

Винахід відноситься до галузі верстатобудування і може бути використаний при конструюванні аеростатичних шпindelних опор верстатів особливо високої точності і, окрема, суперпрецизійних верстатів алмазного мікроточіння.

Відомий патент України "Пристрій компенсації радіальних навантажень на вал радіальної аеростатичної опори" №25727 А від 30.10.98р. Спосіб, який реалізується цим пристроєм, вибраний в якості прототипу і полягає у наступному.

В двох перерізах по А–А і В–В радіальної аеростатичної опори по осям систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X_1^A O_1^A Y_1^A$, осі яких у кожному перерізі зсунуті на кут 45° , установлені датчики величин зазорів.

В перерізах по Б–Б і Г–Г цієї опори, симетрично відносно осей систем координат $X^B O^B Y^B$ і $X^G O^G Y^G$, установлені групи регуляторів тиску, які запобігають зміщенню осі обертання вала опори відносно вибраного її незміщеного положення.

Осі систем координат $X^A O^A Y^A$, $X^B O^B Y^B$, $X^G O^G Y^G$ паралельні і вибираються в якості базових систем координат, в яких визначаються величини опорних зазорів, які відповідають незміщеному положенню осі обертання вала, і до яких прив'язуються сигнали управління на групи регуляторів тиску, відповідно.

Перерізи вала по А–А і В–В задають еліпсами, визначають величини великих і малих напівосей еліпсів, розраховують їх ексцентриситети і полярні радіуси на кутах установки датчиків величин зазорів.

Датчики величин зазорів установлюють з однаковими зазорами відносно поверхні вала і, знаючи полярні радіуси еліпсів, розраховують координати цих датчиків в системах координат $X^A O^A Y^A$, $X_1^A O_1^A Y_1^A$, $X^B O^B Y^B$, $X_1^B O_1^B Y_1^B$.

По координатам двох датчиків величин зазорів, установлених на різних осях систем координат, величинам зазорів під цими датчиками і величинам полярних радіусів еліпсів на кутах установки датчиків розраховують,

наприклад, по датчикам C_1 і C_3 координати осі обертання вала $/X_1^A, Y_1^A/$ з системи алгебраїчних квадратних рівнянь:

$$\begin{cases} (l_1 + Z_1)^2 = (x_{C_1}^A - x_1^A)^2 + (y_{C_1}^A - y_1^A)^2 \\ (l_3 + Z_3)^2 = (x_{C_3}^A - x_1^A)^2 + (y_{C_3}^A - y_1^A)^2 \end{cases} \quad (1)$$

де: l_1 і l_3 - полярні радіуси еліпса в напрямку датчиків C_1 і C_3 ;

$x_{C_1}^A$ і $x_{C_3}^A$ - координати датчиків C_1 і C_3 в системі координат $X^A O^A Y^A$;

Z_1 і Z_3 - величини зазорів під датчиками C_1 і C_3 .

По вимірюванням величин зазорів під "n" датчиками розраховують $2 \cdot [C_n^2 - 4]$ пар координат осі обертання вала, відбирають $C_n^2 - 4$ дійсних значень координат осі обертання. Згладжують їх по методу найменших квадратів і отримують оцінку координат осі обертання.

Вибирають незміщене положення осі обертання вала аеростатичної опори. На дискретних кутах повороту ось обертання вала установлюють у незміщене положення, вимірюють і запам'ятовують величини опорних зазорів під датчиками величин зазорів, установлених по осям базових систем координат.

В процесі компенсації радіального навантаження при відхиленні поточних величин зазорів під цими датчиками від опорних сигнали неузгодження надходять на регулятори тиску, які створюють вектори тиску рівні по величині і протилежні по напрямку радіальним навантаженням і запобігають зміщенню осі обертання вала під дією радіального навантаження.

Недоліком способу прототипу можна вважати наступне. Переріз вала аеростатичної опори по своїй формі може суттєво відрізнятися від найближчого еліпса. Отже полярні радіуси l_1 і l_3 /1/ апроксимуючого еліпса в напрямку датчиків величин зазорів не будуть рівні відстаням від центра цього еліпса до точок обгинаючої перерізу

вала в напрямку на ці датчики. Так як координати датчиків, наприклад, $/X_{C_1}^A, Y_{C_1}^A/$ і $/X_{C_3}^A, Y_{C_3}^A/$ з /1/ в системах

координат $X^A O^A Y^A$, $X_1^A O_1^A Y_1^A$, визначаються як суми полярних радіусів в напрямку на ці датчики і величини зазорів під цими датчиками на куту $\varphi = 0$ повороту вала при суміщеному центрі еліпса з початком базової системи координат, координати датчиків величин зазорів також визначаються з погрешністю, що призводить до зниження точності стабілізації радіального положення осі обертання вала аеростатичної шпindelної опори.

