

Analiza konstrukcji autonomicznego stołu obrotowego

Analysis of construction of autonomous rotary table

KRZYSZTOF ZIELIŃSKI
ANDRZEJ PIOTROWSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.7.56>

W artykule przedstawiono analizę konstrukcji autonomicznego stołu obrotowego przeznaczonego do współrzędnościowych maszyn pomiarowych. Oś obrotu stołu jest czwartą, sterowaną osią rozszerzającą możliwości klasycznej trzyosiowej maszyny pomiarowej w zakresie pomiaru przedmiotów o powtarzalnym zarysie na obwodzie: kół zębatych, frezów ślimakowych itp. Analizę wykonano w programie CAD/CAE Autodesk Inventor Professional 2018.

SŁOWA KLUCZOWE: stół obrotowy, współrzędnościowa technika pomiarowa, systemy CAD/CAE

The article presents an analysis of the construction of an autonomous rotary table dedicated to coordinate measuring machines. The axis of the table rotation is the fourth, controlled axis extending the capabilities of the classical three-axes measuring machine with the possibility of measuring objects with repetitive contours on the circumference: gears, hobs, etc. The analysis was performed using the CAD/CAE Autodesk Inventor Professional 2018 program.

KEYWORDS: rotary table, coordinate measuring technique, CAD/CAE systems

Wprowadzenie

Współrzędnościowa technika pomiarowa zrewolucjonizowała metrologię przemysłową – umożliwiła prowadzenie skomplikowanych pomiarów oraz analiz kształtu w bardzo krótkim czasie, w jednym zamocowaniu mierzonego przedmiotu, i zastąpiła klasyczne, czasochłonne metody pomiarowe. Pomiary są wykonywane w cyklu automatycznym, co zapewnia zminimalizowanie wpływu błędów wywołanych czynnikiem ludzkim.

Obszar zastosowania klasycznych współrzędnościowych maszyn pomiarowych, które mają trzy osie, jest ograniczony. Dzięki doposażeniu tych maszyn w obrotowy stół pomiarowy, czyli czwartą indeksowaną oś, można łatwiej i szybciej mierzyć przedmioty mające oś obrotu, takie jak: koła zębate, pierścienie łożyskowe czy turbiny, a zwłaszcza frezy ślimakowe (ich pomiar bez użycia obrotowego stołu pomiarowego jest niemożliwy). Obrotowe stoły pomiarowe pozwalają na zastosowanie trzpieni pomiarowych o prostszej konfiguracji i umożliwiają pomiar większości elementów mierzonego przedmiotu za pomocą pojedynczego trzpienia pracującego w osi Z. Takie stoły zapewniają optymalne pozycjonowanie mierzonej części w stosunku do końcówki trzpienia pomiarowego i tym samym skracają przejazdy lub całkowicie je eliminują [1–3].

Założenia projektu

Producenci maszyn współrzędnościowych oferują stoły obrotowe, jednak zazwyczaj są one drogie i mogą być stosowane tylko w wybranych maszynach.

Podstawowym celem autorów była analiza konstrukcji uniwersalnego, czyli praktycznie autonomicznego stołu obrotowego, który można zastosować w dowolnej maszynie pomiarowej lub urządzeniu pomiarowym. Stół powinien się charakteryzować: bezpośrednim układem napędowym, obrotowym inkrementalnym układem pomiarowym, łożyskowaniem aerostatycznym oraz – ze względu na ograniczenia zakresu pomiarowego – jak najniższą obudową i małą masą. Odpowiednim zakresem temperatury jego pracy jest 20÷21°C. Układ sterowania obrotem oraz układ pomiarowy muszą być możliwe do zaimplementowania w różnych programach sterujących pracą współrzędnościowych maszyn pomiarowych, a dodatkowo powinny mieć możliwość pracy autonomicznej.

