

Dostrajanie wirtualnego modelu wrzeciennika szlifierki na podstawie eksperymentalnych badań obiektu

Experimental tuning of virtual model of internal grinder wheelhead

WITOLD PAWŁOWSKI
SEBASTIAN BOJANOWSKI

Streszczenie: W artykule przedstawiono procedurę dostrajania wirtualnego modelu (cyfrowego prototypu) wrzeciennika ściernicy szlifierki do otworów. Dostrajanie wykonano, przeprowadzając eksperymentalne badania statyczne oraz identyfikacyjny test modalny. W ten sposób otrzymano wiarygodny wirtualny model zespołu obrabiarki, który można zastosować w celu przewidywania dynamicznej odpowiedzi układu na dowolne wymuszenie bez konieczności wykonywania czasochłonnych badań doświadczalnych. Zweryfikowany model może być zastosowany do określenia właściwości statycznych i dynamicznych układu zawierającego konstrukcyjne modyfikacje.

Słowa kluczowe: komputerowe wspomaganie projektowania, modelowanie, symulacja, obrabiarki

Abstract: In the paper the procedure of tuning the virtual model (digital prototype) of internal grinder wheelhead is presented. The tuning is based on experimental static examination as well as identification modal test. As a result the reliable virtual model of the machine tool unit was obtained. The model can be applied in order to predict the system response to any excitation waveform without laborious and time-consuming additional experimental tests. The verified model can be also utilized in order to investigate the static and dynamic properties of the system subjected to construction modifications.

Keywords: computer aided design, modelling, simulation, machine tools

Wirtualny model (cyfrowy prototyp) stanowi model układu rzeczywistego, zawierający informacje nt. geometrii badanego obiektu, właściwości połączeń pomiędzy elementami konstrukcyjnymi (kontaktów) i właściwości materiałów poszczególnych elementów, wykonany za pomocą techniki modelowania przestrzennego z wykorzystaniem programów CAD 3D. Z tego powodu cyfrowy prototyp stanowi idealizację struktury rzeczywistego obiektu tak bliską oryginałowi, na ile dokładnie można określić modelową postać parametrów rzeczywistych na aktualnym etapie rozwoju nauki [1, 2]. W celu porównania zachowania badanego układu wyznaczonego na podstawie cyfrowego prototypu z wynikami otrzymanymi eksperymentalnie oraz aby otrzymać możliwie zbieżny charakter zachowania modelu i układu rzeczywistego stosowana jest procedura dostrajania modelu. Wynikiem przeprowadzanego dostrajania jest modyfikacja wartości parametrów modelu umożliwiająca otrzymanie akceptowalnego pozio-

mu zbieżności zachowania modelu i obiektu rzeczywistego. Modyfikacja może dotyczyć tych parametrów modelu, których wartości zostały przyjęte na podstawie istniejących standardów (np. parametry materiałowe) lub które „idealizują” zachowanie rzeczywistych węzłów mechanicznych (np. kontakty). W pracy przedstawiono przykład dostrajania cyfrowego prototypu zespołu konstrukcyjnego obrabiarki.

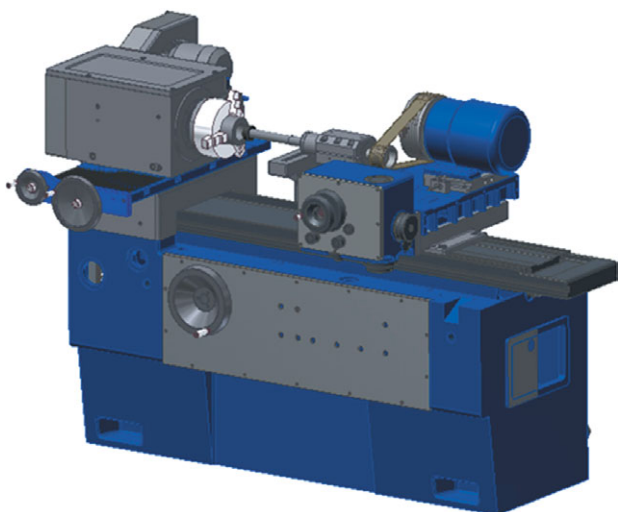
Badania zostały przeprowadzone na szlifierce do otworów SOH-10 firmy Jotes (rys. 1). Wirtualny model szlifierki do otworów został utworzony za pomocą techniki modelowania przestrzennego w systemie CAD Autodesk Inventor Professional 2014 [3]. Analizowany był wrzeciennik ściernicy (rys. 2) wyposażony we wrzeciono łożyskowane tocznie. Teoretyczna analiza wytrzymałościowa oraz dynamiczna modelu została przeprowadzona metodą elementów skończonych (MES) w module analitycznym systemu Autodesk Inventor.

