

ВЛИЯНИЕ НА ТЕХНОЛОГИЧНИТЕ НЕТОЧНОСТИ ВЪРХУ ХАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА ГОНИОМЕТРИЧЕН ЕЛАСТИЧЕН МОДУЛ

Добри Комарски

Технически Университет София, България, dkomarski@tu-sofia.bg

IMPACT OF THE TECHNOLOGICAL ERRORS ON THE CHARACTERISTICS OF GONIOMETRIC ELASTIC MODULE

Dobri Komarski

Technical University of Sofia, Bulgaria, dkomarski@tu-sofia.bg

Abstract

Orientation of different elements in the field of micro- and nano-technology with very high accuracy requirements is very demanding in high precision engineering. Specifically, an angular orientation in precision engineering finds application in different field, including optics, micro- and nanotechnology, semiconductor production where high accuracy and minimal deviation of the axis of rotation is required. As a solution to meet these requirements is the developed goniometric monolithic compliant module with elastic guides. During the production or assembly of such a module with multiple elastic guides, different error could occur that could have impact of the accuracy characteristic. Subject of this paper is a study of the impact of the manufacturing process on the operational characteristic of the developed module. The study is focused on different deviation on the dimensions of the elastic guides that could happened and their impact on the transfer curve and the deviation of the center of rotation.

Keywords: Rotation, accuracy, flexure, elasticity, goniometer.

ВЪВЕДЕНИЕ

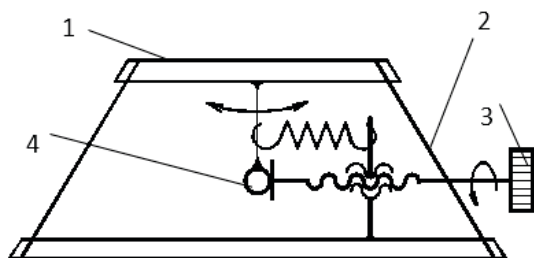
Ъглови ориентиращи и микро-позициониращите системи с еластични направляващи от монолитен тип са едни от предпочитаните в прецизната механична техника особено в случаите, където се изисква висока точност и минимално отклонение на оста на ротация, необслужваемост и работа в неблагоприятна/замърсена среда. Тези предимства са свързани с факта, че модула е монолитен, което практически означава, че няма сглобяеми елементи и няма триене между различните компоненти на системата, единственото триене е междумолекулно. В настоящият доклад са представени резултатите от изследването на влиянието на отклоненията по време на производство на еластичните направляващи на конструираният гониометричен ъглов микропозиционер, върху отклоне-

нието на моментният център на ротация по ос X и Y. Тези изследвания разглеждат част от основните експлоатационни и точностни характеристики и показват минимални отклонения в различните разгледани случаи, които могат да възникнат. Направляващите приемат различни стойности за техните размери като това показва разликата от евентуална грешка и как дизайна би се повлиял от евентуални отклонения на размерите по време на производство. Разгледано е и влиянието на широчината на технологичният канал направен по време на изработване на еластичните направляващи.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Реализацията на системата е направена на база на схемата показана на Фиг. 1 като се задвижва чрез микрометричен винт, с който се измерва и ъгловото за-

въртане. Движението от винта се предава чрез коляно мотовилков механизъм и еластични направляващи към основата, която се измества ъглово.



1 – подвижна платформа 3 – задвижващ механизъм

Фиг. 1. Гониометричен позиционер с еластични шарнири

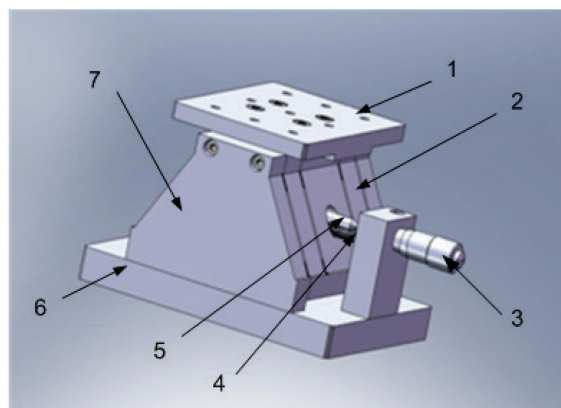
В конкретният случай еластичните направляващи са най-подходящи тъй като:

- Практически няма триене, единственото триене е междумолекулното. Това осигурява висока точност, намалява хистерезиса.
- При липсата на триене няма износване на материала това увеличава експлоатационните възможности на уреда като увеличава живота му и намалява възникващите грешки от дълготрайната употреба и износване.
- Имат висока устойчивост на натоварвания, поради което са предпочитани при компактните изделия, защото малкият размер лимитира възможностите за поемане на възникващите сили.
- Поради отсъствие на смазочни материали и малки хлабини могат да работят в замърсени помещения.
- Няма ограничения спрямо скорост и честота. Границите на движение зависят от задвижващия механизъм.

