

формація. – 2012. – № 1 (51). – С. 28–31.

3. Метод «Диаграмма Исикавы» [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.inventech.ru/pub/method/metod-0019/>

4. *Войченко А.П.* Некоторые аспекты проектирования и разработки многоцелевых сред учебного назначения :

36. наукових праць «Перспективні технології навчання та освітні простори» / *А.П. Войченко.* – 2007. – № 1. – С. 101–107.

5. *Азарова А.О.* Обзор методов та розробка специфічної моделі ПР / *А.О. Азарова* // Математичні машини і системи. – 2003. – № 2. – С. 154–161.

УДК 621.9. (621.1 - 681.2)

КОНСТРУКЦІЯ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ АЕРОСТАТИЧНОЇ НАПРЯМНОЇ ЛІНІЙНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ РОБОЧОГО ІНСТРУМЕНТА ВЕРСТАТА



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

Постановка проблеми. У попередніх номерах журналу «Науково-технічна інформація», зокрема в № 3 за 2015 р., розглянуто питання стабілізації положення рухомого вузла аеростатичної напрямної та аналітичний метод розрахунку його піднімальної сили [1]. Ця стаття є продовженням викладеного раніше матеріалу.

Мета роботи – визначити конструкцію та функціонування аеростатичної напрямної лінійного переміщення робочого інструмента верстата з розрахунком піднімальної сили несучої плоскої аеростатичної опори напрямної для лінійних переміщень (чисельний метод).

Виклад основного матеріалу. Пристрій і робота напрямної для лінійного переміщення інструмента верстата. Напрямна для лінійного переміщення інструмента верстата включає (рис. 1) рухомий елемент 1, що несе інструмент 2. Рухомий елемент переміщається між чотирма основами 3, 4, 5 і 6 (рис. 1–4). Основи 3 і 4 із прилеглими до них гранями

рухомого елемента утворюють несучу плоску аеростатичну опору, а основи 5 і 6 із двома іншими гранями – замикають плоску аеростатичну опору.

У основі 3 несучої опори встановлено чотири блоки датчиків 7, 8, 9, 10 положення рухомого елемента (рис. 2), у кожному з яких встановлено перші й другі датчики 11 і 12 величин зазорів. Блоки датчиків встановлюються так, щоб прямі, проведені через центри основ датчиків були паралельні напрямку переміщення рухомого елемента. У цій же основі виконано паз 13, у якому переміщаються стійки, укріплені в рухомому елементі. На стійках встановлюється вимірювальна голівка 14 лінійного індуктосина 15; 16 – вимірювальна лінійка індуктосина. У основі 4 (рис. 3) симетрично щодо сторін встановлено чотири п'єзоелектричні регулятори 17, 18, 19, 20 положення рухомого елемента. Рухомий елемент переміщається по роликах 23 регуляторів положення. Позиціонування ролика

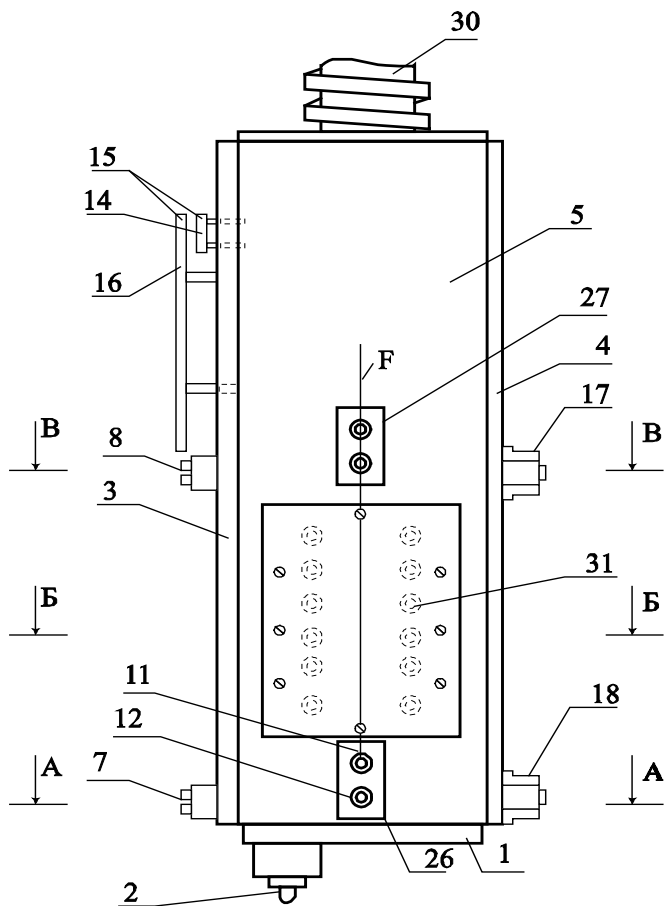


Рис. 1. Напрямна для лінійного переміщення інструмента прецизійного верстата (загальний вигляд)

