

## Експериментално установяване на статичната грешка на следящи преводи с индиректна обратна връзка при равнинно позициониране

Димитър Димитров

*Experimental determination of the error of drive with indirect feedback with plane positioning: Positioning errors of the spindle of CNC machines influences the accuracy of processing and the accuracy of coordinate measurements. Theoretical and experimental error was investigated at one-dimensional and two-dimensional positioning of the machining center.*

**Key words:** accuracy of positioning, coordinate measurements.

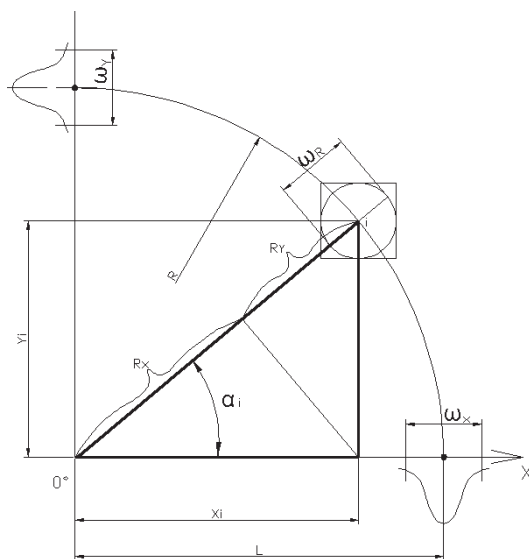
### ВЪВЕДЕНИЕ

Геометричната точност (ГТ) на металорежещите машини (ММ), включително и на тези с цифрово програмно управление (ЦПУ) включва показатели, от чиито значения зависи способността на машината да осигурява определена точност при обработване. Съгласно БДС е въведен пакет от норми, с който тя може да се проверява и оценява. Изисква се данните за ГТ да се вписват от производителя на ММ в придружаващия паспорт към всяка машина. Един характерен елемент от нормите за геометрична точност на ММ с ЦПУ е точността на позициониране на подавателните им преводи [7]. Важна компонента на тази оценка поради своя характер на проявление е т.нар. случайна грешка от позициониране (СГП). Понятието грешка на позициониране се описва с отклонението между програмираното и действителното положение (позиция) на супорта, когато той в покой. Грешката възниква поради невъзможността на подавателния превод да изпълни с абсолютна точност зададената команда за позициониране. Това се дължи основно на вибрациите и на променливите условия на триене при плъзгане или търкаляне и покой, които възникват в направляващите в граничните режими при преминаване през състояние на движение-покой-движение. Явлението е типично за подавателните преводи на ММ с ЦПУ с т.нар. индиректна обратна връзка, имащи конструкция с плъзгачи направляващи и се проявява в заключителния етап от изпълнението на команда за позициониране. В резултат изпълнителният елемент (супорта) на машината заема случайни положения, спрямо зададената позиция, в поле с нормален закон на разпределение. Случайната грешка от позициониране при начално размерно настройване [6,7], поднастройване на технологичната система [8] и при обработване на детайла оказва влияние на точността на получаваните размери на повърхнините, на тяхното взаимно разположение и форма. При осъществяване на контактно координатно измерване чрез инструмента върху ММ с ЦПУ [5] или с помощта на контактна трикоординатна измервателна глава в сумарната случайна грешка при измерване участва грешката при отчитане на позицията от следящия превод на машината [9,10,11]. Поради липса на данни за последната и затруднения тя да бъде установена, със запас от точност обикновено грешката при отчитане на позицията се заменя със СГП [9]. В резултат на експлоатацията на ММ СГП се изменя във времето. В такъв случай за големината ѝ не може да се разчита на паспортните данни на машината, а на актуално определяне чрез експериментално изследване. Установяването ѝ когато е само по една работна ос (линейна или ротационна) е регламентирано с БДС.

