

Modelowanie zjawiska konwekcji ciepła w zespole przekładni śrubowo-tocznej obrabiarek CNC z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych

Modelling of heat convection phenomenon in ball screw of machine tools using artificial neural network

MICHAŁ KOWAL*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.8-9.297

Zaprezentowano model opisujący zjawisko konwekcji w zespole przekładni śrubowo-tocznej. Przedstawiono sposób identyfikacji parametrów modelu, strukturę sztucznej sieci neuronowej i sposób doboru danych uczących, aby ostatecznie przedstawić wyniki walidacji modelu.

SŁOWA KLUCZOWE: przekładnia śrubowo-toczna, kompensacja temperaturowa, obrabiarki CNC, sztuczne sieci neuronowe

In this article, the author presents a model describing the phenomenon of convection in ball screw. The author presents a method for identifying model parameters, the structure of artificial neuron network, the manner of selection of training data and finally the results of model validation.

KEYWORDS: ball screw, thermal compensation, machine tools, artificial neuron network

Silna konkurencja na rynku obrabiarek sterowanych numerycznie zmusza producentów do poszukiwania nowych rozwiązań – tańszych, lecz nie gorszych, podnoszących dokładność i produktywność obrabiarki. Pomimo zastosowania bardzo wyrafinowanych układów sterowania obrabiarki sterowane numerycznie są wrażliwe na wahania temperatury, które przyczyniają się do zmiany geometrii i dokładności obróbki. Szczególnie duży wpływ na dokładność obrabiarki wyposażonej w bardzo popularny pośredni układ pomiarowy ma zjawisko rozszerzalności temperaturowej śruby tocznej [1÷3]. Dzieje się tak ponieważ pętla sprzężenia zwrotnego regulatora położenia zamykana jest przez przetwornik obrotowo-impulsowy umieszczony w silniku. Zatem zmiana skoku śruby tocznej wywołana zjawiskiem odkształcenia termicznego ma bezpośredni wpływ na dokładność pomiaru pozycji, przyczyniając się do powstawania błędów w łańcuchu kinematycznym osi sterowanej numerycznie.

W ośrodkach naukowych na całym świecie poszukuje się skutecznych metod kompensacji tego niekorzystnego zjawiska. Jednym z rozwiązań rozwijanych przez Zakład Maszyn Technologicznych Politechniki Poznańskiej jest predykcyjny algorytm kompensacji odkształceń przekładni śrubowo-tocznej. Jego kluczowym elementem jest model zjawiska dyssypacji energii w zespole przekładni śrubowo-tocznej na skutek tarcia, konwekcji i kondukcji. W artykule opisano zjawisko konwekcji i zaproponowano model opisujący konwekcję z użyciem sztucznych sieci neuronowych.

Zjawisko konwekcji

Z myślą o predykcji stanu energetycznego przekładni śrubowo-tocznej pracującej w różnych warunkach wymaga się określenia wartości gęstości strumienia ciepła

przekazywanego do otoczenia. Zjawisko konwekcji można przedstawić za pomocą równania Newtona [4]:

$$Q = \alpha A(T_2 - T_1) \quad (1)$$

gdzie: Q – strumień ciepła; α – współczynnik wnikania ciepła; A – pole powierzchni oddawania ciepła; T_1 – temperatura otoczenia; T_2 – temperatura ciała.

Wyznaczenie współczynnika wnikania ciepła metodami analitycznymi jest niezwykle trudne. W przypadku śruby tocznej wartość ta będzie zależeć od grubości laminarnej warstwy przyściennej opisanej równaniem [4]:

$$\alpha = \frac{\lambda}{e} \quad (2)$$

gdzie: α – współczynnik wnikania ciepła; λ – współczynnik przewodzenia ciepła; e – grubość laminarnej warstwy przyściennej.

Grubość laminarnej warstwy przyściennej zależy od prędkości, gęstości oraz kształtu geometrycznego opływającego gazem [1]. W rozpatrywanym przypadku można się zatem spodziewać znaczących zmian wartości strumienia ciepła przekazywanego do otoczenia w zależności od warunków pracy przekładni śrubowo-tocznej. Ze względu na trudności z wyznaczeniem współczynnika wnikania ciepła zaproponowano model opisujący zjawisko konwekcji z użyciem sztucznych sieci neuronowych.