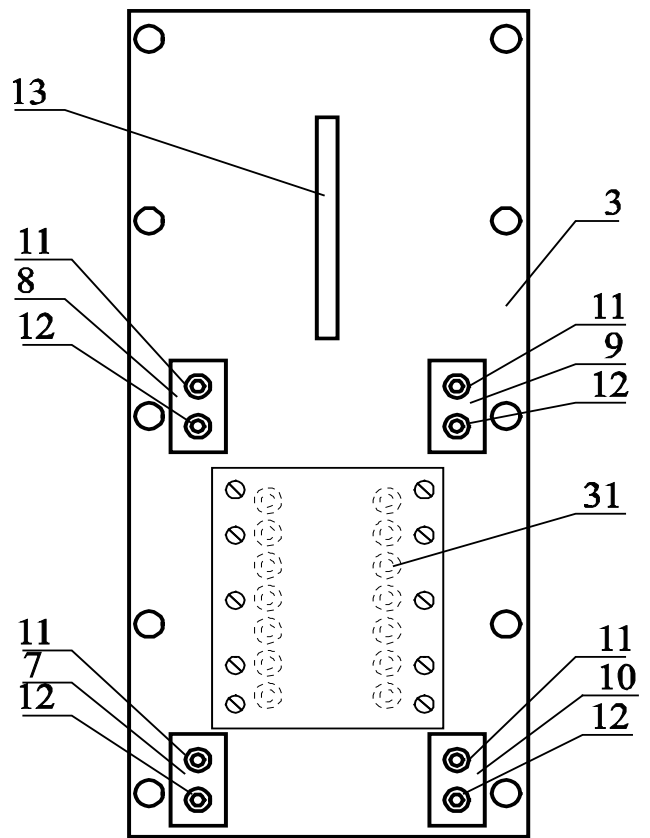


Рис. 2. Основа напрямної з блоками датчиків положення рухомого елемента

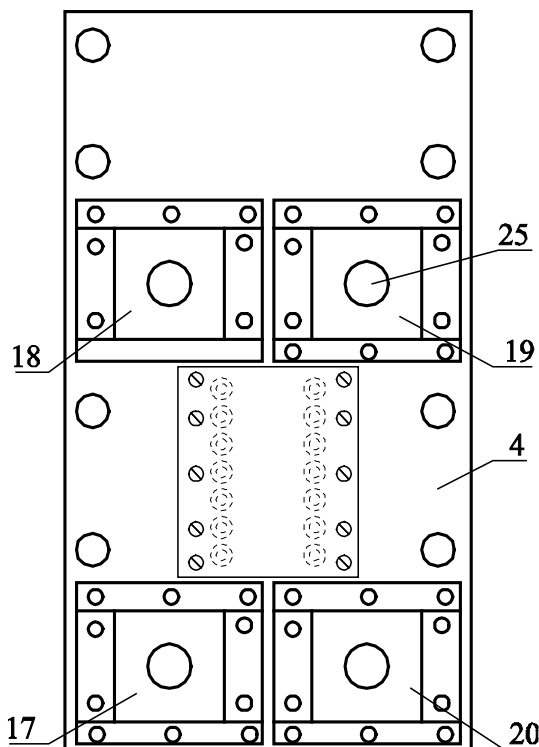


Рис. 3. Основа напрямної з п'єзоелектричними регуляторами положення рухомого елемента

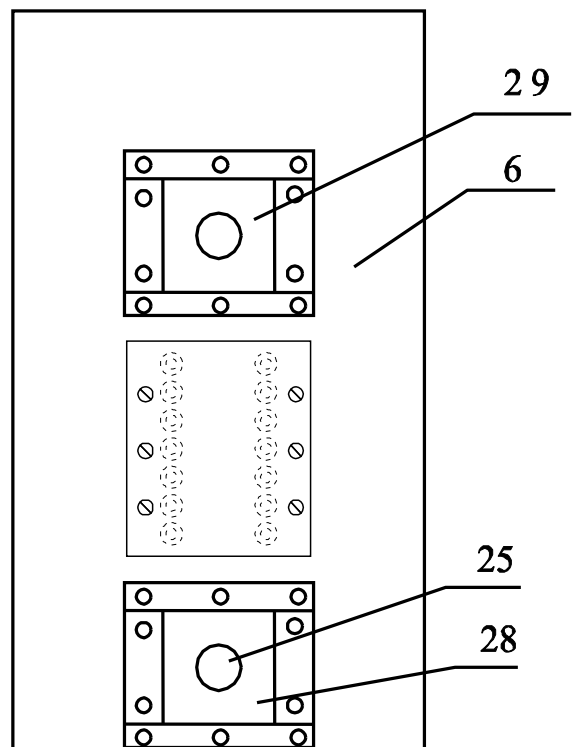


Рис. 4. Основа напрямної з п'єзоелектричними регуляторами лінійності

здійснюється п'єзостовпом 21, а початкове положення ролика встановлюється регулювальним гвинтом 25 (рис. 6).

В одній з основ, наприклад 5, що замикає опори (рис. 1), встановлюються блоки датчиків 26 і 27 лінійного переміщення рухомого елемента. Конструктивно вони виконані так само, як і блоки датчиків положення рухомого елемента, відстані між центрами основ датчиків рівні дискреті стабілізації l , а центри основ датчиків кожного блоку датчиків лежать на прямій, паралельній напрямку переміщення рухомого елемента.

У основі 6 замикаючої опори (рис. 4) напроти блоків датчиків встановлюються два п'єзоелектричні регулятори 28 і 29 лінійності переміщення рухомого елемента. Конструктивно регулятори лінійності виконані так само, як і регулятори положення рухомого елемента опори. Переміщення рухомого елемента здійснюється кінематичною парою гвинт-гайка 30 (див. рис. 1).

У основах 3, 4, 5, 6 на одному рівні по висоті основ виконані жиклери 31 подачі газу в зазори несучої й замикаючої плоских аеростатичних опор (рис. 5).

Напряму обладнано пристроєм керування 32 переміщенням рухомого елемента

(рис. 7). До складу пристрою керування входять наступні елементи: вісім вимірників 33 положення рухомого елемента по сигналах датчиків блоків датчиків положення рухомого елемента; чотири вимірники 34 лінійності переміщення рухомого елемента по сигналах датчиків блоків датчиків лінійності переміщення рухомого елемента; 35 – вимірник величини лінійного переміщення рухомого елемента. До складу пристрою керування входить цифровий блок 36, що виконує наступні функції:

- прийом, перетворення й відображення на екрані дисплея інформації вимірників положення й вимірників величини лінійності переміщення рухомого елемента;
- знімання інформації з вимірника величини лінійного переміщення рухомого елемента;
- формування сигналів керування й видачу їх на регулятори положення й регулятори лінійності переміщення рухомого елемента;
- формування масиву опорних зазорів, що відповідають незміщеному положенню рухомого елемента щодо площини Q ;
- формування масиву величин опорних зазорів, що відповідають незміщеному положенню точок B і F , B_1 і F_1 рухомого елемента відносно прямих m і n , m_1 і n_1 .

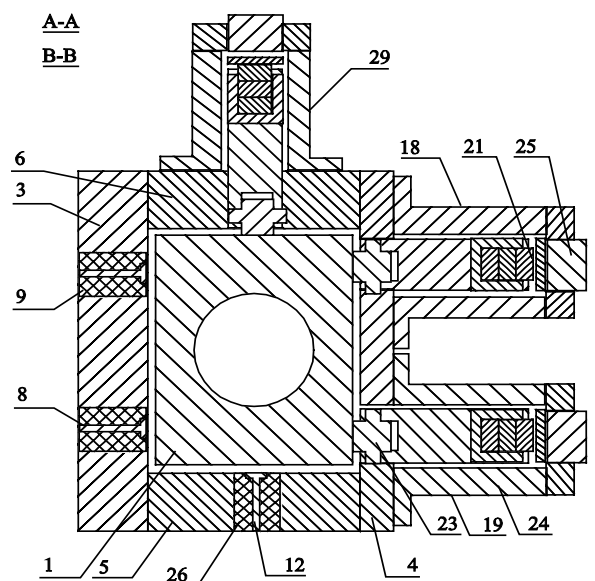
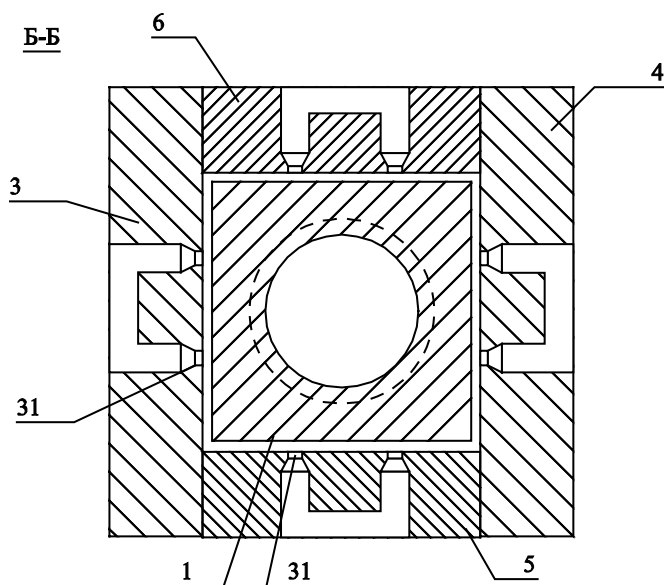


