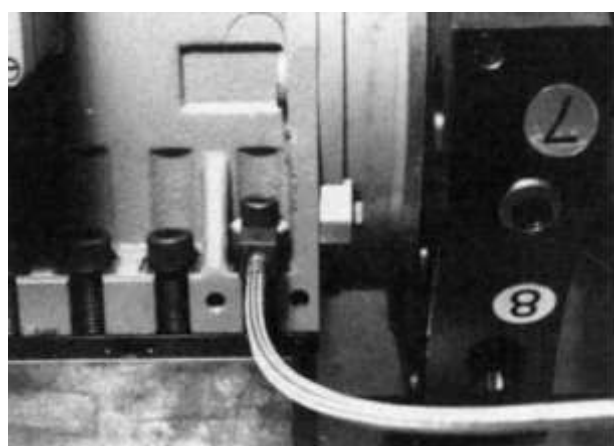
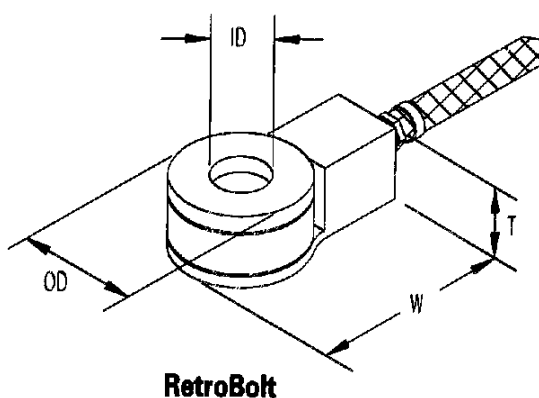


rys. 4.6. Czujniki odkształceń wewnętrznych elementów obrabiarek (kołki pomiarowe) [26]; a) budowa czujnika odkształceń wzdłużnych, b) sposób jego montażu, c) budowa czujnika odkształceń poprzecznych.

Kołki pomiarowe przedstawione na rysunku 4.6 mierzą quasi statyczne i dynamiczne odkształcenia elementów obrabiarki prostopadłe lub równoległe do nich, przenosząc jedynie znikomy procent obciążenia [18, 26]. Czujniki te instaluje się w otworach 5÷10mm. Ze względu na większą długość pomiarową czujniki odkształceń wzdłużnych (rys. 4.6 a i b) wytwarzają większy sygnał niż czujniki odkształceń poprzecznych (rys. 4.6.c) [15]. Oba typy nie są wrażliwe na obciążenia prostopadłe do wybranej osi.

Ze względu na nieuniknione oddziaływania innych sił niż siły skrawania oraz małą czułość czujników przedstawionych na rys. 4.5 i 4.6 nadają się one tylko do wykrywania katastroficznego stopienia ostrza (KSO) przy obróbce zgrubnej [25], wykrywania kolizji i do nadzorowania pracy pras [52].

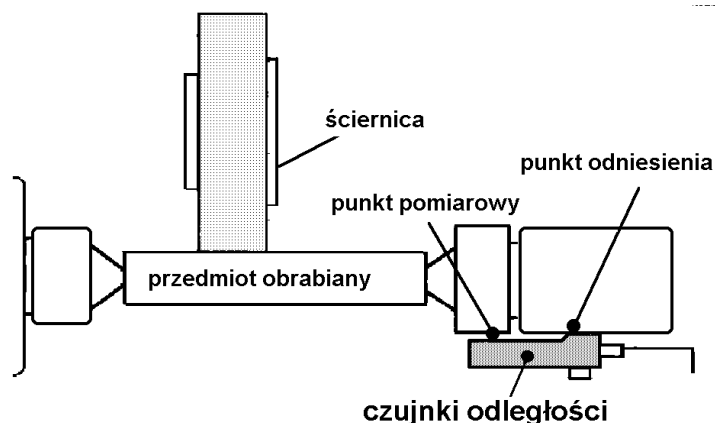
Czujnik sił działających na śrubę mocującą głowicę narzędziową lub imak tokarski (tzw. RetroBolt, rys. 4.7) instaluje się jako podkładkę pod łeb tej śruby. Śruba musi leżeć w torze przenoszenia siły skrawania. Czujnik mierzy niewielkie zmiany naprężenia śruby wynikające ze zmian tej siły. Typowe jego zastosowanie to wykrywanie przeciążenia, kolizji i KSO przy obróbce zgrubnej.



rys. 4.7. Czujniki sił działających na śrubę mocującą głowicę narzędziową [196].

Wszystkie zespoły obrabiarki przenoszące obciążenie jak gniazda, wrzeciona, suporty, uchwyty itp. deformują się sprężysto t.j. są skręcane zginane i odchylane. W wyniku tych deformacji występują mierzalne zmiany odległości między dwoma dobranymi punktami obrabiarki (punkt odniesienia i punkt pomiarowy) leżącymi w torze przenoszenia siły. Ze względu na wysoką sztywność obrabiarki, te deformacje są bardzo

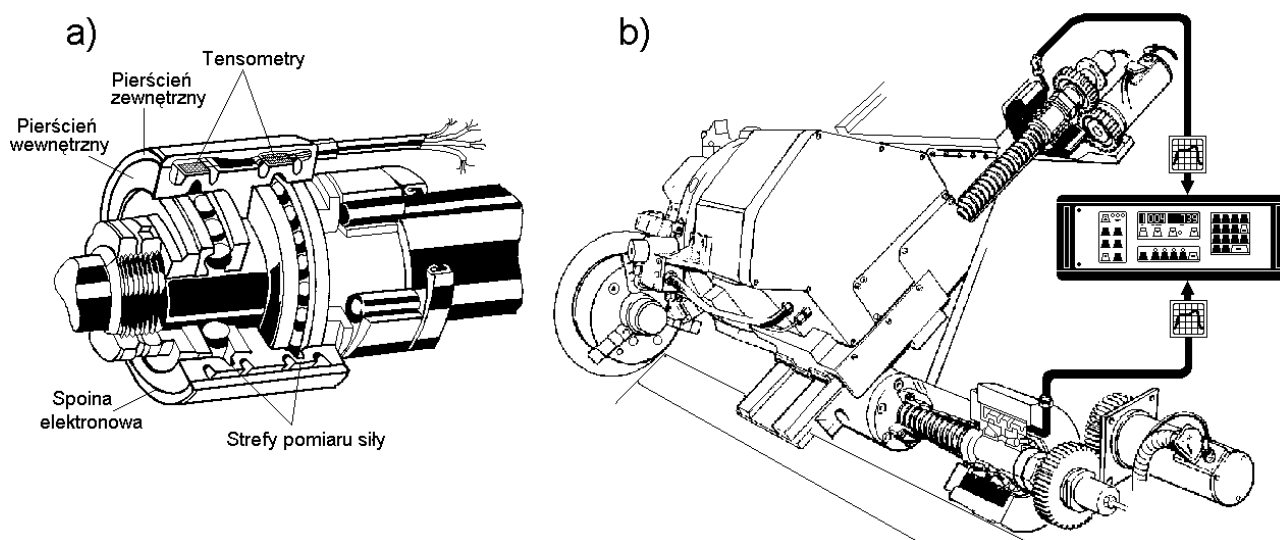
małe, jednakże przy pomocy czujników indukcyjnych lub pojemnościowych można zmierzyć zmiany odległości nawet do 5 nm [16, 180]. Przykład wykorzystania czujnika odległości przedstawiono na rys. 4.8.



rys. 4.8. Przykład wykorzystania czujnika odległości [180].

4. 1. 3. Czujnik siły posuwowej

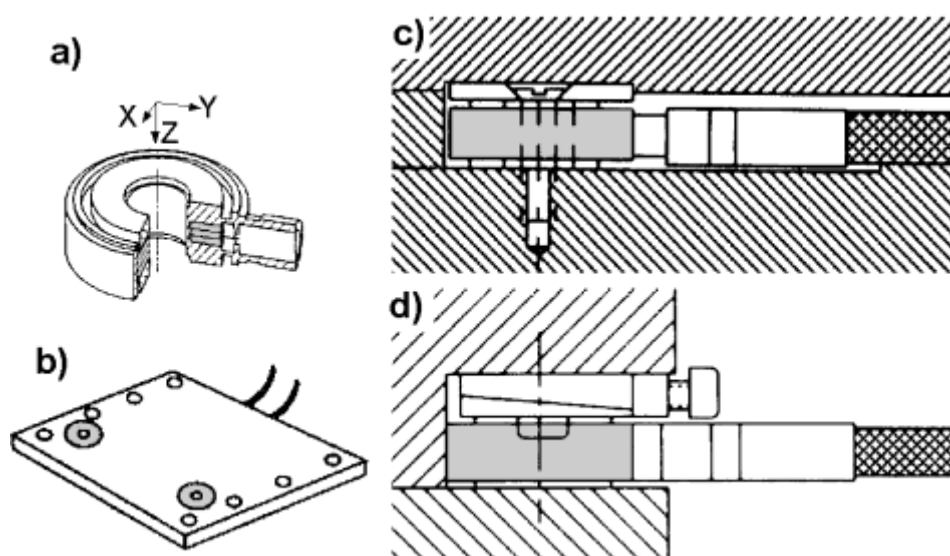
Czujniki siły posuwowej montowane w oprawach łożysk wałków, śrub pociągowych lub wrzecion (rys. 4.7 [226]) są przykładem rozwiązania kompromisowego, między dokładnością pomiaru, a łatwością instalacji. Czujnik składa się z dwu współosiowych pierścieni. Profil wewnętrznego pierścienia zawiera dwie strefy pomiarowe, na których naklejone są tensometry. Pomimo znacznie większej korelacji pomiędzy rzeczywistą wartością siły posuwowej i sygnałem pomiarowym niż dla czujników omówionych do tej pory, w dalszym ciągu występuje szereg niekorzystnych zjawisk, które należy uwzględnić przy przetwarzaniu sygnału [97, 110]. Zostaną one omówione w punkcie 5.1.



rys. 4.9. Czujnik siły posuwowej: a) przekrój wewnętrzny, b) usytuowanie czujnika na śrubie pociągowej tokarki NC [226].

4. 1. 4. Czujniki sił skrawania

Jedno- dwu- i trzyskładowe kwarcowe czujniki sił skrawania (rys. 4.10a) są dobrze przystosowane do trudnych warunków występujących na obrabiarce [52, 138]. Typowo instaluje się je tak, by przenosiły jedynie niewielką część obciążenia (do 10%), co zasadniczo odróżnia je od klasycznych siłomierzy laboratoryjnych. Dzięki temu sztywność czujnika jest ok. dziesięciokrotnie większa niż w siłomierzu, a sam czujnik jest zabezpieczony przed zniszczeniem przez przeciążenie. Z drugiej strony instalacja czujnika nie wpływa na sztywność obrabiarki. Czułość przetwornika oraz jego liniowość i histereza zależą od konkretnej instalacji.

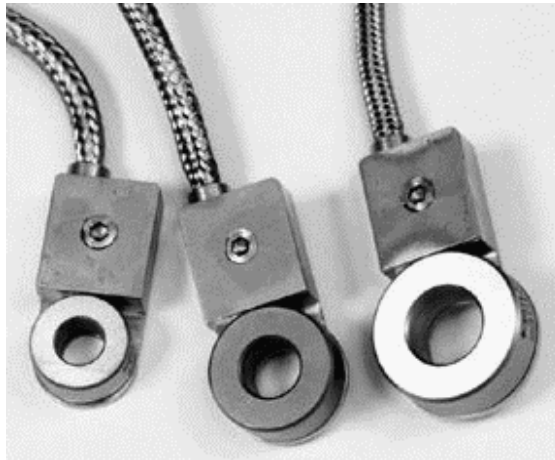


rys. 4.10. Trójskładowy czujnik sił skrawania [52, 138].

Zalecane są trzy główne konfiguracje:

- Płyta pomiarowa (rys. 4.10b) jest precyzyjną podkładką mocowaną między zespołami obrabiarki. Zawiera jeden lub dwa przetworniki i musi być instalowana na drodze przenoszenia siły, typowo między głowicą rewolwerową, a suportem poprzecznym lub między sprzęgłem Hirtha, a głowicą. Płyty pomiarowe zapewniają najdokładniejszy pomiar sił, są jednak czasem trudne do zainstalowania w istniejących obrabiarkach.
- Wnęki (rys. 4.10c) umożliwiają łatwiejszą instalację czujnika niż płyta pomiarowa. Czujnik jest mocowany w precyzyjnie wykonanej wnęce na połączeniu śrubowym. Jego obciążenie wstępne uzyskuje się dzięki dopasowywaniu grubości podkładki, której grubość wraz z grubością czujnika przekracza o ok. $15\mu\text{m}$ wysokość wnęki.
- Trzecie rozwiązanie jest podobne do poprzedniego, ale zamiast podkładki występuje to nastawialny klin (rys. 4.10d). Unika się dzięki temu dopasowywania podkładki kosztem nieco większej wnęki i samego klina. Ponadto to rozwiązanie umożliwia montaż czujnika bezpośrednio w elemencie obrabiarki, a nie na połączeniu.

Współcześnie czujniki te coraz częściej są zintegrowane ze wzmacniaczem (rys. 4.11), co znacznie poprawia jakość sygnału (unika się upływności ładunku) zwłaszcza w trudnym środowisku obrabiarki [64, 139].

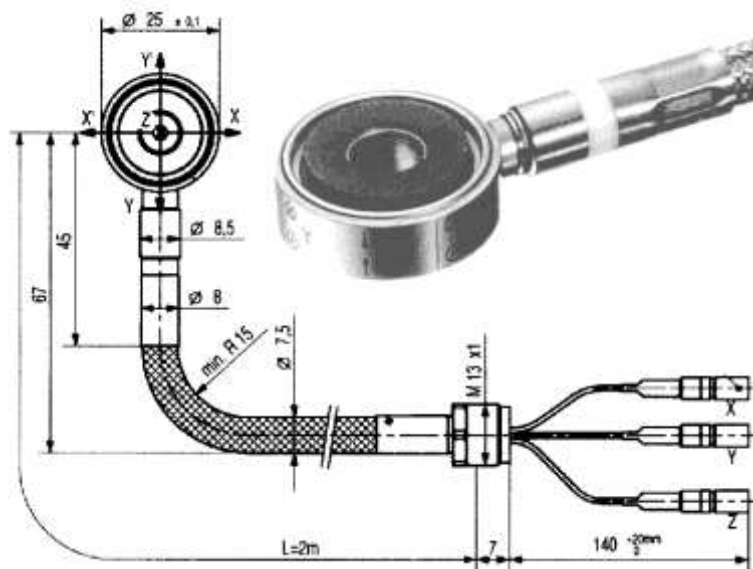


rys. 4.11. Czujniki sił skrawania zintegrowane ze wzmacniaczami ładunku [64].

Mimo iż takie przetworniki siły dostarczane są przez wielu producentów układów DNiPS, największą ich różnorodność (kształty, wymiary, mierzone siły) oferuje firma Kistler [26, 52, 63, 139]. Są to najdoskonalsze czujniki sił skrawania, jakie mogą być wykorzystane w DNiPS, przy toczeniu. Stąd też ich instalacji i charakterystykom poświęcimy nieco więcej uwagi.

Instalacja i badanie czujnika dwuskładowego w warunkach laboratoryjnych

Na rys. 4.12 przedstawiono trójskładowy czujnik sił skrawania firmy Kistler [52]. Czujniki jedno- i dwuskładowe wyglądają podobnie, z tym że mają odpowiednio mniej kabli wyjściowych.



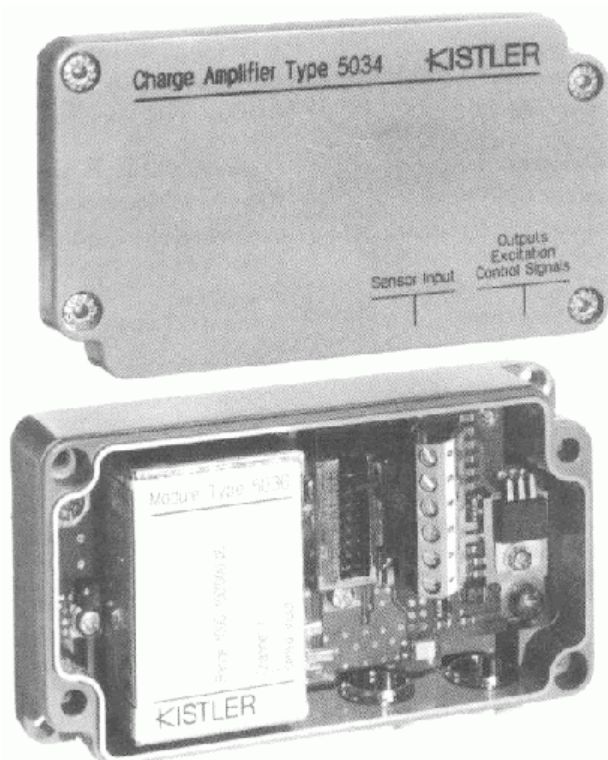
rys. 4.12. Trójskładowy czujnik sił skrawania 9601A3 firmy Kistler [52].

Podstawowe dane techniczne czujnika dwu-składowego, którego instalacja i badania będą omawiane niżej przedstawiono w tabelicy 4.3.

Tablica 4.3. Dane techniczne czujnika sił skrawania.

Zakres pomiarowy	F_f	kN	-2,5 ... 2,5
	F_c	kN	-5 ... 5
Nadwyżka obciążenia	F_f	kN	-3/3
	F_c	kN	-6/6
Czułość	F_f	pC/N	$\approx -3,2$
	F_c	pC/N	$\approx -3,8$
Liniiowość		% FSO	$\leq \pm 1$
Histereza		% FSO	≤ 1
Próg zadziałania		N	$< 0,01$
Szttywność	c_f	N/ μm	≈ 240
	c_c	N/ μm	≈ 1250
Napężenie wstępne		kN	25
Zakres temperatury pracy		$^{\circ}\text{C}$	-50 ... 120
Ciężar /bez przewodu /		g	≈ 24

Czujniki te współpracują z odpowiednimi wzmacniaczami ładunków 5034, zawierającymi odpowiednią liczbę kanałów. Wygląd wzmacniacza umieszczonego w szczelnej, przystosowanej do trudnego środowiska obrabiarki obudowie przedstawiono rys. 4.13, zaś jego podstawowe dane techniczne w tabelicy 4.4.

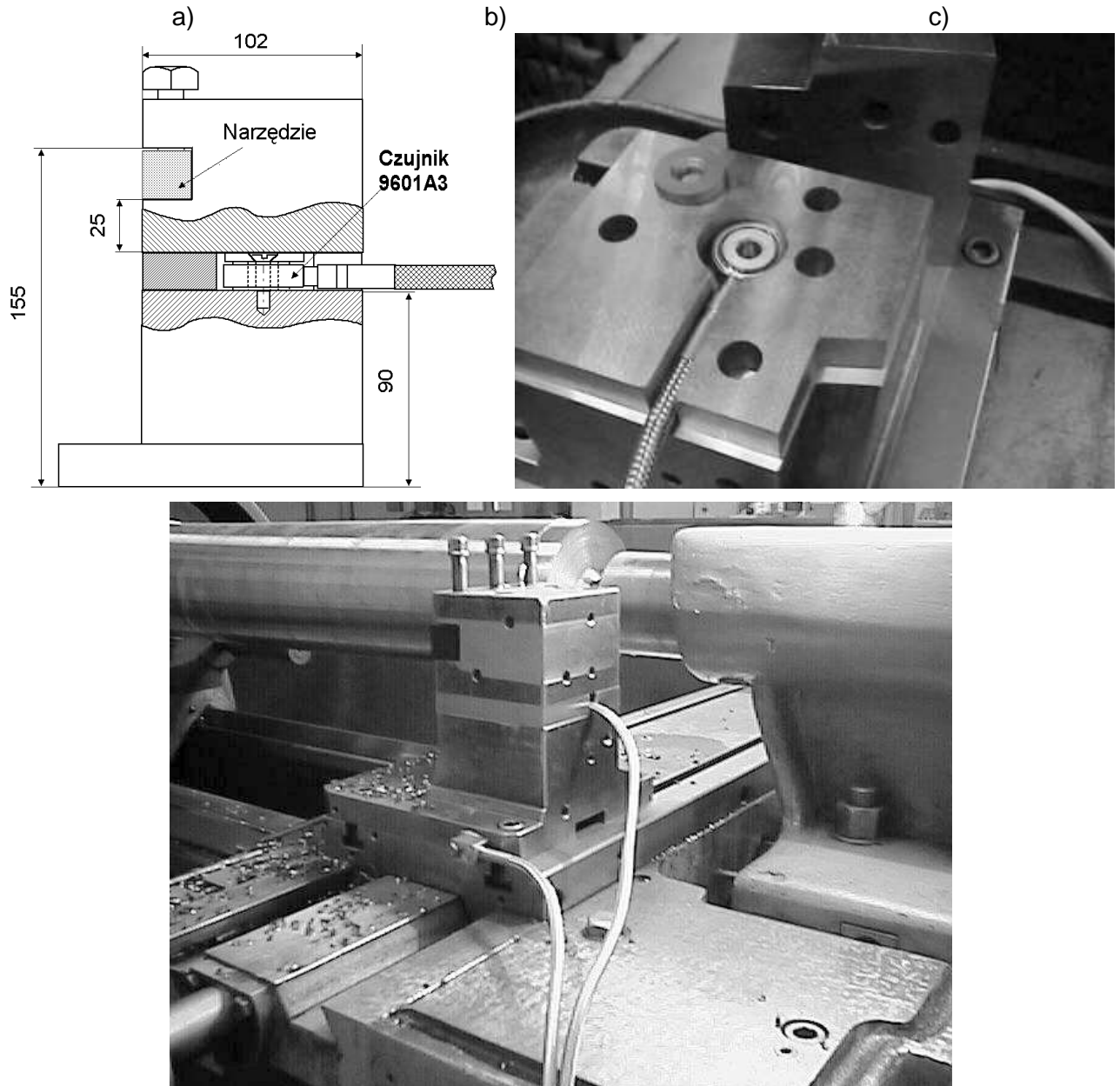


Tablica 4.4. Dane techniczne wzmacniacza ładunków 5034.

Zakres pomiarowy	± 10000 pC
Wzmocnienie	1, 2, 3.5, 6, 10, 20, 35, 60, 100
Błąd pomiarowy	$< \pm 4\%$
Czas resetowania	< 6 ms
Temperatura pracy	$0 \div 60^{\circ}\text{C}$
Wymiary	115 x 64 x 34 mm

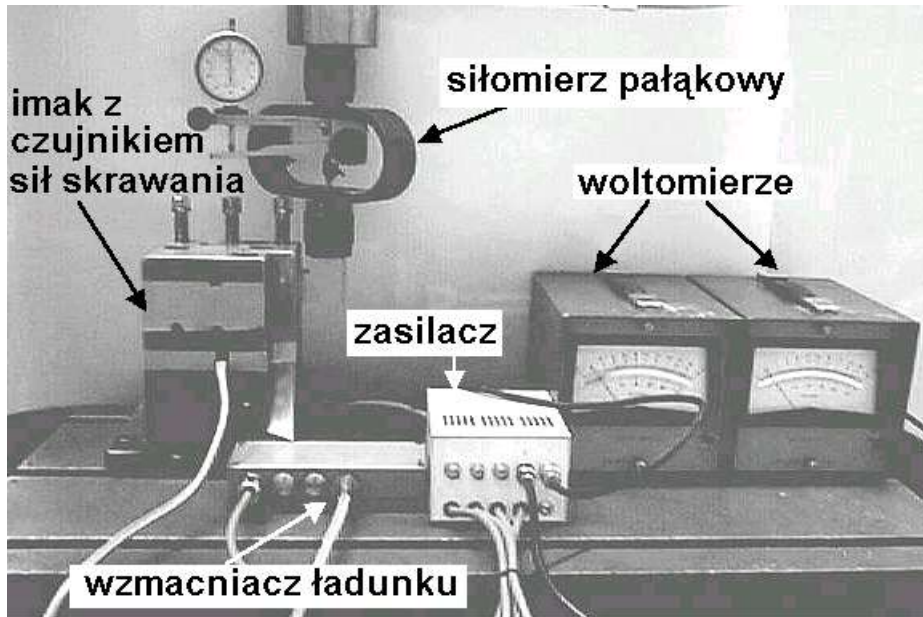
rys. 4.13. Wzmacniacz ładunku 5034.

Pierwszą, laboratoryjną instalację czujnika postanowiono wykonać wykorzystując specjalny, sztywny imak nożowy tokarki badawczej TUD-50 [128]. W połowie wysokości imaka, który został przecięty, wstawiono płytę z odpowiednim otworem, w którym umieszczono czujnik z podkładką regulacyjną – rys. 4.14a,b. Wygląd imaka po montażu na tokarce przedstawiono na rys. 4.14c.



rys. 4.14. Imak tokarski jednożoźowy z zainstalowanym przemysłowym czujnikiem sił skrawania.

Wzorcowanie tak powstałego siłomierza tokarskiego przeprowadzono na wiertarce kadłubowej, wykorzystując siłomierz pałkowy o zakresie pomiarowym do 5 kN. Siłę F_c wywierano podnosząc stół wiertarki przy zablokowanym wrzecionie, umieszczając pomiędzy wrzecionem i przymocowanym do stołu wiertarki imakiem siłomierz kabłąkowy. Siłę F_f wywierano przemieszczając stół wiertarki z zamocowanym na nim imakiem w kierunku kadłuba, ściskając siłomierz pałkowy pomiędzy kadłubem a zamocowanym w imaku nożem - rys. 4.15.



rys. 4.15. Stanowisko do wzorcowania układu do pomiaru sił skrawania.

W trakcie obciążania imaka obserwowano napięcia w obu kanałach, co pozwalało na określenie wielkości występujących sprzężeń skrośnych. Doboru wzmacnienia układu dokonano w oparciu o założenie, iż napięcie wyjściowe nie powinno przekraczać 5V (zakres dopuszczalny dla przetwornika analogowo – cyfrowego), przy maksymalnych wartościach siły 5 kN dla F_c i 2.5 kN dla F_f .

Ze względu na występujące sprzężenia skrośne, napięcia wyjściowe w obu kanałach można opisać zależnościami:

$$U_f = U_{ff} + U_{cf} \quad (4.1)$$

$$U_c = U_{cc} + U_{fc} \quad (4.2)$$

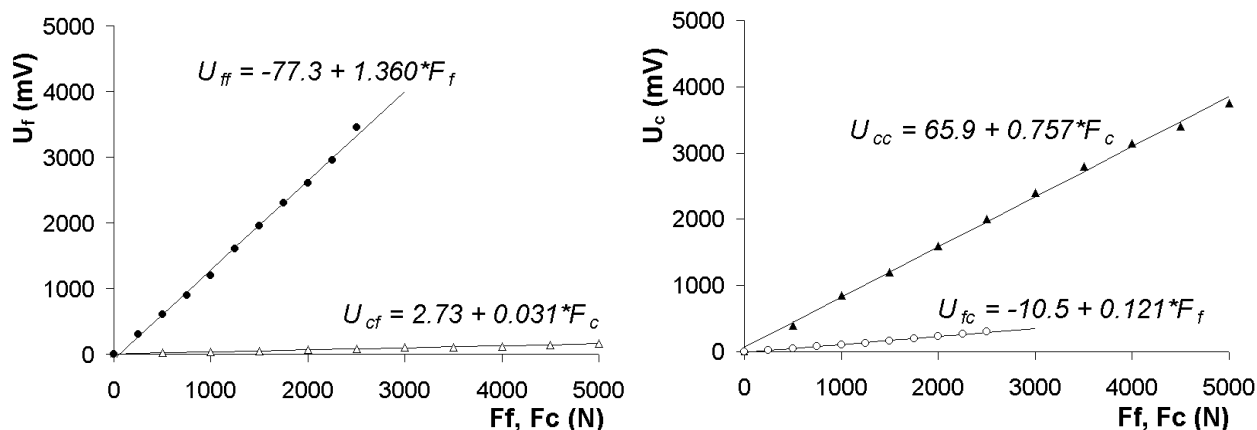
gdzie: U_c - wartość sygnału w kanale „c” pochodząca od zarówno od siły F_c jak i siły F_f

U_f - wartość sygnału w kanale „f” pochodząca od zarówno od siły F_f jak i siły F_c

U_{fc} – wartość sygnału pochodząca od siły F_f , w kanale „c”

U_{cf} – wartość sygnału pochodząca od siły F_c w kanale „f”

Wyznaczenie charakterystyki układu oznacza zatem określenie zależności opisujące człony „ U_{ij} ” w powyższych równaniach. Wyniki przeprowadzonych pomiarów wraz równaniami opisującymi te człony przedstawiono na rys. 4.16. Jak widać, charakterystyki w obu kanałach są liniowe. Siła F_c stosunkowo nieznacznie zakłóca pomiary w kanale f (U_{cf}), jako że jej wpływ jest ponad czterdziestokrotnie mniejszy niż siły F_f (U_{ff}). Oddziaływanie siły F_f na sygnał w kanale c (U_{fc}) jest jednak stosunkowo znaczne, bo zaledwie nieco ponad sześciokrotnie mniejsze niż oddziaływanie siły F_c na ten sygnał (U_{cc}). Skutki tego sprzężenia skrośnego przeanalizujemy niżej. Tymczasem możemy stwierdzić, że uzyskiwane sygnały są dobrze (liniowo) skorelowane z siłami skrawania.



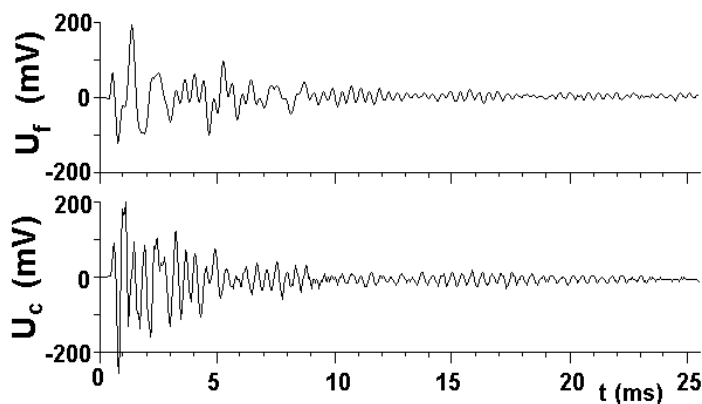
rys. 4.16. Zależność sygnałów wyjściowych od obciążenia.

W warunkach przemysłowych trudno raczej o dokładne wyznaczenie charakterystyk, stąd sprzężenia skrośne będą pomijane. Siły skrawania będą zatem określane w przybliżeniu jedynie na podstawie sygnałów pochodzących z odpowiadających im kanałów. Pomijając ponadto niewielkie stałe występujące w zależnościach opisujących U_{ff} i U_{cc} (patrz rys. 4.16) i zastępując miliwoltów voltami otrzymamy:

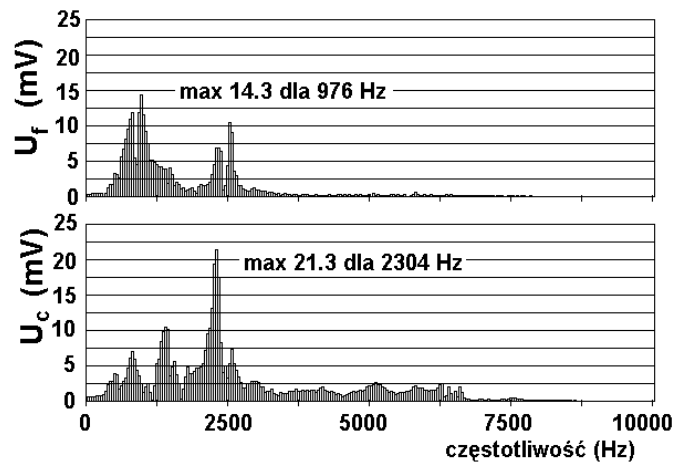
$$F_f = 732 * U_f \quad (4.3)$$

$$F_c = 1321 * U_c \quad (4.4)$$

Dokładność przedstawionego układu do pomiaru sił skrawania zależy także od charakterystyk amplitudowo – częstotliwościowych. Badanie charakterystyki dynamicznej imaka narzędziowego wraz z zainstalowanym w nim czujnikiem przeprowadzono po uprzednim zamontowaniu go na tokarce. Następnie uderzano w wierzchołek noża, w wyniku czego otrzymano czasowe przebiegi sygnałów pokazane na rysunku 4.17. Widma otrzymanych sygnałów (rys. 4.18) odpowiadają w przybliżeniu charakterystykom amplitudowo-częstotliwościowym imaka z czujnikiem sił. Jak widać pierwsze rezonanse występują dość nisko (poniżej 1000 Hz). W przemysłowej instalacji, gdzie czujnik może być umieszczony np. pod znacznie cięższą głowicą narzędziową, wynik ten może być jeszcze gorszy – należy się z tym liczyć.



rys. 4.17. Przebieg sygnału drgań po uderzeniu imaku w obu kierunkach.

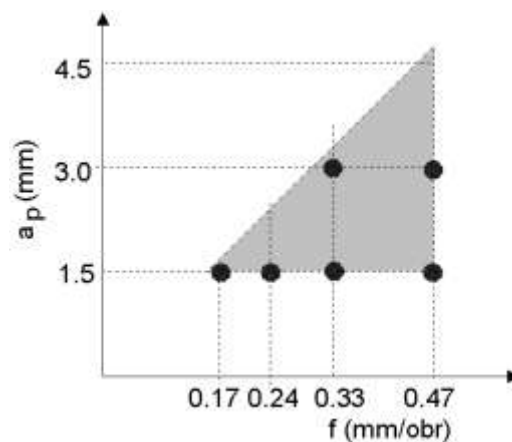


rys. 4.18. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa imaka dla obu kierunków.

Laboratoryjny a przemysłowy czujnik sił skrawania

W celu praktycznej weryfikacji dokładności zbudowanego układu pomiarowego i jego przydatności do diagnostyki stanu ostrza, postanowiono przeprowadzić badania zależności sił skrawania od stanu narzędzia przy różnych parametrach skrawania, stosując opisany wyżej czujnik przemysłowy zainstalowany w imaku (rys. 4.14) oraz laboratoryjny siłomierz tokarski (rys. 3.11) [93]. Do badań użyto oprawek CSRPR 2525 wyposażonych w płytki SCMT 4025 z węglików spiekanych pokrywanych potrójnie TiN/AL₂O₃/TiCN. Zastosowany gatunek miał pod pokryciem warstwę wzbogaconą kobaltem, co zapewniało większą odporność na uderzenia, jednakże powodowało skłonność do gwałtownego kończenia się okresu trwałości w wyniku ścięcia wierzchołka po zużyciu pokrycia. Postanowiono zasymulować przemysłowe warunki skrawania, w których ostrza pracują przemiennie z różnymi parametrami wykonując kolejne operacje wielozabiegowe.

Przyjęto, że parametry skrawania powinny odpowiadać obróbce średniodokładnej prowadzonej z prędkościami skrawania odpowiadającymi racjonalnym okresom trwałości ostrza. Plan badań w płaszczyźnie a_p - f przedstawiono na rys. 4.19.



rys. 4.19. Wybór posuwów i głębokości skrawania

W celu określenia racjonalnych prędkości skrawania założono zależność Taylora w postaci:

$$T = C_T v_c^{-5} f^{-2.5} a_p^{-0.15} \quad (4.5)$$

i przyjęto $T = 15$ min. Stąd:

$$v_{15} = C_{vT} f^{-0.5} a_p^{-0.03} \approx C_{vT} f^{-0.5} \quad (4.6)$$

Przyjęto następnie, że próby będą symulowały wykonywanie operacji składającej się z zabiegów prowadzonych z opisanymi wyżej parametrami, przy czym czas skrawania w każdym zabiegu będzie równy 0.5 min. Długość zabiegu można określić ze wzoru:

$$l = fnt = f \frac{1000}{\pi d} v_c 0.5 = Cf^{0.5} \quad \text{gdzie } C = \frac{500}{\pi d} C_{vT} \quad (4.7)$$

Przyjmując za centralny punkt planu badań $a_p = 3$ mm i $f = 0.33$ możemy obliczyć długości zabiegów w stosunku do długości zabiegu centralnego:

$$l_i = l_0 \sqrt{\frac{f_i}{0.33}} \quad (4.8)$$

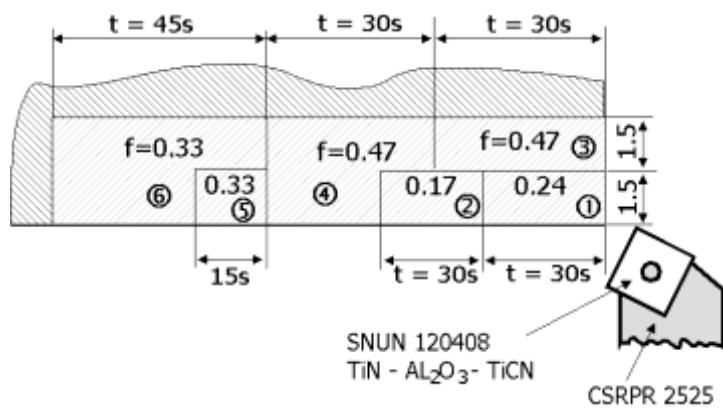
Wstępne próby przeprowadzone dla punktu centralnego wybranymi ostrzami wykazały, że odpowiadająca mu prędkość v_{15} (dla kryterium stępienia $VB_B = 0.3$ mm) wynosi odpowiednio 300 m/min, a to oznacza:

$$v_{15} = 172 \sqrt{f} \quad (4.9)$$

Ostatecznie plan zabiegów (symulowany przedmiot obrabiany) wyglądał jak w tablicy 4.5 i na rys. 4.17. Zabieg czwarty i szósty jest podzielony na dwie części, dzięki czemu możliwe jest zarejestrowanie sił w czasie skoku głębokości skrawania. Próby wykonane z użyciem siłomierza laboratoryjnego oznaczono W5 i W7, zaś te, w których stosowano imak z czujnikiem przemysłowym to próby I6 oraz I9. Prowadzono je do katastroficznego stępienia ostrza.

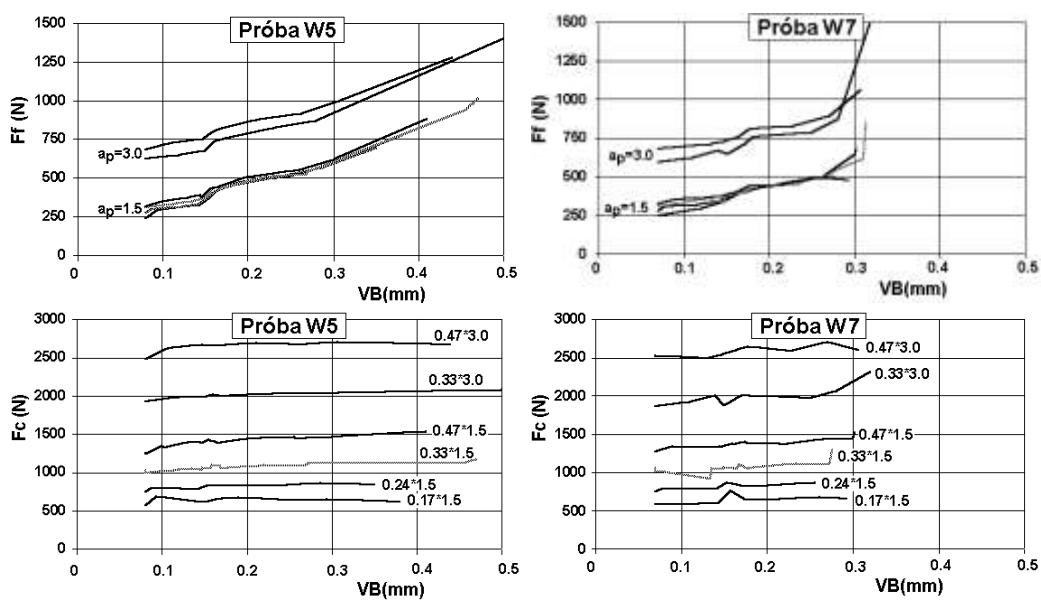
Tablica 4.5. Plan zabiegów w próbach W oraz I.

Zabieg	1	2	3	4	5	6
a_p (mm)	1.5	1.5	1.5	1.5/3	1.5	1.5/3
f (mm/obr)	0.24	0.17	0.47	0.47	0.33	0.33
v_c (m/min)	351	417	251	251	300	300



rys. 4.20. Plan badań w próbach W oraz I.

W pierwszej próbie (W5) przeprowadzonej z wykorzystaniem siłomierza laboratoryjnego wykonano dziesięć operacji, przy czym w ostatnim zabiegu wystąpił nagły wzrost zużycia powierzchni przyłożenia do ok. 0.5 mm. W drugiej takiej próbie (W7) zużycie pokrycia spowodowało zniszczenie naroża końcu dziewiątej operacji. Zużycie ostrza wynosiło wtedy $VB_B = 0.35$ mm. Przebiegi zależności sił skrawania F_f i F_c od zużycia ostrza w tych próbach przedstawiono na rys. 4.21.



rys. 4.21. Wyniki badania zależności sił skrawania od zużycia ostrza prowadzonych przy użyciu siłomierza laboratoryjnego.

Występuje tu charakterystyczna słaba zależność siły skrawania F_c od zużycia ostrza, która praktycznie zależy jedynie od parametrów skrawania:

$$F_c = F_c(a_p, f) \quad (4.10)$$

Siła ta wydaje się więc bezużyteczna z punktu widzenia oceny zużycia ostrza. Z drugiej jednak strony, siła posuwowa F_f jest niemal niezależna od posuwu, będąc funkcją jedynie głębokości skrawania i zużycia ostrza:

$$F_f = F_f(a_p, VB) \quad (4.11)$$

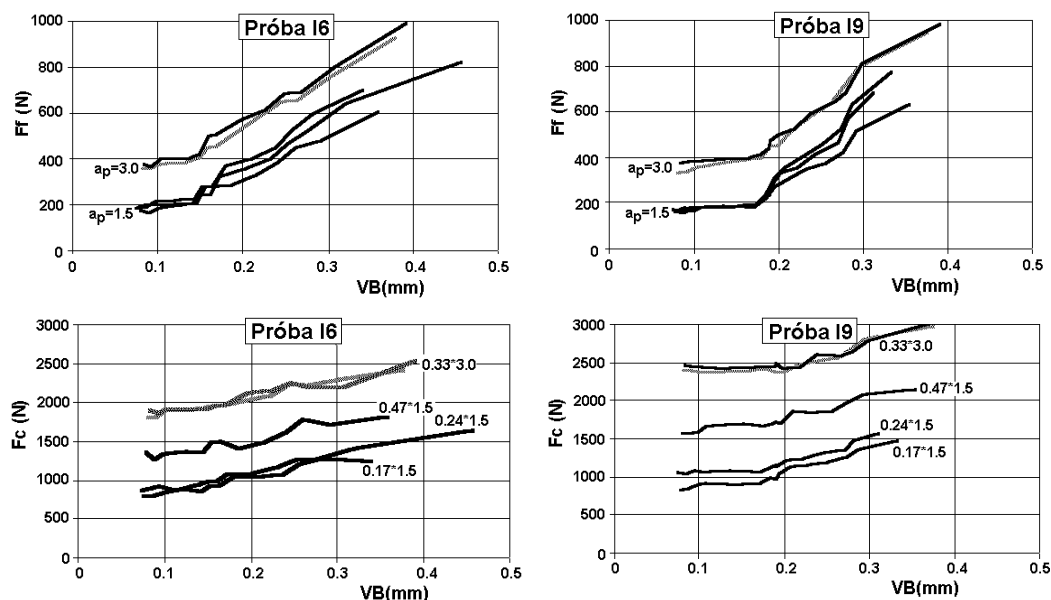
Stąd do określenia zużycia ostrza na podstawie pomiarów F_f niezbędna jest znajomość głębokości skrawania. Informacja o głębokości może być podana bezpośrednio:

$$VB = VB(F_f, a_p) \quad (4.12)$$

lub uzyskana dzięki stwierdzonej wcześniej słabej zależności siły skrawania F_c od zużycia ostrza:

$$VB = VB[F_f, a_p(F_c, f)] \quad (4.13)$$

Na rys. 4.22 przedstawiono wyniki podobnych prób przeprowadzonych przy użyciu imaka z zainstalowanym przemysłowym czujnikiem sił skrawania.

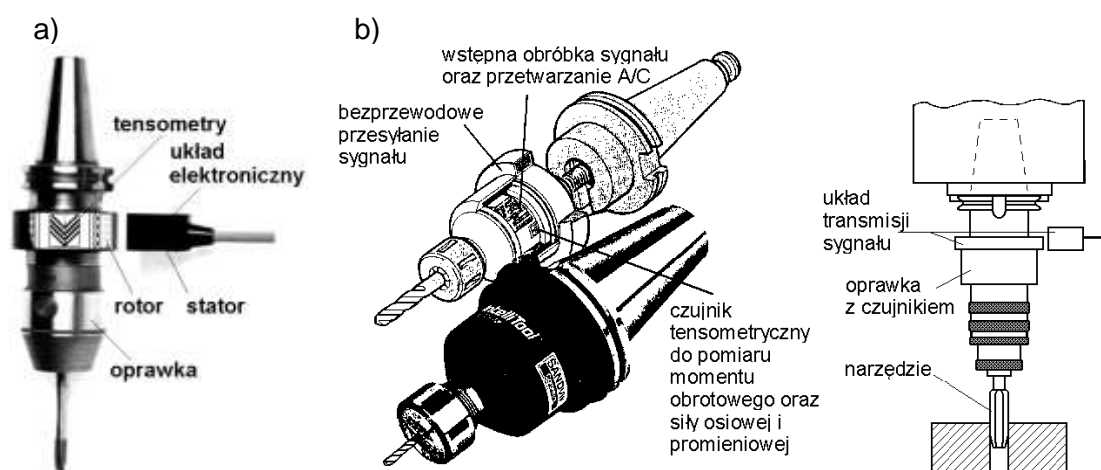


rys. 4.22. Wyniki badania zależności sił skrawania od zużycia ostrza prowadzonych przy użyciu imaka wyposażonego w czujnik przemysłowy

Zależność siły posuwowej od zużycia ostrza jest tu podobna do otrzymanej przy użyciu siłomierza laboratoryjnego. Jednakże mimo wykazanej w próbach W, typowej słabej zależności siły skrawania od zużycia, tu sygnał F_c wydaje się być dość mocno zależny od zużycia. Wynika to ze sprzężeń skośnych niedoskonałego układu pomiarowego, czyli z wpływu siły F_f na sygnał F_c , co było omówione wyżej - patrz rys. 4.14. Oczywiście w instalacji przemysłowej, sprzężenia te mogą być jeszcze większe. Otrzymane wyniki wskazują zatem, że czujnik przemysłowy nie zawsze może być wykorzystany w taki sam sposób jak laboratoryjny. Tu np. ocena zużycia ostrza może być prowadzona w oparciu o zależność (4.12), ale nie jest możliwe określenie głębokości skrawania na podstawie sygnału F_c , czyli wykorzystanie zależności (4.13).

4. 1. 5. Czujniki momentu skręcającego

Bardzo dobre wyniki w monitorowaniu gwintowników i wiertel można uzyskać dzięki specjalnym oprawkom narzędziowym [86, 77, 99]. Jest to szczególnie użyteczne przy gwintowaniu, gdy jedynie niewielka część mocy silnika jest wykorzystywana przez pojedyncze wrzeciono [178, 35]. Czujnik momentu może być wykorzystany do monitorowania zużycia i katastroficznego stępienia ostrza, wykrywania braku skrawania, błędów głębokości gwintowania, zbyt dużej lub zbyt małej średnicy gwintowanego otworu, uszkodzenia lub braku gwintownika. Tensometryczny czujnik momentu zintegrowany z oprawką narzędziową przedstawiono na rys. 4.23a [178]. Składa się on z rotora oraz statora zamocowanego na stałe na korpusie obrabiarki. Rotor ma formę pierścienia ciasno otaczającego górną część oprawki lub uchwytu narzędziowego i zawiera w sobie pełen mostek tensometryczny wraz z układem odbierającym sygnał pomiarowy z tensometrów i przesyłającym go do statora. Stator zainstalowany jest ok. 5 mm od rotora i służy zarówno do zasilania jak i odbioru sygnału.



rys. 4.23. Oprawki do gwintowania i wiercenia umożliwiające wstępną obróbkę sygnałów [25, 147, 178].

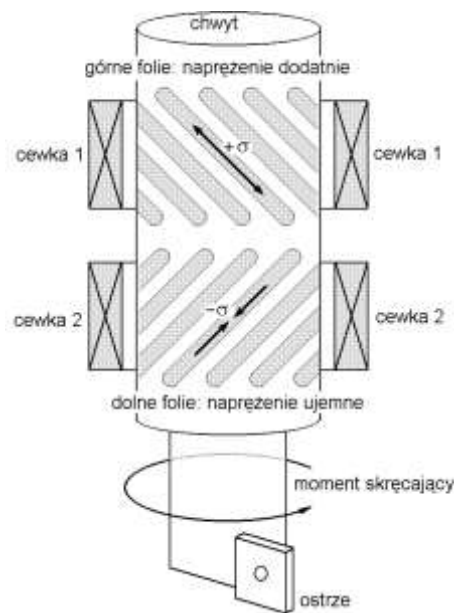
Podobne rozwiązanie przedstawiono na rys. 4.23b. Ta oprawka do wiercenia lub gwintowania umożliwia nie tylko pomiar siły osiowej, promieniowej i momentu obrotowego, ale także wstępną obróbkę sygnału i przetwarzanie go na postać cyfrową oraz przesyłanie bezprzewodowe [25, 147]. Oba rozwiązania mogą być wykorzystane na obrabiarkach wielowrzecionowych, ponieważ każde narzędzie jest monitorowane niezależnie. Jest to jednak z oczywistych względów (oddzielny układ dla każdego wrzeciona) rozwiązanie bardzo kosztowne [25].

Magnetoelastyczny miernik momentu skręcającego [3] zawiera niewielki pierścień o właściwościach magnetycznych, zintegrowany z obracającą się tuleją wrzeciona, oraz nieruchomy układ zasilająco-odbiorczy. Pierścień zamienia mechaniczne obciążenie wrzeciona na proporcjonalne do obciążenia pole magnetyczne. Układ odbiorczy zamienia to pole na proporcjonalny sygnał elektryczny.

Trwają obecnie intensywne prace nad zupełnie nowymi koncepcjami czujników lub dostosowaniem znanych dawniej koncepcji do potrzeb DNIPS [25, 147]. Są to np. momentomierze oparte na pomiarze zmian

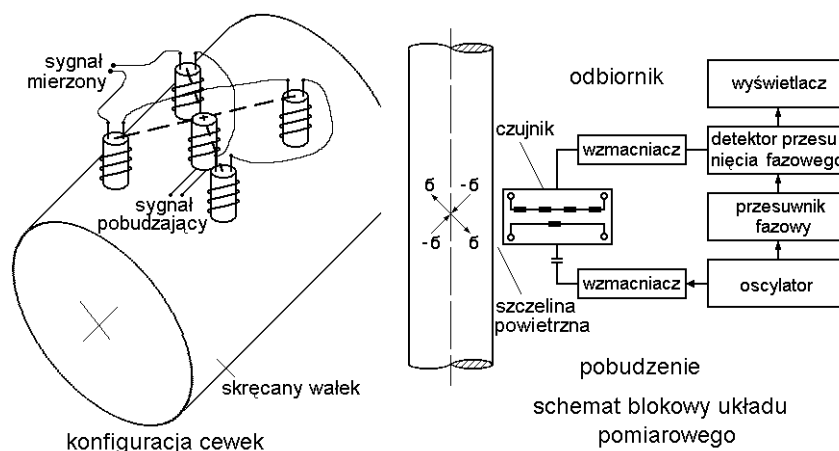
przenikalności magnetycznej cienkich warstw z materiału o silnych właściwościach magnetycznych naniesionych np. na wrzecionie czy chwycie narzędzia trzpieniowego [12] - rys. 4.24. Zmiany te wywołane są naprężeniami na powierzchni tych elementów i odbierane przez umieszczone w pobliżu cewki.

Porównanie sygnałów otrzymanych z takiego czujnika, z pochodzącymi z laboratoryjnego siłomierza stolikowego, wykonane przy wierceniu, wykazało jego dobre właściwości statyczne i dynamiczne, oraz przydatność do wykrywania katastroficznego stępienia ostrza [182] (rys. 3.17).



rys. 4.24. Magnetostrykcyjny czujnik momentu obrotowego [12, 182].

Inne rozwiązanie oparte jest na zależności przewodności elektrycznej materiałów ferromagnetycznych od stanu naprężeń [219]. Na rys. 4.25 przedstawiono czujnik prądów wirowych do monitorowania procesu wiercenia. Umożliwia on pomiar momentu skręcającego bez przebudowy struktury mechanicznej obrabiarki mogącej zredukować jej sztywność. Przy pomocy tego czujnika uzyskane zostały wyniki przedstawione na rys. 3.15.



rys. 4.25. Czujnik prądów wirowych do nadzorowania operacji wiertarskich [219].

Są również dostępne bardzo dobre, czteroskładowe dynamometry obrotowe mierzące trzy składowe siły skrawania i moment na obracającym się wrzecionie [36, 63], jednakże ich wysoki koszt (ok. 30000 USD) sprawia, że należy je traktować raczej jako narzędzie laboratoryjne do badań naukowych.

4. 2. Czujniki emisji akustycznej

Kluczowym elementem każdego układu diagnostycznego opartego na pomiarach AE jest czujnik emisji akustycznej, w którym piezoelektryczny przetwornik zamienia energię fali sprężystej dochodzącej do czujnika na sygnał elektryczny.

Większość dostępnych handlowo czujników AE (wraz z przedwzmacniaczami) jest przystosowana do znacznie słabszych sygnałów niż pochodzące z obróbki skrawaniem. Trudno przy tym polegać na charakterystykach podawanych przez wytwórców, jako że są one otrzymywane różnymi metodami, a przez to nieporównywalne. Dla czujników ultradźwiękowych produkowanych w Polsce, charakterystyki w ogóle nie są podawane. Stąd konieczność opanowania metodyki ich wyznaczania bezpośrednio na stanowisku badawczym, w konkretnej konfiguracji toru pomiarowego. Aparatura do badania sygnałów AE stosowana w ITM jest opisana w punkcie 5.2.

4. 2. 1. Metodyka badania charakterystyk czujników AE

Jak już wspomniano, widmo sygnału AE jest zależne nie tylko od samego czujnika, lecz także od toru przejścia sygnału i nastaw aparatury pomiarowej a uzyskiwane wyniki mają charakter jakościowy i nie mogą być ilościowo przenoszone pomiędzy różnymi stanowiskami. Dlatego do ilościowej ich oceny niezbędne jest użycie metod porównawczych, a charakterystyka i właściwości czujnika winny być przedmiotem starannych analiz. Wyznaczone charakterystyki są podstawą do dalszego okresowego sprawdzania czujników AE, co pozwala na wykrycie potencjalnych uszkodzeń oraz zmian charakterystyk, oraz określania poprawności działania elementów toru pomiarowego (połączeń elektrycznych, jakości sprzężenia akustycznego oraz parametrów pracy aparatury).

Przy pomocy czujnika AE mierzymy tylko energię sygnału elektrycznego wytwarzanego przez użyty czujnik. Nie musi być ona wprost proporcjonalna do energii impulsu akustycznego w materiale, do którego przystawiony jest czujnik [166]. Wpływa na to szereg czynników, jak:

- impedancja akustyczna czujnika i materiału,
- rodzaj warstwy sprzęgającej,
- tłumienie w próbce,
- szerokości pasma przenoszenia układów elektronicznych, itd.

Należy również wspomnieć, że wyniki pomiarów nie dają informacji jaki rodzaj drgań (powierzchniowe, podłużne, poprzeczne) dochodził do czujnika.

Stosowane najczęściej sposoby kalibracji czujników AE, z uwagi na czas trwania rejestrowanego sygnału można podzielić na dwie grupy. Do pierwszej należą metody impulsowe wykorzystujące:

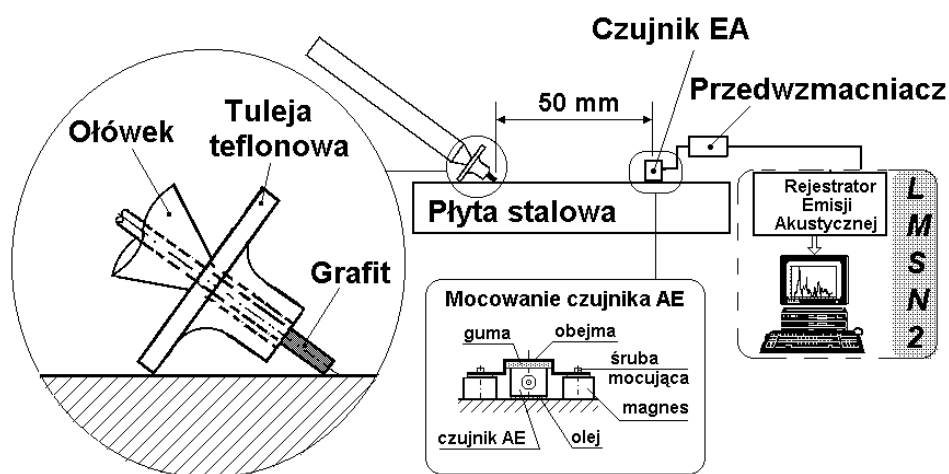
- impuls laserowy,
- energię spadającej kulki,
- łamanie kapilary lub grafitu ołówkowego,
- iskrę elektryczną.

Do drugiej grupy zaliczamy metody wykorzystujące sygnał ciągły:

- metoda wykorzystująca strumień gazowego helu,
- metoda oparta na zasadzie wzajemności,
- metoda bezpośrednia „face-to-face”.

Ich bliższy opis można znaleźć w [166]. W diagnostyce stanu narzędzia i procesu skrawania znalazła zastosowanie metoda oparta na łamaniu grafitu ołówkowego, opracowana przez Nilsena i Hsu [61, 62], opisana w normie amerykańskiej ASTM Standard E976-84. Metoda ta jest stosowana m.in. przez firmę Kistler [10], a także w ITM PW [87, 88, 94, 154, 185]. Ponieważ wyniki otrzymane przy jej pomocy będą tu jeszcze kilkakrotnie cytowane, zostanie ona tu opisana bliżej.

Proces łamania grafitu ołówkowego może być źródłem wzorcowych sygnałów AE pod warunkiem, że zostanie przeprowadzony według ścisłej procedury. Zastosowany grafit musi mieć dobrze określone i powtarzalne parametry. Zalecane są grafity firmy Pentel o średnicy 0.5 mm i twardości 2H. Sam proces łamania musi być przeprowadzony przy użyciu specjalnej tulei wykonanej z teflonu. Na rys. 4.26 przedstawiono widok tej części i jej zamocowanie na ołówku podczas zabiegu łamania wkładu, a także pozostałe elementy stanowiska badawczego. Czujnik kalibrowany ustawiony jest na gładkiej (szlifowanej) stalowej płycie o wymiarach 200 x 200 x 30 mm. Łamanie grafitu odbywa się na tej samej powierzchni płyty w odległości 50 mm od czujnika (do wzorcowania wykorzystuje się fale powierzchniowe). Ponieważ czas trwania sygnału akustycznego jest bardzo krótki, można przyjąć, iż widmo zarejestrowanych drgań z zadowalającym przybliżeniem oddaje charakterystykę amplitudową czujnika wraz z całym torem przenoszenia sygnału..



rys. 4.26. Stanowisko do badań charakterystyk czujników metodą Nilsena-Hsu [61, 62] zbudowane w ITM PW [131].

4. 2. 2. Charakterystyki wybranych czujników AE dostępnych w Polsce

Emisja akustyczna od dawna była stosowana do defektoskopowych badań nieniszczących, stąd czujniki AE był znane i stosowane na długo przed zastosowaniem ich w DNIPS. Wraz z coraz szerszym rozpowszechnieniem tego nowego zastosowania, pojawiły się czujniki specjalnie do niego przystosowane, tj. odporne na trudne warunki panujące w sąsiedztwie strefy skrawania np. [10, 187]. Niemniej jednak, w wielu laboratoriach w Polsce (i nie tylko) wciąż używane są czujniki laboratoryjne, z których najbardziej rozpowszechnione są czujniki firmy Brüel&Kjær [5], a także czujniki AE wykonane w TECHPAN-ie [71, 166], oraz czujniki firmy UNIPAN (aktualnie UNIPAN ULTRASONIC) przeznaczone do defektoskopii ultradźwiękowej [13], które z uwagi na pasmo przenoszonych częstotliwości (100-1000 kHz) mogą być zastosowane do pomiaru AE z procesu skrawania. Dzięki możliwościom badawczym ITM PW oraz znacznej różnorodności posiadanych czujników, możliwe było określenie i porównanie ich charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych, a także zbadanie możliwości ich wykorzystania w diagnostyce stanu narzędzia zwłaszcza produkowanych seryjnie w Polsce, stosunkowo tanich czujników stosowanych do defektoskopii ultradźwiękowej.

Badaniom poddano następujące czujniki będące w posiadaniu ITM PW (rys. 4.27):

a) Czujniki firmy Brüel & Kjær [5]:

- 8312 - szerokopasmowy z wbudowanym przedwzmacniaczem - 2 egzemplarze,
- 8313 - rezonansowy (~200 kHz) współpracujący z modyfikowanym przedwzmacniaczem 2637 o 10-krotnie (20dB) obniżonym wzmocnieniu [84, 128],
- 8314 - rezonansowy (~800 kHz) współpracujący z oryginalnym przedwzmacniaczem 2637, Przedwzmacniacz 2637 był wyposażony w filtr oktawowy 200 kHz także wówczas, gdy współpracował z czujnikiem 8314.
- 8313 - rezonansowy (~200 kHz),
- 8314 - rezonansowy (~800 kHz),

b) Czujniki firmy Kistler zaprojektowane specjalnie do celów diagnostyki obrabiarek i procesu skrawania [10, 187]

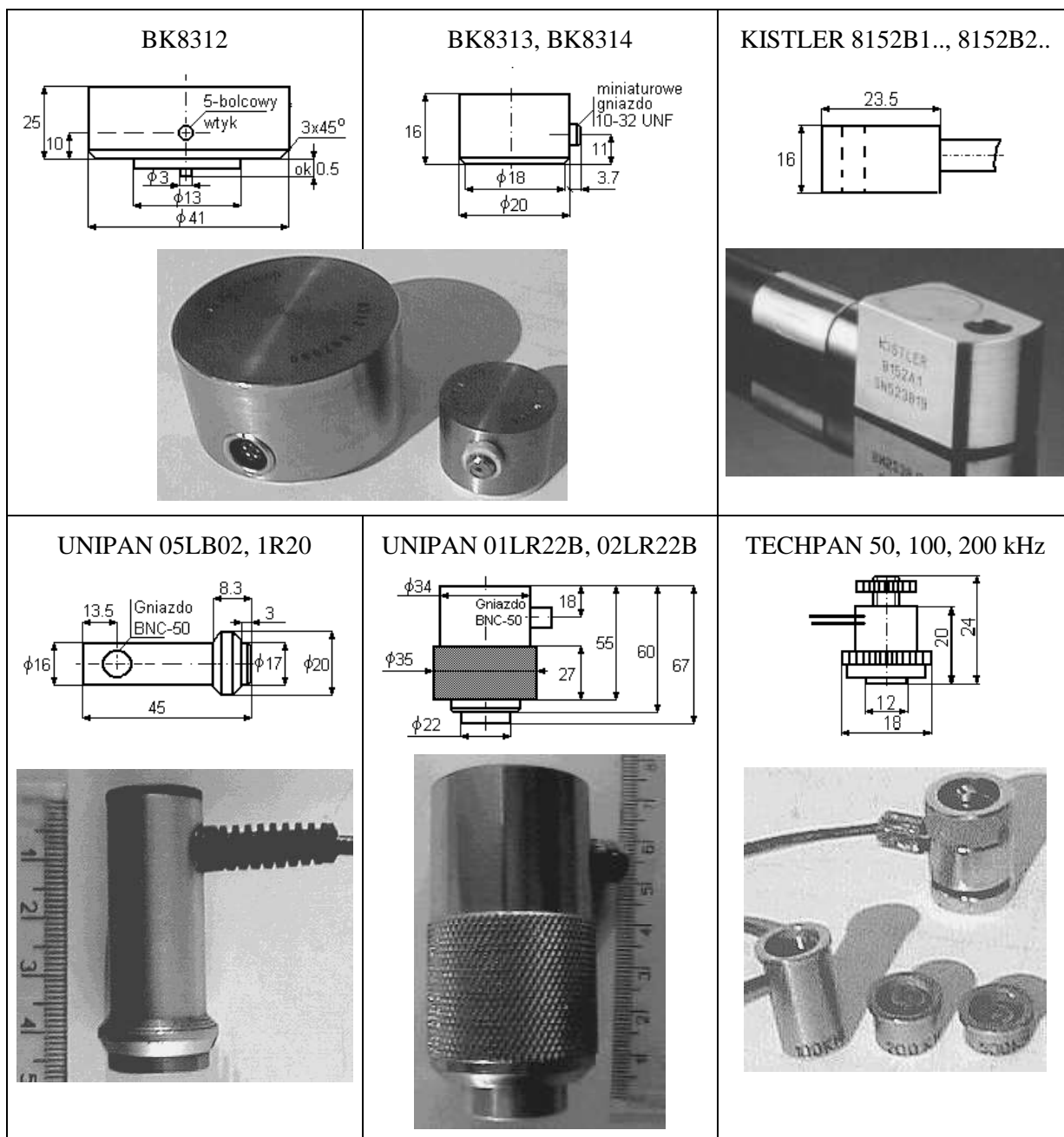
- 8152B2.. - szerokopasmowy 100-900 kHz,
- 8152B1.. - wąskopasmowy 50 - 400 kHz,
- 8152A1.. - wąskopasmowy 50 - 400 kHz - 2 egzemplarze,
Czujnik 8152B1 jest nową wersją czujnika 8152A1

c) Czujniki firmy UNIPAN stosowane w defektoskopii ultradźwiękowej do badania betonu [13]:

- 01LR22B - wąskopasmowy 100 kHz - 2 sztuki,
- 02LR22B - wąskopasmowy 200 kHz,
- 05LB02 - wąskopasmowy 500 kHz,
- 1R20 - wąskopasmowy 1000 kHz.

d) Czujniki firmy TECHPAN stosowane do pomiaru emisji akustycznej [71]. Właściwie jest to jedna obudowa i kilka wymiennych przetworników co pozwala otrzymać szereg czujników m.in.:

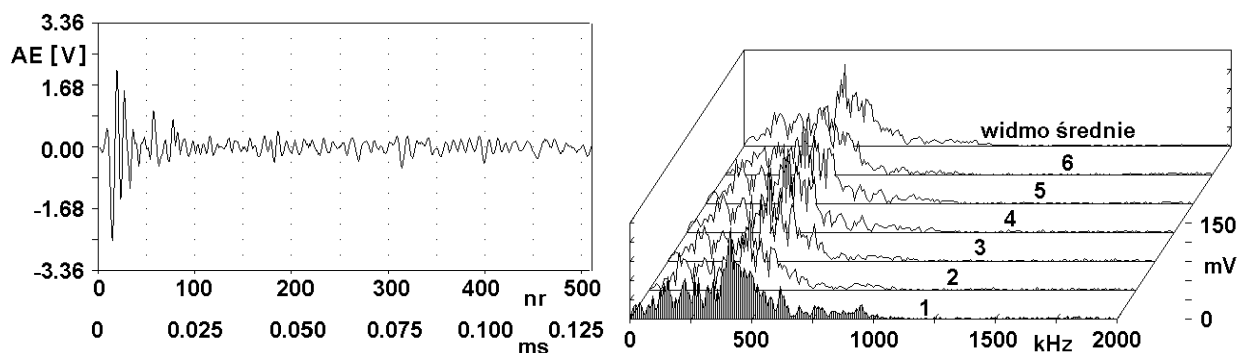
- wąskopasmowy 50 kHz,
- wąskopasmowy 100 kHz,
- wąskopasmowy 200 kHz



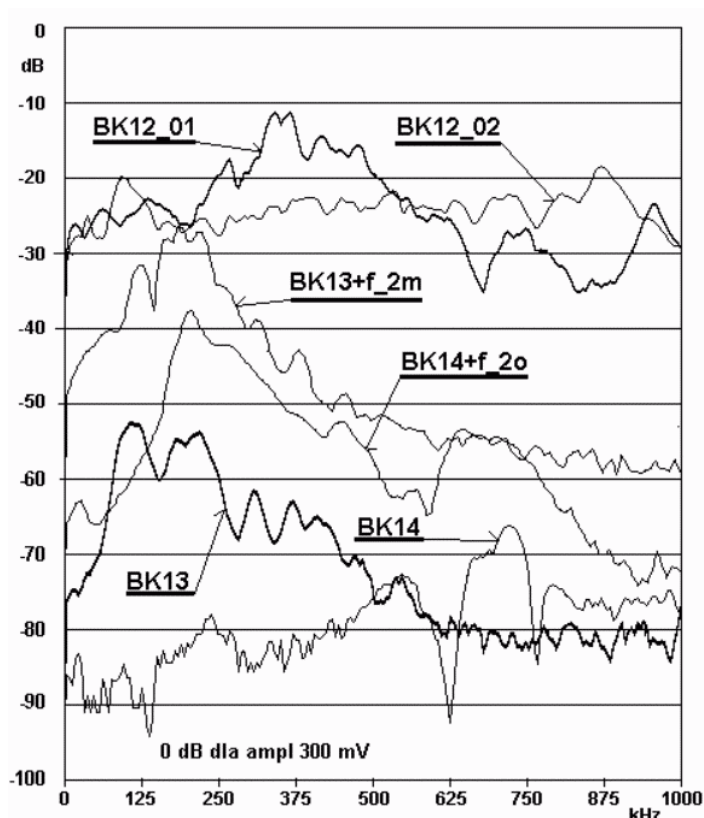
rys. 4.27. Czujniki emisji akustycznej przebadane w Instytucie Technologii Maszyn PW [131, 154].

Badania prowadzono opisaną wyżej metodą łamania grafitu ołówkowego (rys. 4.26). Sygnały wstępnie wzmocnione były przesyłane do LMSN-2 [82], którego oprogramowanie umożliwia wyznaczenie widm sygnałów, a więc określenie charakterystyk czujników.

Dla każdego czujnika wykonywano nie mniej niż pięć prób, rejestrując emisję akustyczną z częstotliwością próbkowania 2.5 MHz. Na podstawie pierwszych 512 punktów (0.2048 ms) wyznaczano transformatę Fouriera sygnału (FFT). Na rys. 4.28 przedstawiono przykładowy przebieg sygnału AE uzyskany przy pomocy czujnika 8312 firmy Brüel&Kjær oraz widma wszystkich sześciu sygnałów wraz z widmem średnim. To średnie widmo traktowano jako charakterystykę amplitudową czujnika AE wraz ze współpracującym z nim przedwzmacniaczem i LMSN-2.



rys. 4.28. Przebieg sygnału AE zarejestrowany czujnikiem B&K 8312 w teście Nielsena-Hsu, widma amplitudowe tego i pięciu następných sygnałów, oraz widmo średnie [131, 154].



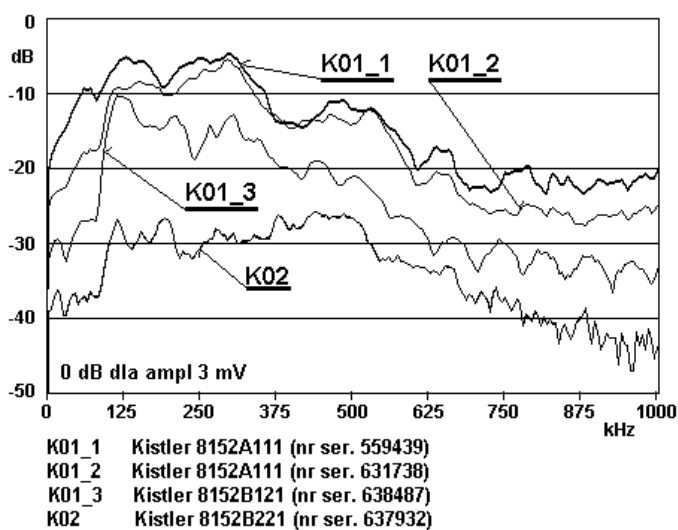
rys. 4.29. Charakterystyki badanych czujników AE firmy Brüel & Kjær

Na kolejnym rysunku (4.29) zestawiono otrzymane w ten sposób charakterystyki czujników firmy Brüel&Kjær. W przypadku czujników szerokopasmowych B&K 8312 (krzywe BK12_01 i BK12_02)

otrzymane charakterystyki różnią się szczególnie w paśmie 250 - 500 kHz. Jak widać, charakterystyka czujnika rezonansowego B&K 8313 wyposażonego w przedwzmacniacz 2637 o 10-krotnie (20dB) obniżonym wzmocnieniu z filtrem oktawowym 200 kHz (krzywa BK13+f_2m), ma maksimum zbliżone do maksimum charakterystyki szerokopasmowego czujnika B&K 8312 (BK12_02), choć odpowiada ono niższym częstotliwościom. Krzywa (BK14+f_2o) ilustruje inny sposób osłabienia sygnału: zastosowanie „niedopasowanego” filtra oktawowego - 200 kHz zamiast 800 kHz, który jest przeznaczony dla rezonansowego czujnika B&K 8314.

Zastosowanie uniwersalnego przedwzmacniacza do czujnika B&K 8313 (krzywa BK13), umożliwia obniżenie charakterystyki o dalsze ok. 17-razy (25 dB) w stosunku do uzyskanej przy stosowaniu przedwzmacniacza 2637 o 10-krotnie (20dB) obniżonym wzmocnieniu z filtrem oktawowym 200 kHz (krzywa BK13+f_2m).

