

# СИСТЕМНИЙ СИНТЕЗ АЕРОСТАТИЧНИХ НАПРЯМНИХ ПРЕЦИЗІЙНИХ ВЕРСТАТІВ



В.О. Тарасов, *докт. техн. наук,*  
Т.М. Назаренко,  
Л.О. Злочевська

**Постановка проблеми.** У попередніх номерах нашого журналу розглядалися питання стабілізації осьового й радіального положення аеростатичної шпиндельної опори з використанням інформаційних керованих пристроїв. Проте слід зазначити, що формотворна система включає в себе лінійне переміщення робочого інструмента, яке має також забезпечувати вимоги до точнісних характеристик шляхом використання інформаційно-управляючих пристроїв, які раніше не розглядалися.

**Принцип конструювання прецизійної аеростатичної напрямної.** Прецизійна аеростатична напрямна призначена для лінійного переміщення елементів формотворних сис-

тем верстатів, інструмента й оброблюваних деталей зі зміщенням по висоті щодо нерухомої в просторі площини, яка не перевищує 0,1 мкм (рис. 1).

Напрямна включає в себе основу 1 у вигляді балки прямокутного перерізу, по якій переміщується рухомий вузол 3. Верхня й нижня стінки рухомого вузла з відповідними гранями основи утворюють дві несучі плоскі аеростатичні опори. Переміщення рухомого вузла здійснюється кроковим п'єзоелектричним двигуном 2, оснащеним вимірниками кроку мікропереміщення й інваріантним до траєкторії переміщення рухомого вузла. П'єзоелектричний двигун [1] включає в себе

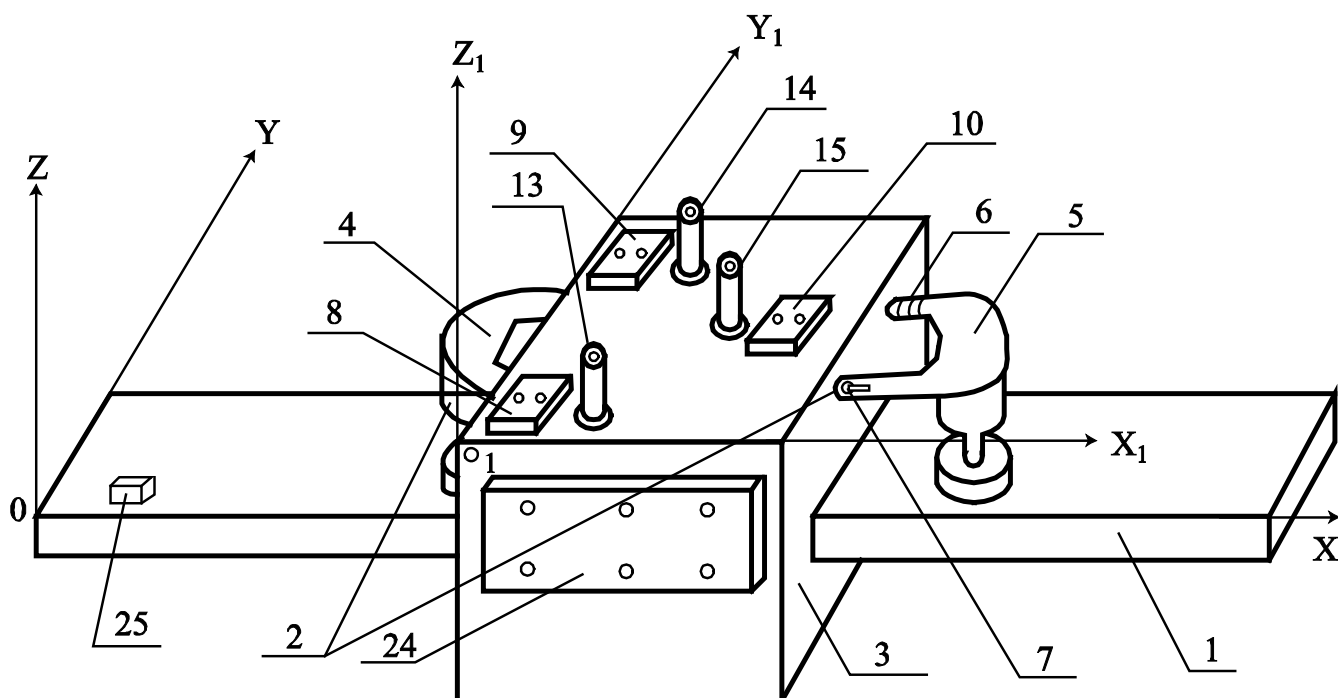


Рис. 1. Загальний вигляд прецизійної аеростатичної напрямної

штовхачі прямого 4 і зворотного 5 ходу, що забезпечують переміщення рухомого вузла в прямому й зворотному напрямку відповідно. Одне плече кожного штовхача з убудованим у нього п'єзостовпом 6 прикріплене до рухомого вузла, а інше, у торець якого вбудований датчик 7 величини кроку переміщення, встановлене із зазором щодо рухомого вузла. Управління переміщенням рухомого вузла здійснює пристрій управління штовхачами, що гарантує крокове переміщення рухомого вузла з вимірюваною й регульованою величиною кроку переміщення. Величина  $m(j)$   $j$ -го кроку переміщення рухомого вузла обчислюється як різниця величин зазорів  $Z_k(j)$  і  $Z_n(j)$  під датчиком величини переміщення рухомого вузла після закінчення кроку переміщення рухомого вузла й до початку його переміщення, тобто,  $m(j) = Z_k(j) - Z_n(j)$ .

На верхній стінці рухомого вузла симетрично щодо його сторін (див. рис. 1) встановлені блоки датчиків величин зазорів 8; 9; 10. У кожному блоці датчиків з можливістю зміщення по висоті зазору встановлені (рис. 2) перший (за напрямком переміщення) датчик 11 і другий датчик 12 величини зазору між основою датчика й верхньою гранню основи напрямної. Відстані між центрами основ датчиків однакові й рівні дискреті стабілізації  $l$ .

На верхній стінці рухомого вузла симетрично щодо блоків датчиків встановлені аеростатичні регулятори положення рухомого вузла 13; 14; 15 (регулятори тиску в газовому шарі несучої плоскої аеростатичної опори).

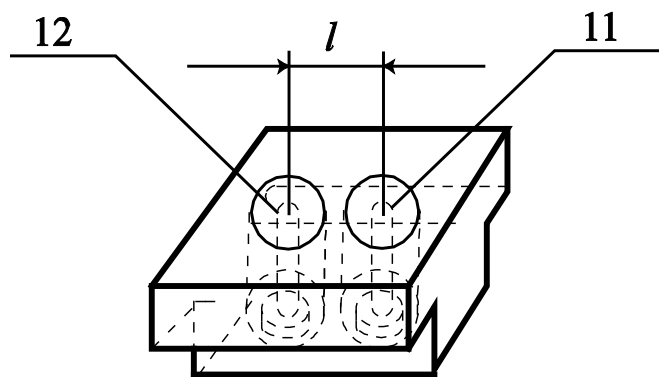


Рис. 2. Блок датчиків величин зазорів

Ці регулятори додатково можуть встановлюватися й на нижній основі аеростатичного вузла попарно навпроти один одного по вертикальних осях симетрії. Варіант конструкції аеростатичного регулятора положення рухомого вузла показано на рис. 3.

У корпусі 16 регулятора розміщено п'єзостовп 17 з установленою на ньому регулювальною голкою 18 для зміни тиску на виході підвідного каналу 19 жиклера подачі газу в зазор несучої плоскої аеростатичної опори. П'єзостовп встановлено в регулювальному гвинті 20 та ізольовано від нього ізолятором 21. Регулювальним гвинтом встановлюється висота голки над підвідним каналом жиклера. Пружина 22 утримує п'єзостовп у регулювальному гвинті й ущільнює шви між пластинами п'єзостовпа. Аеростатичні регулятори забезпечують зміну відносного тиску на виході підвідного каналу жиклера від критичного  $p_d/p_s = 0,528$  до  $p_d/p_s = 1$ .

Силове замикання рухомого вузла в напрямку, перпендикулярному напрямку переміщення, здійснюється двома плоскими аеростатичними опорами, утвореними бічними стінками 23 рухомого вузла (рис. 4), в яких виконані жиклери подачі газу, і бічними гранями основи напрямної. Стабілізацію положення рухомого вузла щодо нерухомої

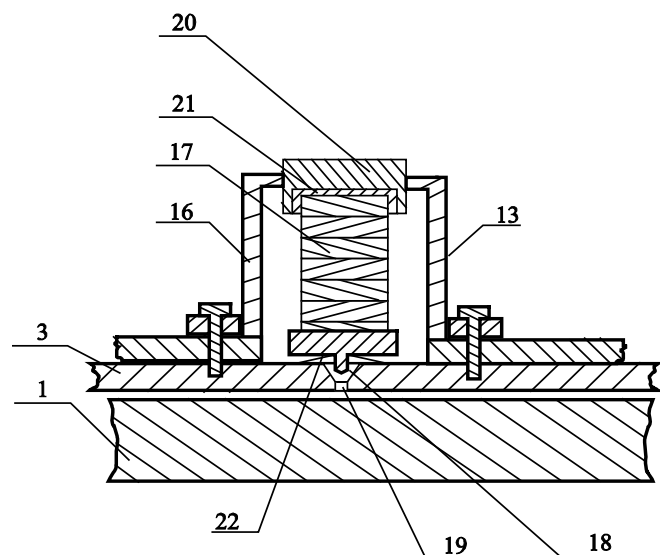


Рис. 3. Аеростатичний регулятор положення рухомого вузла

в просторі (базової) площини здійснює пристрій стабілізації положення рухомого вузла, роботу якого буде розглянуто нижче.

