

**В.О. Тарасов**, академік, д-р техн. наук, професор

**Т.М. Назаренко**, пров. інженер

**Л.О. Злочевська**, пров. інженер

# ТЕХНОЛОГІЯ КОРЕКЦІЇ НЕПЛОЩИННОСТІ ПОВЕРХНІ ЛІНІЙНОЇ НАПРЯМНОЇ

(Початок статті читайте в журналі “Науково-технічна інформація” №№ 1, 2, 3-4 за 2016 р.)

**Резюме.** У статті наведено результати теоретичних і прикладних досліджень системного синтезу конструкції суперпрецизійної лінійної напрямної. Зокрема, розглянуто питання корекції неплоскостності поверхні лінійної напрямної. Запропоновано алгоритм корекції положення поля датчиків по висоті зазора та спосіб корекції неплоскостності поверхні рухомого елемента несучої опори лінійної напрямної.

**Ключові слова:** суперпрецизійна лінійна напрямна, алгоритм, датчики, зазор.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Упровадження сучасних, високих, науко-містких технологій вимагає постійного підвищення точнісних характеристик верстатів, які не повинні змінюватися під впливом динамічного навантаження та при тривалій експлуатації. Проблема точнісних характеристик можна розв’язати в різний спосіб: за рахунок жорсткої стабілізації радіального і осьового положення осі шпиндельної опори; стабілізації положення рухомого елемента лінійної напрямної відносно нерухомої у просторі площини; системою рівнянь, що забезпечують зворотний зв’язок між комп’ютером та пристроями інформаційного управління верстата. У цій статті будемо розглядати питання технології корекції неплоскостності поверхні лінійної напрямної при стабілізації положення рухомого елемента несучої плоскої опори суперпрецизійної лінійної напрямної відносно нерухомої у просторі площини.

Суперпрецизійна лінійна напрямна [1] призначена для конструювання верстатів, що забезпечують обробку точних елементів оптики й механіки, зокрема, для конструювання верстатів з обробки плоских поверхонь із особливо високою точністю.

**Мета статті** — обґрунтувати підвищення точності стабілізації положення рухомого елемента плоских опор суперпрецизійної лінійної напрямної при обробці плоских поверхонь.

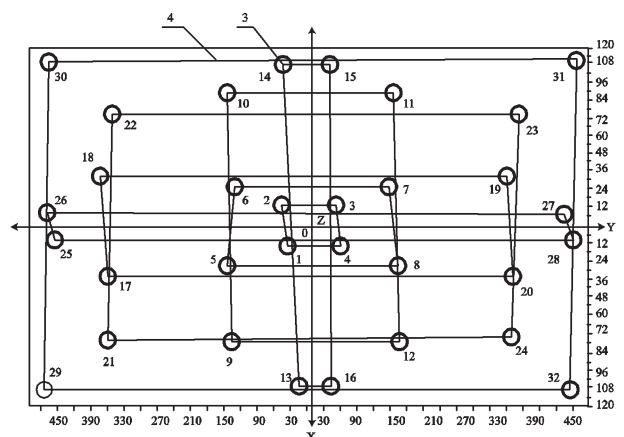
## ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Відомо, що рухомий елемент виготовляється з похибками розмірів і форми, а стабілізація положення рухомого елемента за способом опорних зазорів здійснюється з кінцевою точністю. У зв’язку з цим точність установки в

одну площину датчиків поля датчиків може не відповідати необхідній точності стабілізації положення рухомого елемента.

Для надійного забезпечення високої точності стабілізації положення рухомого елемента необхідно проводити корекцію положення датчиків поля датчиків щодо площини їхньої установки. При цьому передбачається, що поверхня рухомого елемента має бути виготовлена або скорегована з високою точністю й істотно на положення згладжувальної площини не впливає. Алгоритм корекції поверхні рухомого елемента наведено нижче.