Analogiczne wyniki otrzymane przy użyciu czujników firmy Kistler zestawiono na rys. 4.30. Zwraca uwagę powtarzalność (w granicach 3 dB) charakterystyk czujników 8152A1 (krzywe K01_1 i K01_2), natomiast charakterystyka czujnika 8152B1 (nowa wersja czujnika 8152A1 - krzywa K01_3) w zakresie ponad 125 kHz jest niższa o około 10 dB.

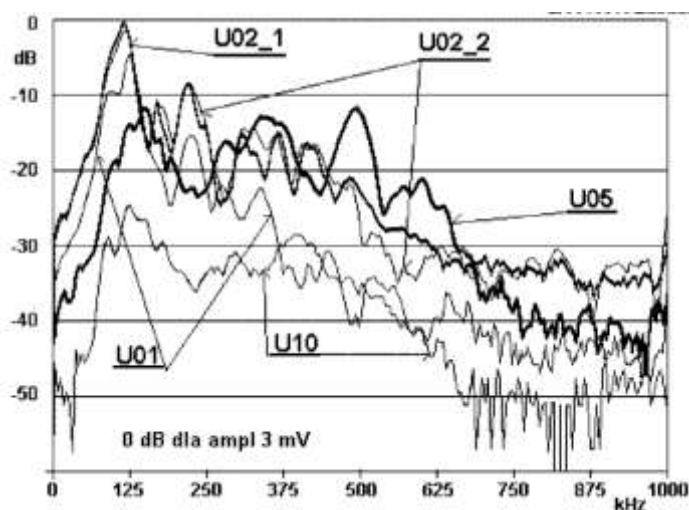


rys. 4.30. Charakterystyki badanych czujników AE firmy Kistler.

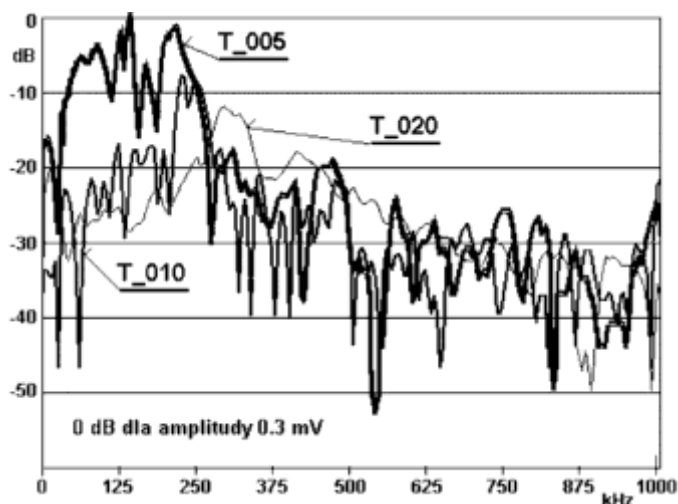
Z kolei przebadano czujniki firmy UNIPAN używane do defektoskopii ultradźwiękowej. Uzyskane charakterystyki przedstawiono na rys. 4.31. Pasmo przenoszenia tych czujników jest zbliżone do charakterystyk czujników firmy Kistler przy czym ich charakterystyki posiadają większą zmienność. Zwraca uwagę powtarzalność charakterystyk w przypadku czujników UNIPAN 02LR22B. Wszystkie czujniki mają wyraźne maksimum w zakresie częstotliwości do 150 kHz. Dla częstotliwości do 500 kHz najmniejszą zmienność charakterystyk wykazują czujniki UNIPAN 05LB02 oraz UNIPAN 1R20.

Na rys. 4.32 przedstawiono charakterystyki czujników firmy TECHPAN. Są one najniższe spośród przebadanych, a ponadto występuje w nich najwięcej miejscowych osłabień funkcji przejścia. Czujniki te są

wyraźnie wąskopasmowe. Szczególnie wyraźnie to widać w przypadku czujnika 200 kHz (krzywa T_020). Ponadto konstrukcja czujników składająca się z jednej obudowy i wymiennych przetworników jest bardzo czuła na błędy montażu i sprawia trudności z utrzymaniem powtarzalności otrzymywanego sygnału.



rys. 4.31. Charakterystyki badanych czujników ultradźwiękowych firmy UNIPAN: U01 - 01LR22B; U02_1 - 02LR22B (nr ser 207); U02_2 - 02LR22B (nr ser 221); U05 - 05LB02; U10 - ULTRASONIC 1R20.



rys. 4.32. Charakterystyki badanych czujników AE firmy TECHPAN: T_005 - czujnik wąskopasmowy 50 kHz; T_010 - czujnik wąskopasmowy 100 kHz; T_020 - czujnik wąskopasmowy 200 kHz.

4. 2. 3. Ocena przydatności czujników ultradźwiękowych do diagnostyki stanu narzędzia

Ocenę przydatności czujników ultradźwiękowych, wybranych spośród przedstawionych w poprzednim punkcie, do diagnostyki stanu narzędzia postanowiono przeprowadzić na podstawie sygnałów zarejestrowanych w czasie zużywania się ostrza, porównując je z sygnałami uzyskanymi przy pomocy klasycznego czujnika AE – BK 8313 [131]. Badania przeprowadzono podczas toczenia wzdłużnego prętów

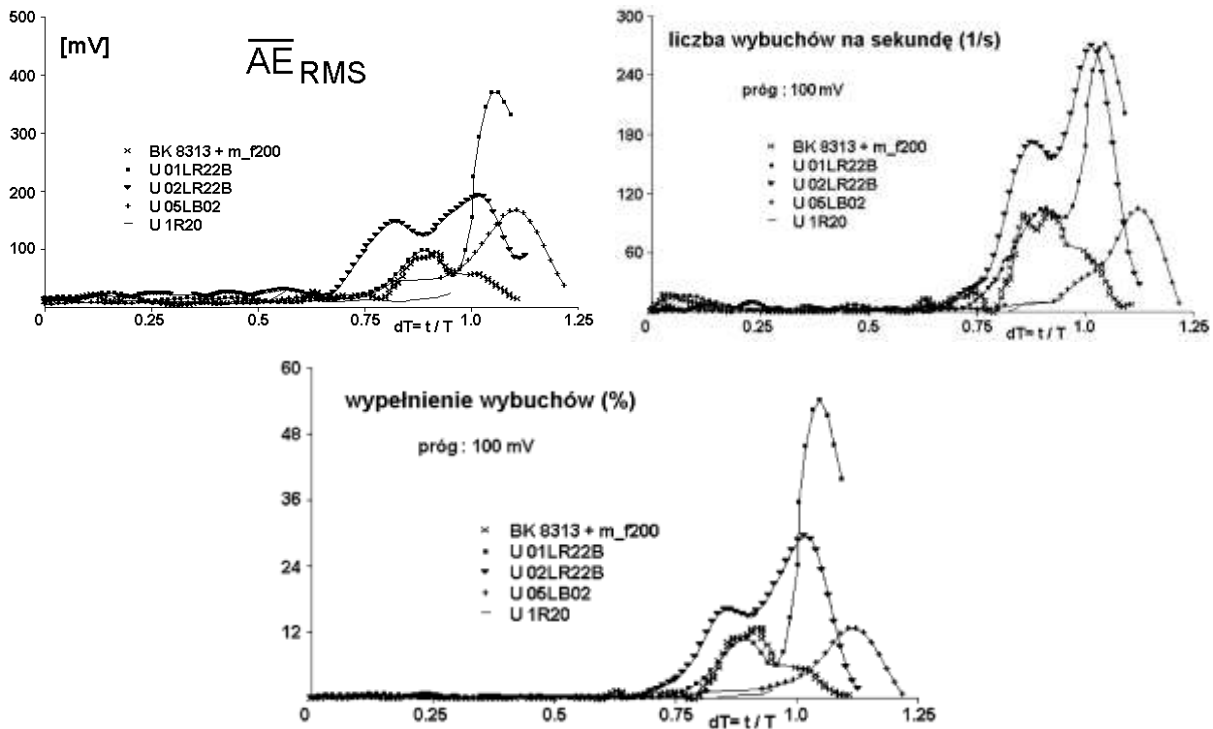
ze stali 45 (180 HB) nożem oprawkowym CSRNR 2525-12 z płytką SNUN 120408 gatunku NT35. Nóż był umieszczony w trójskładowym siłomierzu tokarskim 9263 firmy Kistler (wyniki pomiaru sił nie będą omawiane), na którego górnej powierzchni zamocowano czujnik emisji akustycznej (rys. 3.11). Sygnały AE z uniwersalnego przedwzmacniacza były odbierane przez Laboratoryjny Monitor Stanu Narzędzia LMSN-2 i rejestrowane na dysku komputerowym w postaci cyfrowej. W badaniach tych zastosowano stałe parametry skrawania: $a_p = 2.5$ mm, $f = 0.33$ mm/obr, $v_c = 220$ m/min. W trakcie przerw w skrawaniu (co 1-2 min) wykonywano pomiary szerokości starcia na powierzchni przyłożenia, oraz pomiar głębokości żłobka na powierzchni natarcia. Próby prowadzono do przekroczenia kryterium stępienia, za jakie uznano $KT = 0.15$ mm lub $VB_C = 0.3$ mm.

Procedura pomiarów emisji akustycznej była następująca. W trakcie próby co ok. 6.3 s Rejestrator Emisji Akustycznej zapisywał w pamięci 1 000 000 pomiarów przy częstotliwości próbkowania 2.0 MHz i wyznaczał wartość skuteczną AE_{RMS} ($\tau_{RMS} = 0.2$ ms, z krokiem 0.2 ms) z 200,000 pomiarów (100 ms), a otrzymane wartości były przesyłane do komputera. W komputerze wyznaczana była wartość średnia i odchylenie standardowe AE_{RMS} oraz tempo wybuchów i ich nasycenie dla wybranych poziomów dyskryminacji. Wielkości te tworzyły dyskretny (z krokiem = 6.3 s) przebieg zmian analizowanych miar w funkcji czasu skrawania. W celu wyeliminowania losowych rozprożeń otrzymanego zbioru punktów i określenia tendencji zmian stosowano filtrowanie dolnoprzepustowe. Po zakończonym przejściu rejestrowano także ostatni oryginalny sygnał AE_{raw} . Służył on do analizy charakteru tego sygnału, wyznaczania liczby przekroczeń, oraz do badania widma sygnału. Każda próba opisana została zbiorem przyjętych miar sygnału AE opisanych w punkcie 3.3.2.

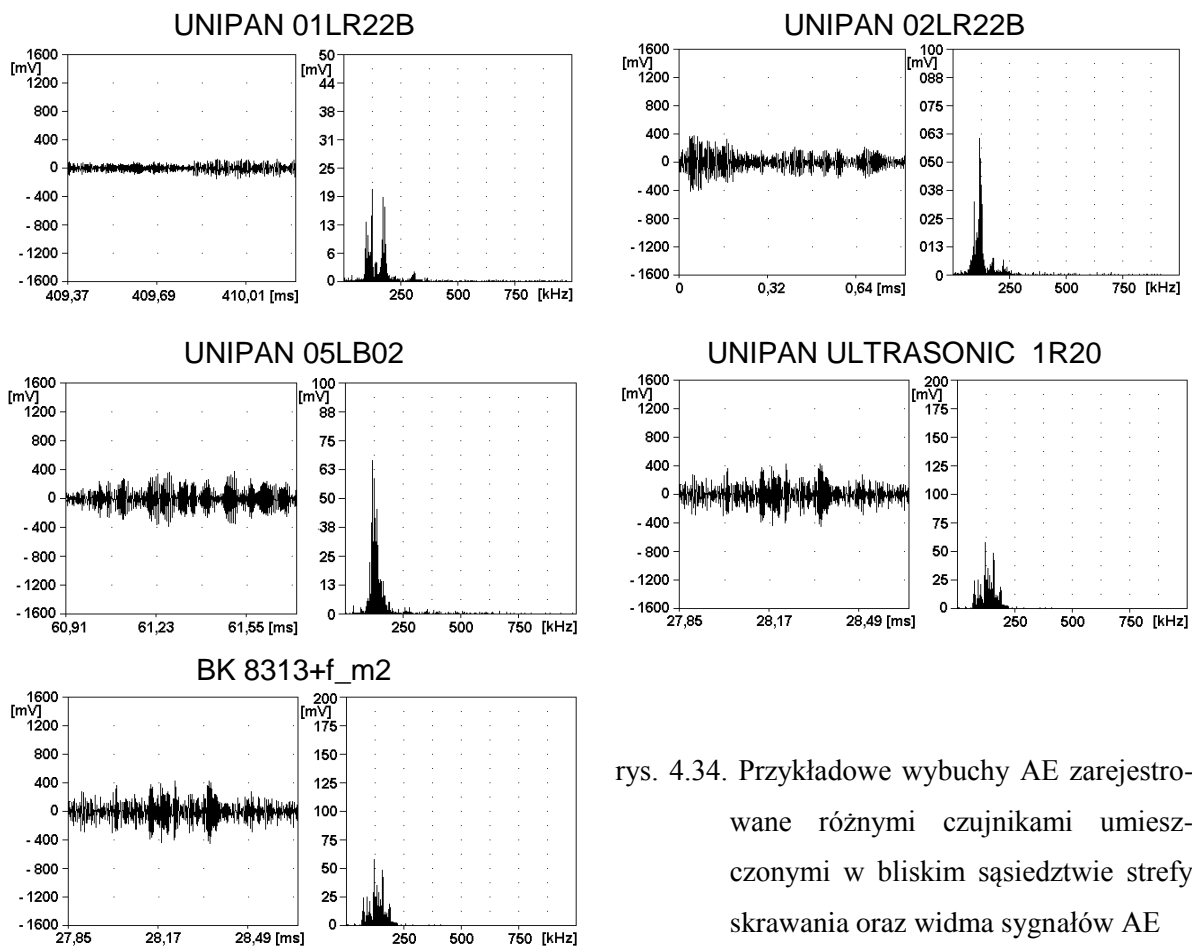
Tu do przedstawienia wyników badań przyjęto miary zdemodulowanego sygnału AE. Jak już wykazano wcześniej (punkt 3.3.2) wszystkie wyznaczane miary AE są ze sobą skorelowane, a ich przydatność do diagnostyki stanu narzędzia jest zbliżona. W celu ujednoczenia osi czasu na rys. 4.33 przedstawiono uzyskane wyniki w funkcji wykorzystanego okresu trwałości ostrza $dt = t_{skr} / T_{KT}$. Jako kryterium stępienia przyjęto $KT = 0.15$ mm.

Przebieg procesu zużywania się ostrza oraz towarzyszących mu zmian miar sygnału AE omówiono szczegółowo w punkcie 3.3.2 (rys. 3.26). Wyniki uzyskane przy pomocy czujnika firmy Brüel&Kjær w tym etapie badań były podobne, czego należało się spodziewać. Ciekawsze jest jednak to, że podobne do nich okazały się także przebiegi AE zarejestrowane przez czujniki przeznaczone do badań ultradźwięków. Jedynie w przypadku czujnika UNIPAN ULTRASONIC 1R20 rejestrowany sygnał AE był słabszy.

Interesującym uzupełnieniem przedstawionych wyników badań charakterystyk czujników może być zestawienie przykładowych wybuchów AE zarejestrowanych przy pomocy wybranych czujników podczas skrawania - rys. 4.34. W celu uzyskania wysokich wartości sygnału AE wykorzystano tu wyniki pomiarów wykonanych przy dużym zużyciu ostrza ($KT > 0.15$ mm). Należy przy tym podkreślić, że wybuchy AE są nieregularne i niepowtarzalne. Nawet sąsiednie różnią się amplitudą, czasem trwania i widmem. Stąd widma



rys. 4.33. Zmienność wartości średniej zdemodulowanego sygnału AE oraz liczby i wypełnienia wybuchów dla wybranych poziomów dyskryminacji.



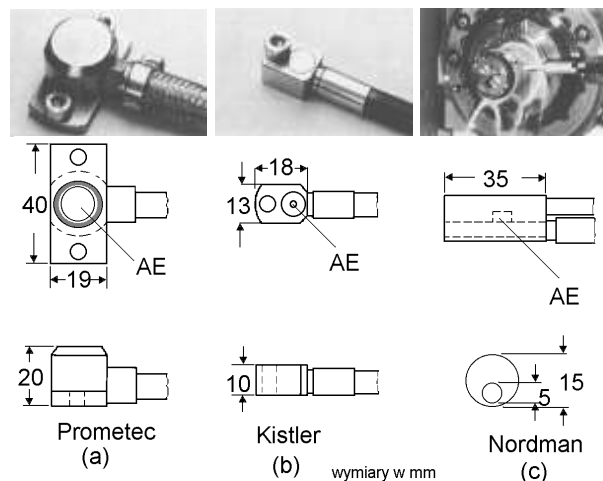
rys. 4.34. Przykładowe wybuchy AE zarejestrowane różnymi czujnikami umieszczonymi w bliskim sąsiedztwie strefy skrawania oraz widma sygnałów AE

przedstawione na rys. 4.34 należy traktować jako w pewnej mierze przypadkowe, a nie jako charakterystyki czujników. Te widoczne są na rysunkach przedstawionych w punkcie 4.2.2 i do nich należy się odwoływać przy interpretacji rysunku 4.34.

Podsumowując przestawione wyżej wyniki badań można stwierdzić, iż omówione czujniki ultradźwiękowe nadają się do nadzoru stanu narzędzia. Różnice dotyczą wielkości sygnału co było do przewidzenia w oparciu o wyznaczone charakterystyki.

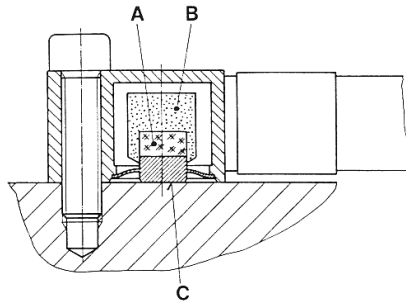
4. 2. 4. Przemysłowe czujniki AE

Przemysłowe, przystosowane do trudnych warunków panujących w strefie skrawania, czujniki emisji akustycznej oferowane są przez wielu producentów [77, 86]. Kilka z nich przedstawiono na rys. 4.35. Dwa pierwsze, jak większość stosowanych przemysłowo w DNIPS czujników AE [4, 178, 186], są przeznaczone do odbioru sygnałów AE z powierzchni obrabiarki. Czasem występują różne warianty doprowadzenia kabla i mocowania: z boku, z góry, od dołu oraz z dociskiem sprężystym [248].



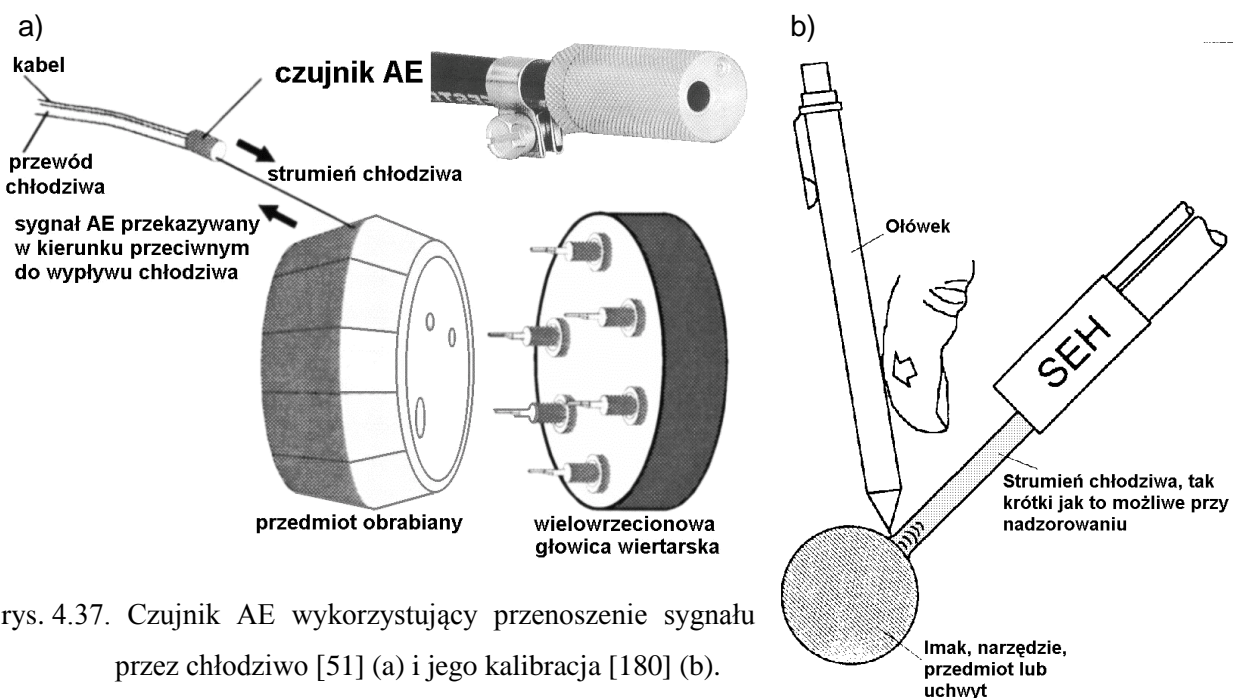
rys. 4.35. Przykładowe wymiary przemysłowych czujników AE przystosowanych do DNIPS [147].

Budowa takich czujników jest wyjaśniona na rys. 4.36 [27]. Przetwornik (A) wykonany jest z materiału piezoelektrycznego, zwykle ceramicznego. Czułość i charakterystyka rezonansowa przetwornika zależy jego wymiarów geometrycznych i od rodzaju materiału. Płaską charakterystykę osiąga się dzięki starannemu odizolowaniu przetwornika od obudowy, przez co unika się oddziaływania niepożądanych rezonansów czy pasmowych wytłumień sygnału. Górna odbierana częstotliwość fal powierzchniowych (Reyleigha) jest zdeterminowana wymiarem powierzchni czołowej elementu kontaktowego czujnika (diafragmy – C na rys. 4.36). Poszerzenie charakterystyki jest możliwe dzięki umocowaniu na przetworniku masy bezwładnej (B) wykonanej z żywicy epoksydowej zmieszanej z proszkiem o dużej gęstości (np. wolframowym) i dopasowanej do przetwornika tak, by tłumiała fale AE i spłaszczała rezonanse. Uzyskane dzięki temu efekty można docenić porównując rys. 4.30 z 4.31 i 4.32.



rys. 4.36. Budowa przemysłowego czujnika emisji akustycznej [27].

Inne podejście polega na odbiorze sygnałów AE przez strumień chłodziwa, który może być skierowany bezpośrednio na narzędzie lub przedmiot (rys. 4.37, [80]).

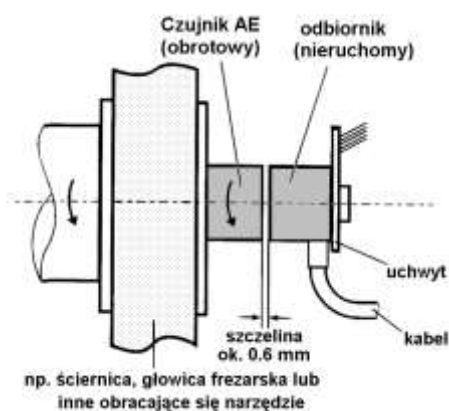


rys. 4.37. Czujnik AE wykorzystujący przenoszenie sygnału przez chłodziwo [51] (a) i jego kalibracja [180] (b).

Jego zaletą jest zbliżenie się do strefy skrawania. Czujniki takie można stosować zamiast konwencjonalnych gdy liczne połączenia zakłócają przekazywanie sygnału lub gdy sygnał jest zakłócony przez pochodzący od innych narzędzi (np. na wielowrzecionowych centrach obróbkowych rys. 4.37a, [51]). Czujnik umożliwia odbiór fal naprężeń z obracających się przedmiotów lub z materiałów o bardzo nierównej powierzchni. Należy jednakże liczyć się z tym, że w niektórych przypadkach fale te mogą być tak zakłócone przez bąbelki powietrza w strumieniu chłodziwa, że odbierany sygnał będzie zbyt słaby. Z drugiej strony cząsteczki metalu czy zanieczyszczenia chłodziwa nie stanowią problemu. Obiektywną ocenę transmisji AE przez strumień cieczy obróbkowej można uzyskać przy pomocy łamania grafitu na powierzchni metalu w miejscu styku ze strumieniem (rys. 4.37b). Jak w teście Nilsena-Hsu (rys. 4.26) powoduje ono powstanie powtarzalnych impulsów AE, odbieranych przez czujnik na drugim końcu strumienia.

Czujnik przedstawiony na rys. 4.38 to przykład rozwiązania problemu transmisji sygnału z elementów obrotowych. Składa się on z bezprzewodowego obrotowego przetwornika AE i nieruchomego

odbiornika [178, 180, 251]. Może być stosowany gdy sygnały muszą być odbierane z obracających się elementów takich jak wrzeciona. Zastosowany do szlifowania czujnik ten umożliwi dokładne wykrycie nawet minimalnego kontaktu, co ułatwia optymalizację głębokości szlifowania [178].

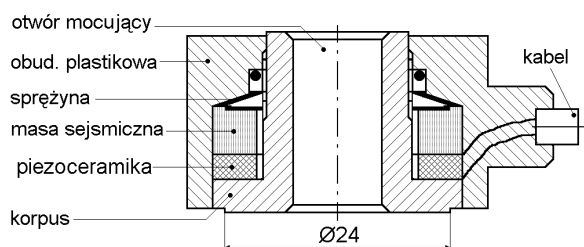


rys. 4.38. Bezprzewodowy czujnik AE [251].

Zapowiadany kilka lat temu czujnik mierzący jednocześnie AE i trzy składowe siły skrawania [27, 138] nigdy nie wyszedł poza próby laboratoryjne (wyniki przy jego pomocy uzyskane przedstawiono na rys. 3.30b) i nie został wdrożony do produkcji. Jego zaletą miało być wspomaganie pomiarów sił przez pomiary AE przy konieczności instalowania tylko jednego czujnika. Okazało się jednakże, iż najlepsze miejsce do pomiaru sił nie koniecznie musi być najbardziej korzystne do pomiaru AE.

4. 3. Czujniki drgania i ultradźwięków

Czujniki drgań były stosowane w warunkach przemysłowych znacznie wcześniej niż czujniki emisji akustycznej, zwłaszcza w celach diagnostycznych obrabiarek. Tym niemniej czujniki te stają się coraz solidniejsze, lepiej spełniające wymagania stawiane przez trudne warunki na obrabiarkach. Na rys. 4.39 przedstawiono czujnik wykorzystywany do monitorowania procesu skrawania w oparciu o pomiar drgań, który pierwotnie był zaprojektowany do badania pracy silników benzynowych [25].



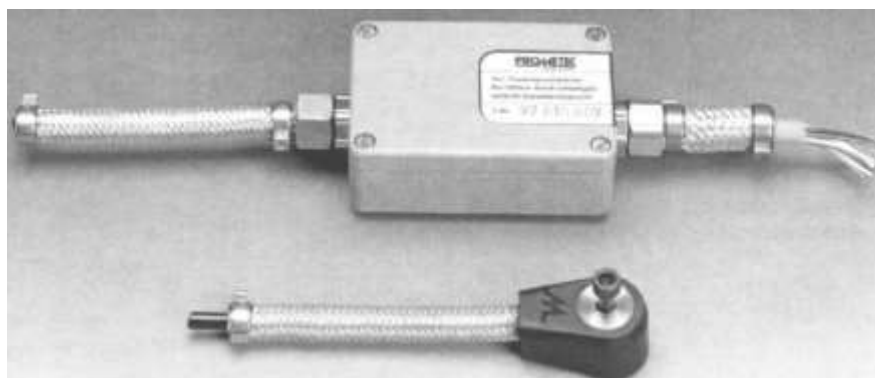
rys. 4.39. Czujnik drgań przeznaczone do monitorowania stanu narzędzia.

Piezoelektryczne akcelerometry mierzą drgania elementów obrabiarki spowodowane przez proces skrawania, zwykle do 10 kHz [1, 14, 64]. Mogą być wykorzystane do wykrywania braku narzędzia, KSO, przekroczenia dopuszczalnych wymiarów przez przedmiot obrabiany, kolizji i innych poważnych zakłóceń

procesu [236]. Można je także wykorzystać do monitorowania nadmiernych drgań łożysk lub wrzecion. Czujnik drgań jest łatwy do zainstalowania na istniejących i nowych maszynach. Czujniki te mogą być instalowane na różnych zespołach układu OUON. Należy przy tym wziąć pod uwagę następujące czynniki:

- Odległość od strefy skrawania. Źródłem energii pobudzającym drgania struktury obrabiarki jest proces skrawania. Im dalej od strefy skrawania jest usytuowany czujnik, tym bardziej zniekształcony jest sygnał drganiowy. Wpływają na niego funkcje przejścia kolejnych elementów i połączeń między nimi.
- Występowanie zakłóceń nie związanych z procesem skrawania, pochodzących od wymuszeń wewnętrznych w obrabiarce (przekładnie zębate, silniki, układy hydrauliczne) i zewnętrznych od innych maszyn i urządzeń.
- Względy techniczne, tzn. dostępność, łatwość i pewność mocowania, a z drugiej możliwość uszkodzenia czujnika lub przewodu odprowadzającego sygnał.

Współcześnie obserwuje się tendencję do rozszerzania zakresu pomiarowego tych czujników. Czujnik drgań i ultradźwięków przedstawiony na rys. 4.40 jest przystosowany do pomiaru oscylacji elementów maszyn od częstotliwości 10 Hz aż do dolnego zakresu AE 80 kHz [234]. Przy okazji warto zwrócić uwagę na widoczne na zdjęciu zabezpieczenie kabli i przedwzmacniacza przed trudnymi warunkami panującymi w strefie obróbki. Jest to typowe dla wszystkich przemysłowych czujników stosowanych w DNIPS. Układy wstępnej obróbki sygnału są umieszczane w stalowych, szczelnych obudowach, są odporne na drgania i izolowane elektrycznie. Kable przyłączeniowe w razie potrzeby są umieszczone w stalowym pancerzu ochronnym. Oprócz „zwyčajnego” zastosowania (we współpracy z układem monitorującym) czujnik przedstawiony na rys. 4.40 może być on wykorzystany z układem nasłuchu procesu PLS 30 [190] (rys. 3.51).



rys. 4.40. Czujnik drgań i ultradźwięków z przedwzmacniaczem firmy Prometec [234].

Jeszcze dalej pod względem rozszerzania możliwości czujników poszła firma Montronix, która oferuje szerokopasmowy czujnik drgań, ultradźwięków i emisji akustycznej o zakresie pomiarowym 0.1Hz ÷500kHz (rys. 4.41), polecany szczególnie do wykrywania KSO na obrabiarkach stosujących różnorodne narzędzia.

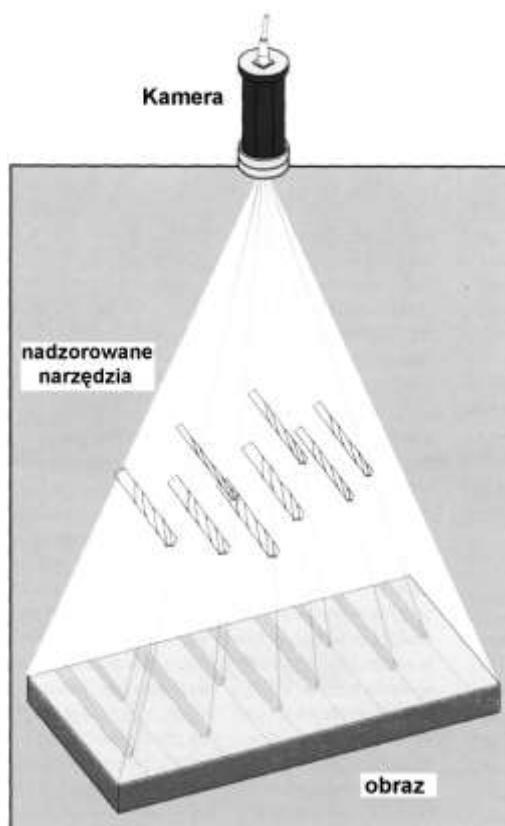


rys. 4.41. Czujniki szerokopasmowy firmy Montronix [64].

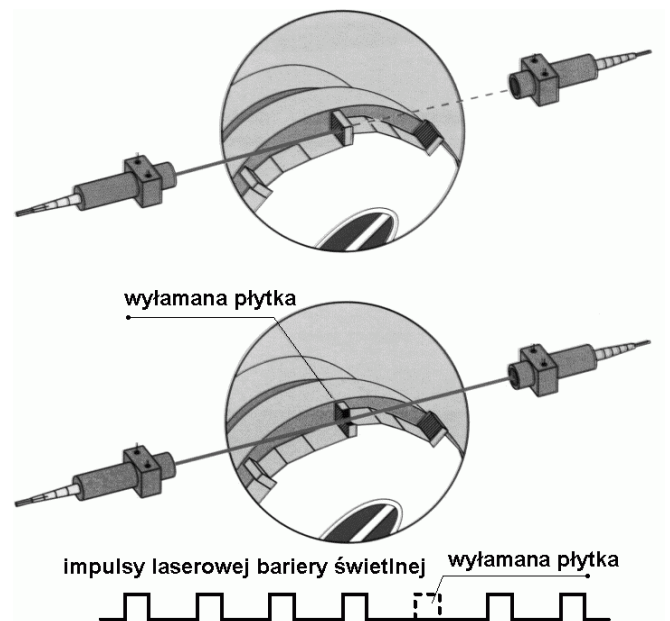
4. 4. Czujniki optyczne i dotykowe stosowane w DNiPS

Obok omówionych wyżej, w szczególnych przypadkach stosowane są czujniki wielkości fizycznych innych niż siły skrawania (z wielkościami pochodnymi), emisja akustyczna i drgania.

Kamera może znaleźć zastosowanie w przypadku głowic wielowrzecionowych (20 i więcej), gdy monitorowanie poszczególnych wrzecion jest zbyt kosztowne - rys. 4.42, [178]. W czasie cyklu uczenia układ zapamiętuje obraz głowicy z narzędziami, do którego porównywany jest obraz w trakcie nadzoru. Umożliwia to wykrycie brakujących lub wyłamanych pojedynczych wiertel. Technika ta może być także wykorzystana np. do testowania montażu, położenia, kompletności, rozmieszczenia itp., kiedy to jest znacznie lepsza niż inne układy nadzoru.



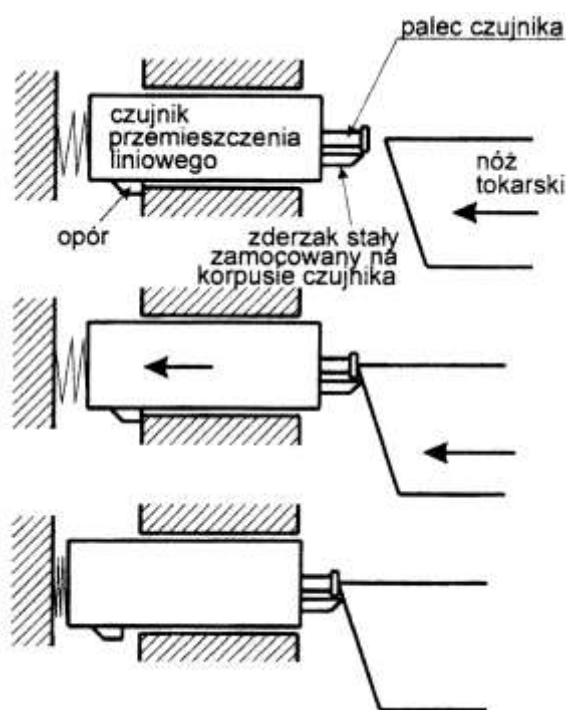
rys. 4.42. Zastosowanie kamery do nadzoru głowicy wielowrzecionowej [178].



rys. 4.43. Zastosowanie lasera do wykrywania KSO przy frezowaniu [178].

Gdy narzędzia są zbyt małe, by można było je nadzorować przy użyciu pomiarów sił lub mocy jak też gdy nie ma odpowiedniego miejsca do zamocowania czujnika AE, rozwiązaniem może być laserowa „bariera świetlna” umożliwiająca wykrywanie KSO i brakującego narzędzia [156, 178, 180]. Może być ona także wykorzystana do nadzorowania ostrzy głowicy frezarskiej, których położenie jest sprawdzane przez promień lasera z rozdzielczością rzędu μm (rys. 4.43). Innym zastosowaniem jest pomiar odkształceń termicznych obrabiarki, np. wydłużenia wrzecion narzędziowych centrum obróbkowego. Wysoką czułość pomiarową uzyskuje się przez ilościową analizę przesłonięcia promienia, która jest wielkością śledzoną przez monitor. Dalsze możliwości wykorzystania lasera to nadzorowanie chropowatości przedmiotu obrabianego, wykrywanie śladów drgań samowzbudnych lub śladów obróbki poprzez analizowanie światła odbitego od powierzchni obrabianej. Układ jest zabezpieczony przed wpływem chłodziwa przy pomocy sprężonego powietrza.

W punkcie 3.1 wspomniano o zastosowaniu sond narzędziowych do nadzoru zużycia ostrza. W celu uniknięcia, a przynajmniej ograniczenia wad tam omówionych, w ITM PW opracowano (i opatentowano) nowatorską koncepcję czujnika do pomiaru zużycia ostrza [32] (rys. 4.44). Zastosowano tu czujnik przemieszczeń, który może się przesuwać w stosunku do obudowy sondy i jest utrzymywany w pozycji wyjściowej za pomocą sprężyny. Popychacz czujnika ma płaskie zakończenie a bardzo blisko niego znajduje się drugi, ostro zakończony popychacz związany z obudową czujnika. Wierzchołek ostrza naciska na popychacz zakończony płasko, a ostro zakończony popychacz opiera się o punkt bazowy narzędzia, przy czym, baza pomiarowa może się znajdować na płycie skrawającej



W czasie najazdu narzędzia na sondę najpierw ostrze narzędzia naciska na popychacz czujnika. Obudowa czujnika pozostaje nieruchoma dzięki sile sprężyny dociskającej. Funkcja typowej sondy narzędziowej (pozycjonowanie ostrza narzędzia w układzie współrzędnych NC) jest automatycznie wykonywana gdy sygnał z czujnika osiąga założoną wcześniej wartość, np. $150\ \mu\text{m}$. Narzędzie przesuwa się nadal, dostatecznie daleko aby ostro zakończony popychacz został dociśnięty do bazy pomiarowej narzędzia. Wskazania czujnika określają wówczas odległość wierzchołka ostrza od bazy, a zmiany tych wskazań przedstawiają zużywanie się ostrza określane przez KE. Zdaniem autorów można w ten sposób uzyskać dokładność rzędu dziesiątych części mikrometra.

rys. 4.44. Sonda narzędziowa przystosowana do pomiaru zużycia ostrza [32].

5. WYBRANE ZAGADNIENIA OBRÓBKI SYGNAŁÓW W DNIPS

Elektryczny sygnał z czujnika jest na ogół wstępnie przetwarzany analogowo. Może to być filtrowanie dolno i/lub górno przepustowe, wstępne wzmacnianie, wyznaczanie wartości skutecznej i inne. Po tej wstępnej obróbce jest on zwykle przekształcany do postaci cyfrowej. Uzyskane w taki sposób szeregi czasowe są w dalszym ciągu przetwarzane w celu ekstrakcji z sygnału tych cech (symptomów), które są najbardziej wrażliwe na parametry interesujące z punktu widzenia monitorowanego procesu (np. na zużycie ostrza). Wykorzystuje się wiele znanych metod przetwarzania jak dalsza filtracja, obliczenia wartości średniej, analiza widmowa, analiza statystyczna i wiele innych. Niektóre z nich były już tu (i będą jeszcze) opisywane. Stosuje się przy tym metody znane z innych zastosowań, a wiedza na temat obróbki sygnałów jest bardzo obszerna i wykracza poza zakres tej monografii. Stąd w tym rozdziale omówione zostaną zaledwie niektóre szczególne aspekty obróbki sygnałów w DNIPS, problemy, z którymi zetknęliśmy w trakcie prac prowadzonych w ITM PW.

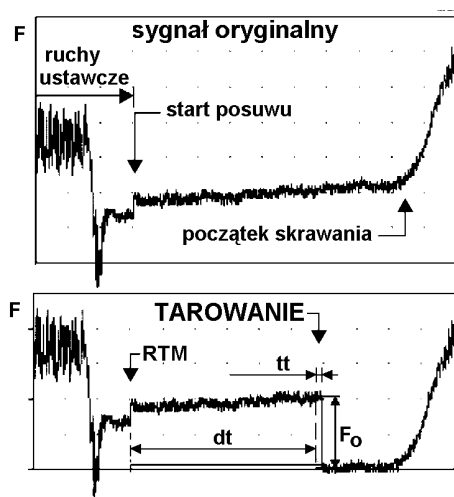
5. 1. Analiza sygnałów z łożysk pomiarowych

Czujniki sił stosowane w DNIPS mierzą siły na nie oddziaływujące, a te pochodzą oczywiście nie tylko od sił skrawania lecz także od szeregu zakłóceń nie związanych z samym procesem skrawania, czasem trudnych do wyeliminowania. Czujniki te podlegają również różnym wpływom zakłócającym (np. cieplnym), które powodują pojawianie się przypadkowych składowych stałych. Stąd też, przed rozpoczęciem skrawania z reguły przeprowadza się tarowanie czujników, czyli pomiar aktualnej wartości sygnału, którą uznaje się za odpowiadającą zerowej sile skrawania. Z zagadnieniami tymi wiązać się może szereg trudności. Jako ich przykładowa ilustracja, niżej przedstawione zostaną wyniki badania przydatności układu nadzoru stanu narzędzia firmy Sandvik (Tool Monitoring System – TMS) wykonane w CBKO-Pruszków [92, 97, 110, 179]. Wykorzystuje on (w omawianej instalacji) sygnały pochodzące z łożysk pomiarowych zainstalowanych na śrubach tocznych napędów posuwów (rys. 4.7). Wprawdzie zarówno układ TMS jak i czujniki nie są już produkowane, jednakże problemy dotyczące tego układu mogą wystąpić i w innych, stąd warte są omówienia.

Badania prowadzone były w CBKO na tokarce TAF 500 CNC będącej składnikiem stacji ASO 50 T. Stosowano oprawkę BT32-PCLN 3240-12 wyposażoną w płytkę z węglików spiekanych CNMG120408. Materiał obrabiany: stal 45. Sygnały pochodzące z łożysk pomiarowych zainstalowanych na śrubach tocznych napędów posuwów rejestrowano na magnetofonie pomiarowym. Były one miarami siły F_f (w kierunku osi Z) i F_p (w kierunku osi X). Konfiguracja czujników była zatem zbliżona do przedstawionej na rys. 4.7, z tym że oś X jest w tokarce TAF 500 CNC pionowa. Sygnały pobierano z wyjścia analogowego układu monitorującego, który wzmacniał 500-krotnie sygnały z czujników sił. W czasie nagrywania sygnały były

osłabiane o 10 lub 20 dB. Łącznie przeprowadzono 75 prób rejestrując blisko 600 m taśmy (ok. 4.4 godzin rejestracji). Zarejestrowane na taśmie wyniki przetworzono na postać cyfrową i zarejestrowano w plikach. Stosowano częstotliwość próbkowania 1904.7 Hz przy prędkości przesuwu taśmy 381 mm/s, dzięki czemu uzyskano 5000 próbek na 1 m taśmy co znacznie ułatwiło identyfikację prób. Stosowano przy tym podwójny filtr dolnoprzepustowy o częstotliwości odcięcia 500 Hz. Ponieważ prędkość przesuwu taśmy była 10-krotnie wyższa niż przy nagrywaniu, otrzymane wyniki należy interpretować jako uzyskane z częstotliwością próbkowania 190.47 Hz, dla częstotliwości odcięcia filtru 50 Hz.

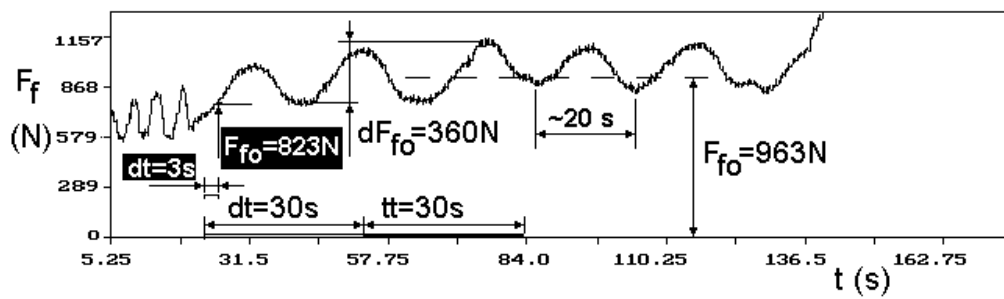
Na rys. 5.1 przedstawiono sposób tarowania sił skrawania stosowany przez TMS [224]. Układ rozpoczyna śledzenie sygnałów sił w chwili podania przez układ sterujący obrabiarki sygnału RTM (Reset Tool Memory). Powinien być on wysyłany po rozpoczęciu posuwu roboczego. Na wstępie TMS oczekuje czas dt , a następnie uśrednia siłę działającą na czujnik przez okres tt , i wyznaczoną wartość F_o przyjmuje za wartość odniesienia ($F = 0$). Instrukcja producenta zaleca $tt = 20 \div 200$ ms. Czas zwłoki winien być wystarczająco długi do ustalenia się sił w czasie dobiegu, jednakże suma $dt + tt$ musi być oczywiście mniejsza od czasu dobiegu. Dopiero po odjęciu F_o od wartości zmierzonej uzyskuje się wartość mówiącą o sile skrawania. Maksymalna występująca w operacji wartość siły skrawania jest wykorzystywana do określania końca trwałości ostrza. Próg czułości, poniżej którego nie są określane wartości maksymalne siły skrawania jest określany w procentach zakresu pomiarowego zastosowanego czujnika siły. Czujniki zainstalowane na badanej tokarce mają zakres pomiarowy 40 kN, co oznacza, że najniższy możliwy do wybrania próg czułości (1%) wynosi 400 N.



rys. 5.1. Tarowanie sygnałów w TCM [224].

Na wstępie postanowiono przeanalizować typowe przebiegi sygnałów przed rozpoczęciem obróbki. Start posuwu roboczego powodował niewielki wzrost sygnału F_f po czym ulegał on w dalszym ciągu istotnym zmianom. W kilku próbach czas dobiegu był znaczny, co pozwoliło na ocenę stabilności sił działających na czujniki w czasie ruchu jałowego. Na rys. 5.2 przedstawiono zmienność sygnału siły F_f w czasie długotrwałego dobiegu w jednej z nich. Przyjęto tu czas zwłoki dt i czas tarowania tt równe 30 s, co

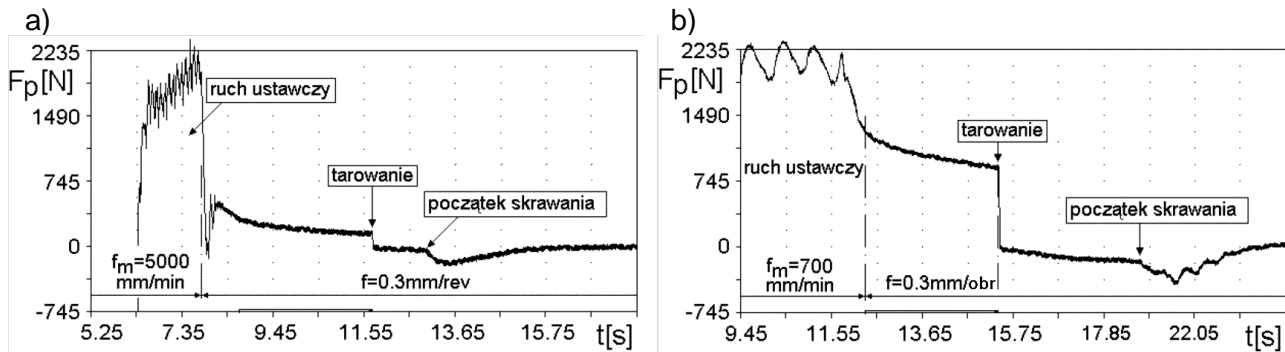
jest oczywiście wartością trudną do przyjęcia w warunkach produkcyjnych. Jak widać zmienność siły F_{fo} (dF_{fo}) wynosiła tu 360 N. Dla wyznaczonej przez TMS siły $F_{fo} = 963$ N, siła maksymalna w próbie wyniosła $F_{fmax} = 1397$ N. Jednakże ta wartość maksymalna będąca podstawą do oceny stanu narzędzia zależy właśnie od F_{fo} . Przy racjonalnych czasach tarowania ($dt = 3$ s i $tt = 200$ ms) wartość F_{fo} w tej próbie wyniosła 823 N co sprawia, iż układ wykrywa $F_{fmax} = 1537$ N. Przy krótkim czasie tarowania wykryta przez układ siła maksymalna w tej próbie jest zatem obciążona błędem przypadkowym $\approx 13\%$. W próbie tej stosowano prędkość obrotową wrzeciona 100 obr/min oraz posuw 0.3 mm/obr czyli 0.5 mm/s. Ponieważ śruba toczna napędu posuwu ma skok 10 mm, czas jej obrotu wynosi ok. 20 s i jak widać jest równy okresowi zmian sygnału F_{fo} , co świadczy o tym, iż pochodzą one od samego czujnika siły czy mówiąc ogólniej od pary śruba toczna – łożysko pomiarowe. Zauważmy, że obserwowana zmienność sygnałów w czasie ruchów ustawczych lub dobiegu narzędzia nie przekracza najniższego progu czułości jaki może być przyjęty przez TMS dla zainstalowanych czujników (400 N) czyli 1% zakresu pomiarowego.



rys. 5.2. Zmienność sygnału siły F_f w czasie ruchu jałowego.

W przebiegu sygnału odporowej siły skrawania F_p w czasie ruchu jałowego można wyróżnić dwa charakterystyczne typy. O ile ruch ustawczy był stosunkowo szybki (rys. 5.3a - 5000 mm/min) przejście do posuwu roboczego powodowało uwolnienie się napięć w łańcuchu kinematycznym – spadek sygnału do zera, po czym następował ponowny szybki wzrost sygnału. Wolniejszy ruch ustawczy (rys. 5.3b) nie powodował spadku sygnału F_p przy przejściu do posuwu roboczego. W czasie dobiegu narzędzia z posuwem roboczym napięcia w układzie kinematycznym opadały powoli. Jeśli czas dobiegu był krótki, początek skrawania powodował uwalnianie pozostałych napięć (spadek sygnału), nakładający się na wzrost siły skrawania, a to pociągało za sobą niemożliwość właściwej oceny rzeczywistej wartości siły skrawania. Sygnał rejestrowany jako siła skrawania często był wręcz niższy niż wyznaczona w czasie tarowania wartość F_{po} . W próbie przedstawionej na rys. 5.3a spadek sygnału spowodowany początkiem obróbki wyniósł ok. 190 N, zaś w próbie z rys. 5.3b ok. 230 N. W obu przypadkach zmierzona siła skrawania była w przybliżeniu równa otrzymanej przy tarowaniu. Oznacza to, że TMS przyjmował ją za zerową. Warto podkreślić, że w szeregu prób rejestrowano „ujemne” wartości siły F_p . Ponieważ TMS bierze pod uwagę tylko wartości wyższe od progu czułości (tu 400 N), z reguły nie było możliwe nauczenie układu, a więc także wykorzystanie sygnałów z tego czujnika do nadzoru. Sprawia to, że sygnał z kierunku, w którym nie odbywa

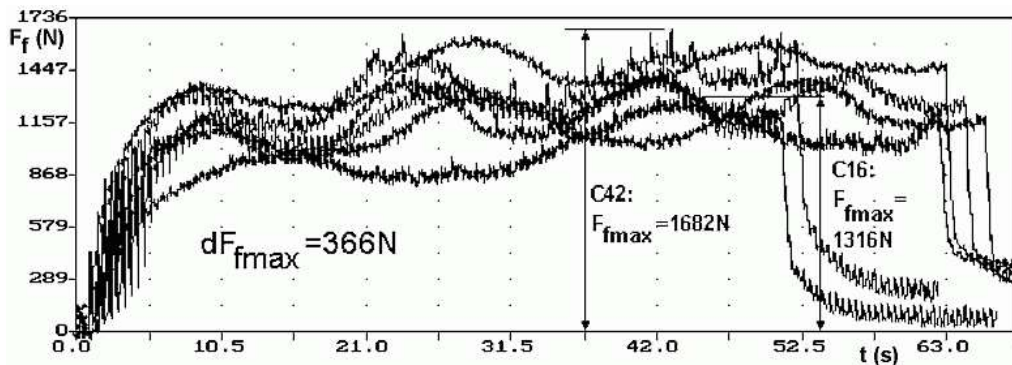
się ruch posuwowy jest nieprzydatny do nadzoru stanu narzędzia opartego na obserwacji wzrostu sił skrawania.



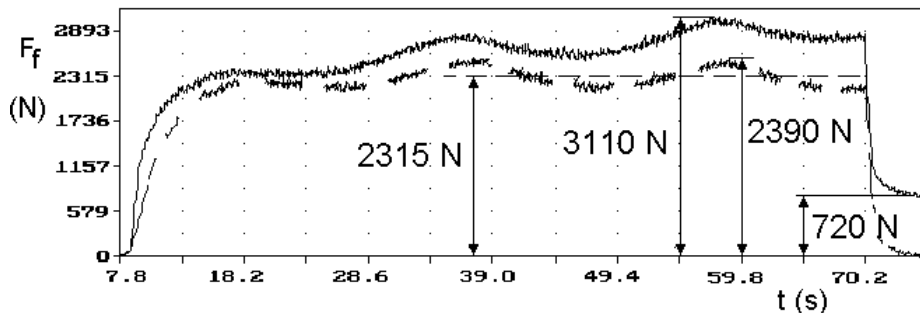
rys. 5.3. Przebieg sygnału siły odporowej na początku próby.

Dotychczas analizowano przebieg sygnałów pochodzących z czujników sił w czasie ruchu jałowego przy rozpoczynaniu skrawania. Obecnie przejdziemy do ich przebiegu w czasie obróbki.

Na rys. 5.4 nałożono na siebie przebiegi sygnałów F_f z sześciu prób, w których przekrój warstwy skrawanej był ten sam ($a_p = 2 \text{ mm}$, $f = 0.3 \text{ mm/obr}$). Jak widać rozrzut wartości sygnałów wyniósł $dF_{fmax} = 366 \text{ N}$ czyli był zbliżony do zaobserwowanego przy dobiegu narzędzia (rys. 5.2), co wydaje się być naturalne, jako że obie te zmienności pochodzą bezpośrednio z łożysk pomiarowych.



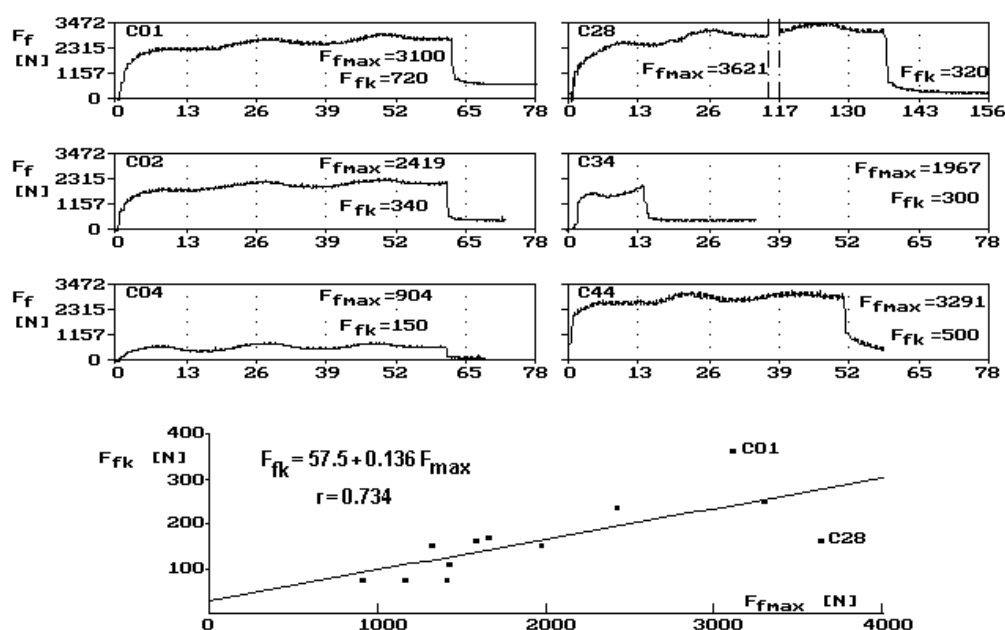
rys. 5.4. Przebiegi sygnału F_f w próbach o tym samym przekroju warstwy skrawanej.



rys. 5.5. Zmienność sygnału siły F_f w czasie skrawania ze stałymi parametrami.

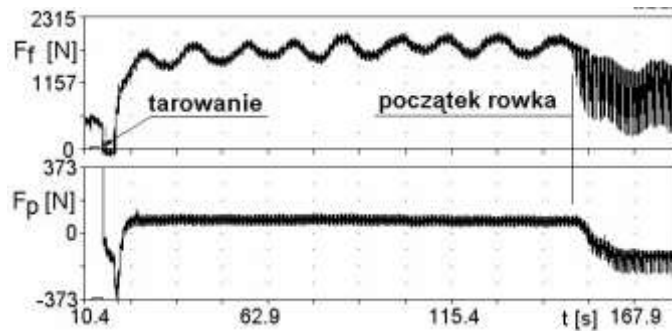
Typowy przebieg sygnału w całej próbie prowadzonej przy ustalonych parametrach skrawania przedstawiono linią ciągłą na rys. 5.5. Jak widać, mimo iż siła posuwowa była stała, siła działająca na łożysko pomiarowe ulegała okresowym wahaniom (okres zmian ≈ 20 s równy czasowi obrotu śruby toczonej) nałożonym na systematyczny wzrost. Po zakończeniu skrawania końcowa wartość sygnału (F_{fk}) nie była równa zero. W celu wyraźniejszego zilustrowania tego narastania, przerywaną linią naniesiono omawiany przebieg obrócony tak, by zbiegał do zera. W tej próbie TMS wykrył $F_{fmax} = 3110$ N, podczas gdy po odliczeniu narastania należałoby przyjąć $F_{fmax} = 2390$ N, zaś eliminując także okresową zmienność $F_{fmax} = 2315$ N.

Taki przebieg sygnału F_f był charakterystyczny dla wszystkich prób, w których parametry skrawania były ustalone. Kilka z nich zestawiono na rys. 5.6. Na dolnej części tego rysunku przedstawiono korelację F_{fk} z F_{fmax} . Jak widać nie jest ona zbyt silna, co widoczne jest szczególnie przy porównaniu prób C01 i C28, zwłaszcza że obie próby prowadzone były przy tym samym posuwie i głębokości skrawania.



rys. 5.6. Zmienność siły posuwowej przy skrawaniu z ustalonymi parametrami skrawania.

O ile wahania sygnału można wyjaśnić podobnie jak poprzednio, o tyle narastanie tego sygnału wydaje się wynikać z gromadzenia się naprężeń w łańcuchu kinematycznym posuwu. Hipoteza ta znajduje potwierdzenie w wynikach pomiarów prowadzonych przy obróbce wałka z rowkiem (rys. 5.7). Z chwilą gdy narzędzie napotykało rowek, wstrząsy spowodowane uderzeniami sprawiały, że siła spadała do wartości nieco niższej niż ta, jaką miała na początku skrawania. Przyrost sygnału F_f wynikający z tego gromadzenia naprężeń jest zatem niestabilny.



rys. 5.7. Wpływ przerw w obróbce na średnią wartość sygnałów sił skrawania.

Rysunek 5.7 ilustruje także bardzo dobitnie trudności na jakie napotyka TMS przy wykorzystaniu sygnału biernej siły skrawania (F_p). Tarowanie przebiegało tu podobnie jak w próbie C02 (omówiony wyżej rys. 5.3b) - po jego wykonaniu sygnał w dalszym ciągu wolno spadał, zaś w momencie rozpoczęcia skrawania uwolnienie się naprężeń spowodowało znaczny dodatkowy spadek. Tak więc w momencie rozpoczynania skrawania TMS „widział” siłę $F_p = -386$ N, a po jej ustaleniu 80 N (zamiast co najmniej 466 N). Przerwy w obróbce spowodowały spadek sygnału o 210 N do wartości -130 N. Sygnał taki jest nieomal nieprzydatny do diagnostyki stanu narzędzia. Wrócimy do problemu tarowania niżej, tymczasem zastanówmy się, w jaki sposób opisane niedokładności będą wpływały na niedokładność oceny końca okresu trwałości ostrza.

Układ monitorujący uznaje narzędzie za stępione, gdy maksymalna siła skrawania w przejściu (F_{max}) spełnia warunek:

$$F_{max} \geq L1F * F_{max_o} \quad (5.1)$$

gdzie F_{max_o} - maksymalna siła przy ostrym narzędziu.

$L1F$ - współczynnik określający stępienie ostrza (zalecane wartości 1.2÷2)

Przyjmując dla uproszczenia liniowy wzrost siły skrawania towarzyszący zużywaniu się ostrza, oraz liniowy wzrost zużycia, wykorzystaną część okresu trwałości ostrza można opisać jako:

$$\Delta T = \frac{F_{max} / F_{max_o} - 1}{L1F - 1} \quad (5.2)$$

Osiągnięcie przez ΔT wartości równej 1 oznacza stępienie ostrza.

Omówione wyżej błędy wyznaczania F_o wpływają bezpośrednio na błąd oszacowania wykorzystanej części okresu trwałości ostrza, który można opisać zależnością:

$$d\Delta T = \left| \frac{\partial \Delta T}{\partial F_{max}} \right| dF_{max} + \left| \frac{\partial \Delta T}{\partial F_{max_o}} \right| dF_{max_o} \quad (5.3)$$

Błędy pomiaru sił F_{max} i F_{max_o} są takie same, ponieważ wynikają ze zmienności siły F_o (F_o na rys. 5.2 i F_{fmax} na rys. 5.4):

$$dF_{max} = dF_{max_o} = dF_o \quad (5.4)$$

i nie powinny przekraczać 1% zakresu pomiarowego czujników siły, czyli minimalnego możliwego do nastawienia progu czułości. W badanym przypadku oznacza to 400 N.

Podstawiając (5.3) do (5.2) i wykonując różniczkowanie otrzymuje się:

$$d\Delta T = \frac{dF_o}{L1F - 1} \left(\frac{1}{F_{max_o}} + \frac{F_{max}}{F_{max_o}^2} \right) \quad (5.5)$$

Gdy zużycie ostrze osiąga wartość dopuszczalną zachodzi:

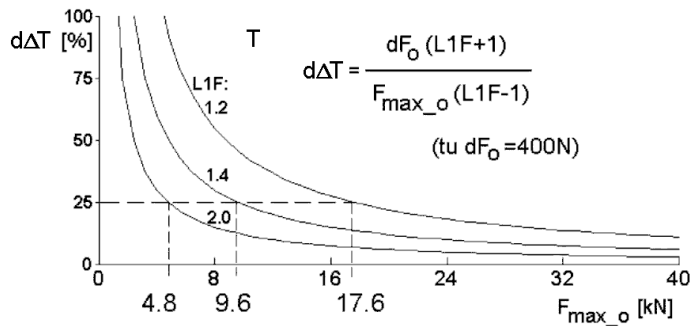
$$F_{max} = L1F * F_{max_o} \quad (5.6)$$

Podstawiając (5.6) do (5.5) otrzymujemy błąd oceny wykorzystania ostrza w chwili zasygnalizowania przez układ stopienia ostrza:

$$d\Delta T = \frac{dF_o(L1F + 1)}{F_{max_o}(L1F - 1)} \quad (5.7)$$

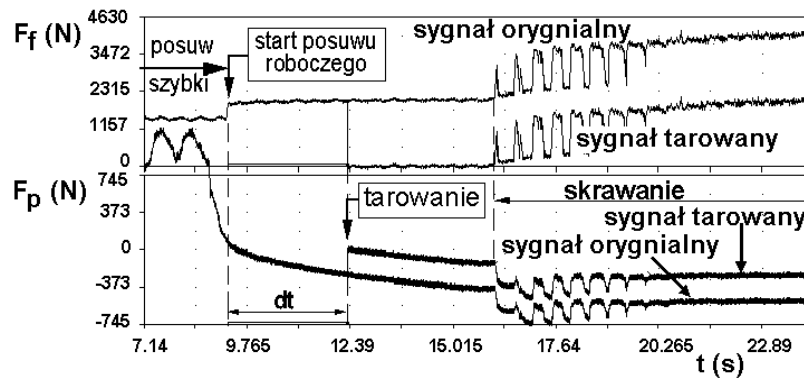
W trakcie przeprowadzonych prób maksymalna zarejestrowana w próbach siła F_f wyniosła 3621 N dla posuwu 0.3 mm/obr i głębokości skrawania 4 mm, a więc dla parametrów odpowiadających obróbce średniokładnej. Dla narzędzia ostrego otrzymywano przy $a_p * f = 2.0 * 0.3$ siłę $F_{fmax_o} \approx 1450$ N, zaś dla stępienego $F_{fmax} \approx 2030$ N, co oznacza wartość współczynnika $L1F \approx 1.4$.

Na rys. 5.8 przedstawiono zależność błędu oszacowania wykorzystania ostrza od siły nominalnej przy ostrym narzędziu i współczynnika $L1F$ przy założeniu, że dF_o jest równe 400 N. Przyjmując wartość współczynnika $L1F$ wynikającą z zależności siły skrawania od stanu narzędzia można stwierdzić jaka musi być minimalna siła F_{fmax_o} aby błąd oszacowania $d\Delta T$ mieścił się w żądanych granicach. Na przykład dla maksymalnej zalecanej wartości $L1F = 2.0$, $d\Delta T$ nie będzie przekraczać 25% jeśli siła F_{fmax_o} będzie większa niż 4800 N. Dla niższych wartości współczynnika $L1F$ niezbędna siła skrawania F_{fmax_o} będzie odpowiednio większa (9600 kN dla $L1F = 1.4$ i 17600 N dla $L1F = 1.2$). Za racjonalną wartość $L1F$ należy uznać ok. 1.4. Ogólnie więc powiedzieć można, że TMS będzie mógł skutecznie wykrywać nadmierne zużycie ostrza jeśli nominalna siła skrawania (dla ostrego narzędzia) będzie wyższa niż ok. 25% zakresu pomiarowego zainstalowanego czujnika. W rozpatrywanym przypadku jest to ok. 10 kN. Tak znaczną siłę posuwową można osiągnąć (w stosowanych warunkach skrawania) dla przekroju warstwy skrawanej $a_p * f \approx 5$ mm².

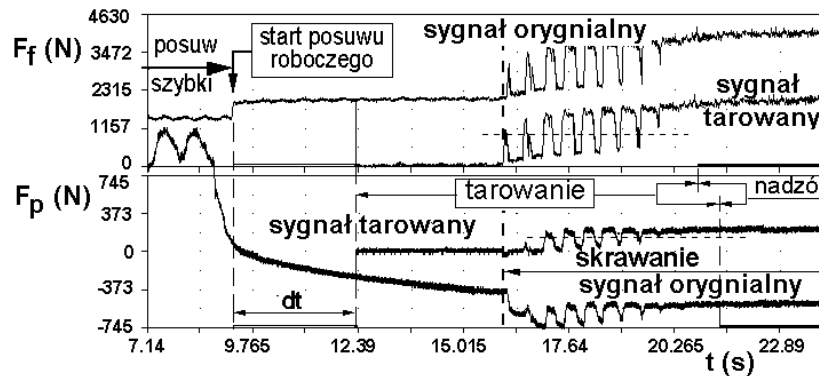


rys. 5.8. Zależność błędu oszacowania wykorzystania ostrza od siły nominalnej i współczynnika $L1F$.

Wróćmy do problemu tarowania sygnałów z czujników sił skrawania. Na rys. 5.9 przedstawiono przebiegi sygnałów F_f i F_p na początku próby, w której toczone wałki miały silnie bijące czoło. Tarowanie przeprowadza się po upływie kilku sekund od startu posuwu roboczego (dt na rys. 5.1). W przypadku sygnału z kierunku, w którym odbywa się posuw (F_f), tarowanie takie daje wynik zadowalający. Znacznie gorzej jest dla kierunku biernego. Sygnał oryginalny obniża się w dalszym ciągu (omówione wyżej powolne uwalnianie naprężeń) powodując, że sygnał tarowany spada poniżej zera. Początek skrawania przyspiesza to uwalnianie powodując dalszy spadek „siły skrawania” poniżej zera i czyniąc sygnał trudnym do wykorzystania. W celu częściowego przynajmniej ograniczenia skutków błędów tarowania przed całkowitym uwolnieniem się naprężeń w układzie kinematycznym, zmodernizowano sposób tarowania (rys. 5.10, [76, 92]). Rozpoczyna się ono, podobnie jak poprzednio, po upływie kilku sekund od startu posuwu, jednakże w odróżnieniu od tarowania konwencjonalnego, w którym wartość odniesienia określana jest w czasie ułamka sekundy (tt na rys. 5.1), tu jest ono procesem ciągłym. W celu wyeliminowania krótkotrwałych, szybkich zmian sygnału z czujnika, jest on na wstępie filtrowany dolnoprzepustowo. Z kolej każda wartość niższa niż uzyskana od początku tarowania uznawana jest za nowe zero. Tarowanie kończy się dopiero po trwającym co najmniej trzy obroty przedmiotu obrabianego przekroczeniu przez sygnał założonej wartości oznaczającej początek skrawania (poziome przerywane linie na rys. 5.10). Moment ten jest wyznaczany niezależnie dla obu kanałów. Korzyści wynikające z zastosowania nowego sposobu tarowania są szczególnie dobrze widoczne dzięki porównaniu sygnałów tarowanych w osi F_p w obu wersjach (rys. 5.9 i 5.10). W nowej wersji sygnał w dalszym ciągu jest wprawdzie zniekształcony (obniżony w stosunku do rzeczywistej siły skrawania o przypadkową wartość), jednakże, w odróżnieniu od sygnału po tarowaniu konwencjonalnym, swoim kształtem przypomina przebieg siły. Może być więc wykorzystany przynajmniej do wykrywania katastroficznego stępienia ostrza.



rys. 5.9. Konwencjonalne tarowanie sygnałów z łożysk pomiarowych.



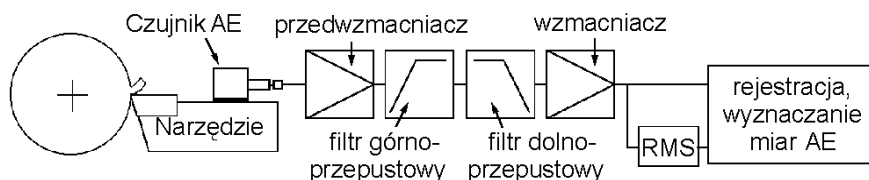
rys. 5.10. Zmodernizowane tarowanie sygnałów z łożysk pomiarowych.

5. 2. Obróbka sygnałów AE pochodzących z procesu skrawania

5. 2. 1. Wstępna obróbka sygnałów AE

Wykorzystując emisję akustyczną do DNiPS, należy zadbać o wzajemne dopasowanie trzech elementów: samego sygnału AE, czujnika i przedwzmacniacza. Od tego dopasowania może w istotny sposób zależeć wiarygodność całego układu diagnostycznego. Często, zwłaszcza w pracach badawczych stosowane są czujniki AE z wbudowanymi przedwzmacniaczami, zaprojektowane do innych, „tradycyjnych” celów jak badania nieniszczące. Często nie są one dopasowane do sygnałów pochodzących ze strefy skrawania, które bywają bardzo silne. To pociągać może za sobą znaczne zniekształcenia sygnału AE, prowadzące nawet do ich całkowitej nieprzydatności. Tu przedstawione zostaną jedne z możliwych przyczyn zniekształceń sygnału AE, a także niektóre inne aspekty obróbki sygnału AE. Wszystkie przedstawione analizy, a także rysunki wykonano przy użyciu Laboratoryjnego Monitora Stanu Narzędzia (LMSN-2) opisanego bliżej w następnym punkcie.

Typowy tor pomiaru emisji akustycznej pochodzącej z procesu skrawania przedstawiono na rys. 5.11.

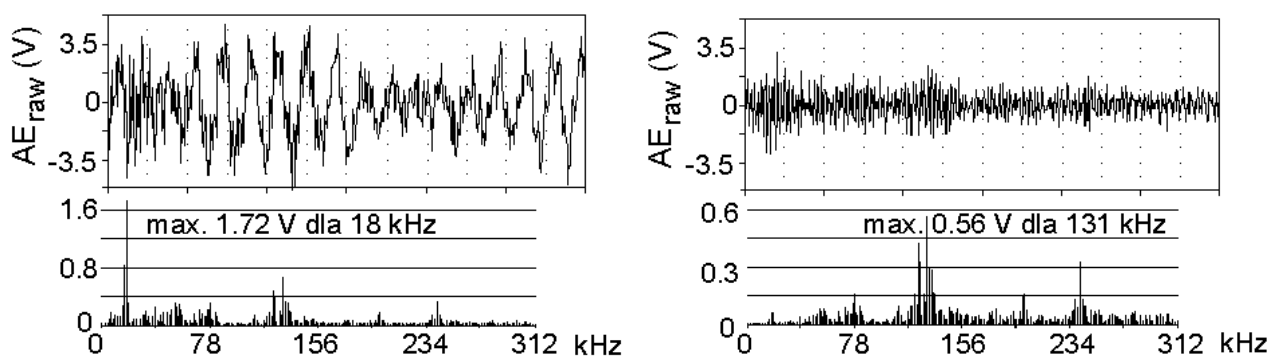


rys. 5.11. Schemat typowej obróbki sygnału AE.