Przeprowadzono procedurę dostrojenia cyfrowego prototypu wrzeciennika szlifierskiego do rzeczywistego obiektu. Dostrajanie cyfrowego modelu wykonano w celu zwiększenia wiarygodności otrzymanych wyników teoretycznych, ponieważ podczas tworzenia wirtualnego modelu wykorzystano właściwości fizyczne i mechaniczne materiałów dostępne

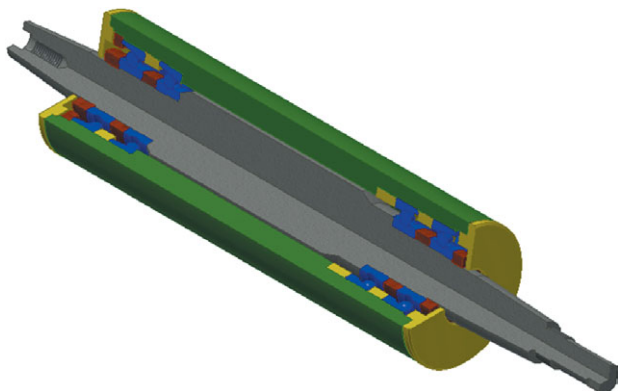
Dr hab. inż. Witold Pawłowski – Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn Politechniki Łódzkiej, ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź, e-mail: witold.pawlowski@p.lodz.pl; mgr inż. Sebastian Bojanowski – Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn Politechniki Łódzkiej, ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź, e-mail: sebastian.bojanowski@p.lodz.pl.

w literaturze oraz zastosowano „idealne” warunki podparcia wrzeciona.

Dostrajanie cyfrowego prototypu wrzeciennika szlifierskiego zostało przeprowadzone przez wprowadzenie odpowiednich parametrów fizycznych



Rys. 1. Trójwymiarowy model szlifierki do otworów SOH-10 utworzony w systemie Autodesk Inventor [3]



Rys. 2. Model zespołu wrzeciennika ściernicy szlifierki SOH-10

elementów badanego wrzeciona (tj. moduł *Younga*, liczba *Poissona*, gęstość masowa, sztywność węzłów lub podpór), a następnie modyfikację ich wartości na podstawie wyników porównania odpowiedzi konstrukcji otrzymanej w wyniku obliczeń analitycznych oraz odpowiedzi pomierzonej doświadczalnie z wykorzystaniem konstrukcji rzeczywistej.

Statyczne badania eksperymentalne

W pierwszym etapie procedury dostrajania ustalono zakres statycznego dostrajania modelu przez doświadczalny pomiar sił podczas szlifowania otworów. Do badań eksperymentalnych zastosowano ściernicę o średnicy 75 mm oraz wykorzystano próbkę wykonaną ze stali 42CrMo4 o średnicy otworu 85 mm i szerokości 50 mm. Powierzchnia próbki została zahartowana do twardości 50 HRC. Podczas operacji zgrubnego szlifowania otworów z posuwem wgłębnym 0,005 [mm/podwójny skok stołu] wartość siły w kierunku posuwu wgłębnego (normalnym) wyniosła ok. 80 N, a w kierunku stycznym ok. 15 N. Natomiast podczas operacji wykańczającego szlifowania z posuwem wgłębnym 0,0025 [mm/podwójny skok stołu] wartość siły w kierunku posuwu wgłębnego wyniosła ok. 30 N, a w kierunku stycznym ok. 6 N. Pomiar sił przeprowadzono w sposób pośredni, przez pomiar odkształcenia trzpienia mocującego ściernicę. Do pomiaru odkształcenia zastosowano system pomiarowy Spider 8 firmy HBM o dokładności pomiaru przemieszczenia 0,01 μm i zakresie pomiarowym $\pm 0,45$ mm.