Model zjawiska konwekcji

Przyjęto, że strumień energii cieplnej przekazywanej na drodze konwekcji będzie funkcją trzech zmiennych:

$$Q = f(t, \omega, T) \quad (3)$$

gdzie: Q – strumień ciepła; t – czas; ω – prędkość kątowna śruby tocznej, T – temperatura otoczenia.

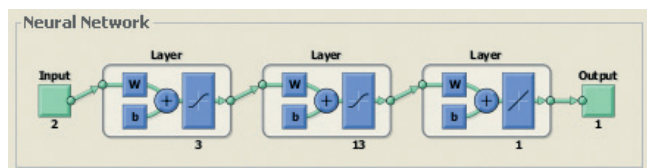
Aby uprościć model, zdecydowano się na implementację kompensacji temperaturowej polegającej na korekcji wydłużenia badanego zespołu w funkcji gradientu temperatury otoczenia. Ostateczny model przedstawia równanie:

$$Q = f(t, \omega) \quad (4)$$

Na podstawie równania (4) opracowano model z użyciem jednokierunkowej, wielowarstwowej sztucznej sieci neuronowej ze wsteczną propagacją błędów (MLP). Strukturę sztucznej sieci neuronowej, tzn. liczbę warstw, liczbę neuronów w poszczególnych warstwach, funkcję aktywacji, sposób uczenia, dobrano w sposób eksperymentalny.

* Mgr inż. Michał Kowal (michal.kowal@put.poznan.pl) – Politechnika Poznańska

Na podstawie wielokrotnie powtarzanego procesu uczenia SSN w różnych konfiguracjach wytypowano strukturę, która najlepiej opisywała problem, tzn. dostatecznie dokładnie aproksymowała, a jednocześnie charakteryzowała się dużą zdolnością do generalizowania. Na rys. 1 przedstawiono strukturę sztucznej sieci neuronowej użytej w badaniach.

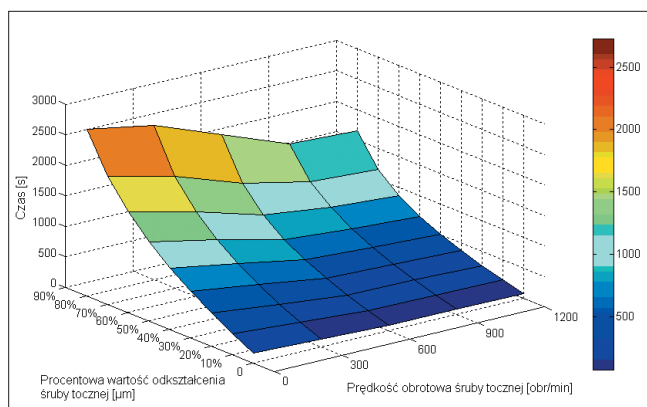


Rys. 1. Struktura zastosowanej sieci neuronowej

Identyfikacja parametrów modelu

Kluczowy etap budowy modelu z użyciem sztucznych sieci neuronowych to nauka tejże struktury [5, 6]. W tym celu wykonano szereg pomiarów stygnięcia śruby tocznej podczas wirowania ze zmienną prędkością (150, 300, 600, 900, 1200, 1500 obr/min). Ponieważ pomiar temperatury wirującej śruby z dostateczną dokładnością jest utrudniony, zdecydowano się na pośredni pomiar przyrostu temperatury obserwowanej w wydłużeniu śruby tocznej. W tym celu użyto czujnika indukcyjnego umieszczonego w osi śruby tocznej. Takie ustawienie czujnika umożliwia pomiar wydłużenia wirującej śruby tocznej z dostateczną dokładnością, niezależnie od pozycji kątowej [3].

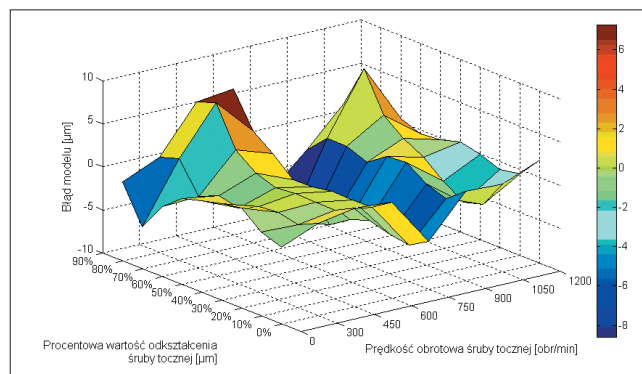
Eksperyment mający na celu wyznaczenie wartości energii oddawanej do otoczenia na drodze konwekcji składał się z dwóch etapów. Etap pierwszy miał na celu zwiększyć w sposób jednorodny temperaturę śruby tocznej. Aby tego dokonać, wykonywano serię ruchów ze stałą prędkością posuwową wynoszącą 15000 mm/min w pełnym zakresie przejazdu osi sterowanej. Po upływie 60 min następował etap drugi monitorujący stygnięcie śruby tocznej. Po rozprężeniu nakrętki przekładni śrubowo-tocznej przez kolejne 120 min śruba toczna stygła, obracając się ze stałą prędkością (0, 300, 600, 900, 1200 obr/min). Wynik przeprowadzonych pomiarów przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Proces stygnięcia śruby tocznej podczas ruchu obrotowego ze zmienną prędkością obrotową

