

Streszczenie

Autor: mgr inż. Jacek Zapłata

Promotor: dr hab. inż. Mirosław Pajor, prof. ZUT

Tytuł: System kompensacji odkształceń cieplnych tocznych śrub pociągowych obrabiarki sterowanej numerycznie

Na dokładność elementów wykonywanych metodą obróbki skrawaniem wpływ mają właściwości układu: obrabiarka, uchwyt, przedmiot obrabiany, narzędzie (OUPN). Źródłami niedokładności wzajemnego ruchu narzędzia i przedmiotu obrabianego mogą być cechy geometryczne, dynamiczne, termiczne tych obiektów albo struktura algorytmu sterowania.

Niniejsza praca poświęcona jest fragmentowi tematyki odkształceń cieplnych maszyn, którym są odkształcenia cieplne osi posuwu liniowego. Bezpośrednią przyczyną powstawania odkształceń cieplnych w tradycyjnych osiach przesuwu liniowego, stosowanych w obrabiarkach CNC, jest ciepło wydzielające się na skutek tarcia, głównie w ułożyskowaniu śruby tocznej, oraz ułożyskowaniu nakrętki.

W tradycyjnych układach posuwu liniowego obrabiarek CNC wyznaczenie położenia ruchomej osi dokonywane jest na podstawie pomiaru pozycji kątowej wału silnika. Taka metoda wyznaczenia pozycji osi nie uwzględnia wydłużenia cieplnego śruby. Uwzględnienie błędów cieplnych śruby wymaga zastosowania dodatkowych liniałów pomiarowych mierzących pozycję położenia stołu bezpośrednio. W pracy badane są możliwości wykluczenia dodatkowego pomiaru, poprzez zastosowanie kompensacji odkształceń cieplnych, na podstawie pomiarów temperatury „on-line” z pomocą dedykowanych modeli matematycznych zaimplementowanych w systemie sterowania obrabiarki CNC.

W pracy przyjęto, iż konstruowany system winien być kompletny, tj. składać się z części sprzętowej w postaci układu pomiaru temperatury śruby pociągowej oraz z warstwy informatycznej w postaci oprogramowania wyznaczającego korektę termiczną. Pod nazwą warstwa informatyczna należy rozumieć oprogramowanie współpracujące z systemem sterowania obrabiarki CNC.

Aby zrealizować cel nadrzędny pracy, jakim jest opracowanie wspomnianego kompletnego systemu kompensacji, w pracy przyjęto następujące cele szczegółowe:

1. Przeprowadzenie wstępnych badań symulacyjnych
2. Opracowanie prototypu stanowiska badawczego oraz układu pomiaru rozkładu temperatur w obracanej śrubie pociągowej.

3. Zmodyfikowanie algorytmu sterowania osi napędowej, w sposób umożliwiający wprowadzanie korekty termicznej do toru ruchu narzędzia względem miejsca zamocowania przedmiotu obrabianego
4. Przeprowadzenie wstępnych badań oraz utworzenie modeli matematycznych pozwalających na obliczanie wartości korekty cieplnej w oparciu o rejestrowane „on-line” pomiary temperatury
5. Doświadczalne zweryfikowanie dokładności funkcjonowania opracowanego systemu kompensacji
6. Implementacja, testowanie, doświadczalne weryfikacja systemu dla obrabiarki 3 osiowej wyposażonej w śruby napięte i nienapięte wstępnie
7. Sprawdzian stosowalności metod sztucznej inteligencji do celów budowy modeli matematycznych pozwalających na obliczanie wartości korekty cieplnej.

Cechą oryginalną zaproponowanego rozwiązania jest możliwość kompensacji on-line, z częstością zadawania trajektorii przez generator trajektorii. Do tego celu wykorzystano architekturę osi wirtualnych. Zbudowano osie napędowe obrabiarki CNC sterowanej numerycznie, których położenie jest korygowane o modelowaną wartość odkształceń cieplnych.

Kolejną oryginalną cechą zaproponowanego systemu kompensacji jest możliwość poprawnego korygowania odkształceń termicznych napędu z węzłem swobodnym jak i układu z napięciem wstępnym, najczęściej spotykanego w obrabiarkach. Dodatkowo, w celu zwiększenia funkcjonalności układu, zaproponowano również możliwość zastosowania algorytmu neuronowego do wyznaczania korekty odkształceń cieplnych.

Porównanie maksymalnych błędów otrzymanych po kompensacji na podstawie modelu fizycznego oraz modelu opartego na sieciach neuronowych wykazuje, że osiągnięte dokładności są podobne, z nieznaczną przewagą wskazującą na sieci neuronowe. W przypadku modelu fizycznego osiągnięta poprawa wynosiła ok. 70-90%, w przypadku neuronowego 80-90%. Jednak przejrzystość modelu fizycznego i jego łatwiejsza identyfikację, wskazują że ma on większe perspektywy na zastosowanie w praktyce przemysłowej.

Opracowana metoda kompensacji charakteryzuje się znacznie niższym nakładem kosztów eksploatacyjnych oraz wdrożeniowych w porównaniu z konwencjonalnymi systemami chłodzenia. Jest ona również korzystniejsza cenowo w porównaniu z dostępnymi na komercyjnym rynku liniami optycznymi czy magnetycznymi.