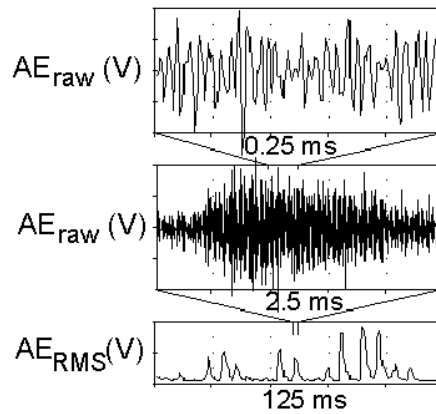
Sygnał z czujnika AE musi być wstępnie wzmacniany w przedwzmacniaczu (wzmacniaczu ładunku). Dość powszechnie uważa się, iż najwięcej informacji o stanie procesu skrawania zawiera się w paśmie powyżej 100 kHz, stąd sygnał AE jest z reguły filtrowany górnoprzepustowo w celu eliminacji nieużytecznych niższych częstotliwości, mogących ponadto zawierać zakłócenia elektryczne czy mechaniczne. Dodatkową przyczyną filtrowania jest fakt, że składowe sygnału o stosunkowo niskich częstotliwościach mogą mieć znaczną amplitudę, a przez to zmuszać do stosowania niższych wzmocnień. Użyteczne pasmo sygnału ma wtedy obniżoną rozdzielczość. Zagadnienie to zilustrowano na rys. 5.12, na którym przedstawiono sygnały uzyskane z szerokopasmowego czujnika firmy Brüel&Kjær BK8312. Po lewej stronie umieszczono fragment sygnału oryginalnego oraz jego widmo. Widoczny jest znaczny udział składowej o częstotliwości 18 kHz. Przefiltrowanie tego sygnału z częstotliwością odcięcia 100 kHz (prawa strona rysunku 5.12) eliminuje to zakłócenie. W przykładzie pokazanym na rys. 5.12 zastosowano filtr cyfrowy do wyników przekształconych przetwornikiem A/C. Filtrowanie analogowe na wcześniejszym etapie obróbki sygnału umożliwia lepsze wykorzystanie zakresu pomiarowego aparatury. Filtr może być umieszczony w różnych miejscach toru pomiarowego - im wcześniej tym lepiej. Np. rezonansowy czujnik BK8313 współpracuje z przedwzmacniaczem BK2637, w którym kolejno występują:

- pierwszy wstępny stopień wzmocnienia sygnału
- filtr liniowy lub oktawowy 200 kHz albo 800 kHz,
- dwa kolejne stopnie wzmacniacza.

Następnie sygnał musi być podany na wzmacniacz, po czym może być ponownie filtrowany.

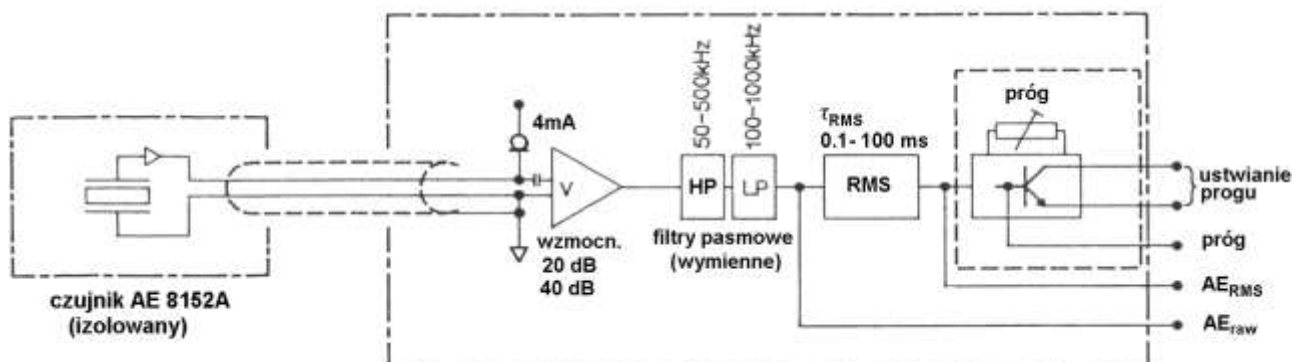


rys. 5.12. Wpływ filtrowania górnoprzepustowego na przebieg sygnału AE.



rys. 5.13. Sprowadzenie sygnału AE do niskoczęstotliwościowego przez demodulację - tu wyznaczenie wartości skutecznej.

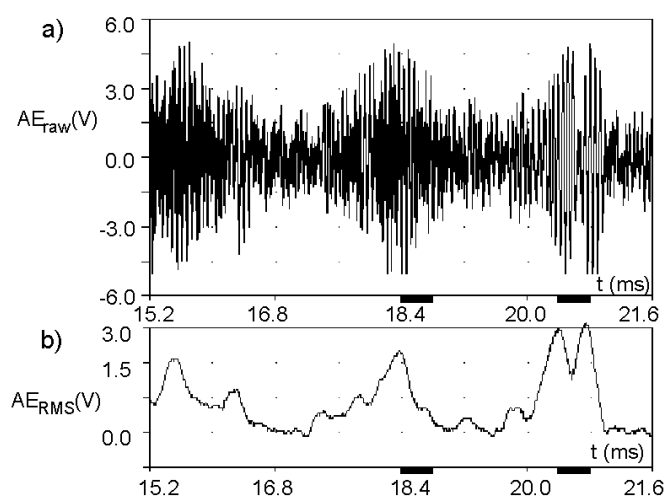
Wysoka częstotliwość AE sprawia, że w większości publikowanych na świecie wyników badań emisji akustycznej pochodzącej z procesu skrawania wykorzystywana jest jakaś forma demodulacji sygnału AE (np. uśrednianie czy obliczanie wartości skutecznej). Redukcję częstotliwości sygnału AE uzyskaną dzięki wyznaczaniu AE_{RMS} przedstawiono na rys. 5.13. Górny przebieg na tym rysunku to fragment sygnału oryginalnego AE_{raw} obejmujący zaledwie 0.25 ms. Jak się nietrudno domyśleć, zarejestrowanie takiego sygnału wymaga częstotliwości próbkowania powyżej 1 MHz. Takie przetworniki są wprawdzie dostępne, jednakże w dalszym ciągu są bardzo kosztowne. Drugi przebieg na omawianym rysunku, to ten sam sygnał oryginalny ściśnięty dziesięciokrotnie, by obejmował 2.5 ms – jak widać jest to wybuch emisji akustycznej. Najniższy przebieg przedstawia wartość skuteczną sygnału AE_{RMS} i obejmuje aż 125 ms. Wybuch widoczny na rysunku środkowym jest tu również widoczny, stanowi jednak niewielki fragment przebiegu. Taki zdemodulowany sygnał można próbkować z częstotliwością kilkaset razy niższą, czyli stosowaną w konwencjonalnym sprzęcie do badań sygnałów wibroakustycznych – rzędu kilku kHz. Tak więc sygnał zdemodulowany stanowi zwykle podstawę do wyznaczania miar AE skorelowanych ze stanem ostrza. Stosowana aparatura przeważnie nie umożliwia rejestracji oryginalnego sygnału, który jest wykorzystywany jedynie w pracach badawczych. Dla przykładu na rys. 5.14 przedstawiono rozwiązanie stosowane przez firmę Kistler.

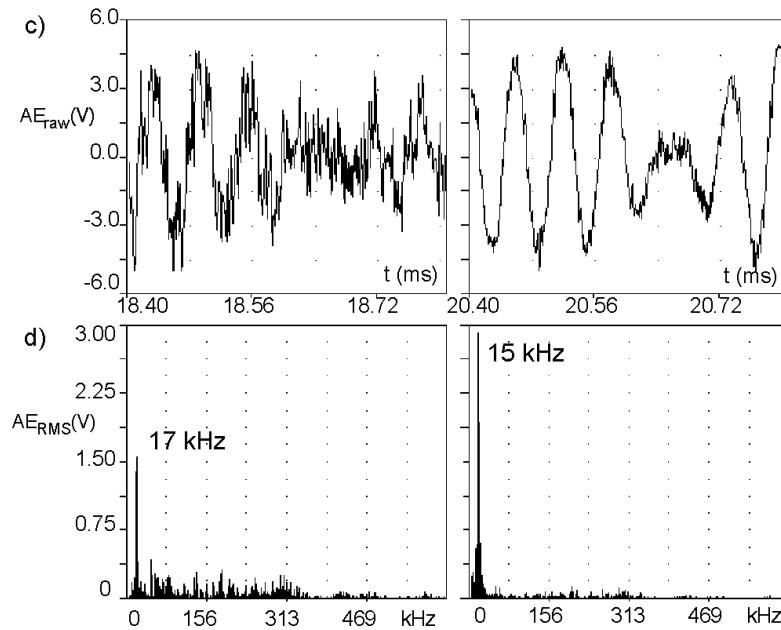


rys. 5.14. Schemat ideowy układu do pomiaru AE firmy Kistler (5125A) [27].

Przy posługiwaniu się zdemodulowanym sygnałem AE, odfiltrowanie składowych niskoczęstotliwościowych jest jeszcze ważniejsze niż gdy dostępny do analizy jest sygnał oryginalny.

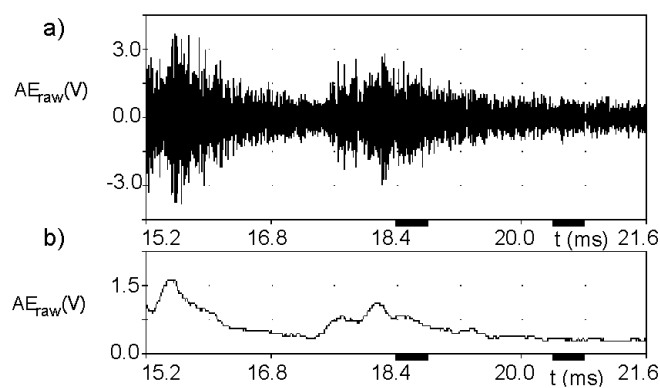
Na rys. 5.15 przedstawiono surowy sygnał AE otrzymany z szerokopasmowego czujnika Brüel & Kjær 8312 bez filtrowania, w czasie skrawania stali 45 nożem CSRNR 2525 z płytką SNUN S30S (konwencjonalny węgiel spiekany), z parametrami $v_c=180$ m/min, $a_p=2.5$ mm, $f=0.33$ mm/obr przy zużyciu ostrza $KT=0.25$ mm (ostrze stępione) [88]. Na rys. 5.15a widoczne są trzy wybuchy o zbliżonej amplitudzie. W sygnale zdemodulowanym (AE_{RMS} , rys. 5.15b) trzeci wybuch osiąga najwyższą wartość. Pod przebiegami AE_{raw} i AE_{RMS} (rys. 5.15 a i b) czarnymi prostokątami zaznaczono dwa fragmenty do bliższej analizy. Zostały one w rozciągniętej skali czasu przedstawione na rys. 5.15c, a ich widma można zobaczyć na rys. 5.15d. Na rysunkach tych wyraźnie widoczne są dominujące składowe niskoczęstotliwościowe. Pochodzą one prawdopodobnie od jakichś zakłóceń mechanicznych i powinny być odfiltrowane jako niezwiązane ze zużyciem ostrza. Oczywiście w przebiegach AR_{RMS} składowe nisko- i wysokoczęstotliwościowe sygnału oryginalnego nie mogą być wyróżnione, co jak wspomniano czyni filtrowanie górnoprzepustowe jeszcze bardziej niezbędnym.

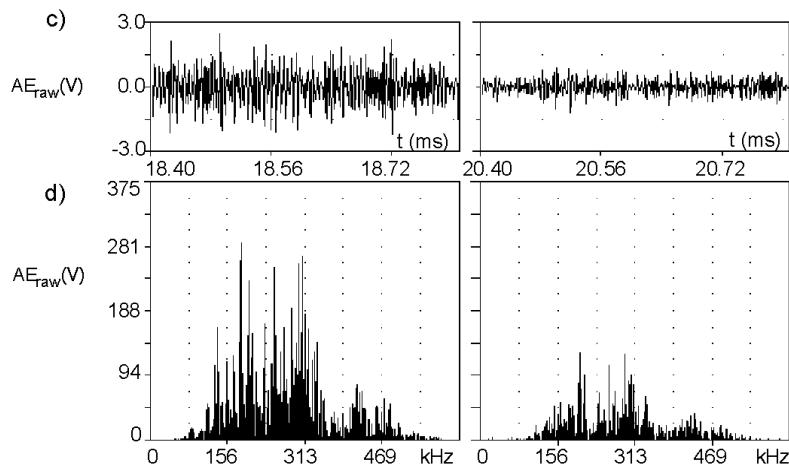




rys. 5.15. Sygnał emisji akustycznej zarejestrowany w czasie skrawania stępionym narzędziem przy użyciu czujnika Brüel&Kjær 8312; a) sygnał oryginalny, b) sygnał zdemodulowany, c) wybrane fragmenty sygnału oryginalnego, c) widma wybranych fragmentów sygnału AE_{raw} .

Na rys. 5.16 przedstawiono wyniki filtrowania górnoprzepustowego (częstotliwość odcięcia 150 kHz) i dolnoprzepustowego (częstotliwość odcięcia 500 kHz) sygnału z rys. 5.15. Jak widać, tylko dwa z trzech wybuchów AE widocznych na rys. 5.15 pozostały po tym filtrowaniu, przy czym drugi jest znacznie słabszy niż pierwszy. Trzeci, najsilniejszy wybuch widoczny na 5.15 po prostu zniknął. Teraz widma sygnałów wykazują, że zawierają one jedynie użyteczne z punktu widzenia diagnostyki składowe (rys. 5.16d).





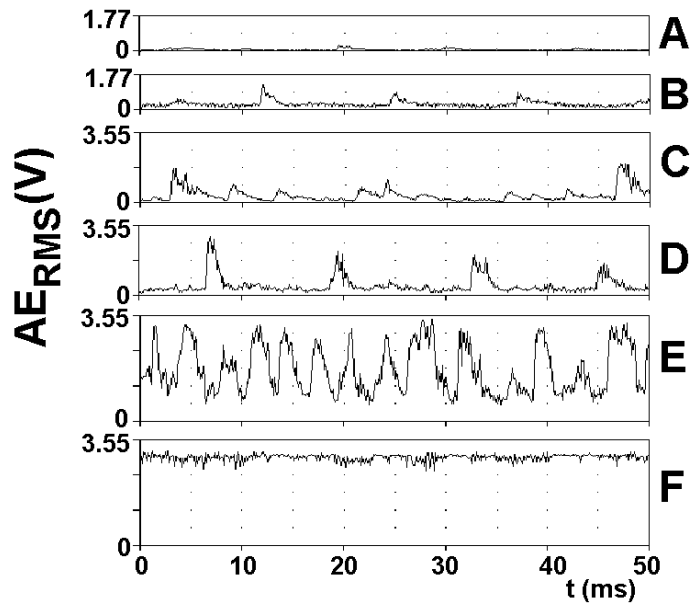
rys. 5.16. Sygnał AE z rys. 5.15 po filtrowaniu górno i dolno przepustowym (150 kHz i 500 kHz); a) widok w ściśniętej skali czasu, b) sygnał zdemodulowany, c) wybrane fragmenty sygnału oryginalnego, d) widma wybranych fragmentów sygnału AE_{raw} .

5. 2. 2. Zniekształcenia sygnału AE

Przeanalizujemy obecnie kilka przykładów zdemodulowanych sygnałów AE otrzymanych różnymi czujnikami, w różnych warunkach.

Na rys. 5.17 przedstawiono sześć przykładowych przebiegów wartości skutecznej sygnału AE. Częstotliwość próbkowania wynosiła 1.25 MHz, a AE_{RMS} wyznaczano cyfrowo co 100 pomiarów (co 12.5 ms). W próbach A-D stosowano czujnik BK8213 z układem wstępnej obróbki sygnału BK2637 wyposażonym w filtr 200 kHz, przy czym w przypadku C użyto przebudowanego (osłabionego – patrz niżej) układu BK2637. W próbie F zastosowano filtr liniowy, zaś próbę E wykonano korzystając z czujnika BK8312 (szerokopasmowego). Prezentowane wyniki nie są zatem w pełni kompatybilne pod względem wielkości amplitudy, jednakże chodzi tu głównie o charakter sygnału.

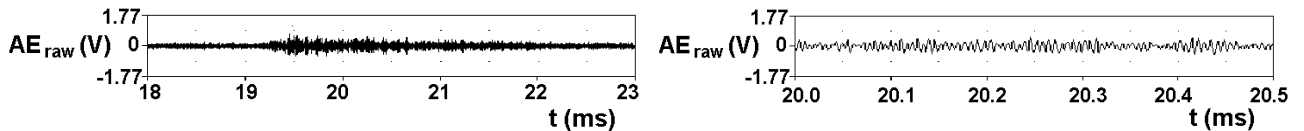
W kolejnych próbach stosunek amplitudy sygnału w czasie wybuchów do wartości poza wybuchami jest coraz wyższy. W próbie E wybuchy nakładają się na siebie, zaś w próbie F sygnał przyjął równomierną wysoką wartość. Coraz większa jest także częstość wybuchów AE wykorzystywana czasem jako wskaźnik stanu narzędzia. Tak więc sądząc po przebiegu AE_{RMS} w pierwszych dwu próbach zużycie ostrza było niewielkie, zaś w kolejnych się wyraźnie zwiększało. W rzeczywistości, tylko w pierwszej z nich zastosowano ostre narzędzie. W pozostałych było ono stępione ($KT \approx 0.25$ mm).



rys. 5.17. Przykładowe przebiegi wartości skutecznej sygnału AE.

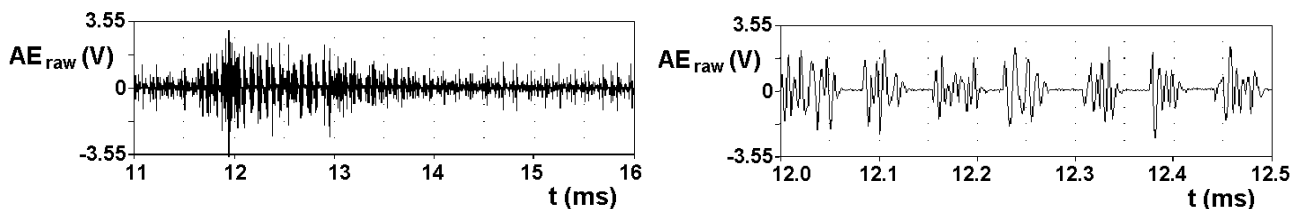
Właściwą interpretację omawianych prób można uzyskać obserwując przebiegi sygnałów oryginalnych, przedstawionych na kolejnych sześciu rysunkach. Na każdym z nich po prawej stronie umieszczono przebieg ściśnięty dziesięciokrotnie, zaś po lewej jego fragment (fragmenty) bez ściskania. Na podstawie osi czasu można zidentyfikować miejsce, z którego pochodzą sygnały i porównać je z rys. 5.17.

Przedstawiony na rys. 5.18 sygnał z próby A był słaby zarówno w czasie widocznego wybuchu AE jak i poza wybuchami. Nie występują w nim żadne nieprawidłowości.



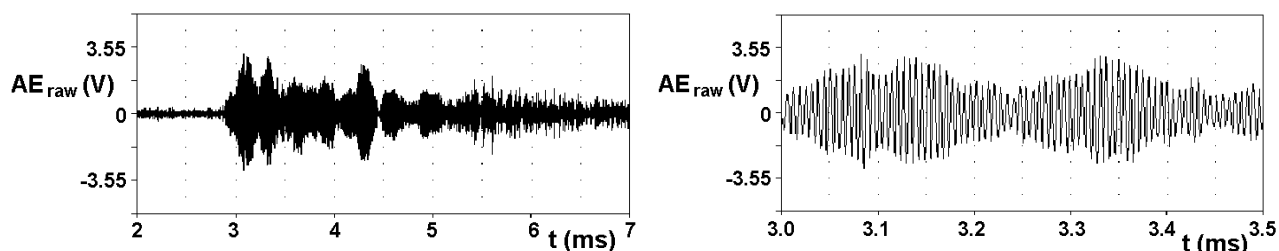
rys. 5.18. Fragmenty przebiegu oryginalnego sygnału AE z próby A.

Na rys. 5.19 (próba B) widać wybuch AE, w którym występują niezrozumiałe, krótkotrwałe spadki amplitudy do zera. Najwyraźniej jest to zniekształcenie spowodowane przez aparaturę pomiarową, a nie rzeczywisty przebieg sygnału. Wrócimy do nich za chwilę.



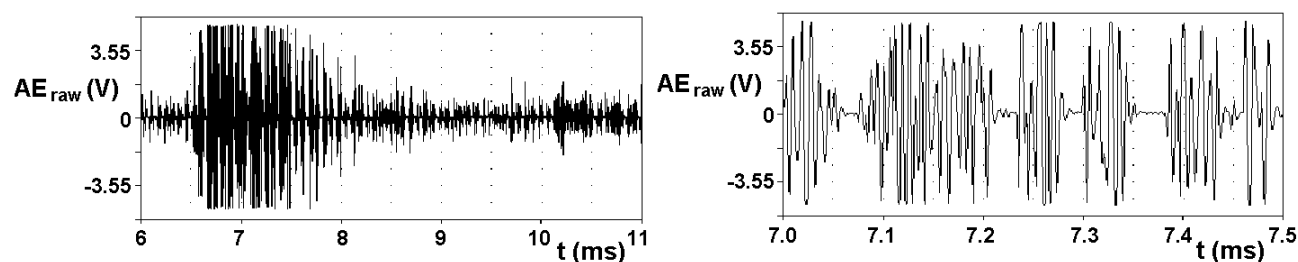
rys. 5.19. Fragmenty przebiegu oryginalnego sygnału AE z próby B.

Rysunek 5.20 przedstawia wybuch AE z próby C. Jego amplituda jest zbliżona do występującej w próbie B, jednakże tym razem nie występują żadne zniekształcenia sygnału. Podobnie jak sygnał z próby A, można go przyjąć za prawidłowy (wzorcowy), z tym że teraz odpowiada on ostrzu stępienemu.



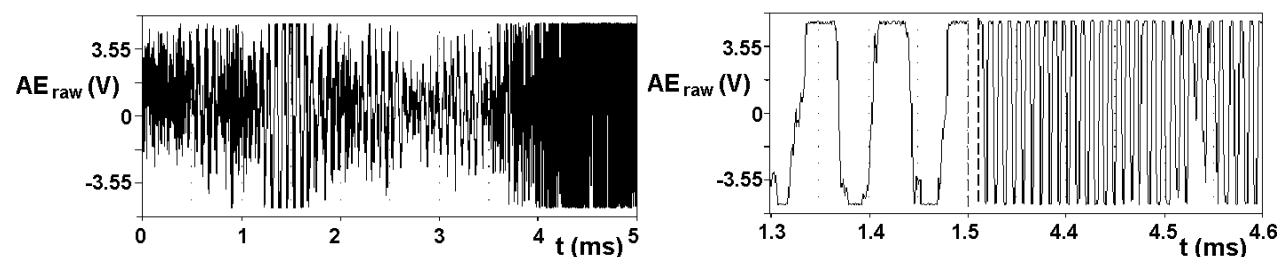
rys. 5.20. Fragmenty przebiegu oryginalnego sygnału AE z próby C.

W próbie D (rys. 5.21) ponownie pojawiły się chwilowe zaniki amplitudy, a ponadto występuje łatwo rozpoznawalne przesterowanie wzmacniacza (nasylenie czyli równe obcięcie sygnału od góry i od dołu). Warto podkreślić, że oba te zniekształcenia trudno byłoby rozpoznać w sygnale zdemodulowanym (rys. 5. 17).



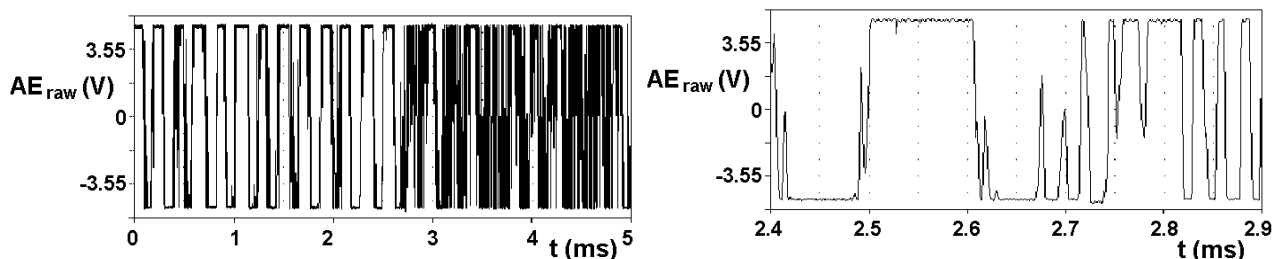
rys. 5.21. Fragmenty przebiegu oryginalnego sygnału AE z próby D.

W dotychczas omawianych próbach sygnał AE był filtrowany oktawowo (200 kHz) między przedwzmacniaczem a wzmacniaczem (patrz rys. 5.11), stąd nie występowały w nich składowe niskoczęstotliwościowe. W próbie E (rys. 5.22), w której korzystano z szerokopasmowego czujnika BK8312, sygnał jest nasycony znacznie silniej niż w próbie D. Wyraźnie widoczne są fragmenty, w których dominuje częstotliwość ok. 13 kHz i takie, w których przeważa ok. 105 kHz. Warto podkreślić, że przesterowanie wystąpiło we wzmacniaczu, na działanie którego operator nie ma bezpośredniego wpływu.



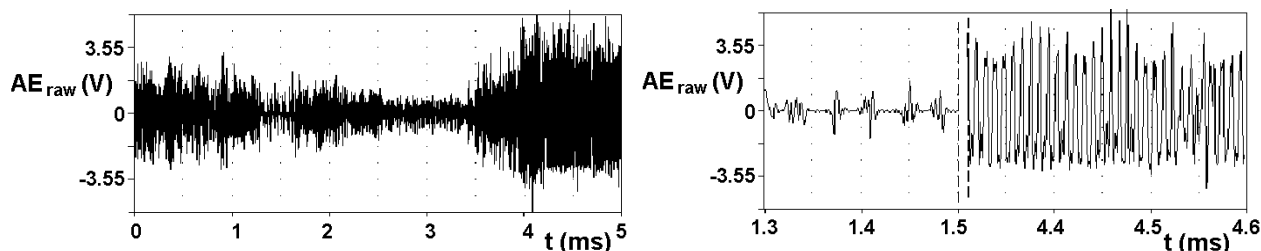
rys. 5.22. Fragmenty przebiegu oryginalnego sygnału AE z próby E.

W ostatniej z przedstawianych tu prób (F - rys. 5.23) sygnał jest stale silnie nasycony. Tu także występują wyraźnie dwie częstotliwości - ok. 5 kHz i ok. 70 kHz. Mimo, iż zastosowany w tej próbie czujnik BK8313 ma charakterystykę rezonansową (200 kHz), przenosi on niższe częstotliwości lepiej niż czujnik szerokopasmowy BK8312, co wyjaśnia wyższą wartość sygnału, jego mocniejsze nasycenie wynikające z silniejszego przesterowania wzmacniacza.

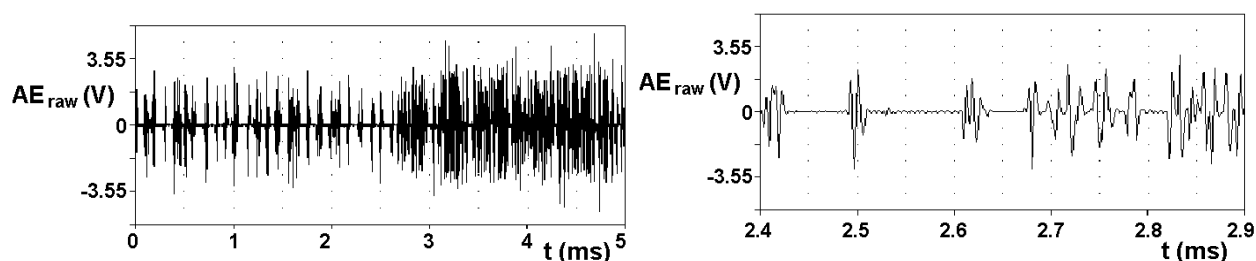


rys. 5.23. Fragmenty przebiegu oryginalnego sygnału AE z próby F.

Ponieważ próby B÷F były prowadzone w zbliżonych warunkach skrawania, można w uproszczeniu przyjąć, że i sygnały AE_{raw} miały podobny przebieg. W celu wyjaśnienia przyczyny chwilowych spadków amplitudy do zera w próbach B i D założmy, że wystąpiło przesterowanie przedwzmacniacza, czyli że na filtr oktawowy podany został sygnał taki jak na rysunkach 5.22 i 5.23 (choć odpowiednio słabszy), a następnie wzmacniony we wzmacniaczu. Sygnały z prób E i F (rys. 5.22 i 5.23) zostały poddane filtrowaniu cyfrowemu przez filtr o charakterystyce odpowiadającej występującemu w układzie wstępnej obróbki sygnału BK2637, a uzyskane wyniki przedstawiono na rysunkach 5.24 i 5.25.



rys. 5.24. Fragmenty sygnału z próby E (rys. 5.22) po filtrowaniu oktawowym 200 kHz.



rys. 5.25. Fragmenty sygnału z próby F (rys. 5.23) po filtrowaniu oktawowym 200 kHz.

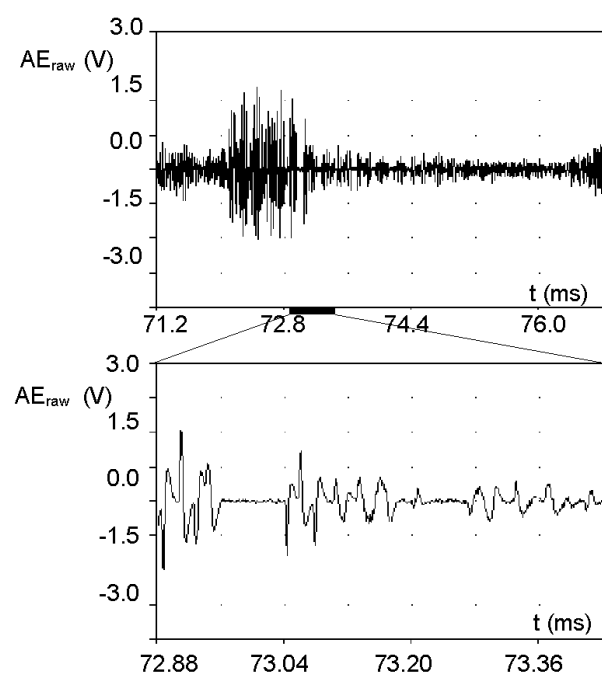
Na obu rysunkach zauważyć można te same prawidłowości. W miejscach, w których sygnał miał stosunkowo niską częstotliwość, pojawiły się charakterystyczne zaniki amplitudy. Przesterowanie

przedwzmacniacza sygnałem o wysokiej częstotliwości zostało po filtrowaniu ukryte. Sygnał z próby B, który na rysunkach 5.17 i 5.19 wygląda na niższy niż z próby C (rys. 5.17 i 5.20), w rzeczywistości był prawdopodobnie wyższy, a w każdym bądź razie zawierał składowe niskoczęstotliwościowe, które zostały zniekształcone przez filtr oktaowy przedwzmacniacza.

Z przedstawionych eksperymentów wynikają następujące wnioski:

- Niezbędne górnoprzepustowe filtrowanie sygnałów AE musi być wykonywane na możliwie wczesnym etapie obróbki tego sygnału.
- Wstępny (buforujący) stopień wzmacnienia powinien być jak najniższy, aby nie występowało przesterowanie sygnału.
- Przy korzystaniu ze zdemodulowanej postaci sygnału należy koniecznie upewnić się, czy przed demulacją nie był on zniekształcony. Przesterowanie wzmacniacza (po filtrowaniu) jest łatwe do rozpoznania w przebiegu sygnału oryginalnego jako jego nasycenie („obcięcie” od góry i od dołu). Przesterowanie przedwzmacniacza sygnałami o niskiej częstotliwości (przed filtrowaniem), po filtrowaniu objawia się charakterystycznymi spadkami amplitudy sygnału do zera. W przypadku wysokich częstotliwości przesterowanie przedwzmacniacza jest praktycznie niewykrywalne.

Przypomnieć raz jeszcze wypada, że stosunkowo rozpowszechnione w Polsce czujniki firmy Brüel&Kjær są przystosowane do znacznie słabszych sygnałów niż pochodzące ze strefy skrawania. W badaniach prowadzonych w ITM PW, wykorzystanie szerokopasmowego czujnika BK8312 umieszczonego na imaku narzędziowym tokarki przy obróbce średniokładnej okazało się niemożliwe. Stąd też korzystaliśmy z czujnika BK8313 podłączonego do układu wstępnej obróbki sygnału BK2637 przebudowanego we własnym zakresie tak, że pierwszy stopień wzmacnienia (wzmacniacz ładunku) osłabiono ok. 10-krotnie.

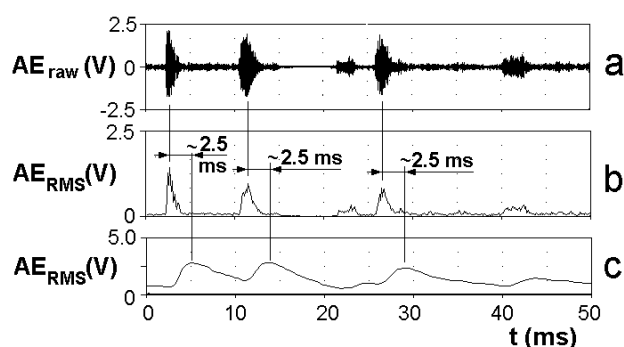


rys. 5.26. Sygnały otrzymane przy pomocy układu pomiarowego z rys. 5.14 przy zastosowaniu filtrów 50 kHz i 1 MHz

Kończąc ten fragment rozważań należy podkreślić, że zastosowanie przemysłowych czujników AE przystosowanych do obróbki skrawaniem, wraz z firmowymi układami wstępnej obróbki sygnału nie gwarantuje poprawności otrzymywanych sygnałów AE. Na rys. 5.26 przedstawiono wybuch AE zarejestrowany przy pomocy czujnika Kistler 8152A1, czyli układu przedstawionego na rys. 5.14. Widać na nim omówione wyżej zniekształcenia.

5. 2. 3. Stała całkowania przy wyznaczaniu wartości skutecznej

Inny problem na który warto zwrócić uwagę przy omawianiu wstępnej obróbki sygnału AE to wartość stałej całkowania stosowana przy wyznaczaniu wartości skutecznej. W [239], gdzie przedstawiono badania sygnałów AE pochodzących ze szlifowania, zalecono stosowanie stałej $\tau_{RMS} \approx 1$ ms. Na rysunku 5.27 przedstawiono przebieg oryginalnego sygnału AE otrzymanego przy pomocy czujnika Kistler 8152A1, jego wartość skuteczną wyznaczoną cyfrowo przez LMSN-2 oraz otrzymaną analogowo przy pomocy układu przedstawionego na rys. 5.14. Znacznie większa wartość analogowego sygnału AE_{RMS} wynika z zastosowania przez wytwórcę dodatkowego wzmocnienia na tym wyjściu. Zastosowano tu występującą w standardowym wyposażeniu stałą wyznaczania wartości skutecznej $\tau_{RMS} = 1.2$ ms. Jak widać, AE_{RMS} otrzymana analogowo osiąga maksima z opóźnieniem ok. 2.5 ms (ok. dwukrotna stała całkowania), czyli wtedy gdy odpowiadający mu wybuch AE już się skończył. Wyraźnie oddzielne w rzeczywistości wybuchy zlewają się ze sobą. Trudno w oparciu o taki sygnał prowadzić analizę wybuchów AE, choć oczywiście może on w dalszym ciągu stanowić podstawę do poszukiwania symptomów stopienia ostrza. Zbyt wysoka wartość stałej całkowania może mieć bardzo negatywny wpływ na zdolność wykrywania kolizji, kiedy to opóźnienie o kilka milisekund czyni sygnał nieprzydatnym do takiego zastosowania. Należy tu dodać, że firma oferuje także układ o 10-krotnie niższej stałej całkowania.



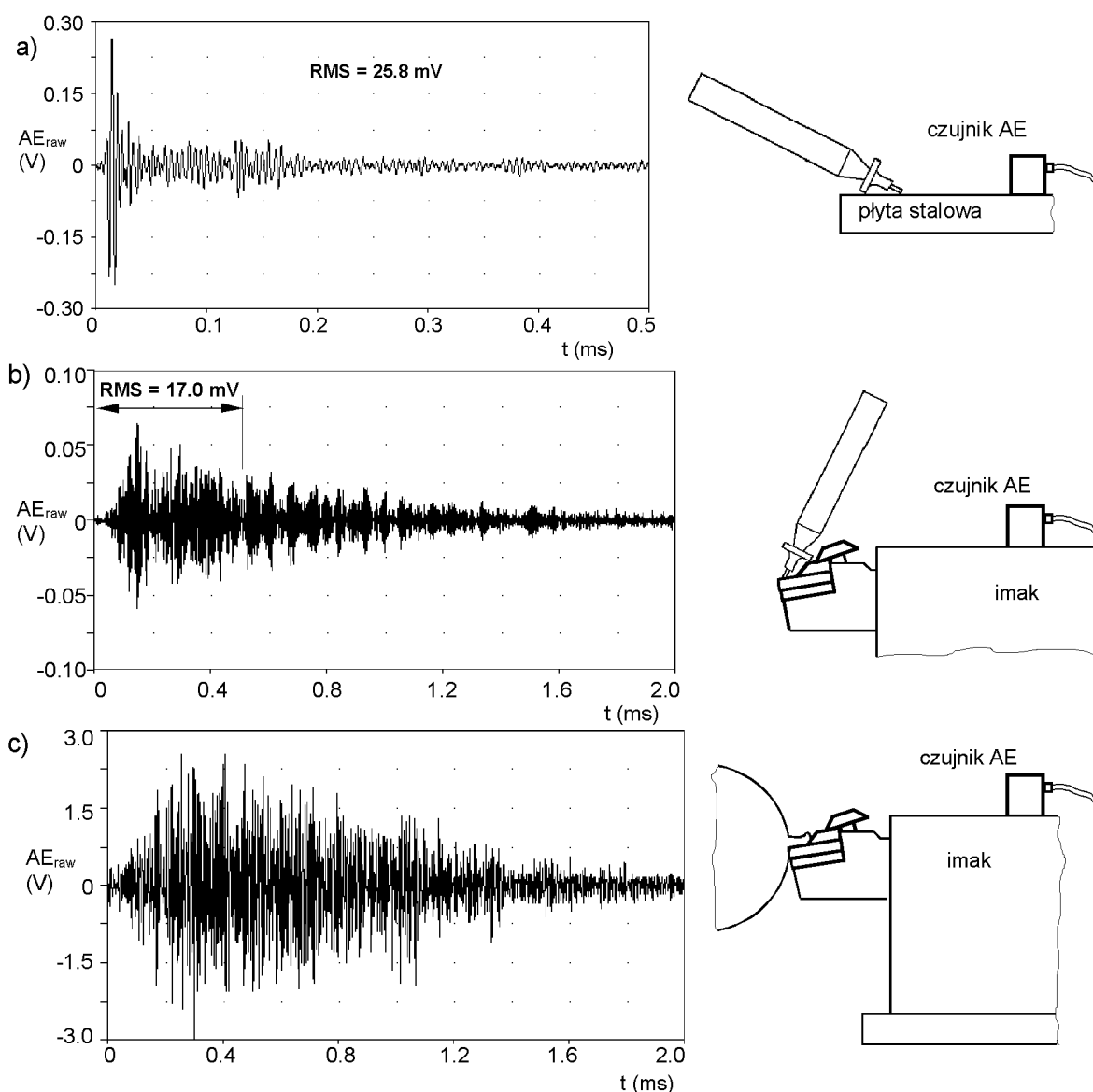
rys. 5.27. Zniekształcenie wartości skutecznej sygnału spowodowane zbyt wysoką stałą całkowania w przedwzmacniaczu 5125A1 firmy Kistler; a: sygnał oryginalny, b: AE_{RMS} wyznaczony cyfrowo przez LMSN-2, c: AE_{RMS} otrzymany analogowo z 5125A1 ($\tau_{RMS} = 1.2$ ms), [94].

Oczywiście wartość stałej całkowania (wyznaczania wartości skutecznej) może być nie tylko zbyt wysoka, lecz także zbyt niska. Na rys. 3.25 przedstawiono oryginalny sygnał AE oraz jego wartość zdemodulowaną uzyskaną cyfrowo przy zastosowaniu dwu stałych – 0.1 ms i 0.5 ms. Dla obu sygnałów

wyznaczono liczbę wybuchów AE jako liczbę przekroczeń wybranych progów dyskryminacji. Można zauważyć, że w pierwszym przypadku, w czasie każdego wybuchu progi te przekraczane są wielokrotnie, co sprawia iż liczba wybuchów jest zawyżona. Zastosowanie niższej stałej całkowania umożliwia wierne zliczanie.

5. 2. 4. Wpływ drogi sygnału AE na jego wartość i charakterystykę

Emisja akustyczna jest sprężystą falą materiałową i jako taka podlega wszelkim prawom rozchodzenia się fal – ulega odbiciom od powierzchni zewnętrznych i osłabieniu przy przechodzeniu przez powierzchnie styku. Należy o tym pamiętać analizując przebiegi AE mierzone czujnikiem umieszczonym w pewnej odległości od źródła sygnału, oddzielonym od niego takimi powierzchniami, co nieomal zawsze ma miejsce w diagnostyce stanu narzędzia. Problem ten ilustruje rys. 5.28.

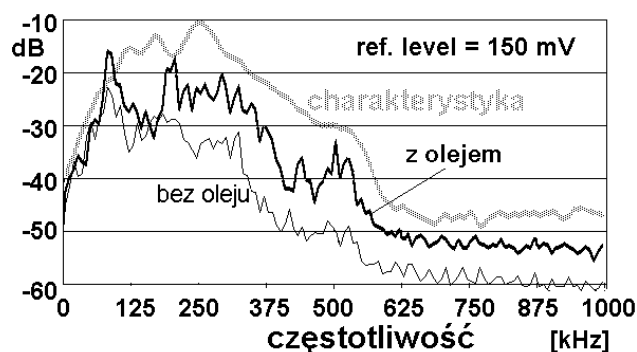


rys. 5.28. Porównanie czasu trwania sygnałów AE [87, 94].

Na rys. 5.28a przedstawiono przebieg AE otrzymany przy pomocy czujnika BK 8313 z modyfikowanym przedwzmacniaczem 2637, otrzymany w teście Nielsena-Hsu (rys. 4.30). Jak już wspomniano, można przyjąć, iż czas trwania impulsu AE spowodowanego złamaniem grafitu jest bardzo krótki, a zarejestrowany przebieg traktować w przybliżeniu jako odpowiedź czujnika na wymuszenie impulsowe. Na rys. 5.28b przedstawiono przebieg AE zarejestrowany tym samym czujnikiem, gdy był on umieszczony na górnej powierzchni imaka jednołożowego pokazanego na rys. 4.14 (tam czujnik AE umieszczony jest w innym miejscu), zaś grafit został złamany na powierzchni natarcia składanego noża tokarskiego. Jak widać maksymalna amplituda sygnału jest znacznie niższa, co można przypisać tłumieniu na powierzchniach styku. Znacznie ciekawszy jest kilkakrotnie dłuższy czas jego trwania (wolniejsze zanikanie). Prawdopodobnie wynika to z odbijania się fali AE od powierzchni płytki skrawającej, oprawki oraz imaka.

Na rys. 5.28c przedstawiono dla porównania wybuch AE zarejestrowany podczas skrawania. Podobieństwo przebiegów 5.28b i 5.28c wskazuje, że prawdopodobnie rzeczywisty czas trwania wybuchu jest znacznie krótszy niż 2-3 ms jak wydają się wskazywać zarejestrowane przebiegi (patrz też rys. 5.27).

Bardzo istotny wpływ na tłumienie sygnału przy przechodzeniu przez powierzchnie styku ma sprzężenie akustyczne pomiędzy nimi. Jak wiadomo chropowatość powierzchni sprawia, iż pole rzeczywistego kontaktu między powierzchniami jest znacznie mniejsze niż nominalna powierzchnia styku. Z drugiej strony AE praktycznie nie jest przenoszona przez powietrze. Sprzężenie akustyczne można uzyskać dzięki chociażby olejowi maszynowemu. Na rys. 5.29 przedstawiono porównanie widm sygnałów AE otrzymanych w wyniku łamania grafitu na powierzchni natarcia narzędzia umieszczonego w imaku, dla przypadku gdy dolna (bazowa) powierzchnia narzędzia była sucha oraz gdy była ona pokryta olejem. Zastosowano tu czujnik 8152A1 umieszczony na górnej powierzchni imaka. Porównanie uzyskanych wyników między sobą oraz z charakterystyką czujnika wskazuje, że niskoczęstotliwościowe składowe sygnału (poniżej ok. 80 kHz) są osłabiane w niewielkim stopniu. Składowe o wyższych częstotliwościach są wyraźnie osłabione. Wpływ braku sprzężenia akustycznego (oleju) daje się zauważyć powyżej ok. 180 kHz, i wynosi on ok. 20 dB, czyli jest bardzo znaczny.



rys. 5.29. Widmo sygnału AE uzyskanego w wyniku łamania grafitu na narzędziu z olejem na spodzie narzędzia i bez niego, porównane z charakterystyką zastosowanego czujnika 8152A1 [94].

5. 3. Aparatura do badania AE stosowana w ITM PW

Jak już powiedziano, uniwersalna aparatura pomiarowa umożliwia rejestrowanie i badanie jedynie zdemodulowanych sygnałów AE. Chcąc głębiej wniknąć w ich charakter, chociażby tak jak to uczyniono w poprzednich punktach, należy zbudować aparaturę specjalną, która umożliwi badanie sygnałów oryginalnych. Oczywiście budując taką aparaturę można się pokusić o wyposażenie jej w szereg możliwości, przydatnych w pracach badawczych. Tu przedstawione zostaną doświadczenia ITM PW w tym zakresie [37, 82, 101, 131,].

5. 3. 1. Uniwersalny układ analogowej obróbki wstępnej sygnału AE

Na rys. 5.11 przedstawiono podstawowy schemat obróbki sygnału AE. Czasami cała obróbka wstępna może być wykonywana przez układ oferowany przez producenta czujnika (tak jest w przypadku wszystkich czujników przemysłowych – patrz rys. 5.14), w innych przypadkach może być to jedynie wstępne wzmocnienie i filtrowanie sygnału (czujniki firmy Brüel&Kjær), w jeszcze innych możemy dysponować samym czujnikiem, który trzeba zasilić i obrobić wstępnie sygnały z niego pochodzące. Niekiedy, np. przy porównywaniu czujników, wygodnie jest korzystać z tego samego układu wstępnej obróbki sygnałów, rezygnując z układów firmowych. Różnorodność czujników AE wykorzystywanych w ITM PW skłoniła nas do zbudowania takiego uniwersalnego układu.

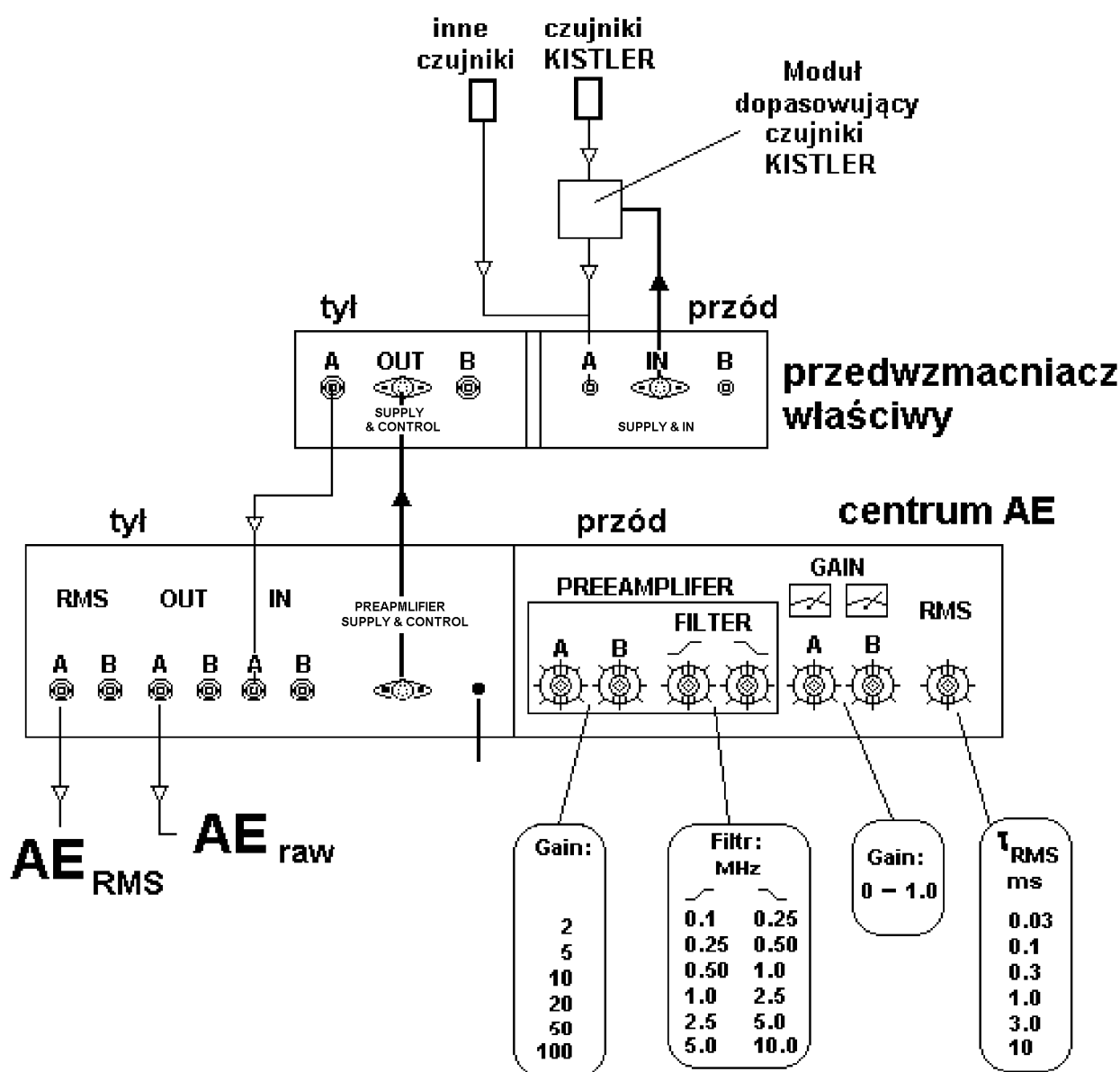
Większość przetworników piezoceramicznych wymaga umieszczenia w ich pobliżu przedwzmacniacza sygnału o wysokiej impedancji wejściowej – wymagany krótki kabel. Dotyczy to wszystkich czujników AE bez wbudowanego przedwzmacniacza (przetworniki pasywne). Stąd wynika konieczność stosowania przedwzmacniacza, który oprócz wstępnego wzmocnienia sygnału, zapewniającego odpowiedni odstęp od szumów i zakłóceń, transformuje wysoką impedancję wyjściową przetwornika do niskiej wartości dostosowanej do kabla koncentrycznego (50Ω). Przedwzmacniacz umieszczony na obrabiarce (krótki kabel łączący z przetwornikiem) powinien być mały, lekki i hermetyczny. Nie powinien zawierać pokręteł i przełączników, gdyż z jednej strony trudno jest uzyskać ich hermetyczność, a z drugiej manipulowanie nimi jest niewygodne. Ograniczenia dotyczące wagi i rozmiarów sugerują umieszczenie w przedwzmacniaczu tylko absolutnie niezbędnych układów. Stąd koncepcja rozdzielenia układu wstępnego przygotowania sygnału na dwa bloki: Przedwzmacniacz Właściwy (PW) i Centrum Emisji Akustycznej (CAE).

Centrum powinno się znajdować na stanowisku operatorskim łącznie z Laboratoryjnym Monitorem Stanu Narzędzia (opisanym w następnym punkcie) i komputerem PC. Powinno zawierać wszystkie wspólne układy toru pomiarowego, np. układy zasilające oraz powinno zapewniać sterowanie wszystkimi parametrami toru wstępnej obróbki sygnału AE i łatwość połączeń ze wszystkimi innymi częściami całego toru pomiarowego. Postanowiliśmy, że przetwornik wartości skutecznej powinien być przystosowany do sygnałów zawierających składowe do 10 MHz i umożliwiać regulację stałej czasowej (6 pozycji). Układ taki

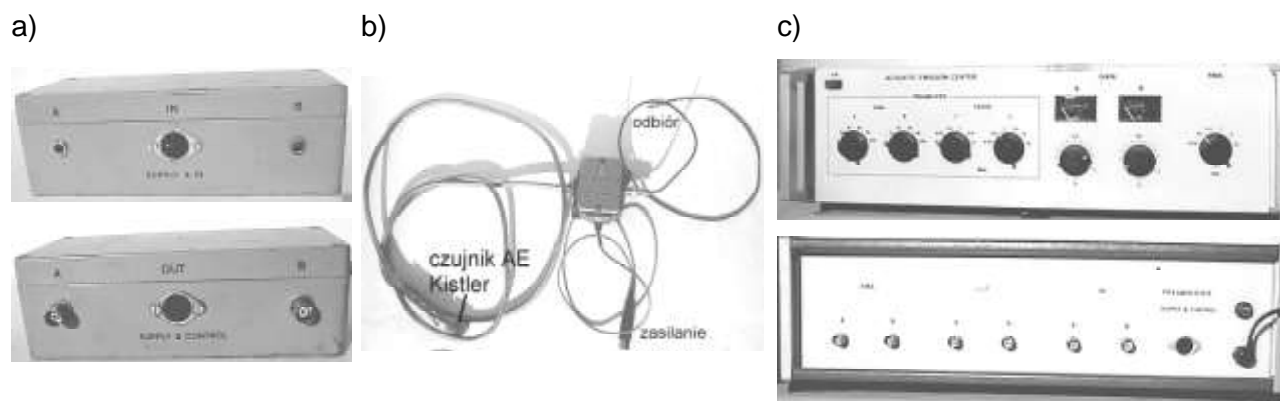
jest układem rozbudowanym, dlatego też zdecydowano się na umieszczenie go w Centrum. Takie rozwiązanie zwiększa uniwersalność i elastyczność systemu. Z jednej strony Centrum może być używane jako niezależne urządzenie zawierające wzmacniacz o płynnie regulowanym wzmocnieniu (0÷10) i układ RMS, z drugiej strony układ może być łatwo rozbudowywany i modernizowany. Istnieje możliwość dodawania różnych przedwzmacniaczy dostosowanych do nowych (np. nietypowych) przetworników. Parametry Centrum Emisji Akustycznej z dużym zapasem (o rząd wielkości) pozwalają na taką rozbudowę.

Dodatkowym elementem, w jaki należało wyposażyć budowany uniwersalny układ obróbki wstępnej sygnału AE był moduł dopasowujący zasilanie czujników firmy Kistler (inne czujniki są bezpośrednio podłączane do wejścia przedwzmacniacza).

Schemat układu wstępnej obróbki sygnału AE przedstawiono na rys. 5.30, zaś na rys. 5.31 jego zdjęcie.



rys. 5.30. Schemat ogólny uniwersalnego układu wstępnej obróbki sygnału AE.



rys. 5.31. Widok elementów uniwersalnego układu wstępnej obróbki sygnału AE; a) przedwzmacniacz właściwy (PW), b) moduł dopasowujący czujniki firmy Kistler, c) Centrum emisji akustycznej (CAE), widok z przodu i z tyłu.

Podstawowe parametry techniczne zbudowanego układu są następujące:

Przedwzmacniacz właściwy (PW)

Wzmocnienie: regulowane skokowo (zdalne sterowanie z CAE): 5, 10, 20, 50

Pasma: 100kHz—1000kHz

Filtry (4-tego rzędu, przełączane skokowo - zdalne sterowanie z CAE)

Górnoprzepustowe: 100kHz, 250kHz, 500kHz

Dolnoprzepustowe: 250kHz, 500kHz, 1000kHz

Impedancja wejściowa: 50k Ω

Impedancja wyjściowa: 50 Ω

Poziom sygnału wyjściowego (standardowy): 1V (peak – amplituda)

Zasilanie: +15V, 0V, -15V (standardowo napięcia te są dostarczane kablem z CAE)

Zdalne sterowanie: regulacja wzmocnienia i przełączanie filtrów (za pomocą kabla z CAE)

Gniazda:

Wejściowe (IN): koncentryczne LEMO

Wyjściowe (OUT): koncentryczne BNC

Zasilania i sterowania (Supply&Control): DIN (7 stykowe)

Zasilania i wejściowe (Supply&IN): DIN (7stykowe) do zasilania przetworników (6V, 9V, 12V)

Centrum Emisji Akustycznej (CAE)

Wzmocnienie (regulowane w sposób ciągły): 0-10

Pasma: 0-10MHz (wzmacniacz) 1kHz-10MHz (RMS)

Stała czasowa RMS: 0.03ms, 0.1ms, 0.3ms, 1ms, 3ms, 10ms

Amplituda sygnału wejściowego:

Wzmacniacz (maksymalna – standard): 1V

RMS (maksymalna): 10V

Impedancja wejściowa: 50Ω

Impedancja wyjściowa: 50Ω

Gniazda:

Wejściowe (IN): BNC

Wyjściowe (OUT): BNC (AE_{raw} i AE_{RMS})

Zasilania i sterowania: (Supply&Control): DIN (7 stykowe) do zasilania i sterowania przedwzmacniacza

Zdalne sterowanie: przełączniki zdalnego sterowania wzmocnieniem i filtrami przedwzmacniacza.

Wskaźnik wysterowania: analogowy, wychyłowy, wyskalowany w dB (wartość szczytowa sygnału)

Zasilanie: sieciowe, maksymalny pobór mocy 20W

Częstotliwości graniczne filtrów dolna i górna są ustawiane niezależnie od siebie za pomocą pokręteł zdalnego sterowania w Centrum Emisji Akustycznej. Ustawienia, w których górna częstotliwość graniczna jest niższa niż dolna częstotliwość graniczna są dopuszczalne – wystąpi wówczas dodatkowe tłumienie sygnału.

Na wyjściu z przedwzmacniacza otrzymujemy sygnał oryginalny AE_{raw} oraz sygnał wartość skuteczną AE_{RMS} . Sygnały te mogą być przekazywane do Rejestratora Emisji Akustycznej, który jest podstawowym elementem Laboratoryjnego Monitora Stanu Narzędzia - 2, lub poprzez odpowiedni przetwornik A/C (zwłaszcza AE_{RMS}) zapisywany bezpośrednio w pamięci komputera.

5. 3. 2. Laboratoryjny Monitor Stanu Narzędzia LMSN-2

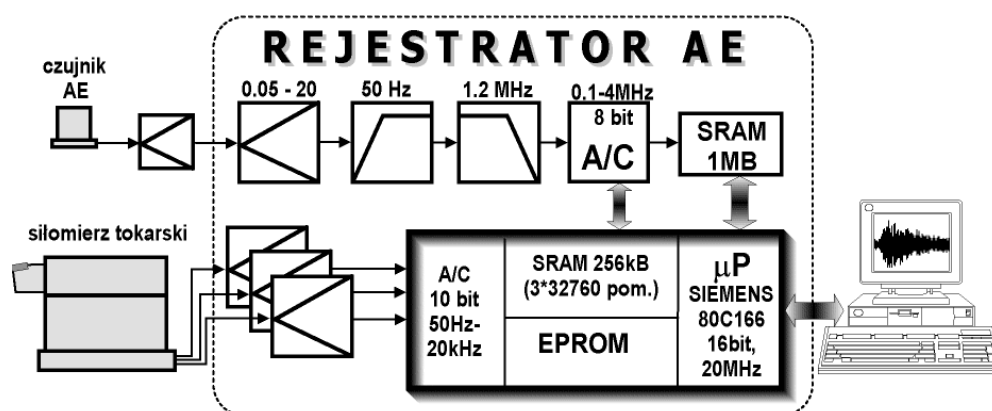
Laboratoryjny Monitor Stanu Narzędzia (LMSN-2) [37, 82] zbudowany w ramach grantu KBN [101] jest podstawowym narzędziem badawczym stosowanym w ITM PW do badań emisji akustycznej pochodzącej z procesu skrawania. Jest to układ dwuprocessorowy. Składa się on z:

- rejestratora emisji akustycznej i sił skrawania,
- komputera osobistego,
- oprogramowania.

Procesorem nadrzędnym jest procesor mikrokomputera, za pośrednictwem którego wysyłane są polecenia do procesora Rejestratora. Pomiary i obliczenia są wykonywane równolegle w Rejestratorze i mikrokomputerze. Schemat ideowy LMSN-2 przedstawiono na rys. 5.32.

O możliwościach LMSN-2 decyduje w równej mierze sprzęt („hardware”) jak i oprogramowanie Rejestratora i mikrokomputera. Oprogramowanie Rejestratora, napisane w języku wewnętrznym mikroprocesora 80C166, jest przechowywane w pamięci EPROM Rejestratora. Poza sterowaniem pracą Rejestratora umożliwia przyjmowanie od komputera poleceń i wysyłanie do komputera odpowiedzi

zawierających wyniki pomiarów i obliczeń oraz informacje o aktualnie wykonywanych działaniach. Zewnętrzne oprogramowanie LMSN-2 opracowane jest w języku Turbo Pascal 7.0 na mikrokomputer klasy PC.



rys. 5.32. Schemat ideowy LMSN-2 [37, 82, 101].

Rejestrator AE i sił skrawania przeznaczony jest do zapisu w postaci cyfrowej jednego wysoko częstotliwościowego oraz trzech niskoczęstotliwościowych przebiegów analogowych. Jednostką centralną Rejestratora jest mikroprocesor SIEMENS 80C166 (16 bitów, 20 MHz). Jedno wejście analogowe rejestratora jest przeznaczone do połączenia z urządzeniem podającym sygnał o napięciu wyjściowym od ~ 0.05 V do ~ 20 V. Zwykle podłączano tu przetworniki emisji akustycznej, stąd kanał ten będzie dalej nazywany kanałem AE. Jest on wyposażony we wzmacniacz o nastawianym skokowo wzmacnieniu $0.05 \div 20$ oraz filtry: górno przepustowy 50 Hz odcinający składową stałą i filtr dolnoprzepustowy 1.2 MHz. Dalej występuje szybki (czas konwersji 50 ns, częstotliwość próbkowania $0.1 \div 4$ MHz) ośmiobitowy przetwornik A/C. Taktowanie (wyzwalanie konwersji) przetwornika może być wykonywane przez mikroprocesor Rejestratora, przez dzielnik lub generator zewnętrzny. Trzy dalsze wejścia Rejestratora są przystosowane do połączenia z urządzeniami podającymi sygnał o zakresie napięcia wyjściowego od -1.25 V do ~ 8.75 V. Z założenia są przystosowane do współpracy ze wzmacniaczami siłomierza typu 9263 firmy Kistler i kanały z nimi związane będą nazywane kanałami sił skrawania. Sygnały w tych kanałach są podawane na wzmacniacze buforowe (wzmocnienie =1), a następnie na wejścia analogowe mikroprocesora, który jest wyposażony w 10 bitowe przetworniki A/C (czas konwersji 10 μ s, częstotliwość próbkowania $50 \div 20.000$ Hz). Rejestracja jest wykonywana z czterech wejść jednocześnie (1 kanał AE i trzy kanały sił skrawania) lub tylko z wybranych. Wyniki pomiaru sił są zapisywane do pamięci SRAM mikroprocesora (256 kB, maksymalna liczba zapamiętanych pomiarów $3 \cdot 32\,760$), zaś wyniki pomiarów AE w oddzielnej pamięci SRAM (1 MB z możliwością rozszerzenia do 16 MB) z pominięciem mikroprocesora, ze względu na wymaganą dużą szybkość. Mikroprocesor ma jednakże możliwość „podglądu” wartości sygnału AE oraz ma dostęp do pamięci. Takie rozwiązanie techniczne daje możliwość programowania „inteligentnego” zachowania się Rejestratora w czasie pomiarów. Na polecenie operatora wyniki pomiarów mogą zostać przesłane przez RS232 do mikrokomputera z prędkością 115 KBodów (ok. 0.3 MB/min), przy czym z

pomiary AE mogą być przekazywane w postaci oryginalnej lub wartości skutecznej obliczanej przez mikroprocesor Rejestratora zadany przez operatora krokiem.

Wszystkie rejestry sterujące przebiegiem pomiaru są obsługiwane przez mikroprocesor. On też uruchamia rejestrację na polecenie z PC, po naciśnięciu przycisku START, po otrzymaniu zewnętrznego sygnału elektrycznego lub na podstawie przekroczenia przez AE lub siłę zadanej programowo wartości, jednakże ostatnie dwie opcje nie są na razie oprogramowane. Sprzęt umożliwia także rejestrację pomiarów w trybie bufora pierścieniowego i zatrzymanie rejestracji na podstawie wyników analizy danych, co wykorzystano w opisanej niżej opcji „Nadzór KSO”. Parametry rejestracji (liczba próbek, częstotliwość próbkowania, wybrane kanały) są programowane przy użyciu mikrokomputera i przesyłane do Rejestratora przez RS232.

Rejestrator posiada własny zasilacz sieciowy (220 V) oraz akumulatory niklowo-kadmowe. Na czas rejestracji i przesyłania danych jest zasilany z sieci. W czasie przechowywania wyników może być zasilany z akumulatorów. Zasilanie akumulatorowe wystarcza na kilkadziesiąt godzin.

Rejestrator zabudowany jest w wolnostojącej kasecie 3U. Kształt i wymiary obudowy pozwalają na jego łatwe przenoszenie (rys. 5.33)



rys. 5.33. Rejestrator Emisji Akustycznej

Wyżej opisano budowę Rejestratora Emisji Akustycznej (hardware), który jest istotnym składnikiem Laboratoryjnego Monitora Stany Narzędzia. Działanie LMSN-2 jest zależne od oprogramowania, które jest stale rozwijane w ramach prowadzonych w ITM PW prac badawczych. Na rys. 5.34 przedstawiono panel czołowy programu obsługującego LMSN-2. Po jego lewej stronie widoczna jest aktualna konfiguracja programu, czyli taktowanie (tu z mikroprocesora), czas próbkowania, wielkości mierzone wraz z częstotliwościami próbkowania („f_prob”), wzmocnienia nastawione na Rejestratorze AE oraz Centrum AE, poziom odniesienia („zero”) sygnału AE oraz zakresy pomiarowe sił skrawania. Warunki te można zmienić wybierając „Warunki” głównego menu programu widocznego po prawej stronie rysunku.



rys. 5.34. Panel czołowy programu obsługującego LMSN-2.

Poniżej omówiono pokrótce główne możliwości LMSN-2.

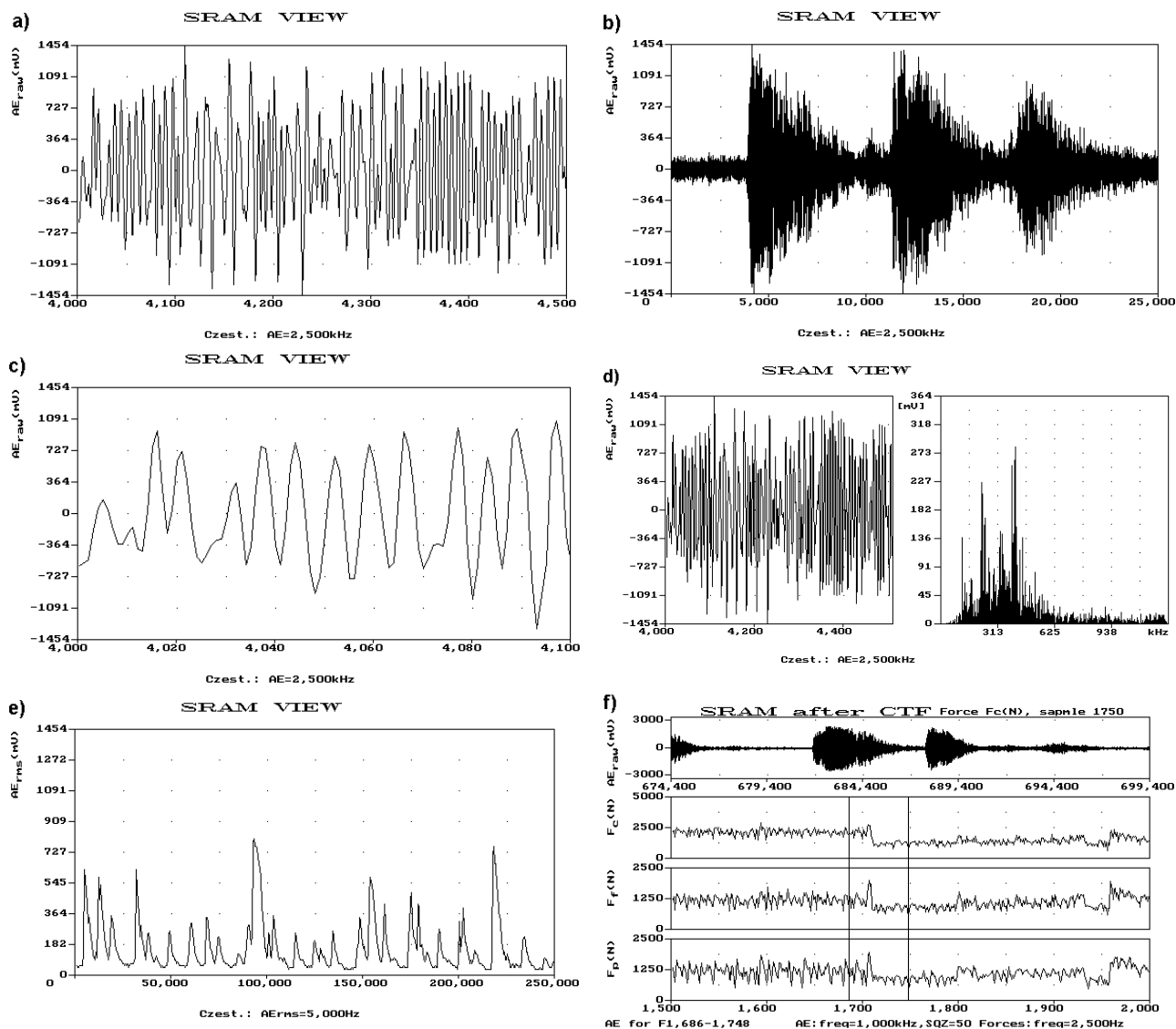
Pomiary w trybie podstawowym

Podstawowy tryb pracy rejestratora polega na próbkowaniu wybranych sygnałów po wybraniu „Start próbkowania” z głównego menu programu, zgodnie z warunkami określonymi przez użytkownika, widocznymi po lewej stronie ekranu. Wyniki pomiarów można przeglądać („Przegląd SRAM”) lub zapisać na dysku („Zapis wyników”):

Przeglądanie i rejestracja wyników

Wyniki pomiarów emisji akustycznej lub sił skrawania zapamiętane w pamięci rejestratora można przeglądać po 500 pomiarów w wybranych kanałach na jednym ekranie (rys. 5.35a), można je „ścisnąć” do 50 razy (25 000 pomiarów na jednym ekranie – rys. 5.35b) lub „rozciągnąć” do 10 razy (50 pomiarów na ekranie – rys. 5.35c). Możliwe jest także przeglądanie przebiegów sygnałów wraz z ich widmami amplitudowymi (rys. 5.35d). Wyniki pomiarów AE mogą być przeglądane w postaci oryginalnej lub zdemodulowanej (AR_{RMS}), co bardzo znacznie ułatwia wyszukiwanie interesujących fragmentów (rys. 5.35e). Stała całkowania jest przy tym podawana przez operatora w liczbie próbek i może wynosić od 20 do 10 000 próbek. Sygnały sił skrawania mogą być przeglądane łącznie z sygnałami AE. Mimo znacznej różnicy częstotliwości próbkowania oryginalnego sygnału AE i sił skrawania, sygnały te przegląda się w postaci skorelowanej w czasie (rys. 5.35f).

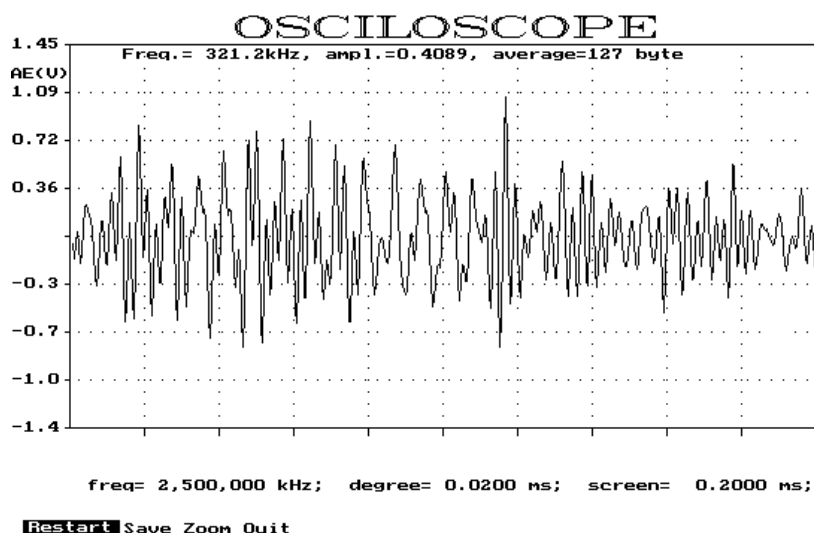
Wyniki mogą być zapisane w całości lub części na pliku dyskowym *.RAE. Plik jest amorficzny, dzięki czemu zawiera w sobie nagłówek z podstawowymi informacjami (mierzone kanały, wzmacnienia AE, zakresy sił skrawania, częstotliwości próbkowania, liczba pomiarów i dwa wiersze opisu), wyniki pomiarów AE (byte) i wyniki pomiarów sił (integer). Wyniki pomiarów AE mogą być zapisywane w postaci oryginalnej lub zdemodulowanej (RMS co zadaną liczbę pomiarów). Obliczanie wartości skutecznej wykonywane jest już w rejestratorze, co znacznie skraca czas przesyłania.



rys. 5.35. Wybrane formy przeglądania sygnałów AE i sił skrawania; a) widok „zwykły”. b) ściśnięty 50-krotnie, c) rozciągnięty dwukrotnie, d) sygnał wraz z jego widmem amplitudowym, e) wartość skuteczna AE_{RMS} , f) przebieg AE (ściśnięty 50-krotnie) i sił skrawania – pionowe linie na przebiegu siły oznaczają odcinek czasu objęty przez przebieg AE.