Основният им недостатък е, че имат малък обхват на работа, което ограничава тяхното използване.

Разработената конструкция може да се види на Фиг. 2. Принципът на работа на гониометричния модул е следния: ъгловото завъртане се осъществява като

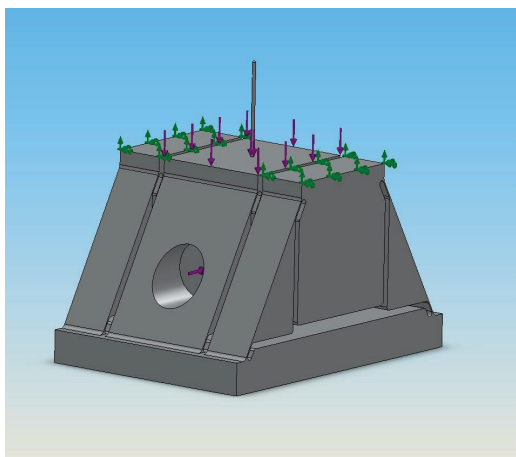
реализираното преместване от микрометричния винт 3 се предава до сдвоен еластичен модул 2 посредством прът 5 с конусни върхове в двата края. Пружина 4 осъществява обратната връзка. Еластичният модул е закрепен за основата 6 посредством опорите 7. Плочата 1 е закрепена за еластичния модул, който се накланя под определен ъгъл в зависимост от подаването. Тя служи за осигуряване на по-голяма работна площ, както и за закрепване на елементи върху нея, затова за по-голямо удобство са предвидени резбови отвори, посредством които се закрепват позиционираните или измервани обекти. Прътът 5 е с конусни върхове, за да може конструкцията да е кинематично определена.



Фиг. 2. Модул за ъглова ориентация с еластични направляващи

Схема на симулационния анализ

Схемата е направена така, че да репрезентира реалното фиксиране и натоварване на проектирания гониометричен модул, което доближава симулацията максимално до реалното поведение на системата при приложението ѝ. Натоварването е в точката, където микрометричния винт упражнява натиск върху еластичната част на системата, а фиксирането е осъществено в основата. Така направена постановката е точно копие на режима на работа на гониометричния модул в реални условия. Схемата на изследването е показана на Фиг.3.

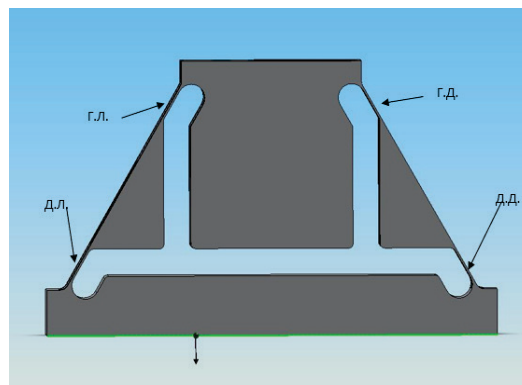


Фиг. 3. Схема на симулационен анализ

При симулацията на работа на конструкциите е предвидено влиянието на различни фактори, като най-важни и директно влияещи на предавателната функция и точностните параметри са: положението на прилаганата сила, товарносимост, дебелината, формата и ъгълът на еластичните елементи, затова и тези параметри са взети в предвид за анализа на гониометричния модул. В настоящото изследване фокуса е върху дебелината на направляващите и влиянието на отклоненията по време на производството им.

Влияние на дебелините на еластичните направляващи върху точностните характеристики на еластичният модул

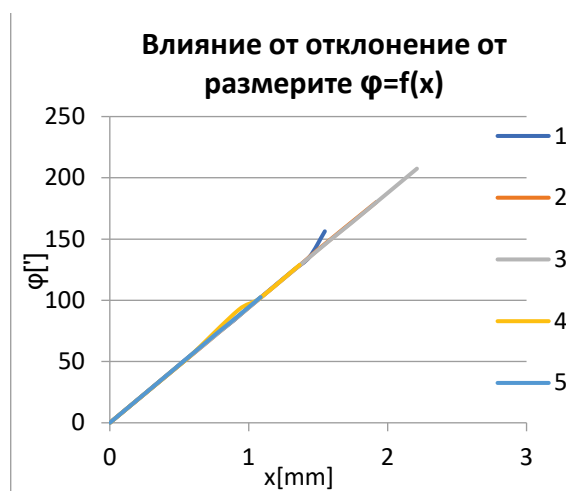
При проектирането на модула основен параметър освен вида е и размерът на еластичните направляващи. При избора на дебелината са съобразени редица фактори (товарносимост, гъвкавост, материал, др.), но освен теоретичното изчисляване на направляващите има фактори, които не могат да бъдат точно съобразени като например грешка от изработка (изрязване на направляващите). При изследването са предвидени различни варианти, които могат да възникнат при изработка като това са няколко стойности за дебелината, както и несиметричност на дебелините на направляващите, т.е. едната да е с една дебелина, а отсрещната с друга, при което се следи, в каква граница е асиметричността на накланяне на основата и как се променят точностните характеристики.