Abstract

Author: mgr inż. Jacek Zapłata

Doctoral supervisor: dr hab. inż. Mirosław Pajor, prof. ZUT

Title: The compensation system of CNC machine ball screw thermal error.

The precision of machined parts depends of properties of machine tools, cutting tools, fixtures used, and the machined piece itself. The inaccuracy of relative movement of the cutting tool and the machined piece is caused by geometric, dynamic and thermal properties of aforementioned equipment, as well as by the control system imperfections.

The presented dissertation brings up the matter of the CNC machine thermal errors, particularly the thermal error of CNC machine ball screws. This thermal error arises mainly as the result of the friction heat generated in bearings and nuts of ball screws. Conventional CNC linear axes use the encoder readings in order to evaluate the actual axes positions. Such a method is vulnerable to positioning errors occurring as a result of thermal elongation of screws. To exclude the influence of the thermal elongation of ball screws on axes positioning accuracy linear encoders are additionally mounted on CNC machines.

The research presented in the dissertation is focused on substituting expensive linear encoders with the compensation system based on temperature measurements and appropriate mathematical models implemented in CNC control system. Thus the compensation system consists of hardware and software layers. The hardware layer includes sensors, wiring system, slip-rings and data acquisition systems connected to the CNC control system, whereas the software layer contains appropriate mathematical models cooperating with CNC control system.

To achieve this the main purpose, after-mentioned detailed aims had to be accomplished:

1. Preliminary simulational research on thermo-mechanical CNC linear axis behaviour.
2. Project of a prototypical measuring stand allowing to conduct on-line temperature measurement of rotating ball screw and linear position accuracy measurements of the linear axis.
3. Implementing software procedures in CNC control system, allowing to modify the linear axes trajectories according to values estimated by thermal error compensation models.
4. Development of appropriate mathematical models allowing to compensate thermal errors of the ball screws and conducting preliminary test with use of the designed research stand.
5. Experimental verification of the ball screw thermal error compensation system accuracy.

6. Implementing and verification of the designed compensation system on a 3-axis machine tool equipped with screws mounted in both: locating-nonlocating arrangement and pretensioned ball screw arrangement.
7. Implementation and accuracy verification of artificial network models of ball screw thermal errors.

The added value of the presented compensation system to nowadays technique is the compensation system ability to efficiently work in on-line regime, that is with frequency equal to the one of the trajectory generator. The virtual axis concept was used to achieve this aim.

Another novel feature of the designed system is the ability to effectively compensate the ball screw thermal error of linear axis mounted both: in locating-nonlocating bearing arrangements and with pretensioned ball screw. The second mentioned arrangement becomes commonly applied in novel machine tools, due to its beneficial mechanical properties.

Additionally, in order to widen the functionality of the compensation system, apart from analytical models, neural network algorithms were also implemented to model the ball screw thermal errors.

The comparison of linear positioning errors measured during experiments conducted with usage of neural network models and analytical model shows that achieved positioning accuracies are quite similar. In case of the usage of the analytical models the reduction of ball screw thermal error was equal to 80-90%, whereas the reduction of thermal errors achieved with usage of neural network models was equal to 70-90%. Although neural network models tend to be slightly more precise, analytical models have more readable structure, and their identification procedures are less time consuming. These features show that analytical models may be more successful in their way to industrial application.

Last but not the least, it is necessarily to mention that the usage of presented compensation system is cost-effective compared to usage of commercially available linear encoders. It is a result of the usage of cheap NTC sensor in place of expensive linear encoders. The cost effectiveness is even greater when compared to usage of screw chilling systems, which tend to be more expensive, have larger running costs and cause greater inaccuracies.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak
Politechnika Koszalińska

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Jacka Zapłaty

nt.: SYSTEM KOMPENSACJI ODKSZTAŁCEŃ CIEPLNYCH
TOCZNYCH ŚRUB POCIĄGOWYCH
OBRABIARKI STEROWANEJ NUMERYCZNIE

Promotor: dr hab. inż. Mirosław Pajor,
profesor Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego
w Szczecinie

Koszalin, październik 2014

Prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak
Politechnika Koszalińska

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Jacka Zapłaty

nt.: SYSTEM KOMPENSACJI ODKSZTAŁCEŃ CIEPLNYCH
TOCZNYCH ŚRUB POCIĄGOWYCH
OBRABIARKI STEROWANEJ NUMERYCZNIE

Promotor: dr hab. inż. Mirosław Pajor,
profesor Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego
w Szczecinie

Ocenę rozprawy doktorskiej mgr inż. Jacka Zapłaty z Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, której promotorem jest dr hab. inż. Mirosław Pajor, przedstawiam na podstawie tekstu rozprawy, a także znanych mi prac opublikowanych i wykonanych przez doktoranta.

1. Ocena tematu i koncepcji pracy

Mechanizmy śrubowo-toczne, zwane także śrubami pociągowymi tocznymi stosowane są powszechnie w układach napędów i pozycjonowania. Charakteryzują się wysokim współczynnikiem sprawności, możliwością pracy z częstymi nawrotami, brakiem luzu osiowego, dużą sztywnością oraz dużą dokładnością skoku.