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że prędkość obrotowa śruby tocznej w znaczący sposób wpływa na ilość energii przekazywanej do otoczenia na drodze konwekcji. W kolejnym etapie wytypowano zbiór danych użytych w procesie uczenia sztucznej sieci neuronowej. W celu walidacji modelu wykonano dodatko-

wo pomiary stygnięcia przekładni śrubowo-tocznej, które nie znalazły się w zbiorze danych uczących. Wyniki procesu walidacji przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Wynik procesu walidacji modelu konwekcyjnego

Podsumowanie

Zjawisko konwekcji ze względu na dużą ilość parametrów wpływających na jej wartość jest niezwykle trudne do wyznaczenia metodami analitycznymi. W przypadku przekładni śrubowo-tocznej, która charakteryzuje się złożoną geometrią, w praktyce parametry modelu analitycznego wyznacza się w sposób doświadczalny. Należy zwrócić uwagę, że wartość strumienia ciepła przekazywanego do otoczenia przez śrubę toczną w dużym stopniu zależy od prędkości wirowania, a więc nie jest stała w trakcie pracy.

W niniejszej publikacji przedstawiono metodę modelowania zjawiska konwekcji w zespole przekładni śrubowo-tocznej z użyciem sztucznych sieci neuronowych. Metoda ta przewiduje wartość energii przekazanej do otoczenia, obserwowanej w zmianie długości śruby tocznej. Walidacja opracowanego modelu wykazała jego dużą skuteczność. Wartość błędu waha się w zakresie $-9,78 \pm 7,25 \mu\text{m}$, co stanowi 14,86%. Badania potwierdziły możliwości opracowania predykcyjnego modelu zjawiska konwekcji w zespole przekładni śrubowo-tocznej z użyciem sztucznych sieci neuronowych. Dalsze prace prowadzone w tym kierunku wpłyną na poprawę dokładności modelu. Należy rozważyć optymalizację struktury SSN według kryterium najmniejszego błędu oraz zastanowić się nad zastosowaniem innego typu sieci. Model konwekcyjny zespołu przekładni śrubowo-tocznej z punktu widzenia opracowywanej metody predykcyjnej kompensacji odkształceń przekładni śrubowo-tocznych stanowi jedno z podstawowych zagadnień. Oszacowanie wartości strumienia ciepła przekazywanego do otoczenia na drodze konwekcji pozwoli na skuteczną kompensację przekładni śrubowo-tocznych.

LITERATURA

1. Yun W.S., Kim S.K., Cho D.W. „Thermal error analysis for a CNC lathe feed-drive system”. *Int. J. Mach. Tool Manu.* Vol. 39 (1999): pp. 1087-1101.
2. Ching-Feng Ch., Chih-Chih W., Chao-Shui L., Ching-Yi Ch., Tsair-Rong Ch. „A theory of ball-screw thermal compensation”. *Proceedings of the International Multi-Conference of Engineers and Computer Scientists.* Vol. 2 (2009).
3. Kowal M., Staniek R. „Compensation system for thermal deformation of ballscrew”. *ASME 2014 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis.* Vol. 3 (2014).
4. Szargut J. „*Termodynamika*”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1998.
5. Mayr J., Jedzejewski J., Uhlmann E., Donmez A., Knapp W., Heartig F., Went K., Moriwaki T., Shore P., Schmitt R., Brecher C., Weurz T., Wegener K. „Thermal issues in machine tools”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology.* 61 (2012): pp. 771-791.
6. Rutkowski L. „*Metody i techniki sztucznej inteligencji*”. Warszawa: WTN, 2006. ■