**Корекція положення датчиків поля датчиків за висотою зазора.** Нехай поле датчиків (рис. 1) включає  $N$  датчиків [2]. Систему координат  $OXYZ$  уведено в такий спосіб. Площина  $XOY$  сполучена із площиною установки датчиків поля датчиків. Її початок поміщено у



**Рис. 1.** Поле датчиків величин зазорів для побудови згладжувальних площин

центр поля датчиків, вісь  $Y$  — паралельна напрямку переміщення, а вісь  $Z$  спрямована за висотою зазора. Корекція положення датчиків поля датчиків полягає в наступному. Рухомий елемент установлюють у середнє за довжиною переміщення положення. Щодо основ перших датчиків першого, третього й п'ятого блоків датчиків рухомий елемент установлюють з робочою величиною зазора.

Будують площини, що згладжує поверхню рухомого елемента. Змінюючи положення рухомого елемента, згладжувальну площину встановлюють паралельно площині установки датчиків поля датчиків. Виконується селекція  $K=C_N^3$  площин, відстань від крайніх точок поля датчиків до яких відхиляється від середньої висоти зазорів під датчиками поля датчиків на величину, що перевищує встановлений поріг селекції. Селекція площин забезпечується виконанням наступних операцій:

1. Задається поріг селекції  $\Delta$ .

2. Вибирають перше сполучення трьох датчиків поля датчиків з  $K=C_N^3$  сполучень цих датчиків. За величинами зазорів від центрів основ цих датчиків до розташованих над ними точок поверхні рухомого елемента й координатами центрів основ цих датчиків у площині  $XOY$ , що проходить через три точки рухомого елемента, розраховують коефіцієнти  $A_1$  та  $B_1$  ( $C$  задається).

3. Вимірюють величини зазорів під  $N$  датчиками поля датчиків і обчислюють їх середню величину

$$\bar{Z} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Z(n).$$

4. Будують рівняння площини з коефіцієнтами  $A_1, B_1, C, D = -C\bar{Z}$ , що проходить через точку на осі  $Z$  системи координат  $OXYZ$  на висоті  $\bar{Z}$ .

5. Розраховують відстані  $d_1, d_3, d_5, d_6$  від центрів основ перших датчиків першого, третього, п'ятого й шостого блоків датчиків до цієї площини.

6. Обчислюють різниці

$$\begin{aligned} r_1 &= \bar{Z} - d_1; & r_2 &= \bar{Z} - d_3; \\ r_3 &= \bar{Z} - d_5; & r_4 &= \bar{Z} - d_6. \end{aligned} \quad (1)$$

Якщо хоча б одна із цих різниць перевищує обраний поріг селекції, то площина належить до числа площин, що пройшли селекцію.

7. Послідовно за цим критерієм проводять селекціонування всіх площин, побудованих по  $K$  сполучень датчиків поля датчиків. Підраховують число  $M$  відселекціонованих площин.

8. Якщо  $M \neq K/2$ , то поріг  $\Delta$  збільшується при  $M < K/2$  і зменшується при  $M > K/2$ . На кожному кроці зміни величини порога виконують селекцію та проводять підрахунок площин, що пройшли селекцію. Методом послідовних на-

ближень визначають величину порога, що забезпечує селекцію  $M=K/2$  площин.

9. Варіюють висоту установки першого датчика  $C_{п.д.}^1$  поля датчиків. На кожному кроці варіації виконують селекцію площин за встановленим критерієм та проводять їхній підрахунок. Датчик  $C_{п.д.}^1$  щодо поверхні рухомого елемента встановлюють із зазором, якому відповідає мінімум  $M$ .

Послідовно варіюють висоту установки кожного датчика поля датчиків. Датчики щодо поверхні рухомого елемента встановлюють із зазорами, яким відповідає мінімальне число  $M$  відселекціонованих площин.

10. Зменшують величину порога  $\Delta$ . На кожному кроці зменшення порога виконують селекцію та проводять підрахунок числа  $M$  відселекціонованих площин. Визначають величину порога  $\Delta_1$ , якій відповідає  $M_1=K/2$ .