### ОПРЕДЕЛЯНЕ НА СЛУЧАЙНАТА ГРЕШКА ПРИ ПОЗИЦИОНИРАНЕ ПО ДВЕ РАБОТНИ ОСИ В РАВНИНАТА

Сумарната случайна грешка при едновременно позициониране по две оси в равнината е един реален пример за двумерно сумиране на две независими

случайни величини. Разработеният модел, теоретичното изследване, изведените зависимости и графичното представяне (фиг.1) на този случай са предствени в [4].



Фиг. 1. Модел на грешката при позициониране в равнината OXY [3]

При теоретичното изследване на примера се анализира получаването на размера L в равнината OXY по зависимостта [3]:

$$L = R \pm \frac{\omega}{2} \quad (1)$$

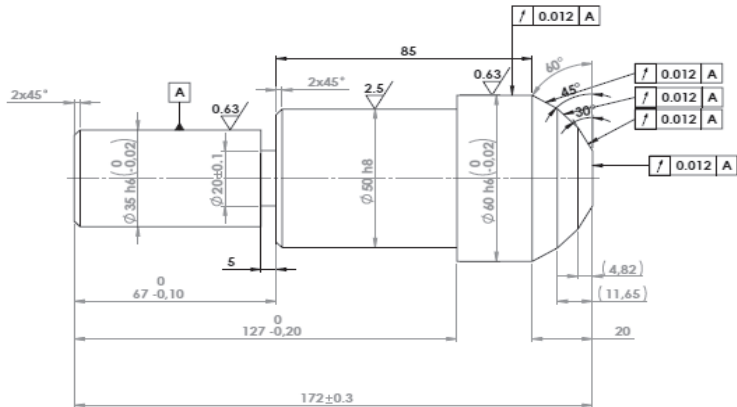
Размерът R се разглежда като затварящо звено на размерна верига с неупоредни съставни звена  $X_i$  и  $Y_i$ , с проекции  $R_x$  и  $R_y$ . Размерът R се получава с грешка  $\omega_R$ , звеното  $R_x$  се получава с грешка  $\omega_x$ , а звеното  $R_y$  с грешка  $\omega_y$ . Съгласно [2] "За размерни вериги с неупоредни звена полето на разсейване и допускът на затварящото звено се пресмятат по зависимост имаща следния окончателен вид [3]:

$$\omega_R = \sqrt{\cos^2 \alpha \cdot \omega_{X_i}^2 + \sin^2 \alpha \cdot \omega_{Y_i}^2} \quad (2)$$

### Експериментално изследване

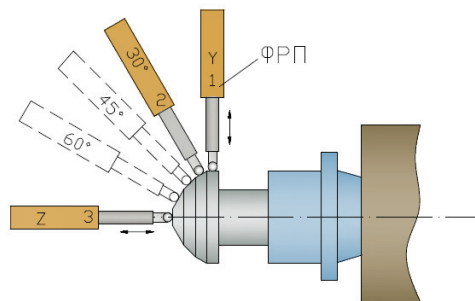
За проверка на теоретично изведените заключения е проведен експеримент. Задачата е да се провери чрез външни измервателни средства позиционирането на машината във всяка от трите ѝ работни равнини. В случая е избрано за всяка равнина да се реализира проверка по двете оси индивидуално и едновременно чрез позициониране под няколко определени ъгъла т.е. спрямо едната от осите проверките са при  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $90^\circ$ . Това става възможно благодарение на конструирания и изработен за целите на експеримента специален ротационен работен калибър (тестов образец). Ротационната форма е предпочетена поради технологичността ѝ при изработване, удобство за установяване и осъществяване на

измервания. Калибърът разполага с цилиндрична повърхнина (А) за установяване във вретеното на машината с помощта на инструментален държач и с пет контролни повърхнини (челна, три конусни и цилиндрична) за осъществяване на проверки в петте избрани направления. Работен чертеж е показан на фиг.2. Трябва да се има предвид, че целите на експеримента не изискват висока точност на размерите и разположението на повърхнините на калибъра. В случая най-важна е грапавостта.