Рис. 5–6. Напряма для лінійного переміщення інструмента

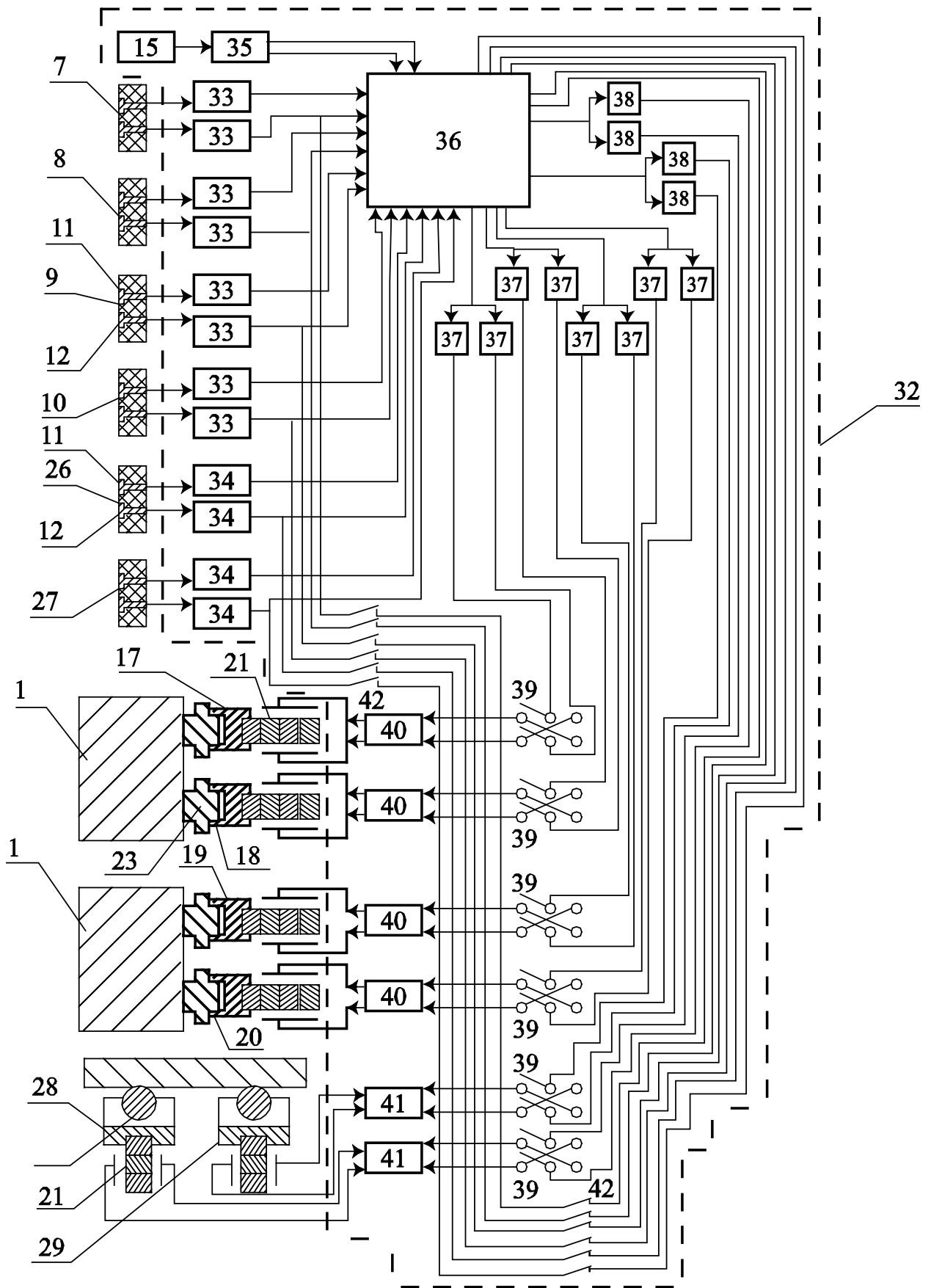


Рис. 7. Функціональна схема пристрою керування переміщенням рухомого елемента напрямної для лінійного переміщення інструмента

У загальному випадку цифровий блок являє собою ЕОМ, оснащеним модулем вводу-виводу для зв'язку із зовнішніми функціональними елементами.

Операційні підсилювачі 37 регуляторів положення рухомого елемента по входах об'єднані попарно й служать для формування на виходах кожної пари підсилювачів протилежних за знаком напруг, обумовлених сигналами керування на регулятори положення, що надходять із цифрового блоку. Операційні підсилювачі 38 регуляторів лінійності переміщення рухомого елемента також по входах об'єднані попарно. Їхні вихідні напруги визначаються сигналами керування із цифрового блоку на регулятори лінійності.

Перемикачі 39 *більше–вимк.–менше* служать для зміни полярності сигналів на входах диференціальних підсилювачів 40 і 41 регуляторів положення й регуляторів лінійності переміщення рухомого елемента, що надходять із операційних підсилювачів. У положенні перемикача *більше* полярність напруги на входах диференціальних підсилювачів така, що п'єзостовпи регуляторів положення й регуляторів лінійності подовжуються. Рухомий елемент зміщається у бік основ 3 і 5 на величину подовження п'єзостовпів. У положенні перемикача *менше* рухомий елемент зміщається у бік основ 4 і 6. Перемикач *робота–вимк.* 42 у положенні *робота* в процесі керування переміщенням рухомого елемента забезпечує підключення до перших входів диференціальних підсилювачів регуляторів положення й регуляторів лінійності виходів вимірників положення й лінійності переміщення рухомого елемента за сигналами перших датчиків блоків датчиків положення й перших датчиків блоків датчиків лінійного переміщення рухомого елемента. Виходи напруг опорних зазорів цифрового блоку підключаються до других входів диференціальних підсилювачів.

Розглянемо роботу пристрою на етапах підготовки й керування лінійним переміщенням рухомого елемента. На етапі підготовки:

1. Попередньо центри основ датчиків блоків датчиків положення й центри основ блоків датчиків лінійного переміщення рухомого елемента встановлюються згідно з методикою установки на паралельні прямі, які паралельні напрямку переміщення рухомого елемента [1].