Похибка позиціонування рухомого вузла аеростатичної напрямної щодо нерухомої в просторі площини визначається такими факторами:

- неплоскістю граней основи напрямної. Так, неплоскість поверхні класу точності нуль може досягати чотирьох мікронів на 1 м довжини поверхні, а кут нахилу окремих ділянок граней основи напрямної змінюється за величиною і знаком. Це призводить до зміщення по висоті й перекосу рухомого вузла щодо нерухомої в просторі площини;

- деформацією поля тиску в газовому шарі аеростатичної напрямної через похибки розмірів і форми її виготовлення. Під час переміщення рухомого вузла ці похибки неперервно деформують поле тиску в газовому шарі напрямної. Деформація цього поля спричинює малі зміни величини й напрямку головного вектора сил тиску в газовому шарі, що призводить до додаткового зміщення і перекосу рухомого вузла;

- впливом зовнішнього навантаження на рухомий вузол, що спричинює зміну величин зазорів у плоских аеростатичних опорах на-

прямної.

На рис. 5 зображено прецизійний двокоординатний верстат, до складу формотворної системи якого входить аеростатична напрямна з установленим на ній аеростатичним електрошпинделем.

Нехай система координат  $OXYZ$  пов'язана з основою напрямної, а вісь  $X$  збігається з напрямком переміщення рухомого вузла. Система координат  $O_1X_1Y_1Z_1$  жорстко пов'язана з рухомим вузлом, а її осі паралельні осям системи координат  $OXYZ$ . Стабілізація положення рухомого вузла аеростатичної напрямної в цьому випадку полягає в тому, щоб під час переміщення рухомого вузла по основі напрямної відстані від трьох точок рухомого вузла до площини  $XOY$  системи координат  $OXYZ$  зберігалися незмінними. За такі точки можуть бути прийняті центри основ перших датчиків у кожному з трьох блоків датчиків, установлених на рухомому вузлі.

Мікроповороти системи координат  $O_1X_1Y_1Z_1$ , пов'язаної з рухомим вузлом, навколо осі  $Z_1$  і її мікропереміщення в напрямку осей  $X_1$  і  $Y_1$  обумовлені навантаженням на рухомий вузол і деформацією поля тиску в газових шарах замикаючих плоских аеростатичних опор. Вертикальне зміщення системи координат  $O_1X_1Y_1Z_1$  у напрямку осі  $Z_1$  та її мікроповороти навколо осей  $X_1$  і  $Y_1$  також визначаються складовими зовнішнього навантаження й деформацією поля тиску в несучих плоских аеростатичних опорах. Дослідження, проведені на моделі балансу точності двокоординатного верстата [2; 3], показують, що вертикальне зміщення рухомого вузла трансформується в нормальну похибку положення точки на оброблюваній поверхні з коефіцієнтом передачі  $k \approx 1$ , а мікроповороти рухомого вузла навколо осі  $Z_1$  і його мікрозміщення по осях  $X_1$  і  $Y_1$  — з коефіцієнтом передачі  $k \ll 1$ . При обробці плоских поверхонь ці мікроповороти й мікрозміщення рухомого вузла не впливають на точність їхньої обробки. Виходячи з цього в аеростатичній напрямній

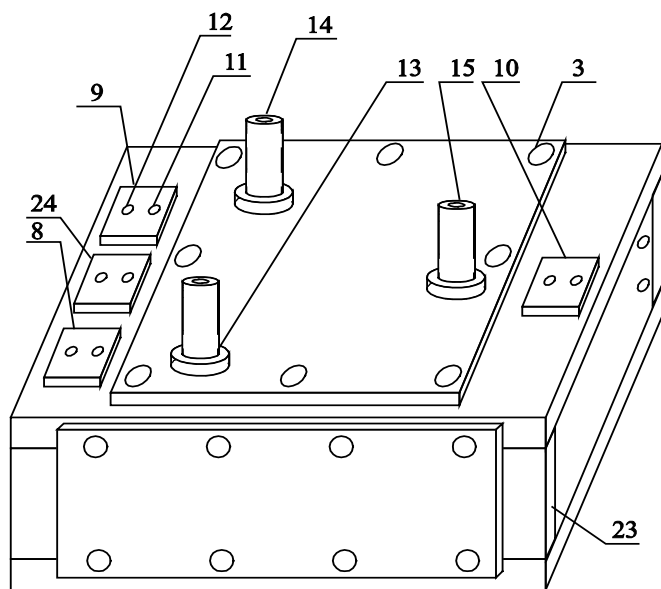
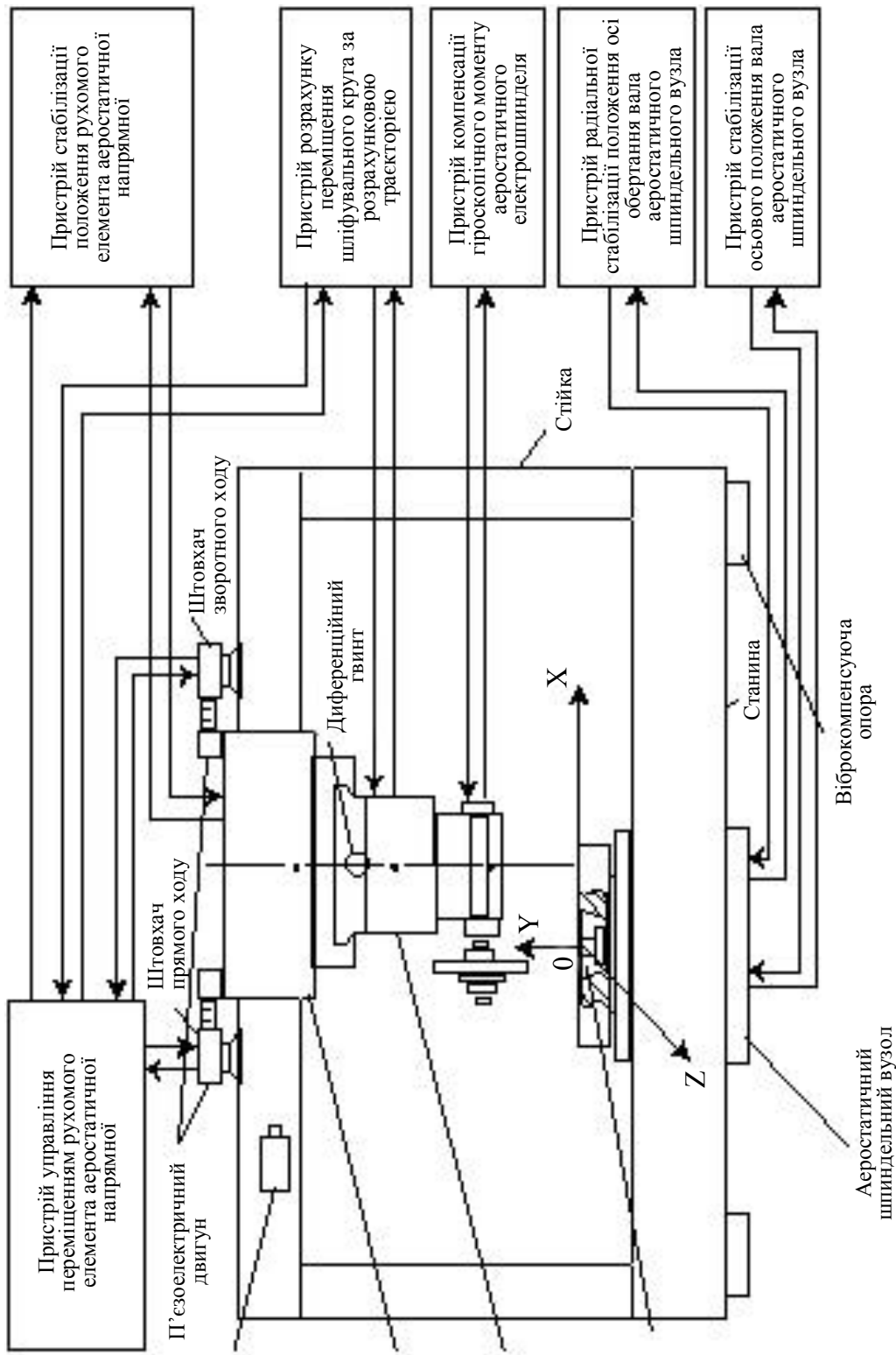


Рис. 4. Рухомий вузол прецизійної аеростатичної напрямної



- Ідентифікатор початкового положення рухомого елемента аеростатичної напрямної
- Рухомий елемент аеростатичної напрямної
- Пристрій лінійного позиціонування шліфувального круга по координаті  $Y$
- Пристрій суміщення нижньої точки шліфувального круга з віссю обертання вала аеростатичного шпindelного вузла

Рис. 5. Функціональна схема суперпрецизійного двокоординатного верстата алмазного мікроточіння

з метою спрощення її конструкції здійснюється стабілізація положення рухомого вузла тільки щодо нерухомої в просторі площини, паралельної площині  $XOY$  системи координат  $OXYZ$ , що запобігає її зміщенню по осі  $Z_1$  й мікроповороту навколо осей  $X_1$  і  $Y_1$ .

Нехай блоки датчиків на верхній стінці рухомого вузла встановлені так, що центри основ датчиків  $C_1^1$  і  $C_2^1$ ,  $C_1^2$  і  $C_2^2$ ,  $C_1^3$  і  $C_2^3$  першого, другого й третього блоків датчиків (рис. 6) лежать на паралельних прямих. Змістимо рухомий вузол по основі напрямної у вихідне для переміщення положення. Подамо на п'єзостовпи аеростатичних регуляторів положення рухомого вузла напруги початкових значень сигналів управління  $U_{ynp.}^1(0), U_{ynp.}^2(0), U_{ynp.}^3(0)$  такі, що під першими датчиками  $C_1^1, C_1^2, C_1^3$  встановлюються задані величини зазорів.

Площину  $Q$ , паралельну прямим, що проходять через центри основ датчиків при поданих початкових сигналах управління, і розташовану на довільній відстані від основ датчиків, прийmemo за площину стабілізації, або базову площину. Положення рухомого вузла у вихідному для переміщення положенні й при поданих на регулятори положення початкових сигналах управління, яке він займає щодо базової площини  $Q$ , приймається за його незбурене положення щодо цієї нерухомої в просторі площини.

Для збереження в процесі переміщення рухомого вузла сталості відстаней від центрів основ датчиків блоків датчиків до базової площини  $Q$  застосуємо спосіб опорних зазорів [4], що полягає в такому.

