

**МОДЕЛ ЗА РЕАЛИЗИРАНЕ НА ВИРТУАЛНА ЕТАЛОННА БАЗА ЗА
КООРДИНАТНИ ИЗМЕРВАНИЯ НА ПРАВОЛИНЕЙНОСТ**

**MODEL FOR DEVELOPING A VIRTUAL GAUGE BASIS FOR
COORDINATE MEASUREMENTS FOR STRAIGHTNESS**

Rositsa Miteva

Technical University of Sofia

Abstract

The means and systems used for coordinate measurements are characterized by a variety of deviations, connected with the practical realization of the pivot coordinate system. In order to compensate for these errors and to eliminate the incorrectness in converting, it is necessary to evaluate the accuracy of the measurement trajectory (linear and angular deviations), the influence of the individual factors on the reference coordinate system, and to determine experimentally the values of these deviations. One of the most rational means for its implementation for real metrological procedures is on the basis of computer-modeled reference elements. In this work is presented a model of a virtual-mechanical standard for coordinate measuring for straightness.

Keywords: coordinate measurements, standards of form, virtual mechanical standard, interpolation, approximation.

ВЪВЕДЕНИЕ

В съвременните измервателни системи се използват разнообразни елементи и механизми, които се различават по своето предназначение, технологични и функционални възможности, кинематични структури, принцип на действие, конструктивно изпълнение и точностни характеристики. Чрез избора и състава на съответните елементи и механизми се реализира общата функция на измервателните системи – получаване на количествена информация за свойствата на обектите и процесите със зададена точност и достоверност.

За обезпечаване на основната метрологична задача е необходимо да се оцени не само точността на отделните компоненти, но и сумарната точност на системата, която се основава на решаването на редица задачи, свързани с нейния точностен и функционален синтез. В съвременния етап от развитието на измервателната техника, основаващ се до голяма степен на достиженията в областта на микропроцесорната и компютърната техника, е особено перспективно внедряването в реалните измервателни процедури на алгоритми, основаващи се на обработването на резултатите

в реално време и повишаващи точността на измерване.

При задачите решавани в координатните измервания, е особено актуално въвеждането на компютърно моделирани референтни елементи, основаващи се на база от данни. Тези елементи имат своите специфични особености, а тяхната ефективност зависи до голяма степен от адекватността на използваните математични модели. Много често в измервателната практика се изпълняват задачи, при които обхватът на конкретните измервания се различава значително от измервателния обхват на измервателната система. В същото време виртуалните референтни елементи, изградени въз основа на базата от данни в първия и втория обхват ще се различават помежду си [3, 15]. Съответно референтният елемент, съставен на базата на текущите измервания ще има по-голяма точност. Целта на настоящата работа е да се изведе математичен модел на виртуален референтен елемент, основаващ се на конкретните измервания. По този начин се създават необходимите условия за адаптиране на измервателните системи към моментните стойности на измерваните

величини, което ще повиши точността на координатните измервания.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТОЧНОСТТА НА РЕАЛИЗАЦИЯ НА ИЗХОДНАТА БАЗА НА ВМЕ ЗА ПРАВОЛИНЕЙНОСТ

Виртуално-механичен еталон (ВМЕ) на формата и разположението е средство за измерване и съответно програмно осигуряване, реализиращи изходен еталон във вид на асоцииран елемент, построен спрямо възпроизвеждан от средствата за измерване реален елемент.

Реализацията на виртуалният изходен еталон се определя от използвания асоцииран елемент. Използването на средна асоциирана права в качеството на виртуален изходен еталон се доближава максимално до определението на отклонение от праволинейност в стандарта [14].

Физическата реализация на измервателната система се определя от вида на използваната изходна база [6, 9, 10, 11]. За реализация на изходна база точно праволинейно движение в метрологичната практика се използват:

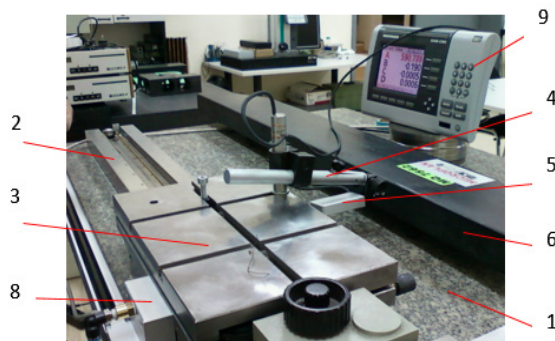
- специализиран уред – праволинейно номер;
- координатно-измервателна машина.