Задача, що вирішується, полягає у такому удосконаленні способу прототипу, яке забезпечує незалежно від форми обгинаючих перерізів вала аеростатичної шпindelної опори плоскостями установки датчиків величин зазорів, установку основ датчиків величин зазорів по колам, центри яких суміщені з печатками базових систем координат, і точне визначення координат цих датчиків в базових системах координат, побудову функціональних залежностей між кутовим положенням точок на обгинаючих перерізах вала опори і відстанями від осі обертання вала до цих точок у вигляді полінома n -го ступеня з точністю, яка визначається ступенями поліномів, що забезпечує точне визначення відстаней від осі обертання вала до точок обгинаючої перерізу вала в напрямку датчиків величин зазорів і на цій основі підвищити точність стабілізації радіального положення осі обертання вала

аеростатичної шпindelної опори. Задача, що вирішується, полягає також у такому удосконаленні способу прототипу, що дозволяє виконати балансування вала опори з високою точністю.

Рішення задачі досягається тим, що спосіб стабілізації радіального положення осі обертання вала аеростатичної шпindelної опори, який включає апроксимацію еліпсами обгинаючих перерізів вала аеростатичної шпindelної опори площинами установки датчиків величин зазорів, розрахунок координат датчиків величин зазорів, установлених по осям систем координат з суміщеними печатками, які лежать в площинах установки датчиків величин зазорів, розрахунок і оцінку координат осі обертання вала аеростатичної шпindelної опори, а також вибір її незміщеного положення, формування масивів величин зазорів стабілізації під датчиками величин зазорів, установлених по осям базових систем координат, формування сигналів управління на регулятори положення вала аеростатичної шпindelної опори, згідно винаходу, на обгинаючій переріза вала аеростатичної шпindelної опори по $A-A$ площині установки датчиків величин зазорів визначають точки максимального розміру цього переріза, відрізок прямої максимального розміру переріза вала, яка з'єднує точки

максимального розміру переріза вала, суміщають з віссю X_1^A базової системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$, кут повороту вала, на якому відрізок прямої максимального розміру переріза вала був суміщений з віссю X_1^A , приймають в якості нульового $\varphi = 0$ кута повороту вала, точку O^A переріза вала по $A-A$ площині установки датчиків, яка лежить на відрізку прямої максимального розміру переріза вала при суміщеному положенні цієї прямої з віссю X_1^A базової системи координат і співпадає з початком O_1^A базової системи координат, приймають

в якості точки осі обертання вала, а положення осі обертання вала, при якому вона проходить через початок O_1^A базової системи координат, приймають в якості її незміщеного положення, радіус кола з центром в точці O^A і яке проходить через одну з точок максимального розміру переріза вала приймають рівним розрахунковій величині радіуса R вала аеростатичної шпindelної опори, послідовно основи кожних чотирьох датчиків величин зазорів, установлених по осям кожної системи координат в перерізі вала по $A-A$ площині установки датчиків,

установлюють по колу радіуса R_1 , який більше радіуса R на величину розрахункового зазору аеростатичної шпindelної опори і визначають відстані від точки O^A до точок обгинаючої переріза вала, розташованих на куту $\varphi = 0$ повороту вала під центрами основ датчиків величин зазорів, координати датчиків величин зазорів, установлених в перерізі вала по $A-A$ по осям "к" систем координат перераховують в координати базової системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$, в цьому ж перерізі вала уводять жорстко зв'язану з валом систему координат $X^A O^A Y^A$, початок якої суміщають з точкою O^A переріза вала, а її осі координат на куту $\varphi = 0$ повороту вала

суміщають з однойменними осями базової системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$, будують функціональну залежність у вигляді полінома n -го ступеня між кутовим положенням точок частини обгинаючої переріза вала, розташованих під центрами основ датчиків величин зазорів на куту $\varphi = 0$ повороту вала, яка лежить над віссю X^A системи координат $X^A O^A Y^A$, і відстанями від точки O^A до цих точок і функціональну залежність у вигляді полінома n -го ступеня між кутовим положенням точок частини обгинаючої переріза вала, розташованих під центрами

основ датчиків величин зазорів на куту $\varphi = 0$ повороту вала, яка лежить під віссю X^A системи координат $X^A O^A Y^A$, і відстанями від точки O^A до цих точок, в статистиці на дискретних кутах повороту вала по вимірюванням величин зазорів під датчиками величин зазорів і розрахованим по отриманим функціональним залежностям відстаням від точки O^A до точок частин обгинаючої на кутах установки датчиків величин зазорів розраховують і

оцінюють координати осі обертання вала в базовій системі координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$, суміщають ось обертання вала з початком O_1^A базової системи координат, запам'ятовують сигнали управління на регулятори положення