У разі незбуреного положення рухомого вузла щодо базової площини вимірюються й запам'ятовуються як опорні величини зазорів під першими датчиками  $C_1^1, C_1^2, C_1^3$  кожної групи датчиків  $Z_{1on.}^1(0) = Z_1^1(0)$ ;  $Z_{1on.}^2(0) = Z_1^2(0)$ ;  $Z_{1on.}^3(0) = Z_1^3(0)$  для установки рухомого вузла в незбурене положення на першій дискреті стабілізації. Рухомий вузол зміщується з по-

чаткового положення на величину дискреті стабілізації  $l$ . У результаті другі датчики кожної групи датчиків розташуються під тими ж точками основи напрямної, над якими розташовувалися перші датчики в початковому положенні рухомого вузла. Оскільки центри основ перших і других датчиків кожної групи датчиків розташовані на паралельних прямих, умовою збереження положення рухомого вузла щодо базової площини  $Q$  незалежно від рельєфу поверхні основи є рівність величин зазорів під другими датчиками після переміщення рухомого вузла на дискрету стабілізації  $l$  величинам відповідних опорних зазорів

$$\begin{aligned} Z_2^1(1) &= Z_{1on.}^1(0); \\ Z_2^2(1) &= Z_{1on.}^2(0); \\ Z_2^3(1) &= Z_{1on.}^3(0). \end{aligned} \quad (1)$$

Подачею сигналів управління  $U_{ynp.}^1(1); U_{ynp.}^2(1); U_{ynp.}^3(1)$  на аеростатичні регулятори положення на першій дискреті стабілізації під другими датчиками величин зазорів встановлюються величини зазорів, рівні опорним зазорам згідно з (1). У результаті рухомий вузол буде встановлено в незбурене положення щодо площини  $Q$ .

Вимірюються й запам'ятовуються як опорні зазори  $Z_{1on.}^1(1); Z_{1on.}^2(1); Z_{1on.}^3(1)$  під першими датчиками для установки рухомого елемента в незбурене положення на другій дискреті стабілізації  $Z_2^1(2) = Z_{1on.}^1(1)$ ;  $Z_2^2(2) = Z_{1on.}^2(1)$ ;  $Z_2^3(2) = Z_{1on.}^3(1)$ .

Ці установки й виміри виконуються на кожній дискреті стабілізації до переміщення рухомого елемента в кінцеве положення. У результаті буде сформовано масив опорних зазорів, що забезпечують на дискретах стабілізації установку рухомого вузла в незбурене положення. У процесі роботи на кожній дискреті стабілізації поточні величини зазорів під першими датчиками кожного блоку датчиків порівнюються з відповідними величинами опорних зазорів для даної дискреті стабілізації.

У разі відхилення поточних величин зазорів від відповідних опорних зазорів формуються сигнали управління  $U_{\text{упр.}}^1(j)$ ;  $U_{\text{упр.}}^2(j)$ ;  $U_{\text{упр.}}^3(j)$ , що запобігають зміщенню рухомого елемента щодо базової площини  $Q$ .

**Стабілізація положення рухомого вузла прецизійної аеростатичної напрямної за способом опорних зазорів.** Реалізація способу опорних зазорів для стабілізації положення рухомого вузла щодо базової площини  $Q$  (див. рис. 6) потребує попередньої установки основ датчиків величин зазорів блоків датчиків на рухомому вузлі напрямної в одну площину, паралельну площині  $Q$ . Тотожною установці основ датчиків в одну площину є установка центрів основ датчиків кожного блоку датчиків на прямі, паралельні площині  $Q$ .

Установка основ датчиків блоків датчиків в одну площину може бути виконана різними способами, наприклад, за допомогою інтерфе-

рометра для контролю площин [4], які дають можливість установити основи датчиків в одну площину з похибкою  $\delta \approx 0,03$  мкм. Використання методу *пробного скла* дає змогу зменшити цю похибку до 0,006 мкм.

Установка основ датчиків в одну площину також може бути виконана за еталонною площиною. Для цього верхня стінка рухомого вузла накладається на еталонну площину. Датчики встановлюються з однаковими зазорами щодо еталонної площини.

Установка центрів основ датчиків блоків датчиків на паралельні прямі може бути виконана автономно без залучення додаткового устаткування. Вона застосовується на властивості способу стабілізації положення рухомого вузла лінійної напрямної по опорних зазорах. Нехай осі симетрії датчиків двох блоків датчиків, установлених на рухомому вузлі напрямної, лежать у вертикальній

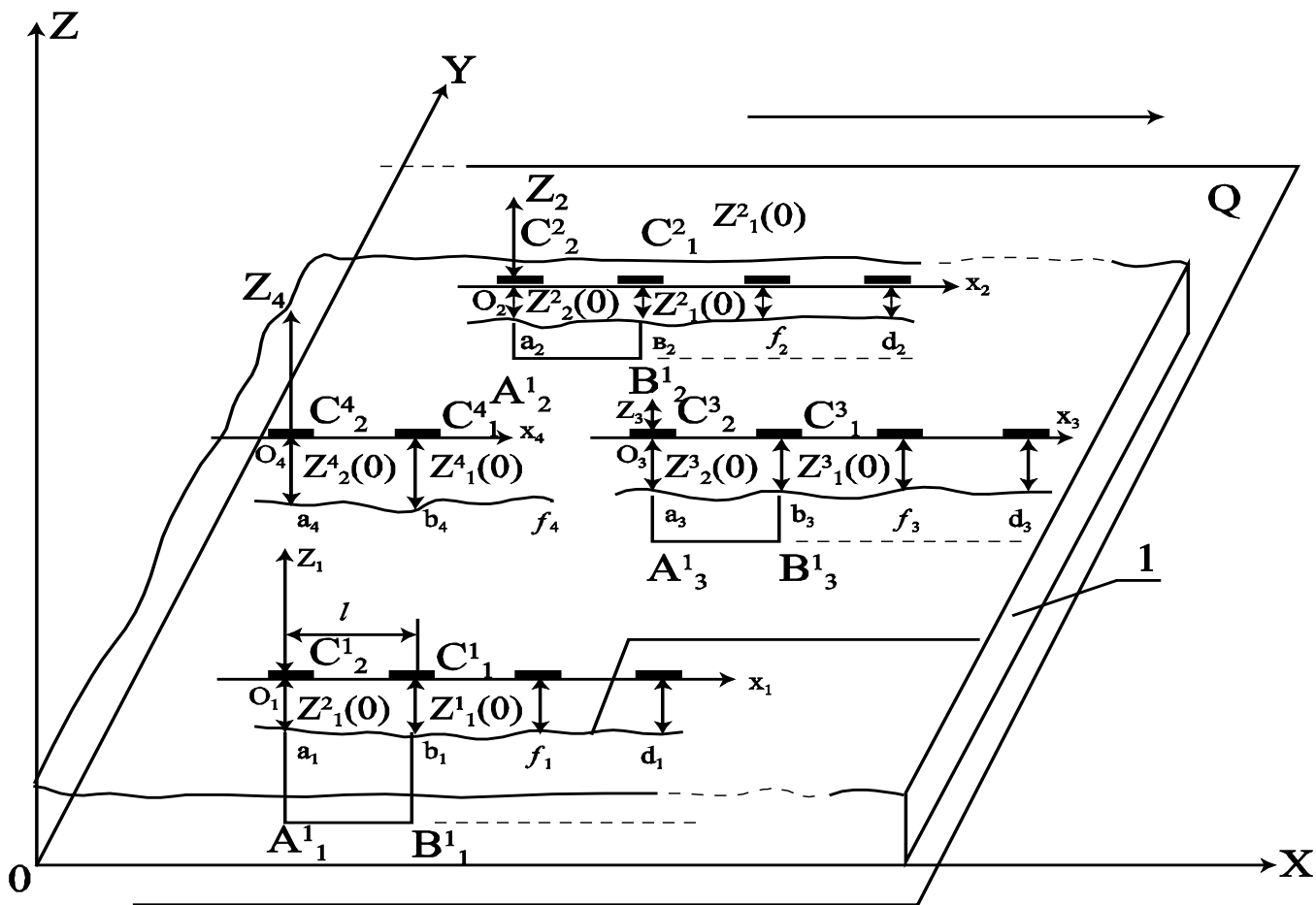


Рис. 6. Стабілізація положення рухомого вузла прецизійної аеростатичної напрямної за способом опорних зазорів

площині, паралельній напрямку переміщення рухомого вузла. Центри основ датчиків цих блоків датчиків лежать на одній прямій або попарно на паралельних прямих. У вихідному для переміщення положенні рухомого вузла напрямної проведемо в просторі пряму  $M$ , паралельну прямим, на яких лежать центри основ датчиків блоків датчиків. З вихідного положення рухомий вузол переміщується вправо з дискретою стабілізації  $l$ . Якщо на кожній  $j$ -й дискреті під другими датчиками блоків датчиків встановлюються зазори, рівні опорним, обмірюваним на  $(j-1)$ -й дискреті стабілізації рухомого вузла під першими датчиками, центри основ двох будь-яких датчиків, установлених у різних блоках датчиків, переміщуються по прямій або прямим, паралельним прямій  $M$ .

Для реалізації цієї властивості способу в процесі установки центрів основ датчиків на паралельні прямі на верхній стінці рухомого вузла додатково встановлюється четвертий блок датчиків 24 з датчиками  $C_1^4$  й  $C_2^4$  (див. рис. 4). Осі симетрії датчиків  $C_1^4$  і  $C_2^4$ ,  $C_1^3$  і  $C_2^3$  лежать в одній площині, що проходить через середню лінію верхньої стінки рухомого вузла. Відстань між першими датчиками  $C_1^3$  й  $C_1^4$  третього й четвертого блоків датчиків дорівнює  $L$  і кратна дискреті стабілізації  $l$ .

У процесі установки центрів основ датчиків на паралельні прямі скористаємося ще однією очевидною властивістю способу опорних зазорів. Нехай на рухомому вузлі напрямної встановлено чотири блоки датчиків. Центри основ датчиків трьох блоків датчиків попарно встановлені на прямі, паралельні між собою й паралельні площині стабілізації  $Q$ . Отже, у кожному блоці датчиків відстані від центрів основ датчиків до площини стабілізації  $Q$  рівні між собою. Пряма, що проходить через центри основ датчиків четвертого блоку датчиків, не паралельна прямим, що проходять через центри основ перших трьох блоків датчиків. Тому відстані від центрів основ четвертого блоку датчиків до площини  $Q$  не

рівні, а їхня різниця становить  $\Delta r$ .

