

MONITOROWANIE ODKSZTAŁCEŃ CIEPLNYCH TOKARKI STEROWANEJ NUMERYCZNIE ZA POMOCĄ SZTUCZNYCH SIECI NEURONOWYCH

Streszczenie: Artykuł zawiera opis metody wykorzystującej sieci neuronowe do prognozowania odkształceń cieplnych obrabiarki NC. Przemieszczenia osi wrzeciona określane są w sposób zgodny z zaleceniami normy ISO 230-3. Ich wartości wyznaczane są na podstawie pomiarów zmian odległości pomiędzy wybranymi punktami korpusu oraz temperatury, przy wykorzystaniu sieci neuronowych jako narzędzia służącego do odnalezienia korelacji pomiędzy mierzonymi sygnałami a przemieszczeniami osi wrzeciona w dwóch płaszczyznach. Przeprowadzone badania potwierdziły przydatność opracowanej metody podczas badań odkształceń cieplnych tokarki sterowanej numerycznie.

1 WPROWADZENIE

Odształcenia cieplne są to zmiany kształtów i wymiarów części obrabiarki, wynikające ze zmian temperatury powstałych wskutek oddziaływania wewnętrznych lub/i zewnętrznych źródeł ciepła. Badania dotyczące odkształceń cieplnych obrabiarek oraz ich wpływu na całkowity błąd wykonania przedmiotu obrobionego prowadzone są od lat 60. XX wieku. Niestety, ze względu na charakter i stopień komplikacji zjawiska odkształceń cieplnych, nie powstały systemy komercyjne umożliwiające zmniejszanie negatywnego wpływu odkształceń tego typu na dokładność wymiarowo-kształtową wykonywanych przedmiotów. W przypadku obróbki wykańczającej, której udział w całkowitym czasie obróbki detali stale rośnie, odkształcenia cieplne stanowią do 70% całkowitego błędu obróbki. Podstawowym problemem jest pomiar odkształceń cieplnych. Mimo prób i badań prowadzonych przez wiele ośrodków badawczych, nie zostały opracowane metody pozwalające na pomiar odkształceń cieplnych w trakcie pracy obrabiarki. Pojawienie się koncepcji sztucznych sieci neuronowych (ang. Artificial Neural Networks – ANN), a właściwie narzędzi umożliwiających ich stosowanie do odnajdywania korelacji pomiędzy wielkościami mierzonymi charakteryzującymi odkształcenia cieplne oraz dokładnością obrabiarki pozwoliło na opracowanie pierwszych metod określania wpływu odkształceń cieplnych na dokładność przedmiotu obrabianego.

Opracowana w Instytucie Technologii Maszyn Politechniki Warszawskiej metoda określania wpływu odkształceń cieplnych na odkształcenia struktury obrabiarki polega na pomiarach temperatury i zmian odległości pomiędzy wybranymi punktami korpusu wrzecionika. Wyniki tych pomiarów wykorzystywane są przez sieć neuronową do określenia położenia osi wrzeciona mierzonego wg zaleceń normy ISO 230-3.

2 NORMA ISO 230-3 DOTYCZĄCA PRZEPISÓW BADANIA OBRABIAREK ZWIĄZANYCH Z POMIARAMI ODKSZTAŁCENŃ CIEPLNYCH

Norma ISO 230-3 jest częścią normy ISO 230 określającej metody sprawdzania dokładności obrabiarek. Część 230-3 jest poświęcona odkształceniom cieplnym i zawiera opis procedur służących określeniu wpływu zjawisk cieplnych, wywołanych przez różne źródła ciepła, a których skutkiem są odkształcenia struktury obrabiarki lub jej układu współrzędnych. Składa się ona z trzech części:

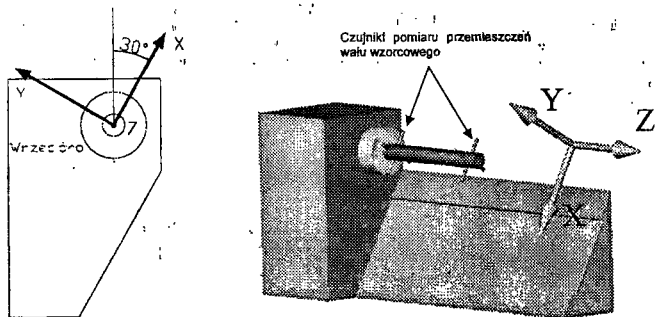
- opisującej badanie zmian temperatury otoczenia obrabiarki,
- opisującej badanie odkształceń cieplnych wywołanych ruchem, obrotowym wrzecion,
- opisującej badanie odkształceń cieplnych wywołanych ruchami liniowymi zespołów obrabiarki.