Praca w trybie „Oscyloskop”

Dodatkowym, pomocniczym trybem pracy LMSN-2 jest obserwacja wybranej wielkości jak na oscyloskopie (z częstością próbkowania do 4MHz). Obraz przebiegu może być w każdej chwili zatrzymany, zapisany na dysku lub powiększony i przeglądany w powiększeniu. Po zatrzymaniu obrazu automatycznie określana i wyświetlana jest amplituda i częstotliwość głównej składowej sygnału oraz jego wartość średnia (rys. 5.36). Dowolny fragment obrazu może być rozciągnięty w pionie i poziomie do 10 razy, a cały sygnał zapisany na dysku.



rys. 5.36. Wykorzystanie LMSN-2 w roli oscyloskopu cyfrowego.

Edytor plików *.RAE

LMSN-2 wyposażony jest w rozbudowany edytor wyników zapisanych w plikach *.RAE, wywoływany opcją „Obsługa *.RAE” z głównego menu. Umożliwia on przeglądanie zapisanych sygnałów – podobnie jak omówione przeglądanie pamięci SRAM, a także przekształcanie plików oraz analizę wyników pomiarów. Jego panel czołowy, zawierający menu przedstawiono na rys. 5.37.



rys. 5.37. Główne menu edytora plików *.RAE.

Plik *.RAE może być przepisany częściowo lub w całości na nowy plik *.RAE, z jednoczesnym przetworzeniem zawartych w nim wyników:

- przepisanie bez zmian;
- obniżenie częstotliwości próbkowania czyli przepisanie co n -tego pomiaru ($n = 1 \div 10$);
- ściskanie czyli zastąpienie n pomiarów ich średnią arytmetyczną;
- demodulacja czyli obliczanie wartości skutecznej z zadaną stałą całkowania (liczbą pomiarów branych do wyznaczania AE_{RMS}) i zadaną częstotliwością;
- zmiana wzmocnienia służąca do przeskalowania zapisanych wyników w razie potrzeby ujednoczenia grupy pomiarów;
- filtrowanie górnoprzepustowe, dolnoprzepustowe, wąskopasmowe lub oktafowe;

Ponadto amorficzny plik *.RAE może być rozbity na plik typu byte (*.BYT) zawierający pomiary AE i pliki typu integer (*.INT) zawierające pomiary sił skrawania, w celu opracowywania wyników innymi programami. Możliwe jest także przekształcenie pliku *.RAE na tekstowy i odwrotnie.

Analizator danych umożliwia między innymi:

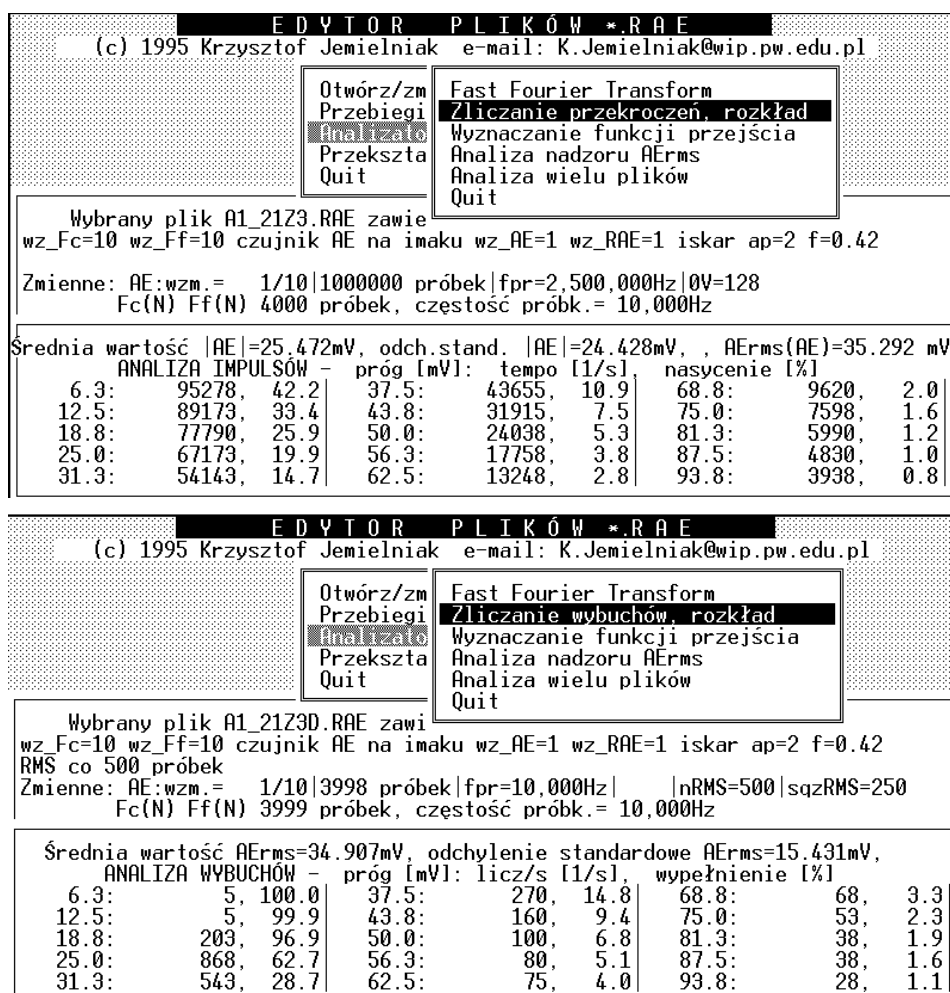
- Wykonywanie analizy widmowej sygnałów (FFT – Fast Fourier Transform).

Możliwe jest wykorzystanie szerokiego zestawu filtrów, okna Hamminga, wykreślanie widm w skali logarytmicznej i liniowej, a także wykonywanie analiz cyklicznych - co określoną liczbę próbek. Dodatkowo można podać maksymalną amplitudę, co pozwala na uzyskanie wykresów w pożądanej skali. Szybką transformatę Fouriera (FFT) można wyznaczać zarówno dla oryginalnych jak zdemodulowanych sygnałów AE i oczywiście dla sił skrawania. Menu FFT zawiera wybór wielkości do analizy, test filtrów oraz zmianę warunków prowadzenia analiz (z/bez zapisu widm w pliku tekstowym, z/bez wykreślania widm w skali logarytmicznej, z/bez okna Hanninga, z/bez stosowania filtrów). Po wybraniu analizowanej wielkości określa się liczbę pomiarów, z której wyznaczana będzie transformata (16÷2049), numer pomiaru początkowego i typ obliczeń: analiza pojedyncza czy cykliczna. Analiza cykliczna polega na wykonywaniu kolejnych FFT do wskazanego pomiaru co określoną liczbę pomiarów. Dodatkowo można podać maksymalną amplitudę, co pozwala na uzyskanie wykresów w pożądanej skali.

- Wyznaczanie wartości średnich i odchylenia standardowego sygnału AE (tak oryginalnego jak i zdemodulowanego),
- Wyznaczanie tempa i nasycenia wybuchów AE_{RMS} , oraz tempa i szerokości impulsów (przekroczeń progu) AR_{raw} dla wybranych poziomów dyskryminacji (rys. 5.38),
- Wyznaczanie funkcji przejścia

LMSN-2 umożliwia wyznaczanie charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych poszczególnych elementów toru pomiarowego AE i porównawczego badania charakterystyk przetworników AE. Badany element jest zasilany z generatora funkcyjno-impulsowego napięciem o stałej amplitudzie i rosnącej w czasie częstotliwości. Sygnał wynikowy, odebrany przez komputer i zapisany w pliku *.RAE ma tak samo zmienną częstotliwość (charakterystyka fazowa jest pomijana) i amplitudę zmienną zgodnie iloczynem charakterystyk badanego elementu i wzmacniacza Rejestratora. LMSN-2 wyznacza poszczególne okresy zmian sygnału i odpowiadające im amplitudy, przy czym amplituda (a) odpowiadająca określonej częstotliwości (f – odwrotności okresu) jest uśredniana z co najmniej 50-ciu okresów zmian sygnału. W ten sposób tworzona jest tablica częstotliwość-amplituda sygnału. Napięcie zasilające może być różne, dopasowane do wzmocnienia obiektu badanego i nastawionego wzmocnienia rejestratora, ponieważ LMSN-2 normalizuje je zawsze do 1 V i uwzględnia nastawione wzmocnienie rejestratora. Wynikowa tablica ma zatem postać $WOR[a, f] = WOR[y/x_0, f]$ i może być traktowana jako fragment iloczynu charakterystyk widmo-

wych badanego obiektu i rejestratora. LMSN-2 umożliwia zapis obliczonych widm w specjalnym pliku *.WAE, lub tekstowym, wykreślanie, nakładanie (składanie) ich na jednym rysunku, a następnie uśrednianie pokrywających się fragmentów i ewentualnie wygładzanie przez filtrowanie dolnoprzepustowe oraz dzielenie przez siebie dwu charakterystyk, dzięki czemu można np. wyeliminować wpływ Rejestratora.



rys. 5.38. Zliczanie impulsów w sygnale AE_{raw} (wyżej) i wybuchów w sygnale AE_{RMS} (niżej).

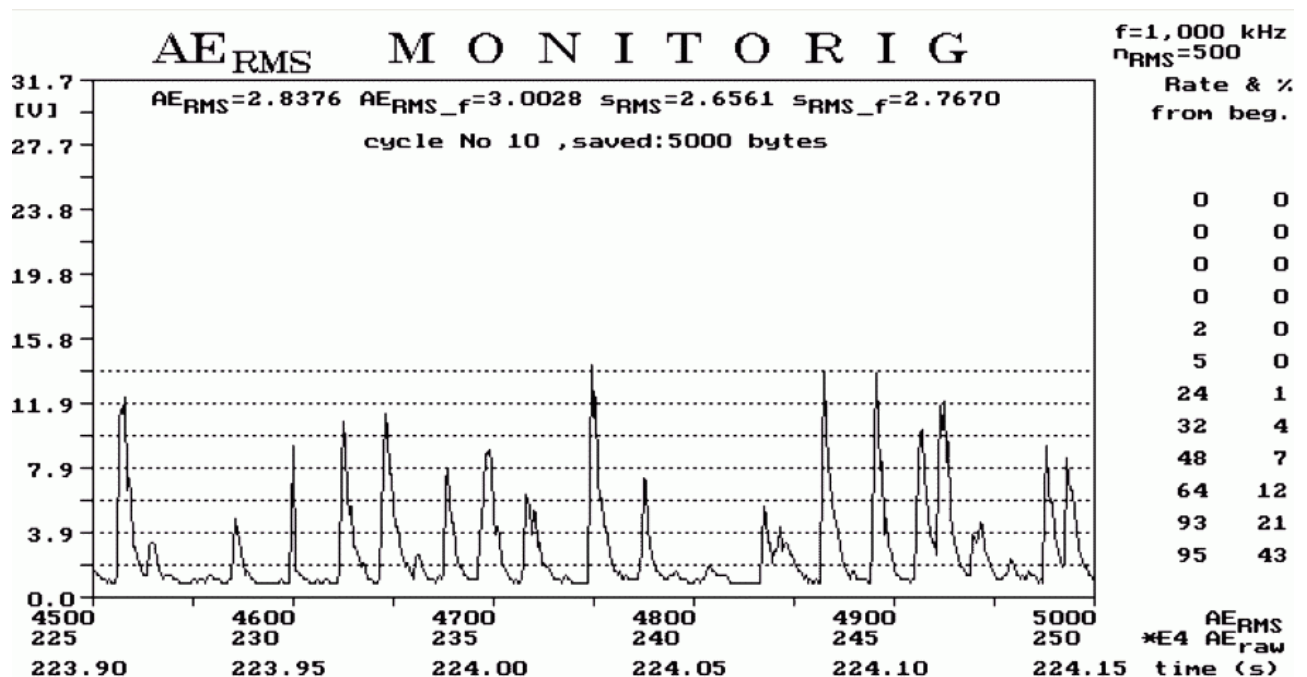
- Analiza nadzoru RMS - służy do analizy przebiegu próby w funkcji wykorzystanej części okresu trwałości ostrza ($\Delta T = t_{skr}/T$) i zapisu wyników w specjalnym pliku tekstowym. Opcja ta służy do analizy plików pochodzących z nadzoru RMS (patrz niżej). W kolejnych wierszach tworzonego pliku tekstowego zapisywane są: ΔT , wartość średnia i odchylenie standardowe sygnału zdemodulowanego oraz tempo wybuchów i procent czasu powyżej trzech wybranych poziomów dyskryminacji.
- Analiza wielu plików służy do obróbki wyników prób, w których rejestrowano krótkie przebiegi AE reprezentatywne dla danego zużycia ostrza. Tworzony jest plik tekstowy zawierający syntetyczne miary sygnału (średnia, odchylenie standardowe, oraz tempo i nasycenie dla 3 poziomów

dyskryminacji) z całej próby trwałościowej – jeden wiersz pliku tekstowego odpowiada jednemu plikowi *.RAE.

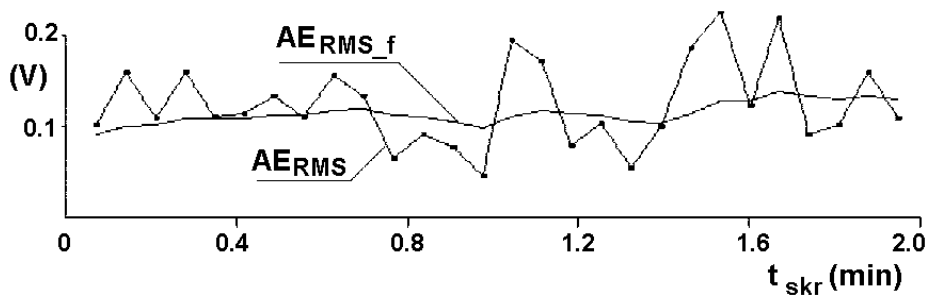
Nadzór AE_{RMS}

Opcja ta służy do bieżącej (on-line) analizy szeregu miar wartości skutecznej sygnału AE (AE_{RMS}) i może być bezpośrednio wykorzystany do nadzoru zużycia ostrza. W jego trakcie LMSN-2 pokazuje wartości AE_{RMS} w trybie oscyloskopowym (rys. 5.39). Z prawej strony ekranu, na wysokości tych poziomów podawane odpowiadające im tempo wybuchów AE i % czasu w jakim sygnał jest wyższy od tego poziomu.

Pracę w tym trybie LMSN-2 rozpoczyna po uruchomieniu posuwu roboczego. W czasie dobiegu narzędzia nie jest prowadzony zapis wyników na dysku, a podawane z prawej strony ekranu wartości dotyczą aktualnie pokazywanej „paczki” (lokalnie). Z chwilą rozpoczęcia skrawania rozpoczyna się właściwy nadzór. Wyniki pomiarów RMS przesyłane przez rejestrator do komputera są automatycznie zapisywane w pliku *.RAE. Tempo wybuchów i procent czasu powyżej poszczególnych poziomów (nasyćenie) liczone są od początku skrawania. Wartości średnie i odchylenia standardowe z natury rzeczy ulegają dość znacznym losowym wahaniom, stąd dodatkowo ich przebiegi są wygładzane przez filtr dolnoprzepustowy i pokazywane na ekranie (z dodatkowym indeksem „f” Wartości wygładzone mogą być wykorzystane do oceny zużycia ostrza, zaś oryginalne do wykrywania zakłóceń w obróbce jak splątanie wiórów lub KSO. Niezależnie od zapisu samego sygnału, wszystkie pokazywane na ekranie wartości są zapisywane w pliku tekstowym wraz z czasem skrawania.



rys. 5.39. Wygląd ekranu w czasie monitorowania wartości skutecznej sygnału AE.



rys. 5.40. Porównanie oryginalnego przebiegu AE_{RMS} z filtrowanym AE_{RMS_f} .

Nadzór KSO

LMSN-2 umożliwia wykrywanie katastroficznego stępienia ostrza (KSO) w oparciu o pomiary wskazanych składowych sił skrawania według jednego z zainstalowanych algorytmów:

- *pełny*, oparty na charakterystycznej zmienności sił skrawania towarzyszącej takiemu stępieniu [78] (patrz punkt 6.2.3),
- *uproszczony* - wykrywający przekroczenie przez siłę podanej wartości (patrz punkt 6.2.1).

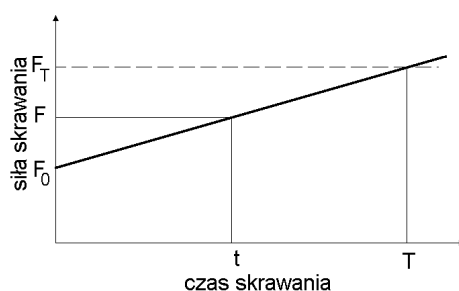
W czasie nadzoru KSO LMSN-2 pracuje w trybie bufora pierścieniowego - próbkowanie sił skrawania i ewentualnie emisji akustycznej odbywa się zgodnie z podanymi warunkami, jednakże po wypełnieniu pamięci próbkowanie nie jest przerywane lecz rozpoczyna się od początku. LMSN-2 na bieżąco (on-line) analizuje przebieg sił skrawania i w razie wykrycia KSO w przebiegu którejkolwiek ze wskazanych sił skrawania, zatrzymuje próbkowanie po podanym przez operatora czasie. W pamięci SRAM pozostają zatem wyniki pomiarów sił skrawania i ewentualnie AE bezpośrednio poprzedzające i następujące po KSO, przy czym LMSN-2 interpretuje adresy komórek SRAM względem KSO. Np. dla częstości próbkowania sił skrawania 2500 Hz i czasu próbkowania 1024 ms, przy zadeklarowanym czasie po KSO 324 ms, pomiar sił skrawania, w którym nastąpiło wykrycie katastroficznego stępienia ostrza będzie miał numer 1750 – patrz rys. 5.35f. Detektor KSO spełnia zatem podwójną rolę: wykrywa KSO oraz steruje pracą bufora pierścieniowego. Dzięki temu możliwe jest badanie charakteru zmienności AE w czasie KSO, co wykorzystano np. w badaniach przedstawionych w punkcie 3.3.3, (np. rys. 3.31, 3.33).

Większość badań AE prowadzonych w ITM PW i przedstawionych w tej monografii, została wykonana przy pomocy LMSN-2.

6. STRATEGIE NADZORU STANU NARZĘDZIA I PROCESU SKRAWANIA

6. 1. Ocena zużycia ostrza

Do automatycznej diagnostyki zużycia ostrza wykorzystywane są pomiary wielkości fizycznych, zależnych od tego zużycia. Zostały one szczegółowo omówione w rozdziale trzecim. Strategie wykrywania nadmiernego zużycia ostrza najczęściej wykorzystują przyrost wartości wybranej miary sygnału towarzyszący zużywaniu się ostrza. Miarą tą może być np. średnia lub maksymalna wartość siły skrawania, liniowa kombinacja sił skrawania, średnia wartość skuteczna emisji akustycznej, średnia wartość wykorzystanej mocy, wartość mocy sygnału w wybranym paśmie, parametry rozkładu sygnału itp. Ocena wybranej miary jest wykonywana z reguły po zakończeniu zabiegu (operacji). Tu dla uproszczenia oznaczymy tę wielkość jako siłę skrawania F , która nawiasem mówiąc jest najczęściej wykorzystywanym pośrednim wskaźnikiem zużycia ostrza. Ostremu narzędziu odpowiada wartość początkowa siły F_0 . W trakcie zużywania się ostrza siła rośnie, uzyskując przy jego stępieniu (na koniec okresu trwałości ostrza T) wartość F_T (rys. 6.1).



rys. 6.1. Przyrost siły skrawania towarzyszący zużywaniu się ostrza.

Uczenie układu polega na obróbce pierwszego przedmiotu ostrym narzędziem. Uzyskana wartość F_0 jest automatycznie normalizowana, czyli uznawana za 100%. Na jej podstawie wyznaczany jest poziom graniczny F_T , jako dopuszczalny przyrost procentowy wartości siły skrawania:

$$F_T = F_0 \left(1 + \frac{dF_T}{100\%} \right) \quad \text{czyli} \quad dF_T = \frac{F_T - F_0}{F_0} \cdot 100\% \quad (6.1)$$

W trakcie nadzoru, po każdej operacji układ wyświetla wartość przyjętej miary (tu F). Osiągnięcie poziomu granicznego oznacza koniec okresu trwałości ostrza, czyli jego stępienie. Procentowy dopuszczalny przyrost miary dF_T może być wstępnie założony przez producenta, ale ostatecznie musi być określony przez operatora. Dostrajanie układu polega na korygowaniu dF_T .

W celu ograniczenia wpływu przypadkowych zmian mierzonego sygnału, zamiast ostatnio zmierzonej jego wartości, można zastosować ruchomą średnią F_{sn} obliczaną na podstawie trzech kolejnych wartości (rys. 6.2 [221]):

$$F_{sn} = (F_n + F_{n-1} + F_{n-2})/3 \quad (6.2)$$

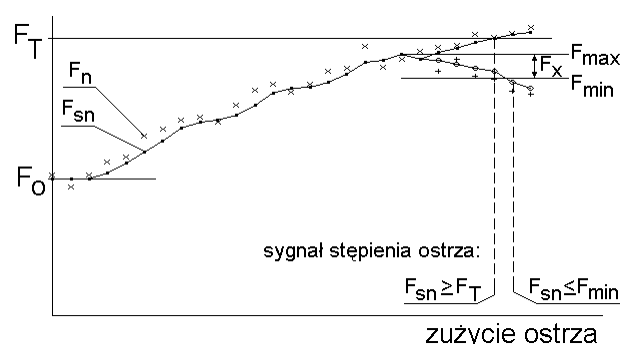
gdzie: F_n – wartość sygnału po ostatnio wykonanej operacji,

F_{n-1}, F_{n-2} – wartości sygnału po dwóch poprzednio wykonanych operacji.

Ruchoma średnia z trzech pierwszych przedmiotów jest przyjmowana jako F_0 we wzorze (6.1). Wartość sygnału może w wyniku stępienia ostrza ulec nie tylko zwiększeniu, lecz także zmniejszeniu. Stąd narzędzie może być uznawane za stępione także wówczas, gdy ruchoma średnia po osiągnięciu wartości maksymalnej F_{max} zmniejszy się więcej niż o F_x :

$$F_x = F_0 \cdot dF_T / 100 \cdot X \quad (6.3)$$

gdzie: X - współczynnik określany doświadczalnie.



rys. 6.2. Strategia wykrywania naturalnego stępienia ostrza opracowana w TH Aachen [221].

Wróćmy jednak do podstawowej strategii wykrywania nadmiernego zużycia ostrza przedstawionej na rys. 6.1 i opisanej wzorami (6.1). Przypomnijmy, że użytkownik jest na bieżąco informowany o wartości mierzonych sygnałów, a przekroczenie wyznaczonych w trakcie uczenia granic wywołuje alarm. Informacje te podawane w formie cyfrowej lub graficznej są przydatne dla badacza lecz nie dla operatora obrabiarki, którego interesuje jedynie na ile ostrze jest zużyte. Gdy operator uzna, iż graniczne wartości mierzonego sygnału są zbyt niskie lub zbyt wysokie, musi sam wykonywać dodatkowe obliczenia wg wzorów (6.1), czyli wyznaczyć wartość dF_T . Cała procedura jest dość niewygodna, nieprzejrzysta i wymaga doświadczenia. Nie ma powodu, dla którego nie można by odciążać operatora od tego posługiwania się wartościami sygnałów i ułatwić mu dostrajanie układu przez uproszczenie komunikacji układ – operator. Prace podjęte w PW zmierzają do zmiany tego stanu rzeczy [115, 128, 129, 130]. Układ nadzorujący zużycie ostrza powinien żądać od użytkownika jedynie niezbędnych, prostych informacji, w zamian przekazując nie wartości sygnałów, lecz procentowe wykorzystanie ostrza. Uczenie winno być łatwe, bez potrzeby bezpośredniego deklarowania wartości progowych. Równie łatwe winno być dostrajanie tych wartości. Niżej przedstawiono podstawowe założenia opracowanej w ITM PW koncepcji.

O ile każdy operator obrabiarki wie co to są np. siły skrawania czy moc silnika itp., o tyle na co dzień nie posługuje się tymi wielkościami, nie ma wycucia co do ich wartości i zmienności. Trudno jest mu więc przewidzieć jaką wartość może mieć mierzony sygnał dla narzędzia ostrego, a tym bardziej jaki

przyrost sygnału oznacza stopień ostrza. Jeśli chodzi o stan narzędzia, naturalnymi pojęciami są narzędzie ostre, częściowo stępione, stępione. Raczej rzadko w warunkach produkcyjnych wykorzystywane są miary zużycia ostrza jak VB czy KT . Przypomnijmy zatem wprowadzone w rozdziale drugim (wzór 2.14) pojęcie wykorzystanej części okresu trwałości ostrza ΔT zdefiniowane jako stosunek dotychczasowego czasu skrawania do okresu trwałości ostrza. Przyjmując w pierwszym przybliżeniu liniową zmienność siły skrawania w czasie skrawania (rys. 6.1) mamy:

$$\Delta T = \frac{t}{T} = \frac{F - F_0}{F_T - F_0} \quad (6.4)$$

a podstawiając (6.1) oraz wyrażając ΔT w %:

$$\Delta T = \left(\frac{F}{F_0} - 1 \right) \cdot \frac{10^4}{dF_T} \quad (6.5)$$

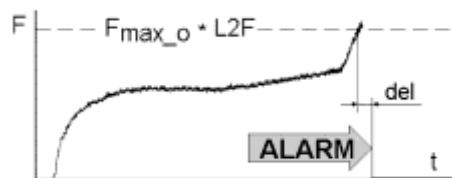
Po wykonaniu pierwszej operacji układ zapamiętuje wartość sygnału F_0 odpowiadającą ostremu narzędziu w ogóle nie absorbując operatora tą informacją. Wartość ΔT jest wyznaczana ze wzoru (6.5) i wyświetlana przez układ po wykonaniu każdej operacji. Po przekroczeniu przez ΔT 100% układ nadzoru generuje sygnał alarmowy, który może być wykorzystany przez układ sterowania obrabiarki do automatycznej wymiany stępionego narzędzia lub jedynie do informowania operatora o stopieniu narzędzia. Jeśli operator uzna, że ostrze jest stępione wcześniej lub później niż wskazuje układ nadzoru, może poinformować układ o swojej ocenie przyciskając odpowiedni klawisz. Będzie to oznaczało, że ostrze jest stępione ($\Delta T = 100\%$), średnia wartość siły uzyskana w ostatniej operacji odpowiada stopieniu ($F = F_T$), więc układ może wyznaczyć ponownie współczynnik dF_T ze wzoru (6.1). Należy podkreślić, że żadna wartość nie będzie podawana przez operatora. Zauważmy przy tym, że nie jest tu potrzebne określanie wielkości zużycia ostrza (wyznaczanie bezpośrednich wskaźników zużycia VB , KT itp). Operator ocenia moment, w którym ostrze jest stępione, na podstawie kryteriów stosowanych niezależnie od układu nadzorującego, a więc np. na podstawie pogorszenia się jakości powierzchni czy obniżenia dokładności obróbki. Weryfikację tej koncepcji przedstawiono w rozdziale dziewiątym.

6. 2. Wykrywanie katastroficznego stopienia ostrza

6. 2. 1. Strategie oparte na stałych granicach

Jak stwierdzono w punkcie 3.2.2, katastroficznemu stopieniu ostrza towarzyszy najczęściej znaczny wzrost sił skrawania, a także emisji akustycznej czy drgań. Fakt ten jest wykorzystywany w większości znanych strategii wykrywania KSO. Główne ich założenia omówione zostaną na przykładzie strategii układu Tool Monitoring System firmy Coromant, zainstalowanym w CBKO Pruszków [97, 110, 224] (rys. 6.3):

- zapamiętywana jest wartość mierzonego sygnału towarzyszącego skrawaniu narzędziem ostrym, a przynajmniej nadającym się do dalszej pracy; w najprostszym przypadku jest to maksymalna wartość sygnału w czasie operacji F_{max_o} (rys. 6.3),
- w oparciu o tę wartość wyznacza się krytyczny poziom sygnału, oznaczający katastroficzne stopień ostrza jako $F_{max_o} * L2F$, gdzie $L2F = 1.5 \div 3.0$;
- KSO jest sygnalizowane po przekroczeniu poziomu krytycznego, przy czym w celu ograniczenia liczby fałszywych alarmów wymagane jest, by przekroczenie to trwało co najmniej założony czas $del = 1 \div 20$ ms.



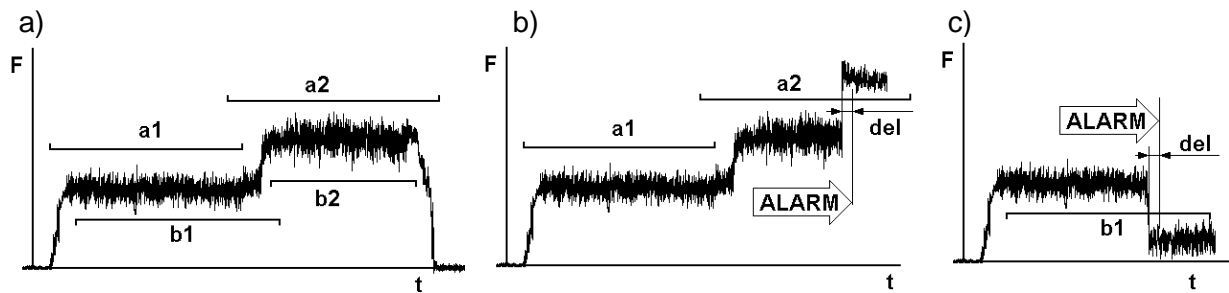
rys. 6.3. Wykrywanie katastroficznego stopnia w oparciu o stałą graniczną wartość krytyczną [224].

Ponieważ mierzone sygnały (np. sił skrawania) rosną wraz ze zużyciem ostrza, zamiast ustalonej na stałe granicy, stosowane być mogą granice dopasowywane z operacji na operację. W takim przypadku poziom graniczny wyznaczany jest nie w oparciu o wartość sygnału dla ostrego narzędzia, lecz na podstawie wartości zmierzonej w czasie poprzedniej operacji od nowa, a dla następnej przyjmowane są nowe, zaktualizowane wartości [77, 86, 205]. Dzięki temu można obniżyć wartość współczynnika $L2F$, a przez to zbliżyć granicę do sygnału, czyli zwiększyć czułość detektora KSO.

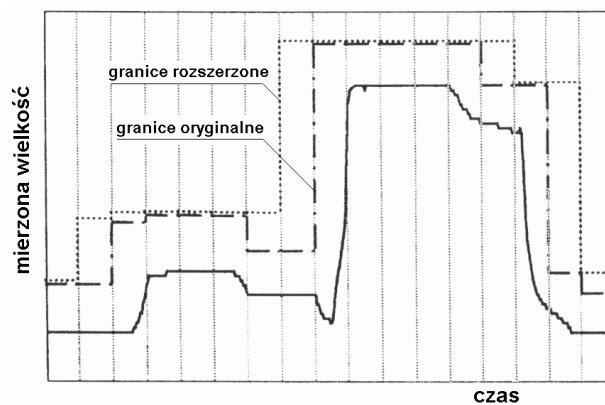
Stałe dla całej operacji granice mogą być stosowane, gdy przebieg sygnału jest w jej trakcie w przybliżeniu ustalony. Jednakże jeśli narzędzie skrawa z różnymi parametrami skrawania, fragmenty operacji w czasie których parametry te są niskie, byłyby oczywiście nadzorowane bardzo źle ze względu na duży dystans sygnału prawidłowego od progu ustalonego dla najwyższych w czasie operacji parametrów. Dla takich przypadków, gdy w przebiegu operacji można wyróżnić etapy o wyraźnie różnych poziomach sygnału można zastosować granice oddzielne dla każdego występującego zestawu parametrów skrawania (rys. 6.4) [222]. Ponieważ katastroficznemu stopniowi ostrza może towarzyszyć nie tylko wzrost, ale i spadek wartości sygnału diagnostycznego wynikający ze spadku przekroju warstwy skrawanej, stosowane są także granice dolne ($b1$ i $b2$ na rys. 6.4), których przekroczenie od góry oznacza KSO.

Jeśli przebieg zmienności sygnału w czasie operacji jest bardziej złożony, tj. nie da się go podzielić na etapy o ustalonej wartości, cały czas trwania operacji może być podzielony na równe niewielkie odcinki czasu. Granice określone są oddzielnie dla każdego z nich na podstawie najwyższej zarejestrowanej w wartości sygnału (linia osiowa na rys. 6.5). Strategia taka jest bardzo wrażliwa na niewielkie nawet przesunięcia w czasie przebiegu operacji – zbyt wczesne wystąpienie etapu, w którym sygnał jest wysoki powoduje fałszywy alarm. Uniknąć tego można stosując technikę zaproponowaną w [171]: granica dla danego odcinka czasu wyznaczana jest na podstawie maksymalnej wartości sygnału w odcinku

poprzedzającym, aktualnym i następnym. Powoduje to rozszerzenie stref z wysoką wartością sygnału i ograniczenie fałszywych alarmów.

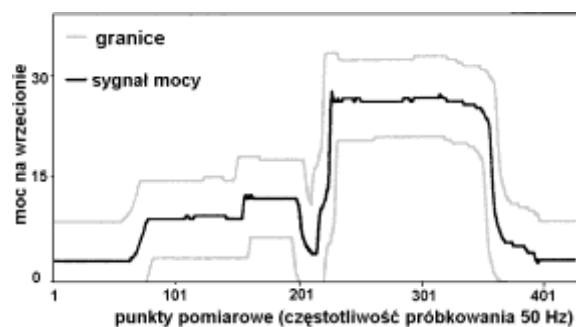


rys. 6.4. Wykrywanie KSO w oparciu o granice określone oddzielnie dla każdego zestawu parametrów skrawania; a) ustawienie granic, b) KSO wykryte jako wzrost sygnału powyżej granicy a2, c) KSO wykryte jako spadek sygnału poniżej granic b1.



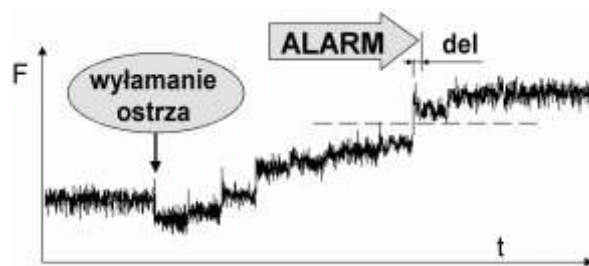
rys. 6.5. Wyznaczanie dopuszczalnych wartości sygnału do wykrywania KSO wg [171].

Szerokość odcinków czasu może być bardzo zawężona dzięki czemu otrzymuje się nieomal ciągly, zmienny w czasie przebieg wzorcowy sygnału, otoczony przez obliczone na jego podstawie granice [2, 21, 205], jak na przykładzie przedstawionym na rysunku 6.6, gdzie strategię tę zastosowano do wykrywania KSO przy wierceniu wiertłami $\phi 30$ w odlewach aluminiowych, w oparciu o pomiar mocy silnika głównego [171].



rys. 6.6. Wzorec przebiegu sygnału wraz z pasmem tolerancji jego wartości stosowany do wykrywania KSO [171].

Należy podkreślić, że we wszystkich opisanych wyżej strategiach wartości graniczne wyznaczone są na podstawie pierwszej lub poprzedniej operacji, a są niezmiennie w czasie wykonywanej aktualnie. Mogą być i są wykorzystywane z lepszym lub gorszym skutkiem we wszystkich sposobach obróbki. Nietrudno jednak zauważyć, że np. przy toczeniu za pomocą omówionych strategii wykryte mogą być tylko znaczne uszkodzenia ostrza, z reguły kilka lub kilkanaście obrotów przedmiotu po KSO, a więc zdecydowanie za późno (rys. 6.7).



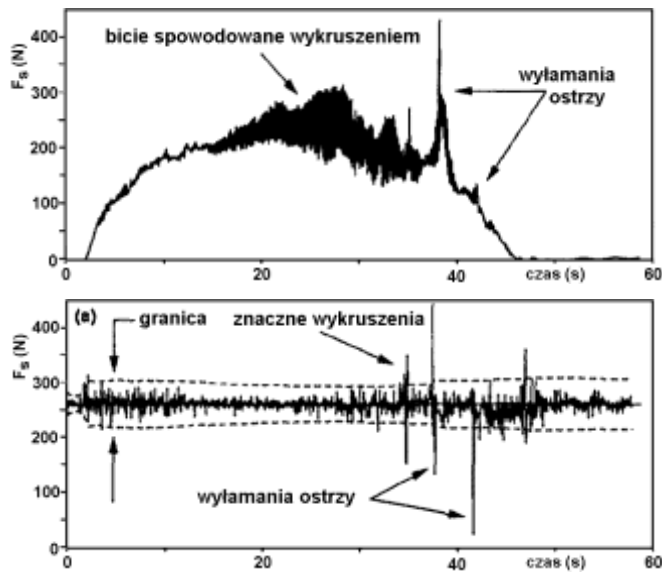
rys. 6.7. Rzeczywista skuteczność wykrywanie KSO w oparciu o stałe granice [89].

6. 2. 2. Rozpoznawanie przebiegu sił skrawania towarzyszącego KSO

Mimo iż strategie opisane w poprzednim punkcie dominują w komercyjnych zastosowaniach, można spotkać bardziej wyrafinowane sposoby wykrywania KSO. Dotyczy to jednak tylko frezowania i toczenia.

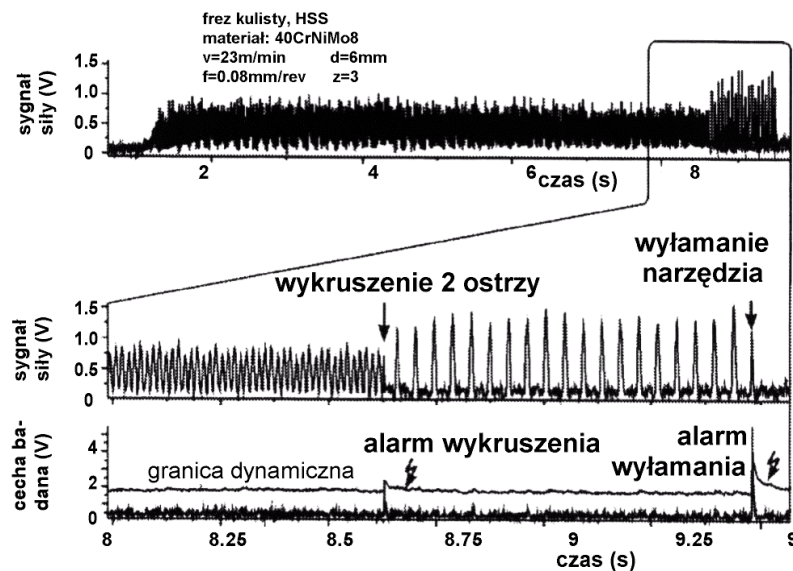
W [253] przedstawiono strategię wykrywania KSO przy frezowaniu opartą na śledzeniu błędów przewidywania przebiegu siły F_s prostopadłej do osi freza przy pomocy modelu auto-regresji pierwszego rzędu – AR(1). Siłę tę wyznaczano jako pierwiastek sumy kwadratów sił mierzonych siłomierzem w dwu osiach (F_x i F_y). W celu ograniczenia błędów wynikających z przesunięcia fazowego tych sił, wyniki pomiarów z czasu odpowiadającego przejściu jednego ostrza uśredniano. Na rysunku 6.8 przedstawiono przebieg siły F_s oraz błędów jej przewidywania w jednym z eksperymentów. Jak widać, przewidywanie to jest dość dokładne w czasie gdy ostrza freza są w dobrym stanie i mieści się w stosunkowo wąskich granicach, dopasowujących się z założoną bezwładnością do tych błędów. Wykruszenia, a tym bardziej wyłamania powodują nagłe zmiany w powtarzalnym przebiegu śledzonej siły. Chwilowy znaczny wzrost błędu przewidywania, przekraczający bezwładne granice może być wykorzystany jako sygnał KSO.

Podobne rozwiązanie można znaleźć w [141, 14], rys. 6.9. Śledzona cecha sygnału jest szczególnie wrażliwa na zmiany przebiegu sygnału towarzyszące KSO, przy czym tym razem nie jest on uśredniany co jedno przejście ostrza. Wykrycie KSO następuje w ciągu 5 ms od jego rzeczywistego wystąpienia. Wzmocnienie sygnału jest automatycznie dopasowywane do różnych rzeczywistych wartości siły w celu utrzymania go na poziomie najbardziej odpowiednim do zastosowanego algorytmu. Dzięki temu układ może monitorować zarówno duże narzędzia wykonujące obróbkę zgrubną, jak małe narzędzia wykańczające, na zupełnie różnych obrabiarkach, bez ręcznego ustawiania układu czy fazy uczenia.



mat. obrabiany: Inconel 718,
 średnica freza, $D = 38$ mm,
 typ płytek: okrągłe, z ceramiki zbrojonej,
 liczba płytek: 2,
 $n = 500$ obr/min,
 $f = 0.175$ mm/ząb,
 $a_p = 2.5$ mm,
 $a_e = 19$ mm.

rys. 6.8. Wykrywanie KSO przy frezowaniu wg [253]; a) przebieg siły prostopadłej do osi freza, b) błędy przewidywania siły przy pomocy modelu AR(1) wraz z granicami.



rys. 6.9. Wykrywanie KSO przy frezowaniu wg [141, 14].

Przy toczeniu przebieg sił skrawania jest znacznie mniej zmienny niż przy frezowaniu, a same siły są znacznie łatwiejsze do dokładnego zmierzenia. Przebieg sił skrawania, towarzyszący katastroficznemu stopniowi ostrza opisano w punkcie 3.2.2, na rys. 3.19÷3.21. Przypomnijmy jego najważniejsze cechy:

- wykruszaniu krawędzi skrawającej towarzyszą skokowe przyrosty (w ciągu 1÷3 ms) składowej posuwowej F_f i/lub składowej odporowej F_p , wywołane pogarszaniem się geometrii krawędzi skrawającej,
- znacznemu wylamaniu ostrza towarzyszy nagły wzrost a następnie spadek siły skrawania; wielkość tych zmian jest funkcją zmiany (zmniejszenia) przekroju warstwy skrawanej, a także innych warunków skrawania.

W obu wymienionych przypadkach, siły skrawania pozostają na nowym poziomie w ciągu jednego obrotu przedmiotu. Po tym obrocie narzędzie napotyka na uskok pozostawiony na powierzchni przejściowej, czemu towarzyszy skokowy przyrost posuwowej i odporowej siły skrawania, a na powierzchni przejściowej pozostaje następny, mniejszy uskok. Taka sekwencja zdarzeń powtarza się co jeden obrót przedmiotu, przy czym zmiany sił są coraz mniejsze. W końcu następuje ustabilizowanie się sił na nowym poziomie.

Opisane cechy charakterystyczne przebiegu sił skrawania zostały wykorzystane do opracowania kilku bardziej wyrafinowanych strategii wykrywania KSO przy toczeniu. W odróżnieniu od strategii opisanych w poprzednim punkcie, nie śledzi się w nich wartości sygnałów lecz ich zmiany. Sama jego wartość, a tym bardziej wartość w poprzednich operacjach nie jest brana pod uwagę, a więc nie jest potrzebna. Wielkości sterujące w tych strategiach nie są zatem zależne od parametrów skrawania i nie jest istotna dokładna wartość samej siły, co oznacza, że nie jest wymagana wysoka dokładność statyczna zastosowanego czujnika.

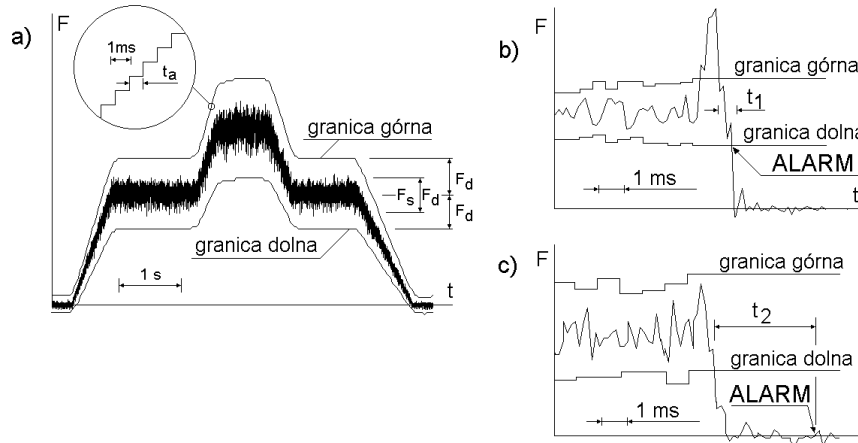
Strategia przedstawiona w [205, 228] oparta jest na rozpoznawaniu charakterystycznego przebiegu sił skrawania towarzyszącego KSO. Układ pamięta szereg takich obrazów – patrz np. rys. 6.10. Pamiętane są także przebiegi sił towarzyszące skrawaniu przerywanemu. Układ stale śledzi przebieg sił i w razie zidentyfikowania jednego z zapamiętanych obrazów sygnalizuje alarm w przeciągu mniej niż 10 ms.



rys. 6.10. Wykrywanie KSO w oparciu o rozpoznawanie obrazu [205, 228].

Strategia opracowana w TH Aachen [148, 221] bazuje na granicach dynamicznych, tzn. dopasowujących się do wartości sygnału na bieżąco, lecz z ograniczoną szybkością (rys. 6.11 a). Strategii tej nie należy mylić z wzorcem przebiegu (rys. 6.6), który nie zmienia się w czasie jednego cyklu obróbki, czy rozpoznawaniem obrazu. Tu wykrywane są bardzo szybkie zmiany sił, powodujące przekroczenia jednej lub obu granic, które po takim przekroczeniu zostają przestają się dopasowywać. Układ monitorujący stale (co mniej niż 1 ms) oblicza dolną i górną granicę, na podstawie średniej siły F_s oraz amplitudy składowej dynamicznej F_d . W rezultacie uzyskuje się zmienne w czasie pasmo tolerancji. Dzięki temu ignorowane są zmiany sił wynikające ze zmian warunków skrawania takich jak nawet 4-krotne zmiany głębokości skrawania czy twardości, które występują zwłaszcza przy wstępnej obróbce lanych lub kutych przygotówek [221]. Zmiany sił spowodowane uszkodzeniem ostrza są zbyt szybkie (1÷2 ms) by granice mogły za nimi nadążyć, są więc przekraczane. Specjalną rolę pełni w tym przypadku chwilowy wzrost siły występujący w momencie KSO (rys. 3.19). Górna granica jest w jego trakcie przekraczana dwukrotnie, w obu kierunkach (z dołu i z góry). Jeżeli takiemu zjawisku towarzyszy szybkie przekroczenie dolnej granicy (w czasie nie większym niż t_1), generowany jest sygnał alarmowy (rys. 6.11 b). W przypadku przekroczenia tylko górnej

lub tylko dolnej granicy (jak rys. 6.11 c), KSO jest sygnalizowane po niewielkiej zwłoce t_2 stosowanej w celu uniknięcia fałszywych alarmów. Przyczyną przekroczenia granic może być także nagłe przerwanie obróbki czy pustka w materiale. Ostateczną interpretację przyczyny alarmu prowadzi się wizualnie na podstawie analizy zarejestrowanego przebiegu siły skrawania.



rys. 6.11. Strategia wykrywania KSO przy toczeniu opracowana w TH Aachen [148, 221].

Pomimo, iż strategia ta jest znacznie lepsza niż bazująca na „sztywnych” lub nauczonych progach, ma jednak pewne niedogodności:

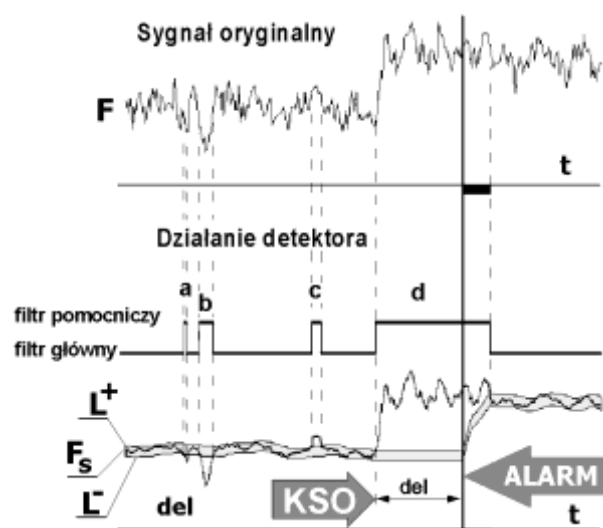
- Potrzeba wykrycia szybkiego wzrostu i spadku siły, trwającego ok. 0.1 ms sprawia, iż konieczne jest stosowanie czujnika o bardzo dobre właściwościach dynamicznych. Oznacza to, że częstotliwość drgań własnych elementów obrabiarki pomiędzy narzędziem i czujnikiem, nie powinna być niższa niż ~ 3 kHz. Takie wymagania spełniają tylko czujniki montowane bezpośrednio w pobliżu narzędzia, omówione w punkcie 4.1.4. Ponadto częstotliwość próbkowania, a co ważniejsze analizowania sygnału nie może być mniejsza niż ok. 5000 Hz.
- Nawet znacznym wyłamaniem ostrza nie muszą towarzyszyć istotne zmniejszenie przekroju warstwy skrawanej, a w konsekwencji wyraźne zmniejszenie siły skrawania (np. rys. 3.21 b, c). Jeżeli siły są silnie zakłócone (duża wartość składowej dynamicznej F_d), pasmo tolerancji może być na tyle szerokie, że nie zostanie przekroczone w wyniku zmiany siły.

6. 2. 3. Strategia wykrywania KSO przy toczeniu opracowana w ITM PW

W Instytucie Technologii Maszyn Politechniki Warszawskiej podjęto próbę eliminacji wad strategii TH Aachen opisanych w poprzednim punkcie [75, 78, 91]. Oparto się przy tym na omówionych wyżej podstawowych cechach charakteryzujących przebieg sił skrawania po wykruszeniu lub wyłamaniu ostrza, upraszczając je nieco:

- średnie wartości sił skrawania zmieniają się na skutek KSO w czasie 0.5-2 ms,
- po KSO siły utrzymują się na zmienionym poziomie przez co najmniej jeden obrót przedmiotu obrabianego.

Pierwsza z wymienionych cech umożliwia odróżnienie zmian sił spowodowanych przez KSO od wynikających np. ze zmian naddatku. Druga pozwala na eliminację naturalnych, często bardzo dużych i szybkich zakłóceń sił pochodzących od nierównomierności procesów zachodzących w strefie skrawania oraz od łamania wióra. Nadzorowana może być dowolna składowa siły skrawania: posuwowa (F_f), odporowa (F_p), główna (F_c) lub inna wygodna do pomiaru miara siły skrawania pod warunkiem wystarczających właściwości dynamicznych układu pomiarowego. Zauważmy, że nie się tu nie mówi o gwałtownym, chwilowym wzroście siły po wyłamaniu ostrza, będącym charakterystycznym elementem przebiegu siły dla strategii TH Aachen (patrz rys. 3.19, 6.1b). Nie oznacza to bynajmniej, iż założono niewystępowanie takiego wzrostu – po prostu jego występowanie lub nie jest dla strategii ITM PW nieistotne. Dzięki temu, wspomniane właściwości dynamiczne układu pomiarowego mogą być znacznie gorsze, a częstotliwość próbkowania znacznie niższa niż dla strategii TH Aachen. Można ponadto zamiast sygnału oryginalnego śledzić sygnał filtrowany dolnoprzepustowo, co znacznie obniży jego składową dynamiczną i umożliwi zawężenie granic tolerancji sygnału.



rys. 6.12. Wyrwanie KSO przy toczeniu wg strategii ITM PW [75, 78, 91].

Na rys. 6.12 przedstawiono podstawowe założenia strategii ITM PW. Górną połowę tego rysunku zajmuje przebieg sygnału pochodzącego bezpośrednio z czujnika siły. Widoczne są na nim wyraźne silne, naturalne zakłócenia. Mniej więcej w połowie przebiegu występuje szybka zmiana średniego poziomu sygnału, wywołana przez wykruszenie ostrza. Dalszy przebieg siły jest również zakłócony jak przed KSO. W celu wstępnego „wygładzenia” sygnału, ułatwiającego wykrywanie KSO, sygnał siły jest wstępnie filtrowany dolnoprzepustowo i zamiast oryginalnej wartości F śledzona jest wartość F_s . Następnie wyznaczane są granice dopuszczalnego zakresu zmienności siły. Muszą być one znacznie bardziej bezwładne niż F_s , aby szybsze zmiany siły mogły być wykrywane, jednakże muszą nadążać za wolnymi zmianami F_s , wynikającymi ze zmian warunków skrawania. Ponadto przyjęto, że wielkość zakłóceń siły, a zatem także szerokość pasma tolerancji powinna być proporcjonalna do wartości siły skrawania. W opracowanym detektorze KSO wartości graniczne otrzymywane są zatem jako:

$$L^+ = F_s + dF \quad (6.6)$$

$$L^- = F_s - dF \quad (6.7)$$

$$dF = 2^{-(c+2)} F_{sG} \quad (6.8)$$

F_{sG} – wolnozmienna składowa siły skrawania uzyskana dzięki dalszemu filtrowaniu siły F_s ,

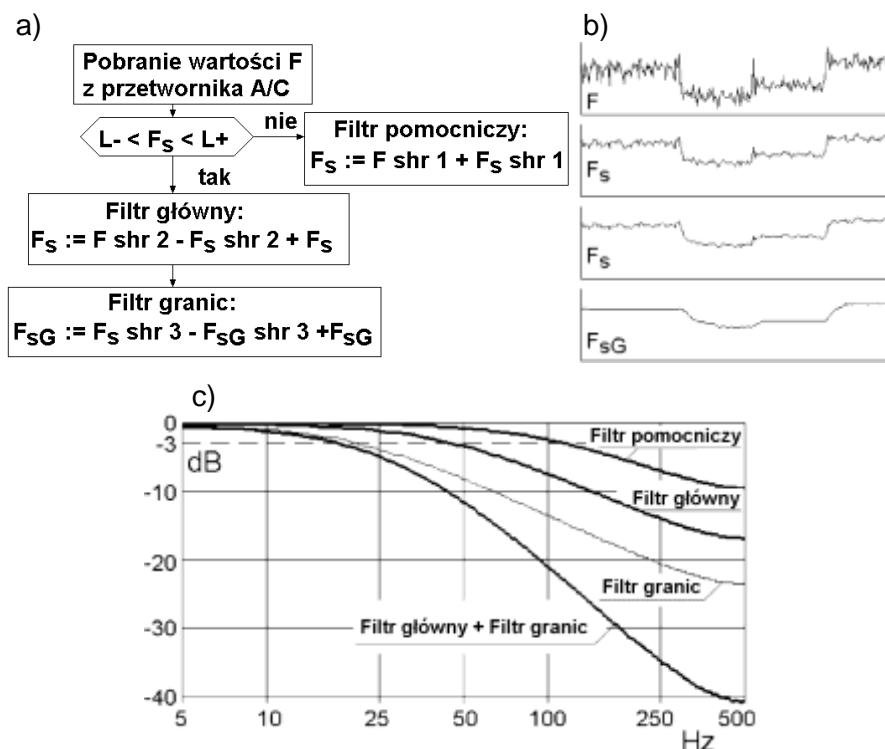
$c = 1 \div 3$ – czułość detektora

Mimo wstępnego filtrowania oryginalnej wartości siły, F_s może przekraczać na krótko wyznaczone granice. Należało zatem stworzyć mechanizm odróżniający takie przypadkowe naturalne przekroczenia od KSO. Wykorzystano w tym celu omówioną cechę przebiegu sił po KSO – utrzymywanie się na zmienionym poziomie przez co najmniej 1 obrót przedmiotu obrabianego. W opracowanej strategii przyjęto, że za KSO uznawana jest zmiana siły skrawania trwająca co najmniej czas del (w milisekundach). A zatem po przekroczeniu przez F_s granicy dolnej L^- (odcinki czasu a i b na rys. 6.12) lub górnej L^+ (odcinki c i d na rys. 6.11) rozpoczyna się odliczanie czasu dopuszczalnego przebywania wartości F_s poza granicami. Jednocześnie wstrzymuje się aktualizację wartości F_{sG} oraz L^+ i L^- , pozostawiając je na ustalonym poziomie. Jeżeli wartość F_s przed upływem czasu del powróci między granice, należy uznać, że przekroczenie granic było naturalnym zakłóceniem (odcinki a, b i c na rys. 6.12). Ponieważ sygnał F_s jest filtrowany dolnoprzepustowo, jego ewentualny powrót między granice jest opóźniony względem sygnału oryginalnego F . W celu ułatwienia tego powrotu, na czas przebywania F_s poza granicami postanowiono osłabić filtrowanie siły F_s tzn. filtr główny zastąpić filtrem pomocniczym. Łamana linia na środku rysunku 6.12 wskazuje kiedy aktywny jest filtr główny, a kiedy pomocniczy.

Jeśli zmieniona wartość siły utrzymuje się przez czas dłuższy niż del , należy uznać, że wystąpiło katastroficzne stępienie ostrza. Na rys. 6.12 KSO wystąpiło na początku odcinka d. Zgodnie z założoną strategią przyjęto, że sygnalizowane powinno być ono po upływie czasu del , w chwili zaznaczonej na rysunku pionową linią. Czas ten dla obróbki ciągłej wynosi 20 ms, a przy obróbce przerywanej (np. toczenie wałka z rowkiem lub wielowypustem) powinien być podany przez operatora i wynosić ok. 1.5 czasu trwania najdłuższych przerw w obróbce. Po zasygnalizowaniu KSO wznawiane jest obliczanie stałej składowej siły skrawania F_{sG} oraz L^+ i L^- , dzięki czemu dopasowują się one do nowej wartości średniej siły. Przez cały czas potrzebny na to dopasowanie detektor wysyła sygnał KSO (czarny prostokąt pod osią czasu). Po powrocie wartości F_s między granice układ jest gotów do wykrywania kolejnego katastroficznego stępienia ostrza. Tę ostatnią możliwość przewidziano, mimo iż obróbka powinna być już przerwana, z dwóch względów. Po pierwsze, w badaniach symulacyjnych wykorzystywane były nagrania magnetofonowe pomiarów sił skrawania w czasie KSO. Obróbka była w nich przerywana przez operatora natychmiast po zauważeniu KSO, co jednak trwało kilka – kilkanaście obrotów przedmiotu. Występowały zatem opisane wyżej kolejne skoki sił, które mogą być wykrywane przez detektor, powiększając liczbę przebadanych

przypadków. Po drugie, gdyby z jakichkolwiek względów układ sterowania obrabiarki nie zareagował na pierwsze KSO, otrzyma kolejne sygnały, w kolejnych obrotach przedmiotu.

Obróbkę sygnału siły skrawania stosowaną w detektorze przedstawiono na rys. 6.13. Z prawej strony tego rysunku pokazano przebieg zmiennej składowej siły po kolejnych etapach tej obróbki, czyli skutki filtrowania. Wykorzystano do tego celu rzeczywiste wyniki jednego z przeprowadzonych pomiarów.



rys. 6.13. Schemat obróbki sygnału siły skrawania (a), wpływ filtrowania na sygnał siły skrawania (b) oraz charakterystyki filtrów cyfrowych zastosowanych w detektorze ITM PW (c).

Cyfrowe filtry zastosowane w detektorze oparte są na ogólnym schemacie:

$$y = 2^{-sh} x + (1 - 2^{-sh}) y_B \quad (6.9)$$

gdzie: sh – stała filtru będąca liczbą naturalną.

x - wielkość wejściowa (poddawana filtrowaniu)

y - wielkość wyjściowa (wynik filtrowania),

y_B – poprzednia wartość y .

Filtry te są bardzo szybkie, ponieważ wykorzystują jedynie operacje dodawania, odejmowania i przesuwania bitowego w prawo (shr – shift right) liczb całkowitych. Np. dla $sh = 2$ wzór (6.9) przyjmuje postać:

$$y := x shr 2 - y shr 2 + y \quad (6.10)$$

gdzie „:=” jest operacją przypisania („staje się”)

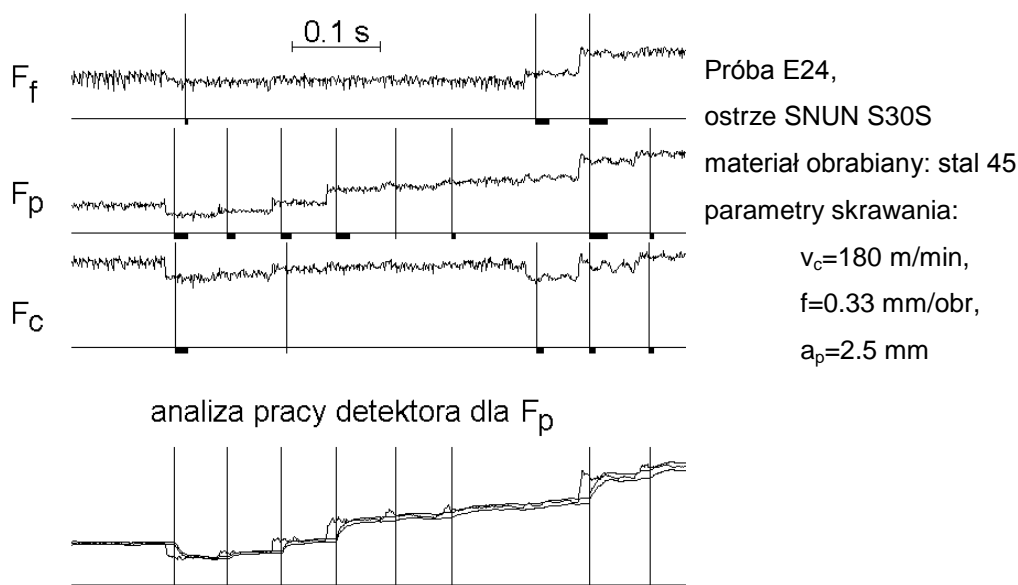
co w „normalnym” zapisie oznacza:

$$y = x/4 + y_B - y_B/4 \quad (6.11)$$

Na wstępie detektor pobiera wartość siły F z przetwornika analogowo – cyfrowego. Na rysunku z prawej widać jak bardzo może być ona zakłócona. Jeżeli poprzednia wartość siły F_s nie mieści się w wyznaczonych granicach, sygnał jest filtrowany słabym filtrem pomocniczym ($sh = 1$), który eliminuje jedynie impulsowe zmiany siły. Jeśli wartość F_s jest zawarta w wyznaczonych granicach, stosowany jest filtr główny ($sh = 2$). Jak widać na rysunku, amplituda zmian F_s jest po takim filtrowaniu znacznie niższa od amplitudy oryginalnej wartości siły F .

Z kolei, na podstawie F_s oblicza się wolnozmienną składową siły skrawania F_{SG} , stanowiącą podstawę do wyznaczania szerokości pasma tolerancji (wzór 6.8).

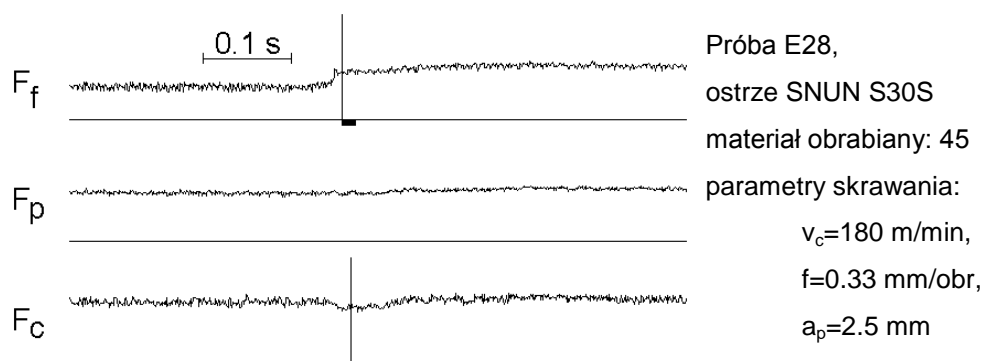
Na rys. 6.14 przedstawiono pierwszy przykład ilustracji wyników pracy detektora KSO opracowanego w ITM PW (próba E24 [91, 125]). Widoczne są na nim przebiegi trzech składowych sił skrawania uzyskane przy pomocy siłomierza Kistler 9265 (rys. 3.11). Mimo umieszczenia tych przebiegów na jednym rysunku, każda z sił była analizowana niezależnie od pozostałych. Z punktu widzenia detektora są to zatem trzy niezależne eksperymenty, choć w rzeczywistości dotyczą tego samego zdarzenia i są ze sobą dokładnie skorelowane w czasie. Tu, jak i w kolejnych pięciu prezentowanych próbach (rys. 6.15 ÷ 6.19) stosowano częstotliwość próbkowania 1000 Hz. Rysunek obejmuje 700 pomiarów sił (kroków pracy detektora), co odpowiada 0.7 s. Linie poziome oznaczają zerową wartość siły skrawania. Liniami pionowymi oznaczono krok, w którym sygnalizowane jest katastroficzne stępienie ostrza. Zaciemnione prostokąty pod osiami poziomymi oznaczają sygnalizowanie KSO, które trwa do chwili gdy średnia wartość siły skrawania powróci między dopuszczalne granice.



rys. 6.14. Działanie detektora ITM PW w czasie wyłamania ostrza [91, 125].

Oprócz ostatecznych wyników pracy detektora, na dolnej części rys. 6.14 przedstawiono analizę jego pracy dla siły F_p , czyli przebieg siły średniej F_{ps} oraz granic L^+ i L^- jak na rys. 6.12. W próbie przedstawionej na rys. 6.14 wystąpiło wyłamanie ostrza. Widoczne są charakterystyczne spadki wszystkich sił skrawania w pierwszym obrocie po KSO. Zostały one wykryte. Przed KSO siła posuwowa F_f była bardzo silnie zakłócona przez proces łamania wióra o powierzchnię przejściową. Jak widać nie zakłóciło to pracy detektora. W kolejnych obrotach następowało wykuszanie krawędzi skrawającej od strony pomocniczej powierzchni przyłożenia, objawiające się wzrostami siły odporowej F_p , wykrytymi przez detektor. Również zmiany siły skrawania F_c zostały rozpoznane jako KSO.

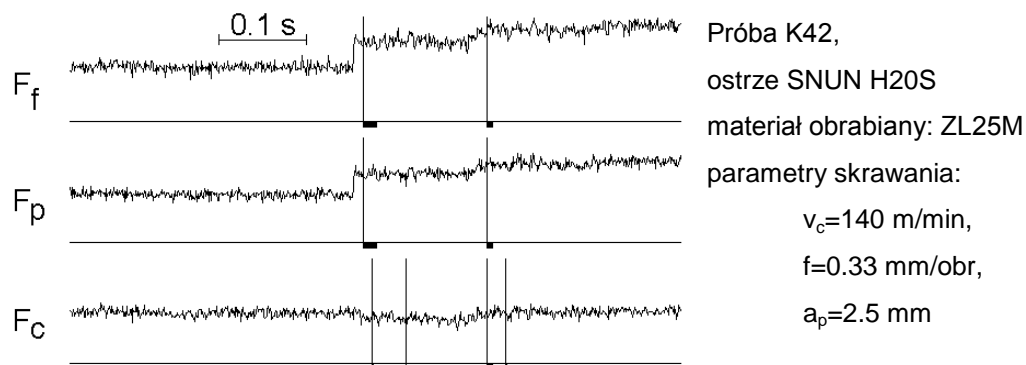
Na rysunku 6.15 przedstawiono wyniki próby E28, prowadzonej w tych samych co próba E24 warunkach skrawania. Tym razem wystąpiło wykuszanie ostrza. Ponieważ miało ono miejsce od strony głównej krawędzi skrawającej, wzrosła siła F_f , natomiast siła F_p nie uległa zmianie. Porównanie tego rysunku z poprzednim wskazuje, że nie można stwierdzić która z sił (F_f czy F_p) lepiej nadaje się do wykrywania KSO. Zależy to od rejonu jego wystąpienia. Ponadto stosując śledzenie tylko jednej z tych sił należy liczyć się z nie wykryciem niektórych KSO lub wykryciem późniejszym. Z drugiej strony zwraca uwagę skuteczność wykrywania, oparta na śledzeniu siły skrawania F_c , która w niewielkim stopniu zmienia się wraz ze zużyciem ostrza.



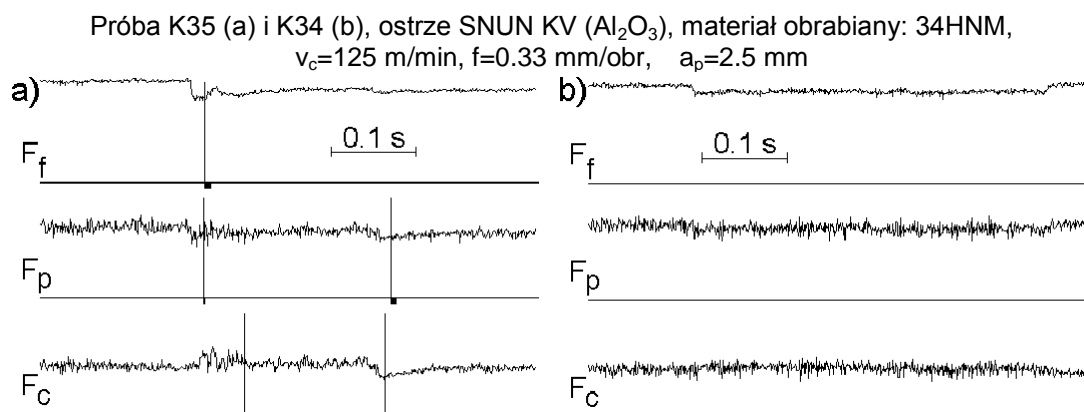
rys. 6.15. Działanie detektora ITM PW w czasie wykuszania ostrza.

Rysunek 6.16 ilustruje wyniki eksperymentu K42 przeprowadzonego w innych warunkach skrawania. Tu wystąpiło wyraźne wykuszanie krawędzi skrawającej dobrze widoczne (i wykrywane) na podstawie pomiaru wszystkich sił.

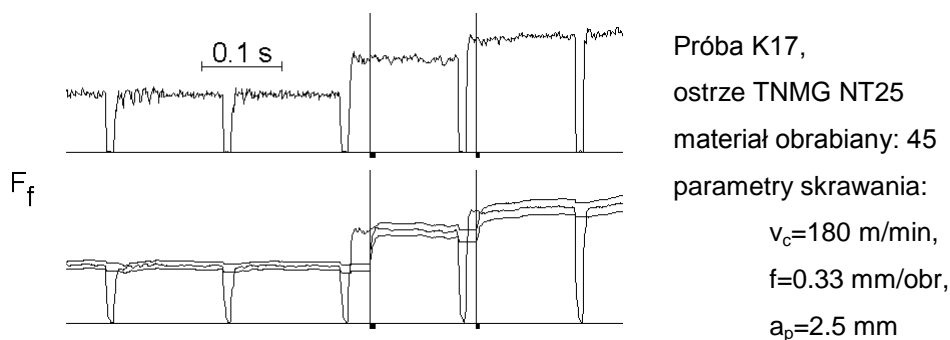
Odmienne od dotychczas przedstawianych był przebieg KSO, gdy używano płytek ceramicznych (Al_2O_3). Z krawędzi skrawającej tych płytek wyłamywały się niewielkie fragmenty. Spadek sił spowodowany tymi wyłamaniami był znacznie mniejszy niż przy płytkach z węglików spiekanych. W próbie K35 przedstawionym na rys. 6.17a wyłamanie to zostało wykryte, jednakże w podobnej próbie (K34 – rys. 6.17b) względny spadek i późniejszy wzrost siły F_f był tak niewielki, że nie został wykryty. W przebiegach sił F_p i F_c wyłamanie jest niemal niewidoczne. Przytoczony wynik jest ilustracją jednego z nielicznych niepowodzeń detektora.



rys. 6.16. Działanie detektora ITM PW w czasie wykruszenia ostrza.



rys. 6.17. Wykrywanie KSO przez detektor ITM PW przy obróbce narzędziami ceramicznymi; a) wyłamanie wykryte, b) wyłamanie nie wykryte.