За целта при проведените изследвания се извършва оценка на точността на реализация на изходната база на праволинейно номер, направена по два начина:

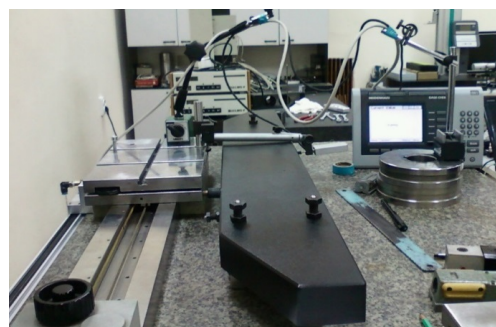
- чрез измерване и оценка на точността на траекторията с прилагането на реверсивен метод;
- оценка на точността на траекторията на база изведените зависимости за влиянието на отделните фактори (линейни и ъглови измествания) върху координатите на точката и определените експериментално стойности на тези отклонения.

Опитната установка (фиг. 1 и фиг. 2) се състои от гранитна виброизолирана основа 1, върху която е монтирана направляваща за праволинейно движение 2, върху която извършва постъпателно движение подвижният модул 3. Върху е закрепена неподвижно конзола 4 с монтиран измервателен преобразувател 5, а преместването му по направляващата се измерва с инкремент-

тална линия 8. Движението на подвижния модул се осъществява със задвижващ модул 7. Върху гранитната основа е установена еталонната каменна линия 6. Тя се ориентира спрямо линията на измерване и направлението на движение чрез регулируеми опори. Изместването на точките на профила спрямо траекторията на движение на характерна точка от преобразувателя и показанията на инкрементална линия 8 се отчитат с електронен блок 9, свързан с компютър.



Фиг. 1. Опитна установка за калибриране на еталон за праволинейност по реверсивен метод – позиция 0°



Фиг. 2. Опитна установка за калибриране на еталон за праволинейност по реверсивен метод – позиция 180°

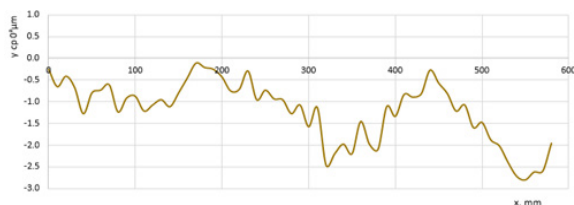
Измерването на профила на еталонна гранитна линия MQ 7562 (отклонението от праволинейност на гранитната линия е $EFL = 0.0038 \text{ mm}$) се извършва чрез сканиране с датчик Heidenhain MT 1281, закрепен със стойка към подвижния модул на праволинейномера, отчитането се извършва с уред мод. Heidenhain GAGE - СНЕК 2108G чрез интерфейс RS 232.

Провеждат се 5 цикъла измервания в положение 0° и 5 цикъла след обръщане на линията в положение 180° , така че началната точка на измерване да съвпадне с предишното измерване в позиция 0° . Стой-

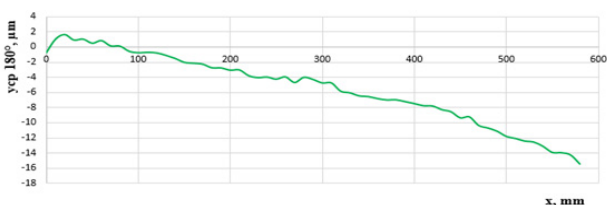
ностите се отчитат през интервал от 10 mm на дължина 580 mm [4, 8].

На база на получените резултати се оценява разсейването на отклонението от праволинейност по ос z на подвижния модул чрез средноквадратичното отклонение на резултатите.

Резултатите от измерване се обработват със специализиран софтуер [7].



Фиг. 3. Резултати от измерване на отклонение от праволинейност на материалния еталон по ос у позиция 0°



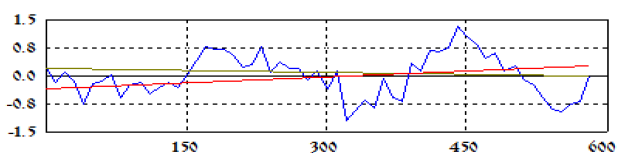
Фиг. 4. Резултати от измерване на отклонение от праволинейност на материалния еталон по ос у позиция 180°

За профила на материалния еталон в позиция 0° се получават следните резултати (фиг. 5):

Отклонение от праволинейност при база средна права – $EFL = 0.0025$ mm;

Отклонение от праволинейност при асоцииран елемент на минимална зона – $EFL = 0.0024$ mm;

Базова права построена по крайните точки на профила – $EFL = 0.0025$ mm.