Norma ISO 230-3 zawiera również ogólny opis narzędzi i przyrządów pomiarowych wykorzystywanych do wykonania ww. badań. Zaprojektowany i wykonany system pomiarowy umożliwia pomiary zmian temperatury otoczenia obrabiarki oraz odkształceń cieplnych wywołanych ruchem obrotowym wrzecion.

3 SYSTEM MONITOROWANIA PRZEMIESZCZEŃ OSI WRZECIONA WYWOŁANYCH PRZEZ ODKSZTAŁCENIA CIEPLNE – ZAŁOŻENIA I BUDOWA

Podczas tworzenia systemu monitorowania odkształceń cieplnych badanej tokarki sformułowano następujące wymagania i wytyczne:

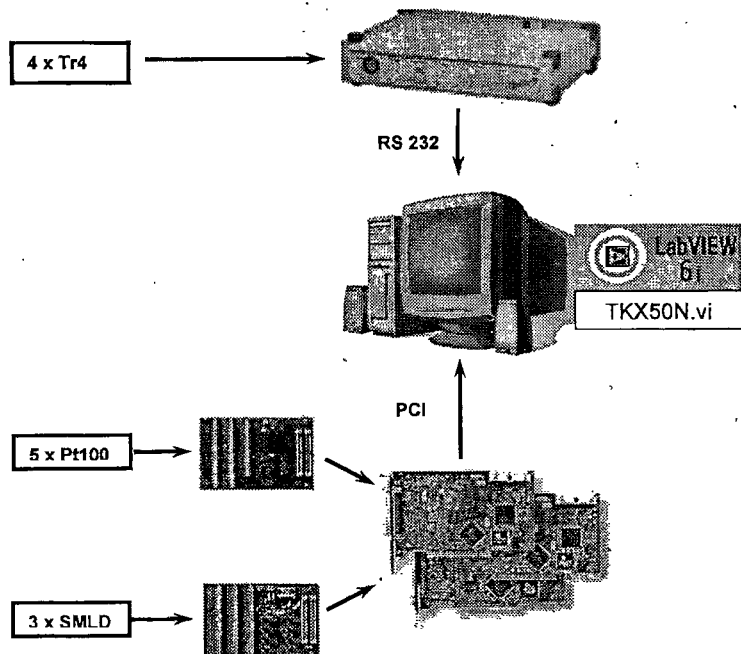
1. System umożliwia automatyczne pomiary temperatury oraz zmian odległości pomiędzy wybranymi punktami korpusu, które charakteryzują odkształcenia cieplne oraz wywołane przez nie zmiany położenia osi wrzeciona w różnych warunkach pracy obrabiarki. Wyniki pomiarów służą do utworzenia zbiorów danych do nauki i testowania sieci neuronowych. Równolegle mierzone są przemieszczenia osi obrotu wału wzorcowego.
2. Nauczona sieć neuronowa umożliwia monitorowanie wpływu odkształceń cieplnych na zmiany położenia osi wrzeciona oraz wywołane tym zmiany dokładności wymiarów i kształtów obrabianego przedmiotu jedynie na podstawie pomiarów zmian odległości i temperatury w wybranych punktach korpusu wrzeciennika tokarki.
3. System zbudowany jest z elementów komercyjnych i może być elementem układu sterowania obrabiarki (w przypadku układów sterowania działających jako aplikacje systemu operacyjnego WINDOWS).



Rysunek 1. Korpus wrzeciennika oraz łożo tokarki numerycznej TKX 50N wykorzystywanej podczas badań systemu monitorowania odkształceń cieplnych oraz kierunki osi X, Y i Z układu współrzędnych maszyny

3.1 Zasada działania opracowanego systemu monitorowania

System monitorowania odkształceń cieplnych tokarki TKX 50N został zbudowany z wykorzystaniem komputera PC z zainstalowaną aplikacją wykonaną za pomocą programu LabVIEW. Taka konfiguracja umożliwiła stworzenie przyrządu pomiarowego zbudowanego na bazie komputera wykorzystującego do zbierania danych moduły SC-2042 RTD oraz SC-2043 SG i dwie karty pomiarowe firmy NATIONAL INSTRUMENTS, typ PCI 6023E. Struktura systemu przedstawiona jest na rysunku 2.