11. Повторно виконують варіювання висот установки датчиків поля датчиків та установку їх із зазорами, яким відповідає мінімум відселекціонованих площин. Визначають нове значення порога  $\Delta_2$ , якому відповідає  $M_2=K/2$ .

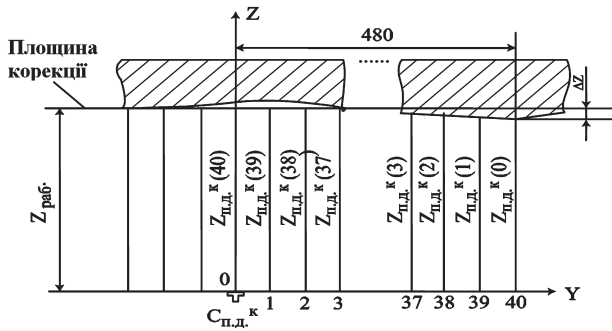
12. Варіювання висот установки датчиків триває доти, поки воно приводить до істотного зменшення числа відселекціонованих площин. Отриману при цьому величину порога можна використовувати для селекції площин при побудові згладжувальних площин.

Зазначимо, що корекція висот установки датчиків поля датчиків проводилася щодо скоренованої поверхні рухомого елемента.

**Корекція неплоскостності поверхні рухомого елемента несучої опори лінійної напрямної.** Спосіб згладжувальних площин при всіх його перевагах порівняно зі способом опорних зазорів має, як ми вже відзначали, істотне обмеження. Воно полягає в тому, що якщо на поверхні рухомого елемента можуть бути виділені області, розташовані під кутом одна до одної, то площини, що згладжують ці області, в процесі переміщення рухомого елемента послідовно сполучаються з базовою згладжувальною областю. У результаті рухомий елемент повертається на величину кута, під яким розташовуються ці області. Водночас спосіб опорних зазорів інваріантний до рельєфу поверхні рухомого елемента.

Висока точність стабілізації досягається на основі спільного використання цих способів: корекція неплоскостності поверхні рухомого елемента виконується на основі способу опорних зазорів, а стабілізація його положення — способом згладжувальних площин.

Корекція неплоскостності поверхні рухомого елемента (**рис. 2**) виконується по лініях корекції



**Рис. 2.** Корекція неплщинності рухомого елемента по сліду датчика поля датчиків

по сліду центра основи на поверхні рухомого елемента кожного датчика поля датчиків при переміщенні рухомого елемента з вихідного положення на величину робочого ходу.

Як приклад, розглянемо корекцію неплщинності поверхні рухомого елемента по сліду  $k$ -го датчика  $C_{п.д.}^k$  поля датчиків (див. **рис. 2**).

Установимо рухомий елемент у вихідне для переміщення положення та, зміщаючи його по висоті зазора, установимо його щодо перших датчиків  $C_1^1, C_1^3, C_1^5$  першого, третього й п'ятого блоків датчиків з робочою величиною зазорів щодо базової площини. Датчики блоків датчиків і датчики поля датчиків установлено в одну площину, а тому відстані від центрів основ цих датчиків до базової площини дорівнюють робочій величині зазора. Прийmemo базову площину за площину корекції й зв'яжемо її з рухомим елементом. Корекція неплщинності поверхні рухомого елемента полягає в тому, що на кожній дискреті стабілізації в процесі побудови згладжувальної площини величини зазорів, вимірювані під датчиками поля датчиків, корегуються на величину відхилення  $\Delta Z$  висоти точки поверхні рухомого елемента над центром основи датчика поля датчиків від площини корекції. Отже, вимірювання на дискретах стабілізації величин зазорів під датчиками поля датчиків зводиться до визначення відстаней від центрів основ цих датчиків до площини корекції.