Установимо рухомий вузол у вихідне для переміщення положення. Перемістимо його над основою напрямної, стабілізуючи його положення щодо площини  $Q$  за способом опорних зазорів. Для стабілізації використовуються величини опорних зазорів, обмірювані під датчиками перших трьох блоків датчиків, центри основ яких установлені на паралельні прямі. Тоді на кожній  $j$ -й дискреті стабілізації рухомого вузла різниця між величиною зазору  $Z_2^4(j)$  під другим датчиком четвертого блоку датчиків і величиною зазору  $Z_1^4(j-1)$  під першим датчиком цього блоку датчиків на  $(j-1)$ -й дискреті стабілізації є сталою, тобто,  $Z_2^4(j) - Z_1^4(j-1) = \pm \Delta r = \text{const}$ . Установка центрів основ датчиків рухомого вузла аеростатичної напрямної на паралельні прямі виконується в такій послідовності:

- рухомий вузол встановлюється в середнє за довжиною переміщення положення;

- подачею сигналів управління  $U_{\text{упр.}}^1(0), U_{\text{упр.}}^2(0), U_{\text{упр.}}^3(0)$  відповідно на аеростатичні регулятори положення рухомого вузла 13, 14, 15 (див. рис. 4) рухомий вузол зміщується по висоті зазору, і під першими датчиками  $C_1^1; C_1^3; C_1^4$  величин зазорів першого 8, третього 10 і четвертого 24 блоків датчиків встановлюються величини зазорів  $Z_1^1(0) = Z_1^3(0) = Z_1^4(0)$ , рівні розрахунковій  $Z_{\text{розр.}}$  величині зазору в несучій плоскій аеростатичній опорі, утвореній верхньою стінкою рухомого вузла й прилягаючою до неї гранню основи напрямної. Не змінюючи положення рухомого вузла, зміщують другі датчики по висоті зазору й встановлюють їх щодо верхньої грані основи із зазорами, рівними величинам зазорів під першими датчиками:  $Z_2^1(0) = Z_2^3(0) = Z_2^4(0) = Z_{\text{розр.}}$ . Датчики величин зазорів  $C_1^2; C_2^2$  другого блоку датчиків 9 зміщуються по висоті зазору й встановлюються щодо основи напрямної із зазорами, рівними розрахунковій величині зазору:  $Z_1^2(0) = Z_2^2(0) = Z_{\text{розр.}}$ . Таким чином, основи датчиків величин зазорів з похибкою виготов-

лення верхньої грані основи напрямної будуть установлені в одну площину;

• рухомий елемент установлено у середнє за довжиною переміщення положення. На регулятори положення рухомого вузла подані сигнали управління  $U_{ynp.}^1(0), U_{ynp.}^2(0), U_{ynp.}^3(0)$ .  
Всі датчики величин зазорів щодо поверхні основи напрямної встановлені із зазорами, рівними розрахунковій величині зазору, тобто  $Z_1^1(0) = Z_2^1(0) = Z_1^2(0) = Z_2^2(0) = Z_1^3(0) = Z_2^3(0) = Z_1^4(0) = Z_2^4(0) = Z_{розр.}$ .

Уведемо нерухомі системи координат  $X_3O_3Z_3$  і  $X_4O_4Z_4$  (див. рис. 6) у такий спосіб. Початки цих систем координат сумістимо з центрами основ других датчиків  $C_2^3$  і  $C_2^4$  третього й четвертого блоків датчиків при середньому за довжиною переміщення положенні рухомого вузла й розрахункових величин зазорів під датчиками величин зазорів. Осі  $X_3$  і  $X_4$  проведемо через центри основ перших датчиків цих блоків датчиків. Площини систем координат сумістимо з вертикальною площиною. Величини зазорів  $Z_1^3(0) = Z_1^4(0) = Z_{розр.}$  у вихідному (середньому за величиною переміщення) положенні рухомого вузла приймемо як величини опорних зазорів  $Z_{1on.}^3(0)$  і  $Z_{1on.}^4(0)$ . Рухомий вузол з вихідного положення перемістимо вправо на величину дискрети стабілізації  $l$ .

Подачею сигналів управління  $U_{ynp.}^1(1) = U_{ynp.}^1(0) \pm \Delta U_1$ ,  $U_{ynp.}^2(1) = U_{ynp.}^2(0) \pm \Delta U_1$ ,  $U_{ynp.}^3(1) = U_{ynp.}^3(0) \pm \Delta U_1$  рухомий вузол без перекосу зміщується по висоті зазору. Під другим датчиком  $C_2^3$  третього блоку датчиків, а потім під другим датчиком  $C_2^4$  четвертого блоку датчиків установлюються величини зазорів, рівні опорним:  $Z_2^3(1) = Z_{1on.}^3(0)$ ,  $Z_2^4(1) = Z_{1on.}^4(0)$ . Зберігаючи положення рухомого вузла, вимірюються й запам'ятовуються як опорні величини зазорів під першими датчиками цих блоків датчиків  $Z_{1on.}^3(1) = Z_1^3(1)$ ,  $Z_{1on.}^4(1) = Z_1^4(1)$ .

Рухомий вузол переміщується на другу дискрету стабілізації. У тій же послідовності під другими датчиками  $C_2^3$  й  $C_2^4$  подачею

сигналів управління  $U_{ynp.}^1(2) = U_{ynp.}^1(1) \pm \Delta U_1$ ,  $U_{ynp.}^2(2) = U_{ynp.}^2(1) \pm \Delta U_1$ ,  $U_{ynp.}^3(2) = U_{ynp.}^3(1) \pm \Delta U_1$  установлюються величини зазорів, рівні опорним  $Z_2^3(2) = Z_{1on.}^3(1)$ ;  $Z_2^4(2) = Z_{1on.}^4(1)$ . Не змінюючи положення рухомого вузла, вимірюються й запам'ятовуються як опорні величини зазорів під першими датчиками цих блоків датчиків:  $Z_{1on.}^3(2) = Z_1^3(2)$ ;  $Z_{1on.}^4(2) = Z_1^4(2)$ . Ці установки й виміри виконуються на  $J$  дискретах до переміщення рухомого вузла на відстань  $L$ . У результаті центр основи датчика  $C_1^4$  розміститься над точкою поверхні основи напрямної, над якою у вихідному положенні рухомого вузла розміщувався центр основи датчика  $C_1^3$ . У підсумку в системі координат  $X_4O_4Z_4$  маємо множину величин опорних зазорів  $Z_{1on.}^4(0), Z_{1on.}^4(1), Z_{1on.}^4(2), \dots, Z_{1on.}^4(J)$  від центра основи датчика  $C_1^4$  величини зазору до точок  $b_{f_p}, f_{f_p}, d_{f_p}, \dots$  поверхні основи напрямної по сліду переміщення центрів основ датчиків  $C_1^4$  і  $C_2^4$  (див. рис. 6). Точки  $b_{f_p}, f_{f_p}, d_{f_p}, \dots$  поверхні основи напрямної згладжуються прямою в системі координат  $X_4O_4Z_4$  за методом найменших квадратів. Для цього запишемо рівняння прямої, сума квадратів відстаней від точок  $b_{f_p}, f_{f_p}, d_{f_p}, \dots$  поверхні основи напрямної до якої мінімальна. Згідно з методом найменших квадратів

$$\sum_{j=1}^J [-Z_{1on.}^4(j) - (k_4 X_4(j) + b_4)]^2 = \min, \quad (2)$$

де  $X_4(j) = jl$ .

Систему рівнянь для розрахунку коефіцієнтів  $k_4$  і  $b_4$  рівняння згладжувальної прямої одержимо, прирівнявши до нуля похідні від (2) по  $k_4$  і  $b_4$ :

$$2 \sum_{j=1}^J [-Z_{1on.}^4(j) - (k_4 X_4(j) + b_4)] [-X_4(j)] = 0; \quad (3)$$

$$2 \sum_{j=1}^J [-Z_{1on.}^4(j) - (k_4 X_4(j) + b_4)] (-1) = 0. \quad (4)$$

Із (3) і (4) з урахуванням, що  $2 \neq 0$

$$(Z_{1on.}^4(1)X_4(0) + k_4 X_4^2(1) + b_4 X_4(1)) + \dots$$



$$\begin{aligned}
& + \left( Z_{1on.}^{(4)}(1)X_4(2) + k_4X_4^2(2) + b_4X_4(2) \right) + \dots \\
& + \left( Z_{1on.}^{(4)}(J)X_4(J) + k_4X_4^2(J) + b_4X_4(J) \right) = 0; \\
& \left( Z_{1on.}^{(4)}(1) + k_4X_4(1) + b_4 \right) + \left( Z_{1on.}^{(4)}(2) + k_4X_4(2) + b_4 \right) + \dots \\
& + \left( Z_{1on.}^{(4)}(J) + k_4X_4(J) + b_4 \right) = 0. \quad (5)
\end{aligned}$$

Після перетворення система (5) набуває вигляду

$$\begin{aligned}
& \left( X_4(0) + X_4(1) + \dots + X_4(J) \right) b_4 + \left( X_4^2(0) + X_4^2(1) + \dots \right. \\
& \quad \left. + X_4^2(J) \right) k_4 = \\
& = Z_{1on.}^{(4)}(0)X_4(0) + Z_{1on.}^{(4)}(1)X_4(1) + \dots \\
& \quad + Z_{1on.}^{(4)}(J)X_4(J); \quad (6)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& jb_4 + \left( X_4(0) + X_4(1) + \dots + X_4(J-1) \right) k_4 = \\
& = Z_{1on.}^{(4)}(0) - Z_{1on.}^{(4)}(1) + \dots + Z_{1on.}^{(4)}(J-1).
\end{aligned}$$

Звідки знаходимо значення  $k_4$  і  $b_4$ .

