

Budgeting of the uncertainty of static stiffness measurement of machine tools

M. Eng. Joanna Jastrzębska

ABSTRACT

The static stiffness of technological machines is crucial for the accuracy of products, as it is one of the essential elements (along with the cutting force value) that should be considered during tool path correction in the control system. Based on the information of the cutting force value and the machine tool stiffness, the displacements of the functional point (where a cutting tool contacts a workpiece) are determined. These displacements could be compensated by applying appropriate corrections. In this doctoral work they are referred to as *workpiece corrections of shaping process*. It is necessary that the values of these corrections are determined together with their uncertainties. It allows to assess the accuracy of their determination. In this context, complete information about the static stiffness of the machine tool is a basic element that enables to determine workpiece corrections of shaping process.

The work described in this doctoral thesis focuses on the measurement of static stiffness of machine tools with particular emphasis on the uncertainty analysis. The presented literature review shows that the currently used methods of static stiffness measurements are still at the stage of development. So far, among the proposed solutions, there are no studies containing detailed uncertainty analyses for the results of stiffness measurements. Therefore, the aim of this work is to develop an uncertainty budget for the static stiffness measurement of a machine tool. The performed uncertainty analysis can be an essential element of the information set to confirm the measurement traceability of the obtained results.

To achieve the purpose of this work, a model for static stiffness measuring was determined. The applied measuring method is based on the model of the rigid body motion which makes it possible to determine the measured quantities in generalised coordinates. The measured translational displacements can be converted into generalised displacements and the measured forces into generalised forces. Consequently, it is possible to determine translational and rotational stiffness coefficients at any selected point in the machining space.

For the proposed model, there were conducted various analyses, including: estimating the impact of applied simplification assumptions (method's error) and optimisation of the number of used displacement sensors and their positioning due to different objective functions. The results of multifaceted analyses point out that some generalised displacements (appropriate pairs of translational and rotational displacements) are correlated with each other. The work shows that the application of a one-way force gauge also results in correlations of some pairs of generalised forces and moments. In proposed model, there is a possibility of occurrence of correlations of the obtained results. Then, for this model, an appropriate method of uncertainty estimation was selected. Due to the fact that the measurement model is complex, it has a variable structure, the measurands are implicit and there is a likelihood of correlations between output quantities, the Monte Carlo method was chosen for uncertainty estimation.

The tests of static stiffness measurement were performed on a 5-axis medium-size milling machine. The identifying process of error sources was performed carefully and enabled to include 57 components in the uncertainty budget. For all these components their standard uncertainties were determined based on manufacturers' documentations or additionally performed tests. As a result of the budgeting process, the values of the stiffness coefficients were obtained along with their expanded uncertainties. The results indicated that the components of reproducibility and method-specific uncertainties contribute significantly more to the budget than the components of metrological

characteristics of the sensors used in the measurements. Moreover, the obtained findings allow to identify some components that may be omitted in the uncertainty analysis, as their lack does not affect the accuracy of the stiffness results. As a result of the conducted study, method of measuring machine tool static stiffness was proposed along with its validation.

The obtained results of static stiffness measurements enable to determine the area of practical acceptability of the measurement method used in this study. The estimated stiffness uncertainties allowed to predict the accuracy of the corrections in workpiece shaping process. Moreover, it may be possible to confirm the measurement traceability of these corrections with the unit of length in relation to the commonly used acceptance criteria of measurement systems. As a part of this PhD thesis, there were also performed preliminary analyses of these aspects for the tested milling machine. As an additional utilisable aspect of this work, it can be found the conclusions regarding the rationality of obtaining corrections in the shaping process of workpieces in the context of their accuracy.