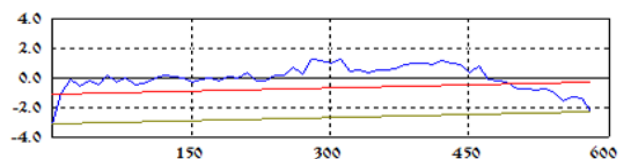
Фиг. 5. Резултати от калибриране на еталонната линия по реверсивен метод – позиция 0°

За профила на материалния еталон в позиция 180° се получават следните резултати (фиг. 6):

Отклонение от праволинейност при база средна права – $EFL = 0.0043$ mm;

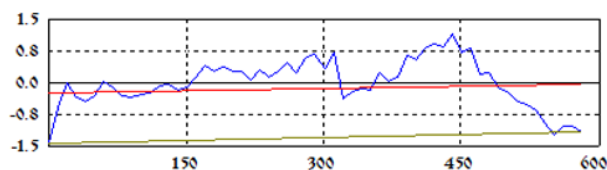
Отклонение от праволинейност при асоцииран елемент на минимална зона – $EFL = 0.0039$ mm;

Базова права построена по крайните точки на профила – $EFL = 0.0039$ mm.



Фиг. 6. Резултати от калибриране на еталонната линия по реверсивен метод – позиция 180°

Отклонението от праволинейност на профила на еталонната линия и траекторията на представителната точка от подвижния модул могат да се определят според [1, 13] като от така получените резултати се изключи грешката от неправолинейност на траекторията на функционалната точка. В единият случай тя участва със знак „+“, а в другия – с „-“. Пресмятането на координатите на точките от измервания профил като средноаритметична стойност на координатите от двете профилограми е показано на фиг. 7.



Фиг. 7. Профил на еталонната линия

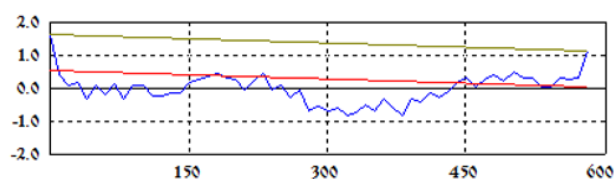
В този случай за EFL на профила на еталонната линия се получава:

Отклонение от праволинейност при база средна права – $EFL = 0.0025$ mm;

Отклонение от праволинейност при асоцииран елемент на минимална зона – $EFL = 0.0024$ mm;

Базова права построена по крайните точки на профила – $EFL = 0.0024$ mm.

Определянето на EFL на траекторията на представителната точка от подвижния модул е извършено с пресмятането на полуразликата от координатите на точките, получени в двете позиции. Резултатите са показани на фиг. 8.



Фиг. 8. Отклонение на траекторията на представителната точка от подвижния модул

В този случай за EFL на траекторията на представителната точка от подвижния модул се получава:

Отклонение от праволинейност при база средна права – EFL = 0.0024 mm;

Отклонение от праволинейност при асоцииран елемент на минимална зона – EFL = 0.0021 mm;

Базова права построена по крайните точки на профила – EFL = 0.0021 mm.

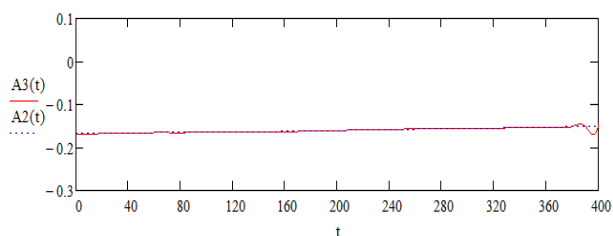
Резултатите от експерименталните изследвания са получени при използване на асоциирана базова права – средна права.

МАТЕМАТИЧЕН МОДЕЛ НА ВИРТУАЛЕН РЕФЕРЕНТЕН ЕЛЕМЕНТ

Изведеният математичен модел на виртуален референтен елемент, се основава на конкретните измервания. По този начин се създават необходимите условия за адаптиране на измервателните системи към моментните стойности на измерваните величини и ще повиши точността на координатните измервания [5, 12].