Фиг. 4. Схема на еластичните направляващи

Направляващите са разделени на четири вида - долна лява за по кратко Д.Л., горна лява (Г.Л.), долна дясна (Д.Д.) и горна дясна (Г.Д.) (фиг. 4), като дебелините се променят с -20% , -40% , $+20\%$, $+40\%$, за всяка поотделно, като по-долу в представените графики ясно се вижда коя направляваща с колко се променя. С φ е означен ъгълът на отклонение, с x преместването на микрометричния винт, а с C_y и C_x компонентата на центъра на ротация C по ос y и ос x . Работните характеристики, които се анализират са предавателната функция и отклонението на моментния център на ротация.

На графиката на Фиг. 5 са показани резултати от изследването в случай, че една направляваща е с променена дебелина спрямо останалите.

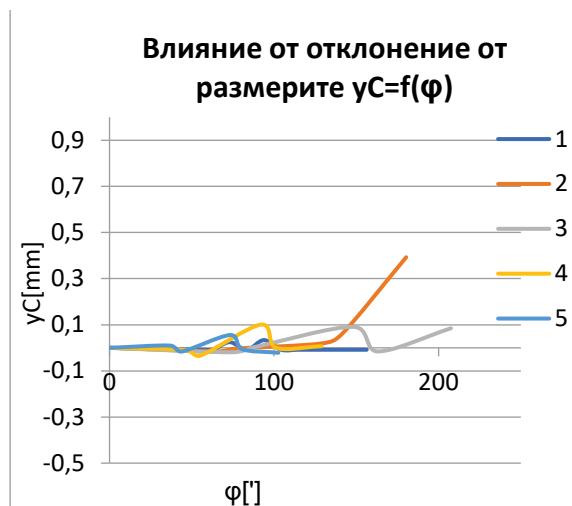


Фиг. 5. Предавателна функция в случай на промяна на дебелината на една от направляващите

1. Модул с номинални размери на еластичните направляващи

2. Модул с Г.Л. напр. с дебелина – 20 %
3. Модул с Г.Л. напр. с дебелина – 40 %
4. Модул с Г.Л. напр. с дебелина + 20 %
5. Модул с Г.Л. напр. с дебелина + 40 %

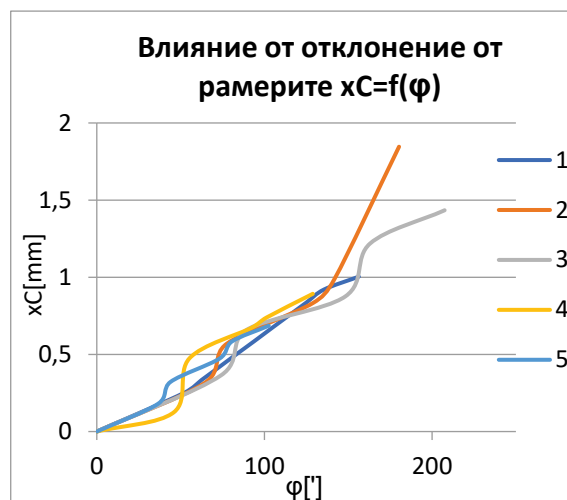
В този случай направляващата е горна лява, като дебелината се увеличава или намалява съответно с 20 % и 40 % от номиналната и величина в случаят 0,25 mm. Резултатите показват, че има промяна в максималният ъгъл на отклонение на платформата, т.е. на работният обхват, но предавателната функция остава с линеен характер. Ъгълът, на който се отклонява еластичният модул достига над 3° еднопосочно при случаят, когато еластичната направляваща е с най-малък размер (- 40 % от номиналната стойност). Това потвърждава правилото, че колкото отношението между дебелината и дължаната на направляващата е по-голямо, толкова по-голяма е еластичността, но това намалява нейната товароносимост, което също е основен параметър за този тип конструкции. Макар и за линейността на предавателната функция да няма отражение леката предизвикана несиметричност на конструкцията, то това може да окаже голямо влияние



Фиг.6. Отклонение на центъра на ротация по ос Y в случай на промяна на дебелината на една от направляващите

1. Модул с номинални размери на еластичните направляващи
2. Модул с Г.Л. напр. с дебелина - 20 %
3. Модул с Г.Л. напр. с дебелина - 40 %
4. Модул с Г.Л. напр. с дебелина + 20 %
5. Модул с Г.Л. напр. с дебелина + 40 %

относно положението на оста на ротация или по-точно нейното отклонение.