Повернемо рухомий вузол у середнє за довжиною переміщення положення. На регулятори положення рухомого вузла подамо сигнали управління  $U_{ynp.}^1(0); U_{ynp.}^2(0); U_{ynp.}^3(0)$ , а під першими датчиками  $C_1^1, C_1^2, C_1^3$  встановимо розрахункові величини зазорів. Рухомий вузол над поверхнею основи напрямної займе те положення, яке він займав перед початком переміщення. Величини зазорів  $Z_2^3(0) = Z_2^4(0) = Z_{роз}$  прийемо як величини опорних зазорів  $Z_{2on.}^3(0)$  і  $Z_{2on.}^4(0)$ . Перемістимо рухомий вузол вліво на величину дискрети стабілізації  $l$ . Подачею сигналів управління  $U_{ynp.}^1(1) = U_{ynp.}^1(0) \pm \Delta U_1$ ;  $U_{ynp.}^2(1) = U_{ynp.}^2(0) \pm \Delta U_1$ ;  $U_{ynp.}^3(1) = U_{ynp.}^3(0) \pm \Delta U_1$  під першим датчиком  $C_1^4$  четвертого блоку датчиків, а потім під першим датчиком  $C_1^3$  третього блоку датчиків установлюють величини зазорів, рівні опорним:  $Z_1^4(1) = Z_{2on.}^4(0)$ ;  $Z_1^3(1) = Z_{2on.}^3(0)$ . Не змінюючи положення рухомого вузла, вимірюються й запам'ятовуються як опорні величини зазорів під другими датчиками цих блоків датчиків  $Z_{2on.}^3(1) = Z_2^3$ ;  $Z_{2on.}^4(1) = Z_2^4$ .

Рухомий вузол переміщується на другу дискрету стабілізації. У тій же послідовності під першими датчиками  $C_1^3$  й  $C_1^4$  подачею сигналів управління  $U_{ynp.}^1(2) = U_{ynp.}^1(1) \pm \Delta U_1$ ;  $U_{ynp.}^2(2) = U_{ynp.}^2(1) \pm \Delta U_1$ ;  $U_{ynp.}^3(2) = U_{ynp.}^3(1) \pm \Delta U_1$  установлюються величини зазорів, рівні опорним  $Z_1^4(2) = Z_{2on.}^4(1)$ ;  $Z_1^3(2) = Z_{2on.}^3(1)$ . Не змінюючи положення рухомого вузла, вимірюють і запам'ятовують як опорні величини зазорів під другими датчиками цих блоків датчиків  $Z_{2on.}^3(2) = Z_2^3(2)$ ;  $Z_{2on.}^4(2) = Z_2^4(2)$ . Як і в попередньому випадку ці установки й виміри виконуються на  $J$  дискретах до переміщення рухомого елемента на відстань  $L$ . У результаті центр основи датчика  $C_2^3$  розміститься над точкою поверхні основи напрямної, над якою у вихідному положенні рухомого вузла розміщався центр основи датчика  $C_2^4$ . У системі координат  $X_3O_3Y_3$  одержимо множину величин опорних зазорів  $Z_{2on.}^3(0), Z_{2on.}^3(1), Z_{2on.}^3(2), \dots, Z_{2on.}^3(J)$  від центра основи датчика  $C_2^3$  величини зазору до точок поверхні основи напрямної по сліду переміщення центрів основ датчиків  $C_1^3$  і  $C_2^3$ . Точки поверхні основи напрямної в системі координат  $X_3O_3Y_3$  згладжуються за методом найменших квадратів, згідно з яким

$$\sum_{j=1}^J \left[ -Z_{2on.}^3(j) - (k_3X_3(j) + b_3) \right]^2 = \min. \quad (7)$$

Систему рівнянь для розрахунку коефіцієнтів  $k_3$  і  $b_3$  рівняння згладжувальної прямої одержимо, прирівнявши до нуля похідні від (7) по  $k_3$  і  $b_3$ :

$$\begin{aligned}
& 2 \sum_{j=1}^J \left[ -Z_{2on.}^3(j) - (k_3X_3(j) + b_3) \right] \left[ -X_3(j) \right] = 0; \\
& 2 \sum_{j=1}^J \left[ -Z_{2on.}^3(j) - (k_3X_3(j) + b_3) \right] (-1) = 0. \quad (8)
\end{aligned}$$

Система рівнянь для обчислення  $k_3$  і  $b_3$ :

$$\begin{aligned}
& \left( X_3(0) + X_3(1) + \dots + X_3(J-1) \right) b_3 + \left( X_3^2(0) + \right. \\
& \quad \left. + X_3^2(1) + \dots + X_3^2(J-1) \right) k_3 = \\
& = Z_{2on.}^3(0)X_3(0) + Z_{2on.}^3(1)X_3(1) + \dots
\end{aligned}$$

$$+ Z_{2on}^{(3)}(J-1)X_3(J-1);$$

$$jb_3 + (X_3(0) + X_3(1) + \dots + X_3(J-1))k_3 = \\ = -Z_{2on}^{(3)}(0) - Z_{2on}^{(3)}(1) + \dots + Z_{2on}^{(3)}(J-1).$$

Рівняння прямих, що згладжують точки поверхні основи напрямної, будувалися за величинами опорних зазорів, обмірюваних під датчиками  $C_2^3$  й  $C_1^4$  третього й четвертого блоків датчиків над тими самими точками цієї поверхні. При цьому рух рухомого вузла напрямної в обидва боки від вихідного положення починався при тому самому положенні рухомого вузла щодо основи напрямної. Оскільки прямі  $Z_3 = k_3 X_3 + b_3$  й  $Z_4 = k_4 X_4 + b_4$  згладжують у системах координат  $X_3 O_3 Y_3$  і  $X_4 O_4 Y_4$  одні й ті ж точки поверхні основи напрямної, рівність коефіцієнтів  $k_3$  і  $k_4$  означає, що осі  $X_3$  і  $X_4$  нерухомих систем координат  $X_3 O_3 Y_3$  і  $X_4 O_4 Y_4$ , на яких у вихідному положенні рухомого вузла лежать центри основ датчиків третього й четвертого блоків датчиків відповідно, паралельні між собою. Центр основи датчика  $C_2^3$  переміщався по осі  $X_3$ , а центр основи датчика  $C_1^4$  – по осі  $X_4$  систем координат  $X_3 O_3 Y_3$  і  $X_4 O_4 Y_4$  відповідно. Тому центри основ третього й четвертого блоків датчиків попарно лежать на паралельних прямих. Якщо додатково виконується умова  $b_3 = b_4$ , то центри основ датчиків лежать на одній прямій. Вираз  $k_3 \neq k_4$  означає, що осі  $X_3$  і  $X_4$  систем координат  $X_3 O_3 Y_3$  і  $X_4 O_4 Y_4$ , що проходять через центри основ третього й четвертого блоків датчиків, не паралельні.

Для установки центрів основ датчиків на паралельні прямі варіюється положення одного з датчиків  $C_1^3; C_2^3; C_1^4; C_2^4$  по висоті зазору. На кожному кроці варіації рухомий вузол згідно з викладеною вище методикою зміщується в обидва боки щодо середнього за довжиною переміщення положення. Множини опорних зазорів  $Z_{1on}^4(0), Z_{1on}^4(1), Z_{1on}^4(2), \dots, Z_{1on}^4(J-1)$  і  $Z_{2on}^3(0), Z_{2on}^3(1), Z_{2on}^3(2), \dots, Z_{2on}^3(J-1)$ , згладжуються прямими згідно з (6) і (8). Методом по-

слідовних наближень досягається виконання  $k_3 = k_4$ .

На наступному етапі установки забезпечується виконання  $k_3 = k_4 = 0$ . Якщо  $k_3 = k_4 \neq 0$ , то паралельні прямі, що проходять через центри основ датчиків  $C_1^3; C_2^3; C_1^4; C_2^4$  і по яких у процесі стабілізації положення рухомого вузла за способом опорних зазорів переміщуються центри основ датчиків, не паралельні згладжувальній прямій і становлять з нею кут  $\alpha = \arctg k_3$ . Отже, у процесі переміщення рухомого вузла змінюються величини зазорів у несучих плоских аеростатичних опорах. Зміна величин зазорів може спричинити зниження жорсткості цих опор. Для повороту паралельних прямих (осей  $X_3$  і  $X_4$  систем координат  $X_3 O_3 Y_3$  і  $X_4 O_4 Y_4$ ) на кут  $\alpha$  у положення, при якому вони будуть паралельні згладжувальній прямій, зменшується висота установки перших датчиків  $C_1^3$  і  $C_1^4$  щодо згладжувальної прямої на  $\Delta h = l \operatorname{tg} \alpha$ , якщо  $k_3 = k_4 > 0$  або збільшується на  $\Delta h$  у протилежному випадку.

Наступний етап – установка центрів основ датчиків третього й четвертого блоків датчиків на одну пряму, паралельну згладжувальній прямій. Обчислюється  $\Delta h_1 = |b_3| - |b_4|$ . Якщо  $\Delta h_1 > 0$ , висота установки датчиків  $C_1^3$  і  $C_2^3$  третього блоку датчиків зменшується на  $\Delta h_1$ , у протилежному випадку — збільшується на  $\Delta h_1$ .

Установка центрів основ датчиків  $C_1^1; C_2^1; C_1^2; C_2^2$  першого й другого блоків датчиків попарно на паралельні прямі, паралельні згладжувальній прямій або прямих, на якій лежать центри основ датчиків третього й четвертого блоків датчиків, виконується в такій послідовності: рухомий вузол установлюється в середнє за довжиною переміщення положення; подачею сигналів управління  $U_{ypr.}^1(0); U_{ypr.}^2(0); U_{ypr.}^3(0)$  під датчиками всіх чотирьох блоків датчиків установлюються величини зазорів, рівні розрахунковій величині зазору несучої плоскої аеростатичної опори; величини зазорів під першими датчиками першого, третього й четвертого блоків датчиків приймають-

ся за опорні:  $Z_{1on}^1(0) = Z_1^1(0)$ ;  $Z_{1on}^3(0) = Z_1^3(0)$ ;  $Z_{1on}^4(0) = Z_1^4(0)$ . Уведемо дві нерухомі в просторі прямі, що лежать у площинах, які проходять через осі симетрії датчиків  $C_1^1$ ;  $C_2^1$ ;  $C_1^2$ ;  $C_2^2$  першого й другого блоків і паралельні раніше визначеній прямій, що згладжує поверхню основи напрямної по сліду центрів основ датчиків третього й четвертого блоків датчиків. Нагадаємо, що перший і другий блоки датчиків розташовані симетрично середній лінії рухомого вузла, по якій встановлені третій і четвертий блоки датчиків. Рухомий вузол зміщується вправо на величину дискрети стабілізації  $l$ . На першій дискреті стабілізації під другими датчиками  $C_2^3$ ;  $C_2^4$ , а потім під датчиком  $C_2^1$  встановлюються величини зазорів, рівні опорним:  $Z_2^1(1) = Z_{1on}^1(0)$ ;  $Z_2^3(1) = Z_{1on}^3(0)$ ;  $Z_2^4(1) = Z_{1on}^4(0)$ .