Rysunek 2. Struktura systemu monitorowania odkształceń cieplnych wrzeciennika tokarki TKX 50N; Tr4 – czujniki mierzące przemieszczenia wałka wzorcowego, Pt100 – czujniki mierzące temperaturę w pięciu punktach wrzeciennika, SMLD – czujniki mierzące odkształcenia lokalne wrzeciennika

Karty wykorzystano do zbierania danych rejestrowanych przez trzy czujniki zmian odległości z elementem referencyjnym w postaci taśmy inwarowej oraz pięć czujników temperatury Pt100 rozmieszczonych na powierzchni korpusu wrzeciennika tokarki TKX 50N. Odształcenia cieplne tego zespołu obrabiarki powodują przemieszczenia liniowe i kątowe osi wrzeciona, co ma decydujący wpływ na dokładność wykonywanych przedmiotów. Zmiany położenia osi wrzeciona wywołane odształceniami cieplnymi mierzone były w płaszczyznach prostopadłych do osi obrotu wrzeciona (w kierunkach osi X i Y układu współrzędnych tokarki, rysunek 1), za pomocą ośmiu czujników indukcyjnych, bezdotykowych, typ Tr4 produkcji firmy HBM. Taki sposób pomiaru przemieszczeń osi wrzeciona uwzględnia następujące czynniki:

- strukturę obrabiarki i położenie układu współrzędnych,
- występowanie sił skrawania w kierunkach osi X i Y układu współrzędnych obrabiarki,

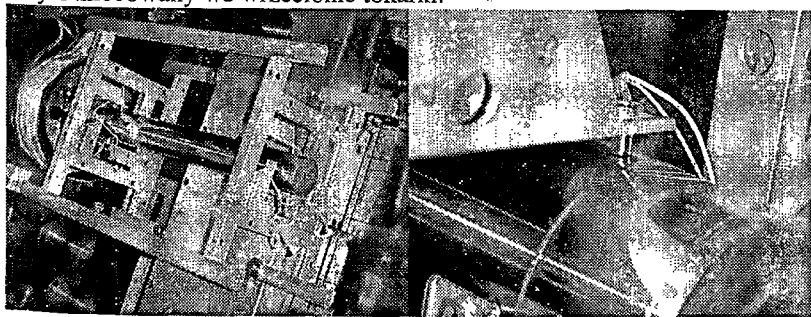
i jest zgodny z zaleceniami normy ISO 230-3.

W celu uzyskania większej dokładności odczytu położenia wału wzorcowego czujniki pracują w układzie różnicowym (rysunek 4). Dzięki zastosowaniu bezdotykowych czujników indukcyjnych i odpowiedniemu ich zamocowaniu możliwe jest wykonywanie pomiarów, gdy wał wzorcowy obraca się. Określenie bieżącej pozycji osi odbywa się za pomocą funkcji FITTING ON A SPHERE, znajdującą się w bibliotece programu LabVIEW. Jest to funkcja określona równaniem

$$\sum_{i=1}^n ((x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 - r^2)^2 = \min!$$

Zastosowanie tej funkcji pozwoliło na eliminację wpływu bicia wału na wynik pomiaru przemieszczeń osi wrzeciona. Funkcja ta jest wykorzystywana do określenia położenia środka wału wzorcowego w dwóch równoległych płaszczyznach, w których prowadzone były pomiary. Minimalna ilość punktów, na podstawie których wyznaczano położenie osi wrzeciona, to 150 na 1 obrót wału wzorcowego. Jest to wystarczająca ilość danych do wyznaczenia położenia osi obracającego się wału a tym samym wrzeciona tokarki. Ten sposób pomiaru pozwolił na określenie przemieszczeń osi wrzeciona w kierunkach osi X i Y układu współrzędnych tokarki, w dwóch płaszczyznach, podczas symulacji obróbki.

Na rysunku 3 przedstawiony jest schemat pomiaru przemieszczeń osi wrzeciona oraz stelaż z zamocowanymi czujnikami. Na rysunku tym widoczny jest również wał wzorcowy zamocowany we wrzecionie tokarki.