Od dokładności skoku oraz odkształceń cieplnych i mechanicznych zależy dokładność pozycjonowania przemieszczanych elementów. Poprzez dobór zarysu śruby i nakrętki oraz naprężeń wstępnych dąży się do zapewnienia wysokiej sztywności przekładni i powtarzalności pozycjonowania.

W niektórych zastosowaniach wprowadza się mechanizmy śrubowo-toczne z układem chłodzenia. W układach wyposażonych w chłodzenie wymuszone płyn chłodzący jest kierowany przez nakrętki. Stosowane są też śruby drążone z chłodzeniem, co zapewnia lepszą stabilizację temperatury na całej długości śruby.

Minimalizacja odkształceń cieplnych śrub nie zapewnia eliminacji ich skutków, a jedynie pozwala je zmniejszyć. Tematyka podjęta w rozprawie doktorskiej w sposób logiczny wynika z dwóch przesłanek. Jedną z nich jest poszukiwanie nowych metod efektywnego podwyższania dokładności obróbki, a drugą jest znalezienie rozwiązania o dużym znaczeniu aplikacyjnym, poprzez budowę systemu zapewniającego łatwe stosowanie opracowanej metody kompensacji.

Zastosowanie kompensacji odkształceń cieplnych precyzyjnych tocznych śrub pociągowych, stosowanych do układów pozycjonowania w obrabiarkach sterowanych numerycznie, jest nowoczesnym rozwiązaniem o znacznym poziomie innowacji, ważnym dla postępu w budowie urządzeń technologicznych. Analiza strumieni ciepła, ich wpływu na pole temperatur w śrubie pociągowej oraz analiza przyczyn niedokładności i wyznaczanie strategii kompensacji, składają się na zadania naukowe o istotnym znaczeniu poznawczym.

Autor słusznie wskazał na zróżnicowanie pól temperatur w poszczególnych zespołach obrabiarki oraz na zależność odchyłki pozycjonowania od położenia elementu w przestrzeni roboczej układu technologicznego. Z tego wynika, że kompensowanie odchyłek położenia jest trudnym zadaniem. Dodatkowym utrudnieniem jest niestacjonarność pól temperatur i ich zależność od cech operacji technologicznych.

Do tego należy jeszcze dodać złożony mechanizm kumulacji geometrycznych skutków przemieszczeń zespołów obrabiarki. Dostrzeganie tej złożoności dobrze świadczy o wyborze koncepcji pracy oraz wartości naukowej jej wyników.

Wybór tematu i koncepcję rozwiązania problemów naukowych oceniam bardzo wysoko. Zakres zagadnień ujętych w rozprawie jest komplementarny, a uzyskane wyniki mają dużą wartość naukową i aplikacyjną.

2. Cele, teza i zakres pracy

Autor sformułował następującą tezę pracy:

„Możliwym jest poprawienie dokładności pozycjonowania obrabiarki CNC, o danej strukturze kinematycznej, poprzez zastosowanie w jej układzie sterowania cyfrowej kompensacji odkształceń cieplnych śrub pociągowych.”

Tezy są stwierdzeniami należącymi do struktur teorii dedukcyjnych, a hipotezy należą wyłącznie do struktur teorii empirycznych. Prawdziwość tez jest uzasadniana przez dowodzenie, a prawdziwość hipotez jest określana w wyniku badań. W tym przypadku

sformułowanie powyższe, dla oceny jego prawdziwości, wymaga porównania wyników badań. Sformułowanie to jest zatem hipotezą, a z jej potwierdzenia, wynikać będzie wniosek, że opracowana metoda kompensacji jest skuteczna.

W zapisie tezy pracy występuje niewielka usterka sformułowania – zamiast „... dokładności pozycjonowania obrabiarki CNC ...” powinno być „dokładności pozycjonowania położenia stołu obrabiarki CNC”.

Cele i zakres pracy są spójne i ukierunkowane na metody kompensacji skutków odkształceń cieplnych śrub pociągowych oraz na tworzenie podstaw ich efektywnego zastosowania.

Na podkreślenie zasługuje wielka dbałość Autora o kompleksowość rozpatrywanych problemów. Bardzo starannie pogrupowano wszystkie zagadnienia w rozdziały i liczne podrozdziały. Praca w przedstawionej postaci może być uznana, jako przydatny zbiór rozwiązanych problemów w tej nowej dziedzinie badań i zastosowań.

3. Rozwiązane problemy naukowe

Autor przeprowadził obszerną analizę odkształceń cieplnych maszyn technologicznych, metod ich modelowania, w tym z zastosowaniem modeli neuronowych. Dokonał oceny stanu wiedzy w zakresie problemów modelowania wrzecion i wrzecienników, liniałów optycznych, a najszerzej przedstawił badania zespołów ruchów posuwowych.

Do ważnych osiągnięć rozprawy należą:

- wyniki analizy i modelowania niedokładności pozycjonowania przez zespoły ruchu posuwowego,
- modele odkształceń cieplnych dla śruby w różnych stanach napięcia wstępnego,
- opracowanie systemu kompensacji odkształceń cieplnych śrub pociągowych obrabiarek,
- implementacja doświadczalna systemu w jedno- i trójosiowym układzie,
- zastosowanie algorytmów neuronowych do kompensacji odkształceń cieplnych.