2. Послідовно під першими датчиками блоків датчиків положення й блоків датчиків лінійного переміщення встановлюються розрахункові величини зазорів. Для цього перемикач *увімк.–вимк.* встановлюється в положення *вимк.* Вимірники положення й вимірники лінійності переміщення рухомого елемента відключаються від перших входів диференціальних підсилювачів, а цифровий блок – від других входів цих підсилювачів.

Перемикачі *більше–вимк.–менше* встановлюються в положення *вимк.* Виходи операційних підсилювачів регуляторів положення й регуляторів лінійності переміщення відключаються від входів відповідних диференціальних підсилювачів. Виконується пуск підпрограми обчислювача *Індикація зазорів*. На екрані дисплея відображаються величини зазорів під першими й другими датчиками блоків датчиків положення й блоків датчиків лінійного переміщення. Спостерігаючи величини зазорів на екрані дисплея й змінюючи за допомогою регульовальних гвинтів положення роликів регуляторів положення й регуляторів лінійності, під першими датчиками всіх блоків датчиків встановлюються величини зазорів, рівні розрахунковій величині, тобто, $Z_{11}^7 = Z_{11}^8 = Z_{11}^9 = Z_{11}^{10} = Z_{11}^{26} = Z_{11}^{27} = Z_{розр.}$

Виконуються пуски підпрограм *Масив опорних зазорів 1* і *Масив опорних зазорів 2*. Коди величин зазорів $Z_{11}^7(0)$, $Z_{11}^8(0)$, $Z_{11}^9(0)$, $Z_{11}^{10}(0)$ під першими датчиками блоків датчиків положення утворюють перші чотири елементи масиву опорних зазорів положення рухомого елемента, а коди величин зазорів $Z_{11}^{26}(0)$ і $Z_{11}^{27}(0)$ утворюють два перших елементи масиву опорних зазорів лінійного переміщення рухомого елемента.

3. Рухомий елемент кінематичною парою гвинт-гайка з вихідного положення переміщається на величину дискрету l . Величина переміщення зчитується із цифрового індикатора вимірника величини лінійного переміщення рухомого елемента.

4. На першій дискреті керування l під другими датчиками 12 блоків датчиків положення встановлюються величини зазорів $Z_{12}^7(1)$, $Z_{12}^8(1)$, $Z_{12}^9(1)$, $Z_{12}^{10}(1)$, рівні величинам опорних зазорів $Z_{11on}^7(0)$, $Z_{11on}^8(0)$, $Z_{11on}^9(0)$, $Z_{11on}^{10}(0)$ відповідно. Встановлюють рухомий елемент у незбурене положення щодо площини Q . Під другими датчиками 12 блоків датчиків лінійного переміщення встановлюють величини зазорів $Z_{12}^{26}(1)$ і $Z_{12}^{27}(1)$, рівні величинам опорних зазорів $Z_{11on}^{26}(0)$ і $Z_{11on}^{27}(0)$ відповідно, і встановлюють точки B і F , B_1 і F_1 рухомого елемента на прямих m і n , m_1 і n_1 . Не змінюючи положення рухомого елемента, вимірюють величини зазорів під першими датчиками всіх блоків датчиків і запам'ятовують їх у якості опорних для установки рухомого елемента в незбурене положення на другій дискреті керування переміщенням.

Для виконання цих установок і вимірів виконується пуск підпрограми *Індикація зазорів*. Величини зазорів $Z_{12}^7(1)$, $Z_{12}^8(1)$, $Z_{12}^9(1)$, $Z_{12}^{10}(1)$ під другими датчиками блоків датчиків положення порівнюються з величинами опорних зазорів $Z_{11on}^7(0)$, $Z_{11on}^8(0)$, $Z_{11on}^9(0)$, $Z_{11on}^{10}(0)$. Якщо зазори під другими датчиками рівні відповідним опорним зазорам, виконується пуск підпрограми *Масив опорних зазорів 1*. Цифровий блок за сигналами перших датчиків виконує опитування вимірників положення рухомого елемента і формує чергові чотири елементи масиву опорних зазорів положення рухомого елемента: $Z_{11on}^7(1)$, $Z_{11on}^8(1)$, $Z_{11on}^9(1)$, $Z_{11on}^{10}(1)$.

Якщо зазори під першими датчиками не рівні відповідним опорним зазорам, у цифровому блоці встановлюються коди сигналів керування $U_{кер.17}$, $U_{кер.18}$, $U_{кер.19}$, $U_{кер.20}$ на регулятори положення рухомого елемента й адреси операційних підсилювачів 37, електрично

пов'язаних з регуляторами положення 17, 18, 19, 20. Виконується пуск підпрограми *Установка зазорів 1*. Сигнали керування із цифрового блоку відповідно до адрес надходять на операційні підсилювачі регуляторів положення, а з їхніх виходів через перемикачі *більше–вимк.–менше* надходять на входи відповідних диференціальних підсилювачів регуляторів положення. З виходів диференціальних підсилювачів сигнали надходять на п'єзостовпи 21 регуляторів положення й змінюють положення рухомого елемента відповідно до величини сигналу керування й положення перемикача *більше–вимк.–менше*.

Виконується пуск підпрограми *Індикація зазорів* і перевіряється рівність величин зазорів під другими датчиками блоків датчиків положення, що відповідають величинам опорних зазорів. Методом послідовних наближень, змінюючи сигнали керування на регулятори положення, під другими датчиками встановлюються зазори, рівні опорним. Виконується пуск підпрограми *Масив опорних зазорів 1*. У результаті утворюються чергові чотири елементи масиву опорних зазорів $Z_{11on}^7(1)$, $Z_{11on}^8(1)$, $Z_{11on}^9(1)$, $Z_{11on}^{10}(1)$ масиву опорних зазорів положення рухомого елемента.

Виконується пуск підпрограми *Індикація зазорів*. Перевіряється рівність величин зазорів під другими датчиками блоків датчиків лінійного переміщення величинам опорних зазорів. Якщо зазори під другими датчиками рівні опорним, виконується пуск підпрограми *Масив опорних зазорів 2*. Цифровий блок опитує вимірники лінійності переміщення рухомого елемента за сигналами перших датчиків і утворює два чергових елементи масиву опорних зазорів лінійного переміщення рухомого елемента.