вала, які на дискретних кутах повороту забезпечують суміщення осі обертання вала з початком O_1^A базової системи координат, вимірюють і запам'ятовують величини зазорів стабілізації під датчиками величин зазорів,

установлених по осям базової системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$, які на дискретних кутах повороту вала відповідають незміщеному положенню осі обертання, наведені вище дії виконують для переріза по $B-B$ аеростатичної шпindelної опори, отримують і запам'ятовують сигнали управління на регулятори положення

вала, які на дискретних кутах повороту забезпечують суміщення осі обертання вала з початком O_1^B базової системи координат $X_1^B O_1^B Y_1^B$, отримують і запам'ятовують величини зазорів стабілізації під датчиками величин

зазорів, установлених по осям базової системи координат $X_1^B O_1^B Y_1^B$, які на дискретних кутах повороту вала відповідають незміщеному положенню осі обертання вала, балансують вал аеростатичної шпindelної опори для чого валу опори задають обертання з номінальною швидкістю, на дискретах стабілізації на регулятори положення вала подають сигнали управління, які в статистиці запобігають зміщенню осі обертання вала відносно

початків O_1^A і O_1^B базових систем координат, на довільному куту повороту вала отримують оцінки координат осі обертання вала в перерізах по А-А і В-В цього вала, визначають величину і напрямок зміщення осі обертання вала в цих перерізах, балансують вал і запобігають зміщення осі обертання вала під дією динамічного навантаження, в процесі роботи аеростатичної шпиндельної опори стабілізують радіальне положення осі обертання вала для чого на дискретах стабілізації порівнюють поточне значення величин зазорів під датчиками

величин зазорів, установлених по осям базових систем координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$ і $X_1^B O_1^B Y_1^B$ з відповідними величинами зазорів стабілізації, при відхиленні поточних величин зазорів від відповідних величин зазорів стабілізації виробляють сигнали управління на регулятори положення вала і запобігають радіальному зміщенню

осі обертання вала відносно початків O_1^A і O_1^B базових систем координат, на довільному куту повороту вала отримують оцінки координат осі обертання вала в перерізах по А-А і В-В вала в цих перерізах, балансують вал і запобігають зміщення осі обертання вала під дією динамічного навантаження, в процесі роботи аеростатичної шпиндельної опори стабілізують радіальне положення осі обертання вала для чого на дискретах стабілізації порівнюють поточне значення величин зазорів під датчиками величин зазорів, установлених по осям базових

систем координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$ і $X_1^B O_1^B Y_1^B$ відповідними величинами зазорів стабілізації, при відхиленні поточних величин зазорів від відповідних величин зазорів стабілізації виробляють сигнал управління на регулятори положення вала і запобігають радіальне зміщення осі обертання вала відносно початків O_1^A і O_1^B базових систем координат.

Причинно-наслідковий зв'язок технічного рішення, що заявляється, з досягаємим технічним результатом полягає у наступному.

На Фіг.1 показаний осьовий переріз аеростатичної шпиндельної опори 2, в перерізах по А-А і В-В якої /Фіг.2/ по осям систем координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$, $X_2^A O_2^A Y_2^A$, $X_3^A O_3^A Y_3^A$ і $X_1^B O_1^B Y_1^B$, $X_2^B O_2^B Y_2^B$, $X_3^B O_3^B Y_3^B$ установлені датчики 3 $C_1 \div C_{12}$ величин зазорів.

В перерізах по Б-Б і Г-Г опори 2 /Фіг.3/ по осям систем координат $X_1^B O_1^B Y_1^B$, $X_2^B O_2^B Y_2^B$, $X_3^B O_3^B Y_3^B$ і $X_1^A O_1^A Y_1^A$, $X_2^A O_2^A Y_2^A$, $X_3^A O_3^A Y_3^A$ осі яких паралельні відповідним осям систем координат в перерізах по А-А і В-В опори 2, установлені регулятори 10 тиску газу, які в кожному перерізі об'єднані в чотири групи 11, 12, 13, 14 і 15, 16, 17, 18 регуляторів положення вала 1 опори 2.

Системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$ і $X_1^B O_1^B Y_1^B$ приймають в якості базових, в яких визначаються координати осі обертання вала 1 в перерізах по А-А і В-В, вибирається її незміщене положення і формуються сигнали управління, які забезпечують стабілізацію радіального положення осі обертання вала 1 аеростатичної шпиндельної опори 2.

Наділення опори 2 названими вище пристроями дозволяє точки O^A і O^B перерізів вала 1, які співпадають O_1^A і O_1^B систем координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$ при заданому положенні вала 1, вибирати в якості точок осі обертання вала 1.