Następnie końcówkę wrzeciona PTSbP 80x250 obciążono ciężarkami o różnych masach, zastępując w ten sposób siłę w kierunku pionowym, jednocześnie mierząc w tym samym kierunku przemieszczenie. Pomiary przemieszczenia końcówki wrzeciona były wykonane w zakresie od zera do maksymalnej siły uzyskanej z pomiarów zgrubnego szlifowania otworów. Wyniki pomiarów i symulacji komputerowej zaprezentowano na rys. 3.

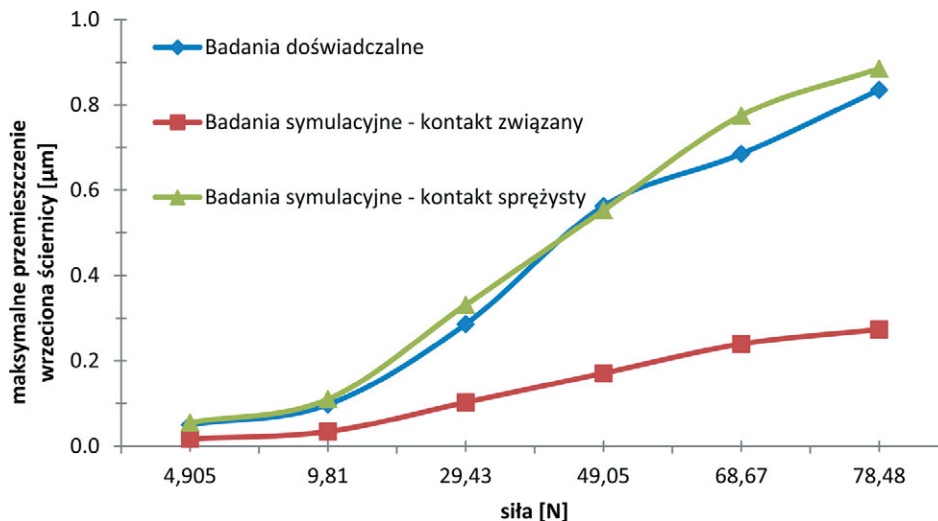
Przedstawione na wykresie wyniki otrzymano w sposób doświadczalny oraz na podstawie symulacji komputerowej. Wyniki z symulacji zostały przedstawione dla dwóch typów kontaktów – związanych oraz sprężystych. Podczas symulacji z kontaktami związanymi wszystkie miejsca styku elementów wchodzących w skład zespołu wrzeciona ściernicy zostały spojne. Natomiast podczas symulacji z kontaktami sprężystymi zastosowano kontakty związane oraz wprowadzono bezmasowe elementy o zdefiniowanej sztywności w kierunku normalnym, tzw. kontakty sprężyste.

Przed przystąpieniem do symulacji komputerowej z kontaktami sprężystymi wyznaczono analitycznie współczynniki sztywności zespołów łożyskowych w kierunku promieniowym i osiowym na podstawie zależności przedstawionych w literaturze [4]. Parametry poszczególnych rodzajów łożysk konieczne do wyznaczenia współczynników sztywności określono na podstawie informacji dostępnych w katalogach łożysk [5, 6].

Następnie otrzymane wyniki zostały wprowadzone do cyfrowego modelu wrzeciennika. Kontakty sprężyste zostały umieszczone w miejscu styku powierzchni wrzeciona i łożysk w celu uzyskania

kontroli nad sztywnością poprzeczną i osiową węzłów łożyskowych. W kierunku promieniowym wprowadzono jeden kontakt sprężysty dla każdego łożyska o współczynniku sztywności 142 kN/mm, natomiast w kierunku osiowym wprowadzono jeden kontakt sprężysty o współczynniku sztywności 31 kN/mm dla pary łożysk. Pozostałe kontakty łączące wrzeciono

i koła pasowego. Dlatego pomiary wykonywano w różnych kierunkach (w płaszczyznach XY i XZ), w punktach o największym przemieszczeniu, zlokalizowanych na wrzecionie i kole pasowym. Wymuszenie drgań obiektu zostało wykonane za pomocą młotka modalnego, a pomiar odpowiedzi konstrukcji przeprowadzono czujnikiem akcelerometrycznym.