3. Ocena poziomu naukowego i osiągnięć rozprawy

Poziom naukowy rozprawy oraz jej zakres oceniam wysoko. Rozważania zawarte w rozprawie są spójne, dotyczą wielu złożonych problemów i zjawisk o znacznej różnorodności cech fizycznych. Metodyka badań została opracowana z wykorzystaniem najnowszych procedur badawczych oraz nowoczesnej aparatury. Wymagało to od Dokto-

ranta bardzo dobrego przygotowania i przeznaczenia na procedury eksperymentalne znacznego nakładu pracy.

Opracowanie systemu kompensacji odkształceń cieplnych tocznych śrub pociągowych oraz jego elementów należy do problemów wymagających wysokich umiejętności, bowiem wraz z koniecznymi zadaniami implementacji modeli w układach sterowania, są to prace wymagające wysokiej precyzji i staranności.

Modelowanie zjawisk cieplnych w obrabiarkach, zawarte w rozdziale 4, oceniam pozytywnie. Uwzględnione zostały liczne warunki graniczne związane z generowaniem strumieni ciepła oraz przejmowania i rozpraszania ciepła. Badania symulacyjne odkształceń również zostały przeprowadzone poprawnie. Wysoko oceniam także projekt warstwy informatycznej.

Uwagi dotyczące niektórych aspektów metodyki badań i analizy wyników zostały przedstawione poniżej.

1. Przewodzenie ciepła w śrubie pociągowej podczas przemieszczania się zespołu posuwowego należy do przypadków nieustalonego przewodnictwa, z poruszającym się zewnętrznym źródłem ciepła. Założenia o quasi-ustalonym rozkładzie są słuszne dla przypadków, w których przemieszczenie jest wielokrotnie większe od średnicy podziałowej śruby. Wówczas rozkład temperatury w osi śruby, w układzie związanym ze źródłem ciepła, zmienia się tylko nieznacznie wraz z przemieszczaniem źródła ciepła. W dokładniejszych analizach należy uwzględnić zmienną wydajność źródła ciepła, wynikającą ze zmian obciążenia układu posuwowego, zależną od specyfiki zadań technologicznych.
2. Cechą wynikającą z istoty procesów technologicznych jest to, iż ze zmianą prędkości źródła ciepła (pozycjonowanego zespołu) zmieniają się nie tylko warunki przewodzenia ciepła w obrabianym przedmiocie, ale również zmieniają się warunki przejmowania ciepła przez otoczenie, co Autor uwzględnia, a także zmienia się wydajność źródła ciepła, gdyż prędkość źródła ciepła jest prędkością posuwu. To wszystko powoduje, że zależność przyrostu temperatury przedmiotu od prędkości posuwu nie zawsze jest zależnością monotoniczną.
3. Przyrost temperatury w rdzeniu śruby może niemonotonicznie zależeć od prędkości posuwu. W obszarze najmniejszych prędkości przyrost temperatury może być większy niż dla większych wartości posuwu, gdy maleje czas oddziaływania strumieni ciepła na określony fragment śruby. Czas oddziaływania maleje odwrotnie proporcjonalnie (wykładnik wynosi -1), a moc źródła ciepła zwiększa się w stopniu mniejszym niż wprost proporcjonalnie (wykładnik jest mniejszy od 1). Na to nakłada się kumulacja skutków kolejnych przemieszczeń, co powoduje, że sumaryczny rozkład temperatur jest skutkiem wielu złożonych procesów. To uzasadnia poszukiwanie modeli neuronowych, co Autor dobrze uzasadnił.

4. W rozprawie występują niezbyt liczne sformułowania, będące skrótami myśli, np. „4.2. Modelowanie osi posuwowej obrabiarki w konwencji ...”, „4.2.2.2 Przyjęte w cieplnej symulacji strumienie ciepła” str. 39, „ $\delta(x)$ – odkształcenie cieplne w funkcji długości śruby”, str. 54 – powinno być „w funkcji położenia nakrętki lub w funkcji odległości nakrętki od ...”, „jednym z rozwiązań montażowych stosowanych w konwencjonalnych osiach posuwowych ...” str. 56, „Wpływ nagrzewania się osi X na rezultaty ...”, str. 92, 94 i podobne str. 96, „Temperatury zmierzone podczas pomiarów ...”, str. 93, 95.
5. Do innych usterek zaliczam brak numerowania stron w spisie treści oraz brak sortowania pozycji w spisie literatury.
6. Zastosowany system odnośników nie ogranicza możliwości sortowania według nazwisk autorów, gdyż w typowych edytorach można wybrać kolumnę, będącą wyróżnikiem dla sortowania. Znaczna liczba pozycji literatury w języku polskim zawiera tytuły zapisane z użyciem dużej litery jako pierwszej dla wszystkich wyrazów. Wygląda to na niedoskonałość automatycznego generatora spisu literatury.