Основи датчиків 3 величин зазорів $C_1 \div C_{12}$ незалежно від конфігурації перерізів вала 1 установлюють по колам з центрами в початках O_1^A і O_1^B базових систем координат. Це виключає погрішності визначення координат датчиків 3 із-за неточної апроксимації обгинаючих вала 1.

На куту $\varphi = 0$ повороту вала 1 визначають відстані від точок O^A і O^B до точок обгинаючих перерізів вала 1, які лежать під центрами основ датчиків 3, і будують функціональні залежності між кутовим положенням точок обгинаючих і відстанями до них від точок O^A і O^B /від осі обертання вала 1/ у вигляді поліномів n-го ступеня. Якщо ступені поліномів достатньо високі, відстані "l" від осі обертання до точок обгинаючих, які входять в системи /III/ алгебраїчних квадратних рівнянь для визначення координат осі обертання вала 1, будуть визначатися точніше, чим при апроксимації перерізів вала еліпсами.

По вимірюванням величин зазорів під датчиками 3 і відстаням від осі обертання вала 1 до точок обгинаючих перерізів вала 1 під центрами основ датчиків 3 /Фіг.4/ на поточних кутах поворота вала 1 вирішують $/C_n^2 - 2k /$ систем рівнянь вигляду /III/, обчислюють і оцінюють /отримують точні значення/ координат осі обертання вала 1 в перерізах по А-А і В-В.

В статичі на кутах поворота вала 1 зміщення його осі обертання відбувається із-за деформації поля тиску опори 2 погрішностями розмірів і форми її виготовлення. На дискретних кутах поворота вала 1 формують сигнали управління на регулятори 11-18 положення вала 1, які запобігають цьому зміщенню. При подачі цих сигналів управління на регулятори 11-18 положення вала 1, коли вал 1 обертається і збалансований при відсутності радіального навантаження зміщення осі обертання вала 1 не відбувається.

Якщо вал 1 розбалансований, визначають координати зміщеної осі обертання /Фіг.5/. розраховують величину і напрямок зміщення осі обертання у відповідності з /24/ і /25/. балансують вал 1, наприклад, за допомогою балансувальних вагів.

На дискретних кутах поворота вала 1, при незміщеному положенні осі обертання, вимірюють величини зазорів стабілізації під датчиками 3 величин зазорів, установлених по осям базових систем координат. В процесі роботи опори 2 порівнюють величини поточних зазорів під цими датчиками з величинами зазорів стабілізації. При відхиленні поточних величин зазорів від відповідних величин зазорів стабілізації на регулятори 11-18 положення вала 1 виробляються сигнали управління, які забезпечують стабілізацію радіального положення осі обертання вала 1 аеростатичної шпindel'ної опори 2.

Винахід пояснюється кресленнями:

Фіг.1 - аеростатична шпindel'на опора /осьовий переріз/;

Фіг.2 - датчики величин зазорів в перерізах по А-А і В-В аеростатичної шпindel'ної опори;

Фіг.3 - регулятори положення вала в перерізах по Б-Б і Г-Г аеростатичної шпindel'ної опори;

Фіг.4 - обчислення координат осі обертання вала по вимірюванням величин зазорів під двома датчиками величин зазорів;

Фіг.5 - ілюстрація напрямку і величини зміщення осі обертання вала під дією динамічного навантаження;

Фіг.6 - функціональна схема пристрою стабілізації радіального положення осі обертання вала аеростатичної шпindel'ної опори.

Пристрій стабілізації осі обертання вала 1 аеростатичної шпindel'ної опори 2 /Фіг. 1, осьова аеростатична опора не показана/ включає датчики 3 величин зазорів 4 між основами датчиків 3 і поверхнею вала 1. Датчики 3 величин зазорів установлені у втулці 5 аеростатичної шпindel'ної опори 2 /в двох перерізах цієї опори 2 по А-А і В-В /Фіг.2/, перпендикулярних осі обертання вала 1.

В кожному із згаданих перерізів по осям систем координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$, $X_2^A O_2^A Y_2^A$, $X_3^A O_3^A Y_3^A$ і $X_1^B O_1^B Y_1^B$, $X_2^B O_2^B Y_2^B$, $X_3^B O_3^B Y_3^B$, початки яких суміщені, а осі зсунуті на кут $\varphi = 30^\circ$ установлено дванадцять $C_1 \div C_{12}$ датчиків 3 величин зазорів. В загальному випадку датчики 3 можуть установлюватися по осям $K > 3$ систем координат. Координати осі обертання вала

1 обчислюють в системах координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$ і $X_1^B O_1^B Y_1^B$ і приймають їх в якості базових систем координат.