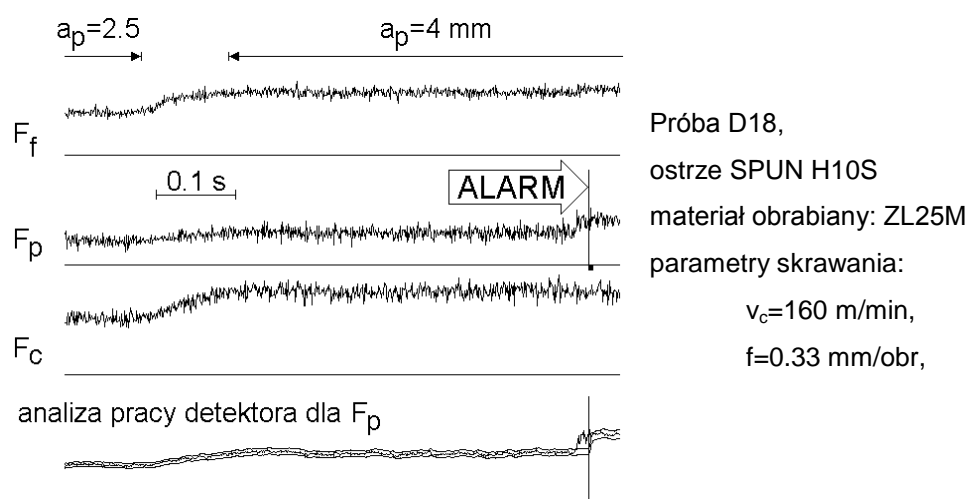


rys. 6.18. Wykrywanie KSO przez detektor ITM PW przy obróbce przerywanej.

Istotnym elementem strategii ITM PW jest uznanie, że nawet znaczna szybka zmiana wartości siły skrawania jest dopuszczalna, o ile trwa odpowiednio krótko. Umożliwia to zastosowanie detektora do obróbki przerywanej. Na rys. 6.18 przedstawiono wyniki próby, w której toczony był walec z wzdłużnym rowkiem, czemu towarzyszyły cykliczne spadki sił skrawania do zera. Odpowiednio dobrany czas opóźnienia reakcji detektora umożliwia „przeczekanie” tych spadków. Granice L^+ i L^- w czasie przechodzenia ostrza przez przerwę pozostają nie zmienione. Jeśli wystąpi KSO (najczęściej, choć nie zawsze, patrz

ok. rys. 3.34, 3.36) przy uderzeniu ostrza w materiał, siła skrawania stabilizuje się na innym poziomie, co jest wykrywane przez detektor.

Istotną właściwością omawianego detektora jest niewrażliwość na zmiany głębokości skrawania. Przeprowadzono szereg prób, w których głębokość zmieniała się skokowo z 2.5 do 4 mm, a więc bardzo znacznie. Błędne alarmy nie występowały. Na rysunku 6.19 przedstawiono wyniki jednej z nich, o tyle interesującej, że krótko po zmianie głębokości skrawania nastąpiło wykruszenie krawędzi skrawającej, wykryte w trakcie śledzenia siły F_p . Jak widać nawet skokowa zmiana głębokości skrawania powoduje na tyle wolne zmiany sił, że detektor je pomija.

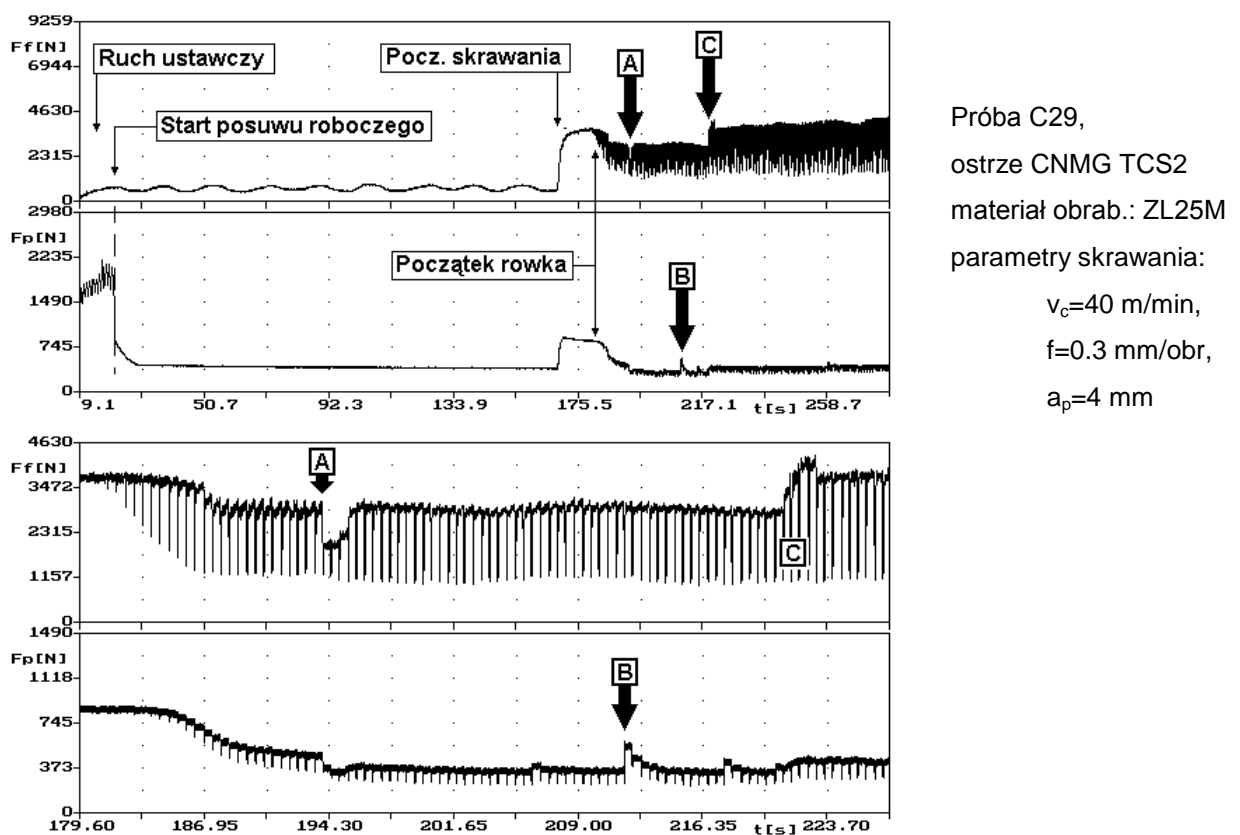


rys. 6.19. Przebieg pracy detektora ITM PW w czasie skokowej zmiany głębokości skrawania i następującego po niej KSO. Ostrze SPUN H10S, mat. obr. ZL25M.

Dotychczas prezentowane wyniki uzyskiwane były przy pomocy siłomierza Kistler 9263. Umożliwia on dokładne pomiary, niezbędne do poznania rzeczywistego przebiegu sił skrawania. Trudno jednakże spodziewać się, by w praktycznym zastosowaniu detektora można było liczyć na użycie tak wyrafinowanego sprzętu pomiarowego. Stąd bardzo ważne jest stwierdzenie, czy opracowany detektor będzie sprawnie funkcjonował w układzie wyposażonym w przemysłowy czujnik siły. Na kolejnych rysunkach przedstawiono wyniki uzyskane z tensometrycznego czujnika siły posuwowej firmy Sandvik zainstalowanego w oprawie łożyska śruby pociągowej [76, 92]. Sygnał siły był pobierany z wyjścia analogowego układu Tool Monitoring System zainstalowanego w autonomicznej stacji obróbkowej ASO T50. Stosowano przy tym częstotliwość próbkowania zaledwie 190.4 Hz, a więc w zasadzie za niską (zalecana wartość wynosi 1000 Hz). Bliżej metodykę badań opisano w punkcie 5.1.

Na rysunku 6.20 przedstawiono w dwóch skalach czasu przebiegi sygnałów F_f (z kierunku posuwowego) i F_p (z kierunku odporowego) otrzymanych w czasie próby C29. Przejście od szybkiego posuwu do posuwu roboczego nie odbiło się wyraźnie na przebiegu F_f . W próbie tej, dobieg narzędzia z posuwem roboczym był (celowo) wyjątkowo długi. Siła skrawania oczywiście nie występowała, a widoczna na rys. 6.19 sinusoidalna zmienność sygnału F_p pochodzi od samego łożyska pomiarowego. Sygnał z

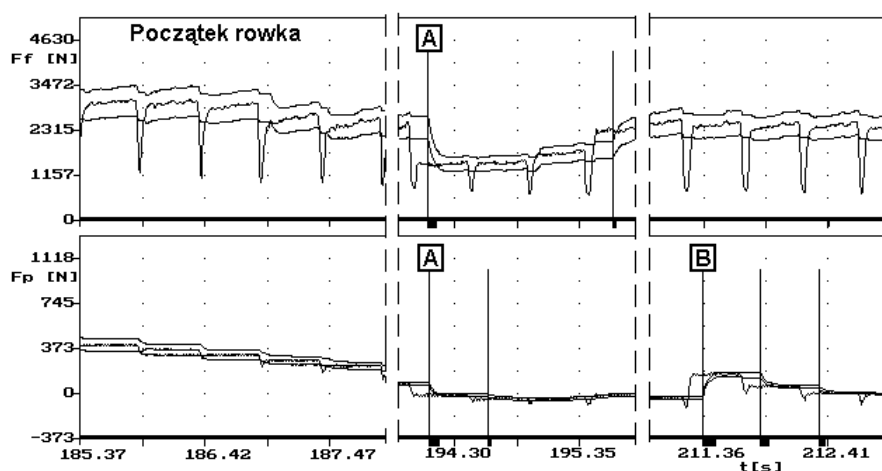
kierunku odporowego (F_p) bardzo znaczny w czasie szybkiego posuwu, gwałtownie spadł przy przejściu do posuwu roboczego. Warto przy tym zauważyć, że naprężenia w łańcuchu kinematycznym (głównie na prowadnicach) w tym kierunku nie uwolniły się do końca natychmiast, lecz dopiero po ok. 10 sekundach. Ponieważ posuw roboczy miał kierunek wzdłużny, sygnał F_p w czasie „skrawania powietrza” nie ulegał zmianom. W próbie tej skrawano wałek na początku gładki, potem z rowkiem wpustowym. Wstrząsy spowodowane obróbką przerywaną spowodowały wyraźny spadek sygnału F_f , mimo że siła posuwowa poza rowkiem oczywiście pozostała bez zmiany. Sygnał F_p spadł jeszcze bardziej, do poziomu sprzed początku obróbki. Zjawisko to szczególnie dobrze widoczne na dolnej części rys. 6.20 (w mniej ściśniętej skali czasu), świadczy o znacznym udziale naprężeń na prowadnicach w sygnale z czujników sprzed rowka, a także o ich niestabilności. Zagadnienia te omówiono bliżej w punkcie 5.1.



rys. 6.20. Przebieg sygnałów z łożysk pomiarowych w czasie próby C29.

Po około 194 sekundach trwania próby (chwila oznaczona strzałką i literą A) nastąpiło wyłamanie krawędzi skrawającej, dobrze widoczne w obu sygnałach, szczególnie dla kierunku posuwowego (F_f). Kilkanaście sekund później (chwila B) pojawiło się wykruszenie ostrza od strony pomocniczej krawędzi skrawającej objawiające się wyłącznie w przebiegu sygnału F_p . Jeszcze później (chwila C), wyraźne wykruszenie głównej krawędzi skrawającej spowodowało stosunkowo znaczny wzrost F_f w kolejnych obrotach przedmiotu obrabianego, jednakże nawet po tym przyroście F_f tylko nieznacznie przekroczyła wartość sprzed rowka i to na krótko. Przy okazji warto zatem podkreślić, że strategię oparte na stałych granicach (rys. 6.3) byłyby tu oczywiście skazane na porażkę.

Na rys. 6.21 przedstawiono analizę działania detektora KSO w próbie C29 w tej samej konwencji co na dolnej części rys. 6.12, 6.14, 6.18 i 6.19 a więc jako przebiegi sygnałów uśrednionych F_{fs} i F_{ps} oraz granic górnych i dolnych. Pionowe linie oznaczają wykrycie, zaś czarne prostokąty pod osią czasu – czas trwania alarmu KSO. Pierwszy fragment przebiegu odnosi się do początku rowka. Jak widać, wyraźne opadanie wartości sygnału po każdorazowym przejściu narzędzia przez rowek jest ignorowane przez detektor jako mieszczące się w granicach tolerancji (patrz też rys. 6.20). Wyłamanie ostrza w chwili A jest łatwo rozpoznawane przez detektor w obu kanałach. Na szczególną uwagę zasługują przebiegi sygnału F_p . Mimo iż jest on zbliżony do zera, detektor wykrył w nim KSO zarówno w chwili A kiedy to wyłamanie ostrza wyraźnie odbiło się także na przebiegu siły posuwowej, jak i w chwili B, w której siła posuwowa nie uległa istotnym zmianom, a więc mogło być wykryte tylko w przebiegu F_p .



rys. 6.21. Analiza pracy detektora KSO w próbie C29.

Przy ocenie skuteczności wykrywania katastroficznego stopienia ostrza należy analizować zarówno wykrywalność zaistniałych KSO jak i występowanie fałszywych alarmów. Biorąc pod uwagę doświadczenia we wdrażaniu układów monitorowania stanu narzędzia, można ogólnie powiedzieć, iż bardziej niekorzystne jest zbyt częste występowanie fałszywych alarmów niż nie wykrywanie mniejszych KSO. W omawianej strategii zależy to od czułości detektora (wzór 6.8). Dla sygnałów zarejestrowanych w czasie prób prowadzonych w warunkach sprzyjających KSO w na ASO T50, wyniki badania skuteczności strategii ITM zestawiono w tabelicy 6.1. Obejmują one 43 próby, z których KSO wystąpiło w 11-tu, często wielokrotnie.

Tablica 6.1. Wyniki badania skuteczności detektora KSO ITM PW w oparciu o sygnały otrzymane z TMS.

Czułość detektora	1	2	3
Liczba fałszywych alarmów	0	0	2
Liczba braków wykrycia KSO	1	1	0

6. 3. Nadzór procesu skrawania

Nadzór nad procesem skrawania polega na wykrywaniu nadmiernych drgań, kolizji, niekorzystnych postaci wiórów i inne nieprawidłowości.

6. 3. 1. Wykrywanie i przeciwdziałanie nadmiernym drganiom

Prace badawcze zmierzające do budowy układów wykrywania i przeciwdziałania nadmiernym drganiom są na ogół nakierowane na drgania samowzbudne. Stosowane przy tym układy i metody pomiarowe mogą być także wykorzystane do wykrywania drgań innych rodzajów. Rozwijające się drgania samowzbudne powodują drgania zespołów układu OUPN, wzrost zmiennych składowych sił i momentów skrawania, wzrost poziomu emitowanego hałasu oraz odwzorowują się na obrabianej powierzchni w postaci charakterystycznych śladów. Wszystkie te wielkości mogą być wykorzystywane do wykrywania drgań samowzbudnych.

Jednym z podstawowych problemów związanych z wykrywaniem drgań samowzbudnych jest ich dostatecznie szybkie odróżnienie od innych rodzajów drgań występujących podczas obróbki, głównie drgań wymuszonych. Np. w [211] miarą intensywności drgań jest uśredniona podwójna amplituda drgań tzw. zakres drgań. Ze zmierzonych tysiąca wartości wyznaczano rozkład procentowy. Jako wartości określające dolną i górną granicę zakresu przyjęto środki skrajnych przedziałów, w których znalazło się po 1% zmierzonych wartości. Przekroczenie tak wyznaczonego zakresu drgań jest interpretowane jako pojawienie się drgań samowzbudnych.

Podwójną, maksymalną amplitudę przyspieszeń drgań mierzonych w kolejnych obrotach przedmiotu na wrzecienniku, suporcie i koniku tokarki TKX50N stosowano w badaniach przedstawionych w pracy [213]. Miarę wartości maksymalnych w kolejnych obrotach przyjęto ze względu na charakterystyczne chwilowe wzrosty i spadki amplitudy drgań spowodowane przez zjawiska kolizji i regeneracji drgań samowzbudnych [121]. Stwierdzono, że do wykrywania drgań samowzbudnych bardziej czułą od bezwzględnej wartości maksymalnych amplitud jest miara względna, liczona jako stosunek aktualnej chwilowej podwójnej amplitudy do średniej z pięciu pierwszych wartości zmierzonych w czasie obróbki stabilnej.

W układzie diagnostycznym [203] zastosowanym w autonomicznej stacji obróbkowej FZ DFS 2/2-CNC do wykrywania drgań samowzbudnych wykorzystano sygnał mierzony tensometrycznym czujnikiem naprężeń. W układzie mikroprocesorowym liczony jest stosunek składowej dynamicznej do statycznej tego sygnału. Po przekroczeniu wprowadzonej wartości dopuszczalnej układ sygnalizuje wykrycie drgań samowzbudnych.

Ze względu na inny sposób reakcji układu na drgania wymuszone i samowzbudne stosowane są procedury umożliwiające odróżnienie tych drgań w widmie. Może to być zrealizowane dwiema metodami. W pierwszej realizowane jest wąskopasmowe filtrowanie sygnału pozwalające wyodrębnić z widma drgania składowe o częstotliwości zbliżonej do spodziewanej częstotliwości drgań wymuszonych wyznaczonej

teoretycznie lub doświadczalnie. Częstotliwość ta jest wprowadzana do układu filtrującego, rozdzielającego widmo drgań na składowe będące wynikiem drgań wymuszonych i pozostałe składowe interpretowane jako drgania samowzbudne. Metoda ta może być realizowana w układach analogowych lub cyfrowych.

W rozwiązaniu przedstawionym w [152, 240] zastosowano układ z cyfrowym analizatorem widmowym pracującym w czasie rzeczywistym Służy on do ciągłego wyznaczania chwilowego widma amplitudowego sygnału. Widmo to jest następnie korygowane w celu uwzględnienia właściwości dynamicznych czujnika pomiarowego. Skorygowane widmo jest podawane do bramki sterowanej przez przewidywaną częstotliwość drgań wymuszonych, która z kolejno podawanych składowych widma wykrywa składowe o częstotliwości drgań wymuszonych. Pozostałe składowe widma traktowane są jako miara drgań samowzbudnych. Części widma interpretowane jako drgania wymuszone i samowzbudne są podawane do oddzielnych bloków porównywania z wprowadzonymi wartościami progowymi. Układ taki zastosowano w układzie sterowania ACC frezarki pionowej zbudowanym w WZL TH Aachen [241, 244]. Mierzył on moment skrawania przy pomocy układu tensometrów naklejonych na wrzecionie. Zmienna składowa momentu była podawana do układu wykrywania drgań wymuszonych i samowzbudnych. Do przeciwdziałania drganiom samowzbudnym wykorzystano tu zależność granicznej głębokości skrawania od prędkości obrotowej wrzeciona tzw. krzywą workową. Po włączeniu procedury przeciwdziałania układ oblicza na podstawie przybliżonych zależności najbliższą prędkość obrotową zakresu stabilnego będącą funkcją częstotliwości drgań samowzbudnych i inicjuje odpowiednią zmianę prędkości obrotowej [240, 241].

Druga metoda wykrywania drgań samowzbudnych w widmie polega na ciągłym porównywaniu chwilowych widm drgań wyznaczanych podczas obróbki z widmem obróbki uznanej jako stabilna. Wykorzystuje się tu charakterystyczną cechę drgań samowzbudnych wyróżniającą je od drgań wymuszonych, która polega na szybkim wzroście amplitudy drgań samowzbudnych o w przybliżeniu stałej częstotliwości po przekroczeniu granicy stabilności. Metoda ta została zastosowana w układzie zbudowanym w Uniwersytecie w Tokio [197]. Mierzone tu są przyspieszenia drgań tulei konika. Sygnał jest próbkowany w przetworniku analogowo-cyfrowym z częstotliwością 2000 Hz i przesyłany do mikrokomputera, gdzie wyznaczana jest miara m , porównywana z zadaną wartością progową. Przeciwdziałanie drganiom samowzbudnym osiągnano na drodze zmniejszania głębokości skrawania.

W pracy [49] opisano wykorzystanie do wykrywania drgań samowzbudnych przy toczeniu sygnału przyspieszeń drgań tulei konika. Sygnał po odpowiednim przygotowaniu poddawany jest cyfrowej analizie częstotliwościowej. Wykrycie drgań samowzbudnych jest sygnalizowane w sytuacji, gdy widmo mocy z postaci szumowej zmienia się w widmo z wyraźną dominantą w jednej częstotliwości. Podobną metodę przedstawiono w pracy [252].

6. 3. 2. Wykrywanie kolizji

Jak stwierdzono we wstępie (rozdział 1) błędy w programie obróbki i ustawieniu obrabiarki stanowią w sumie ok. 34% przyczyn kolizji. Dalsze 18% kolizji jest spowodowane przez nieprawidłowe narzędzie lub

dane narzędziowe. Kolizje pierwszej z tych grup można wyeliminować, a drugiej ograniczyć poprzez symulację na specjalnych stanowiskach lub bezpośrednio przy obrabiarce przebiegu toru narzędzia względem przedmiotu i zespołów obrabiarki.

Do tego celu stosuje się systemy CAD wyznaczające tor narzędzia w przestrzeni roboczej obrabiarki. Do systemu wprowadza się dane opisujące przestrzeń roboczą obrabiarki z uwzględnieniem uchwytu, przyrządów obróbkowych, narzędzia pracującego i oczekującego na wymianę oraz sprawdzany program obróbki. System sprawdza, czy podczas realizacji kolejnych bloków programu, łącznie z wymianą narzędzia i przedmiotu nie wystąpi kolizja [255, 243].

W wielu nowoczesnych układach sterowania komputerowego CNC możliwa jest symulacja toru narzędzia bezpośrednio przy obrabiarce. Kolizje mogą być wykrywane wizualnie przez operatora lub automatycznie przez układ na podstawie detekcji nieprzewidzianych punktów przecięcia torów narzędzia z konturami przestrzeni roboczej. Możliwe jest wykorzystanie czujników i układów pomiarowych, w które wyposażona jest obrabiarka do wyznaczenia i wprowadzenia do układu rzeczywistych wymiarów narzędzia i przygotówki [173].

Ze względu na brak możliwości eliminacji kolizji uzasadnione jest wyposażenie obrabiarki w dodatkowe układy zabezpieczające przed ich skutkami. Ich działanie sprowadza się do wykrywania nadmiernych wartości sił skrawania lub wielkości z nimi związanych. Najczęściej jest to jedna z opcji układu diagnostyki stanu narzędzia bazująca na tej samej wielkości mierzonej.

Układ WIDATRONIC CCS do wykrywania kolizji [247] działa w oparciu o ocenę sygnału z czujnika odkształceń (patrz punkt 4.1.2, rys. 4.5). Strategia działania przyrządu jest prosta – sygnalizacja wykrycia kolizji następuje po przekroczeniu stałej maksymalnej wartości granicznej wprowadzanej z nastawnika dziesiątego. Wykrycie kolizji powoduje zatrzymanie posuwu sygnałem przesyłanym bezpośrednio do sterownika silnika posuwowego z pominięciem układu sterowania. Czas zatrzymania wynosi ok. 3 ms. Jednocześnie kolizja jest sygnalizowana wizualnie i dźwiękowo. Kontynuacja programu jest możliwa po skasowaniu sygnału kolizji. Cena układu jest tak niska, że według zapewnień producenta uniknięcie jednej kolizji całkowicie go amortyzuje.

Podobne strategie oparte o wykrywanie przekroczenia granicznych wartości mierzonych sygnałów mają także inne układy zabezpieczające przed skutkami kolizji [42, 191, 203, 221]. Jako sygnały diagnostyczne wykorzystuje się przy tym różnorodne sygnały bezpośrednio lub pośrednio związane z siłami skrawania.

Bardziej złożoną strategię działania układu opartego na pomiarze poboru mocy silnika głównego przedstawiono w pracy [202]. Układ o nazwie MOP zapamiętuje zróżnicowany przebieg mocy w czasie obróbki całego przedmiotu i sygnalizuje wykrycie kolizji przy przekroczeniu tego przebiegu o określonej wartości.

6. 3. 3. Inne zadania układów DNiPS

Prawidłowe łamanie wiórów jest osiągane przez odpowiedni dobór geometrii ostrza (zwijacze wiórów) i parametrów skrawania. Niemniej jednak trudno jest wykluczyć powstawanie wiórów długich. Niestety układy nadzoru postaci wiórów są nieliczne i mają charakter laboratoryjno-doświadczalny.

Podawanie chłodziwa może być diagnozowane od strony obrabiarki poprzez nadzór nad działaniem odpowiedniego układu oraz od strony procesu poprzez nadzór nad wielkościami charakteryzującymi proces. W obrabiarce rozmieszczone mogą być czujniki poziomu chłodziwa w zbiorniku, czujniki ciśnienia sygnalizujące np. stopień zanieczyszczenia filtrów, czujniki temperatury czy poboru mocy silnika pompki chłodziwa. Przekroczenie dopuszczalnej wartości przez któryś z tych sygnałów powoduje wyświetlenie odpowiedniej informacji alarmowej oraz inną przewidzianą reakcję układu. Z drugiej strony niedostateczna ilość chłodziwa w strefie obróbki powoduje wzrost temperatury i oporów skrawania. Nadzór nad tymi wielkościami może być wykorzystany do diagnozowania poprawności podawania chłodziwa.

Omówione w punkcie 6.2.1 stałe granice określone w funkcji czasu skrawania, stosowane do wykrywania KSO, bywają chętnie wykorzystywane także do wykrywania innych zakłóceń procesu skrawania, jak za krótki lub za długi przedmiot, brak przedmiotu lub narzędzia, niewłaściwe narzędzie itp. Na rys. 6.22 przedstawiono granice przez które musi przejść w określonym kierunku monitorowany sygnał – pierwszą z nich od dołu („wzrost przez”, drugą od góry („spadek przez”). Jeśli po upływie czasu aktywności granicy takie przejście nie wystąpi, wykrywana jest nieprawidłowość procesu.



rys. 6.22. Wykrywanie nieprawidłowości procesu obróbki przy pomocy granic typu „wzrost przez” i „spadek przez” wg [14].

7. METODY SZTUCZNEJ INTELIGENCJI W DNIPS

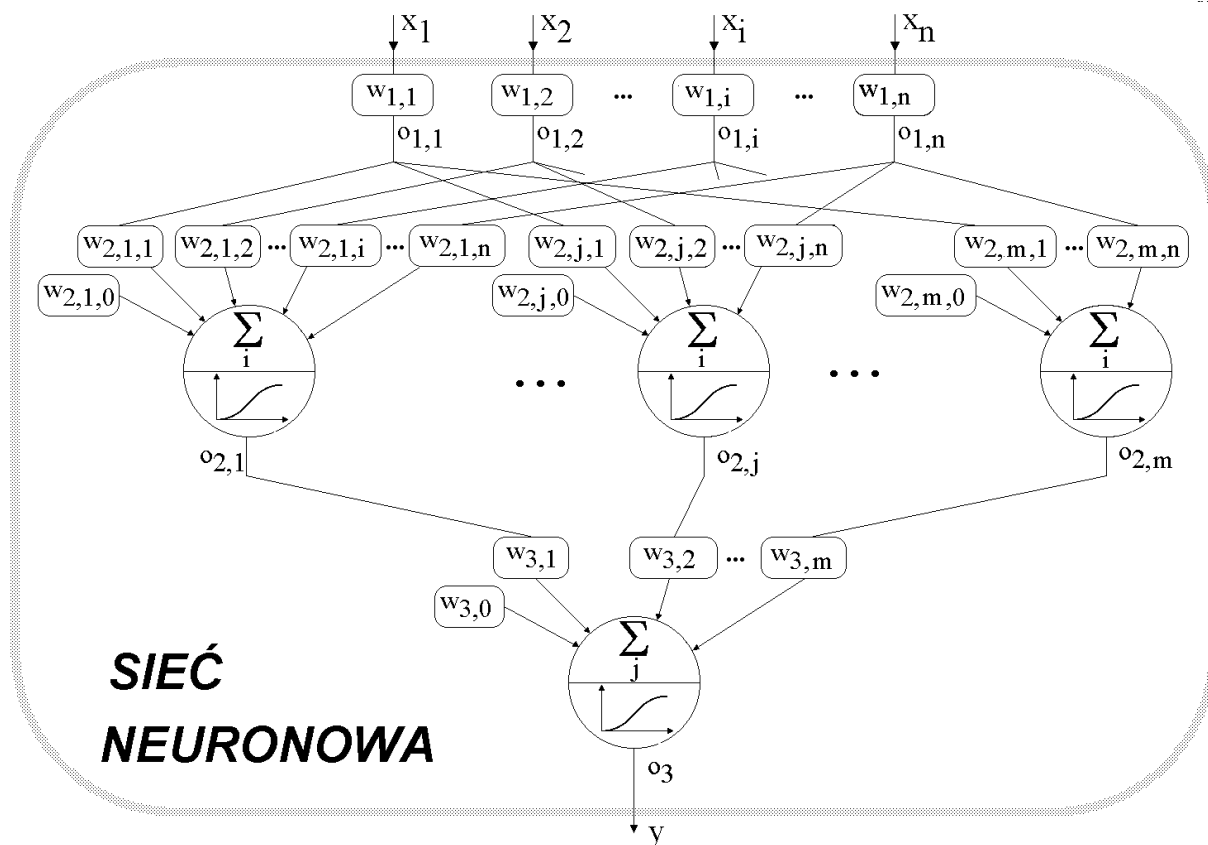
Wszystkie opisane w rozdziale trzecim zjawiska związane są nie tylko z wartością zużycia ostrza (czy inną monitorowaną wielkością) ale także z wieloma innymi cechami jak np. postać zużycia, geometria ostrza, warunki skrawania, materiał ostrza i przedmiotu obrabianego. Ponadto związek pomiędzy zużyciem naturalnym a miarą mierzonego sygnału jest bardzo złożony i posiada charakter raczej statystyczny niż zdeterminowany. Czasami sygnał z czujnika niedokładnie odzwierciedla mierzoną wielkość z uwagi na wpływ zakłóceń, co opisano w rozdziale piątym. Wartości parametrów wykorzystywanych w modelach procesu cechuje pewien poziom niepewności, np. właściwości materiału mogą wahać się w pewnych granicach. Dlatego też dość powszechnie uważa się, że przyszłość układów monitorujących należy do układów opartych na więcej niż jednej tylko mierze sygnału z zastosowanego czujnika, np. [25, 41, 144, 162, 210]. Tymczasem, jak nietrudno zauważyć, wszystkie omówione w poprzednim rozdziale strategie wykorzystują właśnie jedną miarę sygnału, traktowaną jako symptom zużycia. Zastosowanie wielu czujników lub szeregu miar sygnału pochodzącego z jednego czujnika stwarza nowy problem jakim jest redukcja dużej ilości informacji, do kilku najlepszych, wiarygodnych symptomów, które mogą być wykorzystane w układzie monitorowania. Uzyskana informacja z jednego lub kilku czujników musi być przetworzona w celu wyznaczenia wspólnego symptomu opisującego stan narzędzia. Można to osiągnąć wieloma sposobami jak: metody statystyczne, modelowanie metodą autoregresji, metody rozpoznawania obrazów i inne [25, 212]. Metodami tymi trudno jest jednak uwzględnić złożoność i zróżnicowanie procesów obróbki skrawaniem. Brak dokładnych modeli pozwalających na przewidywanie zużycia ostrza skłoniła badaczy do poszukiwania innych metod integracji miar sygnałów [41, 162, 208]. Współcześnie uważa się, że najlepszym rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie metod sztucznej inteligencji, jak zbiory rozmyte, algorytmy genetyczne, a zwłaszcza sieci neuronowe.

Literatura dotycząca zastosowań metod sztucznej inteligencji w diagnostyce stanu narzędzia i procesu skrawania jest bardzo obszerna, a szereg pozycji można znaleźć w wykazie literatury zamieszczonym na końcu tej książki. Przegląd tej literatury wykracza jednak poza zakres monografii. Tu przedstawione zostaną jedynie doświadczenia autora w tym zakresie [19, 90, 93, 107, 123, 122, 124, 126].

7. 1. Budowa i działanie sztucznych sieci neuronowych

Istnieje wiele świetnych pozycji opisujących działania sieci neuronowych (np. [150, 184, 214]). Znaleźć w nich można bardziej lub mniej kompletne opisy różnych rodzajów neuronów (od prostego perceptronu McCullocha-Pittsa, przez neuron typu sinusoidalnego do wielu innych jak ADALINE, INSTAR i OUTSTAR Grossberga, neuron typu *winner takes all*, neuron Hebb'a) oraz sieci na nich opartych. Z drugiej strony, w diagnostyce stanu narzędzia najczęściej stosowanym typem sieci jest sieć typu perceptron wielowarstwowy (najczęściej dwuwarstwowy, z jedną warstwą ukrytą), uczona metodą wstecznej propagacji

błędów, oparta na neuronach z sigmoidalną funkcją aktywacji [41]. Jej strukturę przedstawiono na rysunku 7.1. Zawiera ona n wejść, i tyleż komórek w pierwszej warstwie. Neurony w tej warstwie są jedynie buforami przekazującymi przeskalowane (wagi $w_{1,i}$) wartości wejść do neuronów w warstwie pośredniej zawierającej m komórek.



rys. 7.1. Struktura trzywarstwowej sztucznej sieci neuronowej.

Wyjście i -tego neuronu pierwszej warstwy jest zatem opisane zależnością:

$$o_{1,i} = X_i w_{1,i} \quad (7.1)$$

Wyjścia te są z kolei mnożone i sumowane w neuronach drugiej warstwy:

$$s_{2,j} = \sum_{i=0}^n (w_{2,j,i} o_{1,i}) \quad (7.2)$$

gdzie $o_{1,0} \equiv 1$ - bias.

po czym wyznaczane są wartości wyjść z tych neuronów w oparciu o sumę (2) i funkcję aktywacji (tu sigmoidalną):

$$o_{2,j}(s_{2,j}) = \frac{1}{1 + e^{-s_{2,j}}} \quad (7.3)$$

Sieć może mieć kilka wyjść (kilka komórek w warstwie wyjściowej), tu jednakże przyjęto jedno wyjście, któremu będzie odpowiadało zużycie ostrza. Jest ono wyznaczane analogicznie jak wyjście z neuronu drugiej warstwy:

$$s_3 = \sum_{j=0}^m (w_{3,j} o_{2,j}) \quad o_3(s_3) = \frac{1}{1 + e^{-s_3}} \quad (7.4)$$

Trenowanie sieci oparte jest na algorytmie wstecznej propagacji (back propagation) wykorzystującym uogólnioną regułę spadku Rumelharta z uaktualnianiem wartości wag po prezentacji wszystkich wektorów trenujących czyli co iterację (Generalised Delta Rule - Cumulative Weight Adjustment). Do tego treningu niezbędny jest zbiór danych uczących, z których każdy składa się z wartości $x_1 \dots x_n$ wejściowych i zadanej wartości wyjścia z sieci z . Tak więc zbiór uczący ma postać tablicy:

$$\begin{array}{cccc} x_{11}, & x_{21}, & \dots & x_{n1}, & z_1 \\ x_{12}, & x_{22}, & \dots & x_{n2}, & z_2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ x_{1k}, & x_{2k}, & \dots & x_{nk}, & z_k \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ x_{1N}, & x_{2N}, & \dots & x_{nN}, & z_N \end{array} \quad (7.5)$$

Dane wejściowe są prezentowane sieci wiersz po wierszu, a zadana wartość wyjścia z_k porównywana z aktualną o_{3k} . Algorytm minimalizuje sumę kwadratów błędów sieci:

$$E = \sum_1^N (z_k - o_{3k})^2 \quad (7.6)$$

Po przedstawieniu sieci całego zbioru (po iteracji) wyznaczane są nowe wartości wag z neuronu wyjściowego dla następnego ($l+1$) iteracji:

$$(w_{3,j})_{l+1} = (w_{3,j})_l + \frac{\eta_1}{N} \sum_{k=1}^N (\delta_{3k} o_{2,j,k})_k + \eta_2 \Delta(w_{3,j})_{l-1} \quad (7.7)$$

gdzie $\delta_{3k} = o_{3k}(1 - o_{3k})(z_k - o_{3k})$ (7.8)

N, k - liczba danych wejściowych i aktualny numer wiersza

z_k - zadana wartość wyjścia dla k-tego zestawu danych

o_{3k} - rzeczywista wartość wyjścia dla k-tego zestawu danych

l - liczba wykonanych iteracji

$\Delta(w_{3,j})_{l-1}$ - zmiana wagi $w_{3,j}$ w poprzedniej iteracji

η_1, η_2 - współczynnik uczenia i momentum

Z kolei wyznaczane są nowe wartości wag i warstwie ukrytej:

$$(w_{2,j,i})_{l+1} = (w_{2,j,i})_l + \frac{\eta_1}{N} \sum_{k=1}^N (\delta_{2,j} o_{1,i})_k + \eta_2 \Delta(w_{2,j,i})_{l-1} \quad (7.9)$$

gdzie $\delta_{2,j} = o_{2,j}(1 - o_{2,j})\delta_3 w_{3,j}$ (7.10)

Wagi w pierwszej warstwie nie są aktualizowane.

W większości opracowań oba współczynniki η_1 i η_2 są traktowane niezależnie ($\eta_1 = 0 \div 1$ i $\eta_2 = 0 \div 1$). Jednakże zmiana wagi występująca w równaniu (7.7) czy (7.9) jest opisana klasycznym równaniem prostego filtra dolnoprzepustowego (patrz np. równanie 6.9):

$$y_l = ax_l + by_{l-1}, \quad a + b = 1$$

GDZIE X – SYGNAŁ WEJŚCIOWY

y – sygnał wyjściowy

Warunek $a+b=1$ jest oczywistym warunkiem stabilności filtra. W przypadku uczenia neuronu traktowanie obu stałych niezależnie (jak w równaniach 7.7 i 7.9) nie musi prowadzić do niestabilności. Przyjęcie wartości $\eta_1 + \eta_2 > 1$ oznacza (przy tym samym znaku gradientu w kolejnych krokach) zmiany wag większe niż wynikające z wartości gradientu, a zatem forsowniesze uczenie neuronu.

Zauważmy ponadto, że celem stosowania momentum jest nie tylko umożliwienie “przeskakiwania” minimów lokalnych, lecz także stłumienie zbyt dużych zmian wag wynikających ze znacznych różnic między poszczególnymi zestawami uczącymi.

7. 2. Zastosowanie sieci neuronowych do oceny zużycia ostrza

W kolejnych podpunktach przedstawionych zostanie szereg problemów związanych z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych do diagnostyki stanu narzędzia. Odpowiednie badania były prowadzone przez autora przez szereg lat stąd wykorzystywano w nich kolejno szereg różnych prób trwałości ostrza. Program komputerowy symulujący działanie sztucznej sieci neuronowej również został wykonany przez autora.

7. 2. 1. Wpływ inicjalizacji sieci na przebieg jej uczenia

Pierwsze badania prowadzono z wykorzystaniem siłomierza laboratoryjnego i czujnika emisji akustycznej umieszczonego na górnej powierzchni siłomierza (rys. 3.11). Ich wyniki opisano w rozdziale trzecim (tablica 3.1÷3.4, rys. 3.11÷3.16, 3.24÷3.25, [126]).

W celu zastosowania sieci neuronowej do wyników tych badań sporządzone zostały dwa pliki zawierające dane, odpowiadające próbom S07 i S08. Przypomnijmy, że każda z tych prób przeprowadzona była niezależnie z tymi samymi parametrami skrawania. Pliki z danymi zawierają wyniki pomiarów sześciu miar AE i sił skrawania, które okazały się najlepiej skorelowane ze zużyciem ostrza ($AE_{RMS, sr}$, I_1 , F_f , S_f , F_p , S_p), zakodowane wartości posuwu i prędkości skrawania jako wejścia do sieci oraz wartości wskaźnika zużycia KT pełniące rolę wyjścia z sieci. Postanowiono do uczenia sieci wykorzystać próbę S07, w której uzyskano większe wartości wskaźnika zużycia KT , zaś testowanie sieci prowadzić w oparciu o dane z próby S08.

Badana sieć miała zatem osiem wejść i jedno wyjście o charakterze ciągłym. Arbitralnie przyjęto szesnaście komórek w warstwie ukrytej zakładając, że ich liczba będzie mogła zostać zmniejszona po wytrenowaniu sieci (pruning komórek). Ocena stanu nauczonej sieci prowadzona była na podstawie następujących wskaźników:

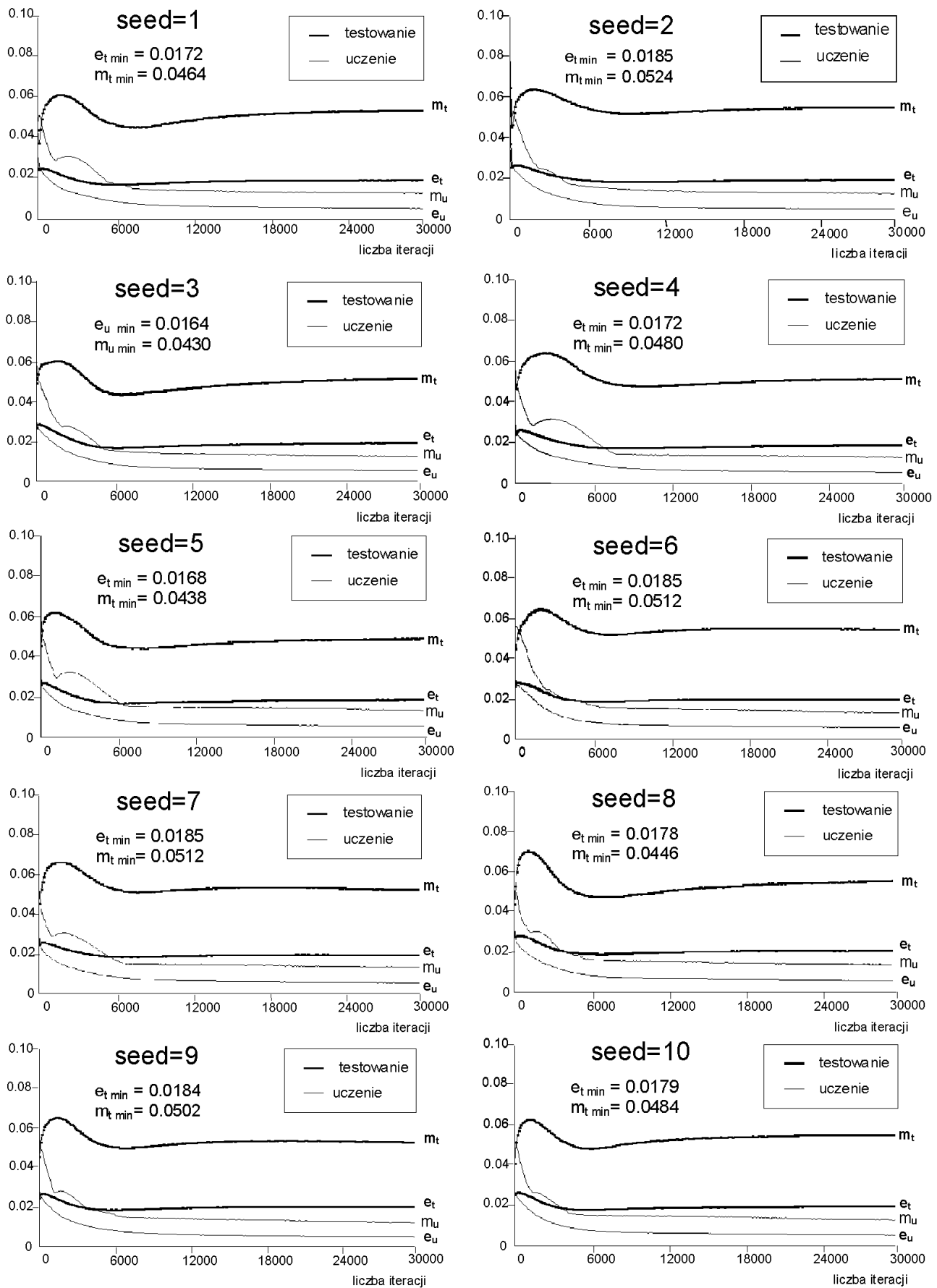
- błędu średniego (*ErrCum* - średni kwadrat błędu łącznego) uczenia (e_u) i testowania (e_t)
- błędu maksymalnego (*max_err*) uczenia (m_u) i testowania (m_t)
- iloczynu błędów będącego stosunkiem liczby błędnych odpowiedzi do liczby wszystkich wektorów; za błędną uznawano odpowiedź sieci różniącą się o ponad 20% od wartości zadanej.

Wartości wag są inicjalizowane losowo w zakresie ± 1 . Stąd i przebieg uczenia sieci musi być w jakiejś mierze losowy. W celu oszacowania tej losowości przebadano wpływ liczby inicjującej losowanie (*seed*) na przebieg i wyniki uczenia sieci. We wszystkich eksperymentach obserwowano jednocześnie błędy uczenia i testowania sieci. Rysunek 7.2 przedstawia przebiegi błędów średnich i maksymalnych dla dziesięciu prób, uszeregowane w miarę rosnącego *seed*. Zgodnie z oczekiwaniami, przebiegi uczenia różnią się znacznie. Jedynie średni błąd uczenia z oczywistych względów zawsze monotonicznie maleje. W wielu próbach (choć nie we wszystkich) występuje okresowe pogorszenie (zwiększenie) wartości maksymalnych błędów uczenia i średniego błędu testowania. Oba błędy uczenia w końcu jednak maleją. We wszystkich próbach występuje lokalne maksimum maksymalnego błędu testowania. Bardzo charakterystyczne jest także występowanie minimum obu błędów testowania, po którym ich wartości systematycznie rosną. Minima tych błędów podano nad wykresami. Najlepszy wynik osiągnięto dla *seed*=3, ale wszak nie można powiedzieć, że nie jest możliwy wynik lepszy, który nie został znaleziony.

W tabelicy 7.1 zestawiono zmienności wartości wyjść z komórek w warstwie ukrytej dla sieci uczonej od *seed* = 3, wyznaczone jako różnice między największymi a najmniejszymi wartościami otrzymanymi dla całego zbioru uczącego. Niska zmienność oznacza, że wyjście z danej komórki jest słabo zależne od wartości wejściowych, a zatem komórkę taką można uznać za zbędną i usunąć przenosząc średnią wartość jej wyjścia do *bias* komórki w niższej warstwie. Proces taki nazywa się „pruningiem” komórek. Jak widać, w tym przypadku jedynie komórka 12-ta w drugiej warstwie mogłaby być usunięta. Pozostałe wydają się być niezbędne.

Tablica 7.1. Zmienność komórek w warstwie ukrytej dla sieci uczonej od *seed*=3, przy minimum błędów.

o2,1	o2,2	o2,3	o2,4	o2,5	o2,6	o2,7	o2,8
0.3608	0.5777	0.4636	0.4225	0.2874	0.5264	0.3927	0.3904
o2,9	o2,10	o2,11	o2,12	o2,13	o2,14	o2,15	o2,16
0.4714	0.2836	0.4979	0.1578	0.3357	0.4287	0.4328	0.2446

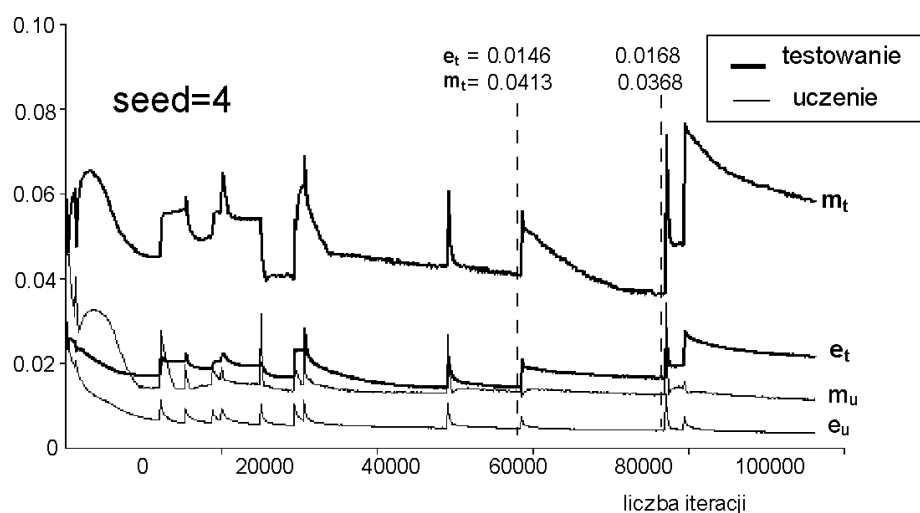


rys. 7.2. Przebiegi uczenia sieci dla różnych wartości *seed* (liczby inicjującej losowanie wag).

Z przedstawionego eksperymentu wynika, że jakość uczenia sieci zależy od przypadkowo dobranych wartości inicjujących uczenie, a po przekroczeniu minimum błędy testowania rosną niezależnie od malejących błędów uczenia – sieć jest „przeuczona” i dalszy jej trening nie ma sensu .

7. 2. 2. Uczenie z zakłóceniami

Opisany w punkcie 7.1 najprostszy algorytm uczenia sieci należy w świetle wyników przedstawionych w poprzednim punkcie uznać za niewydajny. Do dalszych badań postanowiono stosować przypadkowo wybraną wartość $seed=4$. Przedstawione wyżej wnioski w sposób naturalny nasuwają modyfikację algorytmu uczenia: jeśli wartość błędu średniego dla zbioru testującego przestaje maleć, należy zakłócić sieć. Należy jedynie rozstrzygnąć po jakim czasie (po ilu iteracjach) w trakcie których błąd rośnie wprowadza się zakłócenie sieci, oraz jak wielkie ma być to zakłócenie. Na podstawie szeregu prób przyjęto, że jeśli w ciągu tysiąca iteracji sieć nie poprawia swojego wyniku, do wartości wag dodawane są losowo wartości z zakresu ± 1 . Oznacza to w pewnym sensie rozpoczęcie treningu od nowa. Oczywiście wszystkie ciekawe stany poprzednie sieci są zapamiętywane i można do nich wrócić. Na rysunku 7.3 przedstawiono przebieg uczenia sieci według takiego algorytmu. Zgodnie z oczekiwaniami, po kolejnych zakłóceniach błędy testowania osiągały różne minima, z których dwa zaznaczono na rysunku. Jak widać są one niższe niż uzyskane w najlepszym przypadku bez zakłóceń. Interesujące jest przy tym, że mimo znacznych zakłóceń błędy uczenia systematycznie malały, a więc sieć nie traciła zdobytej „wiedzy”, nie musiała się więc uczyć od początku. Dla sieci odpowiadającej minimum średniego błędu testowania przeprowadzono badanie zmienności wyjść z komórek w warstwie ukrytej, a uzyskane wyniki zamieszczono w tablicy 7.2. Tym razem dwie komórki (1-sza i 14-ta w drugiej warstwie) mają dość niską zmienność i mogłyby być usunięte.



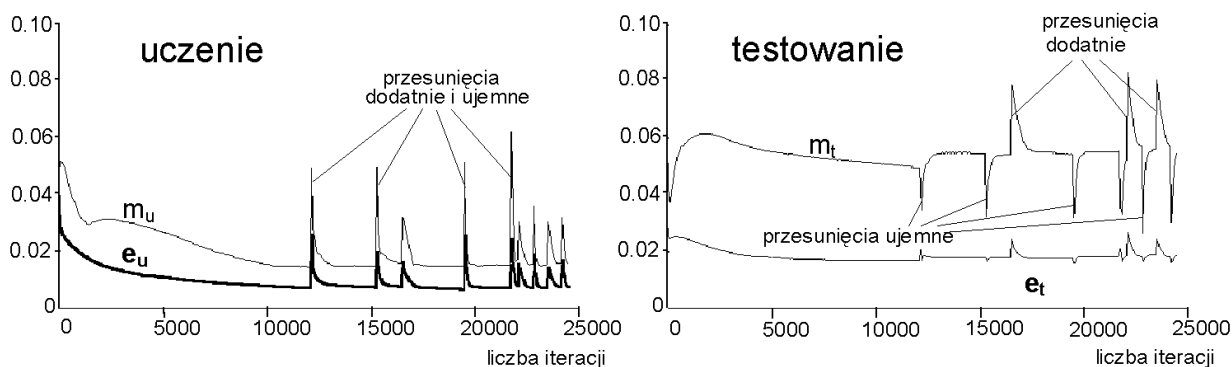
rys. 7.3. Przebiegi uczenia sieci z zakłóceniami wag wprowadzanymi gdy przez 1000 iteracji błąd średni testowania nie maleje.

Dzięki wprowadzeniu zakłóceń losowych uzyskano zatem wyraźną poprawę wyników uczenia, jednakże sieć jest w dalszym ciągu duża. Ponadto uderzające są znacznie wyższe wartości błędów testowania niż uczenia. O ile jest to zrozumiałe ze względu na brak wpływu zbioru testującego na przebieg uczenia, o tyle

oba zbiory ostatecznie reprezentują tę samą klasę danych (były otrzymane w tych samych warunkach skrawania) i równie dobrze ich role mogłyby być zamienione. Nasuwa się pytanie, czy istnieje taki wektor wag, dla którego błędy testowania byłyby mniejsze przy zachowaniu dobrych wyników na danych uczących? Wykonano następujące eksperymenty: wytrenowana konwencjonalnie sieć była zakłócana przez na przemian dodawanie lub odejmowanie do wag określonej wartości z zakresu ± 1 . Zakłócenie takie nazwano przesunięciem wag. Spodziewano się, przy tym że wytrącona z równowagi sieć będzie dążyć do uprzednio osiągniętego stanu przeszukując przestrzeń wag. Efekt uzyskany dla przesunięć ± 0.5 przedstawiono na rys. 7.4.

Tablica 7.2. Zmienność komórek w warstwie ukrytej dla sieci uczonej z zakłóceniami przy stanie odpowiadającym minimum średniego błędu testowania

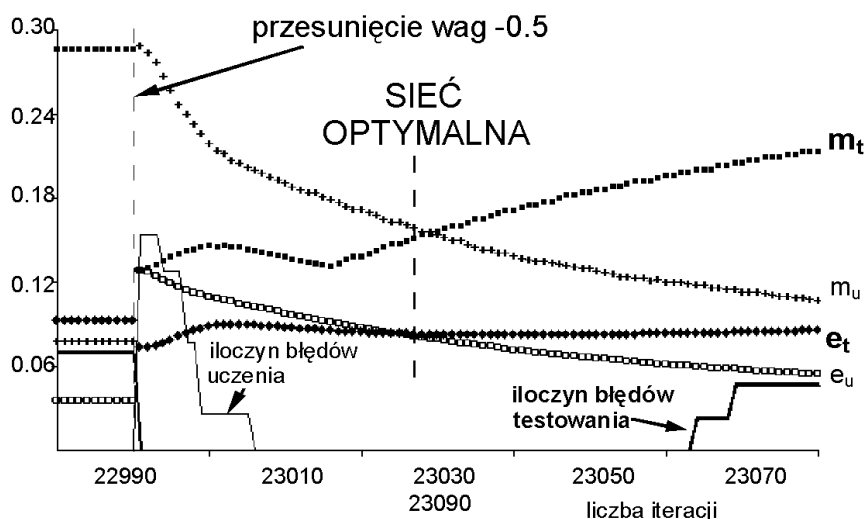
o2,1	o2,2	o2,3	o2,4	o2,5	o2,6	o2,7	o2,8
0.0701	0.5523	0.3529	0.7350	0.5475	0.8864	0.6957	0.4929
o2,9	o2,10	o2,11	o2,12	o2,13	o2,14	o2,15	o2,16
0.7403	0.4025	0.8704	0.8940	0.5731	0.0939	0.6148	0.4608



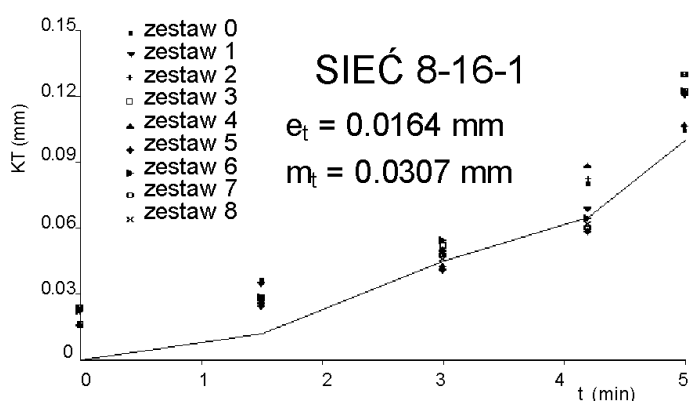
rys. 7.4. Przebieg uczenia sieci z przesunięciami wartości wag na przemian 0.5 i -0.5.

Jak można się było spodziewać, po przesunięciach wag w obu kierunkach błędy uczenia znacznie choć na krótko wzrastały, by po niewielu iteracjach wrócić do poprzedniego malejącego przebiegu. Inaczej rzecz się miała z błędami testowania, które rosły po przesunięciach dodatnich, a malały po przesunięciach ujemnych. Należy przyjrzeć się bliżej błędom bezpośrednio po przesunięciach ujemnych. Wybrano zakłócenie, po którym maksymalny błąd testowania spadł najniżej i przebieg wag po tym zakłóceniu przedstawiono na rysunku 7.5. Jak widać, mimo iż błędy uczenia znacznie wzrastają zaraz po przesunięciu, już w następnej iteracji spadają dążąc do stabilizacji na poziomie, jaki osiągnęły wcześniej. Wartości błędów testowania przebiegają odwrotnie - zakłócenie powoduje ich spadek, następnie występuje lokalne słabe maksimum, niewielki spadek, wreszcie powolny wzrost do poprzednich wartości. Korzystając z takiego przebiegu obu błędów można wybrać sieć optymalną, czyli taką, dla której oba rodzaje błędów są zbliżone, a iloczyny błędów zarówno testowania jak uczenia są równe 0 (żaden wynik nie różni się od rzeczywistego więcej niż 20%).

Ostatecznym sprawdzianem jakości działania sieci nie powinny być jednak wskaźniki formalne lecz merytoryczna ocena wyników jej pracy. W tym przypadku jest to stwierdzenie w jakim stopniu sieć właściwie określa zużycie ostrza na podstawie dostarczanych sygnałów. Na rysunku 7.6 przedstawiono rzeczywisty przebieg zużycia ostrza w próbie S08 (linia ciągła) oraz wartości zużycia podawane przez sieć nauczoną w oparciu o dane z próby S07.



rys. 7.5. Wybór sieci o optymalnej odpowiedzi na dane uczące i testujące.



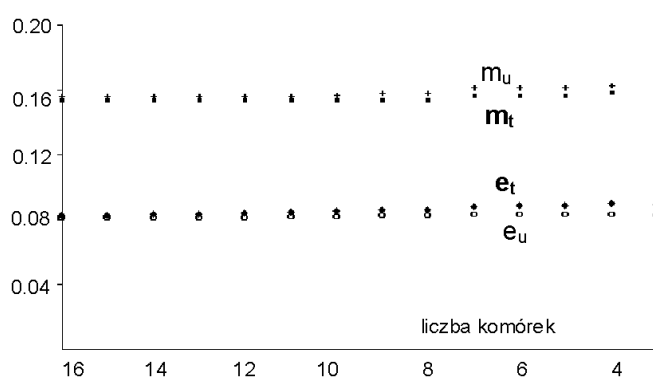
rys. 7.6. Porównanie rzeczywistych wartości zużycia ostrza (linia ciągła) z wyznaczonymi przez sieć otrzymaną dzięki przesunięciom wag.

Uzyskany wynik jest praktycznie zbliżony do otrzymanego przy losowych zakłóceniach sieci i sam w sobie zapewne nie uzasadniałby karkołomnej procedury przesuwania wag gdyby nie bardzo ciekawy „efekt uboczny”. Przesunięcia wartości wag komórek sprawia, że wartość s będąca argumentem funkcji aktywacji (wzory 7.2 ÷ 7.4) oddala się od zera, a wyjście z komórki przesuwa w kierunku 0 lub 1. Komórki, których wyjścia mają stosunkowo małą zmienność, a zarazem są już przed przesunięciem wag oddalone od 0.5 mogą zostać zepchnięte poza zakres stromego fragmentu funkcji sigmoidalnej i przez to stracić wrażliwość na wartości sygnałów z warstwy poprzedniej. Ich zmienność spada znacznie, przestają one mieć udział w działaniu sieci i mogą zostać usunięte. W tabelicy 7.3 zestawiono zmienność komórek sieci, której

działanie pokazano na rys. 7.6. Jak widać aż trzynaście komórek ma bardzo niską zmienność. Postanowiono usuwać je w kolejności rosnącej zmienności, za każdym razem testując nową, zredukowaną sieć. Wyniki zestawiono na rys. 7.7.

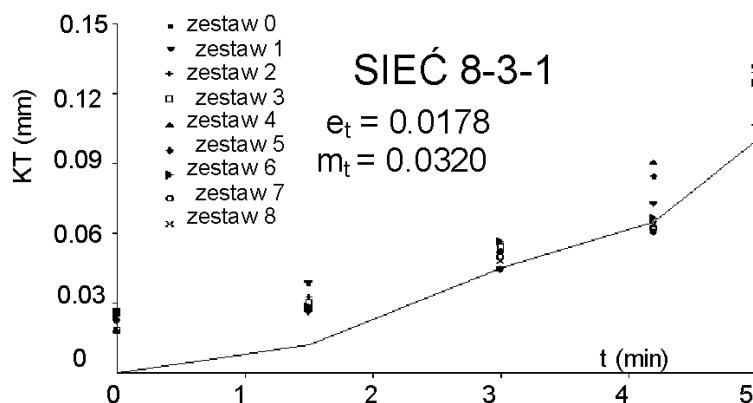
Tablica 7.3. Zmienność komórek w warstwie ukrytej dla sieci uczonej z przesunięciami wag przy stanie odpowiadającym minimum średniego błędu testowania

o2,1	o2,2	o2,3	o2,4	o2,5	o2,6	o2,7	o2,8
0.2176	0.2312	0.0199	0.0308	0.0043	0.0015	0.0029	0.0066
o2,9	o2,10	o2,11	o2,12	o2,13	o2,14	o2,15	o2,16
0.0036	0.0035	0.0345	0.0068	0.0081	0.0069	0.7287	0.0061



rys. 7.7. Błędy uczenia i testowania uzyskiwane w trakcie pruningu komórek sieci uzyskanej dzięki przesunięciom wartości wag.

Jak widać pogorszenie wyników działania sieci dotyczy zwłaszcza danych uczących, lecz jest ono nieznaczne. Otrzymano ostatecznie sieć o strukturze 8-3-1, czyli znacznie mniejszą niż sieć wyjściowa. Ostateczny wynik jej działania przedstawiony na rys. 7.8 jest tylko nieznacznie gorszy od najlepszego uzyskanego dotychczas. Zysk wynikający ze zmniejszenia liczby komórek, a przez to znacznego przyspieszenia działania sieci, a zwłaszcza jej uczenia wart jest zapewne tego.



rys. 7.8. Porównanie rzeczywistych wartości zużycia ostrza (linia ciągła) z wyznaczonymi przez sieć otrzymaną po pruningu komórek.

7. 2. 3. Badanie efektywności wejść sieci neuronowej

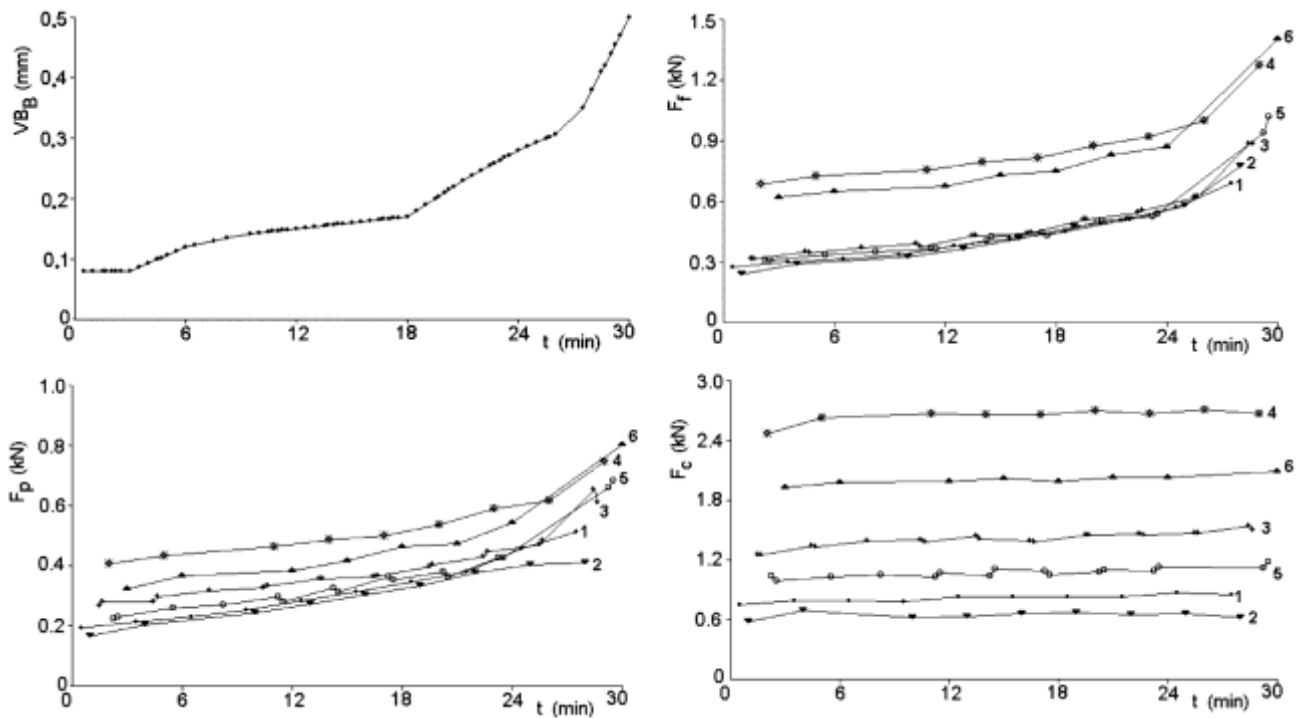
Do badania efektywności wejść sieci neuronowej wykorzystano wyniki prób W5 i W7 opisane w punkcie 4.1.4, rys. 4.21÷4.22 [90, 131]. Do wyznaczania miar zarejestrowanych sygnałów F_c , F_f i F_p stworzone zostało specjalne oprogramowanie. Umożliwia ono wyznaczanie wartości średnich i odchylenia standardowego sygnałów sił (siły są filtrowane w paśmie 150-500 Hz przed wyznaczeniem odchylenia standardowego), a także interpolowane wartości zużycia. Wyniki obliczeń są zapisywane z parametrami skrawania w pliku tekstowym. W celu zilustrowania formatu uzyskiwanych danych, w tabelicy 7.4 zestawiono wyniki uzyskane w ósmej operacji. Z uwagi na zastosowanie w każdej operacji sześciu zestawów parametrów skrawania, każda z prób jest równoważna sześciu konwencjonalnym próbom trwałościowym. Jest to wyraźnie widoczne na przedstawionych na rys. 7.9 i 7.10 przebiegach zużycia ostrza sił skrawania w funkcji czasu uzyskanych w przeprowadzonych próbach.

Tablica 7.4. Wyniki pomiarów zużycia ostrza i sił skrawania w ósmej operacji obu prób

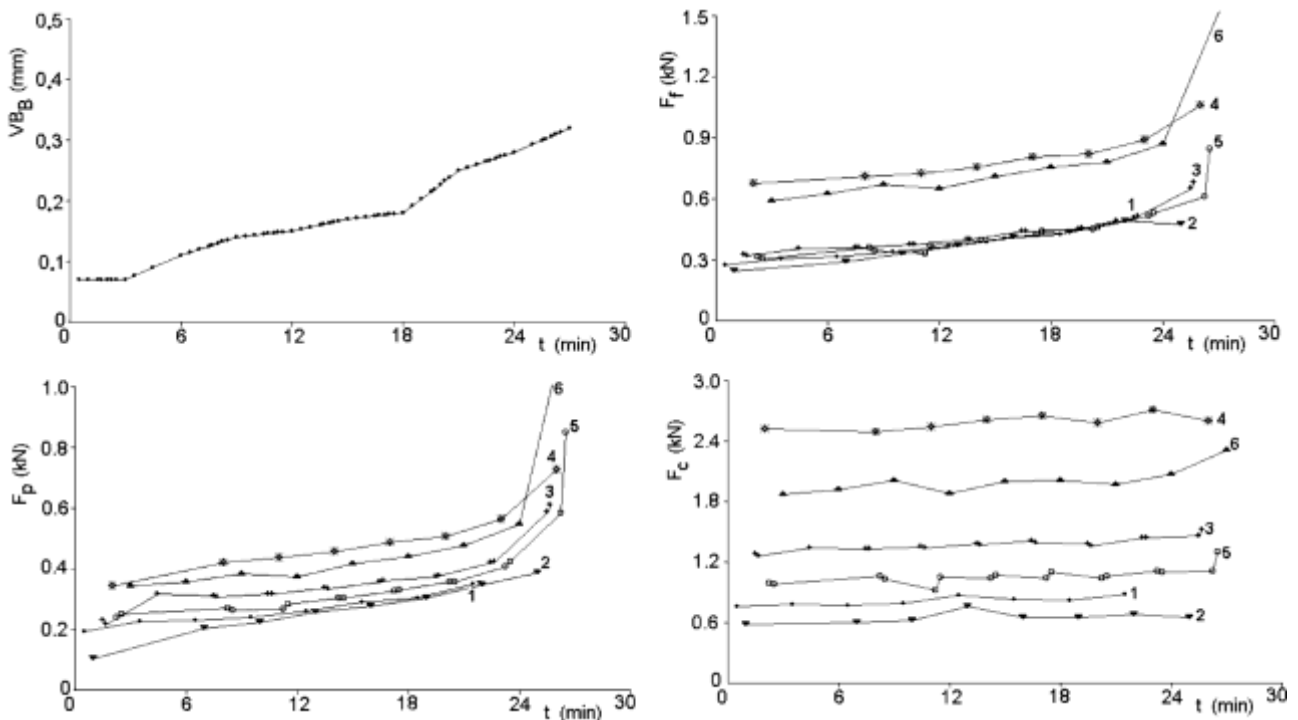
t	v_c	f	a_p	Próba W5				Próba W7			
				F_c	F_f	F_p	VB_B	F_c	F_f	F_p	VB_B
				N	N	N	mm	N	N	N	mm
21.50	351	0.24	1.5	829	505	380	0.238	876	493	350	0.255
22.00	417	0.17	1.5	646	508	376	0.247	677	489	348	0.260
22.50	251	0.47	1.5	1462	547	430	0.255	1440	503	420	0.265
22.67	251	0.47	1.5	1454	553	446	0.258	1436	513	424	0.267
23.00	251	0.47	3.0	2665	920	590	0.263	2713	891	563	0.270
23.25	300	0.33	1.5	1088	523	426	0.268	1114	515	408	0.273
23.50	300	0.33	1.5	1125	542	426	0.272	1100	531	423	0.275
24.00	300	0.33	3.0	2032	868	542	0.280	2066	870	548	0.280

Uzupełnijmy opis tych prób przedstawiony w punkcie 4.1.4. W czasie obróbki ostatniego przedmiotu próbie W5 (ostatniej operacji) zużycie ostrza wyraźnie się powiększyło, dochodząc w czasie ostatniego zabiegu do ok. $VB_B = 0.5$ mm. Na powierzchni skrawania pojawiły się zadziory. Świadczyło to o zbliżającym się katastroficznym stopniu ostrza i to zdecydowało o przerwaniu próby.

W próbie W7 w trakcie ostatniego zabiegu w dziewiątej operacji wystąpiło katastroficzne stopienie ostrza w postaci spłynięcia wierzchołka. Nie jest to widoczne w przebiegu zużycia na powierzchni przyłożenia (VB_B) lecz bardzo silnie odbiło się na przebiegu posuwowej i odporowej składowej siły skrawania. Na tych przebiegach widoczny jest także wyraźny przyrost już w czasie piątego zabiegu ostatniej operacji. Oczywiście można byłoby te dwa ostatnie zabiegi wyeliminować z wyników prób, jako że nie odpowiadają one naturalnemu zużyciu ostrza. Postanowiono jednakże tego nie czynić, by stworzyć, a raczej skorzystać z zaistniałego przypadku stanowiącego rodzaj wyzwania dla strategii nadzoru stanu narzędzia.



rys. 7.9. Wyniki próby W5, numery przy przebiegach oznaczają zestawy parametrów skrawania zgodnie z rys. 4.20 oraz tablicą 4.5.



rys. 7.10. Wyniki próby W7, numery przy przebiegach oznaczają zestawy parametrów skrawania zgodnie z rys. 4.19 i 4.20 oraz tablicą 4.5.

Zgodnie z wynikami badań prowadzonych w ITM PW i przedstawionymi w rozdziale trzecim, a także ogólnym stanem wiedzy, siły F_f i F_p okazały się wyraźnie zależne od zużycia ostrza, podczas gdy główna składowa siły skrawania zmieniała się w czasie próby nieznacznie, zależąc wyraźnie jedynie od posuwu i

głębokości skrawania. Ciekawym zjawiskiem występującym w zastosowanych warunkach skrawania jest bardzo słaba zależność siły posuwowej od posuwu – przebiegi F_f grupują się wyraźnie względem głębokości skrawania. Siła odporowa zależy tak od posuwu i głębokości skrawania jak od zużycia ostrza.

Sieć neuronowa po wytrenowaniu tworzy swoisty model procesu. W przypadku diagnozowania zużycia ostrza jest on podobny w sensie funkcjonalnym do korelacji statystycznej. Nie jest przy tym określona ani potrzebna sformalizowana postać funkcji korelacyjnej. Sieć „sama” wyławia informacje zawarte w sygnałach wejściowych i koreluje je z sygnałem wyjściowym. Wynik uczenia sieci mówi jednak o tym, czy między wyjściem (tu zużyciem ostrza) a wejściami do sieci istnieje wystarczająca korelacja lub inaczej – czy w sygnałach wejściowych są zawarte wystarczające informacje do określenia wartości wyjścia. Wynik testowania natomiast informuje o tym, czy model zbudowany przez sieć w czasie uczenia nie jest lokalny – oddający tylko dane uczące. Stąd dane testujące winny rzeczywiście pochodzić z innego eksperymentu. Niedopuszczalne jest (czasem spotykane w literaturze) dzielenie wyników jednego testu na zbiór uczący i testujący.