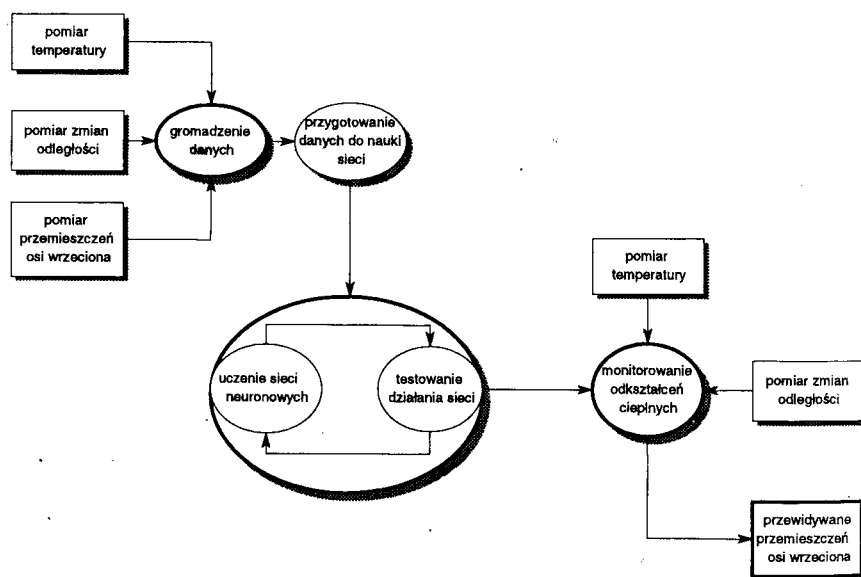


Rysunek 3. Stelaż z zamocowanymi czujnikami indukcyjnymi umożliwiający pomiar położenia osi wrzeciona w dwóch płaszczyznach

Dane o przemieszczeniach osi wrzeciona zbierane są podczas gromadzenia danych do uczenia sieci neuronowej oraz w fazie testowania działania systemu monitorowania. Po nauczeniu sieci system prognozuje zmiany położenia osi wrzeciona tokarki jedynie na podstawie danych uzyskiwanych za pomocą czujników zmian odległości oraz temperatury.

System umożliwia całkowicie automatyczną pracę w trybie zbierania danych, podczas badań tokarki w różnych warunkach pracy. Dane zapisywane są na dysku, a następnie wykorzystywane do uczenia i testowania sieci neuronowych. W fazie uczenia i testowania sieci wykorzystywana jest aplikacja stworzona za pomocą programu stworzonego w środowisku programowym MATLAB wyposażonym w moduł NEURAL NETWORKS.

Po nauczeniu sieci system rozpoczyna pracę w trybie monitorowania na podstawie sygnałów z czujników zmian odległości oraz temperatury. Sposób działania systemu przedstawiony jest na rysunku 4.



Rysunek 4. Sposób działania systemu monitorowania odkształceń cieplnych

4 SIECI NEURONOWE – RODZAJE I STRUKTURY ZBUDOWANYCH SIECI

Celem przeprowadzonych badań był wybranie optymalnego typu i struktury sieci neuronowej do prognozowania przemieszczeń osi wrzeciona. Optymalnego tzn. takiego, dla którego różnica między zmierzonymi wartościami przemieszczeń osi wrzeciona, a wartościami wygenerowanymi przez sieć będzie możliwie mała. Ze względu na brak jasnych reguł doboru typu i struktury sieci konieczne było przeprowadzenie możliwie wielu prób. Jak już wcześniej wspomniano do uczenia i testowania sieci zastosowany został Matlab, wykorzystane sieci i algorytmy ich uczenia są standardowymi funkcjami modułu NEURAL NETWORKS.

Badano sieci następujących typów:

- GRNN (ang. generalized regression):
 - współczynnik kształtu funkcji: $0.5 \div 10$,
- sieć o radialnych funkcjach bazowych (ang. radial basis - RB):
 - współczynnik kształtu funkcji: $0.5 \div 10$,
 - maksymalna liczba neuronów: $25 \div 350$,
 - liczba neuronów dodawana po każdej iteracji: 10,
- perceptron wielowarstwowy (ang. feed forward backpropagation - FF), sieci o budowie kaskadowej (ang. cascade forward backpropagation - CF) oraz rekurencyjnej sieci Elmana (ELM) o następujących parametrach:
 - liczba warstw ukrytych: 1 (2),
 - liczba neuronów w I (II) warstwie ukrytej: $4 \div 30$ ($4 \div 20$),
 - funkcja aktywacji I (II) warstwy ukrytej: tangens hiperboliczny (tangens hiperboliczny funkcja liniowa),
 - funkcja aktywacji warstwy wyjściowej: liniowa,
 - ze względu na brak powtarzalności uczenia sieci, uczenie powtarzane było pięciokrotnie, jako ostateczny wynik uznawane było najlepsze z nich,
 - algorytm uczenia sieci: Levenberga-Marquardta.
 - o maksymalna liczba iteracji uczenia: 100,
 - o początkowa wartość współczynnika regularyzacji (MU): 0.001,
 - o współczynnik zwiększania MU: 0.1,
 - o współczynnik zmniejszania MU: 10,
 - o maksymalna wartość MU: $1e+10$,
 - o maksymalny czas uczenia: nieograniczony.