Якщо зазори під другими датчиками блоків датчиків лінійного переміщення не дорівнюють опорним зазорам $Z_{11on}^{26}(0)$ і $Z_{11on}^{27}(0)$, у цифровому блоці встановлюються сигнали керування $U_{кер.28}$, $U_{кер.29}$ на регулятори лінійності переміщення рухомого елемента й адреси операційних підсилювачів, електрич-

но пов'язаних з відповідними регуляторами лінійності переміщення. Виконується пуск підпрограми *Установка зазорів 2*. Сигнали керування $U_{кер.28}$ та $U_{кер.29}$ відповідно до встановлених адрес надходять на операційні підсилювачі регуляторів лінійності, а з їхніх виходів через перемикачі *більше–вимк.–менше* надходять на входи диференціальних підсилювачів регуляторів лінійності переміщення рухомого елемента. З виходів диференціальних підсилювачів сигнали надходять на п'єзостовпи регуляторів лінійності переміщення й змінюють положення рухомого елемента залежно від величини сигналу керування й положення перемикача *більше–вимк.–менше*. Виконується пуск підпрограми *Індикація зазорів* і перевіряється рівність зазорів під другими датчиками блоків датчиків лінійного переміщення відповідним опорним зазором. Якщо ці рівності не виконуються, змінюючи сигнали керування на регулятори лінійності, під другими датчиками встановлюють зазори, рівні опорним. Виконується пуск підпрограми *Масив опорних зазорів 2*. У масив опорних зазорів лінійного переміщення рухомого елемента будуть записані опорні зазори $Z_{11on}^{26}(1)$ і $Z_{11on}^{27}(1)$.

5. Пункт 4 виконується після кожного переміщення рухомого елемента на дискрету керування l . Будуть сформовані перший і другий масиви опорних зазорів:

$$\left[Z_{11on}^{26}(J) \text{ і } Z_{11on}^{27}(J) \right].$$

Працює пристрій керування лінійним переміщенням інструмента верстата в такий спосіб. Рухомий елемент напрямної встановлюється у вихідне для переміщення положення. Перемикачі *більше–вимк.–менше* встановлюються в положення *вимк.* Виходи операційних підсилювачів відключаються від входів диференціальних підсилювачів. Перемикач *робота–вимк.* установлюється в положення *робота*. Вимірники положення й лінійності переміщення рухомого елемента підключаються до перших входів диференціальних підсилювачів 40 і 41. До других входів цих диференціальних підсилювачів підключаються відповідні виходи напруг опорних зазорів цифрового блоку.

У цифровий блок уводиться задана величина переміщення рухомого елемента L і виконується пуск підпрограми *Лінійне переміщення*. Коди величин опорних зазорів $Z_{11on}^7(0)$, $Z_{11on}^8(0)$, $Z_{11on}^9(0)$, $Z_{11on}^{10}(0)$ зчитуються з першого масиву опорних зазорів, перетворюються в напруги й надходять на другі входи диференціальних підсилювачів регуляторів положення рухомого елемента. Коди величин опорних зазорів $Z_{11on}^{26}(0)$ і $Z_{11on}^{27}(0)$ зчитуються із другого масиву опорних зазорів, перетворюються в напруги опорних зазорів і надходять на другі входи диференціальних підсилювачів регуляторів лінійності переміщення рухомого елемента. На перші входи диференціальних підсилювачів регуляторів положення надходять сигнали з вимірників положення за сигналами перших датчиків відповідних блоків датчиків положення рухомого елемента. На перші входи регуляторів лінійності переміщення надходять сигнали з вимірників лінійності переміщення рухомого елемента за сигналами перших датчиків відповідних блоків датчиків лінійного переміщення.

Якщо зазори під першими датчиками блоків датчиків положення рухомого елемента не

$$\left[Z_{11on}^7(0), Z_{11on}^8(0), Z_{11on}^9(0), Z_{11on}^{10}(0) \right],$$

$$\left[Z_{11on}^7(1), Z_{11on}^8(1), Z_{11on}^9(1), Z_{11on}^{10}(1) \right],$$

$$\left[Z_{11on}^7(2), Z_{11on}^8(2), Z_{11on}^9(2), Z_{11on}^{10}(2) \right],$$

...

$$\left[Z_{11on}^7(J), Z_{11on}^8(J), Z_{11on}^9(J), Z_{11on}^{10}(J) \right],$$

$$\left[Z_{11on}^{26}(0) \text{ і } Z_{11on}^{27}(0) \right],$$

$$\left[Z_{11on}^{26}(1) \text{ і } Z_{11on}^{27}(1) \right],$$

...

рівні відповідним опорним зазорам положення рухомого елемента, а зазори під першими датчиками блоків датчиків лінійного переміщення рухомого елемента не дорівнюють опорним зазорам лінійного переміщення рухомого елемента, на виходах диференціальних підсилювачів виникають різниці потенціалів, що відповідають величинам відхилень зазорів під першими датчиками від величин опорних зазорів. Напруги з виходів диференціальних підсилювачів надходять на п'єзостовпи регуляторів положення й лінійності рухомого елемента. У результаті точки рухомого елемента займають незбурене положення щодо базової площини Q і прямої N .

Переміщують рухомий елемент на задану відстань L . У процесі переміщення сигнал датчика величини лінійного переміщення рухомого елемента (лінійного індуктосина) перетворюється вимірником величини лінійного переміщення й надходить у цифровий блок. Величина поточного переміщення рухомого елемента порівнюється з відстанню до чергової j -ї дискрети корекції лінійного переміщення рухомого елемента. При досягненні рухомим елементом чергової дискрети керування переміщенням з масивів опорних зазорів зчитуються величини опорних зазорів для даної дискрети керування, перетворюються в напруги опорних зазорів і надходять на другі входи диференціальних підсилювачів. Рухомий елемент на початку чергової дискрети керування буде повернуто на лінійну траєкторію переміщення.

Похибка лінійності переміщення рухомого елемента напрямної визначається величиною дискрети керування, похибками виготовлення рухомого елемента, точністю виміру величин зазорів і може обчислюватися з необхідною точністю.

Розрахунок піднімальної сили несучої плоскої аеростатичної опори напрямної для лінійних переміщень (чисельний метод). Несуча й замикаюча опори напрямної – двосторонні плоскі аеростатичні опори.

Для забезпечення надійного прилягання рухомого елемента напрямної до роликів п'єзоелектричних регуляторів положення й лінійності переміщення рухомого елемента він зміщується з допомогою регульовальних гвинтів регуляторів по висоті зазору щодо його рівноважного положення в кожній двосторонній опорі. Якщо рухомий елемент зміщений у газовому шарі опори на Δh , піднімальна сила \bar{w} двосторонньої аеростатичної опори

$$\bar{w} = \bar{w}_1(h - \Delta h) - \bar{w}_2(h + \Delta h). \quad (1)$$

Задано силу різання \bar{P}_p , а п'єзостовпи регуляторів здатні, не руйнуючись, сприймати навантаження $\bar{P} \leq 400$ кг. Плоскі аеростатичні опори виконано симетрично парам 17, 20 і 18, 19 п'єзоелектричних регуляторів. Отже, можна вважати, що лінія дії головного вектора сил тиску несучої опори також проходить симетрично щодо цих регуляторів (рис. 8).