Do praktycznego zastosowania diagnostyki stanu narzędzia niezbędne jest zainstalowanie określonego czujnika (tu – czujnika sił skrawania). Nie jest oczywiście obojętne, jaki to czujnik. W omawianych tu badaniach zastosowano siłomierz laboratoryjny, którego zastosowanie w warunkach przemysłowych jest nie do przyjęcia ze względu na brak zabezpieczenia przed przeciążeniem. W praktyce produkcyjnej stosuje się różne czujniki sił skrawania. Ich cena zależy w dużym stopniu od tego, ile składowych ma być mierzonych. Badając możliwość zastosowania pomiarów sił i sieci neuronowych warto nie poprzestać na wykorzystaniu wszystkich sygnałów dostępnych w wyniku badań laboratoryjnych, lecz spróbować ograniczać dostępne sygnały wejściowe, by zbadać możliwość instalacji skromniejszych czujników, a także eliminacji przypadkowych (nieznanych) zmian głębokości skrawania. Celem badań przedstawionych poniżej było właśnie znalezienie możliwych do wykorzystania w różnych praktycznych sytuacjach konfiguracji sygnałów wejściowych do sieci. Wybrane do badań konfiguracje wejść sieci przedstawiono w tabelicy 7.5. We wszystkich sieciach zastosowano 10 komórek w warstwie pośredniej.

Wszystkie sieci były uczone ze współczynnikiem uczenia 0.9 i momentum 0.6 przez 200000 iteracji. Na rys. 7.11 przedstawiono wygląd ekranu komputera w czasie uczenia sieci 6-tej (oznaczonej jako W6). W ramce po prawej stronie u góry ekranu przedstawione są podstawowe informacje o konfiguracji sieci. W pierwszym miejscu po nazwie pliku konfiguracyjnego (tu **W6.NET**) podana jest struktura sieci: 4 wejścia (przy 7-u dostępnych w plikach z danymi, patrz tablica 7.4), 10 komórek w warstwie ukrytej i jedno ciągle wyjście (VB_B). W następnym wierszu podane są maksymalne wartości sygnałów wejściowych. Określają one warunki, jakim winny odpowiadać dane wejściowe. Wiersz trzeci mówi, że zastosowano uczenie opierające się na uogólnionej metodzie największego spadku Rumelharta z uaktualnianiem wartości wag po prezentacji wszystkich wektorów trenujących czyli co iterację (Generalised Delta Rule - Cumulative Weight Adjustment) oraz podaje współczynnik uczenia i momentum. Następnne wiersze w tej ramce to komentarz

wprowadzane przez operatora. W środku ekranu podawane informacje o zbiorach uczącym i testującym. W ostatnim wierszu ramki podane są wszystkie zmienne w zbiorach, przy czym brane pod uwagę są tylko wyróżnione – program umożliwia wyłączanie wejść, dzięki czemu różne sieci (jak te przedstawione w tablicy 7.5) mogą korzystać z tych samych zbiorów uczących i testujących. W dolej części ekranu pokazywane są co zadana liczbę iteracji wyniki uczenia (tu co 10 iteracji) i testowania sieci (tu co 100 iteracji).

Tablica 7.5. Konfiguracje wejść sieci neuronowej przyjęte do badań.

sieć	sygnały wejściowe					Komentarz
	f	a_p	F_f	F_p	F_c	
1	✓	✓	✓	✓	✓	Sieć pełna – wszystkie wejścia. Można się spodziewać, że to nadmiar. Do zastosowania niezbędny trójskładowy czujnik sił
2			✓	✓	✓	Próba zbadania, czy informacje zawarte w wartościach sił skrawania wystarczą do uwzględnienia wpływu parametrów skrawania. Do zastosowania niezbędny trójskładowy czujnik sił
3	✓		✓		✓	Siła F_f zależy prawie tylko od a_p i VB_B , zaś F_c prawie tylko od a_p i f . To stwarza szansę odzyskania informacji o głębokości skrawania z F_c i f , a w ten sposób wyeliminowanie jej wpływu z wartości F_f . Konfiguracja szczególnie korzystna gdy występują nieznane zmiany a_p (obróbka wstępna)
4	✓	✓	✓			Przy znanej głębokości skrawania i posuwie można ich wartości podać na wejścia wraz z F_f , pozwalając sieci na eliminację ich wpływu i identyfikację zużycia ostrza.
5	✓	✓	✓	✓		Podobnie jak wyżej, z tym że informacje zawarte w sile F_f są dublowane przez zawarte w sile F_p
6	✓	✓	✓		✓	Dla dwuskładowego czujnika sił, przy znanych zmianach a_p

UCZENIE SIECI

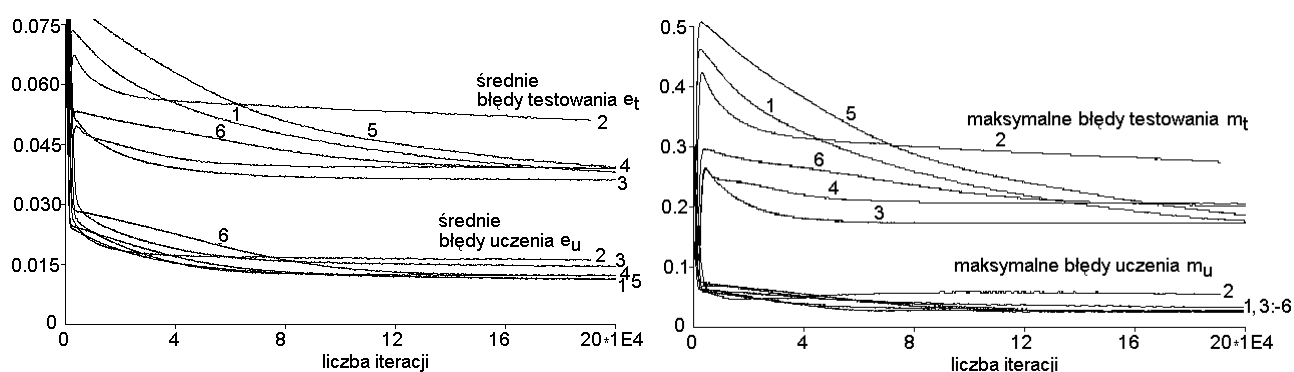
Konfiguracja Uczenie Testowanie Zapis stanu Reset Dane Quit	Sieć W6.NET: 4(7)-10-1c Max.wart.na wejściach: 417 0.47 3 3000 2000 1000 30 GDR-cum współcz. ucz.= 0.9 momentum 0.6 ISCAR W5-W7 Wykorzystuje Ff, Fc, ap i f
---	---

Dane do uczenia sieci pobierane są z pliku:
 D:\AI\NEU_NET\NASZE\1998\NET'W5IA.RTX lp=71
 Dane do testowania sieci pobierane są z pliku:
 D:\AI\NEU_NET\NASZE\1998\NET'W7IA.RTX lp=66
 Zmienne: vc **f ap Fc Ff Fp t VB**

	Nr iter.	Błąd śr.	Il. błędów	Błąd max.	Śr.zmiana wagi
UCZENIE:	41970	0.0220	0/71	0.0539	0.8291E-5
TEST:	41900	0.0481	1/66	0.2646	
TEST:	41800	0.0481	1/66	0.2646	
TEST:	41700	0.0481	1/66	0.2646	
TEST:	41600	0.0481	1/66	0.2646	
TEST:	41500	0.0481	1/66	0.2646	

rys. 7.11. Wygląd ekranu komputera w czasie uczenia sieci neuronowej.

W trakcie uczenia sieci na zbiorze W5, po każdej iteracji wykonywano także testowanie sieci na zbiorze W7. Oczywiście wyniki testowania nie wpływały w żaden sposób na przebieg uczenia, a służył jedynie do bieżącej oceny zdolności sieci do generalizacji. Na rys. 7.12 przedstawiono przebiegi błędów uczenia i testowania. Jak widać, średnie błędy uczenia e_u (sterujące przebiegiem uczenia) oraz maksymalne błędy uczenia m_u zmieniają się dla wszystkich sieci dość podobnie, przy czym dla sieci 2-giej są one najwyższe. Wyraźnie różne są przebiegi błędów testowania. Te błędy są ważniejsze, jako że świadczą o zdolności sieci do oceny zużycia innego ostrza niż użyte do uczenia. Tu przede wszystkim należy podkreślić zdecydowanie najgorszy wynik uzyskany przez sieć 2-gą, opartą jedynie na pomiarach sił skrawania bez informacji o parametrach skrawania. Sieci 1-a i 5-ta uczą się wyraźnie wolniej, a raczej wolniej uzyskują zdolność uogólniania. Niemniej jednak, po 200 000 iteracjach wyniki uzyskiwane przez wszystkie sieci (oprócz 2-giej) są podobne.



rys. 7.12. Przebiegi błędów badanych sieci w czasie ich uczenia.

W celu ułatwienia oceny liczbowych wartości błędów, zestawiono je w tablicy 7.6:

Tablica 7.6. Błędy uczenia i testowania badanych sieci

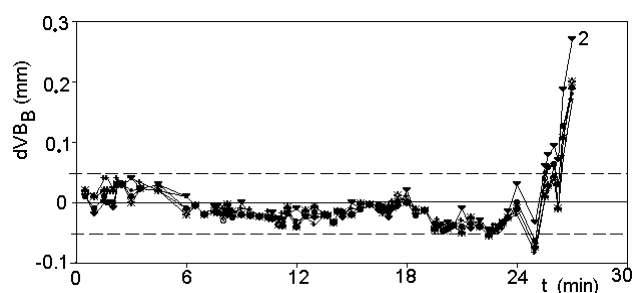
sieć	sygnały wejściowe					błędy uczenia		błędy testowania	
	f	a_p	F_f	F_p	F_c	e_u	m_u	e_t	m_t
1	✓	✓	✓	✓	✓	0.0113	0.0257	0.0380	0.1751
2			✓	✓	✓	0.0161	0.0553	0.0509	0.2740
3	✓		✓		✓	0.0144	0.0329	0.0362	0.1726
4	✓	✓	✓			0.0121	0.0278	0.0390	0.2043
5	✓	✓	✓	✓		0.0112	0.0257	0.0393	0.1873
6	✓	✓	✓		✓	0.0123	0.0260	0.03901	0.2020

Pogrubieniem wyróżniono najniższe wartości w każdej grupie. Najlepsze wyniki uczenia uzyskała sieć 5-ta, a nieomal identyczne sieć 1-a. Wyniki testowania z kolei były najlepsze dla sieci 3-ciej, a tylko nieco gorsze dla sieci 5-tej. Należy jednak podkreślić, że o ile możliwości sieci 3-ciej są wyczerpane (błędy przestały maleć już po ok. 100 000 iteracjach), błędy testowania sieci 1-ej i 5-tej maleją przy dalszym uczeniu. Np. po kolejnych 100 000 iteracjach błędy sieci 1-ej wyniosły :

$$e_u = 0.0111 \quad m_u = 0.0257 \quad e_t = 0.0366 \quad m_t = 0.1629$$

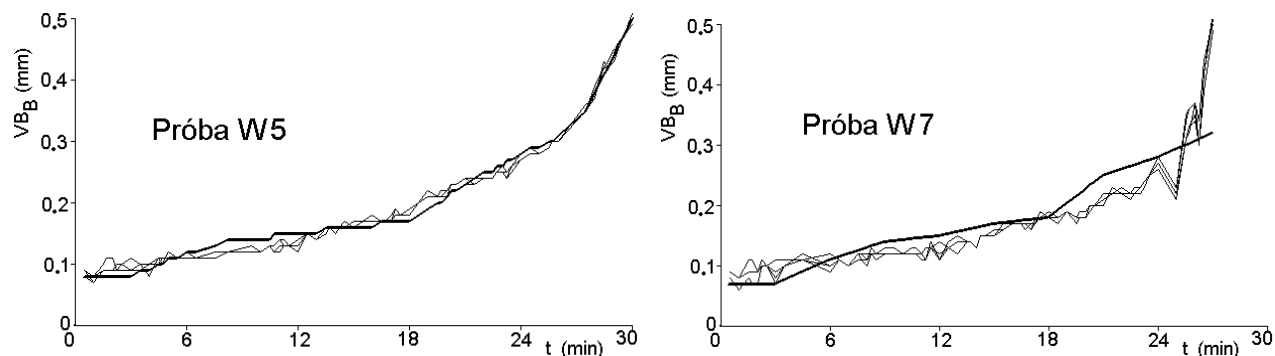
Zauważmy, że mimo niewielkich zmian błędów uczenia, błędy testowania zmniejszyły się wyraźnie. Pomijając sieć 2-gą, widzimy, że średnie błędy testowania nie przekraczają 0.04 mm, czyli ok. 10% wskaźnika stępienia. Nie jest to zły wynik. Błędy maksymalne testowania są oczywiście większe, i wynoszą do 0.2 mm. Ta wartość może być niepokojąca i należy ją uważniej przeanalizować. Wrócimy do tego za chwilę. Tymczasem warto może stwierdzić, że szereg prac z zakresu zastosowania sieci neuronowych do diagnostyki stanu narzędzi ogranicza się do podawania błędów uczenia i testowania. Wydaje się, że podejście takie nie jest słuszne. Istotna jest nie tyle sama wartość błędu średniego czy maksymalnego lecz to gdzie on występuje. W gruncie rzeczy ważna jest dokładność oszacowania momentu, w którym ostrze traci właściwości skrawne, czyli określenie końca jego trwałości.

Na rys. 7.13 przedstawiono różnice między wyjściami z sieci (przewidywanym przez sieci wartościami VB_B), a rzeczywistymi wartościami zużycia ostrza w próbie W7 używanej do testowania. Jak widać, do ok. 24 minuty błędy wszystkich sieci mieszczą się w paśmie ± 0.05 mm. Dopiero ścięcie naroża, które spowodowało wyraźne przyrosty sił F_f i F_p odbija się większymi błędami oszacowania szerokości starcia na powierzchni przyłożenia VB_B . Trudno jednak „mieć to za złe” sieciom. Wręcz przeciwnie, należy uznać, że odpowiedź sieci jest korzystna, lepsza, niż dokładna, tzn. pokazująca właściwe wartości VB_B podczas gdy ostrze utraciło właściwości skrawne.



rys. 7.13. Błędy oszacowania zużycia ostrza przez badane nauczone sieci neuronowe.

Wreszcie jako podsumowanie, na rys. 7.14 przedstawiono przebiegi zużycia ostrza rzeczywistego i oszacowanego przez sieci w obu eksperymentach. Dla próby W5 jest to auto-test, jako że sieci uczyły się właśnie na tej próbie.



rys. 7.14. Rzeczywiste i oszacowane przez sieci (z wyjątkiem 2-giej) wartości zużycia ostrza w obu próbach.

Wróćmy do porównania wyników przedstawionych w tabelicy 7.6. Sieć pierwsza, ze wszystkimi dostępnymi wejściami uzyskała dobry wynik i mogłaby być zastosowana, lecz jak już wspomniano, jest ona nadmiarowa – wymaga zastosowania najdroższego czujnika i uczy się powoli. Sieć drugą należy odrzucić jako dającą najgorsze wyniki, nie oferującą nic w zamian – informacja o posuwie zawsze jest dostępna. Dwie następne sieci (trzecia i czwarta) oddają tę samą treść merytoryczną: informacja o zużyciu ostrza zawarta jest w zmienności siły posuwowej. W celu jej odzyskania należy wyeliminować wpływ posuwu i głębokości skrawania, czyli uwzględnić te informacje. Posuw w obu sieciach podany jest jawnie, natomiast informacja o głębokości skrawania w sieci trzeciej uzyskiwana jest z wartości siły głównej. Umożliwia to zastosowanie przy przypadkowych zmianach głębokości skrawania. W sieci czwartej wartość a_p jest podawana wprost, co umożliwia zastosowanie jednoskładowego czujnika sił. Sieć trzecia okazała się wyraźnie najlepsza jeśli chodzi o błędy testowania, choć najgorsza (poza drugą) pod względem błędów uczenia. Ponieważ jednakże z natury rzeczy te drugie są znacznie mniejsze od tych pierwszych, sieć trzecia jest bardziej zrównoważona od innych, co przemawia na jej korzyść.

W sieci piątej dostarczanych jest więcej informacji na wejściu, co owocuje najlepszymi wynikami uczenia. Wszak także w składowej F_p zawarte są informacje o zużyciu ostrza.

Sieć szósta jest wzbogaceniem o jedno wejście sieci trzeciej (dodane a_p) lub czwartej (dodane F_c). Informacja o głębokości skrawania jest tu niejako dublowana. Wyniki uzyskane przez tę sieć nie są jednakże wyraźnie lepsze od trzeciej i czwartej.

Podsumowując należy stwierdzić, że możliwe są do zastosowania różne sieci, należy jedynie dostarczyć informacje, które zostaną wyłowione przez sieć.

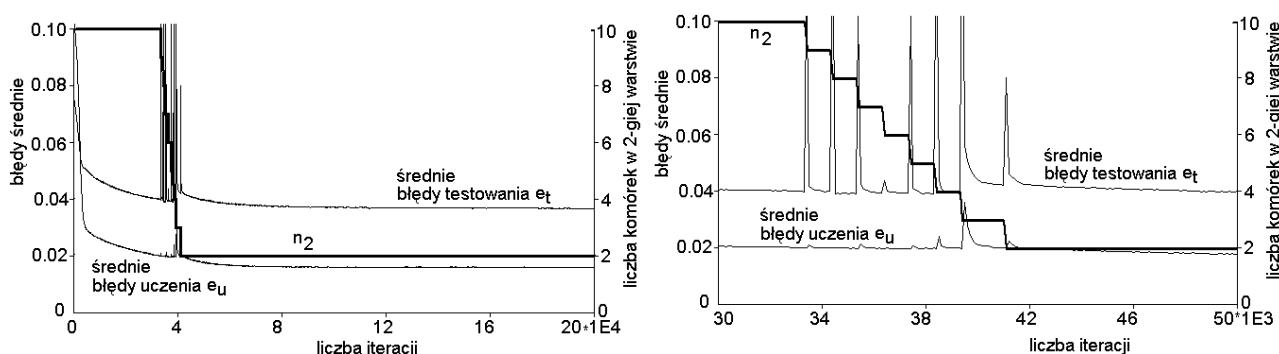
7. 2. 4. Optymalizacja struktury sieci

W poprzednim punkcie badano sieci o różnych wejściach, ale zawsze o tej samej liczbie komórek w warstwie ukrytej. Liczbę tę (10) przyjęto arbitralnie. Po doświadczeniach zdobytych w ramach badań przedstawionych w punkcie 7.2.1 i 7.2.2 program wyposażono w możliwość automatycznego doboru liczby komórek. Jego założenia są następujące: na wstępie przyjęta zostaje założona liczba komórek. Stosując podane kryteria uczenia, sieć zostaje poddana treningowi. Gdy w czasie tego treningu średni błąd uczenia e_u spadnie poniżej zadanego progu program przeprowadza pruning komórek. Polega on na tym, że program analizuje zmienność wyjść komórek w warstwie pośredniej w trakcie prezentacji całego zbioru uczącego. Niska zmienność świadczy o tym, że wartość wyjścia danej komórki niewiele zależy od danych wejściowych, a więc jest ona zbędna. Program wybiera zatem komórkę, której wyjście jest najmniej zmienne przy czym zmienność ta jest mniejsza od tzw. parametru pruningu (pr) podanego przez operatora. Komórka ta zostaje usunięta, a trening ponowiony. W przedstawianych tu badaniach zastosowano parametr pruningu $pr = 0.25$, a prowadzono go nie częściej niż co $it_{pr} = 1000$ iteracji gdy średni błąd uczenia spadał do $e_u = 0.02$. Na rys. 7.15 przedstawiono wygląd ekranu komputera w czasie automatycznego doboru struktury sieci trzeciej. Jak widać pierwszą usuwaną komórką (już po 33 300 iteracjach) była komórka siódma, której

zmienność w chwili pruningu wynosiła zaledwie 0.0641. Dalszy ciąg uczenia z pruningiem komórek doprowadził do pozostawienia zaledwie dwóch komórek w warstwie ukrytej. Przebieg tego procesu przedstawiono na rys. 7.16.



rys. 7.15. Wygląd ekranu komputera w czasie automatycznego doboru struktury sieci 3-ciej.



rys. 7.16. Przebieg automatycznego doboru struktury sieci 3-ciej.

Jak widać, usuwanie komórek odbyło się w stosunkowo krótkim czasie, a odstępy pomiędzy kolejnymi eliminacjami były zdeterminowane przede wszystkim założoną minimalną liczbą iteracji między nimi. Usuwanie wszystkich, poza przedostatnią, komórek w bardzo niewielkim stopniu wpływało na błędy uczenia (patrz prawa strona rysunku 7.16), a sieć bardzo szybko dostosowywała się do nowej konfiguracji. Uzyskane błędy na końcu uczenia wyniosły w tym przypadku.

$$e_u = 0.0160 \quad m_u = 0.0379 \quad e_t = 0.0367 \quad m_t = 0.1677$$

czyli niewiele ustępowały sieci pełnej, przy czym maksymalny błąd testowania był nawet mniejszy.

Analogiczne badania przeprowadzono dla sieci 4, 5 i 6 a do nazw wynikowych sieci dodano literę A (autokonfiguracja). Wyniki przedstawiono w tabelicy 7.7.

Tablica 7.7. Wyniki automatycznego doboru liczby komórek w warstwie ukrytej.

sieć	sygnały wejściowe					błędy uczenia		błędy testowania		n_2
	f	a_p	F_f	F_p	F_c	e_u	m_u	e_t	m_t	
3A	✓		✓		✓	0.0160	0.0379	0.0367	0.1677	2
4A	✓	✓	✓			0.0124	0.0289	0.0393	0.2043	3
5A	✓	✓	✓	X		0.0113	0.0268	0.0398	0.1897	8
6A	✓	✓	✓		✓	0.0122	0.0260	0.0383	0.1946	6

Jak widać, wyniki uzyskane przez sieci stworzone opisanym algorytmem okazały się nie gorsze niż pełne. Jednakże tylko sieci 3 i 4 udało się bardzo znacznie zredukować. Podobnie jak dla sieci z dziesięcioma komórkami w warstwie ukrytej, sieć 3A okazała się bardziej zrównoważona od innych i ma wyraźnie najniższe błędy testowania.

7. 2. 5. Laboratoryjny a przemysłowy czujnik sił skrawania

Prace prowadzone w ITM PW zmierzają do budowy przemysłowych układów nadzoru stanu narzędzia, co wyraża się między innymi zastępowaniem czujników laboratoryjnych przemysłowymi. Stąd też w kolejnych badaniach związanych z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych wykorzystano próby wykonane przy pomocy takiego właśnie czujnika, na stanowisku opisanym w punkcie 4.1.4, rys. 4.14.

Na wstępie postanowiono porównać możliwości jakie daje taki czujnik z zapewnianymi przez siłomierz laboratoryjny. Porównanie takie opisano w punkcie 4.1.4, a wyciągnięte wnioski zawarto w równaniach 4.10÷4.13. Żeby nie zmuszać czytelnika do przerzucania kilkudziesięciu stron wstecz przytoczmy je ponownie, wraz z wnioskami odnoszącymi się do siłomierza laboratoryjnego:

- siła skrawania F_c zależy praktycznie jedynie od parametrów skrawania (4.10):

$$F_c = F_c(a_p, f)$$

- siła posuwowa F_f jest niemal niezależna od posuwu, będąc funkcją jedynie głębokości skrawania i zużycia ostrza (4.11):

$$F_f = F_f(a_p, VB)$$

- do określenia zużycia ostrza na podstawie pomiarów F_f niezbędna jest informacja o głębokości skrawania podana bezpośrednio (4.12):

$$VB = VB(F_f, a_p)$$

lub uzyskana dzięki stwierdzonej wcześniej słabej zależności siły skrawania F_c od zużycia ostrza (4.13):

$$VB = VB[F_f, a_p(F_c, f)]$$

Powyższe wnioski opierały się jedynie na wizualnej ocenie wyników zaprezentowanych na rys. 4.21 i 4.22. W celu dokładniejszego ilościowego przeanalizowania problemu należałoby znaleźć określoną postać równań korelacyjnych odpowiadających równaniom 4.10÷4.13. Innym, bardziej efektywnym sposobem podejścia do zagadnienia jest zastosowanie sztucznej sieci neuronowej przez zbadanie przydatności poszczególnych konfiguracji wejść sieci.

Są trzy parametry sieci, które muszą być określone przy korzystaniu z sieci: wielkości wejściowe (ich rodzaj i liczba), liczba neuronów (komórek) w warstwie ukrytej lub sposób ich doboru, wreszcie kryterium na podstawie którego kończony jest trening sieci. W opisywanych tu badaniach konfiguracja wejść jest przedmiotem badań. W warstwie ukrytej zastosowano dwa razy więcej neuronów niż liczba wejść w analizowanej sieci, a we wszystkich testach stosowano w trakcie uczenia 200 000 iteracji – jak wykazały poprzednie badania, jest to liczba nadmiarowa, po której następuje stabilizacja błędów.

Możliwe konfiguracje sieci przedstawiono w tablicy 7.8. Już na pierwszy rzut oka nietrudno zauważyć, że spośród 11 teoretycznie możliwych sieci tylko sześć (1, 2, 4, 5, 8 i 11) jest warta dalszego zainteresowania.

Do testowania wykorzystano próby W5 oraz I6, zaś do testowania próby W7 i I9.

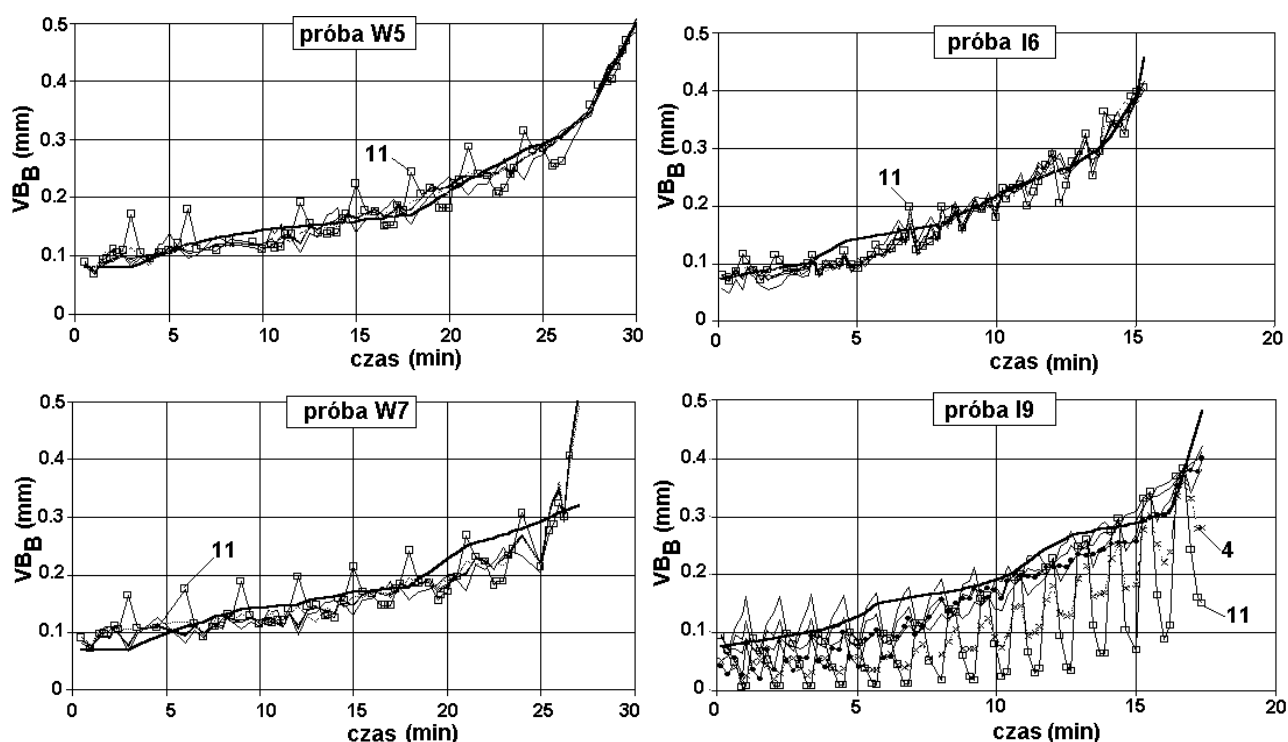
Tablica 7.8. Możliwe konfiguracje sieci opartej na dwóch składowych siłach skrawania oraz posuwie i głębokości skrawania.

Nr	f	a_p	F_f	F_c	Komentarz
1	✓	✓	✓	✓	Wszystkie wejścia umożliwiają ocenę VB_B wg równań (4.12) lub (4.13)
2	✓	✓	✓		Zawiera informacje niezbędne do oceny zużycia wg (4.12), posuw wydaje się zbędny
3	✓	✓		✓	W sposób oczywisty bezużyteczna dla siłomierza laboratoryjnego, jako że F_c nie zależy od zużycia; dla czujnika przemysłowego zależność $F_c(VB_B)$ wynika ze sprzężeń skrośnych, więc nie jest wiarygodna
4	✓		✓	✓	Zawiera informacje niezbędne do oceny zużycia wg (4.13)
5		✓	✓	✓	Zawiera informacje niezbędne do oceny zużycia wg (4.12), F_c wydaje się zbędne
6	✓	✓			W sposób oczywisty bezużyteczna – nie zawiera informacji o zużyciu
7	✓		✓		W sposób oczywisty bezużyteczna – nie zawiera informacji o zależności siły posuwowej od głębokości skrawania
8		✓	✓		Zawiera informacje niezbędne do oceny zużycia wg (4.12)
9	✓			✓	W sposób oczywisty bezużyteczna – nie zawiera informacji o zużyciu zależności $F_c(a_p)$
10		✓		✓	W sposób oczywisty bezużyteczna – nie zawiera informacji o zużyciu zależności $F_c(f)$
11			✓	✓	Próba oceny zużycia jedynie na podstawie sił skrawania bez informacji o parametrach skrawania

W tabelicy 7.9 zestawiono wartości błędów średniokwadratowych nauczonych sieci, na rys. 7.17 natomiast porównanie wartości zużycia ostrza przewidywanych przez sieci ze zmierzonymi (grube linie). Wyniki znacznie gorsze niż większość zostały wytluszczone w tabelicy 7.9 oznaczone punktami na rys. 7.17.

Tablica 7.9. Błędy średnie badanych sieci

Nr sieci	wejścia				siłomierz laboratoryjny		czujnik przemysłowy	
	f	a_p	F_f	F_c	W5	W7	I6	I9
1	✓	✓	✓	✓	0.012	0.030	0.020	0.031
2	✓	✓	✓		0.012	0.030	0.020	0.041
4	✓		✓	✓	0.015	0.029	0.021	0.085
5		✓	✓	✓	0.013	0.029	0.020	0.029
8		✓	✓		0.019	0.033	0.022	0.038
11			✓	✓	0.028	0.039	0.025	0.114



rys. 7.17. Porównanie zmierzonych wartości zużycia ostrza (grube linie) z przewidywanymi przez sieci we wszystkich próbach.

Analiza wyników przedstawionych w tabelicy 7.9 i na rys. 7.17 prowadzi to następujących wniosków:

Dane otrzymywane z siłomierza laboratoryjnego były „łatwiejsze” dla sieci do nauczania (W5) niż uzyskane z czujnika przemysłowego (I6). Błędy testowania jednakże były podobne dla obu układów pomiarowych. Inne obserwacje są związane z zastosowaną konfiguracją wejść:

Sieć nr	siłomierz laboratoryjny	czujnik przemysłowy
1	Mimo iż sieci te oparte były na wszystkich dostępnych wejściach, otrzymane wyniki nie są lepsze niż uzyskane z innych dobrych sieci. Oznacza to, iż niektóre wejścia były zbędne, a informacje przez nie dostarczane nie poprawiały wyników sieci.	
2	Sieć ta uzyskała taki sam wynik jak pierwsza, co potwierdza nadmiarowość F_c gdy dostępne są parametry skrawania i F_f .	Usunięcie F_c wyraźnie pogarsza działanie sieci, co oznacza, iż F_c dostarcza pożytecznych informacji dodatkowych, wspierających sygnał F_f .
4	Wynik tej sieci jest równoważny otrzymanemu przez pierwsze dwie, co potwierdza wniosek, że informacja o głębokości może być wydobyta z siły skrawania i posuwu (wzór 4.13)	Mimo iż sieć nauczyła się zbioru uczącego (I6), nie była w stanie uogólnić tej „wiedzy” na zbiór testujący – błędy dla próby I9 są nie do zaakceptowania. Tak więc siła skrawania zakłócona przez sprzężenia skrośne nie wystarcza do identyfikacji głębokości skrawania w oparciu o wzór (4.13)
5	Sygnał F_c może zastąpić nie tylko głębokość skrawania, jak w sieci 2-giej lecz także posuw, poprawiając dzięki temu wynik sieci 8-ej (patrz niżej)	Sygnał F_c nie może zastąpić głębokości skrawania, jak w sieci 2-giej lecz może zastąpić posuw, poprawiając dzięki temu wynik sieci 8-ej (patrz niżej)
8	To powinna być podstawowa konfiguracja do oceny zużycia ostrza opartego na zależności (4.12). Wyniki są akceptowalne dla obu siłomierzy, jednakże słaba zależność siły F_f od posuwu nie jest pomijalna. Stąd wyniki osiągnięte są gorsze niż uzyskane przez sieci 1-szą i 5-tą.	
11	Można diagnozować zużycie ostrza w oparciu o pomiary sił skrawania, bez znajomości parametrów, lecz wyniki są znacznie gorsze.	Nie można diagnozować zużycia ostrza w oparciu o pomiary sił skrawania, bez znajomości parametrów.

Z przedstawionych rozważań wynikają następujące wnioski (należy pamiętać, że nie są one ogólne lecz dotyczą głównie użyteczności przemysłowego czujnika sił skrawania w porównaniu z siłomierzem laboratoryjnym):

1. Wartość siły posuwowej dostarcza ważnych informacji o zużyciu ostrza. Ze względu na zależność tej siły także od przekroju warstwy skrawanej, jej wymiary (a_p i f) muszą być dostępne dla układu nadzoru.
2. Ponieważ głębokość skrawania ma znacznie większy wpływ na siłę posuwową niż posuw, jej wartość może być zastąpiona przez wartość siły skrawania F_c lecz tylko wtedy gdy nie jest ona zakłócona przez sprzężenia skrośne między kanałami pomiaru sił.

3. Jeśli posuw w nieznacznym stopniu wpływa na siłę posuwową, może być łatwo zastąpiony przez F_c . Sprężenia skrośne nie odgrywają w tym przypadku większej roli.
4. Stosując siłomierz laboratoryjny można pominąć jedną z trzech wielkości: f , a_p lub F_c bez pogorszenia skuteczności przewidywania zużycia. Jeśli występują sprężenia skrośne, pominięty może być jedynie posuw.
5. Nadzorowanie zużycia ostrza bez informacji o wymiarach warstwy skrawanej jest możliwe tylko gdy sprężenia skrośne między kanałami nie występują.

7. 2. 6. Sieć cztero- czy trzywarstwowa?

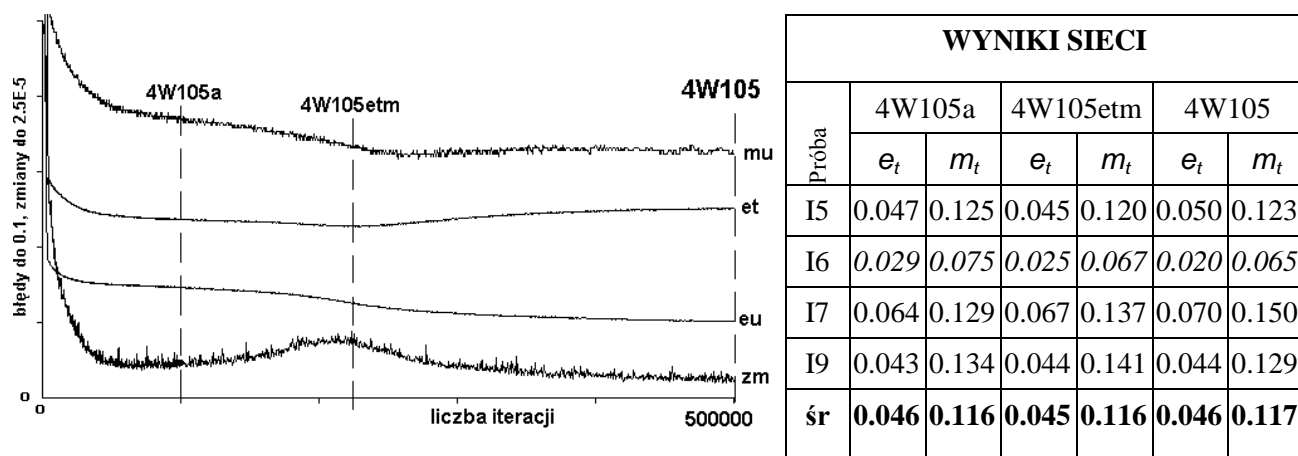
W literaturze coraz częściej można spotkać pogląd, że sieć trzywarstwowa (z jedną warstwą ukrytą) może spełnić te same zadania, co sieć czterowarstwowa. Postanowiono zweryfikować ten pogląd w zastosowaniu do omówionych wyżej danych z prób I6 i I9, do których dołączono wyniki jeszcze dwu eksperymentów prowadzonych w tych samych warunkach skrawania (tablica 4.5) – I5 oraz I7 [107, 122]. Jak poprzednio do uczenia sieci wykorzystywano wyniki próby I6.

Na wstępie przyjęto następujące struktury sieci:

- sieć czterowarstwowa : 4 – 10 – 5 – 1;
- sieć trzywarstwowa : 4 – 10 – 1;

W obu przypadkach wejściami do sieci były: posuw, głębokość skrawania, siła posuwowa i siła główna. Tu i w następnym rozdziale przyjęto $\eta_1=0.9$ oraz $\eta_2=0.9$.

Na rys. 7.18 przedstawiono przebieg naturalnego, tzn. bez żadnych zakłóceń, uczenia sieci czterowarstwowej. Są tu błędy uczenia (eu) i błędy testowania sieci na próbie I5 (et), maksymalne błędy uczenia (mu) oraz średnie zmiany wag sieci (zm). Ta ostatnia wielkość informuje o szybkości zmian, jakim podlega sieć.

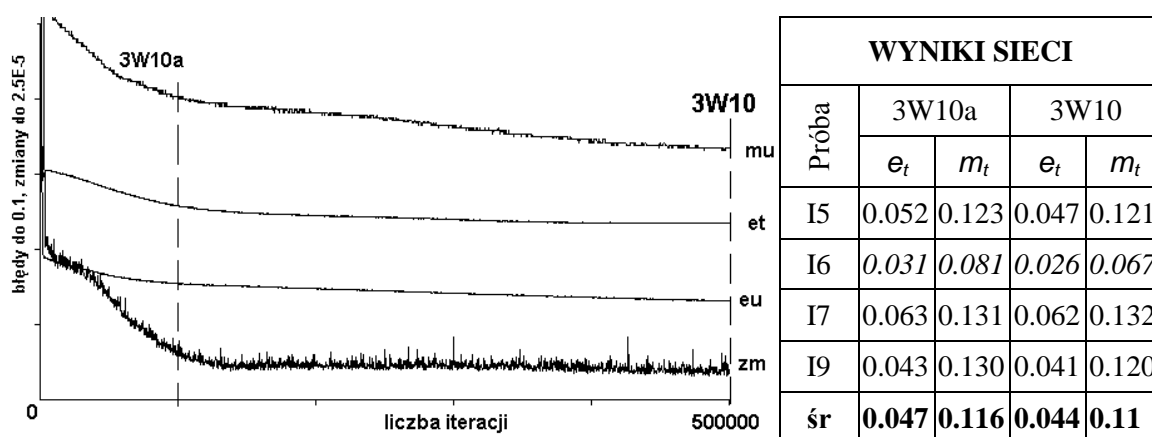


rys. 7.18. Przebieg naturalnego uczenia sieci 4-warstwowej i wyniki uzyskanych sieci.

Sieć uczyła się (mały błędy uczenia) bardzo szybko na początku, a następnie szybkość uczenia wyraźnie spadła. To naturalne zjawisko. Po 100 000 iteracji błędy eu i et się ustabilizowały, stąd

zapamiętano stan sieci jako 4W105a. Później nastąpiła intensyfikacja zmian sieci, osiągająca swoje maksimum po nieco ponad 200000 iteracji. Zaraz potem (po 220 500 iteracjach) sieć osiągnęła minimum błędów testowania. Ten stan sieci został automatycznie wykryty przez program i zarejestrowany jako 4W105etm. Dalsze uczenie sieci prowadziło do naturalnego spadku błędów uczenia lecz także do wzrostu błędów testowania. Po prawej stronie rysunku zestawiono wyniki uzyskanych sieci dla wszystkich czterech prób. Wyniki dla prób I5 i I6 są widoczne na rysunku, tablica je jedynie precyzuje i dodaje maksymalne błędy testowania. Wiersz odpowiadający próbie I6 odnosi się oczywiście do błędów uczenia, a nie testowania.

Analiza błędów uzyskanych w próbach I7 oraz I9 przynosi istotne wnioski – najlepsza okazała się tu sieć pierwsza, uzyskana po zaledwie 100 000 iteracjach. Dalsze uczenie sieci prowadziło do poprawienia wyników dla próby I6, minimum błędów dla próby I5 po 220 500 iteracjach i systematycznego pogarszania wyniku dla prób I7 i I9! W sumie wyniki wszystkich trzech sieci dla wszystkich czterech prób (wartości średnie w ostatnim wierszu tabeli po prawej stronie rysunku) są niemal identyczne. Oznacza to bardzo ważny dla praktyki wniosek – nie należy zbyt wagi przywiązywać do błędów testowania w czasie uczenia sieci (walidacji) – wyniki uzyskane dla innych danych, mogą nie być zbieżne z uzyskanymi dla zbioru wykorzystanego do walidacji. Walidacja stanowić może jedynie przybliżoną wskazówkę o ewentualnym przetrenowaniu sieci, czyli zbyt dużym dopasowaniu do zbioru uczącego, co skutkuje brakiem zdolności do uogólnienia i pogorszeniem wyniku dla innych danych niż uczące. Zajmijmy się teraz analogicznym uczeniem sieci trzywarstwowej. Przebieg tego uczenia i uzyskane wyniki zestawiono na rys. 7.19. Podobnie jak poprzednio zarejestrowano stan sieci po 100 000 iteracji (sieć 3W10a). Tym razem nie wystąpiło minimum błędów testowania, a sieć do końca poprawiała błędy uczenia i testowania. Warto także zauważyć, iż mimo znacznie prostszej struktury, sieć trzywarstwowa uzyskała stabilizację szybkości zmian wag po większej liczbie iteracji niż sieć czterowarstwowa. Pamiętać należy jednak o tym, że czas trwania iteracji dla sieci czterowarstwowej (4-10-5-1) jest znacznie dłuższy niż dla sieci 4-10-1 – dla zastosowanego komputera Pentium II, 330MHz wynosił on odpowiednio 19 i 10 ms.



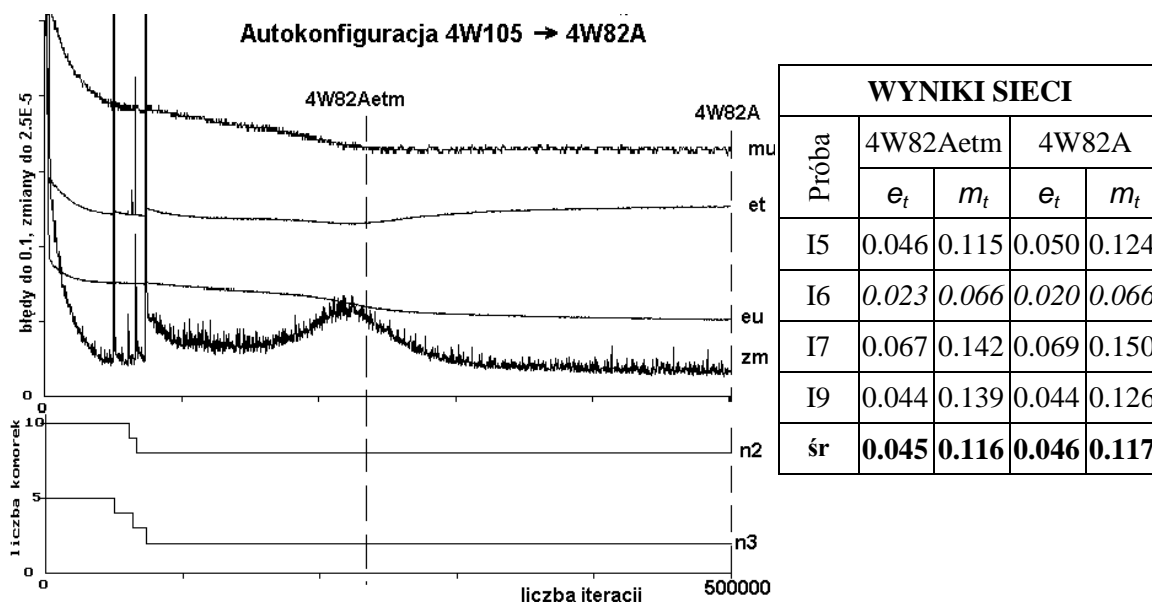
rys. 7.19. Przebieg naturalnego uczenia sieci 3-warstwowej i wyniki oceny uzyskanych sieci.

Po 100 000 iteracji średnie wyniki uzyskane przez sieć trzy- i czterowarstwową były prawie identyczne. Później jednak sieć trzywarstwowa poprawiła swój wynik i to nie tylko dla zbioru uczącego (co oczywiste) lecz także dla wszystkich innych zbiorów. Przemawia to na korzyść sieci trzywarstwowej, a przynajmniej nie podważa wspomnianego na wstępie poglądu o równoważności tych struktur.

Oczywiście obok liczby warstw, duże znaczenie może mieć liczba komórek w poszczególnych warstwach. Stąd też przed ostateczną decyzją co do przyjęcia sieci 4 lub 3-warstwowej, podejmiemy próbę zmniejszenia liczby komórek stosując opisany w punkcie 7.2.4 algorytm pruningu komórek.

Na podstawie przedstawionych na rysunku 7.19 przebiegów naturalnego uczenia sieci, przyjęto minimalny błąd uczenia, zezwalający na pruning komórek, na poziomie $\epsilon_{u_{pr}} = 0.3$. Ponadto przyjęto arbitralnie $pr = 0.2$ oraz $it_{pr} = 2500$.

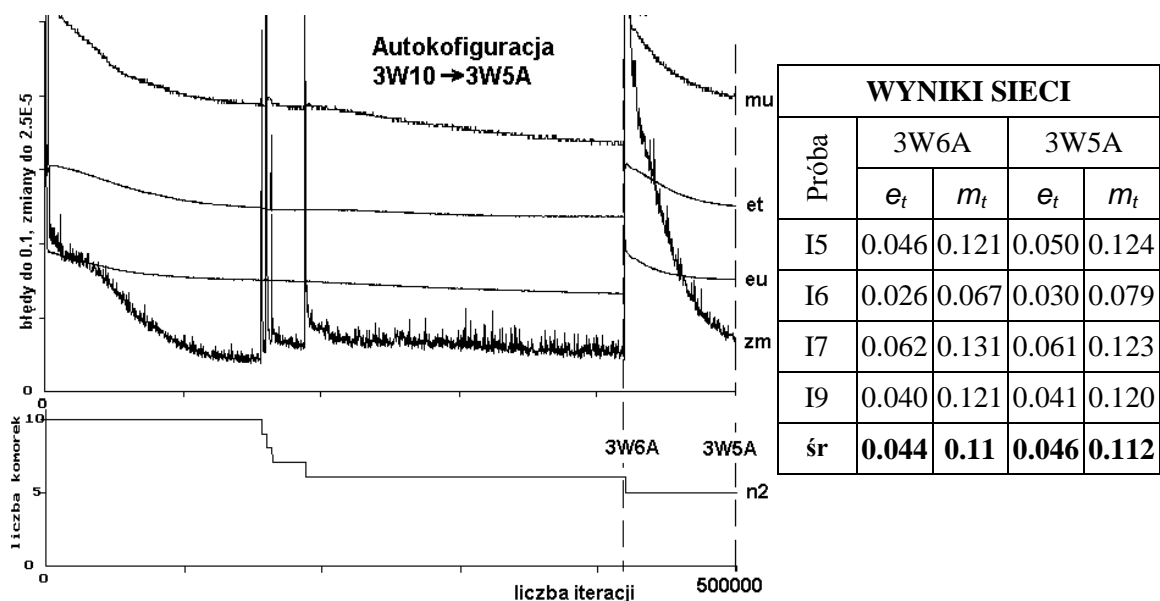
Na rys. 7.20 przedstawiono przebieg uczenia sieci 4-10-5-1 z automatycznym pruningiem komórek (autokonfiguracja sieci), zaś na rys. 7.21 przebieg autokonfigurowania sieci 3-warstwowej.



rys. 7.20. Przebieg autokonfiguracji sieci 4-warstwowej.

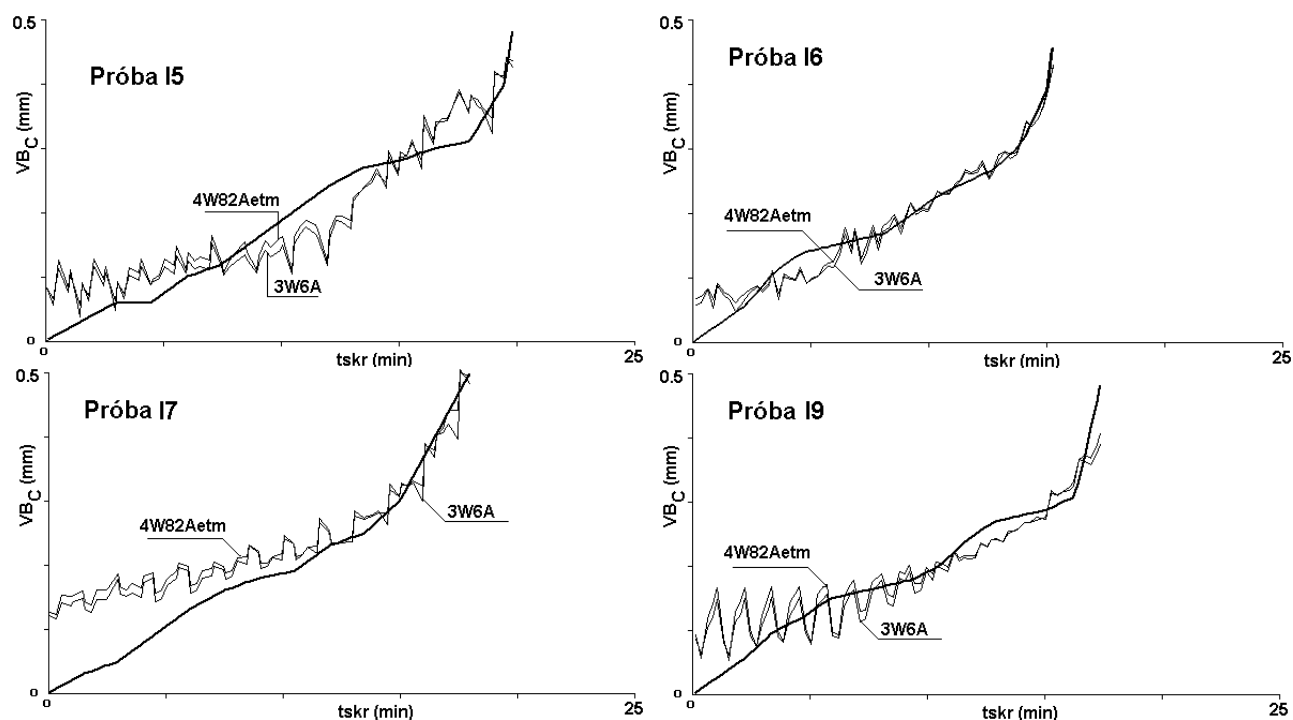
Już na pierwszy rzut oka uderzające jest podobieństwo zmienności zarówno błędów sieci jak i zmienności wag w trakcie autokonfiguracji w stosunku do naturalnego uczenia (porównaj rysunki 7.18 i 7.20 oraz 7.19 i 7.21). Jak widać usuwanie kolejnych komórek (z jednym wyjątkiem, co omówione będzie później) powodowało jedynie „chwilowe” zakłócenie przebiegu uczenia, a po niewielkiej liczbie iteracji, sieć wracała do stanu sprzed pruningu. Usuwanie kolejnych komórek odbywało się szybko jedno po drugim, gdy tylko sieci osiągnęły założony poziom błędów uczenia. Świadczy to o właściwym doborze parametrów autokonfiguracji.

Sieć czterowarstwowa dała się zredukować do 4-8-2-1, czyli wyeliminowano 5 komórek. W czasie dalszego uczenia, zmienność wyjść pozostałych komórek nie spadała poniżej założonego progu $pr = 0.2$.



rys. 7.21. Przebieg autokonfiguracji sieci 3-warstwowej.

Inaczej rzecz się miała w przypadku sieci trzywarstwowej. Tu po stosunkowo szybkim usunięciu 4 komórek, długo nie następowały żadne zmiany. Dopiero po 405 250 iteracjach usunięta została piąta komórka, co pociągnęło za sobą wyraźne pogorszenie jakości sieci (podwyższenie błędów), które spadały w trakcie dalszego uczenia wolno, nie osiągając poprzedniego poziomu nawet po blisko 100 000 iteracji.



rys. 7.22. Porównanie rzeczywistego przebiegu zużycia z oszacowanym przez sieci 4W82etm i 3W6A we wszystkich próbach.

Wyniki podawane w tablicach przy powyższych rysunkach są oczywiście obiektywną miarą jakości sieci, jednakże z punktu widzenia użytkownika ważniejszy jest rozkład błędów oszacowania zużycia

popelnianych przez sieć w funkcji czasu. Stąd na rysunku 7.22 przedstawiono podsumowanie wyników najlepszych z dotychczas uzyskanych sieci (4W82etm oraz 3W6A) w postaci porównania rzeczywistych przebiegów zużycia (pogrubione, monotoniczne przebiegi) z oszacowanymi przez te sieci.

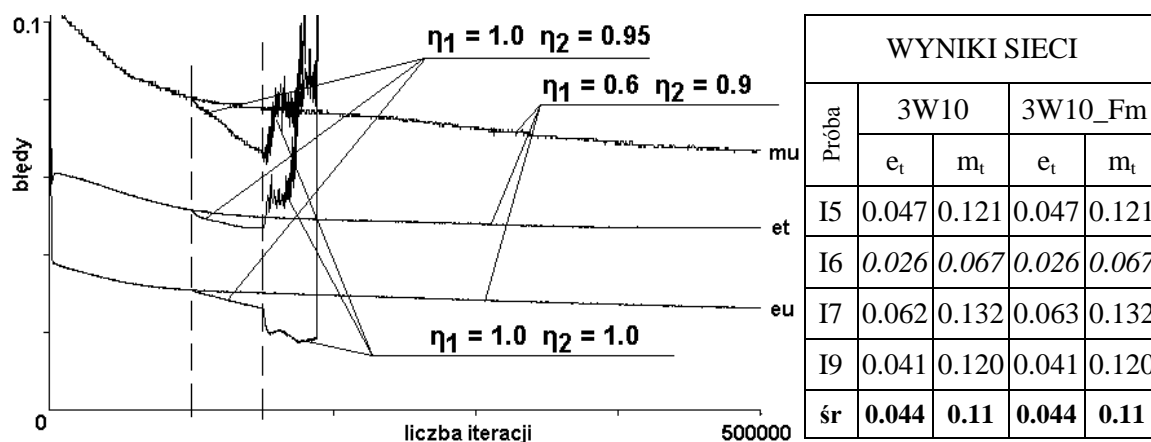
Jak widać na rys. 7.22 dokładność oszacowania zużycia rośnie wraz z jego wartością. Dla $VB_C \approx 0.3$ mm (wielkość odpowiadająca właściwemu dla tych warunków skrawania wskaźnikowi stopienia) przewidywanie to jest bardzo dokładne. Wyniki uzyskiwane przez obie sieci są bardzo zbieżne ze sobą, co świadczy o ich równoważności.

Ostatecznie można zatem przyjąć do dalszych rozważań sieć trzywarstwową.

7. 2. 7. Przyspieszenie uczenia sieci

Przed przystąpieniem do dalszych badań warto spróbować przyspieszyć proces uczenia sieci. O szybkości tego procesu decydują współczynniki η_1 i η_2 , o których pisano w punkcie 7.1. Dotychczas stosowano wartości 0.9 i 0.6 przyjęte w opracowanym programie jako domyślne. Powiększanie ich może przyspieszyć uczenie lecz grozi niestabilnością. Można je zastosować dopiero po wstępnym wytrenowaniu sieci, gdy kierunek zmian wag jest w ustalony i może być przyjęty za właściwy.

Technikę tę postanowiono wypróbować na sieci 4-10-1 (rys. 7.19). Przebieg uczenia sieci przedstawiono na rys. 7.23 na tle uczenia naturalnego powtórnego z rys. 7.19.



rys. 7.23. Przebieg uczenia sieci trzywarstwowej z forsowaniem.

Po wstępnym treningu sieci przez 100 000 iteracji zmieniono współczynniki na $\eta_1 = 1.0$ i $\eta_2 = 0.95$. Uczenie uległo gwałtownemu przyspieszeniu osiągając po zaledwie 50 000 iteracji wartości błędów dokładnie takie same jak osiągnięte przy naturalnym uczeniu po 400 000 iteracji w sieci 3W10. Sieć uzyskaną w ten sposób nazwano 3W10_Fm. Następnie podwyższono η_2 do 1.0 i kontynuowano trening. Błąd średni uczenia szybko znacznie spadł, wzrosły jednakże błędy średnie testowania oraz maksymalne uczenia i testowania. Po ok. 38 700 iteracjach sieć nagle utraciła stabilność i wszystkie błędy gwałtownie wzrosły. Wynika stąd wniosek, że takie zwiększenie współczynnika η_2 jest niewłaściwe. Ponadto ze

względu na nie dość dokładne poznanie działania sieci z forsowaniem, postanowiono tego algorytmu nie automatyzować.

7. 2. 8. Ograniczanie liczby wejść

Wróćmy do omawianego już zagadnienia sygnałów wejściowych do sieci. Liczba informacji dostarczanych sieci jest zależna od liczby wejść. Korzystne jest jej ograniczenie, ponieważ umożliwia to uniezależnienie się sieci od części danych, a przede wszystkim eliminację danych zbędnych, mogących wносить niepotrzebne zakłócenia.

Program symulujący działanie sztucznej sieci neuronowej wyposażono w opcję wstępnej oceny możliwości usuwania wejść czyli ich pruning. Prowadzi się go na wytrenowanej sieci. Polega on na wyzerowaniu kolejno każdego wejścia i wyznaczeniu błędów uczenia oraz testowania po takim zabiegu. Program podaje te błędy oraz błędy przed wyłączeniem wejść i umożliwia stałe wyłączenie któregoś z nich. Na rysunku 7.24 przedstawiono wygląd ekranu w czasie takiej właśnie operacji.

```

NEURAL NETWORK
Ucz Sieć 3W6A.NET: 4(5)-6-1c 0.47 3 3500 1500
Błędy średnie i maksymalne po wyzerowaniu wejść
      f      ap      Fc      Ff
eu=   0.0363  0.1011  0.1029  0.1718
mu=   0.1082  0.2407  0.1842  0.3637
et=   0.0516  0.0925  0.1073  0.1691
mt=   0.1312  0.2282  0.2566  0.3761

eu=
mu=
et=
mt=

Dla kompletnej sieci:
eu=0.0265
mu=0.0677
et=0.0469
mt=0.1210

Wyłączyć któreś wejście ? TN

```

rys. 7.24. Wygląd ekranu programu stosowanego w pracy w czasie pruningu wejść.

Eliminację wejść postanowiono przeprowadzić wychodząc z sieci **3W6A** (trzy warstwy, 6 neuronów w warstwie ukrytej, wejścia f , a_p , F_c i F_f). Jak widać na rysunku 7.24 program zasugerował usunięcie posuwu (najmniejszy przyrost błędów po usunięciu tego wejścia). Po zastosowaniu się do tej sugestii trenowano sieć od początku, tzn. nadano wagom losowe wartości. Po wstępnym nauczaniu przeprowadzono pruning dwu komórek oraz zmianę współczynnika uczenia do 1 i momentum do 0.95. Uzyskano sieć **3W4-f** (4 neurony w warstwie ukrytej, wejścia a_p , F_c i F_f). Z tej sieci usunięto jeszcze siłę główną F_c i trenowano dalej do sieci **3W4-f-Fc** (4 neurony w warstwie ukrytej, wejścia a_p i F_f). Następnie usunięto jeszcze jedną komórkę, i kontynuowano trening do ustabilizowania się błędów. Uzyskano w ten sposób **3W3-f-Fc** (3 neurony w warstwie ukrytej, wejścia a_p i F_f).

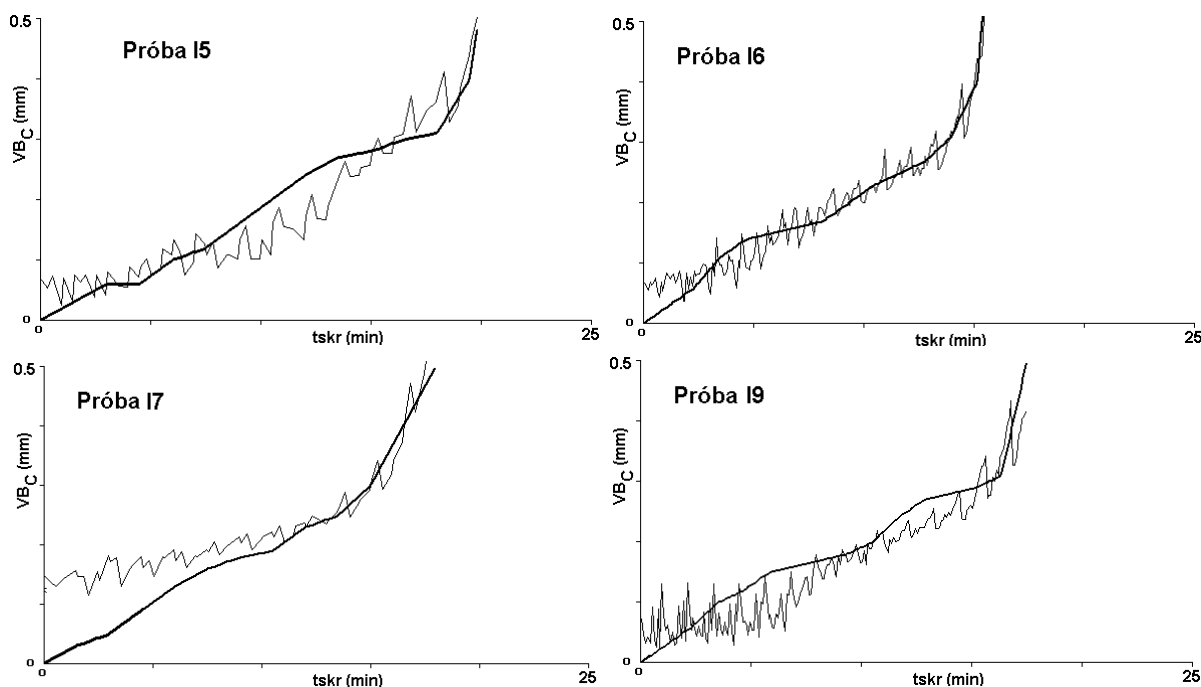
Z kolei podjęto próbę eliminacji głębokości skrawania. Z **3W6A** usunięto a_p i kontynuowano uczenie przez ok. 44 000 iteracji. Ponieważ postępy uczenia ustały, zmieniono η_1 i η_2 na 1 i 0.95. Uzyskano sieć **3W6-ap** (6 neuronów w warstwie ukrytej, wejścia f , F_c i F_f). Mimo niezbyt zachęcających wyników usunięto z niej jedną komórkę i douczono do stanu **3W5-ap** (5 neuronów ukrytych, wejścia f , F_c i F_f).

Wyniki takich eksperymentów przeprowadzonych dla wszystkich czterech prób zestawiono w tabelicy 7.10, poczynając od sieci wyjściowej czyli **3W6A**.

Najkorzystniejsze rezultaty uzyskano dla sieci **3W3-f-Fc**. Porównanie rzeczywistych przebiegów zużycia ostrzy z oszacowanymi przy pomocy tej przedstawiono na rysunku 7.25. Ponownie dla $VB_C \approx 0.3$ mm czyli wskaźnika stępienia wyniki uzyskiwane przez sieć są bardzo dokładne.

Tablica 7.10. Wyniki uzyskane dla sieci z ograniczoną liczbą wejść.

Próba	3W6A		3W4-f		3W4-f-Fc		3W3-f-Fc		3W6-ap		3W5-ap	
	e_t	m_t	e_t	m_t	e_t	m_t	e_t	m_t	e_t	m_t	e_t	m_t
I5	0.046	0.121	0.043	0.111	0.044	0.108	0.043	0.105	0.065	0.181	0.070	0.200
I6	0.026	0.067	0.024	0.065	0.026	0.060	0.026	0.058	0.028	0.074	0.028	0.072
I7	0.062	0.131	0.073	0.159	0.063	0.140	0.064	0.145	0.068	0.221	0.075	0.257
I9	0.040	0.121	0.033	0.089	0.041	0.089	0.041	0.092	0.054	0.12	0.049	0.124
śr	0.044	0.11	0.043	0.106	0.044	0.099	<u>0.044</u>	<u>0.1</u>	0.054	0.149	0.056	0.163

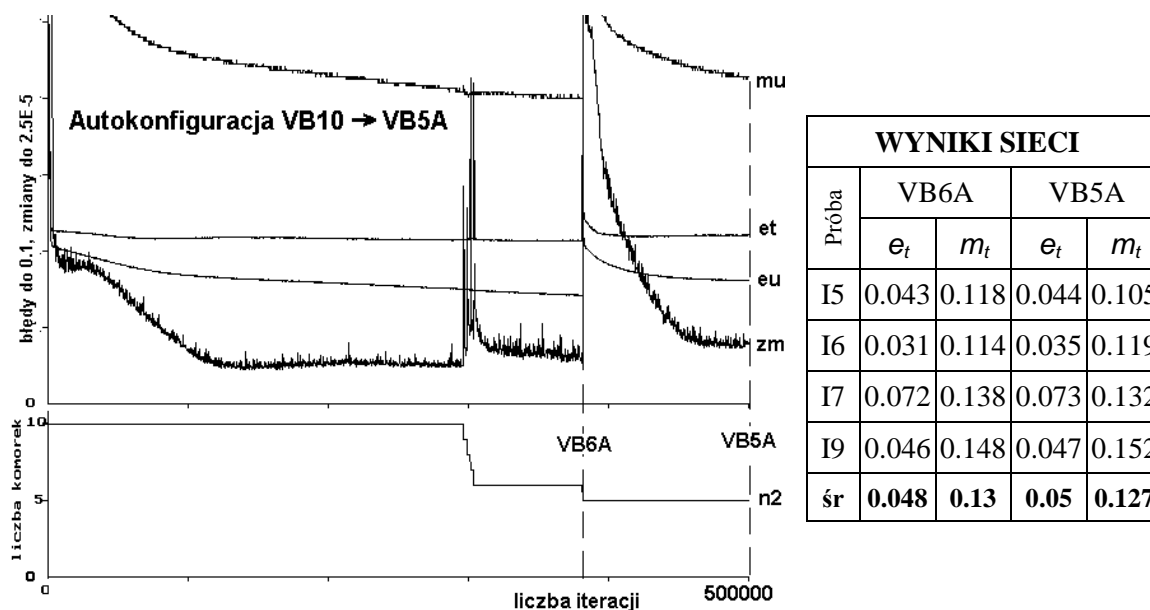


rys. 7.25. Porównanie rzeczywistych przebiegów zużycia ostrzy z oszacowanymi przy pomocy sieci **3W3-f-Fc**.

Sukces sieci **3W3-f-Fc** wynika bezpośrednio z analizy danych pierwotnych: posuw nie wpływa na siłę F_f ale wpływa na F_c . Sukces sieci uczonej bez posuwu, a z siłą główną F_c (**3W4-f**), wynika stąd, iż siła F_c niesie niewiele informacji o zużyciu. To wniosek nie nowy – z analizy przedstawionej w punkcie 7.2.5 wynikało, że F_c przydaje się tylko do identyfikacji głębokości skrawania. Tam jednakże stosowano siłomierz laboratoryjny i pomiar siły głównej nie był zakłócony sprzężeniem skrośnym. Tu siła główna, a raczej odpowiadający jej sygnał z czujnika przemysłowego zależy w pewnym stopniu od siły F_f , a wyeliminowanie a_p się nie udało. Potwierdza to przedstawione w 7.2.5 wnioski mówiące, że informacja o głębokości skrawania jest niezbędna dla oddzielenia jej wpływu na siłę F_f , która to siła nie jest istotnie zależna, a więc przy korzystaniu z siły posuwowej ta informacja jest zbędna. Jest ona potrzebna do interpretacji wartości siły głównej, ale ta niewiele mówi o zużyciu i praktycznie można ją pominąć.

7. 2. 9. Oszacowanie zużycia powierzchni przyłożenia w strefie środkowej

Dotychczas zajmowano się zużyciem powierzchni przyłożenia na narożu (VB_C), jako że jego przebieg nie jest zakłócony zmianami głębokości skrawania. Warto jednak podjąć próbę wykorzystania sieci do oszacowania zużycia powierzchni przyłożenia w strefie środkowej (VB_B), które to zużycie w większym stopniu niż VB_C wpływa na siły skrawania.



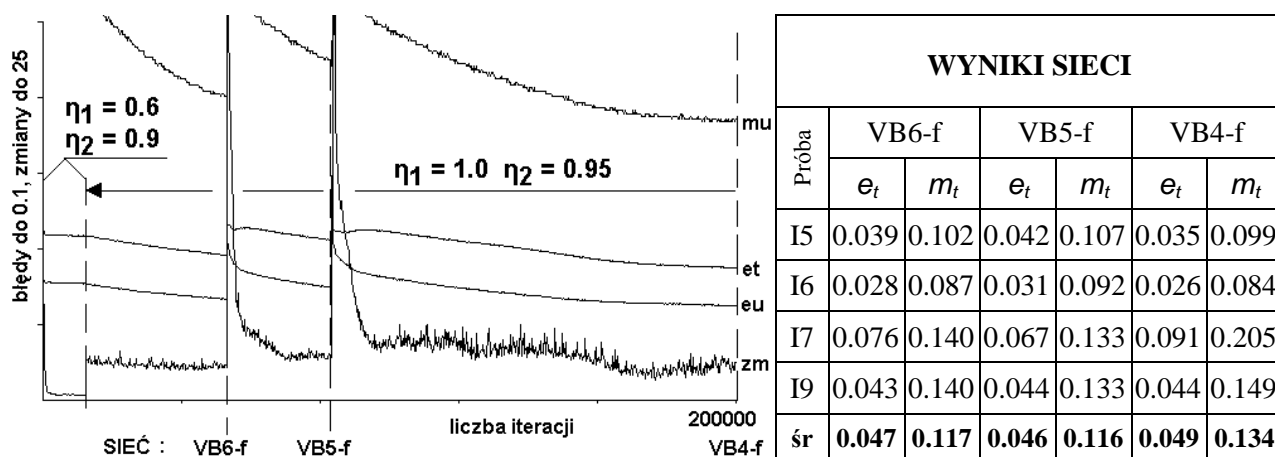
rys. 7.26. Przebieg autokonfiguracji sieci 3-warstwowej dla VB_B .

Na wstępie powtórzono autokonfigurację sieci trzywarstwowej (tu będą w użyciu jedynie sieci trzywarstwowe). Jak poprzednio zbiorem uczącym były wyniki próby I6, zaś zbiorem walidującym próby I5. Do ostatecznej weryfikacji uzyskanych sieci postanowiono tu użyć pełnych wyników wszystkich 6 prób. Przebieg tej autokonfiguracji przedstawiono na rys. 7.26. Jest on dość podobny do przedstawionego na rys. 7.23 (dla VB_C), z tym że tu pruning czterech komórek nastąpił dopiero po ok. 400 000 iteracji (tyle było potrzeba do uzyskania zadanego błędu uczenia $eu_{pr} = 0.03$). Mimo szybkiego usunięcia aż czterech komórek

błędy prawie natychmiast wracały do wartości z przed pruningu, co świadczy o tym, że sieć komórek tych rzeczywiście nie potrzebowała. Po ok. 80 000 następnym iteracji usunięta została 5-ta komórka. Tym razem błędy znacznie wzrosły i nie spadły do poprzedniej wartości nawet po ok. 120 000 iteracji. Do dalszych rozważań postanowiono zatem przyjąć sieć z 6-ma komórkami w warstwie ukrytej: **VB6A**.

Podobnie jak w przypadku zużycia powierzchni przyłożenia w rejonie naroża i tu podjęto próbę redukcji danych wejściowych, stosując zarazem wypracowane techniki forsownego treningu sieci. Tu „ręcznie” sterowano uczeniem sieci obserwując przebieg zmian błędów uczenia i testowania.