Mimo powyższych uwag uważam, iż oceniana praca doktorska charakteryzuje się wysokim poziomem naukowym, znacznym zakresem badań, dużą wartością wyników dla innych naukowców i znacznym potencjałem aplikacyjnym. Poziom redukcji niedokładności pozycjonowania jest bardzo wysoki, co wskazuje na wysoką przydatność praktyczną wyników.

Autor wykonał wartościową pracę naukową, wymagającą licznych i pracochłonnych badań oraz zastosował nowoczesne metody pomiarowe i wysokiej jakości aparaturę badawczą.

5. Wniosek końcowy

W wyniku analizy rozprawy mgr inż. Jacka Zapłaty nt.: SYSTEM KOMPENSACJI ODKSZTAŁCEŃ CIEPLNYCH TOCZNYCH ŚRUB POCIĄGOWYCH OBRABIARKI STEROWANEJ NUMERYCZNIE, której promotorem jest dr hab. inż. Mirosław Pajor, mogę stwierdzić, iż Autor:

- wybrał temat rozprawy ważny dla opracowania, rozwoju i upowszechnienia nowych metod kompensacji skutków odkształceń cieplnych tocznych śrub pociągowych,

- opracował innowacyjny system kompensacji odchyłek położenia, dzięki czemu praca tworzy podstawy do rozwoju i upowszechnienia nowych metod podwyższania dokładności obrabiarek,
- przyjął szeroki i spójny zakres zagadnień rozpatrywanych w rozprawie,
- uzyskał wyniki, które mogą być wykorzystane w innych pracach badawczych,
- dokonał poprawnych uogólnień, dotyczących podstaw budowy systemów kompensacji geometrycznych skutków różnych przyczyn odchyłek pozycjonowania,

co pozwala wyrazić opinię, iż rozprawa w bardzo dobrym stopniu spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim. Wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.



Dr hab. inż. Roman Staniek, prof. nadzw. PP
Instytut Technologii Mechanicznej
Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania
Politechnika Poznańska
pl. Mari Skłodowskiej-Curie 5
60-965 Poznań

Poznań, dnia 31 października 2014r.

R E C E N Z J A

pracy doktorskiej mgr inż. Jacka ZAPŁATY

pt.

System kompensacji odkształceń cieplnych tocznych śrub pociągowych obrobiarki sterowanej numerycznie

Podstawa opracowania

- praca doktorska mgr inż. Jacka ZAPŁATY, której promotorem jest dr hab. inż. Mirosław Pajor, prof. nadzw. ZUT,
- uchwała Rady Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie z dnia 1 lipca 2014 roku w sprawie wyznaczenia recenzentów w/w pracy i umowa o dzieło wystawiona przez Dziekana Wydziału prof. dr hab. inż. Stefana BERCZYŃSKIEGO na opracowanie recenzji.

Wybór tematu, ogólny opis pracy

Silna konkurencja na rynku obrabiarek zmusiła w ostatnim czasie producentów do zainteresowania się segmentem obrabiarek ekonomicznych (posiadających w nazwie „eco” od economy), w których dąży się do połączenia dużej dokładności i produktywności z relatywnie niskimi kosztami. Trend ten wymusza poszukiwanie nowych rozwiązań, znacznie tańszych, lecz nie gorszych. Jednym z głównych elementów kosztotwórczych osi sterowanych numerycznie jest bezpośredni układ pomiarowy. Rezygnacja z takiego rozwiązania przyczynia się do wzrostu błędu pozycjonowania wynikającego z błędów łańcucha kinematycznego serwonapędu, a także odkształceń termicznych śruby tocznej. Szacuje się, iż błędy powstające na skutek rozszerzalności temperaturowej komponentów mechanicznych obrabiarek są przyczyną ponad 60% braków produkowanych części. Drugą wadą bezpośredniego systemu pomiarowego, oprócz kosztów, staje się awaryjność związana z lokalizacją w pobliżu przestrzeni obróbkowej, gdzie narażony jest na działanie agresywnego środowiska. Z praktyki wynika, iż najczęstsze uszkodzenia linearów wynikają właśnie z zalania ich cieczą chłodzącą. Z tych względów tematyka podjęta przez Autora w rozprawie doktorskiej jest jak najbardziej uzasadniona, aktualna, wręcz potrzebna. Porusza niezwykle trudne i skomplikowane zagadnienia

związane z efektywną kompensacją odkształceń cieplnych osi liniowych napędzanych tocznymi śrubami pociągowymi współczesnych obrabiarek sterowanych numerycznie.

Praca liczy 122 strony. Składa się z wprowadzenia (rozdz.1) poprzedzonego spisem treści, niekompletnym bowiem, nie zawiera numerów stron, wykazem ważniejszych oznaczeń i akronimów, przeglądu literatury (rozdz. 2), sześciu rozdziałów zasadniczych (rozdz. 3–8), wniosków końcowych (rozdz. 9) i bibliografii. W pracy brakuje streszczeń, zarówno w języku polskim jak i zwyczajowo angielskim. Bibliografia obejmuje ogółem 139 pozycji, w tym 74 artykuły (9 współautorskich Doktoranta), 33 książki, 20 norm, 2 katalogi i 10 stron www. Całkowicie niezrozumiały dla mnie jest system oznaczeń i cytowań literatury w tekście pracy, a także kolejność umieszczenia jej w wykazie.