Нехай, наприклад, у вихідному положенні рухомого вузла датчик  $C_1^1$  щодо введеної нерухомої прямої встановлено нижче датчика  $C_2^1$ , що легко встановити. Тоді на першій дискреті стабілізації після виконання установки  $Z_2^1(1) = Z_{1on}^1(0) = Z_{розр}$ . висота датчика  $C_1^1$  першого блоку датчиків щодо нерухомої в просторі прямої, що лежить у площині установки цих датчиків, зменшиться на  $\Delta Z$  ( $\Delta Z$  — величина перевищення висоти установки датчика  $C_2^1$ ). У разі збереження незмінними величин зазорів  $Z_2^3(1) = Z_{1on}^3(0) = Z_{розр}$ . і  $Z_2^4(1) = Z_{1on}^4(0) = Z_{розр}$ . рухомий вузол повернеться навколо прямої, на яку встановлені центри основ датчиків третього й четвертого блоку датчиків. Висота датчика  $C_1^2$  другого блоку датчиків щодо нерухомої в просторі прямої, що лежить у площині установки цих датчиків, збільшиться на  $\Delta Z$ . Змістимо другий датчик  $C_2^2$  другого блоку датчиків по висоті зазору й установимо під ним зазор  $Z_2^2(1) = Z_{розр}$ , що дорівнює величині зазору під першим датчиком  $C_1^2$  у вихідному положенні рухомого вузла. У результаті на першій дискреті стабілізації (щодо середнього за довжиною переміщення положення рухомого вузла) відносно введених нерухомих прямих датчик  $C_1^1$  перебуває нижче датчика

$C_2^1$  на  $\Delta Z$ , а датчик  $C_1^2$  вище датчика  $C_2^2$  на  $\Delta Z$ .

Із кроком  $\Delta Z_1 \ll \Delta Z$  будемо збільшувати висоту датчика  $C_1^1$  і зменшувати висоту датчика  $C_1^2$ . На кожному кроці зміни висоти установки датчиків рухомий вузол встановлюється у вихідне положення. Під датчиками  $C_2^3$ ;  $C_2^4$  встановлюються розрахункові величини зазорів  $Z_2^3(0) = Z_2^4(0) = Z_{розр}$ . Величини зазорів під першими датчиками  $Z_1^1(0) = Z_1^3(0) = Z_1^4(0)$  першого, третього й четвертого блоків датчиків приймаються за опорні. Рухомий вузол зміщується вправо на дискрету стабілізації  $l$ . Під другими датчиками  $C_2^1$ ;  $C_2^3$ ;  $C_2^4$  встановлюються величини зазорів, рівні опорним. Вимірюються й порівнюються величини зазорів  $Z_1^1$  і  $Z_2^2$ . Якщо  $Z_1^1 \neq Z_2^2$ , змінюються висоти датчиків  $C_1^1$  і  $C_1^2$ . Рухомий вузол встановлюється у вихідне положення. Виконуються наведені вище операції. Якщо на черговому кроці зміни зазорів під датчиками  $C_1^1$  і  $C_1^2$  виконується  $Z_1^1 = Z_2^2$ , датчики  $C_1^1$ ,  $C_2^1$  та  $C_1^2$ ,  $C_2^2$  попарно перебувають на одній висоті над уведеними нерухомими прямими. Отже, центри основ цих датчиків лежать на прямих, паралельних згладжувальній прямій. Стабілізація положення рухомого вузла щодо нерухомої в просторі площини  $Q$ , паралельній прямим, що проходять через центри основ пар датчиків блоків датчиків, може здійснюватися за способом опорних зазорів.

Якщо при роботі напрямної вихідним для переміщення положенням рухомого вузла є крайнє ліве положення, необхідно визначити величини зазорів під датчиками першого, другого й третього блоків датчиків, при яких у процесі переміщення рухомого вузла в несучій плоскій аеростатичній опорі зберігається робоча величина зазору. Для цього рухомий вузол встановлюється в середнє за довжиною переміщення положення. Під датчиками  $C_2^1$ ;  $C_2^3$ ;  $C_2^4$  встановлюються і приймаються за опорні розрахункові величини зазорів. Рухомий вузол зміщується вліво на величину дискрети стабілізації  $l$ . Під першими датчиками  $C_1^1$ ;  $C_1^3$ ;  $C_1^4$  встановлюються зазори,

рівні опорним:  $Z_1^1(1) = Z_{2on.}^1(0)$ ;  $Z_1^3(1) = Z_{2on.}^3(0)$ ;  $Z_1^4(1) = Z_{2on.}^4(0)$ . Вимірюються й запам'ятовуються як опорні величини зазорів під другими датчиками цих блоків датчиків:  $Z_{2on.}^1(1) = Z_2^1(1)$ ;  $Z_{2on.}^3(1) = Z_2^3(1)$ ;  $Z_{2on.}^4(1) = Z_2^4(1)$ . Рухомий вузол зміщується на чергову дискрету стабілізації. Під першими датчиками встановлюються зазори, рівні відповідним опорним. Стабілізація положення рухомого вузла виконується до його переміщення у вихідне (крайнє ліве) положення. У вихідному положенні вимірюються й запам'ятовуються величини зазорів  $Z_1^1$ ;  $Z_1^2$ ;  $Z_1^3$  під першими датчиками першого, другого й третього блоків датчиків, які надалі використовуються як установчі для початкової установки рухомого вузла по висоті зазору.

Стабілізація положення рухомого вузла аеростатичної напрямної за способом опорних зазорів здійснюється в такій послідовності.

Отже, центри основ датчиків установлені на паралельні прямі або основи датчиків усіх блоків датчиків установлені в одну площину. Рухомий вузол установлено у вихідне для переміщення положення. Подачею сигналів управління  $U_{уп.}^1(0)$ ;  $U_{уп.}^2(0)$ ;  $U_{уп.}^3(0)$  під першими датчиками  $C_1^1$ ;  $C_1^2$ ;  $C_1^3$  встановлюються установні величини зазорів.

П'єзоелектричний двигун забезпечує дискретне переміщення рухомого вузла з установленим кроком переміщення  $m$ . Для переміщення рухомого вузла на дискрету стабілізації  $l$  п'єзодвигун виконує  $P = l/m$  кроків мікропереміщень рухомого вузла. Оскільки величини опорних зазорів, що забезпечують на  $j$ -й дискреті стабілізації установку рухомого вузла в незбурене положення, прив'язуються до дискрет стабілізації, потрібно точно визначити вихід рухомого вузла на  $j$ -ту дискрету стабілізації. Для цього необхідно виключити накопичення похибки установки рухомого вузла на дискрету стабілізації в міру його переміщення. П'єзоелектричний двигун, що переміщає рухомий вузол, через наявність внутрішніх шумів переміщає рухомий вузол

на кожний крок  $m$  мікропереміщення з кінцевою точністю. Наприклад, п'єзостовп штовхача під впливом навколишнього середовища відпрацьовує задану величину кроку переміщення з похибкою, а обмірювана величина кроку переміщення включає шум вимірника. Для забезпечення високої точності установки рухомого вузла на дискрету стабілізації величина переміщення рухомого вузла оцінюється лінійним дискретним фільтром Калмана.

Для реалізації оптимального лінійного дискретного фільтра Калмана, що забезпечує незміщену мінімальну середньоквадратичну помилку оцінювання вектора стану лінійної динамічної системи [5], попередньо виконуються такі операції:

- задається модель руху рухомого вузла напрямної;
- задається вектор стану лінійної динамічної системи (вектор параметрів переміщення рухомого вузла напрямної);
- модель руху подається в просторі станів, задаються початкове значення вектора стану і дисперсія помилки задавання початкового значення вектора стану;
- визначається матриця параметрів вимірника величини переміщення рухомого вузла напрямної;
- визначається матриця перетворення вхідного шуму (шуму системи переміщення рухомого вузла напрямної);
- задаються параметри вхідного шуму;
- задаються параметри шуму вимірника величини переміщення рухомого вузла напрямної.

Оскільки кожне мікропереміщення рухомого вузла однієї й тієї ж величини виконується за один і той же час, рух рухомого вузла напрямної (з точки зору його оцінки лінійним дискретним фільтром Калмана) буде еквівалентним рівномірному прямолінійному руху. Тоді модель руху рухомого вузла (точка  $O_1$  початку системи координат  $O_1X_1Y_1Z_1$ , жорстко пов'язаної з рухомим вузлом у нерухомій системі координат  $OXYZ$  (див. рис. 1)), опи-

сується диференційним рівнянням

$$\frac{d^2 X}{dt^2} = 0,$$

згідно з яким вектор стану лінійної динамічної системи має вигляд

$$\bar{X}^T = |X, \dot{X}|.$$

Модель руху рухомого вузла в просторі станів зображується у вигляді  $X = X_1$ ;  $\dot{X} = X_2$ . Як початкове значення оцінки вектора стану  $\bar{X}$  вибирається математичне очікування початкового значення вектора стану

$$\hat{\bar{X}}(0) = E[\bar{X}(0)] = \mu_x(0) = 0.$$

У розглянутому випадку  $\mu_x(0) = 0$ . Отже й дисперсія помилки завдання початкового значення вектора стану  $\bar{V}_{\bar{X}}(0) = 0$ .

Модель вимірювання задається лінійним алгебраїчним співвідношенням [5]:

$$\bar{Z}_j = H(j)\bar{X}(j) + \bar{V}(j),$$

де  $H(j)$  – матриця параметрів вимірника величини переміщення (одинична матриця);

$\bar{X}(j)$  – вектор вимірювання;

$\bar{V}(j)$  – дисперсія шуму вимірника.