Фиг.2. Работен калибър

Принципната схема на експерименталната установка е показана на фиг.3 в положение за измервания в равнината YZ. Специалният тестов образец е установен чрез подходящ инструментален държач (напр. цангов) във вретеното на машината (в случая MC032). Самото вретено е във фиксирано ъглово положение с помощта на тъй.нар. ориентиран стоп на вретеното. С ФРП 1, 2 и 3 са означени три броя фоторастерови линейни преобразуватели (ФРП) HEIDENHAIN с константа  $0,1 \mu\text{m}$ . ФРП-1 и ФРП-3 са с постоянно положение за измерване на отклоненията при позициониране съответно по ос Y и по ос Z. С ФРП-2 се измерват последователно отклоненията при позициониране под три различни ъгъла. Във всяка посока се изпълняват по 20 повторения като за всяко повторение се отчитат показанията от трите ФРП. Вместо с три броя ФРП експериментът би могъл да се осъществи и със само един, който да заема последователно всяко от положенията на фигурата.



Фиг.3. Измервателна схема за определяне на случайна грешка от позициониране в равнината

За статистическо обработване на резултатите се използват зависимостите, съгласно БДС [14], и [1,3,12,13], чрез които са пресметнати някои основни характеристики на изследвания параметър:

- за центъра на групиране е определена средната стойност за всяко от петте направления в равнината ( $\bar{Z}$ ):

$$\bar{Z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i \quad (3)$$

- за разсейването във всяко направление са пресметнати размахът (R):

$$(4)$$

и средноквадратичното отклонение (S) по зависимостта:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2} \quad (5)$$

- изчислено е полето на разсейване (доверителния интервал) на грешката  $\omega$  при 99.73% вероятност за попадане на измерена стойност в приетите граници.

$$\omega = 6.S \quad (6)$$

Обобщените резултати с изчислените полета на разсейване са представени в таблиците 1, 2 и 3, в които с  $\omega_{XY,T}$ ,  $\omega_{XZ,T}$ ,  $\omega_{YZ,T}$ , са означени изчислените по зависимост 2 теоретични стойности на  $\omega_R$  за сумарните полета на случайната грешка при позициониране в съответната равнина при известни стойности за полетата на случайните грешки от позициониране по всяка от осите. С  $\omega_{XY,e}$ ,  $\omega_{XZ,e}$ ,  $\omega_{YZ,e}$ , са означени получените полета при обработването на резултатите от експерименталните стойности.

Таблица 1

напр/равн.	$\omega_X$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\omega_Y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\omega_{XY}30^\circ$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\omega_{XY}45^\circ$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\omega_{XY}60^\circ$ [ $\mu\text{m}$ ]
Теорет.	-	-	<b>1.75</b>	<b>1.58</b>	<b>1.41</b>
Експер.	<b>1.9</b>	<b>1.2</b>	<b>1.9</b>	<b>1.6</b>	<b>1.4</b>

Таблица 2

напр/равн.	$\omega_X$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\omega_Z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\omega_{XZ}30^\circ$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\omega_{XZ}45^\circ$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\omega_{XZ}60^\circ$ [ $\mu\text{m}$ ]
Теорет.	-	-	<b>1.83</b>	<b>1.75</b>	<b>1.68</b>
Експер.	<b>1.9</b>	<b>1.6</b>	<b>2.0</b>	<b>1.9</b>	<b>1.8</b>

Таблица 3

напр/равн.	$\omega_Y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\omega_Z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\omega_{YZ}30^\circ$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\omega_{YZ}45^\circ$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\omega_{YZ}60^\circ$ [ $\mu\text{m}$ ]
Теорет.	-	-	<b>1.31</b>	<b>1.41</b>	<b>1.51</b>
Експер.	<b>1.2</b>	<b>1.6</b>	<b>1.4</b>	<b>1.5</b>	<b>1.6</b>

Оценката при сравняване на получените теоретични и експериментални резултати показва, че те се припокриват, вариацията между тях е малка и най-вероятно се дължи на смуцаващите шумове при експеримента, каквито са напр. вибрациите. Адекватността на модела може да се оцени и чрез относителната грешка (БДС(ISO)17397) за максималните отклонения по зависимостта:

$$X_{er} = \frac{|\omega_E - \omega_T|}{\omega_T} = \frac{|1.9 - 1.75|}{1.75} \approx 0.086, \quad (7)$$

Където за  $\omega_E$  и  $\omega_T$  са взети онези получени експериментални и съответно изчислени теоретични стойности, които са с най-голяма разлика една спрямо друга.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- При равнинно позициониране на ММ с ЦПУ за определяне на сумарната грешка от позициониране следва да се прилага двумерно сумиране.