Pan mgr inż. Jacek Zapłata wykonał pracę doktorską pod kierunkiem dr hab. inż. Mirosława Pajora, prof. nadzw. w Instytucie Technologii Mechanicznej Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Chciałbym podkreślić, że Instytut w obszarze badawczym, w którym zrealizowano pracę doktorską, należy do jednego z najlepszych ośrodków w kraju i dysponuje nowoczesnym zapleczem badawczym oraz doświadczoną kadrą naukową.

Uważam, że przedstawiona do opiniowania praca stanowi kompletne opracowanie naukowe w zakresie określonym tematem podjętym przez Autora.

Ocena merytoryczna

Presja współczesnego świata, aby produkować dokładniej, szybciej i taniej znajduje silne odzwierciedlenie we współczesnych technikach wytwarzania, w konstrukcji, technologii i budowie maszyn. Żeby sprostać tym potrzebom maganiom, podejmuje się wielokierunkowe innowacyjne działania i poszukiwania, które wymagają nieprzeciętnych umiejętności od ich autorów. Współczesny badacz, konstruktor maszyn technologicznych powinien być w równej mierze dobrym technologiem, elektronikiem i informatykiem, a najlepiej skupiać w sobie cechy wszystkich tych profesji. Przyswojenie i opanowanie dużej ilości niezwykle szybko pojawiających się nowych informacji, różnorodnych programów wspomagających procesy projektowania, konstruowania i wytwarzania wymaga od współczesnych konstruktorów i technologów niezwykle umiejętności i stałego doksztalcania się.

Autor w pracy podjął się bardzo trudnego i ambitnego zadania opracowania systemu cyfrowej kompensacji „on-line” odkształceń cieplnych tocznych śrub pociągowych współpracującego z systemem sterowania CNC. Przeprowadził wstępne badania symulacyjne, opracował i zbudował stanowisko badawcze do pomiaru rozkładu temperatury w śrubie, dokonał ingerencji w układ sterowania obrabiarki celem wprowadzania odpowiednich korekt, zbudował modele matematyczne umożliwiające obliczanie korekt, przeprowadził badania doświadczalne działania systemu i weryfikacyjne, a także zaproponował zastosowanie 2 metod sztucznej inteligencji do obliczania wartości korekt.

W krótkim wprowadzeniu (**rozdział 1**, s.6-9) Autor podkreślił znaczenie dokładności części wykonywanych na OSN, opisał aktualne normy związane z badaniem dokładności obrabiarek, rodza je występujących błędów geometrycznych, skupiając szczególną uwagę na tych

związanych ze zmianami cieplnymi obrabiarek. Na końcu wskazał niszę, którą będzie próbował rozwiązać w rozprawie.

W **rozdziale 2** (s.10-19) Autor na podstawie bogatej literatury dokonał przeglądu stanu wiedzy w obszarze wpływu zmian cieplnych obrabiarek na ich dokładność, szczególną uwagę poświęcając błędom cieplnym związanym ze strukturą geometryczną obrabiarek, błędom zespołów wrzecionowych, błędom liniiów optycznych stosowanych w układach automatycznej regulacji położenia. Najwięcej miejsca poświęcił błędom zespołów ruchów posuwowych. Uważam, że zabrakło podrozdziału poświęconego bardzo ważnym błędom pochodzącym od zespołów korpusowych zarówno liniowych jak i skrętnych. Ponadto, brak w wykazie literatury pozycji od S1 do S7 (s.12,13), a w tekście Autor powołuje się na nie.

W krótkim, ale bardzo ważnym, **rozdziale 3** (s.20-22) na podstawie przeprowadzonej analizy Autor sformułował cele, tezę i zakres pracy. Główny cel pracy to opracowanie systemu cyfrowej kompensacji „on line” odkształceń cieplnych tocznych śrub pociągowych współpracującego z układem sterowania CNC obrabiarki. Postawiona teza jest oczywiście prawdziwa, ale w sumie oczywista, trywialna. Aby zrealizować cel pracy i udowodnić tezę Autor przedstawił spójny i logiczny zakres realizacji 7 szczegółowych zadań cząstkowych, które mieszczą się w 5 głównych rozdziałach pracy. Takie podejście do tematu jest logicznie uzasadnione i jak najbardziej prawidłowe.

W **rozdziale 4** (s.23-44) Kandydat opisał podstawowe sposoby modelowania zjawisk cieplnych zachodzących w obrabiarkach. Następnie skupił uwagę na analizie cieplno-mechanicznej osi posuwu obrabiarki metodą elementów skończonych. Wyszczególnił kolejne kroki analizy oraz przedstawił podstawowe zależności służące wyznaczeniu warunków granicznych, niezbędnych do zbudowania modelu cieplno-mechanicznego osi posuwu obrabiarki metodą MES. Rozdział zakończył przedstawieniem wyników symulacji cieplnej oraz mechanicznej oszacowującej odkształcenia cieplne osi napędowej dla przyjętych warunków granicznych.