5 WYNIKI SYMULACJI OBRÓBK

W celu weryfikacji zaproponowanej metody przeprowadzono badania na tokarce TKX 50N. Po przeprowadzeniu badań wstępnych zdecydowano się na symulację pracy obrabiarki wykorzystując następujące cykle pracy:

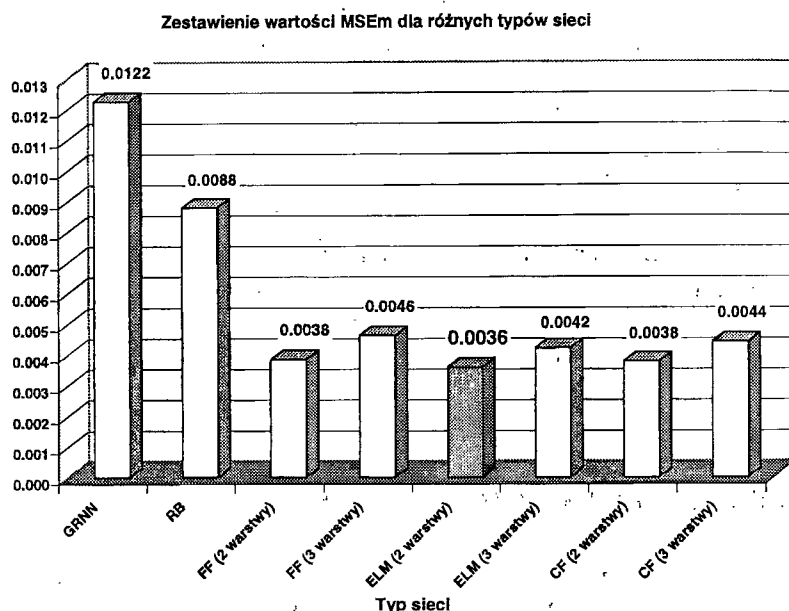
1. praca ze stałą prędkością obrotową – 400 obr/min – przez 3 godziny (wymuszenie minimalnych odkształceń cieplnych korpusu wrzeciennika), oznaczenie „min”,
2. obróbka małej serii takich samych przedmiotów (18 sztuk), oznaczenie „ms”,
3. obróbka małej serii takich samych przedmiotów (18 sztuk) z godzinną przerwą (30% całkowitego czasu cyklu), podczas której obrabiarka ulega naturalnemu studzeniu, oznaczenie „ms_p”,
4. obróbka 18. sztuk różnych przedmiotów, oznaczenie „oj”.

Każdy cykl składał się z operacji trwających od jednej do trzech minut, charakteryzujących się różnymi prędkościami obrotowymi wrzeciona. Sygnały rejestrowane były, co 30 sekund. Wprowadzenie cyklu pracy z przerwą pozwoliło określić wpływ przerw w pracy na odkształcenia cieplne. Zdecydowano, że w dalszych badaniach do uczenia sieci zostaną wykorzystane cykle oznaczone jako „min” i „oj”,

natomiast do testowania cykle „ms” oraz „ms_p”. Zbiory danych wykorzystane do testowania działania sieci charakteryzują typowe operacje wykonywane na tokarce TKX 50N a więc uzyskane wyniki dotyczą typowych prac wykonywanych przez obrabiarkę.

Jako kryterium jakości prognozowania przemieszczeń osi wrzeciona przyjęto wartość zmodyfikowanego błędu średniokwadratowego MSE_m (określanego jako średnia arytmetyczną błędów średniokwadratowych odpowiedzi sieci wyznaczanych dla poszczególnych kierunków - X_1, Y_1, X_2, Y_2).

Badania sieci rozpoczęto od określenia typu i struktury sieci, dla której uzyskane zostaną najlepsze wyniki prognozowania przemieszczeń osi wrzeciona. Na rysunku 5 przedstawiono zestawienie wyników uzyskanych dla testowanych typów sieci neuronowych.