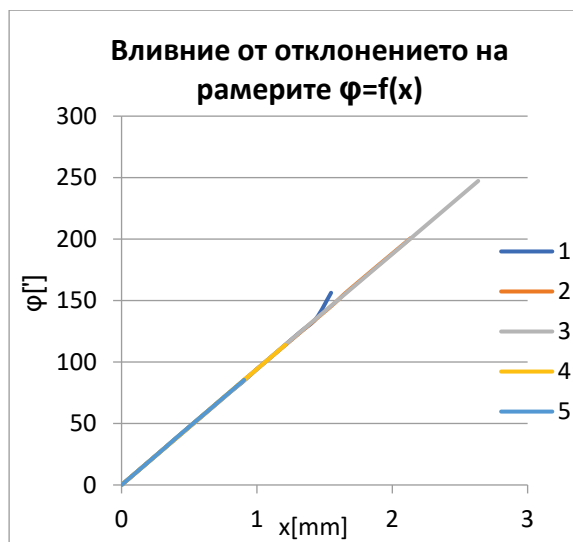


Фиг. 7. Отклонение на центъра на ротация по ос X в случай на промяна на дебелината на една от направляващите

1. Модул с номинални размери на еластичните направляващи
2. Модул с Г.Л. напр. с дебелина -20%
3. Модул с Г.Л. напр. с дебелина -40%
4. Модул с Г.Л. напр. с дебелина +20%
5. Модул с Г.Л. напр. с дебелина +40%

Фигури 6 и 7 показват графики с резултатите от изследването на отклоненията на центъра на ротация по ос X и Y.

Резултатите показват, че няма съществена промяна в разгледаните случаи, където само една от направляващите променя дебелината си, като по ос Y отклоненията са в рамките на 0,3 mm, а по ос X отклоненията са до 1,7 mm. Разликата е съществена, когато се сравнят различните случаи с резултатите от изследването при номинални размери, където отклоненията са в рамките 0,015 mm по ос Y и приблизително 1 mm по ос X. Тази разлика се наблюдава при случаите, когато направляващата е по-тънка, понеже обхвата е повишен, което е очакван ефект.

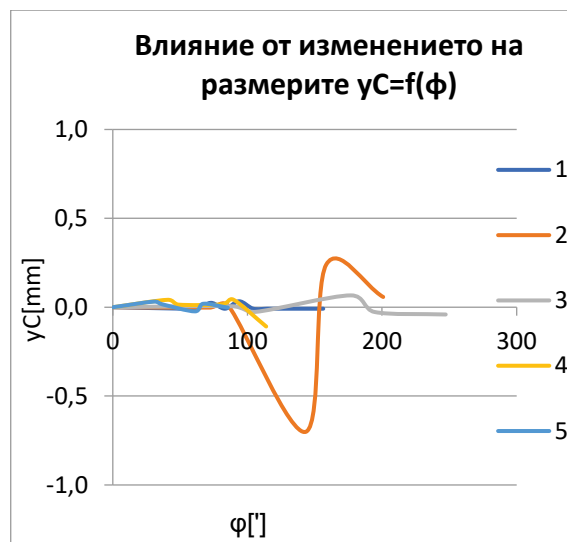


Фиг. 8. Предавателна функция в случай на промяна на дебелината на две от долните направляващите

1. Модул с номинални размери на еластичните направляващи
2. Модул с Д.Л. и Д.Д. напр. с дебелина -20%
3. Модул с Д.Л. и Д.Д. напр. с дебелина -40%
4. Модул с Д.Л. и Д.Д. напр. с дебелина +20%
5. Модул с Д.Л. и Д.Д. напр. с дебелина +40%

Направено е аналогично изследване, но в случай, когато две от направляващите променят размера си, което може да покаже поведението на еластичният модул, в случай на възникнала грешка в производството или изработка в гранични стойности на допуски. Двете направляващи се намират отдолу, т.е. влияят едностранно като се намират в долния край на модула.

На Фиг. 8 е показана графиката за предавателната функция получена от резултатите на изследването на поведението на еластичният модул при две направляващи с еднакви дебелини но различни от останалите.