Konstrukcja uniwersalnego stołu obrotowego

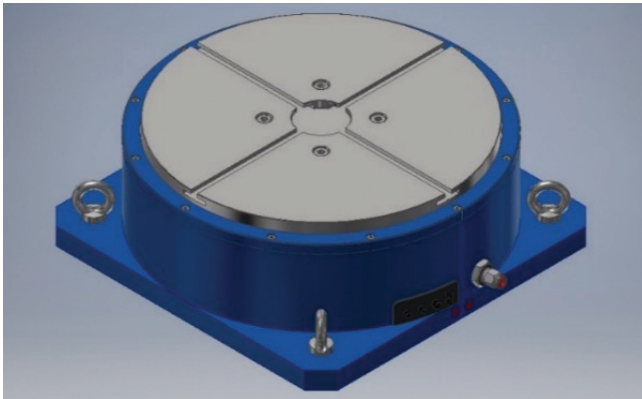
Analizę konstrukcyjno-wytrzymałościową przeprowadzono w programie Autodesk Inventor Professional 2018. Jest to typowy program CAD służący do tworzenia poszczególnych części jako modeli 3D, a następnie – do ich składania w jeden zespół z możliwością określenia zależności kinematycznych współpracujących części oraz przeprowadzenia analizy wytrzymałościowej zaprojektowanej konstrukcji metodą MES. Po analizie kompatybilności oraz analizach kinematyczno-wytrzymałościowych współpracujących elementów możliwe jest automatyczne wygenerowanie rysunków wykonawczych i złożeniowych oraz dokonywanie na bieżąco zmian konstrukcyjnych bez potrzeby budowania rzeczywistego modelu. Program Autodesk Inventor Professional 2018 pracuje w dowolnym systemie operacyjnym z rodziny Microsoft Windows [4].

Podstawowym elementem konstrukcji obrotowego stołu pomiarowego (rys. 1) jest tarcza, na której spoczywa mierzony element. Ma ona możliwość obrotu dzięki łożyskom. W układach pomiarowych stosuje się superprecyzyjne łożyska toczne lub – jeśli jest to możliwe – łożyskowanie aerostatyczne. W odróżnieniu od łożyska tocznego łożysko aerostatyczne nie zużywa się, a ponadto ma zdolność samooczyszczania, więc zapewnia długą i precyzyjną pracę.

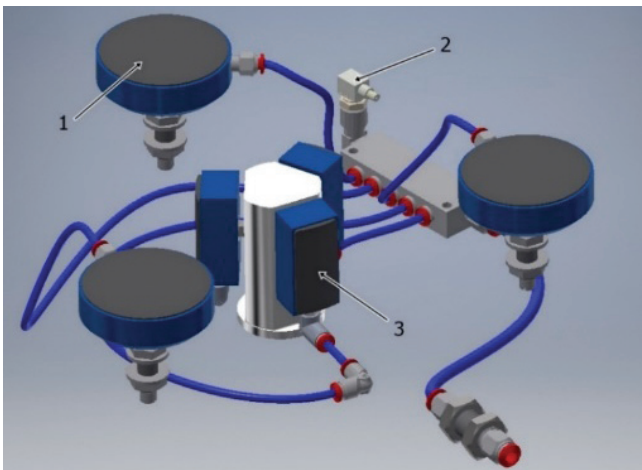
W konstrukcji stołu wykorzystano nowatorskie łożyska powietrzne (rys. 2) [5]. Łożyskowanie powietrzne opiera się na zjawisku powstawania pomiędzy elementem ruchomym przedmiotu a zespołem łożyska poduszki powietrznej, które jest wywołane strumieniem przepływającego sprężonego powietrza. W klasycznych łożyskach powietrze wydostaje się z pojedynczego otworu, z reguły umieszczonego na środku. To powoduje nierównomierne rozprowadzenie powietrza między łożyskiem a powierzchnią, po której się ono przesuwają. Z tego względu po przeprowadzeniu analizy zdecydowano się na zastosowanie łożysk wyposażonych w porowatą powierzchnię kontaktową, przez którą powietrze przechodzi równomiernie. W ten sposób osiągnięto najwyższą dokładność łożyskowania oraz dużą nośność układu [5].

* Inż. Krzysztof Zieliński, krzysiek.ziel@poczta.pl

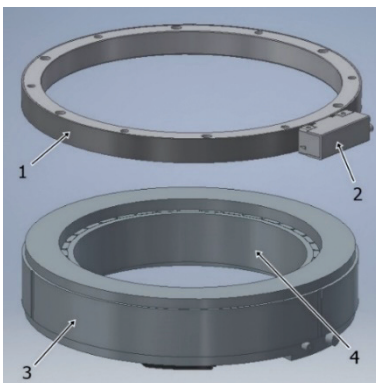
Dr inż. Andrzej Piotrowski, apiotr@itm.pcz.pl, <https://orcid.org/0000-0001-6382-200X> – Politechnika Częstochowska, Częstochowa, Polska