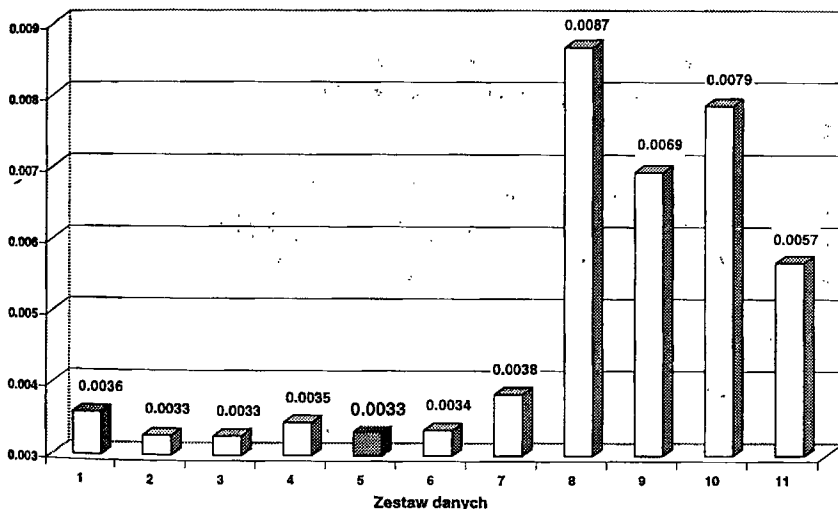
Rysunek 5. Zestawienie wyników uzyskanych dla różnych typów sieci

Najlepsze wyniki uzyskano dla sieci Elmana dwuwarstwowej (cztery neurony w warstwie ukrytej), porównywalne wyniki uzyskano dla perceptronu wielowarstwowego oraz sieci o budowie kaskadowej.

Kolejnym etapem badań była optymalizacja zbiorów danych wejściowych dla najlepszej spośród testowanych sieci - sieci Elmana - pod względem ilości sygnałów wejściowych. Przeprowadzono testy, w których sieci uczone i testowane były na różnych zestawach danych wejściowych. W tabeli przedstawiono zestawy sygnałów wejściowych oraz odpowiadające im błędy odpowiedzi sieci.

Nr zestawu	Zestaw danych	MSE _m
1	SG1, SG2, SG3, T0, T1, T2, T3, T4	0.0036
2	SG1, SG2, SG3, T1, T2, T3, T4	0.0033
3	SG1, SG2, SG3, T1, T2, T3	0.0033
4	SG1, SG2, T1, T2, T3, T4	0.0035
5	SG1, SG2, T1, T2, T3	0.0033
6	SG1, T1, T2, T3	0.0034
7	SG1, T1, T3	0.0038
8	SG1, T3	0.0087
9	SG1, T2	0.0069
10	T0, T1, T2, T3, T4	0.0079
11	SG1, SG2, SG3	0.0057