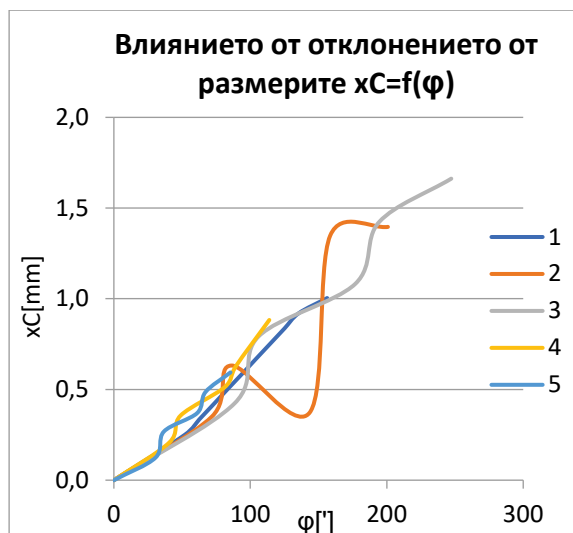


Фиг. 9. Отклонение на центъра на ротация по ос Y в случай на промяна на дебелината на две от долните направляващите

1. Модул с номинални размери на еластичните направляващи
2. Модул с Д.Л. и Д.Д. напр. с дебелина -20%
3. Модул с Д.Л. и Д.Д. напр. с дебелина -40%
4. Модул с Д.Л. и Д.Д. напр. с дебелина +20%
5. Модул с Д.Л. и Д.Д. напр. с дебелина +40%

Отново се вижда, че влияние има само при големината на ъгловото отклонение, т.е. обхвата, но функцията запазва линейният си характер, като в случая, където са най-тънки направляващите (+ 40 %) обхвата е най-голям и достига 4° едноросочно. Разбира се отново, когато направляващите са по-тънки се прави компромис с товароносимостта.

При разглеждане на резултатите от изследване на отклонението на моментния център на ротация показани на Фиг. 9 и 10 съответно по ос Y и X отново се вижда, че съществена разлика няма. Разликата, която се наблюдава е, че при повишения обхват се повишава и отклонението на центъра на ротация, като по ос X достига 1.7 mm, а по ос Y – 0.3 mm.

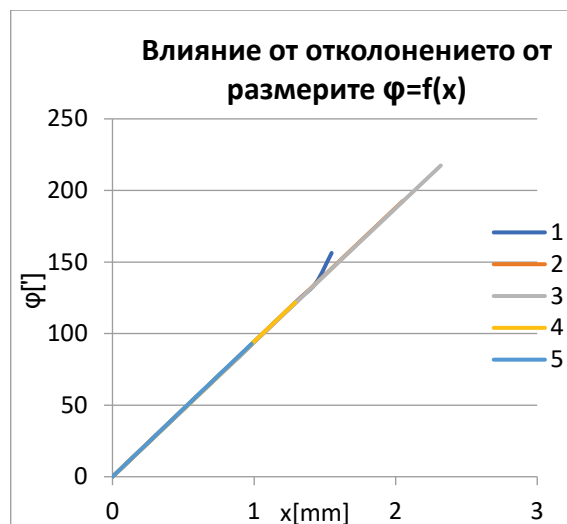


Фиг. 10. Отклонение на центъра на ротация по ос X в случай на промяна на дебелината на две от долните направляващите

1. Модул с номинални размери на еластичните направляващи
2. Модул с Д.Л. и Д.Д. напр. с дебелина - 20%
3. Модул с Д.Л. и Д.Д. напр. с дебелина - 40%
4. Модул с Д.Л. и Д.Д. напр. с дебелина + 20%
5. Модул с Д.Л. и Д.Д. напр. с дебелина + 40%

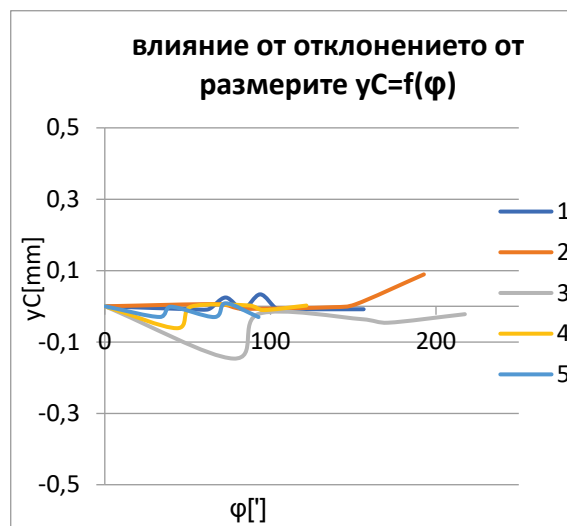
Сравнено с резултатите, когато само една от направляващите е с различен размер, показва, че отклонението на центъра на ротация се запазва в сравнително същите граници, т.е. няма съществено влошаване на точността, ако две от направляващите са с различни размери.