Rys. 3. Wyniki badań przemieszczenia wrzeciona otrzymane na podstawie pomiarów i symulacji komputerowej

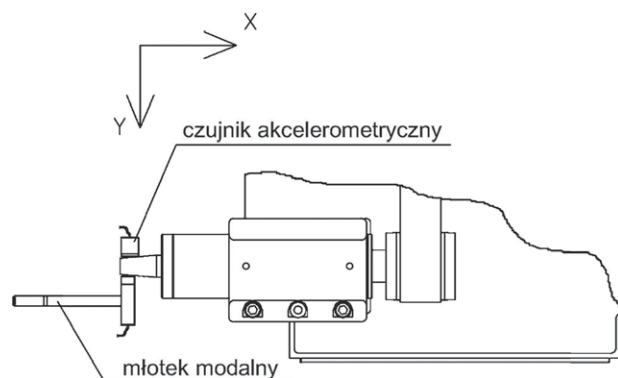
z łożyskami zostały wyłączone, aby nie wprowadzały zakłóceń podczas symulacji. Na podstawie wykresu (rys. 3) można stwierdzić, że maksymalne przemieszczenie wrzeciona dla badań symulacyjnych z kontaktami związanymi jest trzykrotnie mniejsze od pozostałych wyników badań. Natomiast wyniki badań doświadczalnych są zbliżone do wyników badań symulacyjnych z kontaktami sprężystymi, co może świadczyć o właściwym doborze parametrów sztywności łożysk oraz parametrów materiałów zastosowanych podczas symulacji dla elementów wchodzących w skład wrzeciennika.

Eksperymentalne badania drgań swobodnych wrzeciennika ściernicy

W drugim etapie dostrajania zmierzono częstotliwości drgań własnych zespołu wrzeciennika ściernicy szlifierki SOH-10 (rys. 2) za pomocą eksperymentalnej analizy modalnej. Badania modalne przeprowadzono przy użyciu systemu PULSE firmy Bruel & Kjaer.

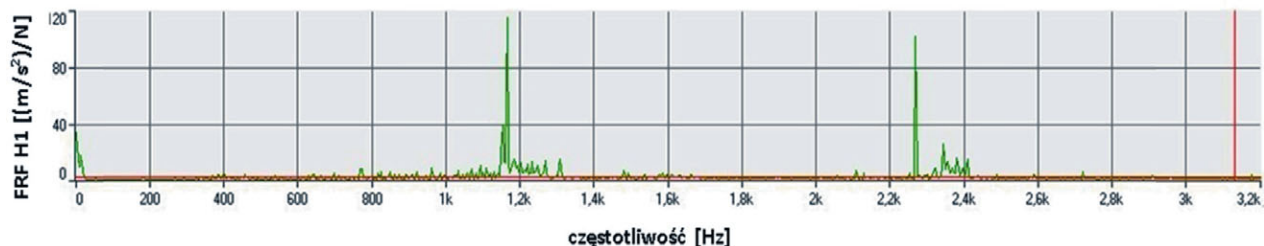
Na podstawie symulacji komputerowej trójwymiarowego modelu zespołu wrzeciennika ściernicy szlifierki SOH-10 wybrano miejsca wymuszenia i pomiaru odpowiedzi układu. Głównym celem badań było wyznaczenie drgań swobodnych wrzeciona

Przykładowy sposób pomiaru przyspieszenia i wymuszenia drgań przedstawiono na rys. 4. Dla analizowanego układu (rys. 4) otrzymano wykres odpo-



Rys. 4. Sposób wymuszenia drgań i pomiaru przyspieszenia

wiedzi częstotliwościowej w postaci estymaty H1 widmowej funkcji przejścia (FRF) zaprezentowany na rys. 5. Na podstawie wykresów odpowiedzi częstotliwościowej określono częstotliwości drgań swobodnych zespołu wrzeciennika ściernicy szlifierki SOH-10 (tab. I).



Rys. 5. Wykres odpowiedzi częstotliwościowej FRF H1

W tabeli przedstawiono również częstotliwości drgań swobodnych otrzymane w wyniku symulacji przeprowadzonej na podstawie cyfrowego prototypu badanego zespołu szlifierki.