У втулці 5 в перерізах по Б-Б і Г-Г рівномірно по колу виконують дванадцять /в данному прикладі/ жиклерів 6 подачі газу в зазори аеростатичної шпindel'ної опори 2. Кожний жиклер 6 з'єднує камеру наддува 7 з згаданими зазорами. В камері наддува 7 установлені п'єзоелектричні двигуни 8 /ПЕД 8/ з установленими на них регульовальними голками 9, які призначені для зміни площ поперечних перерізів жиклерів 6. Жиклер 6, ПЕД 8, регульовальна голка 9, камера наддува 7 утворюють регулятор тиску 10 в зазорі аеростатичної шпindel'ної опори 2.

Регулятори 10 тиску газу, які розташовані в одному перерізі, об'єднані в чотири групи /Фіг.3/: перша група 11 регуляторів положення вала, друга група 12 регуляторів положення вала, третя група 13 регуляторів положення вала, четверта група 14 регуляторів положення вала в перерізі опори 2 по Б-Б і перша група 15 регуляторів положення вала, друга група 16 регуляторів положення вала, третя група 17 регуляторів положення вала, четверта група 18 регуляторів положення вала виконані в перерізі по Г-Г опори 2.

Регулятори 10 тиску кожної групи 11 - 18 регуляторів положення вала виконані симетрично відносно осей базових систем координат /Фіг. 3/. Причому, групи 11, 12, 13, 14 регуляторів положення вала, які виконані в перерізі по Б-Б і датчики 3 величин зазорів, які установлені в перерізі по А-А опори 2 /Фіг. 1/, утворюють компенсатор 19 радіального зміщення осі обертання вала. Групи 15, 16, 17, 18 регуляторів положення вала, які виконані в перерізі по Г-Г опори 2, і датчики 3 величин зазорів, які установлені в перерізі по Г-Г опори 2, утворюють компенсатор 20 радіального зміщення осі обертання вала 1 аеростатичної шпindel'ної опори 2.

Кожний датчик 3 величини зазору компенсаторів 19 і 20 радіального зміщення осі обертання з'єднаний з відповідним вимірювачем 21 величини зазору /Фіг.6/. В якості вимірювачів 21 величин зазорів можуть використовуватися вимірювачі мікроперемішень /Гриневич Б.Ф. "Измерительные компенсационно-мостовые устройства с емкостными датчиками Киев, Наукова Думка, 1987г./.. Їх погрішність вимірювання не перевищує $10^{-3} - 10^{-4}$ величини зазора, що вимірюється.

Сигнал з кожного вимірювача 21 надходить в обчислювач 22. В якості вимірювача 22 може використовуватися персональна ЕОМ з модулем вводу - виводу для обміну інформацією з зовнішніми функціональними елементами, наприклад, типа 9825 фірми "Хьюлетт - Паккард" / Науман Г. и др. "Стандартные интерфейсы для элементной техники", М., Мир, 1982г./.

Обчислювач 22 забезпечує:

1. Прийом інформації з вимірювачів 21, обчислення і оцінку координат осі обертання вала 1 опори 2.

2. Прийом інформації з вимірювача 40 кута поворота вала 1.

3. Формування на групи 11-18 регуляторів положення вала 1 компенсаторів 19 і 20 радіального зміщення осі обертання сигналів управління, які на дискретних кутах поворота вала 1 забезпечують установку осі обертання в незміщене положення.

3. Визначення напрямку і величини зміщення осі обертання вала під дією динамічної навантаження.

4. Формування масивів величин зазорів стабілізації, які відповідають незміщеному положенню осі обертання вала 1 на дискретах кута його поворота.

На торці аеростатичної шпindel'ної опори 2 укріплений датчик 23 кута поворота вала 1 в якості якого може бути використаний багатополісний обертаючийся трансформатор /под редакцией Ахметжанова А.А. "Электромеханические преобразователи угла с электрической редукцией М., "Энергия", 1978г./.

3 обчислювача 22 сигнал $U_{уп1}^A$ управління положенням вала 1 на групи 11 і 13 регуляторів положення вала, сигнал $U_{уп2}^A$ управління положенням вала на групи 12 і 14 регуляторів положення вала, сигнал $U_{уп1}^B$

управління положенням вала на групи 15 і 17 регуляторів положенням вала, сигнал $U_{упр2}^B$ управління положенням вала 1 на групи 16 і 18 регуляторів положення вала надходять через два операційних підсилювача 24 і 25 кожний /Фіг. 6/. Причому, на операційні підсилювачі 24 сигнали управління надходять на їх прямі входи, а на операційні підсилювачі 25 сигнали надходять на їх інвертуючі входи. Отже кожна пара операційних підсилювачів 24 і 25 формують рівні по величині і протилежні по фазі напруги, які відповідають сигналам управління.

Виходи кожної пари операційних підсилювачів 24 і 25 вимикачами 26 "увімк. - вимк." підключаються до входів диференціальних підсилювачів 27 сигналів управління.