Шум вимірника вважається білим з нульовим середнім і коваріаційною матрицею:

$$\text{cov}\{\bar{V}(k), \bar{V}(k)\} = \bar{V}_v(k)\delta_k(k-j).$$

Дискретні значення дисперсії шуму  $\bar{V}_v(k)$  вимірника розраховують за вибіркою випадкових чисел, використовуючи для цього паспортне значення середньоквадратичної помилки вимірника величини переміщення  $\sigma_{\text{вим}}$ .

Ураховуючи, що вектор виміру  $\bar{Z}(j)$  і вектор стану визначаються в одній системі координат, модель виміру в розгорнутому вигляді зображується співвідношенням

$$\bar{Z}(j) = \begin{vmatrix} X_1(j) \\ X_2(j) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} X_1(j) \\ X_2(j) \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} V_2(j) \\ V_2(j) \end{vmatrix}.$$

Модель управління задається лінійним векторним різницеvim рівнянням [5]:

$$\bar{X}(j+1) = \Phi(j+1, j)\bar{X}(j) + \Gamma(j)\bar{w}(j),$$

де  $\Phi(j+1, j)\bar{X}(j)$  – передбачення вектора стану на  $(j+1)$ -му кроці переміщення за значенням вектора стану на  $j$ -му кроці як результат незбуреного переміщення на один крок уперед

$$\bar{X}(j) = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} X_1 \\ X_2 \end{vmatrix}.$$

Оскільки  $X_1(j+1) = X_1(j) + \Delta t X_2$ , а  $X_2 = \text{const}$ , матриця  $\Phi(j+1, j)$  має вигляд

$$\Phi(j+1, j) = \begin{vmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Матриця  $\Gamma$  – одинична,  $\Gamma = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$ .

Оскільки  $X_1(j+1) = X(j) + \Delta t X_2 + V_{\omega_1}(j)$ , то  $X_2(j+1) = X_2 + V_{\omega_2}(j)$ , де  $\omega_1(j)$  й  $\omega_2(j)$  – складові вхідного шуму (шуму переміщення рухомого елемента) по компонентах вектора стану лінійної динамічної системи.

Вхідний шум вважають білим з нульовим середнім і коваріаційною матрицею

$$\text{cov}\{\bar{\omega}(k), \bar{\omega}(k)\} = \bar{V}_w \delta_k(k-j).$$

Дискретні значення дисперсії шуму  $\bar{V}_w$ , як і шуму  $\bar{V}_v$ , одержують за допомогою датчика випадкових чисел.

Наведені вище співвідношення дають змогу реалізувати для оцінки вектора параметрів переміщення рухомого вузла напрямної на кожному кроці переміщення дискретний лінійний фільтр Калмана, який у зібраному вигляді має вигляд [5]:

- початкові умови:

$$\hat{X}(0) = \mu_x(0) = 0, \bar{V}_x(0) = 0;$$

• модель управління:

$$\bar{X}(j+1) = \Phi(j+1, j)\bar{X}(j) + \Gamma(j)\bar{w}(j);$$

• модель спостереження:

$$\bar{Z}(j) = H(j)\bar{X}(j) + \bar{V}(j);$$

• рівняння для обчислення апостеріорної дисперсії:

$$\bar{V}(j+1, j) = \Phi(j+1, j)\bar{V}_x(j)\Phi^T(j+1, j) + \Gamma(j)\bar{V}_w(j)\Gamma^T(j);$$

• коефіцієнт підсилення фільтра:

$$\bar{k}(j) = \bar{V}_x(j, j-1)H^T(j) \left[ H(j)\bar{V}_x(j, j-1)H^T(j) + \bar{V}_v(j) \right]^{-1};$$

• алгоритм фільтрації:

$$\hat{X}(j) = \Phi(j, j-1)\hat{X}(j-1) + k(j) \left[ \bar{Z}(j) - H(j)\Phi(j, j-1)\hat{X}(j-1) \right].$$

Тут  $\hat{X}(j)$  – оцінка вектора стану лінійної динамічної системи на  $j$ -му кроці;

• рівняння для обчислення апостеріорної дисперсії:  $\bar{V}_x(j) = \left[ I - \bar{k}(j)H(j) \right] \bar{V}_x(j, j-1)$ .

У розв'язуваному завданні переміщення аеростатичного вузла напрямної здійснюється з постійним кроком мікропереміщення. Величина кроку мікропереміщення рухомого вузла дорівнює величині зазору, обмірюваного вимірником кроку мікропереміщення (під датчиком величини кроку мікропереміщення п'єзоелектричного двигуна). Уведемо масштаб часу такий, що кожний крок мікропереміщення аеростатичного вузла виконується за одиницю часу ( $t_k = 1$ ). Це дає змогу трактувати вимір  $j$ -го кроку мікропереміщення аеростатичного вузла як вимір швидкості його переміщення або вимір компонента  $X_2(j)$  вектора стану динамічної системи з дисперсією шуму  $V_{v2}$ , рівною дисперсії шуму вимірника величини кроку  $m$  мікропереміщення на  $j$ -му кроці мікропереміщення.

Компонента  $X_1(j)$  вектора стану не вимірюється, а формується в такий спосіб:

$$X_1(j) = \hat{X}_1(j-1) + m(j), \text{ де } \hat{X}_1(j-1) \text{ – оцінка}$$

величини переміщення аеростатичного вузла за  $(j-1)$  кроків мікропереміщень.

Прийнятому способу формування невимірюваного компонента  $X_1(j)$  вектора стану динамічної системи на  $j$ -му кроці фільтрації (оцінювання) відповідає дисперсія  $V_{v1}(j)$  помилки виміру цього компонента, рівна сумі апостеріорної дисперсії  $V_{\hat{x}_1}(j-1)$  помилки оцінки компоненти  $X_1$  вектора стану за  $(j-1)$  кроків мікропереміщень аеростатичного вузла й дисперсії  $V_{v2}(j)$  похибки виміру  $j$ -го кроку мікропереміщення (дисперсії помилки виміру компоненти  $X_2(j)$  вектора стану)  $V_{v1} = V_{\hat{x}_1}(j-1) + V_{v2}(j)$ .

Матриця дисперсії  $V_v(j)$  шуму виміру має вигляд

$$\bar{V}_{v1} = \begin{vmatrix} V_{\hat{x}_1}(j-1) + V_{v2}(j) & 0 \\ 0 & V_{v2}(j) \end{vmatrix}.$$

Аналіз фізичної сутності розв'язуваного завдання (*висока точність виміру кроку мікропереміщення*) дозволяє вважати шум виміру стабільним. Середньоквадратична похибка  $\sigma_{вим.}$  вимірника кроку мікропереміщення відома. Тоді  $V_{v2}(j) = \sigma_{вим.}^2 = \text{const}$ .

Як відомо, дисперсію  $\bar{V}_w$  вхідного шуму одержують або з аналізу фізичної сутності розв'язуваного завдання, або шляхом безпосереднього виміру з доцільною точністю.

Дисперсія вхідного шуму пристрою переміщення рухомого елемента лінійної напрямної може бути прийнята рівною, наприклад,  $\bar{V}_w = 4\bar{V}_v$ .

Матриця дисперсії вхідного шуму має вигляд

$$\bar{V}_w(j) = \begin{vmatrix} V_w & 0 \\ 0 & V_w \end{vmatrix}.$$

Висока точність переміщення аеростатичного вузла на величину дискрети переміщення  $m$  і висока стабільність цього переміщення дозволяють уважати вхідний шум сталим, тобто,  $\bar{V}_w(j) = \text{const}$ .

Обчислення дисперсії шуму за компонен-

тою  $X_2$  вектора стану виконується в такій послідовності:

- аеростатичний вузол з вихідного положення переміщується на  $N$  кроків із установленим кроком  $m$  мікропереміщення. Після закінчення кожного  $n$ -го кроку мікропереміщення  $k$  раз вимірюється величина  $m(n, k)$  кроку мікропереміщення й обчислюється його асимптотично незміщена оцінка:

$$\hat{m}(n) = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^K m(n, k);$$

- обчислюється за  $N$  спостереженнями середнє значення  $\bar{\Delta}$  величини кроку мікропереміщення

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \hat{m}(n);$$

- аеростатичний вузол установлюється у вихідне положення й повторно переміщується на  $N$  кроків з тим же кроком мікропереміщення  $m$ . На кожному кроці мікропереміщення для підвищення точності вимірника обчислюється його асимптотично незміщена оцінка  $\hat{m}(n)$ .

Обчислюється дисперсія шуму вимірника за компонентою  $X_2$  вектора стану

$$V_{\omega 2} = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \left[ \hat{m}(n) - \bar{\Delta} \right]^2.$$

У розглянутому варіанті фільтрації  $\Delta t = 1$ . Матриця  $\Phi(j+1)$  набуває вигляду:

$$\Phi(j+1, j) = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Фільтрація здійснюється в такій послідовності:

- задаються початкові умови;
- обчислюються:
  - апріорна дисперсія  $\bar{V}_{\hat{x}_1}(j+1, j)$  помилки фільтрації;
  - коефіцієнт підсилення фільтра  $\bar{k}(j)$ ;
  - оцінка вектора стану  $\hat{X}(j)$ ;

апостеріорна дисперсія  $V_{\hat{x}}(j)$ .

На першому кроці фільтрації як апріорна дисперсія приймається сума дисперсій вхідного шуму й шуму вимірника  $\bar{V}(1, 0) = \bar{V}_w + \bar{V}_{v, 2}$ .

Установка рухомого вузла на дискрету стабілізації виконується в такій послідовності.

Установлюється величина кроку  $m$  переміщення рухомого вузла п'єзоелектричним двигуном. Рухомий вузол з початкового положення переміщується із установленою величиною кроку переміщення на величину дискрету стабілізації  $l$ . На кожному кроці переміщення, починаючи з першого, з вимірника величини кроку переміщення зчитується код величини  $j$ -го кроку переміщення й додається до оцінки величини переміщення рухомого вузла за  $(j-1)$  попередніх кроків  $X_1(j) = \hat{X}_1(j-1) + m(j)$ . Здійснюється оцінювання вектора стану лінійної динамічної системи на  $j$ -му кроці переміщення дискретним лінійним фільтром Калмана. Одержують оцінку  $\hat{X}(j)$  вектора стану лінійної динамічної системи, отже, оцінку величини переміщення  $\hat{X}_1(j)$ , яка порівнюється з величиною  $l$  заданого переміщення рухомого вузла. Якщо  $\hat{X}_1(j) \neq l$ , на  $j$ -му кроці після одержання оцінки величини переміщення обчислюється різниця  $\Delta l = l - \hat{X}_1(j)$ . Якщо  $\Delta l < m$ , рухомий вузол зміщується на величину  $\Delta l$  і точно встановлюється на  $j$ -ту дискрету переміщення.