Рухомий елемент із вихідного положення переміщується на величину робочого ходу  $L$  ( $L=480$  мм у цьому прикладі, що відповідає 40 дискретам стабілізації за способом опорних зазорів). Стабілізація положення рухомого елемента здійснюється за способом опорних зазорів. Величини опорних зазорів вимірюються під першими датчиками  $C_1^1, C_1^3, C_1^5$  першого, третього й п'ятого блоків датчиків. Площина корекції переміщатиметься паралельно площині установки датчиків поля датчиків на висоті робочого зазора несучої опори.

На кожній дискреті стабілізації після установки рухомого елемента в незбурене положення щодо площини стабілізації вимірюється величина зазора під  $k$ -м датчиком поля датчиків

$$Z_{п.д.}^k(0), Z_{п.д.}^k(1), Z_{п.д.}^k(2), \dots, Z_{п.д.}^k(j), \dots, Z_{п.д.}^k(J). \quad (2)$$

Початок системи координат  $YOZ$  (див. **рис. 2**) помістимо в центр основи датчика  $C_{п.д.}^k$ , вісь  $Y$  у площині установки основ датчиків поля датчиків направимо в напрямку переміщення рухомого елемента, вісь  $Z$  направимо по висоті зазора. Точки поверхні рухомого елемента, що лежать на сліді центра основи датчика  $C_{п.д.}^k$  й переміщуються по прямих, паралельних осі  $Y$ , після переміщення рухомого елемента на  $J=40$  дискрет стабілізації мають координати

$$\begin{aligned} [Y=0, Z=Z_{п.д.}^k(J)], \\ [Y=l, Z=Z_{п.д.}^k(J-1)], \dots, \\ [Y=2l, Z=Z_{п.д.}^k(J-2)], \dots, \\ [Y=Jl, Z=Z_{п.д.}^k(0)]. \end{aligned} \quad (3)$$

Пронумеруємо точки на осі  $Y$ , у яких вимірювалися величини зазорів під датчиком  $C_{п.д.}^k$  (від 0 до  $J=40$  у даному прикладі). Відрізки сліду проекції лінії корекції на площину рухомого елемента між двома суміжними точками представимо прямими. Рівняння  $n$ -ї прямої, що проходить через дві точки поверхні рухомого елемента на висоті зазорів під датчиком  $C_{п.д.}^k$ , має вигляд

$$\frac{Y-Y(n-1)}{Y_n-Y(n-1)} = \frac{Z-Z_{п.д.}^k(n-1)}{Z_{п.д.}^k(n)-Z_{п.д.}^k(n-1)},$$

або  $Z = k_n Y + b_n. \quad (4)$

Відрізки сліду проекції лінії корекції на площину рухомого елемента представляються рівняннями: між нульовою й першою точкою —  $Z=k_1 Y+b_1$ ; між першою й другою точкою —  $Z=k_2 Y+b_2$ ; між  $(J-1)$  і  $J$  точкою —  $Z=k_J Y+b_J$ .

Нехай рухомий елемент перебуває на відстані  $r$  щодо вихідного положення (наприклад,  $2l < r < 3l$ ). Номер  $n$  рівняння прямої, якою представлений відрізок сліду проекції лінії корекції, що розташувалася після установки рухомого елемента на відстань  $r$  над центром основи датчика  $C_{п.д.}^k$ , визначається зі співвідношення

$$n=J - \text{ціла частина}(r/l). \quad (5)$$

Відстань від центра основи датчика  $C_{п.д.}^k$  до  $n$ -ї прямої визначається з (4):

$$Z_{п.д.}^k(r) = k_n r + b_n. \quad (6)$$

Обчислюється величина корекції  $\Delta Z_{п.д.}^k$  зазора під  $k$ -м датчиком  $C_{п.д.}^{(k)}$  поля датчиків, обмірюваного після переміщення рухомого вузла на відстань  $r$  щодо вихідного:

$$\pm \Delta Z_{п.д.}^k(r) = Z_{п.д.}^k(r) - Z_{роб.} \quad (7)$$

Тоді величина зазора під датчиком  $C_{п.д.}^{(k)}$  до скорегованої поверхні рухомого елемента приймається рівною

$$Z_{п.д.скор.}^k(r) = Z_{п.д.}^k(r) \mp \Delta Z_{п.д.}^k(r) \quad (8)$$

За наведеною вище методикою на кожній дискреті стабілізації при побудові згладжувальних площин корегуються виміри величин зазорів під кожним датчиком поля датчиків.