Разгледан е случай, в който две противоположни направляващи, разположени диагонално една на друга са с различни размери, т.е. евентуално най-лошият случай, който може да има при производство на еластичният модул. На Фиг. 11 може да се видят резултатите от това изследване за предавателната функция на модула. Тук отново се вижда, че се променя единствено работният обхват, а функцията запазва линейния си характер. Ъгълът на отклонение на



Фиг. 11. Предавателна функция в случай на промяна на дебелината на две от направляващите – горна лява и долна лява

1. Модул с номинални размери на еластичните направляващи
2. Модул с Г.Л. и Д.Л. напр. с дебелина - 20%
3. Модул с Г.Л. и Д.Л. напр. с дебелина - 40%
4. Модул с Г.Л. и Д.Л. напр. с дебелина + 20%
5. Модул с Г.Л. и Д.Л. напр. с дебелина + 40%



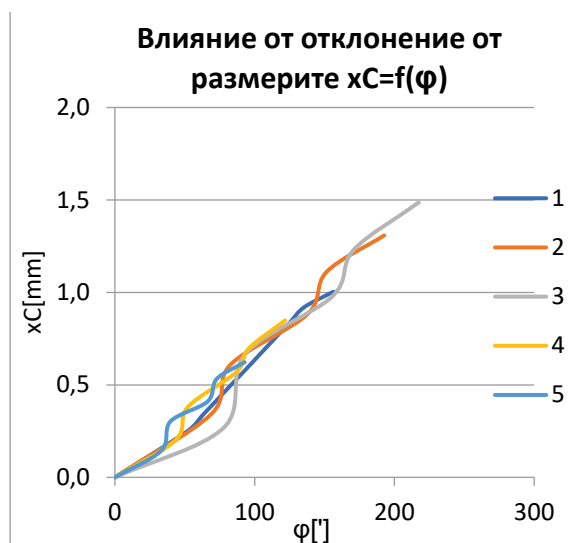
Фиг. 12. Отклонение на центъра на ротация по ос Y в случай на промяна на дебелината на две леви направляващи

1. Модул с номинални размери на еластичните направляващи
2. Модул с Г.Л. и Д.Л. напр. с дебелина - 20%

3. Модул с Г.Л. и Д.Л. напр. с дебелина - 40%
4. Модул с Г.Л. и Д.Л. напр. с дебелина +20%
5. Модул с Г.Л. и Д.Л. напр. с дебелина +40%

еластичният модул достига приблизително 4°, което е съпоставимо с предишното изследване, което е съпоставимо с предишното изследване, където също две от направляващите бяха с различни размери, т.е. когато имаме две направляващи с различни размери няма значение за линейността на предавателната функция и работният обхват, тяхното местоположение.

На фигури 12 и 13 са представени графиките от резултатите на изследването на отклонението на центъра на ротация по ос Y и X респективно. Направеният анализ показва, че няма съществена разлика, ако се сравнят резултатите с тези при по-горните изследвания и максималното отклонение по X е 1.5 mm, а по ос Y е 0.15 mm.



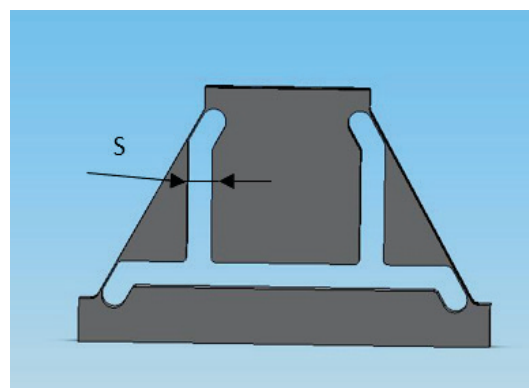
Фиг. 13. Отклонение на центъра на ротация по ос X в случай на промяна на дебелината на две леви направляващи

1. Модул с номинални размери на еластичните направляващи
2. Модул с Г.Л. и Д.Л. напр. с дебелина - 20%
3. Модул с Г.Л. и Д.Л. напр. с дебелина - 40%
4. Модул с Г.Л. и Д.Л. напр. с дебелина +20%
5. Модул с Г.Л. и Д.Л. напр. с дебелина +40%

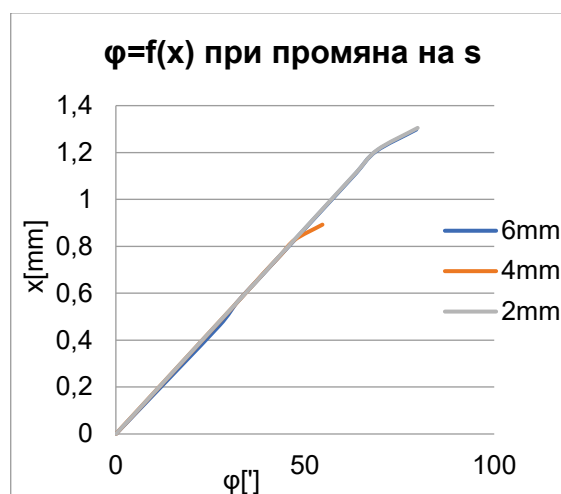
Имат влияние само ако са с различна дебелина, защото се получава асиметричност и различно накланяне на основата дори само в неутрално положение с товар.