У процесі переміщення рухомого вузла на задану відстань  $L$  на кожній дискреті стабілізації з метою формування масиву величин опорних зазорів для установки рухомого вузла в незбурене положення щодо базової площини на всій довжині його переміщення визначаються величини опорних зазорів під першими датчиками кожного блоку датчиків. Для цього за наведеною вище методикою у вихідному для переміщення положенні рухомого вузла під датчиками блоків датчиків установлюються установочні величини зазорів  $Z_2^1(0) = Z_2^2(0) = Z_2^3(0) = Z_{yct}$ . Зазори  $Z_1^1(0)$ ;  $Z_1^2(0)$ ;  $Z_1^3(0)$  приймаються як

опорні зазори  $Z_{1on.}^1(0)$ ;  $Z_{1on.}^2(0)$ ;  $Z_{1on.}^3(0)$ .

Перемістивши рухомий вузол на першу дискрету стабілізації, вимірюють величини зазорів під другими датчиками  $Z_2^1(l)$ ;  $Z_2^2(l)$ ;  $Z_2^3(l)$  і порівнюють із величинами відповідних опорних зазорів  $Z_{1on.}^1(0)$ ;  $Z_{1on.}^2(0)$ ;  $Z_{1on.}^3(0)$ . Якщо рівності  $Z_2^1(l) = Z_{1on.}^1(0)$ ;  $Z_2^2(l) = Z_{1on.}^2(0)$ ;  $Z_2^3(l) = Z_{1on.}^3(0)$  не виконуються, подачею сигналів управління на регулятори положення рухомого вузла методом послідовних наближень під другими датчиками встановлюються величини зазорів, рівні опорним. У результаті рухомий вузол буде встановлено (на першій дискреті стабілізації) у незбурене положення щодо базової площини. Вимірюються величини зазорів  $Z_1^1(l) = Z_1^2(l) = Z_1^3(l)$  під першими датчиками блоків датчиків і запам'ятовуються як величини опорних зазорів  $Z_{1on.}^1(l)$ ;  $Z_{1on.}^2(l)$ ;  $Z_{1on.}^3(l)$  для установки рухомого вузла в незбурене положення після другого переміщення рухомого вузла на величину дискрети стабілізації  $l$ .

Рухомий вузол встановлюється на другу дискрету стабілізації. Під другими датчиками блоків датчиків встановлюються величини зазорів  $Z_2^1(2l) = Z_{1on.}^1(l)$ ;  $Z_2^2(2l) = Z_{1on.}^2(l)$ ;  $Z_2^3(2l) = Z_{1on.}^3(l)$  і встановлюють рухомий вузол у незбурене положення. Не змінюючи положення рухомого вузла, вимірюють величини зазорів під першими датчиками й запам'ятовують їх як величини опорних зазорів для установки рухомого елемента в незбурене положення на третій дискреті стабілізації.

Наведені переміщення, виміри й установки виконуються до переміщення рухомого вузла на задану відстань  $L$ . Одержують масив величин опорних зазорів, що забезпечує стабілізацію положення рухомого вузла щодо базової площини в процесі його робочого переміщення

$$\left[ Z_{1on.}^1(0), Z_{1on.}^2(0), Z_{1on.}^3(0) \right], \dots, \left[ Z_{1on.}^1(l), Z_{1on.}^2(l), Z_{1on.}^3(l) \right], \dots, \left[ Z_{1on.}^1(Jl), Z_{1on.}^2(Jl), Z_{1on.}^3(Jl) \right].$$

У процесі переміщення рухомого вузла вимірюється й оцінюється фільтром Калмана на кожному кроці  $m$  мікропереміщення рухомого вузла поточне значення  $l(im)$  величини переміщення. Поточне значення величини переміщення порівнюється з відстанню до чергової дискрети стабілізації і, якщо виконується нерівність  $(j-1)l \leq l(im) \leq jl$  ( $j$  — номер дискрети стабілізації), поточні значення  $Z_1^1(t)$ ,  $Z_1^2(t)$ ,  $Z_1^3(t)$  величин зазорів під першими датчиками блоків датчиків порівнюються з відповідними величинами  $Z_{1on.}^1$ ;  $Z_{1on.}^2$ ;  $Z_{1on.}^3$  опорних зазорів, отриманих на  $(j-1)$ -й дискреті стабілізації. При відхиленні поточних величин зазорів від першими датчиками відповідних величин опорних зазорів виробляються сигнали неузгодженості на регулятори положення рухомого вузла, що усувають це відхилення.

Відхилення рухомого вузла щодо незбуреного положення визначається різницею  $\delta$  величин двох суміжних опорних зазорів (рис. 7).

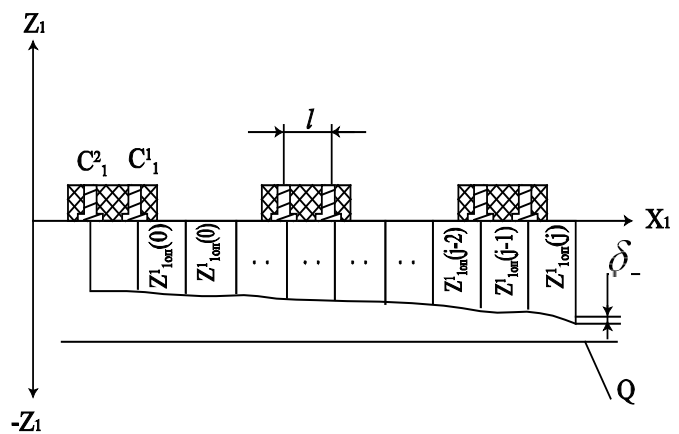


Рис. 7. Похибка стабілізації положення рухомої прецизійної аеростатичної напрямної на дискреті стабілізації

Звідси випливає, що точність стабілізації положення рухомого вузла у вирішальному ступені визначається величиною дискрети стабілізації  $l$ , неплоскістю поверхні основи напрямної, а також точністю виміру величин зазорів. Досяжна точність стабілізації може не перевищувати 0,1 мкм.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Деклараційний патент на винахід 36957 А Україна,



МПК H02N 2/00. Пьезоелектричний двигачель / *Зиненко В.Н.* – Заявл. 29.02.2000, № 2000021209; опубл. 16.04.2001, Бюл. № 3/2001.

2. *Решетов Д.Н., Портман В.Т.* Точність металлорежущих станків. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.

3. Пат. 36956 А Україна, МПК В23В 25/00. Устройство совмещения вершины алмазного резца с осью вращения вала азростатической шпиндельной опоры / *Зиненко В.Н.*,

*Шенелев А.А.* – Заявл. 29.02.2000, № 2000021208; опубл. 16.04.2001, Бюл. № 3/2001.

4. *Коломийцов Ю. В.* Интерферометры. Основы инженерной теории, применение. – Л.: Машиностроение, 1976. – 296 с.

5. *Сейддж. Э., Мелс Дж.* Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. – М.: Связь, 1976. – 496 с.



### **Будівництво**

## **МОДИФІКОВАНІ СУХІ БУДІВЕЛЬНІ СУМІШІ НА ОСНОВІ ГІПСОВОГО І ФОСФОГІПСОВОГО В'ЯЖУЧОГО**

**Призначення** – для внутрішніх і зовнішніх робіт з використанням як традиційного гіпсового в'язучого, так і в'язучого на основі фосфогіпсу (багатотоннажного відходу від виробництва фосфорної кислоти). Використання цієї технології дає змогу суттєво підвищити експлуатаційні характеристики матеріалу й отримати значний економічний ефект.

**Галузь застосування** – виробництво будівельних матеріалів, сухих сумішей.

**Опис.** Здійснено дослідження ефективних поліфункціональних модифікаторів гіпсових систем на основі сучасних суперпластифікаторів і визначені можливості суттєвого збільшення міцності гіпсових і фосфогіпсових в'язучих. Визначено оптимальний склад високоякісних гіпсових сухих будівельних сумішей на основі модифікованих гіпсових і фосфогіпсових в'язучих з використанням наповнювача – дигідратного фосфогіпсу.

### **Технічні характеристики**

Технологія виготовлення:

• гіпсового в'язучого з фосфогіпсу: міцність після двох годин твердіння на повітрі 12...16 МПа і початок схоплювання – понад 25 хв;

• комплексного суперпластифікатора для гіпсового в'язучого надає можливість отримати гіпсове в'язуче з водопотребою 0,28...0,38

## **ТРАНСФЕР ТЕХНОЛОГІЙ**

і міцністю 12...20 МПа;

• водостійких гіпсових і фосфогіпсових в'язучих: міцність 14...20 МПа, коефіцієнт розм'якшення – понад 0,6.

**Новизна** – два патенти України.

**Стадія готовності.** Упроваджено у виробництво.

**Пропозиції щодо співробітництва:** спільні виробництво; продаж; експлуатація.

### **Гірничорудна промисловість**

## **ТЕХНОЛОГІЯ КОМПЛЕКСНОЇ РОЗРОБКИ АЛМАЗОНОСНИХ РОДОВИЩ**

**Призначення.** Кафедра розробки родовищ корисних копалин українського університету пропонує технологію комплексної розробки алмазонасних родовищ. За допомогою цієї технології можна суміщати відпрацювання алмазонасного родовища, яке залягає в складних гірничо-геологічних умовах, з одночасним використанням виробок для зберігання радіоактивних відходів. Автори розробки шукають інвесторів для спільного впровадження технології у виробництво.

**Галузі застосування** – гірничо-промисловість, енергетика, екологія.

**Опис.** Технологія дає змогу здійснювати відпрацювання алмазонасної трубки в три стадії. На першій і другій – розробляють ділянки трубки, розташовані по обидва боки вертикальної площини, що проходить через поздовжню вісь капітального штреку в напрямках від флангів до капітального штреку.