Диференціальні підсилювачі 27 сигналів управління призначені для формування протифазних напруг, різниці потенціалів між якими відповідає сигналам управління $U_{упр1}^A, U_{упр2}^A, U_{упр1}^B, U_{упр2}^B$.

Виходи диференціальних підсилювачів 27 в процесі підготовки пристрою стабілізації до роботи вимикачами 28 "увімк. - вимк." в положенні "увімк." підключаються до відповідних груп 11 - 18 регуляторів положення вала. Причому, до кожного диференціального підсилювача 27 підключаються дві групи регуляторів положення вала I,

які розташовані по напівосях, паралельних однойменним напівосям базових систем координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$ і $X_1^B O_1^B Y_1^B$. При роботі пристрою в режимі стабілізації диференціальні підсилювачі 27 вимикачами 28 відключаються від груп 11÷18 регуляторів положення вала.

Напруги, які відповідають величинам зазорів стабілізації, з обчислювача 22 надходять на перші входи диференціальних підсилювачів 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36 сигналів неузгодження. На другі входи диференціальних підсилювачів 29, 30, 31, 32 надходять сигнали вимірювачів 21 величин зазорів по сигналам

датчиків 3 величин зазорів, установлених по напівосям $X_1^A, -X_1^A, Y_1^A, -Y_1^A$ базової системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$ в перерізі по А-А вала 1. На другі входи диференціальних підсилювачів 33, 34, 35, 36 надходять

сигнали вимірювачів 21 величин зазорів по сигналам датчиків 3 величин зазорів, установлених по напівосям $X_1^B, -X_1^B, Y_1^B, -Y_1^B$ базової системи координат $X_1^B O_1^B Y_1^B$ в перерізі по В-В вала 1.

Отже диференціальні підсилювачі 29÷36 призначені для формування протифазних сигналів, різниці потенціалів між якими пропорційна величинам відхилень поточних значень величин зазорів під датчиками 3 величин зазорів, установлених в порорізах по А-А і В-В опори 2 по осям базових систем координат від величин відповідних зазорів стабілізації, які відповідають незміщеному положенню осі обертання вала 1 аеростатичної шпindelної опори 2.

Сигнали управління з виходів диференціальних підсилювачів 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36 через перемикач "робота - вимк." в положенні "робота" надходять на групи 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 регуляторів положення вала 1, відповідно. В результаті кожна пара 11 і 13, 12 і 14 регуляторів положення вала 1 в перерізі по Б-Б опори 2, 15 і 17, 16 і 18 в перерізі по Г-Г опори 2 компенсаторів 19 і 20 осі обертання вала 1 створюють силу тиску на вал 1, рівну по величині і протилежну по напрямку складової радіального навантаження на вал 1 по відповідній осі

систем координат $X_1^B O_1^B Y_1^B$ і $X_1^A O_1^A Y_1^A$ в перерізах по Б-Б і В-В опори 2 і запобігають зміщенню вала 1 з незміщеного положення під дією зовнішнього радіального навантаження, із-за деформації поля тиску в газовому шарі опори 2 погіршеннями розмірів і форми її виготовлення, а також залишкового дисбалансу.

38 - балансувальні ваги; 39 - планшайба; 40 - вимірювач кута повороту вала 1 по сигналам датчика 23 кута повороту.

В якості вимірювача кута повороту може використовуватися перетворювач фаза - код /под редакцией Ахметжанова А.А. "Электромеханические преобразователи угла с электрической редукицией", М., "Энергия", 1978 г./.

Причому, датчики 3 величин зазорів компенсаторів 19 і 20 радіального зміщення вала 1 аеростатичної шпindelної опори 2 з'єднані з входами вимірювачів 21 величин зазорів, виходи вимірювачів 21 величин зазорів з'єднані з входами обчислювача 22, а виходи вимірювачів 21 величин зазорів по датчикам 3 величин зазорів, установлених по осям базових систем координат, додатково з'єднані з входами диференціальних підсилювачів 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36 сигналів неузгодження, виходи вимірювача 40 кута повороту вала з'єднані з входами обчислювача 22, виходи обчислювача 22 з'єднані з входами диференціальних підсилювачів 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36 сигналів неузгодження, виходи диференціальних підсилювачів 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36 сигналів неузгодження через перемикач 37 "робота-вимк." з'єднані з відповідними групами 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 регуляторів положення вала 1 компенсаторів 19 і 20 радіального зміщення осі обертання вала 1 аеростатичної шпindelної опори 2, входи кожної пари операційних підсилювачів 24 і 25 з'єднані з виходами обчислювача 22, виходи кожної пари операційних підсилювачів 24 і 25 через вимикачі 26 "увімк.-вимк." з'єднані з входами відповідних диференціальних підсилювачів 27 сигналів управління, а їх виходи через вимикачі 28 "увімк.-вимк." з'єднані з відповідними групами 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 регуляторів положення вала компенсаторів 19 і 20 радіального зміщення осі обертання вала 1 аеростатичної шпindelної опори, виходи датчика 23 кута повороту з'єднані з входами вимірювача 40 кута повороту вала 1.