Zestawienie wartości MSE_m dla różnych zestawów danych wejściowych

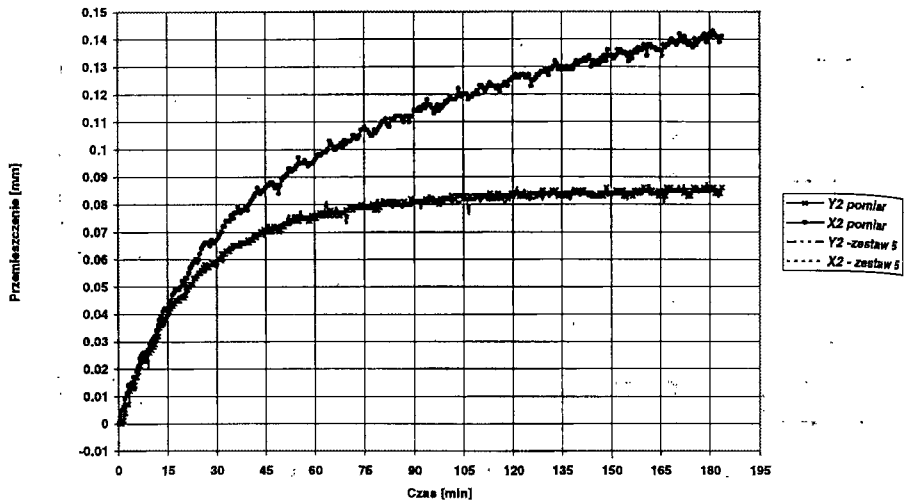


Rysunek 6. Wyniki uzyskane dla różnych zbiorów danych wejściowych

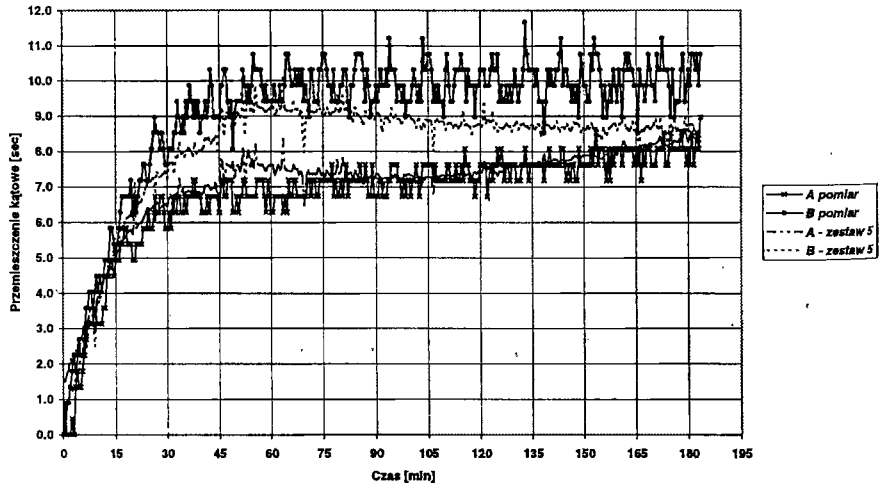
Najlepsze wyniki uzyskano dla zestawu 5, błąd MSE_m dla tego przypadku wynosi 0.0033 mm. Jest to minimalny zestaw sygnałów wejściowych - który nie powoduje wzrostu błędu prognozowania - różniący się od początkowego tym, iż usunięto sygnały z czujników T0, T4 i SG3. Z porównania uzyskanych wyników wynika, że sygnały te nie wnoszą istotnych informacji na temat przemieszczeń osi wrzeciona.

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono odpowiedzi sieci, dla których uzyskano najlepsze wyniki przewidywania przemieszczeń osi wrzeciona tokarki. Błąd średniokwadratowy dla poszczególnych kierunków waha się od 0.0014 do 0.0026 mm dla pierwszego zbioru testującego oraz od 0.0014 do 0.005 mm dla zbioru drugiego.

Przesunięcie liniowe wału wzorcowego w osiach X, Y - seria "ms"

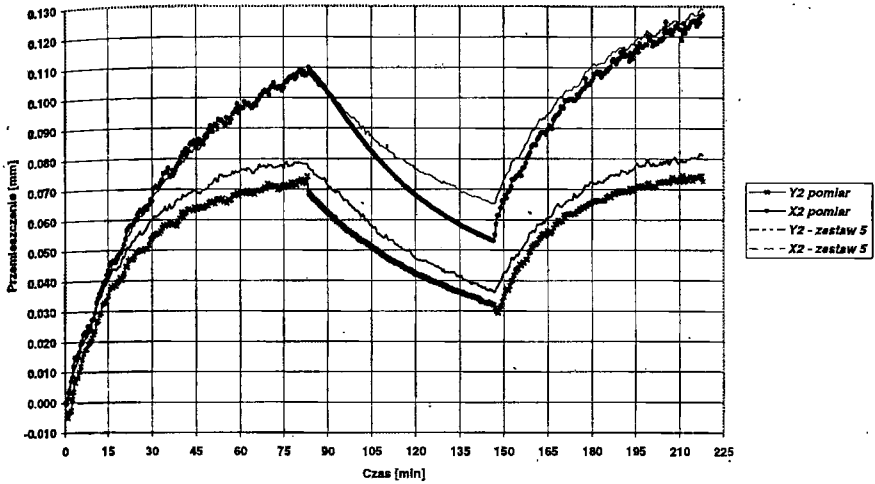


Przesunięcia kątowe wału wzorcowego A w osi X i B w osi Y - seria "ms"