Rozdział 5 (s.45-67) to jeden z ważniejszych rozdziałów pracy. Zawiera projekt systemu kompensacji odkształceń cieplnych śruby napędowej osi liniowej obrabiarki sterowanej numerycznie, składający się z konstrukcji mechanicznej i sfery informatycznej. Przedstawiono w nim sposób implementacji obliczanej korekty do układu sterowania obrabiarki CNC. Opracowano dwa modele cieplne służące do wyznaczania wartości korekt, pierwszy to model odkształceń cieplnych dla śruby bez napięcia wstępnego (z łożyskiem ustalającym i pływającym), drugi dla śruby napiętej wstępnie. Opracowano także wytyczne w formie zaleceń dla konstruktorów pragnących wdrożyć podobny system w nowopowstających obrabiarkach. Na szczególną uwagę w tym rozdziale zasługuje autorska analiza pozwalająca ustalić optymalną liczbę czujników temperatury, które system winien mieć dla poprawnego funkcjonowania.

W **rozdziale 6** (s.68-84) przedstawiono doświadczalne wyniki badań uzyskane na specjalnie zbudowanym stanowisku badawczym z opracowanym systemem kompensacji odkształceń cieplnych. Na stanowisku tym, przeprowadzono cykl badań mających na celu zbadanie odkształceń cieplnych osi napędowej, opracowanie odpowiednich modeli tych odkształceń, a następnie weryfikację poprawności funkcjonowania opracowanego systemu

kompensacji. Z zaprezentowanych wyników badań wynika, że osiągnięto znaczącą redukcję błędów spowodowanych odkształceniami cieplnymi śruby pociągowej, a tym samym osiągnięto dużo większą dokładność pozycjonowania badanej osi sterowanej numerycznie.

W **rozdziale 7** (s.85-103) cały system został zainstalowany i zweryfikowany na 3-osiowej frezarce CNC typu VC760 firmy AVIA. Kompensacji poddano wszystkie osie. W procesie implementacji systemu uwzględniono specyficzne właściwości osi badanej obrabiarki, tj. ich sposób ułożyskowania oraz długość śrub. Przeprowadzono cykl badań doświadczalnych, którego celem była weryfikacja poprawności funkcjonowania systemu na obrabiarce produkcyjnej. W efekcie końcowym Autor uzyskał znaczną redukcję błędów pozycjonowania osi spowodowanych odkształceniami cieplnymi śrub tocznych.

W **rozdziale 8** (s.104-111) Pretendent opisał próby zastosowania sztucznych sieci neuronowych w celu zamodelowania odkształceń cieplnych śrub pociągowych. Opisał proces uczenia SSN. Przedstawił wskazówki i zalecenia dotyczące implementacji SSN w układzie sterowania obrabiarki CNC. Przeprowadził doświadczalną weryfikację jakości działania modeli opracowanych w oparciu o sieci neuronowe. Porównał dokładność pozycjonowania osi przy zastosowaniu modeli opracowanych w poprzednich rozdziałach z modelami zbudowanymi w oparciu o sieci neuronowe.

Generalnie, wnioski przedstawione w **rozdziale 9** (s.112-114) w pełni potwierdzają osiągnięcie założonego celu głównego oraz celów częściowych i nie budzą zastrzeżeń pod względem formalnym i merytorycznym.

Podsumowując, uważam, że praca stanowi własny oryginalny i istotny wkład Doktoranta w dążeniu do ograniczania wpływu odkształceń termicznych na dokładność pozycjonowania osi liniowych sterowanych numerycznie napędzanych śrubami tocznymi i poszerza nasze horyzonty w tym obszarze wiedzy.

Ocena redakcyjna

Praca doktorska mgr. inż. Jacka ZAPŁATY stanowi całościowo kompletne opracowanie naukowe zgodne z tematem określonym w tytule, logiczne pod względem struktury podziału treści, celów, zakresu i wniosków końcowych.

Praca napisana jest dobrym, komunikatywnym językiem, jakim Autor posługuje się w opisie niełatwych problemów technicznych. Trafne określenia, ciekawe konstrukcje zdań złożonych sprawiają, że pracę, jak na tekst techniczny, czyta się z przyjemnością. To ostatnio coraz rzadziej spotykana cecha u autorów tekstów technicznych, a bardzo ważna dla czytelności.

Autor stosuje poprawną terminologię oraz jednostki układu SI. Silną stroną pracy są także rysunki, wykresy, ilustracje, tablice i schematy.

Nie mogę jednak pominąć kilku uwag krytycznych.

W całej pracy szczególną uwagę zwraca stosunkowo duża liczba błędów, tzw. literówek. Oto kilka z nich:

- s.8 – zamiast *powstawania* jest *postawiania*,

- s.10 – zamiast *ciepłych* jest *cieplny*,
- s.11 – zamiast *od* jest *do*,
- s.12 – zamiast *modeli* jest *modelów*,
- s.37 – zamiast *odpowiada* jest *opowiada*,
- s.75 i 77 – zamiast *co obrazuje rys. ...* jest *do obrazuje rys.*

Szkoda, że Autor nie wydrukował pracy dwustronnie oraz nie włączył opcji dzielenia wyrazów.

Doktorant niekonsekwentnie postępuje w wykazie oznaczeń i symboli, podając w niektórych jednostki, a w innych nie.