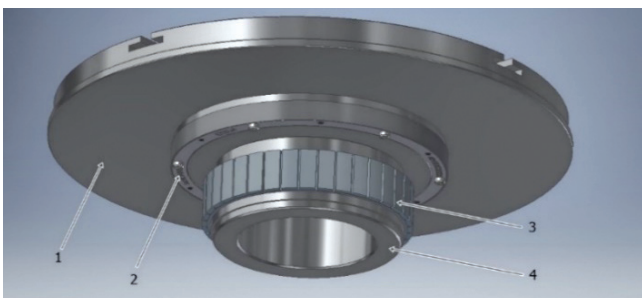
Rys. 1. Model 3D obrotowego stołu pomiarowego



Rys. 2. Model 3D układu łożyskowania z podłączeniem układu pneumatycznego: 1 – łożysko osiowe, 2 – czujnik ciśnienia powietrza, 3 – łożysko promieniowe



Rys. 3. Model 3D układu napędowego i pomiarowego: 1 – pierścień pomiarowy, 2 – głowica odczytująca, 3 – stator silnika elektrycznego, 4 – rotor silnika elektrycznego



Rys. 4. Złożenie modeli 3D z tarczą stołu: 1 – tarcza stołu, 2 – pierścień pomiarowy, 3 – rotor silnika elektrycznego, 4 – tuleja środkowa

Stół jest wyposażony w trzy płaskie łożyska powietrzne o średnicy 65 mm, unoszące tarczę stołu pomiarowego, oraz w trzy promieniowe łożyska powietrzne o profilu wypukłym i wymiarach 25 × 50 mm, utrzymujące elementy ruchowe w odpowiednim położeniu osiowym (rys. 2).

W celu zabezpieczenia łożysk oraz powierzchni, które z nimi współpracują, dobrano kompaktowy czujnik ciśnienia powietrza, monitorujący zakres ciśnienia pracy. Łożyska zostały podłączone do układu pneumatycznego za pomocą kompaktowych złączek wtykowych oraz elastycznych węży pneumatycznych (rys. 2).

Stół pomiarowy jest wyposażony w inkrementalny magnetyczny enkoder pierścieniowy z głowicą odczytującą LM13 firmy Renishaw, odmierzającą kąt obrotu stołu (rys. 3). Układ pomiarowy jest zamocowany bezpośrednio do tarczy stołu pomiarowego i zapewnia precyzję odczytu wynoszącą 0,006 mm przy szczeliny 0,6 mm między pierścieniem pomiarowym a głowicą odczytującą. Układ charakteryzuje się bardzo wysoką rozdzielczością pomiarową, wynoszącą 0,000244 mm, a także odpornością na zabrudzenia i niezawodnością – dzięki bezdotykowej pracy [6].

W celu wyeliminowania luzów charakterystycznych dla klasycznych przekładni zębatych w badanej konstrukcji wykorzystano bezpośredni układ przeniesienia napędu (rys. 3) [7]. Zastosowany silnik momentowy charakteryzuje się wysoką precyzją pozycjonowania, wynoszącą kilka sekund kątowych (dokładność pozycjonowania jest zależna od dokładności zastosowanego układu pomiarowego), oraz dużą sztywnością. Nie wymaga on konserwacji i ma kompaktową budowę, co pozwala na ograniczenie całkowitej wysokości stołu. Silnik jest wyposażony w czujnik Halla (umieszczony na statorze), który służy do określania położenia rotora, aby zwiększyć precyzję pozycjonowania. Moment obrotowy silnika wynosi 15,7 Nm (moment ciągły) i jest dostępny od najmniejszych wartości prędkości obrotowej, co zapewnia odpowiednie położenie kątowe zespołów ruchomych zaprojektowanego stołu [7, 8].

Zaprojektowany układ (rys. 4) nie ma żadnych mechanicznych połączeń z pozostałymi częściami stołu pomiarowego, co decyduje o długiej i bezawaryjnej eksploatacji urządzenia. Tarcza stołu, która jest bezpośrednio łożyskowana aerostatycznie, ma nośność ok. 188 kg, a układ pomiarowy przymocowany do tarczy zapewnia najwyższą dokładność pomiarową (patrz tablica). Napęd bezpośredni gwarantuje dokładność i powtarzalność pozycjonowania.