Сили притиску \bar{P}_{18} і \bar{P}_{19} рухомого елемента до роликів 18 і 19 задано. Піднімальна сила \bar{w}

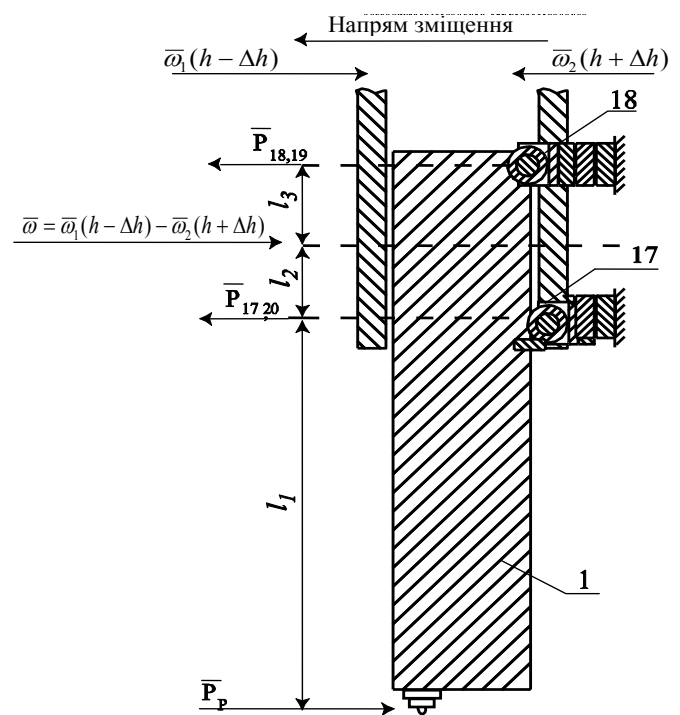


Рис. 8. Розрахунок сили притиску рухомого елемента до роликів п'єзоелектричних регуляторів положення

несучої опори повинна бути достатньою для забезпечення необхідного притиску й компенсації моменту сили різання. Розрахунок проводиться для максимально висунутого рухомого елемента.

Реакції пар п'єзоелектричних регуляторів:

$$\bar{P}_{17,20} = \bar{P}_{17} + \bar{P}_{20}; \quad \bar{P}_{18,19} = \bar{P}_{18} + \bar{P}_{19}.$$

Рівняння моментів щодо лінії установки регуляторів 17 і 20:

$$\bar{P}_p l_1 + \bar{P}_{18,19} (l_2 + l_3) - \bar{\omega} l_2.$$

Звідси

$$\bar{\omega} = \left[(\bar{P}_p l_1) + \bar{P}_{18,19} (l_2 + l_3) \right] / l_2. \quad (2)$$

Чисельний метод розрахунку секції плоскої аеростатичної опори. Цей метод розглядається для однієї секції наддування [2].

Початок прямокутної системи координат XOY установлюється в центр розглянутого опорного елемента (рис. 9), вісь X направляється уздовж мікроканавки. На область опорного елемента наноситься сітка координатних ліній:

$$X = X_i = i\Delta X; \quad Y = Y_j = j\Delta Y,$$

де $\Delta X = L / 2k$, $\Delta Y = B / 2n$ – крок сітки в напрямку осей X і Y відповідно; k , n – цілі числа, що визначають крок сітки.

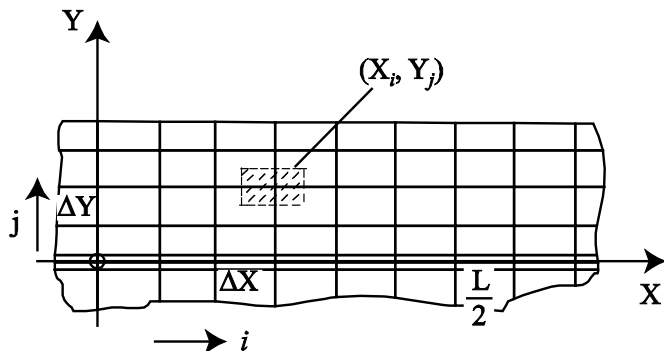


Рис. 9. Розрахунок піднімальної сили секції плоскої аеростатичної опори

Позначимо абсолютний тиск у вузлах сітки через p_{ij} . Чим більші k та n і відповідно менший крок сітки, тим точніша апроксимація тиску в зазорі різницеvim рівнянням. Сітка повинна вибиратися так, щоб лінії контура й мікроканавки збігалися з координатними лініями. При виводі різницеvих рівнянь використовується умова балансу витрати газу через елементарний прямокутник

$$X_i - \frac{1}{2}\Delta X \leq X \leq X_i + \frac{1}{2}\Delta X,$$

$$Y_j - \frac{1}{2}\Delta Y \leq Y \leq Y_j + \frac{1}{2}\Delta Y$$

з центром у точці X , Y (на рис. 9 заштрихований). Масова витрата газу M_X та M_Y через елемент шириною ΔX , ΔY в напрямку осей X , Y у припущенні ізотермічності процесу змащення визначається співвідношеннями:

$$M_X = -\frac{h^3 \Xi_a}{24\mu p_a} \cdot \frac{\partial P^2}{\partial X} \Delta Y;$$

$$M_Y = -\frac{h^3 \Xi_a}{24\mu p_a} \cdot \frac{\partial P^2}{\partial Y} \Delta X \quad (3)$$

Масова витрата газу M_{KX} (M_{KY}) через мікроканавку, паралельну осі X (Y):

$$M_{KX} = -\frac{f_X \Xi_a}{2\mu p_a} \cdot \frac{\partial P^2}{\partial X};$$

$$M_{KY} = -\frac{f_Y \Xi_a}{2\mu p_a} \cdot \frac{\partial P^2}{\partial Y} \quad (4)$$

де f – параметр, що залежить від форми поперечного перерізу мікроканавки, пропорційний четвертому ступеню її лінійного розміру.

Для мікроканавок із профілем правильного трикутника $f = \sqrt{3}t^4 / 180$, де t – висота трикутника.