## ВИСНОВКИ

Розв'язання проблеми лінійного переміщення робочого інструмента за допомогою суперпрецизійної лінійної напрямної має важливе значення для забезпечення точності характеристик виробів оптики і механіки. Саме цей пристрій разом із осьюовою і радіальною складовою забезпечує точнісні характеристики виробів.

Розроблений пристрій лінійного переміщення являє собою досить складний агрегат, який виконує наступні функції: прийом, перетворення і відображення на екрані дисплея вимірних величин переміщення робочого інструмента; знімання інформації лінійного переміщення; формування сигналів управління; формування масиву опорних зазорів; формування опорних зазорів, відповідних до несуміщення положенню фіксованих точок рухомого елемента щодо фіксованих прямих.

Конструкції вузлів пристрою і електронно-механічних схем управління переміщенням рухомого елемента напрямної для лінійного переміщення робочого інструмента представляють новизну і оригінальність розроблених рішень.

У статті представлені результати теоретичних і прикладних досліджень технології корекції неплоскості поверхні лінійної напрямної при

стабілізації положення рухомого елемента несучої плоскої опори суперпрецизійної лінійної напрямної відносно нерухомої у просторі площини.

Це використовується для системного синтезу конструкції суперпрецизійної лінійної напрямної. Розглянута корекція при конструюванні лінійної напрямної. Запропонована корекція неплоскості поверхні рухомого елемента несучої опори лінійної напрямної. Визначена достяжна точність стабілізації положення рухливих елементів плоских опор і її залежність від різних характеристик.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Деклараційний патент на винахід 34059 А Україна, МПК F16C 32/06 (2006.01). Суперпрецизійна лінійна напрямна / Зіненко В.М. — Заявл. 24.05.1999, № 99052840; опубл. 15.02.2001, бюл. № 1/2001.
2. *Тарасов В.О.* Системний синтез суперпрецизійних лінійних напрямних / В.О. Тарасов, Т.М. Назаренко, Л.О. Злочевська // Науково-технічна інформація. — 2016. — № 1. — С. 62–72.
3. *Тарасов В.О.* Пристрій та стабілізація управління переміщенням рухомих елементів / В.О. Тарасов, Т.М. Назаренко, Л.О. Злочевська // Науково-технічна інформація. — 2016. — № 2. — С. 68–78.

## REFERENCES

1. Deklaratsiyni patent na vynakhid 34059 A Ukraina, MPK F16C 32/06 (2006.01). Superpretsyziina liniina napriamna / Zinenko V.M. — Zaiavl. 24.05.1999, № 99052840; opubl. 15.02.2001, biul. № 1/2001 [Patent for invention 34059 Ukraine A, IPC F16C 32/06 (2006.01). Highly-precise linear motion guide. Zinenko V.M. Appl. 24.05.1999, № 99052840; publ. 15.02.2001, Bull. № 1/2001].
2. *Tarasov V.O., Nazarenko T.M., Zlochevska L.O.* (2016) Systemnyi syntez superpretsyziinykh liniinykh napriamnykh [Systematic synthesis of highly-precise linear motion guide]. *Naukovo-tekhnichna informatsiia* [Scientific and Technical Information], no. 1, pp. 62–72.
3. *Tarasov V.O., Nazarenko T.M., Zlochevska L.O.* (2016) Prystrii ta stabilizatsiia upravlinnia peremishchenniam rukhomykh elementiv [Device and stabilization management of the transfer of movable elements]. *Naukovo-tekhnichna informatsiia* [Scientific and Technical Information], no. 2, pp. 68–78.