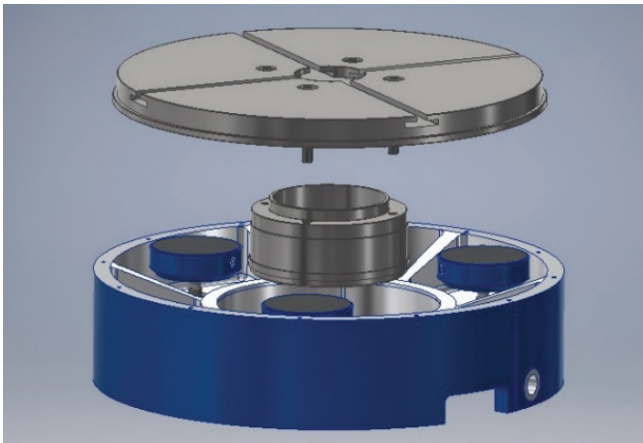
TABLICA. Parametry techniczne stołu obrotowego

Masa	ok. 26 kg
Nośność	ok. 188 kg
Wysokość	120 mm
Średnica talerza pomiarowego	∅300 mm
Średnica otworu centrującego	∅50 mm
Sposób łożyskowania	łożyskowanie aerostatyczne
Układ pomiarowy	bezpośredni, inkrementalny
Przeniesienie napędu	bezpośrednie
Maksymalny/ciągły moment obrotowy	35,4/15,7 Nm

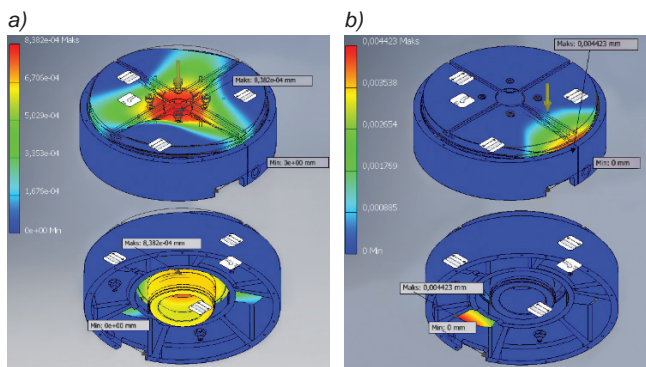
Analiza konstrukcji

Analizie MES poddano opracowany model 3D obrotowego stołu pomiarowego z narzuconymi zależnościami kinematycznymi i ze zdefiniowanymi materiałami: stalą AISI 440C (stół) oraz aluminium PA 45 (korpus) (rys. 5). Założono, że obciążenie konstrukcji, będące odpowiednikiem punktowego nacisku rozłożonego na powierzchni 4535 mm² (∅100 mm) oraz 640 mm² (∅60 mm) (uwzględniono otwór centralny, fazy i rowki teowe) i równego maksymalnemu naciskowi wywieranemu przez mierzony detal

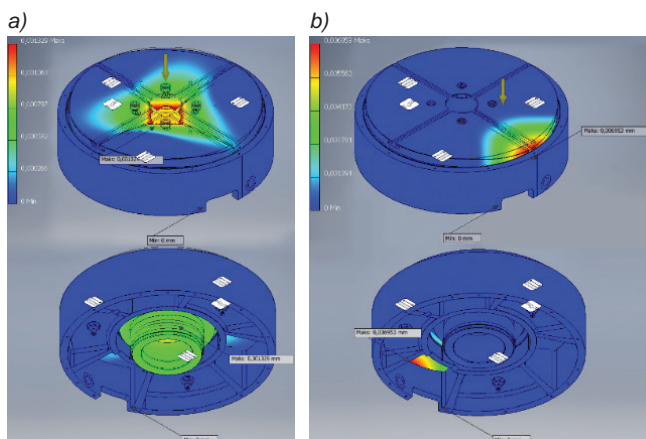
(188 kg), zostanie przyłożone w osi obrotu stołu i w odległości 100 mm od osi obrotu, czyli w najbardziej niewalcznym miejscu (rowek teowy, brak podpory w miejscu maksymalnego obciążenia), aby zasymulować nierównomierne obciążenie stołu (rys. 6 i 7). Model uproszczono i analizowano kluczowe elementy nośne stołu pomiarowego (bez uwzględniania części niemających wpływu na nośność), co ułatwiło interpretację wyników.