Влияние на широчината на технологичните канали [s] върху точностните характеристики

При изработката на еластичните елементи трябва да се направят канали за да се оформят еластичните направляващи. Технологично могат да са направени от фреза или на ерозионна машина. В това изследване са взети в предвид различни дебелини на прорезите от 2 mm до 6 mm (Фиг.14), за да може дизайнът да направен така, че да се изработи и на ерозионна машина и на фреза и да се намали цената за изработка.

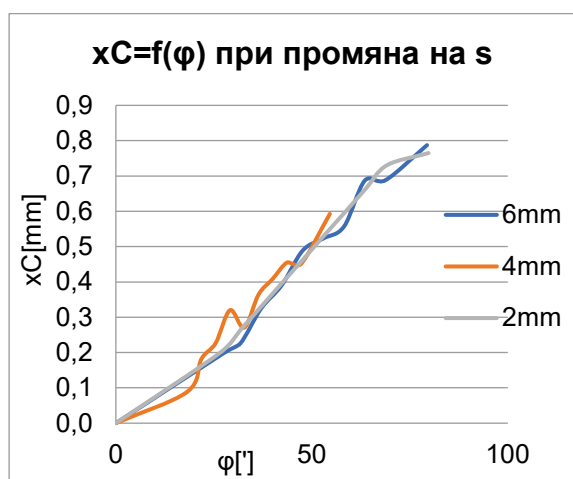


Фиг. 14. Технологични изрязани канали с широчина S

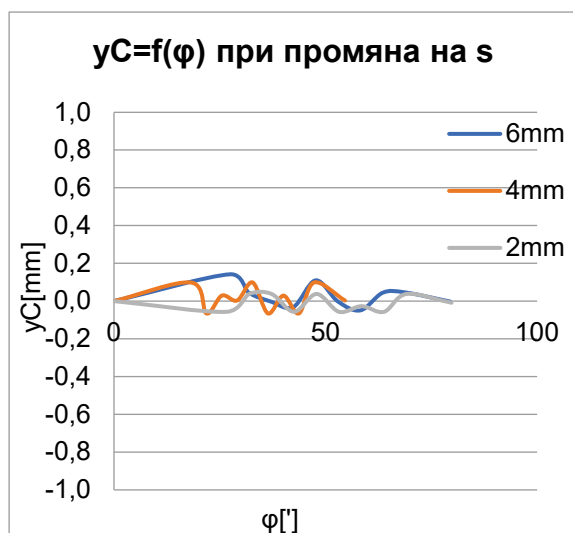


Фиг. 15. Предавателна функция в случай на промяна на широчините на технологичните канали – 2mm, 4mm, 6mm

На Фиг. 15 може да се видят резултатите от изследването на предавателната функция при трите разгледани случая – канали с 2, 4 и 6 mm широчина. Максималния ъгъл на отклонение е 1.5° и при трите случая, а линейността на функцията се запазва и при трите варианта, от което може да се заключи, че широчината на каналите нямат отношение към предавателната функция.



Фиг. 16. Отклонение на центъра на ротация по ос X в случай на промяна на широчините на технологичните канали – 2 mm, 4 mm, 6 mm



Фиг. 17. Отклонение на центъра на ротация по ос Y в случай на промяна на широчините на технологичните канали – 2 mm, 4 mm, 6 mm

Максималните отклонения на моментния център на ротация по ос X е 0.8 mm, а по ос Y е 0.15 mm.

При изменението на центъра на ротация по X и по Y показани на фигури 16 и 17, не се наблюдава никакво изменение при различните широчини на каналите т.е. няма никакво значение за точностните характеристики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От направените симулационни изследвания може да се направят следните заключения:

- При намаляване дебелината на направляващите се увеличава еластичността, което води до постигане на по-голямо ъглово завъртане с по-малко натоварване, но се увеличава грешката пропорционално на увеличаването на ъгъла. Също така се увеличава и грешката възникваща при сложен товар върху конструкцията.

- Когато срещуположни направляващи са с различна дебелина се получава асиметричност на накланяне на масата т.е. единият край се отклонява повече от другия. Това води до промяна положението на оста на ротация при измерване, както и когато е натоварена с товар направляващите се деформират по различен начин и основата се накланя.

- Предавателната функция не се влияе при разгледаните случаи на направляващи с отклонения в размерите и запазва относително линейният си характер.