Wyniki badań drgań swobodnych zespołu wrzeciennika ściernicy

badania symulacyjne – kontakt związany, Hz	badania symulacyjne – kontakt sprężysty, Hz	badania doświadczalne, Hz
545,58	409,84	438
1067,86	485,38	454
709,37	495,1	
1267,4	927,19	1064
-	1016,75	-
1565,52	1026,52	1184
1373	1354,56	1314
1935	1881,48	1534
-	1884,86	
-	1886,25	
2323,14	-	-
2630,22	-	-
-	2725,13	2340
-	2977,41	2348

Wyniki eksperymentalnej analizy modalnej w postaci częstotliwości drgań swobodnych obiektu rzeczywistego porównano z wynikami symulacji (tab.). Wartości częstotliwości drgań swobodnych otrzymane na podstawie badań cyfrowego prototypu z kontaktami sprężystymi są zbliżone do wartości częstotliwości drgań swobodnych wrzeciennika ściernicy otrzymanych doświadczalnie. Natomiast częstotliwości drgań swobodnych uzyskane na podstawie symulacji komputerowej z kontaktami złączonymi są większe niż częstotliwości otrzymane doświadczalnie oraz oparte na symulacji komputerowej z kontaktami sprężystymi. Niektóre postacie drgań z symulacji komputerowej z kontaktami sprężystymi nie mają swoich odpowiedników w wynikach otrzymanych na podstawie symulacji z kontaktami złączonymi.

Podsumowanie

Procedura dostrajania cyfrowego prototypu zespołu wrzeciennika ściernicy szlifierki do otworów przeprowadzona na podstawie statycznych i dynamicznych badań eksperymentalnych pozwoliła otrzymać wiarygodny model wrzeciennika. Dzięki temu można zastosować zweryfikowany cyfrowy prototyp wrzeciennika ściernicy do badań wpływu różnego rodzaju wymuszeń na odpowiedź dynamiczną układu [7 – 9]. Wrzeciennik ściernicy, zawierający system łożyskowania najbardziej odpowiedzialnego elementu szlifierki, jakim jest wrzeciono, stanowi bardzo istotny zespół konstrukcyjny dla dokładności geometrycznej obróbki. Możliwość analizowania skutków wprowadzania zmian konstrukcyjnych elementów tego zespołu za pomocą wiarygodnego wirtualnego modelu, zarówno jeśli chodzi o badania statyczne, jak i dynamiczne, powoduje znaczne obniżenie kosztów badań wskutek braku konieczności budowy licznych fizycznych prototypów różnych rozwiązań konstrukcyjnych. W celu zbudowania wirtualnego prototypu maszyny można zastosować popularne systemy CAD 3D, a dostrajanie przeprowadzić w sposób doświadczalny.

LITERATURA

1. *Pawłowski W.*: Zastosowanie programu CAD do modelowania i analizy układów mechanicznych. *Technologia i Automatyka Montażu*, Nr 2, 2003, ss. 12 – 15.
2. *Pawłowski W., Bojanowski S.*: Optymalizacja cyfrowych prototypów obrabiarek z wykorzystaniem programów CAD. *Mechanik*, Nr 8-9, 2014, ss. 604 – 609.
3. *Pawłowski W., Bojanowski S.*: Możliwości badania wirtualnych prototypów obrabiarek w programach CAD. *Przegląd Mechaniczny*, Nr 1, 2013, ss. 20 – 26.
4. *Harris T. A.*: Rolling bearing analysis. John Wiley&Sons, New York-London-Sydney 1966.
5. Fabryka Łożysk Toczących w Kraśniku: Katalog wrzecion szlifierskich, 2004.
6. SKF: Precision bearings. Catalogue 3700/I E, 1991.
7. *Lajmert P., Sikora M., Kruszyński B., Wrąbel D.*: Zastosowanie eksperymentalnej i numerycznej analizy modalnej do określenia właściwości dynamicznych szlifierki kłowej do wałków. *Mechanik*, Nr 8-9, 2013, ss. 283 – 290.
8. *Pawłowski W., Bojanowski S.*: Teoretyczna analiza modalna zespołu wrzeciennika przedmiotu szlifierki do otworów. *Mechanik*, Nr 11, 2011, ss. 870 – 874.
9. *Mosion D., Pawłowski W.*: Optymalizacja konstrukcji zespołu łożysk aerostatycznych elektrowrzeciona szlifierskiego. *Hydraulika i Pneumatyka*, Nr 6, 2011, ss. 19 – 22.