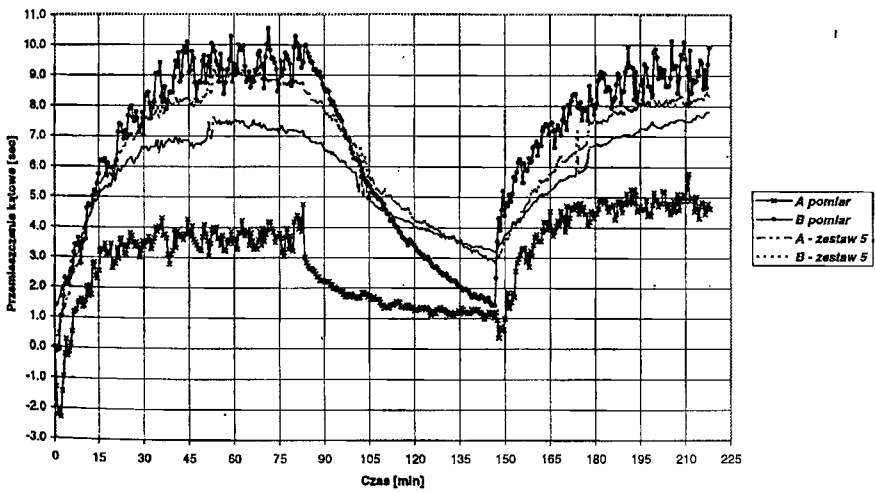


Rysunek 7. Porównanie odpowiedzi sieci i wartości zmierzonych podczas pracy obrabiarki; symulacja obróbki małej serii przedmiotów (ms)

Przemieszczenie liniowe wału wzorcowego w osiach X, Y - seria "ms_p"



Przemieszczenia kątowe wału wzorcowego A w osi X i B w osi Y - seria "ms_p"



Rysunek 8. Porównanie odpowiedzi sieci i wartości zmierzonych podczas pracy obrabiarki; symulacja obróbki małej serii przedmiotów z przerwą (ms_p)

6 PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawione wyniki, pokazują korzystny wpływ informacji dotyczących zmian odległości pomiędzy wybranymi punktami korpusu wrzeciennika tokarki na jakość prognozowania przemieszczeń osi wrzeciona. Wprowadzenie tej informacji do zbiorów uczących spowodowało zmniejszenie wartości błędów w porównaniu do wyników uzyskanych dla zbiorów uczących zawierających jedynie informację dotyczącą zmian temperatury w wybranych punktach korpusu wrzeciennika. Porównując wartości błędu MSE_m uzyskane dla danych wejściowych zawierających jedynie sygnały z czujników temperatury z wartością błędu uzyskaną dla danych wejściowych zawierających informacje z czujników zmian odległości można stwierdzić, że błąd ten jest mniejszy dla danych wejściowych uzyskanych za pomocą czujników zmian odległości. Wynika z tego, że lokalne zmiany odległości są silniej skorelowane z przemieszczeniami osi wrzeciona niż zmiany temperatury korpusu wrzeciennika. Skuteczność prognozowania przemieszczeń osi wrzeciona (dla poszczególnych kierunków), realizowana za pomocą sieci Elmana, przekracza 90%. Prognozowanie to odbywa się na podstawie informacji dotyczących zmian temperatury w trzech punktach oraz zmian odległości pomiędzy dwiema parami punktów korpusu wrzeciennika.

Uzyskane wyniki potwierdziły zasadność stosowania czujników pomiaru zmian odległości do identyfikacji wpływu odkształceń cieplnych na strukturę badanej obrabiarki i przemieszczenia osi wrzeciona.

7 BIBLIOGRAFIA

1. Bryan J., "Thermal Effects" CIRP Annals 39/2/1990, strona 645.
2. Bryan J., "International status of thermal error research CIRP Annals 16/2/1968, s. 203.
3. Jędrzejewski J., Kaczmarek J., Kowal Z., Winiarski Z. "Numerical optimization of thermal behaviour of machine tools", CIRP Annals STC M, 39/1/1990, s. 379.
4. Spur G., "Thermal behaviour optimization of machine tools", CIRP Annals STC M, 37/1/1988, s. 401.
5. Szafarczyk M., „Application of Control Systems for Measurement and Data Acquisition in Workshop Conditions”, materiały konferencyjne International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments ISMTI'98, Miskolc 2-4.09.1998.
6. Ślęzak Ł., „Monitorowanie odkształceń cieplnych poprzez pomiar zmian odległości pomiędzy wybranymi punktami korpusów” rozprawa doktorska, 2004.
7. Ślęzak Ł., „Monitoring of Thermal Distortions Using Direct Displacement Measurement Sensors”, Conference Proceedings XI Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining Systems, Karpacz 12-17.03.2000.
8. Weck M., McKeown P., Bonse R., Herbst U. "Reduction and Compensation of Thermal Errors in Machine Tools", Annals of CIRP Vol. 44/2/1995 ss. 589-598.
9. Weck M., "Reduction and Compensation of Thermal Errors in Machine Tools" CIRP Annals STC M, 44/2/1995, s. 589.
10. Norma ISO 230-3, Test code for machine tools – Part 3: Determination of thermal effects.
11. Demuth H., Beale M., "Neural Network. Inc.", Natick 1998.
12. Osowski S. „Sieci neuronowe” OWPW, Warszawa 1996.