- Делът на всяка от съставните в сумирането се определя от тригонометрична връзка и зависи от ъгъла, който сключва направлението на измерване с двете оси.

- Ако грешките от позициониране по двете оси са равни, то точността на позициониране във всички направления на равнината би трябвало да е една и съща.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Борисов Б. и др. "Справочник технолога-машиностроителя" том 1, Машиностроение, Москва 1985г.

[2] Гатев Г., Размерни вериги, Техника, София 1979г.;

[3] Георгиев, Ц. ISO 9001:2000 и / или 6 сигма?. В: Библиотека Клуб 9000 консултира, бр.17, София, 2005, стр. 22-27

[4] Димитров Д., В. Карачорова. Изследване на случайната грешка при едномерно и двумерно позициониране на обработващ център. В: НК на РУ и СУ - 2012, Русе, Механика и машиностроителни технологии, Русе, 2012, РУ "Ангел Кънчев" Русе, 2012

[5] Енчев М., С. Колева. Приложение на измерването на детайла посредством режещия инструмент. В: Научна конференция, Сливен, 2013

[6] Енчев М., С. Колева. Начално размерно настройване на стругови машини с ЦПУ. // Списание на ТУ – София, филиал Пловдив, 2013, брой кн.2, ISSN 1310-8271

[7] Замфиров Ив., М. Енчев, Св. Колева. Точность автоматической наладки токарных станков с ЧПУ, част 1- Начальная наладка.// Машиностроение и техносфера XXI века // сборник трудов XVI МНТК в г. Севастополе, 2009, брой 1, стр. 248-252, ISSN 966-7907-25-2.

[8] Замфиров Ив., Св. Колева, М. Енчев. Точность автоматической наладки токарных станков с ЧПУ, част 2 - Текущая наладка.// Машиностроение и техносфера XXI века // сборник трудов XVI МНТК в г. Севастополе, 2009, брой 1, стр. 252-256, ISSN 966-7907-25-2.

[9] Замфиров И., Д. Димитров и др. Разработване и изследване на система за трикоординатни измервания върху машини с ЦПУ, Отчет на ПРОЕКТ ФНИ 2009 – ФМТ – 04 на РУ "А. Кънчев"

[10] Карачорова В., Д. Димитров " Възможности за автоматична самодиагностика на обработващи центри", НК на РУ и СУ-2011г

[11] Карачорова В. Изследване на точността при координатни измервания на обработващи. В: центри НК на РУ и СУ - 2012, Русе, Механика и машиностроителни технологии, Русе, 2012, РУ "Ангел Кънчев" Русе, 2012

[12] Митков Ат., Математични методи на инженерните изследвания, Русе 1985г

[13] Наков Н., Т. Тошков, Цв. Корийков, Бр. Сотиров, Мл. Петров, Ив. Попов, Св. Цанков. МЕТРОЛОГИЯ И КАЧЕСТВО. Русенски университет "Ангел Кънчев", Печатна база РУ, 1996

[14] БДС/ISO 17397–1998, нов 17397–2005, Речник на основни и общи термини по метрология. Точност на измерванията. Прецизност, повторяемост, възпроизводимост

## За контакти:

гл.ас. д-р Димитър Димитров, Катедра "ТММРМ" РУ"Ангел Кънчев",  
[ddimitrov@uni-ruse.bg](mailto:ddimitrov@uni-ruse.bg)

**Докладът е рецензиран**