В даному прикладі реалізації способу стабілізації радіального положення осі обертання вала 1 опори 2 в перерізах по А-А і В-В опори 2 по осям трьох систем координат, початки яких суміщені, а осі зсунуті на кут $\varphi = 30^\circ$, установлені дванадцять датчиків 3 величин зазорів: $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9, C_{10}, C_{11}, C_{12}$,

Кутове положення кожного з цих датчиків в базових системах координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$ і $X_1^B O_1^B Y_1^B$ дорівнює:
 $\alpha_1 = \alpha_{C_3} = 150^\circ$; $\alpha_2 = \alpha_{C_2} = 60^\circ$; $\alpha_3 = \alpha_{C_1} = 90^\circ$; $\alpha_4 = \alpha_{C_2} = 120^\circ$; $\alpha_5 = \alpha_{C_{11}} = 150^\circ$; $\alpha_6 = \alpha_{C_{10}} = 180^\circ$;
 $\alpha_7 = \alpha_{C_9} = 210^\circ$; $\alpha_8 = \alpha_{C_8} = 240^\circ$; $\alpha_9 = \alpha_{C_7} = 270^\circ$; $\alpha_{10} = \alpha_{C_6} = 300^\circ$; $\alpha_{11} = \alpha_{C_5} = 330^\circ$; $\alpha_{12} = \alpha_{C_4} = 0^\circ$.

Спосіб стабілізації радіального положення осі обертання вала 1 аеростатичної шпindelної опори 2 здійснюється наступним чином.

1. Визначають і установлюють точки максимального розміру вала 1 на обгинаючій переріза вала 1 по А-А площини установки датчиків 3 величин зазорів $C_1 - C_{12}$ під центри основ датчиків 3 величин зазорів C_4 і C_{10} , установлених по осі X_1^A базової системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$ такі, що довжина відрізка прямої, який з'єднує ці точки і проходить через початок O_1^A цієї базової системи координат, являється максимальним розміром переріза вала 1 по А-А площини установки датчиків 3. Отже відрізок прямої максимального розміру вала 1 /а₂а₄, Фіг.2/ суміщають з віссю X_1^A базової системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$.

Для цього вал 1 опори 2 установлюють на довільний кут повороту. Регуляторами 11 і 13 положення вала 1 під датчиками 3 C_1 і C_7 установлюють рівні величини зазорів 4: $Z_1 = Z_7$. Вимірюють і запам'ятовують величину зазору 3 C_{10} , а також величину зазору 3 C_4 . З дискретністю $\Delta\varphi$ вал 1 опори 2 послідовно установлюють на кут повороту $\Delta\varphi, 2 \cdot \Delta\varphi, 3 \cdot \Delta\varphi, \dots, 360^\circ - \Delta\varphi$. На кожному дискретному куту повороту регуляторами 11 і 13 положення вала 1 зміщують вал 1 по осі Y_1^A системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$ і під датчиками 3 C_1 і C_7 установлюють рівні $Z_1 = Z_7$ величини зазорів 4. Регуляторами 12 і 14 положення вала 1 зміщують вал 1 по осі X_1^A системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$ і під датчиком 3 C_{10} установлюють величину зазору $Z_{10} / \kappa \cdot \Delta\varphi = Z_{10}$. Вимірюють і запам'ятовують величину зазору 4 $Z_4 / \kappa \cdot \Delta\varphi$.

Вал 1 опори 2 установлюють на кут повороту $\varphi = \kappa \cdot \Delta\varphi$, на якому $Z_4 / \kappa \cdot \Delta\varphi = \min$.

З дискретністю $\Delta\varphi_1 < \Delta\varphi$ зберігаючи рівними на кожній дискреті величини зазорів 4 під датчиками 3 C_1 і C_7 , варіюють кутове положення вала 1 опори 2 відносно кута повороту $\varphi = \kappa \cdot \Delta\varphi$. Установлюють вал на кут повороту φ , на якому величина зазору 4 під датчиком 3 C_4 досягає точної нижньої грані: $Z_4 / \varphi = \inf$. Кут φ приймають в якості нульового $\varphi = 0$ кута повороту вала 1.

Не змінюючи кутового положення вала 1 регуляторами 11 і 13 положення вала 1 з дискретністю ΔZ зміщують вал 1 по осі Y_1^A системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$ в інтервалі, наприклад, $\pm Z_1 / 2$ відносно його початкового положення/ Z_1 - величина зазору 4 під датчиком 3 C_1 /.