Получените резултати от измерване се апроксимират по точки през интервал 30 mm. Най-добро приближение до възлите на интерполация дават математичните модели на интерполация – сплайн, кубичен сплайн, МНМК и ред на Фурие. Резултатите за сплайн интерполацията и кубичен сплайн са с близки стойности, което дава основание да се избере само единия математичен модел. По-нататък в работата е направен анализ на резултатите от измерване със сплайн, МНМК и ред на Фурие [2].

Получените след обработка данни се използват по-нататък за интерполиране на профила по 19 точки през интервал 30 mm.

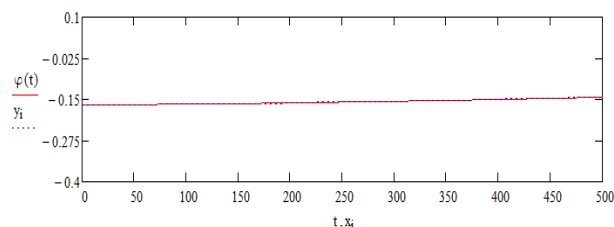


Фиг. 9. Сплайн интерполация на профила при 19 точки

Резултатите за сплайн интерполацията са показани на фиг. 9. На графиката $A3(t)$ е интерполиращата функция през интервал 30

mm, $A2(t)$ е функцията на зададения профил през 5 mm. Разликата между двете функции е $\Delta_{max} = 0.66 \mu\text{m}$ (27.5% от EFL) [7].

При апроксимиране по МНМК при същите данни за грешката се получава $\Delta_{max} = 0.048 \mu\text{m}$ (2% от EFL). На фиг. 10 функцията $\varphi(t)$ е апроксимираща функция по МНМК, а зададения профил през 5 mm е y_i .



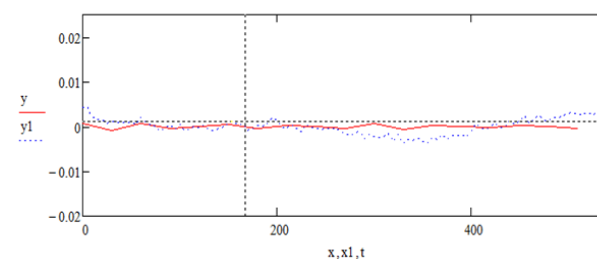
Фиг. 10. Апроксимация с МНМК на профила при 19 точки

За апроксимация с ред на Фурие с шест хармоника при същите данни, $\Delta_{max} = 0.73 \mu\text{m}$ (30.5% от EFL). На графика фиг. 11 функцията y е апроксимиращата функция с ред на Фурие по 19 точки, а зададеният профил през 5 mm е означен с y_i .

При интерполиране по 54 точки през интервал 10 mm се получава по-малка грешка от интерполиране на профила за сплайн интерполацията – $\Delta_{max} = 0,49 \mu\text{m}$ (20.5% от EFL). При апроксимиране по МНМК при същите данни за грешката се получава $\Delta_{max} = 0.39 \mu\text{m}$ (16.5% от EFL).

При задаване на интервал 10 mm и 12 хармоника $\Delta_{max} = 0,12 \mu\text{m}$ (5% от EFL). Точността на апроксимация с реда на Фурие се увеличава с увеличаване броя на хармониците. Той може да бъде избран в интервал $0 \leq j < \frac{m}{2}$, където m е броя на

интерполационните възли. При 26 хармоника $\Delta_{max} = 0,048 \mu\text{m}$ (2% от EFL). Данните са обобщени в табл. 1.



Фиг. 11. Апроксимация с ред на Фурие на профила при 19 точки

Таблица 1 Максимални грешки, получени при възпроизвеждане на профила

Точки от профила,	EFL μm	Математичен модел интерполация					
		Сплайн		МНМК		Ред на Фурие	
		Δ_{max} μm	Δ_{max} %	Δ_{max} μm	Δ_{max} %	Δ_{max} μm	Δ_{max} %
19	2.5	0.66	27.5	0.07	3	0.73	30.5
54	2.5	0.49	20.5	0.39	16.5	0.05	2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение може да се каже, че предварителната информация за характера на профила е важна за избора на подходящи математични модели за апроксимация, с което да се постигне необходимата за измерването точност.

Направеният анализ показва, че и трите математични модели за интерполация могат да бъдат използвани при определяне на отклонението от праволинейност на еталонни детайли, с което се постига необходимата за измерването точност.

Методът на най-малките квадрати дава най-добри резултати когато се апроксимират "гладки" криви, в които няма силно изразени екстремуми. Когато правилно е определен броят на хармонците при апроксимация с реда на Фурие се постига висока точност.