9.06.2022

Joanna Gąsiorowska

Budżetowanie niepewności pomiaru sztywności statycznej obrabiarek

mgr inż. Joanna Jastrzębska

STRESZCZENIE

Rozprawa doktorska podejmuje tematykę pomiaru sztywności statycznej obrabiarek ze szczególnym uwzględnieniem analizy niepewności jej pomiaru. Sztywność statyczna maszyn technologicznych ma istotne znaczenie dla dokładności uzyskiwanych wyrobów, ponieważ stanowi jeden z niezbędnych elementów (obok wartości siły skrawania) które należy uwzględnić podczas korygowania ścieżki narzędzia w układzie sterowania. W oparciu o informacje o wartości siły skrawania oraz sztywności obrabiarki wyznacza się przemieszczenia punktu funkcjonalnego, w którym narzędzie skrawające styka się z przedmiotem obrabianym. Przemieszczenia te mogą podlegać kompensacji przez stosowanie odpowiednich poprawek, zwanych w niniejszej pracy poprawkami kształtowania przedmiotu obrabianego. Niezbędne jest, aby wartości tych poprawek wyznaczone były wraz z ich niepewnościami, ponieważ pozwala to ocenić dokładność ich wyznaczania. Wobec tego pełna informacja o sztywności statycznej obrabiarki stanowi podstawowy element umożliwiający wyznaczenie poprawki kształtowania przedmiotu obrabianego.

Na podstawie przeprowadzonego w pracy przeglądu stanu zagadnienia, wykazano, że obecnie proponowane metody pomiarów sztywności statycznej obrabiarek skrawających są nadal na etapie rozwoju. Jak dotąd, wśród proponowanych rozwiązań brak jest opracowań zawierających szczegółowe analizy niepewności dla wyników pomiarów sztywności. W związku z tym, celem pracy było opracowanie budżetu niepewności pomiaru sztywności statycznej obrabiarki. Przeprowadzona analiza niepewności to zasadniczy element zbioru informacji do potwierdzania spójności pomiarowej uzyskiwanych wyników.

Realizacja celu pracy wymagała przyjęcia modelu pomiaru sztywności statycznej oraz doboru odpowiedniej metody szacowania niepewności. Zastosowana metoda oparta została na modelu ruchu bryły sztywnej, co umożliwiło wyznaczanie wielkości mierzonych we współrzędnych uogólnionych. Przekształcenie efektów mierzonych przemieszczeń translacyjnych (czujnikami przemieszczenia) na przemieszczenia uogólnione oraz mierzonej siły na siły uogólnione, pozwoliło na wyznaczanie współczynników sztywności translacyjnych oraz rotacyjnych w dowolnie rozpatrywanym punkcie. Na podstawie wieloaspektowych analiz wykazano, że dla proponowanej metody pomiaru, otrzymuje się skorelowane ze sobą przemieszczenia uogólnione (odpowiednie pary przemieszczeń translacyjnych i rotacyjnych). Wykazano analitycznie, że użycie jednokierunkowego siłomierza skutkuje także wystąpieniem korelacji pary uogólnionych sił i momentów. Następnie, opracowano algorytm szacowania niepewności pomiaru sztywności statycznej obrabiarek z użyciem metody Monte Carlo. Badania pomiaru sztywności statycznej zrealizowano na 5-osiowej frezarce średniej wielkości. Szczegółowo przeprowadzony proces identyfikacji źródeł błędów oraz określania ich niepewności standardowych pozwolił na przyjęcie do budżetu niepewności aż 57 składowych. W następstwie przeprowadzonego budżetowania uzyskano wartości współczynników sztywności wraz z ich niepewnościami rozszerzonymi, co stanowiło realizację celu pracy. Otrzymane rezultaty pozwoliły także na zidentyfikowanie składowych, które mogą zostać pominięte w analizie niepewności bez utraty dokładności jej szacowania.

Uzyskane wyniki pomiarów sztywności statycznej umożliwiły określenie obszaru praktycznej akceptowalności stosowanej w niniejszej pracy metody pomiaru. Oszacowana niepewność sztywności pozwoliła na prognozowanie dokładności poprawek kształtowania przedmiotu obrabianego. W następstwie tego możliwe było potwierdzenie spójności tych poprawek z jednostką długości w odniesieniu do powszechnie stosowanych kryteriów akceptowalności systemów pomiarowych.

W związku z powyższym, w przekonaniu autorki, teza tej pracy została potwierdzona. Za efekt użyteczny pracy uznaje się rozważania dotyczące racjonalności uzyskiwania poprawek kształtowania przedmiotów obrabianych w kontekście ich dokładności.

3.06.2022

Joanna Jastrzębska