Масова витрата газу через отвір наддування визначається за формулою:

$$M = \alpha M_{кр} \theta \left(\frac{p_d}{p_s} \right) \quad (5)$$

Умова балансу витрати газу через елемент з мікроканавкою, яка проходить через нього паралельно осі X , та отвором наддування має вигляд:

$$M_{Xi+\frac{1}{2},j} - M_{Xi-\frac{1}{2},j} + M_{kXi+\frac{1}{2}} - M_{kXi-\frac{1}{2}} + M_{i,Yj+\frac{1}{2}} - M_{i,Yj-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Замінивши похідні у виразах (3) і (4) різницевиими співвідношеннями

$$M_{xi\pm\frac{1}{2},j} = \mp \frac{h^3 \Xi_a}{24 \mu P_a} \cdot \frac{P_{i\pm 1,j}^2 - P_{ij}^2}{\Delta X} \Delta Y;$$

$$M_{Yi,j\pm\frac{1}{2}} = \mp \frac{h^3 \Xi_a}{24 \mu P_a} \cdot \frac{P_{i,j+1}^2 - P_{ij}^2}{\Delta Y} \Delta X;$$

$$M_{kXi\pm\frac{1}{2}} = \mp \frac{f_X \Xi_a}{24 \mu p_a} \cdot \frac{P_{i\pm 1,j}^2 - P_{ij}^2}{\Delta X} \Delta Y,$$

підставивши ці вирази у вираз (5) та умову (6) і перейшовши до безрозмірних змінних, одержують рівняння:

$$\left(2 \frac{\Delta X}{\Delta Y} + 2 \frac{\Delta Y}{\Delta X} + \frac{2}{\Delta X} K\right) \bar{P}_{ij}^2 - \left(\frac{\Delta X}{\Delta Y} + \frac{1}{\Delta X} K\right) \bar{P}_{i+1,j}^2 - \left(\frac{\Delta X}{\Delta Y} + \frac{1}{\Delta X} K\right) \bar{P}_{i-1,j}^2 - \frac{\Delta X}{\Delta Y} \bar{P}_{i,j+1} - \frac{\Delta X}{\Delta Y} \bar{P}_{i,j-1} = \bar{m} P_s \theta \left(\frac{P_d}{P_s}\right)$$

де $\bar{P}_{ij} = p_{ij} / p_a$ – відносний тиск у вузлах координатної сітки; $\Delta X = p_{ij} / B$; $\Delta Y = 2 \Delta Y / B$; $K = \frac{24 f}{B h^3} = \frac{t^4}{2,5 \sqrt{3} B h^3}$ – безрозмірний параметр для мікроканавок із профілем правильного трикутника.

Коефіцієнт режиму для повітря $\psi = 1,4$:

$$m = \frac{12,9 \mu d^2}{\sqrt{p_a \Xi_a} h^3}.$$

Аналогічно одержують різницеві рівняння для вузлів з довільним розташуванням мікроканавок. У загальному вигляді рівняння, що зв'язують значення квадрата відносного тиску \bar{P}_{ij} у вузлах сітки, будуть:

$$a_{ij} \bar{P}_{ij}^2 - b_{ij} \bar{P}_{i+1,j}^2 - c_{ij} \bar{P}_{i-1,j}^2 - d_{ij} \bar{P}_{i,j+1} - e_{ij} \bar{P}_{i,j-1} = f_{ij} \quad (7)$$

У рівнянні (7) коефіцієнти a_{ij} , b_{ij} , c_{ij} , d_{ij} , e_{ij} залежать від розташування мікроканавок і визначаються в такий спосіб:

1. Для вузла, через який мікроканавка проходить паралельно осі X :

$$a_{ij} = 2 \frac{\Delta Y}{\Delta X} + 2 \frac{\Delta X}{\Delta Y} + \frac{2}{\Delta X} K;$$

$$a_{ij} = \frac{\Delta Y}{\Delta X} c_{ij} = \frac{\Delta Y}{\Delta X} + \frac{1}{\Delta X} K; \quad d_{ij} = e_{ij} = \frac{\Delta X}{\Delta Y}.$$

2. Для вузла, до якого ліворуч підходить мікроканавка й закінчується в ньому:

$$a_{ij} = 2 \frac{\Delta Y}{\Delta X} + 2 \frac{\Delta X}{\Delta Y} + \frac{2}{\Delta X} K;$$

$$b_{ij} = c_{ij} = \frac{\Delta X}{\Delta Y} + \frac{1}{\Delta X} K; \quad d_{ij} = e_{ij} = \frac{\Delta X}{\Delta Y}.$$

3. Для вузла з мікроканавкою, що проходить через нього паралельно осі Y :

$$a_{ij} = 2 \frac{\Delta X}{\Delta Y} + 2 \frac{\Delta X}{\Delta Y} + \frac{2}{\Delta Y} K;$$

$$b_{ij} = c_{ij} = \frac{\Delta Y}{\Delta X}; \quad d_{ij} = e_{ij} = \frac{\Delta X}{\Delta Y} + \frac{1}{\Delta Y} K.$$

4. Для вузла, до якого ліворуч і знизу підходять дві мікроканавки й закінчуються в ньому:

$$a_{ij} = 2 \frac{\Delta Y}{\Delta X} + 2 \frac{\Delta X}{\Delta Y} + \frac{1}{\Delta X} K + \frac{1}{\Delta Y} K; \quad b_{ij} = \frac{\Delta Y}{\Delta X};$$

$$c_{ij} = \frac{\Delta X}{\Delta Y} + \frac{1}{\Delta X} K; \quad d_{ij} = \frac{\Delta X}{\Delta Y}; \quad e_{ij} = \frac{\Delta X}{\Delta Y} + \frac{1}{\Delta Y} K.$$

Для вузлів, де немає мікроканалов, коефіцієнтів виду $K/\Delta X$, $2K/\Delta X$, $K/\Delta Y$, $2K/\Delta Y$ немає.

Таким чином, викладений спосіб дозволяє одержувати різницеві алгебраїчні рівняння, що описують зміну в зазорі для вузлів, які зустрічаються в прямокутних опорах, а також в одно- і двоканалових секціях.

Вільний член f_{ij} для вузла, у якому є отвір наддування ($i = j = 0$), визначається співвідношенням $f_{00} = mp_s \theta \left(\frac{p_d}{p_s} \right)$. Для всіх інших вузлів $f_{ij} = 0$.

Оскільки геометрія опори й система розподільників газу симетричні щодо координатних осей і ліній, які проходять паралельно осі Y посередині між отворами, то розподіл тиску досить визначити для четвертої частини опорного елемента $0 \leq X \leq L/2$, $0 \leq Y \leq B/2$. Це відповідає зміні індексів у межах $0 \leq i \leq k$, $0 \leq j \leq n$.