Autorowi, moim zdaniem, zbyt często zdarza się powtarzać podmiot w zdaniach złożonych, co powoduje, że tekst staje się trochę sztywny, oficjalny. Użycie zaimków ożywiłoby go. Zbyt często Doktorant używa orzeczenia *jest*. Stosowanie w jednym zdaniu kilkakrotnie tego samego wyrazu, np. *przedstawiono 3x* (s.74) nie należy do najbardziej eleganckich. Ma też Autor kłopoty z interpunkcją, jest niekonsekwentny w stawianiu przecinków. Przypominam, że wzory stanowią integralne części zdania i też tak należałoby je traktować.

Analizując literaturę w rozdz. 2, Autor często używa słowa *doniesiono* (np. s.13) – mnie osobiście to słowo nie najlepiej się kojarzy.

W pracy (s.8) użyto zwrotu *Nieruchomo, do maszyny montuje się ramię ...*, powinno być *Do maszyny montuje się nieruchomo/e ramię*.

Brak konsekwencji w oznaczaniu serii pomiarów na rysunkach 6.18–6.21.

Doktorant używa terminu *błąd nawrotu* (s.86, 2-gi akapit), wg polskiej normy powinno być *wartość zwrotna osi* lub, wg anglojęzycznych *backlash*; często używa też potocznego terminu *enkodek* w odniesieniu do *przetwornika obrotowo-impulsowego*.

Bardzo jestem ciekawy, jakim kryterium posługiwał się Autor, ustalając kolejność poszczególnych pozycji w wykazie literatury; na pewno nie alfabetycznym nazwisk, nie wg kolejności cytowań, nie rokiem wydania ??? W niektórych pozycjach brak pełnego opisu bibliograficznego. Przypominam także Autorowi, że przy stronach www. koniecznie należy umieszczać daty.

W podsumowaniu stwierdzam, że pracę jako całość pod względem redakcyjnym i edytor skim, pomimo poczynionych wyżej uwag, oceniam bardzo dobrze.

Wartość naukowa i przydatność praktyczna pracy

Praca dotyczy odkształceń ciepłych napędowych osi liniowych napędzanych śrubami tocznymi i doskonale wpisuje się w kompleksowy system kompensacji odkształceń ciepłych całej obrabiarki. Z tak określonego w tytule pracy zadania Autor wywiązał się znakomicie. Tematyka pracy jest z praktycznego punktu widzenia ważna i choć nie uwzględnia wpływu, m.in. odkształceń zespołów korpusowych czy wrzecionowych związanych z wpływem szyb-

kości i nierównomierności nagrzewania, które generują trudniejsze do kompensacji od liniowych odkształcenia skrajne, to Autor doskonale zdaje sobie z tego sprawę i wyraźnie zaznacza we wnioskach, że zajmie się tymi problemami w dalszych badaniach.

Do największych osiągnięć naukowych w pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Jacka Zapłaty należy opracowanie, przebadanie i wdrożenie oryginalnej, nowej metody kompensacji odkształceń termicznych osi liniowych napędzanych śrubami tocznymi. Bardzo wysoko oceniam także autorską analizę pozwalającą dobierać optymalną liczbę czujników pomiarowych umieszczanych w śrubie tocznej w tej metodzie.

Podjęta w rozprawie tematyka jest aktualna, rozwojowa, nie do końca rozpracowana i, co najważniejsze, ma ogromne znaczenie praktyczne. Wybór tematu pracy w tym aspekcie staje się jest zatem jak najbardziej słuszny.

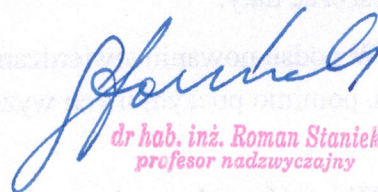
Na zakończenie chciałbym zasugerować Autorowi pracy i całemu „Zespołowi Szczecińskiemu”, aby w dalszych pracach nad tym tematem skupił się na poszukiwaniach innych, mniej skomplikowanych (bezcujnikowych) metod, gdyż wydaje mi się, aczkolwiek mogę się mylić, że ta metoda wyczerpała już swoje możliwości.

Wniosek końcowy

Przedstawiona do opiniowania praca doktorska mgr inż. Jacka ZAPŁATY wykazała, że Autor ma właściwe rozeznanie naukowej problematyki w zakresie objętym dysertacją, tj. znajomość aktualnej wiedzy teoretycznej i praktycznej oraz metod badawczych.

Kandydat rozwiązał problem naukowy polegający na opracowaniu oryginalnej metody kompensacji odkształceń termicznych osi liniowych napędzanych śrubami tocznymi, a także opracował szereg praktycznych wskazówek i uwag przydatnych w pracy konstruktorów obrabiarek. Udowodnił na konkretnych przykładach analitycznych i praktycznych przydatność opracowanej przez siebie metody kompensacji.

Na tej podstawie stwierdzam, że praca doktorska mgr. inż. Jacka ZAPŁATY pt. „System kompensacji odkształceń cieplnych tocznych śrub pociągowych obrabiarki sterowanej numerycznie” spełnia wymagania zawarte w Art. 13 pkt 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym ... i może być dopuszczona do publicznej obrony.



dr hab. inż. Roman Staniek
profesor nadzwyczajny