При отсъствие на предварителна информация за топографията на изследвания профил е най-подходящо използването на апроксимиране с МНМК и ред на Фурие, поради високата точност и надеждност на методите.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Dyakov D., I. Kalimanova, V. Bogevev, G. Kasabova. Sistema za izmervane na otklonenieto ot pravolineynost. 12-ti Natsionalen Nauchen Sbornik dokladi ot 12-ti Natsionalen Nauchen Simpozium s mezhd. uchastie "MMO'2002", Sozopol, 2002 g., s. 147-152, ISBN 954-438-229-5.

[2] Miteva R. Virtualno-mehanichni etaloni na formata i razpolozhenieto, Softtrade, 2019 g., ISBN 978-954-334-213-6.

[3] Dyakov D. Otnosno otsenyavaneto na otkloneniyata na formata i orientatsiyata. Sb. dokladi ot 10-ti Natsionalen Nauchen

Simpozium s mezhd.uchastie "MMO'2000", Sozopol, 2000 g., (s. 87-92), ISBN 954-438-229-3.

[4] Zhelezarov I. S., Povtoryaemost i vazproivodimost na izmervatelni sistemi. UNITEH 2010. Gabrovo. 2010 g., s. II445 – II448. ISSN 1313-230X.

[5] Dichev, D., F. Kogia, H. Nikolova, D. Diakov. A mathematical Model of the Error of Measuring Instruments for Investigating the Dynamic Characteristics, Journal of Engineering Science and Technology Review 11(6) (2018) 14-19, ISSN 1791-2377, doi: 10.25103/jestr.116.03; SJR 2017: 0.225; CiteScore 2017: 1.00; SNIP 2017: 0.386.

[6] Nikolova H. N., D. I. Diakov, V. A. Vassilev, Form Deviations Measurement of Planar Surfaces by Overlapping Measuring Positions Using Reference Plane Method, XXVIII International Scientific Symposium "METROLOGY AND METROLOGY ASSURANCE 2018" September 10-14th, 2018, Sozopol, Bulgaria, ISSN 1313-9126 p.65-69;

[7] Bogevev V., Spetsializiran softuer "Otsenka na formata, razpolozhenieto i orientatsiyata pri koordinatni izmervania", TU – Sofia, katedra PTU pri MF, 1999.

[8] Zhelezarov, I., Analysis of measuring devices and measurement systems. Mechanical Engineering in XXI Century. Nis, Serbia. 2010. p. 199 – 200. ISBN 978-86-6055-008-0.

[9] Radev, Hr., V. Bogevev, D. Dyakov, Metod za izmervane na otklonenieto ot pravolineynost, Sb. Dokladi na natsionalna konferentsia s mezhdunarodno uchastie „Metrologia ‘93“, Veliko Tarnovo, 1993 g.

[10] Kalimanova I., D. Dyakov. Izsledvane na karakteristikata na lazerna sistema LMS 100 za izmervane na otklonenieto ot pravolineynost. Sbornik dokladi ot XII-ti Natsionalen Nauchen Simpozium s mezhd. uchastie "MMO'2002", Sozopol 2002 g., s. 153-157, ISBN 954-438-229-5.

[11] Dyakov, D., I. Kalimanova, A. Georgiev, Stend za izsledvane na tochnostnite parametri na koordinatni mikropozitsionirashti sistemi. Sbornik dokladi na Konferentsia s mezhdunarodno uchastie mashinoznanie i mashinni elementi, 2008 g., ISBN 978-954-580-260-7, s. 254-260.

[12] D. Dichev D., F. Kogia, Hr. Koev and D. Diakov. Method of analysis and correction of the error from nonlinearity of the measurement instruments, JOURNAL OF Engineering Science and Technology Review Volume 9,

Number 6, 2016 ISSN: 1791-2377, p.116-121

- [13] ISO 230-1:2012. Test code for machine tools - Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions.
- [14] BDS EN ISO 12780-1: 2011 Geometrical product specifications (GPS) - Straightness - Part 1: Vocabulary and parameters of

straightness (ISO 12780-1:2011).

- [15] Kalimanova I., D. Dyakov. Bezkontaktna sistema za izmervane na tochnostnite harakteristiki na dvukoordinatni lineyni pozitsionirashti moduli. Sbornik dokladi ot XVIII-ti Natsionalen Nauchen Simpozium s mezhd. uchastie "MMO 2008", Sozopol, 2008 g., s. 137-141, ISBN 978-954-334-078-1.