- Изборът на широчина на каналите, няма отношение към точностните характеристики на модула. От значение са вида, формата и размерите на еластичните направляващи, които трябва да се изработят. От избраната широчина на каналите зависи технологията за изработка.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ashby MF. Materials selection in mechanical design. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann; 1999.

- [2] Diakov D., Komarski D., Micro-positioning Module for Angular Orientation Position of the Axis of Rotation Analysis, (2021) 31st International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance, MMA 2021, DOI: 10.1109/MMA52675.2021.9610873
- [3] Georgiev, B., Karadzhov, T. Investigating the Repeatability of 3D Printers Using a Multi-Sensor Measurement System (2024) Vide. Tehnologija. Resursi - Environment, Technology, Resources, 3, pp. 65-69. DOI: 10.17770/etr2024vol3.8114
- [4] Dichev, D., I. Zhelezarov, N. Madzharov. System for Measuring the Attitude of Moving Objects, using a Kalman Filter and MEMS Sensors. Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences, volume 72, issue 11, pp. 1527-1536, 2019. DOI: 10.7546/CRABS.2019.11.10
- [5] Dichev, D., Koev, H., Bakalova, T., Louda, P. A Measuring Method for Gyro-Free Determination of the Parameters of Moving Objects. Metrology and Measurement Systems. Volume 23, Issue 1, 2016, pp. 107-118. DOI 10.1515/mms-2016-0001
- [6] Dyakov D., I. Kalimanova, Opredelyane polozhenie na osta na rotatsiya na goniometrichni pozitsioneri, Sbornik dokladi ot 1-va konferentsiya s mezhd. uchastie "Mashinoznanie i mashinni elementi", Sofiya, 4-6 Noemvri 2004
- [7] Hui Tang, Yangmin Li and Jiming Huang, Design and analysis of a dual-mode driven parallel XY micromanipulator for micro/nanomanipulations, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science 1989-1996 (vols 203-210) 226(12):3043-3057, DOI:10.1177/0954406212442272
- [8] ISO 230-7:2015 Test Code For Machine Tools. Geometric Accuracy Of Axes Of Rotation
- [9] Kim, Yong-Sik & Shi, Hongliang & Dagalakis, Nicholas & Gupta, Satyandra. (2016). Design of a MEMS-based motion stage based on a lever mechanism for generating large displacements and forces. Journal of Micromechanics and Microengineering. 26. 095008. 10.1088/0960-1317/26/9/095008
- [10] Michael F. Ashby - Materials Selection In Mechanical Design 4Ed, Butterworth-Heinemann 2010, ISBN-13 978-9380931722
- [11] Qian LU, Optimization Design of Flexible Micro-Displacement Amplification Mechanism Based on Parameters, School of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng City, Jiangsu Province 224051, P.R. China, <https://doi.org/10.6180/jase.2015.18.4.05>
- [12] Slocum A. Precision Machine Design. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall; 1992. ISBN: 978-0872634923
- [13] Vasilev V., Nikolova H., Programno osiguravane na sistemi za izmervane na otkloneniyata na formata i razpolozhenieto na povurkhninite i osite na detaile, Sofiya, Softtreid, 2020, ISBN 978-954-334-231-0
- [14] Xu Pei1, Jingjun Yu, Guanghua Zong, Shusheng Bi, A Family of Butterfly Flexural Joints: Q-LITF Pivots, School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, R.P. China, DOI:10.1115/DETC2011-48394
- [15] Zentner L, Linß S. Compliant Systems – Mechanics of Elastically Deformable Mechanisms, Actuators and Sensors. München: De Gruyter Oldenbourg; 2019, 166 p., ASIN: B06Y6FNSXB
- [16] Georgiev, B., Karadzhov, T., "Comparative Analysis of Geometric Deviations in Contact Measuring Instruments for Control and Laser Contactless Scanning", In ENVIRONMENT. TECHNOLOGIES. RESOURCES. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, volume 3, 2023, June, pp. 306-310. DOI: 10.17770/etr2023vol3.7182.
- [16] Tsenkov T, Gerchev A. Concomitance of Rotator Cuff Disease in Symptomatic Anterior Shoulder Instability. J of IMAB. 2022 Jul-Sep;28(3):4517-4520. DOI: 10.5272/jimab.2022283.4517
- [17] D. Dichev et al., Mathematical Model for Increasing Accuracy when Measuring Linear Quantities in Conditions of External Mechanical Impacts, 2023 XXXIII International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA), Sozopol, Bulgaria, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/MMA59144.2023.10317908.
- [18] Dichev, Dimitar & Diakov, Dimitar & Dicheva, Ralitza. (2022). Method for increasing the accuracy of linear measurements based on a measurement-computational approach. AIP Conference Proceedings. 2505. 120008. 10.1063/5.0101084