Z sieci **VB6A** usunięto posuw i w celu ustabilizowania jej uczono konwencjonalnie przez 1250 iteracji ($\eta_1 = 0.6$, $\eta_2 = 0.9$) – patrz rys. 7.27. Następnie zmieniono współczynniki na $\eta_1 = 1.0$, $\eta_2 = 0.95$, czyli rozpoczęto uczenie forsowne. Przejawiło się to kilkukrotnym zwiększeniem średnich zmian sieci (uwaga! na rys. 7.27 skala zmian sieci jest dziesięciokrotnie większa niż na poprzednich rysunkach!). Zgodnie z oczekiwaniami zwiększyła się także prędkość uczenia sieci. Po 53 100 iteracjach sieć osiągnęła stan, który zapamiętano jako **VB6-f** i usunięto komórkę o najmniejszej zmienności. Spowodowało to znaczny wzrost błędów, jednakże szybko sieć „odrobiła” te straty. Po 83 470 iteracjach zapamiętano stan sieci jako **VB5-f** i usunięto kolejną komórkę. Sytuacja się powtórzyła, choć tym razem spadek błędów był wolniejszy. Trening kontynuowano do 200 000 iteracji.



rys. 7.27. Przebieg błędów w czasie treningu sieci z forsowaniem i pruningem komórek

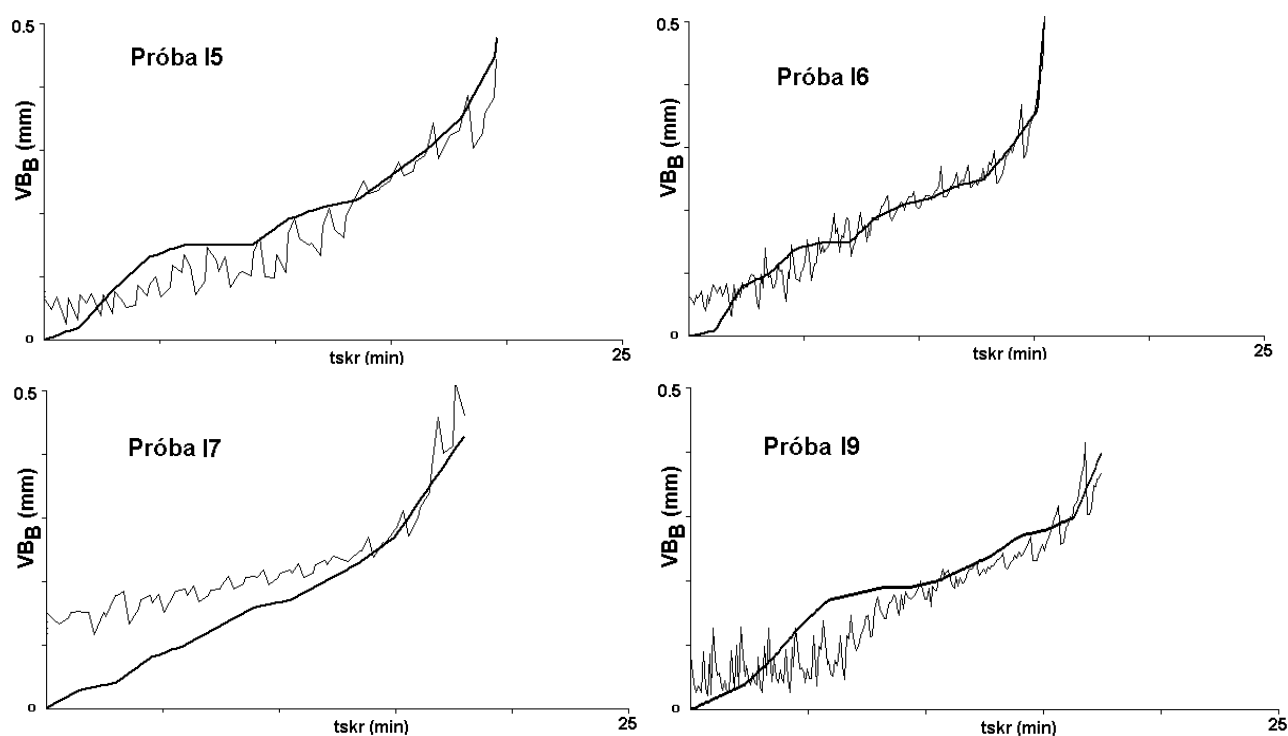
Na zakończenie z sieci **VB4-f** usunięto siłę główną i po forsownym wytrenowaniu uzyskano sieć **VB4-f-Fc**. Błędy tej sieci były mniejsze niż dla sieci, w których uwzględniano informację o sile głównej. Zestawiono je w tablicy 7.11

Ostateczną ocenę działania uzyskanych sieci w postaci porównania rzeczywistych przebiegów zużycia z oszacowanymi przez sieci przedstawiono na rys. 7.28. Podobnie jak w przypadku zużycia w strefie naroża (rys. 7.25), najdokładniejsze przewidywanie uzyskuje się dla wartości zbliżonych do krytycznych. I podobnie jak poprzednio dość słabo wypadła dokładność sieci w próbie I7 dla małych wartości zużycia.

Tablica 7.11. Błędy sieci **VB4-f-Fc** przy ocenie zużycia VB_B we wszystkich próbach.

próba	e_t	m_t
I5	0.039	0.102
I6	0.028	0.087
I7	0.076	0.140
I9	0.043	0.140
śr	0.047	0.117

Ogólnie powiedzieć można, że dla analizowanych prób, sieć o strukturze 2-4-1, gdzie wejściami są jedynie siła posuwowa i głębokość skrawania równie dobrze nadaje się do oceny zużycia powierzchni przyłożenia w strefie naroża jak w strefie natarcia.



rys. 7.28. Porównanie rzeczywistych przebiegów zużycia powierzchni przyłożenia w strefie środkowej, z oszacowanymi przy pomocy sieci **VB4-f-Fc**.

7. 3. Logika rozmyta

7. 3. 1. Wybrane aspekty logiki rozmytej

Logika rozmyta wywodzi się z teorii zbiorów rozmytych. Określenia takie jak „zimne”, „chłodne”, „dość ciepłe”, „bardzo ciepłe”, „gorące” mogą być opisane matematycznie i przetwarzane komputerowo. Podejmowanie decyzji oparte na lingwistycznych zasadach wnioskowania zaprezentowane zostało po raz pierwszy przez prof. Lotfi A. Zadeh w [254], jako metoda radzenia sobie z niejasno sformułowanymi pojęciami w formie słownej lub lingwistycznej. W tradycyjnej teorii zbiorów i przetwarzania danych zbior

elementów jest ściśle określony i pojedynczy element należy do tego zbioru lub nie. W teorii zbiorów rozmytych, element może należeć do wielu zbiorów z różnym stopniem przynależności. Taka logika jest znacznie bliższa rzeczywistości zwłaszcza potocznej i zgodna z naturalnym sposobem rozumowania człowieka. Wyobraźmy sobie zbiór jabłek czerwonych i zbiór jabłek zielonych. Weźmy przypadkowe jabłko – bardzo często okaże się, że jest ono częściowo zielone a częściowo czerwone. W logice tradycyjnej, należałoby stworzyć dodatkowo zbiór jabłek częściowo czerwonych, a mimo to nieraz mielibyśmy problem, czy jabłko jaśniejsze z jednej strony już zaliczyć do czerwono – zielonych, czy do czerwonych. Logika rozmyta umożliwia rozwiązywanie takich właśnie problemów – każde jabłko jest w jakimś procencie czerwone (0÷100%) i w jakimś zielone (0÷100%), czyli w różnym stopniu przynależy do obu zbiorów. Wracając do obróbki skrawaniem – stwórzmy zbiór sił skrawania „niskie”, co będzie znaczyło ~300 N i drugi „wysokie” co oznacza ~600 N. Zarejestrowana siła 400 N będzie jednocześnie należała do obu tych zbiorów, lecz ponieważ jest bliższa „niskim” niż „wysokim”, przynależność do pierwszego z nich będzie większa niż do drugiego. Możemy powiedzieć, że siła o wartości 400 N jest w 66% „niska”, zaś w 33% „wysoka”. Taka właśnie charakterystyka stanowi podstawę teorii zbiorów rozmytych i jest całkowicie odmienna od klasycznej teorii zbiorów. W klasycznej teorii moglibyśmy mieć np. zbiór „niskie” określony jako $0 < F \leq 450$ oraz „wysokie” określony jako $450 < F$. Każda wartość należałaby tylko do jednego z tych zbiorów, a wartość 400 N byłaby po prostu równie niska jak 300 N. Już taki bardzo uproszczony opis pokazuje jak atrakcyjne możliwości niesie w sobie logika rozmyta.

Podstawowymi zaletami systemów logiki rozmytej (SLR) są [18]:

- brak konieczności tworzenia modelu matematycznego – baza wiedzy tworzona jest w postaci zestawu praktycznych reguł
- baza wiedzy definiowana jest jako zestaw praktycznych zasad wnioskowania za pośrednictwem zmiennych lingwistycznych
- duża skuteczność wnioskowania przy danych zakłóconych lub niepewnych, które występują nader często w zastosowaniach przemysłowych
- zwartość danych wejściowych i duża prędkość przetwarzania.

Wiedza w systemach logiki rozmytej (SLR) tworzona jest przez ekspertów jako zestaw heurystycznych reguł wnioskowania typu MIMO (multiple input multiple output), które można zapisać w postaci:

jeśli x_1 jest X_1 i x_2 jest X_2 ... i x_n jest X_n to y_1 jest Y_1 , y_m jest Y_m

gdzie: $X = \{X_1...X_n\}$ oznacza zbiór n wartości zmiennych lingwistycznych $x = \{x_1...x_n\}$ będących przesłankami wnioskowania

$Y = \{Y_1...Y_m\}$ jest zbiorem m wartości zmiennych lingwistycznych $y = \{y_1...y_m\}$ będących wnioskami

Zadanie operatora SLR sprowadza się najczęściej do stworzenia zestawu kilku lub kilkunastu prostych reguł takich jak pokazana wyżej. Należy tylko wyjaśnić co, w logice rozmytej, oznaczają stosowane w praktyce operatory koniunkcji „*i*”, alternatywy „*lub*” czy negacji „*nie*”:

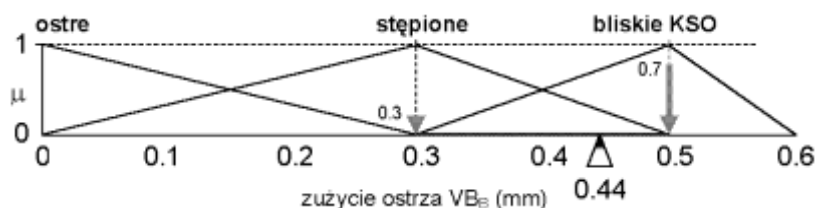
$$i: \quad \mu_{A \wedge B} = \min\{\mu_A, \mu_B\}$$

$$lub: \quad \mu_{A \vee B} = \max\{\mu_A, \mu_B\}$$

$$nie: \quad \mu_{\neg A} = 1 - \mu_A$$

Istotne jest również to, że obowiązują tu identyczne prawa jak przy klasycznym rachunku zbiorów (rozdzielności koniunkcji względem alternatywy itd.). Jako wynik wnioskowania otrzymuje się lingwistyczną wartość zmiennej wyjściowej określoną stopniem przynależności do każdego ze zbiorów rozmytych, na które podzielony został zakres zmienności. Taką postać zmiennej wyjściowej można następnie przetłumaczyć na wartość rzeczywistą według metody Środka Ciężkości. Wyobraźmy sobie, że tą zmienną wyjściową będzie zużycie ostrza, określona wartościami lingwistycznymi **ostre** (~0), **stępione** (~0.3) i **bliskie KSO** (~0.5). Jeśli z zastosowania jednej z reguł wyniknie, że ostrze jest **stępione** ze stopniem przynależności $\mu = 0.3$, a z innej reguły, że jest **bliskie KSO** ze stopniem przynależności $\mu = 0.7$, to dyskretną wartość zużycia ostrza wyznacza się jako sumę zmiennej lingwistycznej (patrz rys. 7.29):

$$VB_B = 0.3 \cdot 0.3 + 0.7 \cdot 0.5 = 0.44 \text{ mm}$$



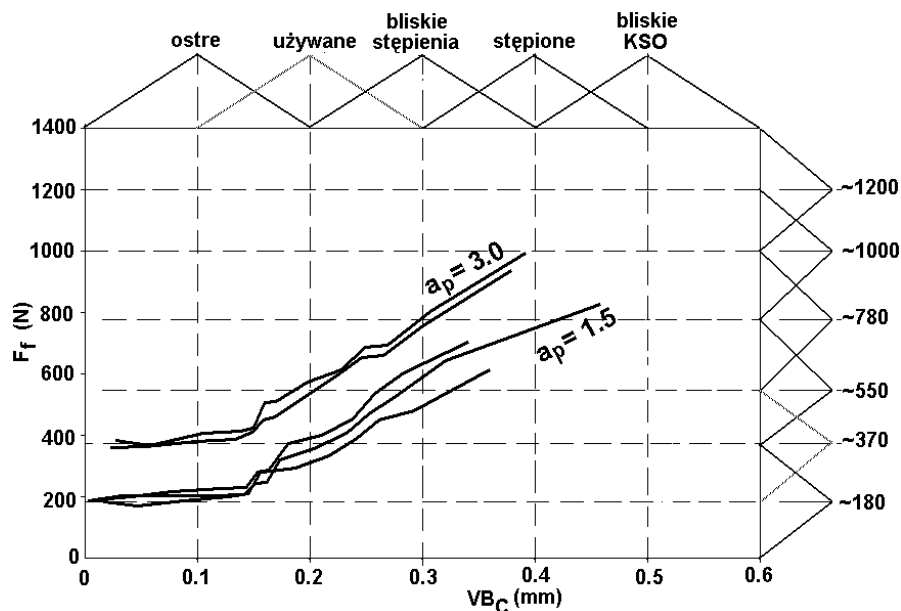
rys. 7.29. Wyznaczanie wartości rzeczywistej wyjścia na podstawie zmiennych lingwistycznych metodą Środka Ciężkości.

7. 3. 2. Tworzenie bazy wiedzy do oceny zużycia ostrza

Podobnie jak dla sieci neuronowych omawianych w poprzednich punktach postanowiono opracować system logiki w oparciu jedynie o wyniki próby I6, a testować jego skuteczność na wszystkich czterech próbach. Jak stwierdzono wcześniej, w zastosowanych warunkach skrawania siła główna zależy od głębokości skrawania, posuwu i zużycia ostrza, przy czym ta ostatnia zależność jest dość słaba (patrz rys. 7.9 i 7.10). Badania nad sieciami neuronowymi wykazały nieprzydatność wyników pomiarów tej siły do oceny stanu narzędzia (choć może być przydatna do identyfikacji parametrów skrawania).

Na rys. 7.30 przypomniano pokazywaną już na rys. 4.22 zależność siły posuwowej F_f od zużycia ostrza w strefie naroża w próbie I6. Jak widać siła posuwowa zależy od głębokości skrawania i zużycia ostrza, zaś wpływ posuwu ujawnia się dopiero przy wyższych wartościach zużycia. Zostanie on pominięty właśnie ze względu na zależność od zużycia które ma być ocenianie. Budowę systemu logiki rozmytej

rozpoczniemy od wyznaczenia zbiorów rozmytych dla zużycia i siły F_f . Zastosujemy przy tym funkcje przynależności klasy t czyli trójkątne, rozmieszczone tak, by suma przynależności do zbiorów zawsze była równa 1 (poza brzegami dziedziny wartości zmiennych). Tworzy się je w oparciu o przedstawioną na rys. 7.30 zależność $F_f - VB_C$. Na wstępie zauważmy, że przy małych wartościach zużycia siła pozostaje w przybliżeniu na stałym poziomie: ~ 180 N dla $a_p = 1.5$ mm i ~ 370 N dla $a_p = 3$ mm. Niech to będą pierwsze dwa zbiory rozmyte dla siły posuwowej, którym odpowiadać będzie zużycie ostrza określane jako „ostre” ($VB_C \approx 0.1$ mm). Przy $a_p = 1.5$ mm siły osiągają poziom ~ 370 N dla zużycia ostrza ~ 0.2 mm. Przy $a_p = 3$ mm zużyciu temu odpowiada siła $F_f \approx 550$. Mamy zatem kolejny zbiór rozmyty dla zużycia ostrza: „używane” ($VB_C \approx 0.2$ mm) i odpowiadającej mu sile $F_f \approx 550$ N. Postępując analogicznie możemy stworzyć kolejne zbiory dla zużycia ostrza: „bliskie stępienia” ($VB_C \approx 0.3$ mm), „stępione” ($VB_C \approx 0.4$ mm) i „bliskie KSO” ($VB_C \approx 0.5$ mm). Dalsze zbiory wartości siły skrawania wynikające z rysunku 7.30 to: ~ 780 , ~ 1000 i ~ 1200 . Te ostatnie zostały określone przez przybliżoną ekstrapolację przebiegów siły F_f w funkcji zużycia ostrza przedstawioną na rys. 7.30.



rys. 7.30. Tworzenie zbiorów rozmytych dla siły F_f i zużycia ostrza VB_C .

Należy stworzyć reguły do bazy wiedzy. Również one wynikają bezpośrednio z rys. 7.30:

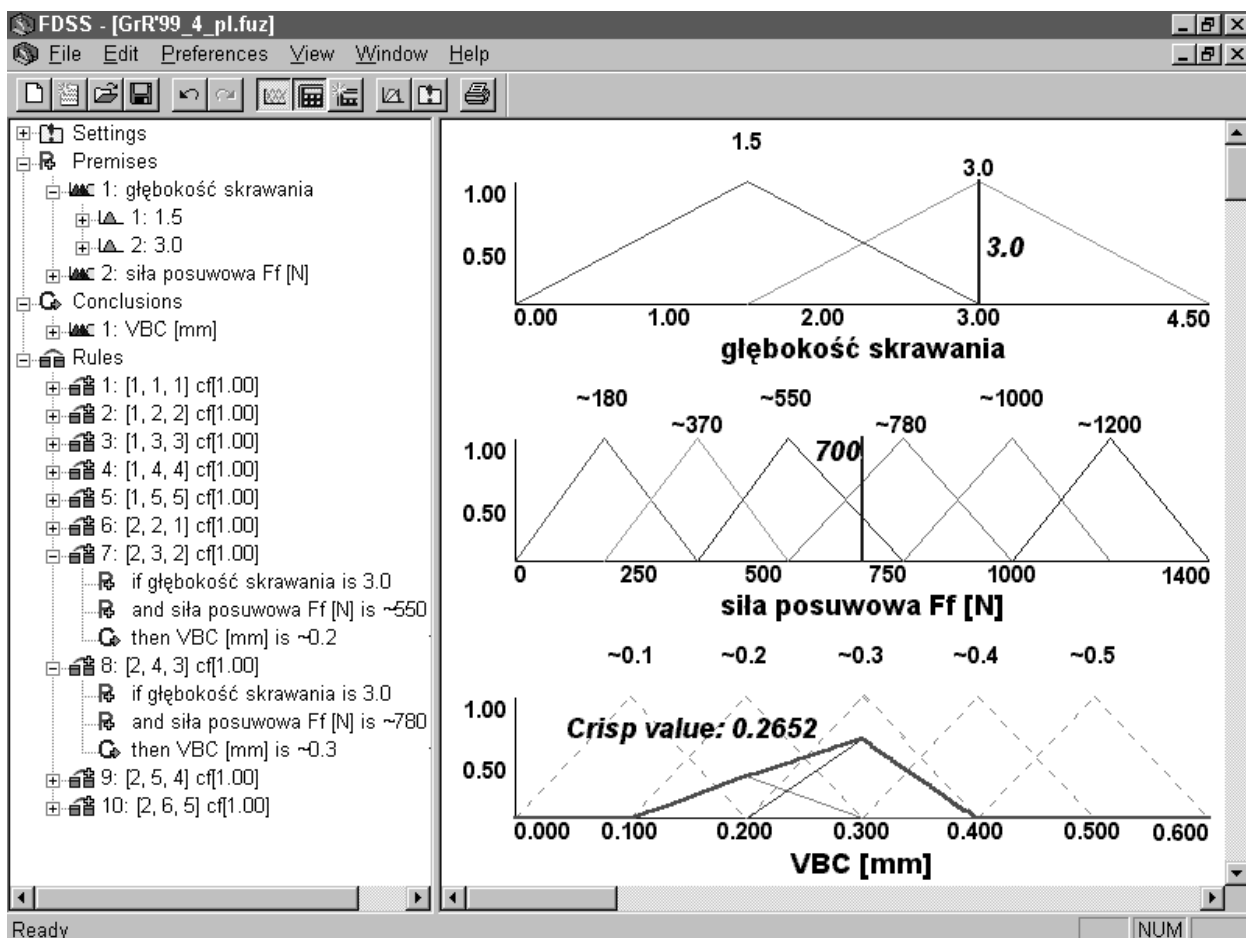
- Reguła 1: **jeśli** $a_p = 1.5$ mm **i** $F_f = 180$ N **to** narzędzie jest ostre ($VB_C = 0.1$ mm)
- Reguła 2: **jeśli** $a_p = 1.5$ mm **i** $F_f = 370$ N **to** narzędzie jest używane ($VB_C = 0.2$ mm)
- Reguła 3: **jeśli** $a_p = 1.5$ mm **i** $F_f = 550$ N **to** narzędzie jest bliskie stępienia ($VB_C = 0.3$ mm)
- Reguła 4: **jeśli** $a_p = 1.5$ mm **i** $F_f = 780$ N **to** narzędzie jest stępione ($VB_C = 0.4$ mm)
- Reguła 5: **jeśli** $a_p = 1.5$ mm **i** $F_f = 1000$ N **to** narzędzie jest bliskie KSO ($VB_C = 0.5$ mm)
- Reguła 6: **jeśli** $a_p = 3.0$ mm **i** $F_f = 370$ N **to** narzędzie jest ostre ($VB_C = 0.1$ mm)
- Reguła 7: **jeśli** $a_p = 3.0$ mm **i** $F_f = 550$ N **to** narzędzie jest używane ($VB_C = 0.2$ mm)
- Reguła 8: **jeśli** $a_p = 3.0$ mm **i** $F_f = 780$ N **to** narzędzie jest bliskie stępienia ($VB_C = 0.3$ mm)

Reguła 9: **jeśli** $a_p = 3.0$ mm **i** $F_f = 1000$ N **to** narzędzie jest stępione ($VB_C = 0.4$ mm)

Reguła 10: **jeśli** $a_p = 3.0$ mm **i** $F_f = 1200$ N **to** narzędzie jest bliskie KSO ($VB_C = 0.5$ mm)

7. 3. 3. Przewidywanie zużycia ostrza w oparciu o system logiki rozmytej

Opisane wyżej zbiory rozmyte i bazę wiedzy wprowadzono do programu „Fuzzy Decision Support System Fuzzy -Flou” opracowanego w Ecole Polytechnique w Montrealu oraz w Politechnice Śląskiej w Gliwicach [17]. Program ten został udostępniony ITM PW w ramach współpracy naukowej [19, 93] z jednym z głównych autorów programu - prof. Markiem Bałazińskim z Ecolé Polytechnique.

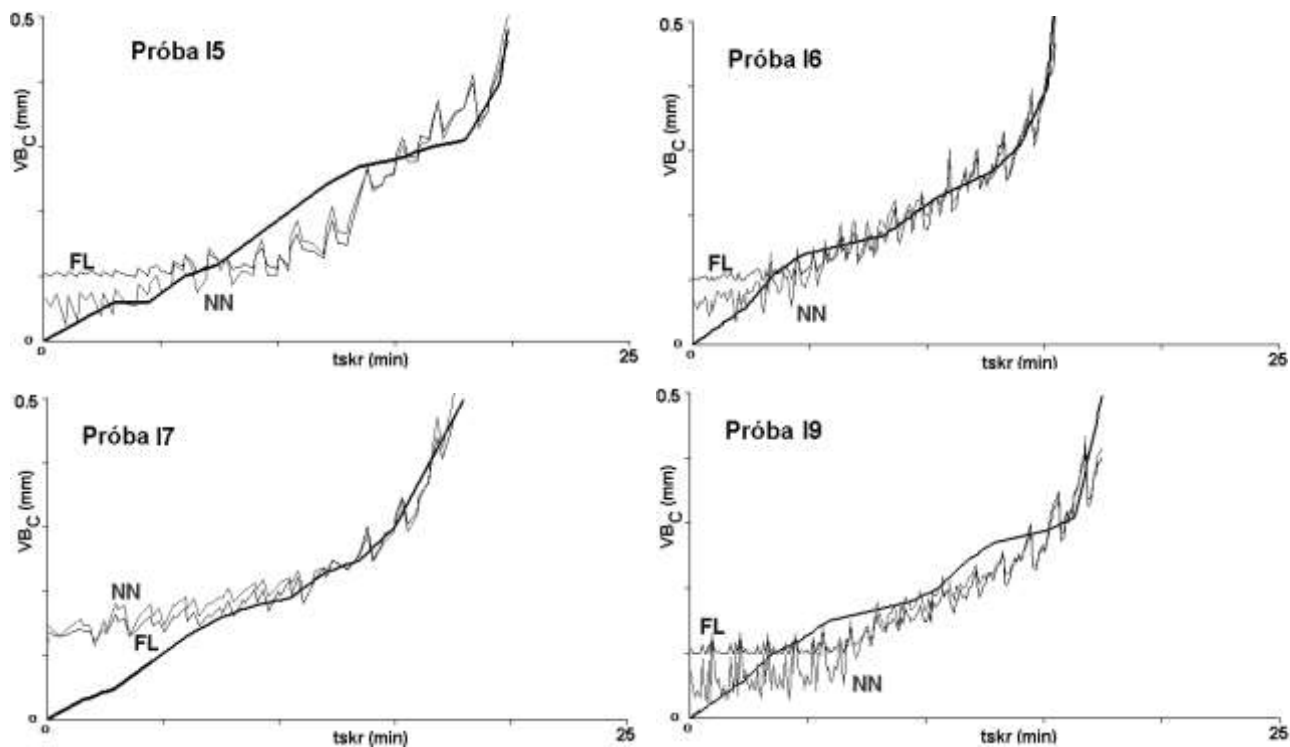


rys. 7.31. Program FDSS w czasie pracy.

Na rys. 7.31 przedstawiono wygląd ekranu programu w czasie pracy. Po jego lewej stronie widoczne są przesłanki, wnioski i reguły omówione wyżej. Prawa, większa część ekranu pokazuje zbiory rozmyte odpowiadające przesłankom i wnioskom oraz działanie programu dla określonej wartości wejść: $a_p = 3$ mm i $F_f = 700$ N. Wartość głębokości skrawania należy tylko do jednego zdefiniowanego zbioru rozmytego: „3 mm”. Siła posuwowa należy w pewnej mierze do „~550” i w większej mierze do „~780”. Sytuacja ta opisywana jest przez reguły 7 i 8, a więc odpowiadające im wnioski: „ $VB_C = 0.2$ mm” i „ $VB_C = 0.3$ mm” są aktywowane w stopniu odpowiadającym przynależności siły F_f do zbiorów „~550” i „~780”. Widać to dobrze na rys. 7.31. Oba trójkąty wraz z linią łączącą ich wierzchołki tworzą figurę (czworobok), której

środek ciężkości określa dyskretną wartość („*crisp value*”) odpowiedzi systemu na zadane wartości wejść - tu wynosi ona 0.2652 mm.

Analogiczne operacje przeprowadzono dla wszystkich wartości wejść, wszystkich czterech prób, a wyniki porównania oszacowania zużycia ostrza z uzyskanymi z systemu logiki rozmytej i sieci neuronowej **3W3-f-Fc** zestawiono na rys. 7.32. Ocenę błędów zawiera tablica 8.1.



rys. 7.32. Porównanie rzeczywistych przebiegów zużycia powierzchni przyłożenia z oszacowanymi przy pomocy logiki rozmytej (FL) i sieci neuronowej (NN).

Tablica 7.12. Porównanie błędów oszacowania zużycia ostrza przez sieć neuronową i system logiki rozmytej

Próba	sieć neuronowa		logika rozmyta	
	e_t	m_t	e_t	m_t
I5	0.043	0.105	0.054	0.111
I6	0.027	0.069	0.036	0.103
I7	0.064	0.145	0.0552	0.136
I9	0.042	0.105	0.045	0.105
średni	0.044	0.106	0.0476	0.114

Wyniki uzyskane przez system logiki rozmytej okazały się tu nieco gorsze, jednak pamiętać należy o tym, że bazę wiedzy i zbiory rozmyte budowano intuicyjnie na podstawie rysunku. Można przypuszczać, że zastosowanie metod matematycznych, poprawiłoby ten wynik.

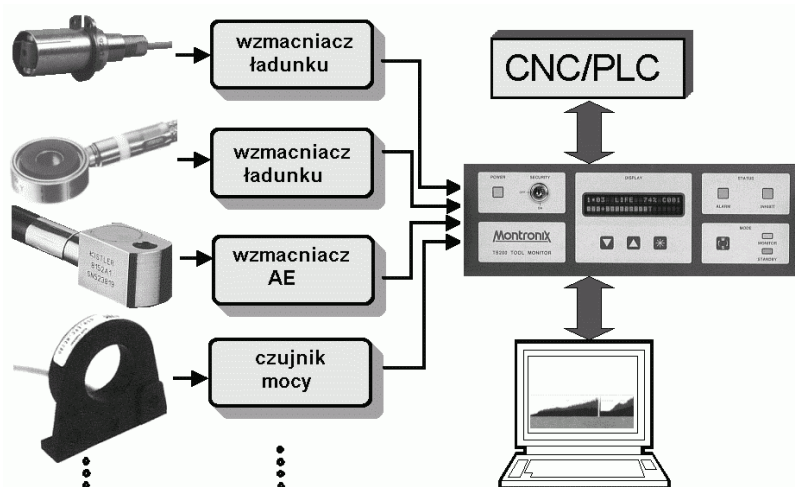
Porównując ze sobą dwie zastosowane metody sztucznej inteligencji należy stwierdzić, że uzyskane wyniki są zbliżone pod względem dokładności. Przewagą sieci neuronowej jest pełne zobiektywizowanie przygotowania danych wejściowych i uniezależnienie tego przygotowania od kwalifikacji użytkownika. Budowa bazy wiedzy logiki rozmytej wymaga doświadczenia i znajomości rzeczy. Z drugiej strony dobór struktury sieci neuronowej dającej najniższe błędy w rozpatrywanym przedziale zużycia i jej wytrenowanie wymaga wielu godzin pracy i pewnego doświadczenia. System logiki rozmytej gotów jest do użytku natychmiast po przygotowaniu, którego czas trwania w dużej mierze zależy od doświadczenia. Można zatem uznać omawiane metody raczej za komplementarne niż konkurencyjne.

8. PRZEMYSŁOWE UKŁADY DNiPS

Literatura przedmiotu związana z diagnostyką stanu narzędzia i procesu skrawania jest niezwykle liczna (patrz np. [25, 85, 216, 217, 218]). Przedstawiono w niej wiele pomysłów, podejść i metod zmierzających do rozwiązania problemu DNiPS. Z drugiej strony samej natury badań naukowych wynika luka między nauką i praktyką przemysłową. Czas „od pomysłu do przemysłu” jest długi, a każda nowa technologia musi dojrzeć do praktycznego zastosowania [157]. Niektóre prace badawcze w omawianej dziedzinie nie są dostatecznie dopracowane, by mogły być wykorzystane w układach komercyjnych, inne są wciąż na etapie badań rozpoznawczych, lub pół przemysłowych. W określonym momencie czasu istnieje szereg pomysłów i możliwości rozwiązania danego zagadnienia, które potencjalnie mogą w przyszłości stać się użyteczne możliwe do ekonomicznego wykorzystania. Jednakże wiele z nich nigdy nie będzie stosowanych, ponieważ okażą się nie dość niezawodne lub zbyt drogie. Inne zapewne będą po prostu nieudane. Ponieważ ostatecznym celem wszystkich wspomnianych prac jest budowa przemysłowych układów DNiPS, przegląd istniejących układów produkowanych na sprzedaż (i kupowanych!) wydaje się niezbędnym i bardzo pouczającym, elementem każdego większego opracowania na temat DNiPS, tego więc także.

Mimo iż istnieje wiele firm produkujących różne układy nadzorujące i wyposażenie do nich, tu wzięte pod uwagę będzie jedynie sześć wiodących: Artis, Brankamp, Kistler, Montronix, Nordmann i Promotec.

Strukturę ideową układów DNiPS przedstawiono we wstępie, na rysunku 1.3. Przechodząc do omawiania istniejących, komercyjnych układów, spójrzmy na ich ogólny schemat budowy. Każdy układ DNiPS składa się z czujników, przedwzmacniaczy i jednostki centralnej, czyli właściwego układu DNiPS, który tu, dla uproszczenia będziemy nazywać monitorem (rys. 8.1). Omówimy pokrótce te elementy.



rys. 8.1. Budowa układów DNiPS.

8. 1. Czujniki

Czujnik jest kluczowym elementem każdego układu DNiPS. W literaturze znaleźć można opis wielu różnych czujników, wykorzystujących różne wielkości fizyczne występujące w procesie skrawania, a większość z nich została omówiona w rozdziale czwartym, jednakże tylko nieliczne znalazły zastosowanie w układach handlowych. Zestawienie tych ostatnich przedstawiono w tablicy 8.1, a najbardziej typowe można zobaczyć na rysunkach 4.1, 4.3, 4.5÷4.13, 4.23, 4.33÷4.43.

Tablica 8.1. Czujniki stosowane w handlowych układach DNiPS.

Wielkość fizyczna (typ czujnika)		PRODUCENT UKŁADÓW DNiPS					
		Artis	Brankamp	Kistler	Montronix	Nordmann	Prometec
Siła skrawania i wielkości pochodne	Moc	○	○		○	○	○
	Moment skręcający	○		○	○		
	Odształcenie materiału		○	○	○		○
	Dystans/przemieszczenie					○	○
	1÷3 osiowy czujnik sił	○	○	○	○		○
	Płyta pomiarowa			○	○		○
AE	Emisja akustyczna	○	○	○	○	○	○
	Cieczowy czujnik AE					○	○
	Obrotowy czujnik AE	○				○	○
Inne	Drgania i ultradźwięki			○	○		○
	Kamera	○	○				
	Laser	○				○	

Ogólnie powiedzieć można, iż w dostępnych na rynku układach DNiPS najczęściej wykorzystuje się czujniki sił skrawania i wielkości pochodnych jak moc, moment, odkształcenie czy przemieszczenie. Są one obecnie dość łatwe do zainstalowania na istniejących lub nowych obrabiarkach, bez naruszania ich struktury i obniżania sztywności. Wszyscy producenci stosują także czujniki emisji akustycznej, zwłaszcza do nadzorowania małych narzędzi oraz do szlifowania. Pewne zastosowanie znajdują także czujniki drgań oraz optyczne (kamera, laser).

8. 2. Przekazywanie i obróbka sygnału

Ogólnie przyjętym rozwiązaniem jest oddzielny układ wstępnej obróbki sygnału zbudowany specjalnie do każdego typu czujnika. Tu dla uproszczenia będziemy układy te nazywali wzmacniaczami, choć zawierają one zwykle także szereg innych układów (patrz np. rys. 4.13 i 5.14). Są one umieszczane w stalowych, szczelnych obudowach, są odporne na drgania i izolowane elektrycznie (patrz np. rys. 4.13,

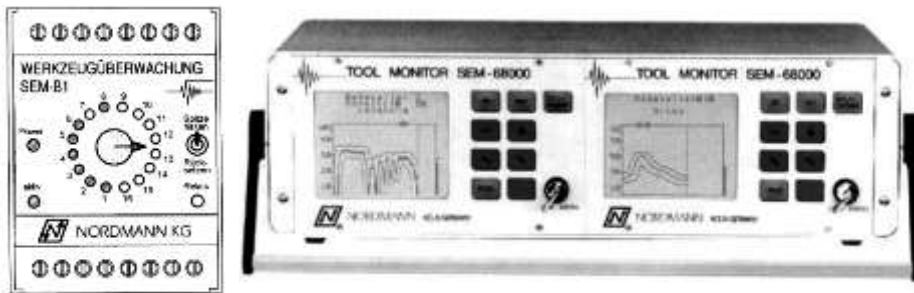
4.40). Kable przyłączeniowe w razie potrzeby są umieszczone w stalowym pancerzu ochronnym (rys. 4.7, 4.11, 4.12, 4.14, 4.40 i 4.41). Tak więc zarówno czujniki jak kable, połączenia i wzmacniacze stosowane w układach DNiPS są obecnie bardzo dobrze przystosowane do trudnych warunków panujących w strefie obróbki, w której występuje rozchlapywanie chłodziwa i uderzają wióry.

Czujniki sił, emisji akustycznej i drgań są przetwornikami piezoelektrycznymi, stąd obsługujące je wzmacniacze zamieniają ładunek elektryczny na proporcjonalny sygnał napięciowy, filtrują go i przekazują do monitora, gdzie jest na wstępie zamieniany na postać cyfrową, a następnie analizowany zgodnie z przyjętą strategią. Wszystkie wzmacniacze emisji akustycznej, a czasem także sygnałów drganiowych [45] wyznaczają ponadto wartość skuteczną sygnału, która ma znacznie mniejszą częstotliwość niż sygnał oryginalny (surowy) jest więc znacznie łatwiejsza do dalszej obróbki i analizy (patrz np. rys. 5.14). Wprawdzie wzmacniacze AE mają wyjścia sygnału oryginalnego, jednakże jest on wykorzystywany wyłącznie do diagnostyki samego układu oraz w badaniach naukowych.

8. 3. Budowa układów przemysłowych DNiPS

O ile przedwzmacniacze są przystosowane do określonych czujników, jednostki centralne zwykle mogą współpracować z dowolnym zestawem czujnik-przedwzmacniacz, jako że działają już w oparciu o sygnały napięciowe. Występują dwie podstawowe konfiguracje układów diagnostyki stanu narzędzia i procesu skrawania: zwarta i modułowa. Firmy Montronix, Brankamp, Nordmann i Kistler produkują układy o budowie zwartej, w której podstawowym elementem układu jest jednostka centralna – monitor.

Sygnały generowane przez czujniki i wstępnie przygotowane przez wzmacniacze są przesyłane do monitora, który jest bezpośrednio połączony z układem sterowania obrabiarki (PLC/CNC). Jedynie firma Kistler, będąca przede wszystkim producentem bardzo dobrych czujników siły, odkształceń i drgań, oferuje jeden (CoMoII) uniwersalny monitor [52, 34]. Większość producentów oferuje szereg rozwiązań – od prostych (i tanich) jednokanałowych, wyposażonych jedynie w podstawowe funkcje, do złożonych, opartych na bardziej wyrafinowanych strategiach, mogących nadzorować jednocześnie szereg narzędzi [77, 86]. Pozwala to na łatwiejsze zaspokojenie potrzeb użytkownika, a ponadto, jak się okazało, rozwiązania przystosowane do określonego zastosowania lepiej spełniają swoją rolę niż uniwersalne [136]. Np. monitor SEM-B1 firmy Nordmann (rys. 8.2) jest jednokanałowym monitorem opartym na jednej granicy (możliwych jest jedynie jej szesnaście poziomów) nastawianej ręcznie lub z programu NC. Jest on wyposażony w szesnastopozycyjny wyświetlacz LED pokazujący wartość sygnału z jednego z czujników (AE, mocy, siły, odkształcenia, ciśnienia lub przemieszczenia) [227]. Alternatywą jest monitor SEM-68000, który może obsługiwać do 16 kanałów pomiarowych, ma graficzny wyświetlacz, różne strategie monitorowania oparte na granicach [222].



rys. 8.2. Monitory stanu narzędzia i procesu skrawania oferowane przez firmę Nordmann.

Firma Montronix oferuje najbogatszą paletę monitorów [2, 229, 230, 231, 232] (rys. 8.3):

TS10 – prosty monitor do wykrywania kolizji na obrabiarkach CNC;

TS50 – modułowy, przystosowany do pracy w sieci, dwukanałowy monitor wykorzystujący strategię oparte na granicach, do wykrywania kolizji, KSO i przeciążenia;

TS100 – wielokanałowy monitor do obsługi wielu stanowisk, również stosujący strategię graniczne także do nadzoru zużycia;

TS100PRO+ - nowa wersja monitora TS100, przystosowana do pracy w sieci, wyposażona w wyświetlacz graficzny, który umieszczony w dogodnym miejscu może obsługiwać szereg takich monitorów;

TS200, TS220 – najbardziej złożone monitory przeznaczone do dwu- i czterosiowych tokarek, oferowane w trzech konfiguracjach:

- wykrywanie tylko kolizji (strategia graniczna – parz rys. 8.7)
- wykrywanie kolizji i KSO (granice + rozpoznawanie wzorca – parz rys. 8.7 i 6.10)
- wykrywanie kolizji, KSO i zużycia (granice + rozpoznawanie wzorca + wskaźnik zużycia – parz rys. 8.7, 6.10 i 8.9);

TS300 – monitor przeznaczony do układów sterowania o otwartej architekturze, ma postać karty instalowanej w pojedynczym gnieździe płyty ISA. Szyna danych ISA eliminuje potrzebę szeregowego czy równoległego interfejsu I/O. Monitor jest oparty na procesorze RISC 40 MHz, co minimalizuje obciążenie jednostki centralnej układu sterowania przetwarzaniem sygnałów i przerwami. Do komunikacji z operatorem może służyć dowolny przemysłowy komputer osobisty. Przystosowany do pracy w sieci.

PDT – (Portable Diagnostic Tool) to wszechstronny monitor przeznaczony do celów badawczych i wdrożeń.

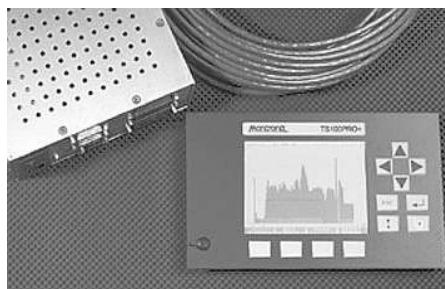
Warto zauważyć, że monitory Montronix (za wyjątkiem TS100Pro+) nie są wyposażone w wyświetlacze graficzne. Obserwacja przebiegu procesu możliwa jest jedynie przy pomocy oprogramowania IPM (Integrated Process Monitor) instalowanego na komputerze osobistym. IPM wyświetla przebieg mierzonego sygnału uznawany za wzorcowy (prawidłowy) i automatycznie porównuje go z bieżącym, wykrywając wszelkie odstępstwa. Po takim wykryciu wyświetla właściwy dla danej aplikacji komunikat alarmowy, przedstawiający przyjętą przez monitor interpretację zdarzenia oraz proponuje sposób

postępowania w celu naprawienia zaistniałej nieprawidłowości. Ponadto IPM może być używany do optymalizacji parametrów monitora. Zastosowanie IPM w układzie sterowania o strukturze otwartej eliminuje sprzętowy panel czołowy układu DNIPS, wykorzystując możliwości kolorowej karty VGA powszechnie występującej w takich układach sterowania. Można program skonfigurować tak, by wyświetlał przebieg procesu w tle, automatycznie czyniąc go widocznym po wystąpieniu alarmu. IPM jest wyposażony w pomoc kontekstową w kilku językach i obsługiwany jest jak typowa aplikacja Windows.

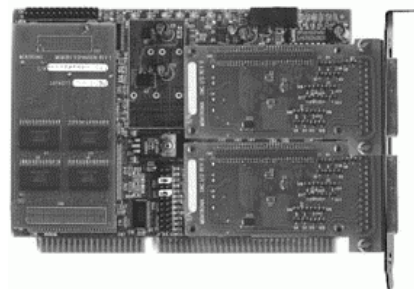
TS10



TS100Pro+



TS300



TS100



TS200



rys. 8.3. Niektóre z układów DNIPS oferowane przez firmę Montronix [2, 64, 229, 230, 231, 232].

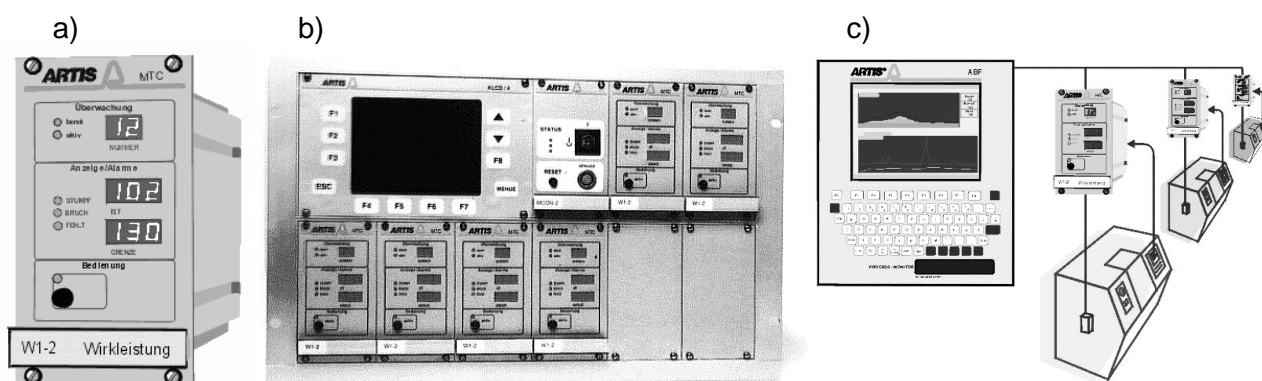
Również firma Brankamp produkuje wiele monitorów poczynając od prostego CMS przeznaczanego do wykrywania kolizji, do 4 kanałowego C 8060 umożliwiającego korzystanie z czterech, zależnych do czasu granic [21, 22, 192], rys. 8.4. Ten ostatni został zaprojektowany jako uniwersalny monitor procesów przeróbki plastycznej (kucie, tłoczenie, prasowanie) oraz skrawania. Oryginalną jego cechą jest kolorowy ekran wrażliwy na dotyk, pełniący rolę zarówno wyświetlacza jak i klawiatury [23]



rys. 8.4. Przykłady monitorów firmy Brankamp [21, 21, 192].

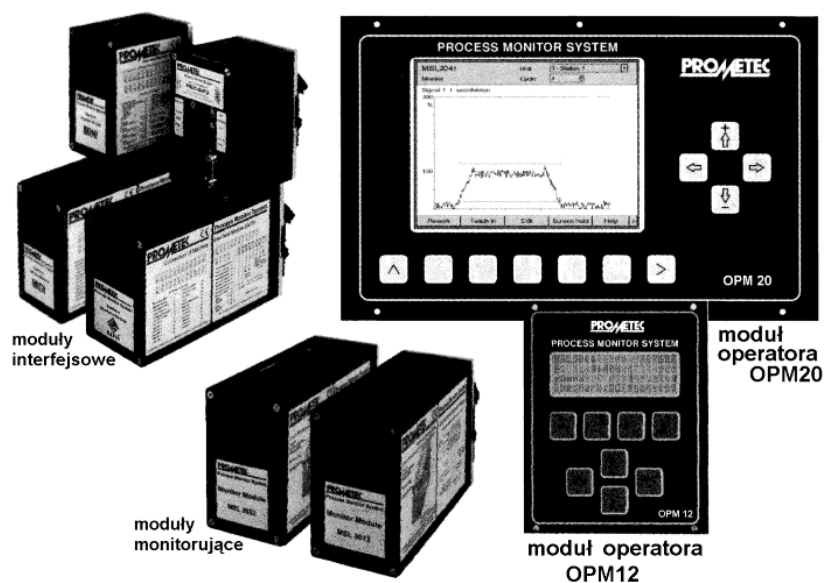
Modułowa budowa układów DNiPS to alternatywna koncepcja ich konfigurowania. Reprezentuje ją układ MTC firmy Artis [178] oraz PROMOS firmy Prometec [174].

Układ MTC (rys. 8.5) składa się z przedwzmacniaczy przeznaczonych do określonego typu czujników oraz szeregu modułów monitorujących – odrębny moduł dla każdego typu czujnika (rys. 8.5a). Do obsługi modułów monitorujących i wizualizacji przebiegu procesu służy odrębny panel. Można też wykorzystać klawiaturę i ekran układu sterowania o architekturze otwartej, z którym MTC łączy się za pośrednictwem kolejnego modułu. Można także oglądać i przechowywać przebiegi sygnałów na komputerze osobistym wyposażonym w specjalne oprogramowanie. MTC może być zainstalowany w jednym miejscu lub w rozproszeniu. W tym pierwszym przypadku wszystkie moduły połączone są razem w jedno przejrzyste urządzenie (rys. 8.5b). Jest ono korzystne np. w przypadku centrów obróbkowych i tokarek, ponieważ czujniki i moduły są położone w niewielkiej odległości od siebie. W konfiguracji rozproszonej (rys. 8.5c) moduły są instalowane indywidualnie w pobliżu monitorowanych maszyn, zaś panel sterujący w zasięgu operatora. Ta konfiguracja jest szczególnie korzystna w przypadku linii produkcyjnych.



rys. 8.5. Modułowy układ DNiPS firmy Artis; a) pojedynczy moduł, b) konfiguracja zwarta, c) konfiguracja rozproszona.

Modułowy układ nadzorujący firmy Prometec (rys. 8.6) składa się z czujników, dopasowanych do nich modułów przedwzmacniaczy, uniwersalnych modułów monitorujących, modułów dopasowujących (interfejsowych) oraz modułu operatora. Jedno lub dwukanałowe moduły monitorujące (w układzie może być ich wiele) prowadzą nadzór niezależnie od siebie zgodnie ze specyficznymi wymaganiami stanowiska, na którym są zainstalowane. Sygnały alarmowe (KSO, zużycie itd.) są przesyłane z monitora do układu PLC obrabiarki przez moduł dopasowujący, który może być zainstalowany w szafie sterującej obrabiarki. Układ PROMOS może być obsługiwany przy pomocy prostego modułu OPM 12 lub przez bardziej złożony, wyposażony w ekran graficzny moduł OPM 20. Inne opcje to sterowanie układem przez komputer osobisty (za pośrednictwem kolejnego modułu dopasowującego) lub instalacja specjalnego oprogramowania do sterowania i wizualizacji w układzie sterowania o strukturze otwartej.



rys. 8.6. Przykładowe moduły układu PROMOS.

Zestawienie metod wizualizacji przebiegu sygnałów i nadzorowanego procesu, stosowanych w układach DNIPS przedstawiono w tablicy 8.2.

Tablica 8.2. Metody wizualizacji stosowane w układach DNIPS.

Metoda wizualizacji	PRODUCENT UKŁADÓW DNIPS					
	Artis	Brankamp	Kistler	Montronix	Nordmann	Prometec
Prosty wyświetlacz	○	○		○	○	○
Wyświetlacz graficzny	○	○	○	○	○	○
Przez otwarty układ sterowania	○			○	○	○
Przez komputer osobisty	○	○	○	○		○

8. 4. Strategie monitorowania

Strategie stosowane przez różnych producentów układów DNIPS można sklasyfikować w pięć podstawowych typów, zestawionych w tablicy 8.3. Większość z nich oparta jest na granicach statycznych, tzn. niezmiennych w trakcie trwania pojedynczego cyklu obróbki. Zostały one omówione w punkcie 6.1 i 6.2.1, stąd tu przedstawione zostaną jedynie przykłady z konkretnych układów przemysłowych.

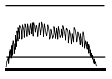
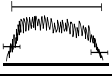
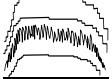

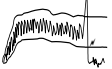
Typowym przykładem jest strategia zastosowana w monitorach TS 50 i TS 100 [229, 232]. Występują tu następujące granice (rys. 8.7a):

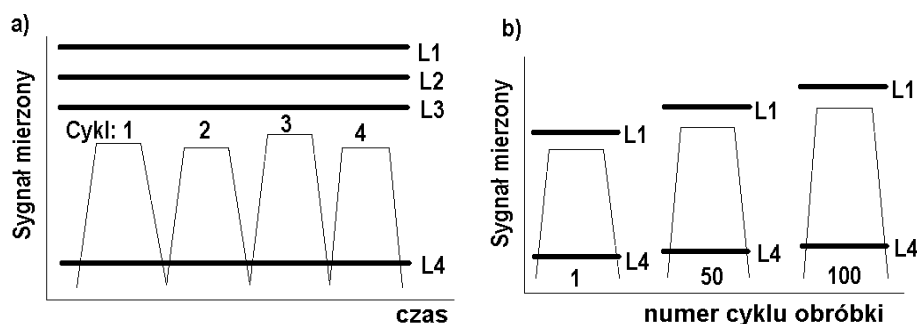
- L1: Górna granica, typowo wykorzystywana jako zabezpieczenie przed kolizją lub przeciążeniem. Jej przekroczenie powoduje natychmiastowe zatrzymanie obrabiarki.
- L2: Określana na np. 250% służy do wykrywania KSO, więc jej przekroczenie powoduje zatrzymanie obróbki.

L3: (Tylko dla TS100) Próg ustawiany na poziomie np. 150%, służy do wykrywania nadmiernego zużycia (stopienia) ostrza. Powoduje wymianę narzędzia po zakończeniu operacji.

L4: Niski próg (np. 50%) służący do wykrycia braku skrawania. Nie przekroczenie tego progu powstrzymuje realizację następnej operacji.

Tablica 8.3. Strategie stosowane w układach DNiPS.

STRATEGIA			PRODUCENT UKŁADÓW DNiPS					
			Artis	Brankamp	Kistler	Montronix	Nordmann	Prometec
Granice statyczne	Proste, stałe granice					○	○	○
	Etapowe, stałe granice				○		○	○
	Wzorzec przebiegu		○	○	○	○	○	○
Rozpoznawanie obrazu						○		
Granice dynamiczne								○

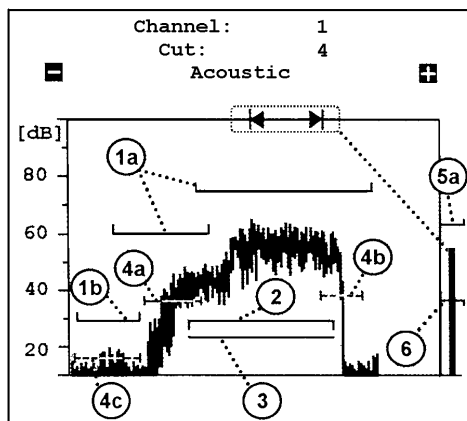


rys. 8.7. Granice stałe (a) i dopasowywane z operacji na operację (b).

Zamiast ustalonych granic L1 i L4, stosowane być mogą granice dopasowywane z operacji na operację. W takim przypadku sygnał jest normalizowany po każdej operacji od nowa, a dla następnej przyjmowane są nowe, zaktualizowane wartości [205]. Dzięki temu można np. poprawić niezawodność wykrywania brakującego narzędzia przy obrabiarkach wielowrzecionowych. Takie granice są także bardziej czułe na krótkotrwałe zmiany sygnału niż granice stałe.

Do wykrywania KSO przy użyciu takiej strategii firma Montronix wykorzystuje także szybkość zmian sygnału ignorując w takim przypadku jego wartość bezwzględną [205]. Można dzięki temu wykryć bardzo szybkie zmiany sygnału towarzyszące KSO, jednakże nie jest to (zdaniem firmy) tak efektywne jak rozpoznawanie obrazu (patrz rys. 6.10). Podobne strategie oparte na stałych granicach stosowane są w układach PROMOS [174] i SEM-B1 [227]

Przebieg obróbki w czasie całego cyklu może być podzielony na etapy, a granice określone oddzielnie dla każdego z nich. Ponadto stosowanych jest szereg innych granic stałych, ale dotyczących fragmentu operacji. Największa różnorodność takich granic występuje w strategiach monitorów firmy Nordmann [222]. Przykłady przedstawiono na rys. 8.8:



rys. 8.8. Przykładowe granice w strategii firmy Nordmann [222].

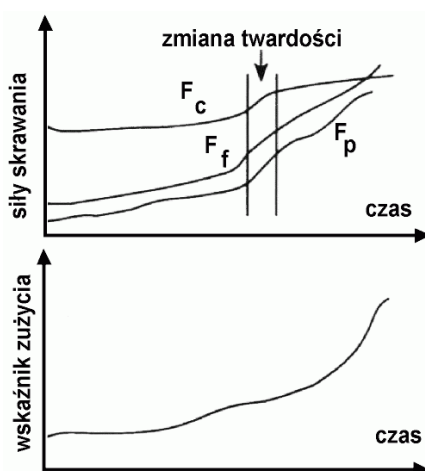
- Maksymalna wartość sygnału:
 - 1a – przekroczenie uznawane jest za katastroficzne stępienie ostrza,
 - 1b – wywołuje alarm jeśli skrawanie zaczyna się zbyt szybko (np. ze względu na za duży lub źle zamocowany przedmiot obrabiany),
 - Minimalna wartość sygnału:
 - 2 – służy do wykrywania KSO i niewłaściwego zamocowania przedmiotu, zatrzymuje obróbkę natychmiast po wykryciu wartości sygnału niższej niż próg,
 - Przekroczenie niedopuszczalne:
 - 3 – jak 2, jednakże zatrzymuje obróbkę jeśli wartość sygnału była wyższa i spadnie do tego progu. Jeśli sygnał przebiega poniżej np. w wyniku braku części, alarm nie jest włączany,
 - Przekroczenie konieczne:
 - 4a, 4b i 4c – progi te muszą być przekroczone przynajmniej raz w czasie cyklu w celu rozpoznania początku obróbki (4a), obecności narzędzia na końcu cyklu (4b) i poprawności działania czujnika i przekazywania sygnału (4c),
 - Maksymalna wartość średnia:
 - 5a – odnosi się do średniej wartości sygnału wyznaczonej w czasie zadanego odcinka czasu, przekroczenie powoduje alarm po skończeniu cyklu, oznaczający naturalne stępienie ostrza,
 - Minimalna wartość średnia:
 - 6 – analogicznie jak 5a, jednakże stanowi dolną dopuszczalną granicę wartości sygnału, jako że rosnącemu zużyciu niektórych narzędzi towarzyszy malejący sygnał AE; może być wykorzystywany także do samokontroli układu – spadek sygnału AE może świadczyć o zakłóceniu jego transmisji.
- Firma Prometec stosuje granice podobne do 4a i 4b [174], (rys. 6.21). Funkcja „pudełko” firmy

Kistler sprawdza czy sygnał wchodzi i wychodzi w pole prostokąta na płaszczyźnie wartości sygnału – czas przez założone jego boki. Pozostałe boki nie mogą być „przecięte” [34].

Ostatni typ strategii opartych na granicach statycznych oparty jest na tzw. wzorcu przebiegu. Układ zapamiętuje cały przebieg sygnału wzorcowego lub określa jego wartość w wielu niewielkich odcinkach czasowych. Dzięki temu wartość odniesienia jest określana znacznie bardziej precyzyjnie niż w poprzednio omówionych strategiach [205]. Wzorzec przebiegu sygnału jest wykorzystany jak w wyżej opisanej strategii granic etapowych lub do utworzenia pasma tolerancji otaczającego zapamiętany przebieg (patrz rys. 8.4 z prawej). Przy korzystaniu z wzorca przebiegu bardzo istotna dla jakości monitorowania jest ścisła synchronizacja w czasie przebiegu aktualnego i wzorca [205], o czym wspomniano już w rozdziale 6.2.1.

Warto może przypomnieć, że omówione wyżej strategie stosowane w układach przemysłowych, mogą wykorzystywać różne miary sygnałów z różnych czujników, w tym ich składowe dynamiczne. Tym niemniej jest to zawsze jeden sygnał i jedna jego miara. Wyjątkiem jest „wskaźnik zużycia” używany przez firmę Montronix oparty na kombinacji liniowej trzech składowych siły skrawania wykorzystywany do oceny zużycia noża tokarskiego [205, 228] – rys. 8.9. Wskaźnik umożliwia rozróżnienie między zużyciem ostrza, które wpływa przede wszystkim na siłę posuwową i odporową, od zmian warunków skrawania takich jak bicie przedmiotu czy wahania twardości materiału obrabianego, które bardzo zakłócają wyniki pracy układów opartych na jednej sile skrawania.

Ponieważ wykrywanie KSO oparte na granicach statycznych bardzo często nie zapewnia skutecznej ochrony przed jego skutkami (rys. 6.7), znacznie bardziej właściwe jest zastosowanie granic samodopasowujących się [25]. Mimo to jedynie firmy Prometec i Montronix oferują bardziej zaawansowane strategie. Zostały one już omówione w rozdziale szóstym – wykrywanie KSO w oparciu o rozpoznawanie obrazu stosowane w monitorach firmy Montronix (rys. 6.10, [205, 231]) oraz w oparciu o rozpoznawanie zmian przebiegu siły przy frezowaniu (rys. 6.9, [141, 14]) oraz o granice dynamiczne dla toczenia (rys. 6.11, [148, 191]) stosowane przez firmę Prometec.



rys. 8.9. Wskaźnik zużycia opracowany przez firmę Montronix [205, 229].

9. RODZINA UKŁADÓW DNIPS BUDOWANA W ITM PW

Jak wynika z porównania osiągnięć światowych dotyczących diagnostyki stanu narzędzia i procesu skrawania przedstawionego w rozdziałach 3÷7 z układami, które znalazły szersze zastosowanie przedstawionymi w poprzednim rozdziale luka między osiągnięciami czołowych laboratoriów światowych (w tym polskich, np. [7÷9, 38, 53, 55, 56, 57, 151, 161, 162, 206÷210]), a układami komercyjnymi jest znaczna [77]. Mimo ogromnej liczby prac naukowych i publikacji dotyczących zaawansowanych technik obróbki sygnału (FFT, cepstrum, ARMA, analiza statyczna i wiele innych), dominującą techniką jest filtrowanie (dolno-, górno- i pasmowoprzepustowe), uśrednianie i wyznaczanie wartości skutecznej. Układy DNIPS tworzone w laboratoriach badawczych są zwykle wieloczujnikowe lub/i wykorzystujące różne miary sygnału z tego samego czujnika. Do integracji wielkich ilości informacji, ekstrakcji cech, opracowywania wiarygodnych wskaźników stanu procesu i narzędzia często wykorzystywane są metody sztucznej inteligencji (np. [7, 9, 19, 43, 45, 50, 107, 162, 206, 208, 210]). Tymczasem w układach dostępnych handlowo dominuje podejście jeden czujnik – jeden proces (narzędzie). Tu „wieloczujnikowy” oznacza możliwość wyboru jednego, najlepiej dostosowanego do monitorowanego procesu czujnika z szeregu możliwych do wykorzystania. Czasem używane są dwa czujniki do monitorowania jednego procesu w celu zwiększenia wiarygodności systemu, jednakże nawet wtedy obróbka sygnałów, strategii nadzorowania są dla każdego z czujników (kanałów) niezależne od siebie [235]. Jedynie „wskaźnik zużycia” firmy Montronix wykorzystuje więcej niż jeden sygnał do monitorowania zużycia ostrza – wyłącznie dla toczenia (rys. 8.9).

W Polsce dotychczas (jesień 2001) nie powstał żaden układ mogący działać w warunkach przemysłowych, a więc w oparciu o przemysłowe czujniki wielkości fizycznych pochodzących z procesu skrawania (jak siły skrawania i emisja akustyczna), przy zmiennych parametrach skrawania, bez udziału twórców układu (czyli z łatwą obsługą nie wymagającą kwalifikacji naukowych), z automatycznym w dużym stopniu zbieraniem danych i wypracowywaniem oceny stanu narzędzia.

W Instytucie Technologii Maszyn PW podjęliśmy w ostatnich latach prace [96, 115, 128, 129, 130], których celem jest opracowanie podstaw do stworzenia rodziny przemysłowych układów Automatycznej Diagnostyki Ostrzy Narzędzi Skrawających (ADONIS), zweryfikowane wykonaniem i przebadaniem prototypów. Praca ta jest podsumowaniem doświadczeń autora i jego zespołu, przedstawionych w poprzednich rozdziałach tej książki.

9. 1. Podstawowe założenia rodziny układów ADONIS

Podstawowe założenia do budowy rodziny układów Automatycznej Diagnostyki Ostrzy Narzędzi Skrawających (ADONIS) są następujące:

- Rodzina składać się będzie z kilku układów, różniących się od siebie zastosowanymi strategiami nadzoru i realizowanymi funkcjami, liczbą nadzorowanych narzędzi oraz formą – kasetą wolnostojącą lub przyrząd wirtualny będący programem komputerowym. Tej drugiej formie warto poświęcić nieco więcej uwagi. Współcześnie w wielu zastosowaniach przemysłowych wykorzystuje się komputery osobiste do testowania, pomiarów i automatyzacji produkcji. Układy sterowania obrabiarek są często wyposażone w środowisko Windows, ze względu na jego rozbudowane, wygodne i dość powszechnie znane funkcje komunikacji z użytkownikiem, przechowywanie i przesyłanie danych itp. Możliwości komputerów osobistych (i wspomnianych układów CNC) można wykorzystać także do budowy złożonych układów nadzoru i sterowania opartych na uniwersalnych kartach do akwizycji danych (DAQ). Umożliwia to znaczne zmniejszenie czasu wdrożenia nowych rozwiązań czy modernizacji istniejących, zwiększenie uniwersalności i elastyczności, a w rezultacie obniżenie kosztów, w stosunku do rozwiązań tradycyjnych, sprzętowych, o ustalonych przez producenta funkcjach. Trzeba jednakże pamiętać o tym, że szybka akwizycja danych, ich analiza, diagnostyka i sterowanie w czasie rzeczywistym jest trudne do osiągnięcia przy użyciu konwencjonalnych komputerów i kart DAQ. Może być ono realizowane w oparciu o programy niskiego poziomu jak C, poza środowiskiem Windows. W czasie rzeczywistym, system operacyjny Windows 2000/NT/9x reaguje na zdarzenia i przerwania zgodnie z określonymi priorytetami, odpowiada na te przerwania, powodując powstawanie przypadkowych przerw w działaniu innych programów. Stąd działanie aplikacji kontrolowanej przez ten system jest spowolnione, a ponadto nie jest zdeterminowane czasowo – poszczególne identyczne iteracje zajmują różny czas. Rozwiązaniem umożliwiającym wykorzystanie zalet środowiska Windows, a zarazem uniknięcie jego wad jest zaproponowana przez National Instruments technologia LabVIEW RT [195]. Programy opracowywane są przy użyciu standardowych komputerów PC, w graficznym języku LabVIEW RT (bardzo zbliżonym do LabVIEW). Następnie część programu, realizująca działanie w czasie rzeczywistym jest ładowana do pamięci procesora na karcie RT DAQ PCI zainstalowanej w komputerze głównym lub karcie RT DAQ PXI w oddzielnej kasecie, połączonej z komputerem głównym przez Ethernet. Karta obsługiwana jest przez własny system operacyjny działający w czasie rzeczywistym, skonfigurowany specjalnie do zadań diagnostycznych i automatyzacji. Druga część programu, odpowiedzialna za komunikację z użytkownikiem wykonywana jest jako aplikacja Windows 2000/NT/9x na komputerze głównym. Bardzo istotną cechą LabVIEW RT jest to, że procesor karty RT DAQ działa niezależnie od komputera głównego i jego systemu operacyjnego, włącznie z jego wyłączeniem czy jakimikolwiek błędami krytycznymi. Tak więc po uruchomieniu programu komputer główny może być nawet wyłączony lub przełączony na inne aplikacje, a włączany (przełączany na LabVIEW) tylko w celu komunikacji użytkownika z wirtualnym systemem diagnostycznym.
- Użytkownik będzie miał do dyspozycji szereg strategii nadzorowania zużycia ostrza, w zależności od jakości zainstalowanego czujnika i typu przebiegu sygnału w czasie operacji. Sygnałem tym może być

wartość skuteczna emisji akustycznej AE_{rms} , siła posuwowa F_f (lub sygnał pochodzący od tej siły jak moc silnika posuwu czy odkształcenie układu), stosunek siły posuwowej do siły skrawania F_f/F_c (wymagany co najmniej dwuskładowy czujnik sił), wreszcie stosunek sumy sił posuwowej i odporowej do siły skrawania $(F_f+F_p)/F_c$ (wymagany trójskładowy czujnik sił). Strategie te zostały już wstępnie wypróbowane przy pomocy już wykonanych układów ADONiS [118, 129] – patrz niżej, punkt 9.2). Inne, np. oparte na względnych przyrostach składowych sił i ich kombinacji liniowych czekają na testowanie w warunkach przemysłowych. Jeszcze inne zostaną dopiero opracowane w na podstawie analizy literatury i wyników własnych badań. W trakcie uczenia, układy będą sprawdzały, czy poziom sygnałów przekracza założone minimum i na tej podstawie będą określały dostępne sygnały. W zależności od liczby składowych sił skrawania będących do dyspozycji dobierana będzie właściwa strategia nadzorowania, przy czym użytkownik będzie mógł zrezygnować z wyższych składowych (F_c i F_p) a więc z wykorzystywania stosunku sił jako sygnału diagnostycznego.

- W pracach laboratoryjnych często wynikiem działania układu jest wartość zużycia ostrza. Użytkownik jest więc po każdej operacji informowany o aktualnym stanie narzędzia, co jest bardzo wygodne. Niestety podejście takie jest raczej trudne do zastosowania w warunkach przemysłowych, jako że pomiar zużycia ostrza (niezbędny w fazie uczenia układu) jest bardzo kłopotliwy. W układach komercyjnych występuje przeciwstawne podejście – układ sygnalizuje jedynie stępienie ostrza po osiągnięciu przez wartości sygnałów diagnostycznych założonych wcześniej (nauczonych) wartości. W projektowanej w ramach tego projektu rodzinie układów nadzorujących, użytkownik informowany będzie o wykorzystanej części okresu trwałości ostrza w procentach, czyli będzie uzyskiwał najbardziej interesującą go informację. Koncepcja ta została przedstawiona w punkcie 6.1. Wielkością wyjściową w nadzorowaniu zużycia będzie procentowe wykorzystanie trwałości ostrza, obliczane jako część dopuszczalnego przyrostu wybranego sygnału:

$$\Delta T = \left(\frac{100 * M_i}{M_0} - 100 \right) * \frac{100}{dM_k} [\%] \quad (9.1)$$

gdzie M_0 – początkowa wartość miary (narzędzie ostrze),

M_i – wartość miary w ostatniej operacji,

M_k – krytyczna wartość miary oznaczająca stępienie ostrza,

dM_k – dopuszczalny procentowy przyrost miary,

ΔT – procentowe wykorzystanie trwałości ostrza.






Wartość ΔT będzie wyznaczana i wyświetlana po wykonaniu każdej operacji. Dodatkowo przewiduje się wyświetlanie przewidywanego zużycia ostrza po następnej operacji. Po przekroczeniu przez jedną z tych wartości (ΔT po ostatniej wykonanej lub po następnej operacji) 100% układ nadzoru będzie generował sygnał, który może być wykorzystany przez układ sterowania obrabiarki do automatycznej

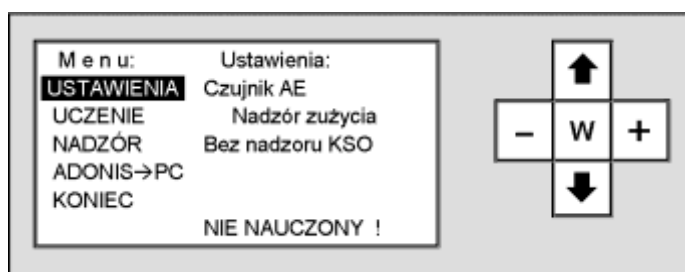
wymiany narzędzia. Jeśli operator uzna, że ostrze jest w pełni wykorzystane wcześniej lub później niż wskazuje układ nadzoru, będzie mógł sam wskazać stopień ostrza. Spowoduje to automatyczne ponowne wyznaczenie przez układ wielkości dM_k . Należy podkreślić, że żadna z wielkości w powyższym równaniu (oprócz ΔT) nie będzie podawana przez operatora. Zauważmy przy tym, że nie jest tu potrzebne określanie wielkości zużycia ostrza (wyznaczanie bezpośrednich wskaźników zużycia). W trakcie uczenia układu (obróbka pierwszym narzędziem) operator sam ocenia moment, w którym ostrze jest stępione, na podstawie kryteriów stosowanych niezależnie od układu nadzorującego, a więc np. na podstawie pogorszenia się jakości powierzchni czy obniżenia dokładności obróbki.

- Jeden z układów wyposażony będzie w strategię opartą na sztucznej sieci neuronowej. Dobór struktury sieci i uczenie odbywać się będzie automatycznie, tzn. użytkownik nie będzie musiał nic wiedzieć o sieciach neuronowych. Zagadnienia te zostały już w znacznym stopniu opanowane w pracach zespołu ITM PW dla sieci neuronowych działających na wstępnie przygotowanych danych (patrz rozdział siódmy). Rozwiązania wymagać będzie automatyczna akwizycja danych i przygotowanie zbiorów uczących dla sieci. Zakłada się, iż w czasie obróbki pierwszymi narzędziami, układ będzie zapamiętywał wartości wybranych miar sygnałów diagnostycznych wraz z odpowiadającymi im czasami skrawania. Po stępieniu ostrza (określanym przez operatora) czasy te zostaną podzielone przez czas skrawania do stępienia ostrza (okres trwałości), a uzyskane w ten sposób wykorzystane części okresu trwałości będą stanowiły zadane wartości wyjścia sieci w trakcie uczenia.
- Nadzorowanie katastroficznego stępienia ostrza będzie możliwe bez uczenia, tzn. także dla niepowtarzalnych operacji tokarskich. Opierać się ono będzie na algorytmie opracowanym w ITM PW [78, 80 92, 118, 129], a opisanym w punkcie 6.2.3. Projektowane układy będą również wykrywały kolizje i przeciążenie ostrza. Reakcją układu nadzorującego na te sytuacje będzie wysłanie do układu sterowania obrabiarki sygnału stop posuwu i wycofanie narzędzia.
- Ponieważ sygnały z czujników sił, mocy czy naprężeń mogą podlegać różnym zakłóceniom nie związanym z siłami skrawania, a nawet znaczne ich wartości mogą wynikać z szybkich ruchów ustawczych, konieczne jest tarowanie sygnału po rozpoczęciu posuwu roboczego, a przed rozpoczęciem skrawania. Dlatego też w układach ADONIS zastosowano algorytm tarowania opisany w punkcie 5.1 (rys. 5.10). Samo skrawanie jest w nim być rozpoznawane jako przekroczenie określonego procentu oszacowanej wstępnie średniej wartości sygnału. Spadek wartości sygnału poniżej tego progu uznawany jest za przerwę w skrawaniu, nawet jeśli trwa posuw roboczy. Tyko w czasie tak określonego skrawania będzie zliczana wartość siły do wyznaczenia wartości średniej. Przy korzystaniu z czujników emisji akustycznej, rozpoznawany jest jedynie początek skrawania, zaś za koniec skrawania przyjmowany jest sygnał stop posuwu roboczego lub stop nadzoru wysyłany przez układ sterowania obrabiarki.