Для визначення поля тиску в опорі необхідно вирішити систему $(k + 1) n$ рівнянь (7) з урахуванням $(k + 1 + 2n)$ співвідношень, що впливають із умови симетрії

$$\bar{P}_{i,-1} = \bar{P}_{i,+1} \quad (0 \leq i \leq k),$$

$$\bar{P}_{-1,j} = \bar{P}_{+1,j}; \quad \bar{P}_{(k+1),j} = \bar{P}_{(k-1),j} \quad (0 \leq j \leq (n-1)), \quad (8)$$

і $(k+1)$ співвідношень, що впливають із рівності тиску на контурі атмосферному:

$$\bar{P}_{i,n} = 1 \quad (0 \leq i \leq k). \quad (9)$$

Рішення системи (7) ускладнюється її нелінійністю, яку дає вільний член, що відповідає точці наддування. Тому система лінеаризується введенням нової змінної U_{ij} за формулою:

$$\bar{P}_{ij}^2 = 1 + \bar{m} p_s \theta \left(\frac{p_d}{p_s} \right) U_{ij}. \quad (10)$$

Підставляючи (10) у рівняння (7), і з огляду на те, що $a_{ij} = b_{ij} = c_{ij} = d_{ij} = e_{ij}$, одержують лінійні рівняння для U_{ij} , де коефіцієнти при

невдомих ті самі, що й у рівнянні (7), тобто:

$$a_{ij} U_{ij} - b_{ij} U_{(i+1),j} - c_{ij} U_{(i-1),j} - d_{ij} U_{i,(j+1)} - e_{ij} U_{i,(j-1)} = \delta_{ij} \quad (11)$$

де $\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{в точці наддування;} \\ 0 & \text{в решті точок.} \end{cases}$

Умови (8) і (9) дають додаткові співвідношення для U_{ij} :

$$U_{i,-1} = U_{i,+1}; \quad U_{-1,j} = U_{+1,j}; \\ U_{k+1,j} = U_{k-1,j}; \quad U_{i,n} = 0. \quad (12)$$

Системи рівнянь (11), (12) вирішуються методом послідовної верхньої релаксації [3], відповідно до якого на кожному етапі ітерацій спочатку обчислюється проміжне $(S - 1/2)$ наближення, одержуване рішенням (11) відносно U_{ij}

$$U_{ij} = (b_{ij} U_{(n+1),j} + c_{ij} U_{(i-1),j} + d_{ij} U_{i,(j+1)} + e_{ij} U_{i,(j-1)} + \delta_{ij}) / a_{ij},$$

потім чергове S -те наближення

$$U_{ij}^{(S)} = U_{ij}^{(S-1)} + \gamma (U_{ij}^{(S-1/2)} - U_{ij}^{(S-1)}),$$

де γ – параметр релаксації, що змінюється в межах $0 < \gamma < 2$.

Ітераційний процес сходиться для будь-яких γ із цього інтервалу, оскільки матриця коефіцієнтів має діагональну перевагу, тобто має місце співвідношення $|a_{ij}| \geq |b_{ij}| + |c_{ij}| + |d_{ij}| + |e_{ij}|$ зі строгою нерівністю для сусідніх із границею $j = n$ вузлів. На кожному етапі ітерацій спочатку обчислюються всі U_{ij} з парною сумою індексів, а потім з непарною, з використанням обчислених значень U_{ij} , що сприяє прискоренню збіжності:

$$\sqrt{\sum_{ij} |(U_{ij}^{(S)})^2 - (U_{ij}^{(S-1)})^2|} < 0,0001.$$

Після рішення системи для U_{ij} можна визначити значення коефіцієнта режиму \bar{m} для низки значень p_s та $p_d = p_{00}$, що змінюються від одиниці до p_s . Для цього у виразі (10) приймають $i = j = 0$. У результаті одержують

$$\bar{m} = \frac{p_d^2 - 1}{p_s \theta (p / p_s) U_d}, \quad (13)$$

де $U_d = U_{00}$ – значення U_{ij} в точці наддування.

Тепер з (10) можна визначити значення \bar{P}_{ij} та поле тиску в опорі:

$$\begin{aligned} \bar{P}_{ij} &= p_a \sqrt{1 + \bar{m} p_s \theta (p_d / p_s) U_{ij}} = \\ &= p_a \sqrt{1 + (p_d^2 - 1) U_{ij} / U_d}. \end{aligned} \quad (14)$$

Піднімальна сила опори обчислюється як сума елементарних сил, створених кожним елементом поверхні $\bar{\omega} = \sum_{ij} \Delta \bar{\omega}_{ij}$. Тоді

$$\Delta \bar{\omega} = (\bar{P}_{(i+1/2), (j+1/2)} - p_a) \Delta X \Delta Y,$$

$$\text{де } \bar{P}_{(i+1/2), (j+1/2)} = \frac{\bar{P}_{ij} + \bar{P}_{(i+1), j} + \bar{P}_{i, (j+1)} + \bar{P}_{(i+1), (j+1)}}{4}.$$

В одноканавкових секціях довжина мікроканавки звичайно дорівнює $L-B$, тобто вона не доходить до краю на відстань, рівну половині ширини опори. У двоканавкових секціях мікроканавки, що утворюють замкнутий прямокутний контур, виконуються однакою глибини та на однаковій відстані від країв опори, як правило, на $1/4$ її ширини. Глибину центральної канавки роблять звичайно в 1,3-1,5 раза глибше за інші, що враховується при визначенні її безрозмірного параметра.

Індокси в системах рівнянь для U_{ij} , одержуваних при розрахунку прямокутних

секцій, змінюються в межах $0 \leq i \leq (k-1)$, $0 \leq j \leq (n-1)$. Складаються ці системи з $(k+n)$ рівнянь, які вирішуються з $(k+n)$ умовами симетрії

$$U_{i,-1} = U_{i,+1} \quad (0 \leq i \leq (k-1)),$$

$$U_{-1,j} = U_{+1,j} \quad (0 \leq j \leq (n-1))$$

та з $(k+n)$ умовами на контурі $U_{in} = U_{kj} \quad (0 \leq i \leq (k-1), 0 \leq j \leq (n-1))$.

Висновки

З викладеного матеріалу можна констатувати, що похибка лінійності переміщення рухомого елемента напрямної визначається величиною дискрети керування, похибками виготовлення рухомого вузла, точністю виміру зазорів переміщення рухомого елемента і може здійснюватися з необхідною точністю.

При одноканавкових секціях довжина мікроканавки не доходить до краю на відстань, рівну половині ширини опори. У двоканавкових секціях мікроканавки, що утворюють замкнутий прямокутний контур, виконують однакою глибини й на однаковій відстані від країв опори (як правило, на $1/4$ її ширини). Глибину центральної канавки роблять звичайно в 1,3-1,5 глибини інших, що враховується при визначенні її безрозмірного параметра.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Тарасов В.О. Пристрій стабілізації положення рухомого вузла аеростатичної напрямної і аналітичний метод розрахунку його піднімальної сили / В.О. Тарасов, Т.М. Назаренко, Л.О. Злочевська // Науково-технічна інформація. – 2015. – № 3. – С. 61–70.
2. Вазов В. Разностные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных. : пер. с англ. / В. Вазов, Дж. Форсайт. – М. : Изд. иностр. лит-ры, 1963. – 487 с.
3. Шейнберг С.А. Опоры скольжения с газовой смазкой / С.А. Шейнберг. – М. : Машиностроение, 1979. – 328 с.