**V.O. Tarasov**, Academician, Doctor of Science in Engineering, Professor

**T.M. Nazarenko**, Leading Engineer

**L.O. Zlochevska**, Leading Engineer

## THE DEVICE AND STABILIZATION OF TRANSFER CONTROL OF MOVABLE ELEMENTS

**Abstract.** *The results of theoretical and applied research of the system synthesis of highly-precise linear motion guide are presented in the paper. Questions of surface flatness correction of a linear guide are reviewed. There are also proposed the correction algorithm of field position sensors on the clearance height and the method for correcting the surface flatness of the movable bearing support element linear guide.*

**Keywords:** *highly-precise linear guide, algorithm, sensor, clearance.*

**В.А. Тарасов**, академик, д-р техн. наук, профессор

**Т.Н. Назаренко**, ведущ. инженер

**Л.А. Злочевская**, ведущ. инженер

## **ТЕХНОЛОГИЯ КОРРЕКЦИИ НЕПЛОСКОСТНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ЛИНЕЙНОЙ НАПРАВЛЯЮЩЕЙ**

***Резюме.** В статье представлены результаты теоретических и прикладных исследований системного синтеза конструкции суперпрецизионной линейной направляющей. В частности, рассмотрены вопросы коррекции неплоскостности поверхности линейной направляющей. Предложены алгоритм коррекции положения поля датчиков по высоте зазора и способ коррекции неплоскостности поверхности подвижного элемента несущей опоры линейной направляющей.*

***Ключевые слова:** суперпрецизионная линейная направляющая, алгоритм, датчики, зазор.*

### **ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ**

**Тарасов Віктор Олексійович** — академік, д-р техн. наук, професор Міжнародної академії комп'ютерних наук і систем, президент МАКС, пр-т Академіка Глушкова, 42, м. Київ, Україна, 03680; amianta@yandex.ua

**Назаренко Тетяна Миколаївна** — пров. інженер Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій та систем НАН та МОН України, пр-т Академіка Глушкова, 40, м. Київ, Україна, 03680; +38 (044) 526-00-03; t-n-nazarenko@ya.ru

**Злочевська Любов Опанасівна** — пров. інженер МННЦІТС НАН та МОН України, пр-т Академіка Глушкова, 40, м. Київ, Україна, 03680; +38 (044) 526-63-37; amianta@yandex.ua

### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Tarasov V.O.** — Academician, Doctor of Science in Engineering, Professor, International Academy of Computer Science and Systems, President of MAKS, 42, Acad. Glushkova Ave. Kyiv, Ukraine, 03680; amianta@yandex.ua

**Nazarenko T.M.** — Leading Engineer, International Research and Training Center for Information Technologies and Systems under NAS and MES of Ukraine, 40, Acad. Glushkova Ave., Kyiv, Ukraine, 03680; +38 (044) 526-00-03; t-n-nazarenko@ya.ru

**Zlochevska L.O.** — Leading Engineer, IRTCITS under NAS and MES of Ukraine, 40, Acad. Glushkova Ave., Kyiv, Ukraine, 03680; +38 (044) 526-63-37; amianta@yandex.ua

### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Тарасов В.А.** — академик, д-р техн. наук, профессор Международной академии компьютерных наук и систем, президент МАКС, пр-т Академіка Глушкова, 42, г. Киев, Украина, 03680; amianta@yandex.ua

**Назаренко Т.Н.** — ведущ. инженер Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем НАН и МОН Украины, пр-т Академіка Глушкова, 40, г. Киев, Украина, 03680; +38 (044) 526-00-03; t-n-nazarenko@ya.ru

**Злочевская Л.А.** — ведущ. инженер МНУЦИТС НАН и МОН Украины, пр-т Академіка Глушкова, 40, г. Киев, Украина, 03680; +38 (044) 526-63-37; amianta@yandex.ua