9. 2. Prezentacja działania układu ADONIS 3

W celu przybliżenia przynajmniej części z przedstawionych założeń, nize omówione zostanie działanie i wyniki wstępnych testów jednego ze zbudowanych już układów – ADONIS 3.

Na rys. 9.1 przedstawiono wygląd panelu czołowego układu po jego uruchomieniu. Jest na nim wyświetlacz tekstowy oraz pięć klawiszy. Wyświetlacz prezentuje informacje zależnie od stanu układu. Po włączeniu układu jest tam menu oraz aktualna konfiguracja układu. Klawisze   pozwalają na poruszanie się po ekranie,  i  służą do zmieniania wartości wybranego pola (gdy jest to możliwe – patrz niżej), zaś klawisz  oznacza w zależności od sytuacji „Wejdz” „Wyjdz” lub „Wykonaj”. Układ może pracować w trzech trybach: **Ustawienia**, **Uczenie** i **Nadzór**, przy czym po zmianie ustawień nadzór musi być poprzedzony uczeniem. Dodatkowo możliwe jest przesyłanie danych z układu do komputera osobistego w celu ich wizualizacji i analizy. Ta funkcja nie będzie tu omawiana, choć będzie wykorzystana.



rys. 9.1. Panel czołowy układu ADONIS 3 po uruchomieniu.


Konfiguracja

Przed rozpoczęciem nadzoru stanu narzędzia w nowych warunkach skrawania, należy określić podstawowe parametry pracy układu, ale tylko te, których nie może on sam zdobyć od układu sterowania obrabiarki. Są one widoczne na rys. 9.2. Inne ważne informacje o nadzorowanym procesie układ zdobywa sam w trakcie uczenia. Ostatnia konfiguracja układu jest pamiętana także po jego wyłączeniu.



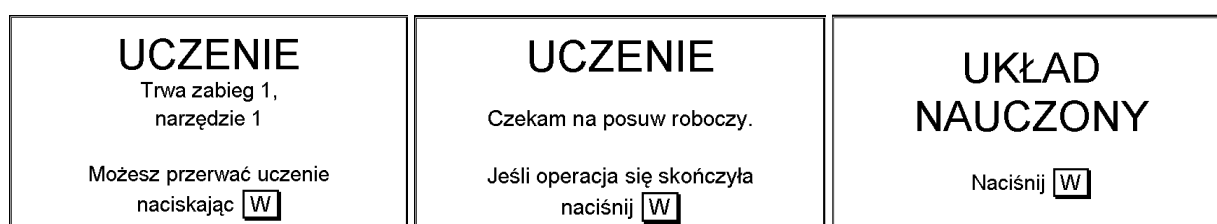
rys. 9.2. Ustawianie podstawowych parametrów pracy układu – przykłady.

Uczenie

Uczenie polega na przeprowadzeniu jednej operacji, najlepiej ostrym narzędziem. Operator może przerwać uczenie w dowolnej chwili wciskając klawisz , unieważniając uczenie (rys. 9.3a). Zakończenie uczenia następuje po wciśnięciu tego klawisza w czasie oczekiwania przez układ na kolejny zabieg (start posuwu roboczego – rys. 9.3b). Układ interpretuje takie przerwanie jako koniec operacji i zapamiętuje liczbę dotychczas wykonanych zabiegów. Na podstawie numeru używanego narzędzia w każdym zabiegu, układ

wykrywa liczbę narzędzi biorących udział w operacji – nadzór każdego narzędzia prowadzony jest oddzielnie. Jeśli liczba zabiegów jest większa niż zero, układ sprawdza czy zarejestrowany został sygnał z czujnika zadeklarowanego w konfiguracji. Jeśli nie (lub gdy liczba zabiegów jest równa zero), układ wyświetla odpowiedni alarm i pozostaje nie nauczony. W przeciwnym razie określa maksymalne wartości sygnałów w zabiegach, przekroczenie których oznacza przeciążenie i minimalną wartość sygnału oznaczającą skrawanie. Po udanym uczeniu układ gotów jest do podjęcia nadzoru (rys. 9.3c), z tym że współczynnik dF_T określający dopuszczalny przyrost sygnału pozostaje taki, jaki był przy poprzednim wykorzystaniu układu, może być więc niepoprawny. Nie jest on w ogóle podawany operatorowi, a jego wartość będzie dostrajana w trakcie nadzorowania pierwszych ostrzy.

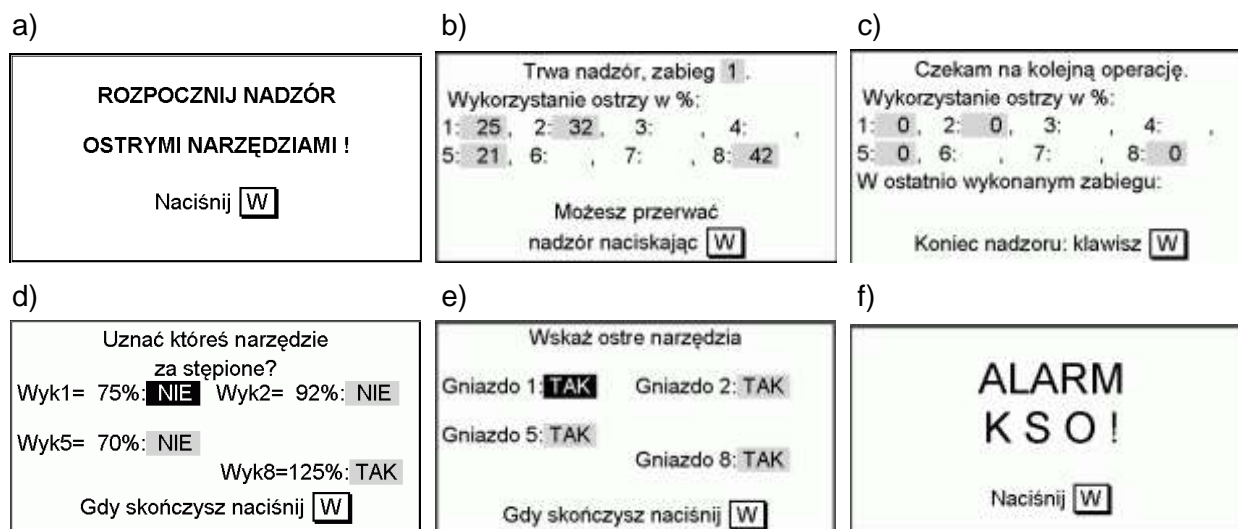
Nadzór KSO od początku wykonywany jest poprawnie.



rys. 9.3. Wyświetlacz układu w trakcie uczenia.

Nadzór

Przy pierwszym po uczeniu wejściu w tryb nadzoru operator jest informowany, że obróbka winna być prowadzona ostrym narzędziem (rys. 9.4a). Po wykonaniu pierwszej operacji układ zapamiętuje średnią wartość sygnału jako jego wartość początkową M_0 , odpowiadającą ostremu narzędziu (dla każdego nadzorowanego narzędzia oddzielnie). Po wykonaniu każdej operacji układ wyznacza wykorzystane części okresu trwałości ostrza ΔT ze wzoru (9.1). Wartości wyznaczone po ostatnio wykonanej operacji są wyświetlane przez cały czas trwania nadzoru, aż do końca następnej operacji (rys. 9.4b).



rys. 9.4. Wyświetlacz układu w czasie nadzoru.

Nadzór może być zatrzymany przez operatora w każdej chwili. Jednakże jeśli zatrzymanie to następuje w czasie oczekiwania na kolejną operację (rys. 9.4c), układ zadaje operatorowi pytanie – „czy uznać któreś z narzędzi za stępione?” (rys. 9.4d). Pozytywna odpowiedź na to pytanie, powoduje przyjęcie wykorzystanej części okresu trwałości wybranego ostrza za 100% i przeliczenie wartości dF_T dla stępionych narzędzi wg wzoru (9.1). Po ponownym wejściu w tryb nadzoru operator wskazuje, które narzędzia zostały wymienione na ostre (rys. 9.4e). Oczywiście wykrycie KSO, kolizji lub przeciążenia powoduje przerwanie obróbki, wycofanie narzędzia i wyświetlenie odpowiedniego komunikatu (rys. 9.4f).

Przykładowe wyniki pracy układu Adonis

Weryfikację opisaną w punkcie 6.1 i przypomnianej wyżej (wzór 9.1) koncepcji nadzorowania naturalnego stępienia ostrza przeprowadzono na stanowisku opisanym w punkcie 4.1.4 (rys. 4.14), tzn. przy użyciu dwuskładowego przemysłowego czujnika sił skrawania. Ponadto rejestrowano sygnały emisji akustycznej czujnikiem zamocowanym w dolnej części imaka jednołożowego, również widocznym na rys. 4.14. Sygnały były rejestrowane na magnetofonie pomiarowym, dzięki czemu możliwe było ich wielokrotne wykorzystanie. Podawane były one na odpowiednie wejścia układu ADONIS 2, wartościami rejestrowanymi natomiast były wskazania układu, czyli wykorzystana część okresu trwałości ostrza.

Warunki skrawania odpowiadały wykonywaniu operacji dwuzabiegowej wykonywanej jednym narzędziem. W pierwszym zabiegu zastosowano parametry: $a_p = 1.5$ mm, $f = 0.17$ mm/obr $v_c = 500$ m/min zaś w drugim $a_p = 1.5$ mm, $f = 0.47$ mm/obr $v_c = 200$ m/min. Blisko trzykrotny stosunek zastosowanych posuwów powodował znaczną różnicę w stosunku siły posuwowej do siły skrawania, co ma zasadnicze znaczenie dla stosowanych strategii wykorzystujących dwuskładowy czujnik sił skrawania. Czas skrawania w obu zabiegach wynosił 5 s, co ze względu na ręczne włączanie i wyłączanie posuwu nie zawsze było ściśle. Zastosowano nóż CSRPR 2525M 12 płytką SCMT, pokrywaną $Ti(C+N) + Al_2O_3$. Kryterium stępienia $VB_C = 0.30$ mm.

Wykonano dwa pełne testy, w których ostrza wykonywały opisane operacje od początku do stępienia. Pierwszy z nich (T1) wykorzystano do uczenia układu, tzn. przebieg pierwszej wykonanej operacji posłużył do nauczania układu przebiegu operacji oraz wartości sygnałów odpowiadających ostremu narzędziu. Po wykonaniu dwunastu operacji ostrze osiągnęło wartość zużycia $VB_C = 0.31$ mm, a więc tę operację uznano za odpowiadającą stępieniu ostrza (kryterium stępienia $VB_C = 0.30$ mm). Próbę kontynuowano, co doprowadziło do katastroficznego stępienia ostrza w czternastej operacji.

Pierwszą operację pierwszego testu (T1) wykorzystano do uczenia układu. W trakcie nadzorowania kolejnych operacji tej próby wskazania układu były niewłaściwe, co wynikało z przypadkowej wartości współczynnika dF_T . Po 12-tej operacji przerwano nadzór i poinformowano układ, że narzędzie jest stępione, co pozwoliło układowi na wyznaczenie właściwej wartości dF_T . Uczenie i następujący po nim nadzór przeprowadzono dwukrotnie – za pierwszym razem korzystając jedynie z sygnału siły posuwowej F_b za

drugim natomiast z sygnałów F_f i F_c , co umożliwiło nadzorowanie zużycia ostrza w oparciu o stosunek F_f/F_c .

Przebieg nadzoru zużycia ostrza w czasie trwania testu T2 przedstawiono w tabelicy 9.1. Już pierwszy rzut oka na tę tablicę wykazuje, że w zastosowanych warunkach skrawania, sygnał AE niezbyt dobrze nadaje się do nadzoru zużycia. W ostateczności mógłby być wykorzystany do sygnalizacji samego stopienia ostrza.

Tablica 9.1. Wyniki badań układu ADONiS

oper	VB_C	dVB_C	ΔT	F_f	F_f/F_c	AE
1	0.03	10	7	0	0	0
2	0.06	19	14	2	0	0
3	0.10	32	21	2	0	0
4	0.12	39	29	2	0	89
5	0.15	48	36	6	6	9
6	0.16	52	43	10	12	0
7	0.17	55	50	19	24	77
8	0.18	58	57	28	42	0
9	0.20	65	64	37	48	0
10	0.24	77	71	49	65	0
11	0.27	87	79	62	77	0
12	0.28	90	86	75	85	217
13	0.29	94	93	89	95	0
14	0.31	100	100	123	131	102
15	0.50	161	107	160	149	170

dVB_C oznacza tu stosunek aktualnej wartości zużycia ostrza (VB_C) do odpowiadającej uzyskanej po stopieniu ostrza (0.31 mm)

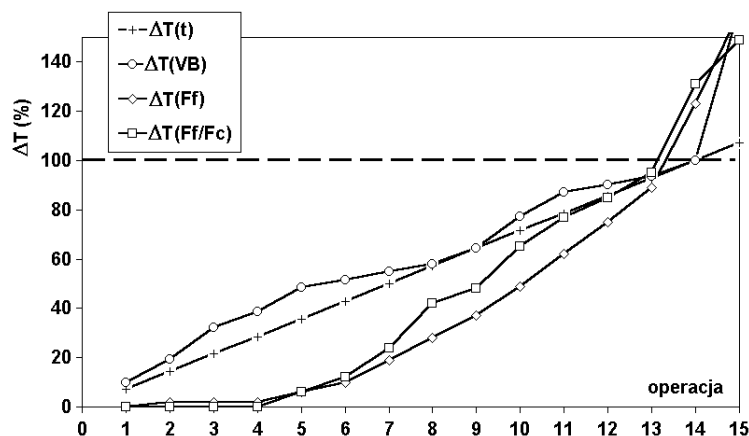
ΔT oznacza rzeczywistą wykorzystaną część okresu trwałości ostrza, czyli stosunek tego okresu co czasu skrawania, tu numeru operacji do liczby operacji do stopienia ostrza (14)

W kolumnach F_f , F_f/F_c i AE zawarto wykorzystane części okresu trwałości ostrza wyznaczone przez układ ADONiS

Na rys. 9.5 przedstawiono jedynie wyniki dotyczące sił skrawania. Zestawiono na nim wykorzystaną część okresu trwałości ostrza ΔT :

- rzeczywistą, wyznaczoną bezpośrednio jako stosunek czasu skrawania do okresu trwałości – $\Delta T(t)$
- obliczoną jako stosunek aktualnej wartości zużycia ostrza (VB_C) do kryterium stopienia – $\Delta T(VB_C)$
- wskazywaną po każdej operacji przez układ, przy korzystaniu z F_f – $\Delta T(F_f)$
- wskazywaną po każdej operacji przez układ, przy korzystaniu z F_f i F_c – $\Delta T(F_f/F_c)$

Wykorzystaną część okresu trwałości ostrza najdokładniej można określić na podstawie pomiarów zużycia ostrza, co jednak nie wchodzi w rachubę w warunkach produkcyjnych. Przy oszacowaniu ΔT na podstawie siły posuwowej charakterystyczne jest utrzymywanie się zaniżonych wskazań układu na początku okresu trwałości ostrza. Wynika ono ze słabego wzrostu siły F_f w tym czasie. Tym niemniej, pod koniec trwałości narzędzia, wskazania układu bardzo mocno zbliżają się do właściwych, a po stopieniu ostrza znacznie je przewyższają, co jest korzystną cechą działania układu. Przy korzystaniu ze stosunku sił F_f/F_c wyniki okazały się nieco bardziej dokładne.



rys. 9.5. Wyniki pracy układu wykorzystującego sygnały sił skrawania.

Testowanie skuteczności wykrywania katastroficznego stępienia ostrza jest zawsze kłopotliwe, jako że KSO jest zjawiskiem losowym, trudnym do uzyskania „na zawołanie”. „Na szczęście” tu wystąpiło takie stępienie w ostatniej operacji testu pierwszego. Oczywiście wykorzystano tę próbę do badania poprawności działania układu ADONiS. Ponadto użyto dwóch innych prób z obszernego archiwum ITM PW. Są to:

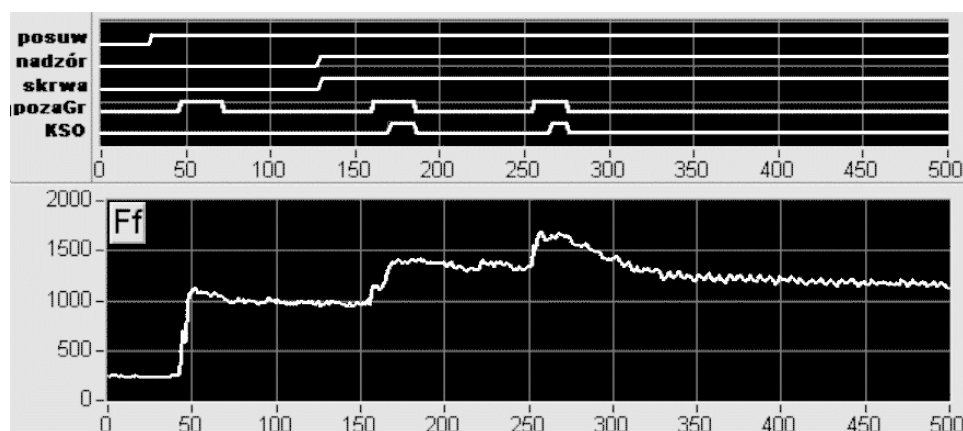
- próba C29 przeprowadzona w 1993 roku w CBKO na ASO T50 [97, 76, 110], przy wykorzystaniu przemysłowych czujników siły posuwowej zainstalowanych w oprawach łożysk śrub tocznych napędu posuwu, wykorzystana już w rozdziale szóstym (rys. 6.20 i 6.21); materiał obrabiany stal 45 wałek początkowo gładki, potem z rowkiem wpustowym, narzędzie BT32-PCLN 3240-12, CNMG120408 TCS2, $a_p = 4$ mm, $f = 0.3$ mm/obr, $v_c = 39.6$ m/min, $n = 140$ obr/min,
- próba B27 przeprowadzona w 1996 roku na stanowisku przedstawionym na rys. 3.11; materiał obrabiany stal 45, wałek z rowkiem wzdłużnym, narzędzie CSRNR 2525-12, SNUN 120408 NT35, $a_p = 4$ mm, $f = 0.42$ mm/obr, $v_c = 120$ m/min, $n = 330$ obr/min

Próba T1 op 14

Przebieg nadzoru KSO w ostatniej operacji testu pierwszego przedstawiono na rys. 9.6. Jest to kopia ekranu komputera osobistego w czasie pracy programu obsługującego wizualizację danych przesłanych z ADONIS'a 2. Warto podkreślić, że zastosowano przy tym częstość próbkowania zaledwie 250 Hz – na tym, jak zresztą na wszystkich rysunkach uzyskanych bezpośrednio z tego programu na osi poziomej jednostką osi czasu jest iteracja – tu równa 4 ms. Z lewej strony u góry widoczny jest stan flag sygnalizujący ważne parametry pracy układu: posuw, monitorowanie, skrawanie, przekraczanie przez sygnał F_s granic (patrz rys. 6.12) oraz wykrycie i sygnalizację KSO. Niżej przedstawiono przebieg siły F_f . Z prawej strony widoczny jest wygląd wyświetlacza po wykryciu KSO.

Przebieg próby ilustruje znaczenie czasu wcinania, jaki jest uwzględniany przed rozpoczęciem nadzoru. Jak widać detektor KSO pracuje od początku, a wykroczenie sygnału F_s poza granice steruje doborem filtrów. Sygnalizacja KSO jest jednakże włączana dopiero po trzech obrotach przedmiotu od wejścia narzędzia w materiał. Tu zaledwie po ok. 100 iteracjach (0.4s) od rozpoczęcia skrawania wystąpiło

wykruszenie ostrza, a chwilę później następne. Ponieważ w tych badaniach zastosowano obrabiarkę konwencjonalną, układ nadzorujący nie mógł przerwać obróbki. Tym niemniej oba KSO zostały prawidłowo zidentyfikowane i zasygnalizowane.



rys. 9.6. Katastroficzne stępienie ostrza wykryte w teście pierwszym.

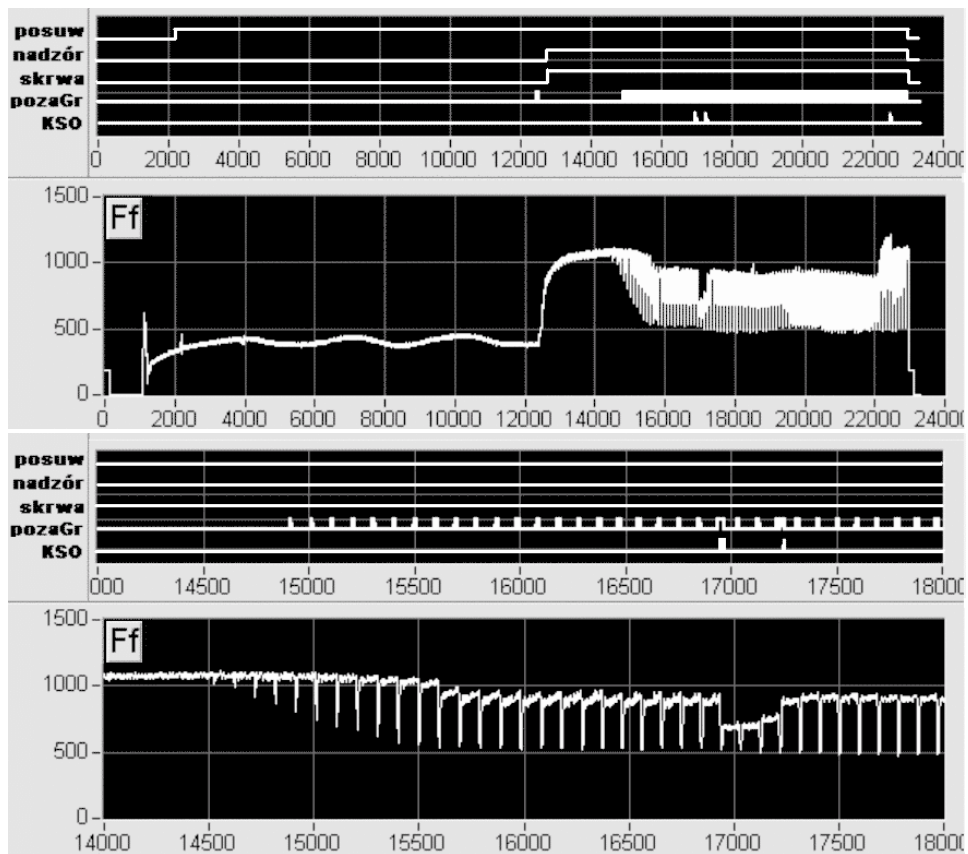
Próba C29

W próbie tej występowała jeszcze niższa częstotliwość próbkowania, bo zaledwie 190 Hz. Zastosowano tu wyjątkowo długi dobieg, w celu zbadania przebiegu sygnału pochodzącego z czujnika zainstalowanego w oprawie łożyska śruby tocznej napędu posuwu (patrz punkt 5.1). Przez cały ten czas (ponad 50 s) układ oczekiwał na skrawanie wstrzymując się z podjęciem nadzoru. Podobnie jak w omówionej poprzednio próbie odczekanie trzech obrotów od wejścia w materiał uchroniło przed błędnym alarmem KSO (rys. 9.7).

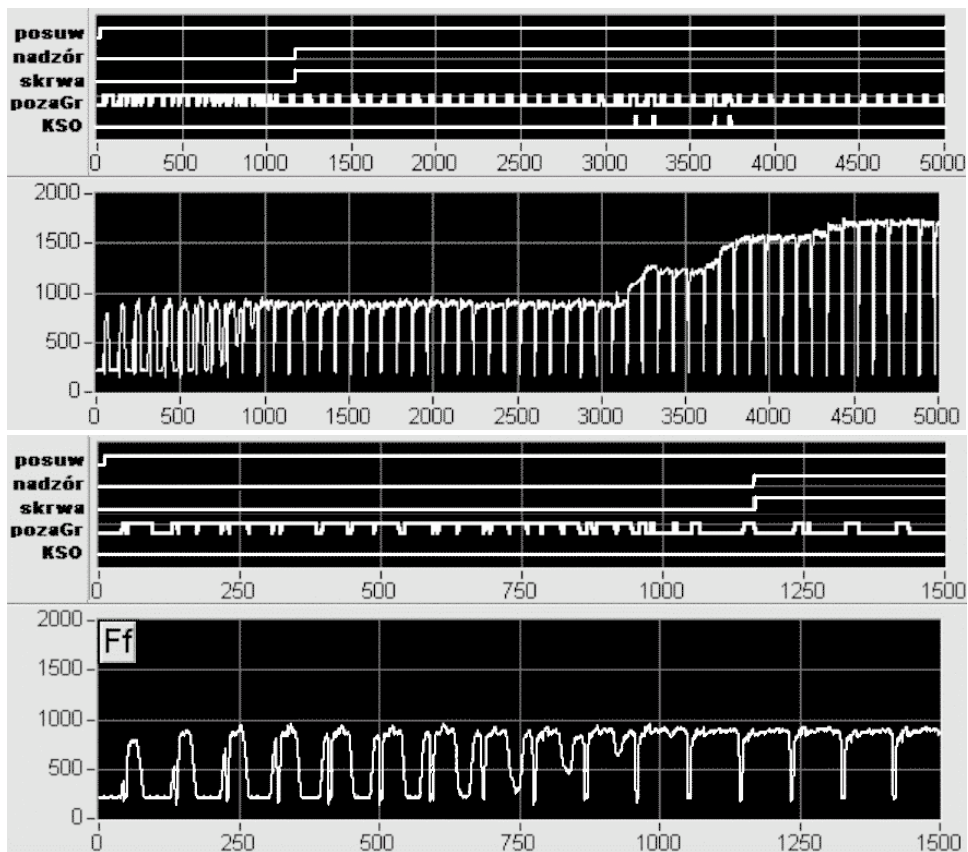
Po rozpoczęciu obróbki fragmentu wałka z rowkiem wpustowym wystąpił charakterystyczny spadek wartości sygnału spowodowany uwolnieniem naprężeń skumulowanych w układzie kinematycznym obrabiarki (patrz punkt 5.1). Został on poprawnie zinterpretowany czyli zignorowany dzięki zastosowanej najniższej czułości detektora (przy wyższej niż 1 występował błędny alarm ok.15600 iteracji). Wskazuje to na rolę właściwie do warunków obróbki dobranej czułości. Chwilę później wystąpiło wyłamanie płytki, a po trzech obrotach przedmiotu wyraźne wykruszenie – oba wykryte przez detektor. Pod koniec próby wystąpiło kolejne wyłamanie, ponownie wykryte przez program.

Próba B27

W próbie B27 rowek wzdłużny występował na całej długości wałka. Ponadto jego czoło było wyraźnie nieprostopadłe do osi, co powodowało jego znaczne bicie czołowe. Przebieg tej próby przedstawiono na rysunku 9.8.



rys. 9.7. Przebieg nadzoru KSO w próbie C29. Wyżej cała próba, niżej wybrany fragment.



rys. 9.8. Przebieg nadzoru KSO w próbie B27; wyżej cała próba, niżej początek.

Bicie czoła wałka powoduje, że czas wcinania znacznie się wydłuża, co grozi fałszywymi alarmami KSO. Można temu zapobiec podając niższą od rzeczywistej prędkość obrotową wrzeciona. Tu wynosiła ona 330 obr/min, natomiast w ustawieniach podano 100 obr/min. Łącznie z odliczaniem od czasu wcinania czasu, w którym nie ma skrawania, dało to opóźnienie rozpoczęcia nadzoru aż do dwunastego obrotu od pierwszego kontaktu narzędzia z przedmiotem. Występujące później katastroficzne stępienie ostrza zostało sprawnie wykryte.

Przedstawione tu wyniki badań są zaledwie wstępne. W chwili oddawania książki do druku trwały przygotowania do instalacji czujnika sił skrawania na centrum obróbkowym tokarskim Venus w Centrum Badawczo-Konstrukcyjnym w Pruszkowie i synchronizacji układu ADONIS 3 z jej układem sterowania. Zainteresowanych wynikami tego uruchomienia zapraszam do swoich następnych publikacji, i prezentacji na konferencjach naukowych.

LITERATURA

- [1] A Sensor for Every Application, *Montronix*, Ann Arbor, USA. 1996.
- [2] A Word of Monitoring Solutions, *Montronix*, Ann Arbor, USA. 1996.
- [3] Accu-Torque Sensor, *Montronix*, Ann Arbor, USA. 1997.
- [4] Acoustic Emission Sensor, *Montronix*, Ann Arbor, USA, 1994.
- [5] Acoustic Emission Transducers and Preamplifiers, *Brüel & Kjær*, 1984.
- [6] Adam P.i in., Prozessnahes Messen - Steigerung der Automatisierung/ Sicherung der Qualität, *Industrie-Anzeiger*, vol. 103, nr 62, 171, 1981.
- [7] Adamczyk Z., Knowledge - Based Concept of Adaptive Control, *V CIRP Int. Conf. on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing AC'98*, Miedzeszyn, 107-114, 1998.
- [8] Adamczyk Z., Jemielniak K., Kosmol J., Sokołowski A., Monitorowanie ostrza skrawającego, metody konwencjonalne i sieci neuronowe, *WNT*, Warszawa, 1996.
- [9] Adamczyk, Z., AI in Automatic Supervision and Control of Machining Process, *IV CIRP Int. Conf. on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing AC'95*, Miedzeszyn, 99-110, 1995.
- [10] AE Piezotron Coupler 5125A, Piezo-Instrumentation, No 12, 5125, *Kistler Instrumentation Corp.*, 1995.
- [11] Albrecht L., Beurteilung des Werkzeugzustandes auf der Grundlage einer Mehrk-omponenten-Schnittkraftmessung, *VDI-Z*, vol. 125, nr 11, 419, 1983.
- [12] Aoyama H., Ohzeki H., Mashine A., Takashita J, Cutting Force Sensing in Milling Process, *VDI Berichte* vol. 1179, 319-333, 1995.
- [13] Aparatura do ultradźwiękowych badań nieniszczących, *Unipan*.
- [14] Automatic Tool Monitor MA 300 and MA 302 for Machining Centres and Milling Machines, *Prometec*, Aachen, Germany.
- [15] Axial and Radial Measuring Dowel, *Prometec*, Aachen, Germany.
- [16] Axial displacement sensor DSA 50, *Prometec*, Aachen, Germany.
- [17] Balazinski, M., Bellerose, M. i Czogala, E., Application of Fuzzy Logic Techniques to the Selection of Cutting Parameters in Machining Processes, *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 63, 307-317, 1994,.
- [18] Balazinski M., Introduction to Fuzzy Logic. Fuzzy logic – a powerful new technology, *École Polytechnique de Montréal*, 1999.
- [19] Balazinski M., Jemielniak K., Tool Conditions Monitoring Using Fuzzy Decision Support System, *V CIRP Int. Conf. on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing AC'98*, Miedzeszyn, 115-122, 1998.
- [20] Baldoni J.G., Buljan S.T., Sarin V.K., Deformation and Wear of Cemented Carbide Cutting Tools. *Proc of 11-th NAMR Conf.*, 342, 1983.
- [21] Bankamp C 8060, *Brankamp, Erkrath*, Germany, 1997.
- [22] Bankamp CMS, *Brankamp, Erkrath*, Germany, 1994.
- [23] Bankamp GT, *Brankamp, Erkrath*, Germany, 1997.
- [24] Bodnar A., Computational diagnostics of self-excited vibrations in a machine tool – cutting process system, *Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń*, vol. 22, zeszyt 2, 53-72, 1998.
- [25] Byrne G., Dornfeld D., Inasaki I., Ketteler G., König W., Teti R., Tool Condition Monitoring (TCM)- The status of Research and Industrial Application, *CIRP Annals* vol. 44, No 2, 541-567, 1995.

- [26] Cavalloni C., Engeler P., Schaffner G., Strain Measurement inside Structures with Piezoelectric Sensors, *Sensors and Sensor Systems*, vol. 3, 132-143, 1991.
- [27] Cavalloni C., Kirchheim A., New Acoustic Emission Sensors for In-Process Monitoring, *12th International Acoustic Emission Symposium*, Sapporo, Japan, 1994.
- [28] Chen X., Ermittlung der Gerauchursachen beim Innendrehen, *Industrie Anzeiger*, vol. 105, No 18, 25, 1983.
- [29] Cho D.-W., Lee, S.J., Chu, C.N., The state of machining process monitoring research in Korea, *Int. Journal of Machine Tools And Manufacture*, vol. 39, No 11, 1697-1715, 1999.
- [30] Choudhury S.K., Kishore K.K., Tool wear measurement in turning using force ratio, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 40, 899-909, 2000.
- [31] Christofel K., Standzeitenderkennung beim Fräsen, *Industrie Anzeiger*, vol. 107, No 53, 45, 1985.
- [32] Chrzanowski J., Szafarczyk M., Winiarski A., Winiarski M., Monitorowanie i korekcja zużycia wymiarowego noży tokarskich, *Konferencja NT Automatykacja – Nowości i Perspektywy, Automation 2001*, Warszawa, 421-427, 2001.
- [33] CNC Werkzeug - Masseinrichtung. System Blum, *Balluf*, Katalog 506 D, 1985.
- [34] Control Monitor CoMo II, *Kistler*, Winterhur, Switzerland. 1997,
- [35] Controlling system Type ICS, Tap holder with a permanent torque control, *Emuge*, Lauf a d Pegnitz, Germany.
- [36] Cutting Force Measurements. Innovative Precision for Optimizing Productivity, *Kistler*, Winterhur, Switzerland, 1995.
- [37] Dagil S., Jemielniak K., Rejestrator Emisji Akustycznej, *Konferencja Naukowa „Maszyny i Urządzenia Technologiczne - Podstawy Projektowania, Budowy i Eksploatacji”*, Miedzeszyn, 1993.
- [38] Darlewski J., Gawlik J., Grzesik W., Jemielniak K., Ruszaj A., Weiss E., Żebrowski H., Trendy w ubytkowych metodach obróbki, *Automatykacja produkcji '97 Innowacje w technice i zarządzaniu*, Wrocław, 175-212. 1997.
- [39] D'Errico G.E., Fuzzy control systems with application to machining processes, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 109, 38-43, 2001.
- [40] Dimla E. Dimla Snr., Sensor Signals For Tool-Wear Monitoring in Metal Cutting Operations – a Review of Methods, *Int. J. Mach. Tools & Manufact*, vol 40, pp. 1073-1098
- [41] Dimla JR D.E., Lister P.M., Leighton N.J., Neural Network Solutions to the Tool Condition Monitoring Problem in Metal Cutting – a Critical Review of Methods, *Int. J. Mach. Tools & Manufact.*, vol. 37, No 9, 1219-1241, 1997.
- [42] DMS-Technik, Mess-Systeme für die Produktions technik, Mess-Geräte für die Produktionstechnik, *Promess GmbH*, 1985.
- [43] Dornfeld D., Future Directions for Intelligent Sensors, *Proc. Third Meeting of the CIRP Working Group on TCM*, Paris, 1994, 52-57.
- [44] Dornfeld D., Glossary of Sensors and Sensor Related Terms for Monitoring of Machining Processes, *Proceedings of the Third Meeting of the CIRP Working Group on Tool Condition Monitoring*, Paris, 88, 1994.
- [45] Dornfeld D., Monitoring Technologies for Intelligent Machining, *Proc. of Int. CIRP/VDI-Conf. "Monitoring of Machining and Forming Processes"*, *VDI Berichte*, vol. 1179, 71-90, 1995.
- [46] Dornfeld D., CAI G.H., An Investigation of Grinding and Wheel Loading Using Acoustic Emission. *Jour. of Engg. for Ind.* vol. 106, No 29, 28, 1984.

- [47] Eda H., Kakino Y., Fujiwara A. i in., In-Process Detection of Grinding Cracks by the Use of Acoustic Emissions, *Bull. Japan Soc. of Prec. Engg.*, vol. 19, No 3, 181, 1985.
- [48] Eda H., Kisi K. i in., In-Process Detection of Grinding Burn by Means of Utilizing Acoustic Emission, *Bull. Japan Soc. of Prec. Engg.*, vol. 18, No 4, 299, 1984.
- [49] Eman K., Wu S. M., A Feasibility Study of On-Line Identification of Chatter in Turning Operation, *J. Eng. for Ind. Trans of ASME*, 315, 1980.
- [50] Etxeberria, J., Arnaiz A., Azuke I., In Process Tool Wear Detection in Face Milling by Neural Networks using Internal Sensor Signals, *Proceedings of the Second Int. Workshop of Intelligent Manufacturing Systems*, Leuven, 737-745, 1999.
- [51] Fluid Sound Sensor WAE 100, *Prometec*, Aachen, Germany.
- [52] Force Measurements, *Kistler*, Winterhur, Switzerland, 1992.
- [53] Gawlik J., Zębala W., New Concept of Edge Wear Prediction in the Precision Cutting, *IV CIRP Int. Conf. on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing AC'95*, Miedzeszyn, 149-156, 1995.
- [54] Giusti F., Santochi M., Tantussi G., On-Line Sensing of Flank and Crater Wear of Cutting Tools, *Annals of the CIRP*, vol. 36, No 1, 41, 1987.
- [55] Grzesik, W., Kwiatkowska, E., A Multi-Criterion Approach to Chip-Form Recognition in Turning, *IV CIRP Int. Conf. on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing AC'95*, Miedzeszyn, 163-172, 1995,.
- [56] Hamrol A., Generalczyk P., Diagnosis of Grinding Process Applying Computer Supporting, *IV CIRP Int. Conf. on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing AC'95*, Miedzeszyn 1995, 291-298.
- [57] Hamrol A., Twardowski P., Shape Error Control for Turning Hardened Steel Based on Neural Network Model, *V CIRP Int. Conf. on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing AC'98*, Miedzeszyn 1998, 123-128.
- [58] Honczarenko J., Elastyczna automatyzacja wytwarzania. Obrabiarki i systemy obróbkowe. *WNT*, Warszawa, 2000.
- [59] Hatano H. and Mori E., Acoustic Emission Transducer Calibration, *Materials Evaluation*, vol. 33 No 2, 41, 1976.
- [60] Hatano H. and Mori E., Calibration of Acoustic Emission Transducers, *Presented at Joint Japanese and U.S. Acoustical Societies Meeting*, Hawaii, December 1978.
- [61] Hsu N. N., Berckenridge F. R., Characterization and Calibration of Acoustic Emission Sensors, *Journal of Materials Evaluation*, vol. 39, 60-68, 1981.
- [62] Hsu N. N., Hardy S. C., Experiments in Acoustic Emission Waveform Analysis for Characterization of AE Sources, Sensors and Structures, *Elastic Waves and Non-destructive Testing of Materials*, AMD 29, 85-106, 1978.
- [63] <http://www.kistler.ch>
- [64] <http://www.montronix.com>
- [65] Ichimiya R., Aichi M., Analiza dźwięków emitowanych przez tokarkę przy skrawaniu narzędziem jednostrzowym. *Mechanik.* nr 4, 213, 1982.
- [66] Inasaki I., Monitoring of Cutting and Grinding in Japan, *Proceedings of the Third Meeting of the CIRP Working Group on Tool Condition Monitoring*, 88, Paris, 1994.
- [67] Inasaki I., Sensor fusion for Monitoring Cutting Processes, *Proc. of the Second Int. Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*, Leuven, Belgium, 801-807, 1999.

- [68] Inasaki I., Karpuschewski B., Lee H.S, Grinding Chatter – Origin and Suppression, *Annals of CIRP*, vol. 20, No 2, 2001.
- [69] Inasaki I., Yonetsu S., In-Process Detection of Cutting Tool Damage by Acoustic Emission Measurement, *Proc. of 22-nd Int. MTDR Conf.*, 261-269, 1981.
- [70] Induktive Bohrerebuch-Kontrolle, *Euchner*, Katalog 023 550, 1983.
- [71] Instrukcja obsługi zestawu do pomiaru emisji akustycznej DEMA-10, *Techpan*.
- [72] Iwata K., Moriwaki T., An Application of Acoustic Emission Measurement to In-Process Sensing of Tool Wear, *Annals of the CIRP*, vol. 25, No 1, 25, 1977.
- [73] Iwata K., Moriwaki T., Cutting State Identification and In-Process Tool Wear Sensing by Acoustic Emission Analysis, *Bull. Japan Soc. of Prec. Engg.*, vol. 12, No 4, 213, 1978.
- [74] Jagodziński Z., Przetworniki ultradźwiękowe, *WKŁ Warszawa*, 1997.
- [75] Jemielniak K., Algorithm of the Detector of the Cutting Edge Breakage in Turning, CIRP January Meeting, STC “Cutting” Paris, 1993.
- [76] Jemielniak K., Catastrophic Tool Failure Detection Based on Signals from Feed Force Sensors, *IV CIRP Int. Conf. on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing AC'95*, Miedzeszyn, 127-134, 1995.
- [77] Jemielniak K., Commercial Tool Condition Monitoring Systems, *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 15, 711-721, 1999.
- [78] Jemielniak K., Detection of Cutting Edge Breakage in Turning, *Annals of the CIRP*, vol. 41, nr 1, 91-100, 1992.
- [79] Jemielniak K., Diagnostyka stanu narzędzi w autonomicznych stacjach obróbkowych, *Mechanik*, nr 4, 183-190, 1988.
- [80] Jemielniak K., Diagnostyka stanu narzędzia w pracach Instytutu Technologii Maszyn Politechniki Warszawskiej, *Międzynarodowa Konferencja Naukowa OBRÓBKA MATERIAŁÓW, OM'2000*, Kraków, 2000, vol. 1, 91-102.
- [81] Jemielniak K., Dobór estymat sił skrawania do nadzorowania zużycia ostrza przy toczeniu ze zmiennymi parametrami skrawania. *Mechanik*, nr 8-9, 285-288, 1991.
- [82] Jemielniak K., Laboratoryjny Monitor Stanu Narzędzia, *III Szkoła-Konferencja „Metrologia Wspomagana Komputerowo”*, Zegrze k/Warszawy, 215-220, 1997.
- [83] Jemielniak K., Obróbka Skrawaniem, *Oficyna Wydawnicza PW*, 1998
- [84] Jemielniak K., Obróbka wysokoczęstotliwościowych sygnałów emisji akustycznej pochodzącej z procesu skrawania, *Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń*, vol. 18, nr 4, 21-29, 1994.
- [85] Jemielniak K., Przebieg sił skrawania w czasie tępienia się ostrza przy toczeniu, *Mechanik*, nr 5-6, 175-178, 1991.
- [86] Jemielniak K., Przemysłowe układy diagnostyki stanu narzędzia i procesu skrawania. *Mechanik*, 11, 625-631, 1998.
- [87] Jemielniak K., Some Aspects of Acoustic Emission Signal Pre-processing, *Journal of Materials Processing Technolog.*, vol. 109, No 3, 242-247, 2001.
- [88] Jemielniak K., Some Aspects of AE application in Tool Condition Monitoring, *Ultrasonics*, 38, No 1-8, 603-607, 2000, referat zapraszany na *Ultrasonics International '99 joint with 1999 World Congress of Ultrasonics*, Copenhagen 1999.
- [89] Jemielniak K., Tendencje rozwojowe w diagnostyce stanu narzędzia i procesu skrawania, *Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń*, vol. 21, nr 1, 43-55, 1997.

- [90] Jemielniak K., Tool Wear Monitoring by Means of Artificial Neural Networks, *II Int. Conf. of Advances in Production Engineering APE'2001*, Warsaw, 2001.
- [91] Jemielniak K., Wykrywanie katastroficznego stępienia ostrza przy toczeniu. *Mechanik.*, nr 7, 233-238, 1991.
- [92] Jemielniak K., Wykrywanie katastroficznego stępienia ostrza w oparciu o sygnały z łożysk pomiarowych śrub tocznych. *Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wrocławskiej*, nr 57, 167-176, 1995.
- [93] Jemielniak K., Balazinski M., Laboratory Versus Industrial Cutting Force Sensor in Tool Condition Monitoring, *The International Journal for Manufacturing Science & Production*, 3, No 1, 41-47, 2000.
- [94] Jemielniak K., Belgassim O., Acoustic Emission Signal Pre-processing and Interpretation in Tool Condition Monitoring, *Int. Conf. on Development in Metal Cutting*, TU Košice, Košice, PL12-PL18, 1996.
- [95] Jemielniak K., Belgassim O., Characteristics of Acoustic Emission Sensors Employed for Tool Condition Monitoring, *VII CIRP Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining Systems*, Karpacz, 241-252, 1996.
- [96] Jemielniak K., Bombiński S., Analiza przydatności różnych typów sztucznych sieci neuronowych do oceny zużycia ostrza skrawającego przy toczeniu w warunkach przemysłowych, *Grant Rektorski, Politechnika Warszawska*, 2000/2001.
- [97] Jemielniak K., Dworak P., Ograniczenia możliwości wykorzystania układu TMS w diagnostyce stanu narzędzia, *Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń*, vol. 19, nr 1, 21-28, 1995.
- [98] Jemielniak K., Kosmol J., Diagnostyka narzędzia i procesu skrawania - stan aktualny i kierunki rozwoju, *Mechanik*, nr 10, 429-437, 1996.
- [99] Jemielniak K., Kosmol J., Tool and Process Monitoring - State of Art and Future Prospects, *VI CIRP Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining Systems*, Karpacz, 90-112, 1995.
- [100] Jemielniak K., Kwiatkowski L. i in., Analiza zależności emisji akustycznej od stanu narzędzia przy toczeniu, *Praca własna, Politechnika Warszawska*, 1991.
- [101] Jemielniak K., Kwiatkowski L. i in., Budowa układu diagnostyki stanu narzędzia opartego na pomiarach emisji akustycznej, *Projekt KBN 7 1241 91 01, Politechnika Warszawska*, 1990-1993.
- [102] Jemielniak K., Kwiatkowski L., Badania zależności sygnału AE od stanu narzędzia przy toczeniu, *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji*, vol. 13, 299-309, 1994.
- [103] Jemielniak K., Kwiatkowski L., Emisja akustyczna w diagnostyce stanu narzędzia skrawającego, *Mechanik*, nr 12, 563-567, 1987.
- [104] Jemielniak K., Kwiatkowski L., Ocena przydatności miar emisji akustycznej do diagnostyki stanu narzędzia przy toczeniu, *II Forum Prac Badawczych „Kształtowanie części maszyn przez usuwanie materiału”*, Mielno-Unieście 1996,
- [105] Jemielniak K., Kwiatkowski L., Wykorzystanie sygnału emisji akustycznej pochodzącego ze strefy skrawania do określenia zużycia ostrza podczas toczenia stali 45, *Materiały Konferencji NT „Rozwój narzędzi tokarskich - PAFANA '95”*, PFN, Pabianice, 103-111, 1995.
- [106] Jemielniak K., Kwiatkowski L., Zależność sygnałów emisji akustycznej od stanu narzędzia przy toczeniu, *Konferencja Naukowa „Maszyny i Urządzenia Technologiczne - Podstawy Projektowania, Budowy i Eksploatacji”*, Politechnika Warszawska, Miedzeszyn, 1993.

- [107] Jemielniak K., Kwiatkowski L., Wrzosek P., Diagnosis of Tool Wear Based on Cutting Forces and Acoustic Emission Measurements as Inputs to a Neural Network, *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 9, 447-455, 1998.
- [108] Jemielniak K., Kwiatkowski L., Wrzosek P., Ocena przydatności miar emisji akustycznej i sił skrawania do diagnostyki stanu narzędzia przy toczeniu, *Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń*, vol. 21, nr 2, 25-36, 1997.
- [109] Jemielniak K., Kwiatkowski L., Zawistowski J., Możliwość przewidywania zużycia ostrza noża tokarskiego przy skrawaniu ze zmiennymi parametrami skrawania, *Archiwum TBM PAN*, vol. 6, 425-432, 1987.
- [110] Jemielniak K., Niedbała M., Badania układu automatycznego nadzoru stanu narzędzia w ASO T50, *I Forum Prac Badawczych „Kształtowanie Części Maszyn przez Usuwanie Materiału”*, WSI Koszalin, KBM-PAN, Mielno-Unieście, 99-108, 1994.
- [111] Jemielniak K., Otman O., Catastrophic Tool Failure Detection Based on Acoustic Emission Signal Analysis, *Annals of the CIRP*, vol. 48, 31-34, 1998.
- [112] Jemielniak K., Otman O., Tool Failure Detection Based on Analysis of Acoustic Emission Signals, *Journal of Material Processing Technology*, vol. 76, 192-197, 1998.
- [113] Jemielniak K., Szafarczyk M., Zawistowski J., Difficulties in Tool Life Predicting when Turning with Variable Cutting Parameters, *Annals of the CIRP*, vol. 37, No 1, 113-116, 1985.
- [114] Jemielniak K., Szafarczyk M., Zawistowski J. i in., Zużycie noży tokarskich przy obróbce ze zmiennymi parametrami skrawania, *Mechanik*, nr 1, 21-24, 1983.
- [115] Jemielniak K., Szwajka K., Automatyczna diagnostyka ostrzy narzędzi skrawających przy toczeniu, *Grant promotorski KBN, Politechnika Warszawska 2000-2001*.
- [116] Jemielniak K., Szwajka K., Badania zależności sił skrawania od zużycia ostrza przy toczeniu z zastosowaniem czujników przemysłowych. *III Ogólnokrajowa Konferencja Naukowo-Techniczna Postępy w Technice Wytwarzania Maszyn*, Kraków, 93-100, 1999.
- [117] Jemielniak K., Szwajka K., Budowa układu automatycznego nadzoru stanu narzędzia, *Program Priorytetowy Nowe Technologie, Prace Naukowe PW, zeszyt 2, Oficyna Wydawnicza PW*, 215-224, 1999.
- [118] Jemielniak K., Szwajka K., Strategia działania układu automatycznej diagnostyki ostrzy narzędzi skrawających, *IV Międzynarodowe Sympozjum nt.: “OSiN’ 99”*, Kraków, 133-140, 1999.
- [119] Jemielniak K., Szwajka K., Układ automatycznej diagnostyki ostrzy narzędzi skrawających, *Program Priorytetowy Nowe Technologie, Prace Naukowe PW, zeszyt 3, Oficyna Wydawnicza PW*, 61-70, 2000.
- [120] Jemielniak K., Szwajka K., Zawistowski J., Zastosowanie przemysłowych torów pomiarowych do badania sił skrawania i emisji akustycznej, *Program Priorytetowy Nowe Technologie, Prace Naukowe PW, zeszyt 1, Oficyna Wydawnicza PW*, 149-158, 1998.
- [121] Jemielniak K., Widota A., Zagadnienia stabilności obróbki skrawaniem, *Materiały XIII-tej Międzynarodowej Konferencji Dynamiki Maszyn INTERDYNAMICS’81*, 218, 1981.
- [122] Jemielniak K., Wrzosek P., Zastosowanie metod sztucznej inteligencji do diagnostyki stanu narzędzia przy toczeniu, *Grant Rektorski, Politechnika Warszawska*, 1999.
- [123] Jemielniak K., Wrzosek P., Zastosowanie sieci neuronowych typu FFBP i RBF do oceny zużycia ostrza skrawającego przy toczeniu, *VI Międzynarodowe Sympozjum Obróbka Skrawaniem i Narzędzia OSiN’99*, Kraków, 119-132, 1999.

- [124] Jemielniak K., Wrzosek P., Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do diagnostyki stanu narzędzia przy toczeniu, *Grant Rektorski, Politechnika Warszawska*, 1998.
- [125] Jemielniak K. i in., Automatyczna diagnostyka stanu narzędzia w operacjach tokarskich, *CPBP 02.04- 04.02-02, Politechnika Warszawska*, 1990.
- [126] Jemielniak K. i in., Automatyczna ocena zużycia ostrza w oparciu o pomiary sił skrawania i emisji akustycznej z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej, *Program Priorytetowy Automatyki Techniki Informatycznej i Automatyzaacji - PATIA, Politechnika Warszawska*, 1996.
- [127] Jemielniak K. i in., Badania zależności emisji akustycznej i sił skrawania od stanu narzędzia przy toczeniu, *Praca statutowa, Politechnika Warszawska*, 1995.
- [128] Jemielniak K. i in., Budowa układu automatycznego nadzoru stanu narzędzia, *Program Priorytetowy NOWE TECHNOLOGIE, Politechnika Warszawska*, 1997-2000.
- [129] Jemielniak K. i in., Budowa wirtualnego układu automatycznej diagnostyki stanu narzędzia, *Grant dziekański konkursowy, Politechnika Warszawska*, 2000.
- [130] Jemielniak K. i in., Podstawy budowy przemysłowych układów automatycznej diagnostyki stanu narzędzi skrawających, *Projekt KBN 8 T07D 019 20, Politechnika Warszawska*, 2001-2003.
- [131] Jemielniak K. i in., Wykorzystanie sygnałów emisji akustycznej i sił skrawania do diagnostyki stanu narzędzia przy toczeniu, *Grant KBN 7T07TD03410*, 1996-1998.
- [132] Jemielniak R., Królikowski J., Witczak P., Witczak Z., Laserowe stanowisko do badania piezoelektrycznych czujników emisji akustycznej, *Konferencja Naukowa Czujniki Optyczne i Elektroniczne COE'92, Zegrze k/Warszawy*, 1992.
- [133] Jetly S., Measuring Cutting Tool Wear On-Line: Some Practical Considerations, *Manufacturing Engineering*, No 6, 55, 1984.
- [134] Kakino Y., Suizu H., Hashitani M. i in., In-Process Detection of Thermal Crack of Cutting Tool by Making Use of Acoustic Emission, *Bull. Japan Soc. of Prec. Engg.*, vol. 17, No 4, 241, 1983.
- [135] Kanneatey-Ashibu E., Dornfeld D.A., A Study of Tool Wear Using Statistical Analysis of Metal-Cutting Acoustic Emission, *Wear*, vol. 78, 247, 1982.
- [136] Ketteler G., Analysis of Requirements for Monitoring Systems, *Proc. of the Second Int. Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*, Leuven, Belgium, 721-725, 1999.
- [137] Ketteler G., Influence on Monitoring Systems Which Affect their Reliability, *Proc. of the Second Int. Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*, Leuven, Belgium, 768-777, 1999.
- [138] Kirchheim A., Schaffner G., Wolfer P., Piezoelektrische Sensoren zur kombinierten Messung von Kräften und Acoustic Emission für die Prozeßüberwachung, *Proc. of Int. CIRP/VDI Conf. Monitoring of Machining and Forming Processes*, VDI Verlag, vol. 1179, 157-172, 1995.
- [139] Kirchheim A., Zanetti M., Reliable Monitoring for Turning Operations. Force Sensor with Integrated Electronics Measures Forces in three Directions, *Swiss Quality Production*, No 4, 1999.
- [140] Kluft W., Automatisches Erkennen des Standzeitendes aus dem Kraftanstieg beim Drehen, *Industrie Anzeiger*, vol. 103, No 14, 29, 1981.
- [141] Kluft W., Schneider G., Methoden zur Werkzeugbruchererkennung beim Fräsen sowie beim Drehen und Bohren in der Einzelteil - und Kleinserienfertigung, *Proc. of Int. CIRP/VDI-Conf. "Monitoring of Machining and Forming Processes"*, VDI Berichte, vol. 1179, 259-269, 1995.

- [142] Ko T.J., Cho D.W., Jung M.Y., On-line monitoring of tool breakage in face milling using self-organized neural network, *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 14, No 2, 80–90, 1995.
- [143] Kondo Y., Kawano O., Suto H., Behaviour of self-excited chatter due to multiple regenerative effect, *J. of Eng. for Ind. Trans. ASME*, 324, 1981.
- [144] König W., Dornfeld D., Rehse M., Sokółowski A., On Designing of a Tool Wear Monitoring System for a Multispindle Drilling Machine, *Proc. IV Int. Conf. on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing*, Miedzeszyn, 89-98, 1995.
- [145] König W., Ketteler G. Research on Tool Condition Monitoring in Europe - State of the Art and Future Prospects, *Proc. Third Meeting of the CIRP Working Group on TCM*, Paris, 8-29, 1994.
- [146] König W., Ketteler G., Klumpen T., Monitoring Turning, Milling, Drilling and Grinding Processes using Acoustic Emission Signals, *Progress in Acoustic Emission VII*, The Japanese Society for NDI, 619-624, 1994.
- [147] König W., Klocke F., Ketteler G., Sensors for Tool Condition Monitoring, *Meeting of the CIRP Working Group on TCM*, Paris, January 1995.
- [148] König W., Kluft W., Processbegleitendes Erkennen von Werkzeugbruch und Verschleisswertgrenzen, *Industrie Anzeiger*, vol. 104, No 96, 33, 1982.
- [149] Kopac J., Sali S., Tool Wear Monitoring During the Turning Process, *Journal of Materials Processing Technology*, 113, 312-316, 2001.
- [150] Korbicz J., Obuchowicz A., Uciński D., Sztuczne sieci neuronowe. Podstawy i zastosowania, *Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ*, Warszawa 1994.
- [151] Kosmol J., Badania nad wykorzystaniem sygnałów wibroakustycznych do nadzorowania zużycia ostrza skrawającego. *Projekt KBN 707319101*, Politechnika Śląska, Gliwice, 1993.
- [152] Kosmol J., Automatyzacja obrabiarek i obróbki skrawaniem, *WNT*, Warszawa, 1999.
- [153] Krupp Widia Bruchsensor System WZL, *Prospekt firmy Krupp Widia GmbH*, 1984.
- [154] Kwiatkowski L., Wykorzystanie czujników ultradźwiękowych do diagnostyki stanu narzędzia, *III Forum Prac Badawczych – „Kształtowanie części maszyn przez usuwanie materiały”* Koszalin, 1998.
- [155] Lan M., Dornfeld D., In Process Tool Fracture Detection, *Trans. ASME, J. Eng. Mats. Tech.*, vol. 106, No 2, 111-118, 1984.
- [156] Laser System for Tool Setting and Breakage Detection, *Blum*, Ravensburg, Germany.
- [157] Le Pair, C., University Research and Industry, *Annals of the CIRP*, vol. 44, No 2, 629-637, 1995.
- [158] Lee J.H., Kim D.E., Lee S.J., Statistical Analysis of Cutting Force Ratios for Flank-Wear Monitoring, *Journal of Materials Processing Technology*, 74, 104-114, 1998.
- [159] Lee J.H., Lee S.J. One-step-ahead prediction of flank wear using cutting force, *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, vol. 39, No 11, 1747-1760, 1999.
- [160] Lee J.M., Choi D.K., Chu C.N., Real-Time Tool Breakage Monitoring for NC Turning and Drilling, *Annals of the CIRP*, vol. 43, No 1, 81-84, 1994.
- [161] Lezanski P., A Neuro-Fuzzy System for Diagnostics of Cylindrical Grinding Process, *V CIRP Int. Conf. on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing AC'98*, 137-144, 1998.
- [162] Lezanski P., An intelligent system for grinding wheel condition monitoring, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 109, 258-263, 2001.

- [163] Lim G.H, Tool-Wear Monitoring in Machine Turning, *Journal of Materials Processing Technology*, 51, 25-36, 1995.
- [164] Lister P.M., Barrow G., Tool Condition Monitoring Systems, *Proc. 26-th Int. MTDR Conf.*, 271, 1986.
- [165] Mackinnon R., Wilson G.E., Wilkinson A.J., Tool Condition Monitoring Using Multi-Component Force Measurements, *Proc. 26-th Int. MTDR Conf.*, 317, 1986.
- [166] Malecki I., Ranachowski J. i in., Emisja akustyczna, źródła, metody zastosowania, *Wydawnictwo Biuro PASCAL*, Warszawa 1994.
- [167] Martin P., Mutels B., Drapier J.P., Influence of Lathe Tool Wear on the Vibrations Sustained in Cutting, *Proc. 15-th Int. MTDR Conf.*, 251, 1975.
- [168] Mason F., Freeman N.B., Turning Centers Come of Age, Special Report 773, *American Machinist*, No 2, 97, 1985.
- [169] McBride S. L., Hutchison T. S., Absolute Calibration of the Helium Gas Jet Noise Source, *Canadian Journal of Physics*, vol. 56, 504-507, 1978.
- [170] McBride S. L., Hutchison T. S., Helium Gas Jet Spectral Calibration of Acoustic Emission Transducers and Systems, *Canadian Journal of Physics*, vol. 54, No 17, 1824-1830, 1976.
- [171] McClenaghan K., Kelly K., Byrne G., Tool Condition Monitoring – A New Algorithm for Breakage Detection, *Proc. of the Second Int. Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*, Leuven, Belgium, 825-833, 1999.
- [172] Micheletti G.F., Konig W., Victor H.R., In Process Tool Sensors for Cutting Operations, *Annals of the CIRP*, vol. 25, No 2, 483, 1976.
- [173] Milberg J., Pilland U., Umfassender Kollisionschutz für Drehmaschinen, *Industrie Anzeiger*, vol. 108, No 10, 34, 1986.
- [174] Modular Process Monitor System PROMOS, *Prometec*, Aachen, Germany.
- [175] Moriwaki T., Detection for Cutting Tool Fracture by Acoustic Emission Measurement, *Annals of the CIRP*, vol. 29, No 1, 35, 1980.
- [176] Moriwaki T., Sensing and Prediction of Cutting Tool Failure, *Bull. Japan Soc of Prec. Engg.*, vol. 18, No 2, 90, 1984.
- [177] Moriwaki T., Iwata K., In-process analysis of machine tool structure dynamics and prediction of machining chatter, *Trans. of ASME*, Paper nr 75-DEC-20, 1975.
- [178] MTC Tool – and Process Monitoring, *Artis*, Ann Arbor, USA. 1997,
- [179] Niedbała M., Szafarczyk M., Jemielniak K. i in., Badania układów automatycznego nadzoru w autonomicznej stacji obróbkowej ASO T50, *Grant KBN 7 7113 91 02, CBKO Pruszków*, 1992-1993.
- [180] Nordmann Sensor Technology, *Nordmann*, Köln, Germany. 1997,
- [181] Novak A., Ossbahr G., Reliability of the Cutting Force Monitoring in FMS-Installations, *Proc. 24th Int. MTDR Conf.*, 325, 1986.
- [182] Ohzeki H., Suda I., Mashine A., Monitoring of tool failure in drilling by utilizing magnetostrictive torque sensor, *Proc. of the Second Int. Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*, Leuven, Belgium, 787-794, 1999.
- [183] Olejarczyk K., Pneumatyczna metoda pomiaru promieniowego zużycia ostrza, *Mechanik*, nr 6, 263, 1987.
- [184] Osowski S., Sieci Neuronowe, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa 1994.

- [185] Otman M.O., Catastrophic Tool Failure Detection in Turning Based on Acoustic Emission Signal Analysis. *Rozprawa doktorska pod kierunkiem K. Jemielniaka, Politechnika Warszawska, 1998.*
- [186] Piezo-Instrumentation, *Kistler*, Winterhur, Switzerland, 1997.
- [187] Piezotron Acoustic Emission Sensor 8125A, Piezo-Instrumentation, No, 8, 8152A, *Kistler Instrumentation Corp*, 1994
- [188] Power Sensor PS 60 und Power Monitor PM 60, *Prometec*, Aachen, Germany.
- [189] Power Sensor, *Montronix*, Ann Arbor, USA, 1996.
- [190] Process Listening System PLS 20, *Prometec*, Aachen, Germany.
- [191] Process Monitor K 100, *Prometec GmbH Aachen*, 1985.
- [192] Process Monitoring for Metal Processing, *Brankamp*, Erkrath, Germany.
- [193] Product data types 8312, 8313, 8314 and 2637, *Brüel & Kjær*, Catalogue No. BP 0245-13.
- [194] Raja J., Whitehouse D.J., Field Testing of Machine Tool Diagnostic Using Surface Metrology, *Annals of the CIRP*, vol. 32, No 1, 1983.
- [195] Real-Time Made Easy with National Instruments LabVIEW™ RT –*National Instruments*.
- [196] RetroBolt Tool Monitoring Sensor, *Montronix*, Ann Arbor, USA. 1994.
- [197] Sata T., Inamura T., Development of method to predict and prevent chattering in metal cutting, *Annals of the CIRP*, vol 24, No 1, 309, 1975.
- [198] Sato A., Ohori M., Characteristic of Two Dimensional Surface Roughness-Taking Self-Excited Chatter Marks as Objective, *Annals of the CIRP*, vol 30, No 1, 481, 1981.
- [199] Schafer G., Sensors, the Eyes and Ears of CIM. Special Report 756, *American Machinist*, No 7, 109, 1983.
- [200] Schneider H.P., Ausfälle und Störungen minimieren, *Industrie Anzeiger Extra, NC-Technik*, 110, 1987.
- [201] Schneider H.P., Widatronic Werkzeugüberwachung in Digital technik, *Krupp Widia GmbH, Werkzeutechnik*. 1985.
- [202] Schulz H., Production rund um die Uhr, *Werkstatt und Betrieb*, vol. 116, nr 1, s.3, 1983.
- [203] Sentoool Rota. Werkzeugüberwachungssystem Drehen, *Technische Universität Dresden*, 1987.
- [204] Shumsheruddin A., Lawrence J.C., In-Process Prediction of Milling Tool Wear, *Proc. 24-th Int. MTDR Conf.*, s. 201, 1983.
- [205] Signal Processing Techniques – a Summary, *Montronix*, Ann Arbor, USA. 1995,
- [206] Sokołowski A., Nadzorowanie stanu ostrza skrawającego z zastosowaniem sieci neuronowej, *Rozprawa doktorska*, Politechnika Śląska, Gliwice, 1994.
- [207] Sokołowski A., Kosmol J., Feature selection for burr height estimation, *V CIRP Int. Conf. on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing AC'98*, Miedzeszyn, 85-92, 1998.
- [208] Sokołowski A., Kosmol J., Selected Examples of Cutting Process monitoring and Diagnostics, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 113, 322-330, 2001.
- [209] Sokołowski A., Kosmol J., Vibration Measurement as a Means for Tool Wear Monitoring; Part 1: Conventional Method Application, *Proc. IV CIRP Int. Conf. on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing*, Miedzeszyn, 111-118, 1995.
- [210] Sokołowski A., Kosmol J., Dornfeld, D.A., Vibration Measurement as a Means for Tool Wear Monitoring; Part 2. Neural Network Application, *IV CIRP Int. Conf. on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing AC'95*, Miedzeszyn, 119-128, 1995.

- [211] Subramanian T.L., Devries M.F., Wu S.M., An investigation of computer control of machining chatter, *J. Eng. for Ind. Trans. ASME*, 1209, 1976.
- [212] Szafarczyk M. (Ed.), Automatic Supervision in Manufacturing, *Springer-Verlag*, London, 1994.
- [213] Szafarczyk M., Monitorowanie i automatyczny nadzór w wytwarzaniu, *Prace Naukowe Wydziału Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej*, zeszyt 68, 137-148, 2001.
- [214] Tadeusiewicz R., Sieci neuronowe, *Akademicka Oficyna Wydawnicza RM*, Warszawa 1993.
- [215] Takemura T., Kitamura T., Itoshi T., Okushima K., Active Suppression Of Chatter By Programmed Variation of Spindle Speed, *Annals of the CIRP*, vol 25, No 1, 121,1974.
- [216] Teti R., A Review of Tool Condition Monitoring Literature Data Base, *Annals of the CIRP*, vol. 44, No 2, 659-666. 1995
- [217] Tlustý J., Andrews G.C., A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining, *Annals of the CIRP*, vol. 32, No 2, 563, 1983.
- [218] Tönshoff H., Wobker H., Hartmann M., Kilsmark P., The Future of Monitoring, *VDI Berichte* Nr. 1179, 347-360, 1995.
- [219] Tönshoff H.K., Brinksmeier E., Husen H., Berührungslose Messung des dynamischen Bearbeitungsmoments zur Überwachung schlanker rotierender Werkzeuge, *Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 108, No 6, 252-257, 1991.
- [220] Tönshoff H.K., Wulfsberg J.P., Kals H.J.J., König W., Van Luttenevelt C.A., Developments and Trends in Monitoring and Control of Machining Processes, *CIRP Annals*, vol. 37, No 2, 611-622, 1988.
- [221] Tool Monitor System, *Prometec GmbH Aachen*, 1985.
- [222] Tool Monitoring for the Protection and Unsupervised Operation of Machine Tools, *Nordmann*, Köln, Germany. 1997,
- [223] Tool Monitoring System, Current Sensor, *Sandvik Coromant*, 1986,
- [224] Tool Monitoring System, Installation Guide, Multi-channel Tool Monitor, *Sandvik Coromant*, 342-TMS: 007 ENG, 1984
- [225] Tool Monitoring System, Multi-channel Tool Monitor Unit, *Sandvik-Coromant*, 342-TMS:001, 1984.
- [226] Tool Monitoring System, Vorschubkraftsensor, *Sandvik-Coromant*, 342-TMS: 003-GER, 1984.
- [227] Tool Monitoring Unit SEM-B1, *Nordmann*, Köln, Germany. 1997,
- [228] TS Series Tool Monitors, *Montronix*, Ann Arbor, USA. 1991,
- [229] TS100 Series Tool Monitors, *Montronix*, Ann Arbor, USA. 1996,
- [230] TS200 Series Tool Monitors, *Montronix*, Ann Arbor, USA. 1991,
- [231] TS300 Series Tool Monitors, *Montronix*, Ann Arbor, USA. 1997,
- [232] TS50 Series Tool Monitors, *Montronix*, Ann Arbor, USA. 1997
- [233] Uerhara K., Kanda Y., Identification of Chip Formation Mechanism through Acoustic Emission Measurements. *Annals of the CIRP*, vol.33, nr 1, s. 71, 1984.
- [234] Ultra Sound and Vibration Sensor AE 30, *Prometec*, Aachen, Germany.
- [235] Varma A., Kline W.A., Multi Sensor Tool Monitoring-Applications Experience and Future Trends in Industry and Education, *VDI Berichte* 1179, 223-233, 1995.
- [236] Vibraton Sensor, *Montronix*, Ann Arbor, USA. 1996.

- [237] Villa A., Quagilia G., Chiara R., Levi R., An Expert Control System for Tool Life Management in Flexible Manufacturing Cells, *Annals of the CIRP*, vol 34, nr 1, s. 87, 1985.
- [238] Volk W., Statystyka stosowana dla inżynierów, *WNT*, Warszawa 1973.
- [239] Webster J., Dong W.P., Lindsay R., Raw Acoustic Emission Signal Analysis of Grinding Process, *Annals of the CIRP*, Vol 45/1, 335-340, 1996.
- [240] Weck M., Eckstein R., Stan i tendencje w badaniach i ocenie dynamicznych właściwości obrabiarek, *Mechanik* nr 6,355, 1985.
- [241] Weck M., Gather M., Massnahmen und Strategien zur Stabilisierung des Frasprouesses, *Industrie Anzeiger*, vol. 98, No 28, 457, 1976.
- [242] Weck M., Muller W., Werth K.H., Sensoren fur fremd- und selbsterregte Schwingungen - Rattern bei adaptivem geregelten Werkzeugmaschinen, *Industrie Anzeiger*, vol.98, No 85, 1497,1976.
- [243] Weck M., Pascher M., Sensorloses Kollisionschutzsystem fur Werkzeugmaschinen, *Industrie Anzeiger*, vol. 109, No 7, 10, 1987.
- [244] Weck M., Vahaag E., Gather M., Adaptive control for face milling operations with strategies for avoiding chatter vibrations and for automatic cut distribution, *Annals of the CIRP*, vol. 24, No 1, 405, 1975.
- [245] Weller E.J., Shirier H.M., Weichbrodt B., What Sound Can Be Expected From a Worn Tool, *Trans ASME*, vol 91B, No 3, 525, 1969.
- [246] Whitehouse, D. J., Beta Functions for Surface Topology, *Annals of the CIRP*, vol. 27, 491-497, 1978.
- [247] Widatronic Werkzeuguberwachungs-Systeme fur Kollision, Bruch und Verschleiss, *Krupp Widia GmbH Werkzeugtechnik*, 1985.
- [248] Wide Band Acoustic Emission Sensor WAE 100, Prometec, Aachen, Germany.
- [249] Widota A., Układy diagnostyczne w obrabiarkach sterowanych numerycznie, *Mechanik* nr 10, 503, 1985.
- [250] Widota A., Jemielniak K. i in., Opracowanie podstaw wykrywania i zapobiegania drganiom samowzbudnym przy toczeniu, *Projekt CPBP 02.04-04.03-04*, 1986-90.
- [251] Wireless AE Sensor AEL 200, Prometec, Aachen, Germany.
- [252] Wu S.M., Eman K.F., CAM - Another viewpoint, *Proc. of 24-th MTDR Conf.*, 391, 1983.
- [253] Yan D., El-Wardany T.I., Elbastawi M.A, A Multi-Sensor Strategy for Tool Failure Detection in Milling, *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, vol. 35, nr 3, 383-398, 1995.
- [254] Zadeh L.A., Fuzzy Sets, *Information and Control*, vol 8, 338-352, 1965.
- [255] Zalewski A., Wykrywanie kolizji na etapie projektowania procesów wytwórczych, *Rozprawa doktorska*, Politechnika Warszawska, 2001.