Rys. 5. Złożenie kluczowych elementów nośnych do analizy MES



Rys. 6. Rozkład przemieszczeń przy maksymalnej nośności stołu ($\varnothing 100$ mm): a) przemieszczenie układu przy obciążeniu znajdującym się w osi obrotu, b) przemieszczenie układu przy obciążeniu znajdującym się 100 mm od osi obrotu



Rys. 7. Rozkład przemieszczeń przy maksymalnej nośności stołu ($\varnothing 60$ mm): a) przemieszczenie układu przy obciążeniu znajdującym się w osi obrotu, b) przemieszczenie układu przy obciążeniu znajdującym się 100 mm od osi obrotu

Weryfikację warunków początkowych przeprowadzono przy założeniu, że obciążenie stołu pomiarowego jest maksymalne – równe maksymalnej nośności łożysk osiowych, przy czym uwzględniono masę złożonych elementów z tarczą stołu, czyli nacisk siłą 1850 N. Poważnym

problemem jest to, że w przypadku łożysk aerostatycznych stół wraz z mierzonym przedmiotem unosi się i jest podtrzymywany na wysokości 0,005 mm (przy maksymalnej nośności nominalnej) jedynie siłą wytworzonej poduszki powietrznej [5].

Z przeprowadzonych analiz wynika, że elementem, który najbardziej ulega odkształceniom, jest tarcza stołu. Otrzymane wielkości przemieszczeń (odkształceń), wynoszące maksymalnie 0,004 mm (w przypadku detalu o średnicy $\varnothing 100$ mm) i 0,006 mm (w przypadku detalu o średnicy $\varnothing 60$ mm) dla nieosiowego zamocowania przedmiotu, są małe i możliwe do pominięcia przy budowie lokalnego układu współrzędnych. Zalecane jest jednak równomierne obciążenie stołu i mocowanie detalu w osi obrotu stołu. Rozkłady przemieszczeń w korpusie (rys. 6 i 7) nie są widoczne ze względu na bardzo małe wartości w porównaniu z przemieszczeniami występującymi w tarczy stołu.

Można stwierdzić, że zaprojektowany stół pomiarowy będzie się charakteryzował nośnością równą maksymalnej nośności łożysk osiowych, pomniejszoną o wpływ masy elementów ruchomych (tarczy stołu, tulei środkowej, rotora silnika itp.), wynoszącej ok. 188 kg. Innymi słowy, założona wstępnie nośność stołu pomiarowego nie będzie ograniczona przez wytrzymałość elementów nośnych.

Podsumowanie

Posługując się programem Autodesk Inventor Professional 2018 [4], zaprojektowano nowatorski, autonomiczny stół obrotowy dla współrzędnościowych maszyn pomiarowych. Stół pomiarowy jest urządzeniem przenośnym, które można zamocować na dowolnej maszynie pomiarowej. Jego dodatkową zaletą jest mała wysokość (120 mm), tylko w niewielkim stopniu ograniczająca przestrzeń pomiarową w osi Z. Prezentowana konstrukcja charakteryzuje się niską masą, wynoszącą ok. 26 kg. Jej osiągnięcie było możliwe dzięki zoptymalizowaniu wymiarów i starannemu dobraniu materiałów na poszczególne elementy konstrukcyjne stołu. W trakcie projektowania stołu wielokrotnie przeprowadzono analizy MES, których wyniki były podstawą do zmiany kształtu i wymiarów elementów konstrukcyjnych. Ponadto potwierdzano prawidłowość założeń oraz określano maksymalną masę mierzonych elementów i wpływ położenia detalu na dokładność wykonywanych pomiarów. W kolejnych krokach optymalizowano konstrukcję stołu. Ostateczne wyniki obliczeń jednoznacznie potwierdziły prawidłowość założeń konstrukcyjnych. Wytrzymałość konstrukcji nośnej jest zgodna z założoną nośnością 188 kg, a wszystkie odkształcenia mieszczą się w zakresie odkształceń sprężystych (rys. 6 i 7) i wynoszą maksymalnie 0,006 mm.

LITERATURA

- [1] Jakubiec W., Malinowski J. „Metrologia wielkości geometrycznych”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1993.
- [2] Ratajczyk E., Woźniak A. „Współrzędnościowe systemy pomiarowe”. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2016.
- [3] <https://www.zeiss.pl/metrologia/produkty/systemy/portallowe-maszyny-pomiarowe/prismo.html> (03.2019).
- [4] <https://www.autodesk.pl> (03.2019).
- [5] <https://www.newwayairbearings.com> (03.2019).
- [6] <https://www.rls.si/en/lm13-magnetic-ring-encoder-system> (03.2019).
- [7] <https://www.tecnotion.com> (03.2019).
- [8] https://automatykab2b.pl/produkty/technika-napedowa/silniki-elektryczne/8089-tecnotion-Silniki_Momentowe_QTR_FirmyTecnotion (03.2019).