На кожній n-ій дискреті переміщення вимірюють величини зазорів 4 $Z_4(n \cdot \Delta Z)$ і $Z_{10}(n \cdot \Delta Z)$ обчислюють їх суму:

$$S(n \cdot \Delta Z) = Z_4(n \cdot \Delta Z) + Z_{10}(n \cdot \Delta Z). \quad (2)$$

Вал 1 опори 2 по осі Y_1^A установлюють на дискрету переміщення, на якій сума $S(n \cdot \Delta Z) = \min$.

В результаті відрізок прямої максимального розміру вала 1 а₂а₄ /Фіг. 2/, який з'єднує точки а₂ і а₄ в перерізі по А-А вала 1 буде суміщений з віссю X_1^A базової системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$.

2. Точку O^A переріза вала 1 по А-А площиною установки датчиків 3, яка лежить на відрізку прямої максимального розміру а₂а₄ і співпадає з початком O_1^A системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$ приймають в якості точки осі обертання вала 1. Положення осі обертання вала 1 опори 2, при якому вона проходить через початок O_1^A базової системи координат /точка O^A співпадає з початком O_1^A базової системи координат/ приймають в якості її незміщеного положення.

3. Не змінюючи положення вала 1, датчики 3 величин зазорів $C_1 - C_{12}$ установлюють з однаковими зазорами 4 Z відносно поверхні вала 1: $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_4 = Z_5 = \dots = Z_{12} = Z$, де Z - розрахункова величина зазору аеростатичної шпindelної опори 2.

4. Радіус $O_{a_2}^A$ кола з центром в точці O^A , яке проходить через точку а₂ /або через точку а₄ / максимального розміру вала 1 приймають рівним розрахунковій величині радіуса R вала 1 аеростатичної шпindelної опори 2: $O_{a_2}^A = R$.

Примітка: радіус вала 1 може вибиратися довільно.

5. Основи датчиків 3 величин зазорів 4 C_1, C_4, C_7, C_{10} установлюють по колу радіуса $R_1 = O_{a_2}^A + Z$, центр якої суміщений з початком O_1^A базової системи координат.

Визначають відстані від точки O^A в перерізі вала 1 по А-А до точок a_1, a_3, a_4 на обгинаючій переріза вала 1 по А-А, розташованих на куту $\varphi = 0$ повороту вала під центрами основ датчиків 3 C_1, C_4, C_7 /визначають довжину відрізків прямих $O_{a_1}^A, O_{a_3}^A, O_{a_4}^A$ /.

Для виконання цих дій попередньо визначають різницю між величинами відрізків прямих максимального розміру переріза вала 1 $O_{a_2}^A$ і $O_{a_4}^A$ і величину відрізка $O_{a_4}^A$, а також різницю між величинами відрізків прямих $O_{a_1}^A$ і $O_{a_3}^A$, які лежать на осях базової системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$.

Для цього вал 1 опори 2 відносно нульового $\varphi = 0^\circ$ кута повороту установлюють на кут $\varphi = 180^\circ$ і суміщають точку O^A переріза вала 1 з початком O_1^A базової системи координат. Так як на куті $\varphi = 0^\circ$ усі датчики 3 $C_1 - C_{12}$, відносно поверхні вала 1 були установлені з рівними зазорами, рівними Z критерієм суміщення точки O^A з початком O^A базової системи координат на куту $\varphi = 180^\circ$ повороту вала 1 являється рівність сум зазорів $Z_3 + Z_9 = 2Z$ і $Z_6 + Z_{12} = 2Z$ під датчиками 3 величин установлених зазорів, по осям системи координат $X_2^A O_2^A Y_2^A$, або рівність сум зазорів 4 $Z_2 + Z_8 = 2Z$ і $Z_5 + Z_{11} = 2Z$ під датчиками сум величин зазорів, установлених по осям системи координат $X_3^A O_3^A Y_3^A$.

Точку O^A переріза вала 1 по А-А з початком O_1^A базової системи координат суміщають по вимірюванням зазорів 4 під датчиками 3, установлених по осям системи координат $X_2^A O_2^A Y_2^A$. Для цього, не змінюючи кутового положення вала 1, регуляторами 11, 12, 13, 14 положення вала 1 з вибраною дискретністю ΔZ зміщують вал 1 по осі Y_2^A , наприклад, в інтервалі $\pm Z/2$. На кожній дискреті переміщення вимірюють величини зазорів 4 під датчиками 3 C_3 і C_9 . Установлюють вал 1 в положення, при якому сума величин зазорів 4 $Z_3 + Z_9 = 2Z$. Далі регуляторами 11, 12, 13, 14 положення вала 1 з дискретою ΔZ зміщують його по осі X_2^A цієї ж системи координат у тому ж інтервалі $\pm Z/2$. На кожній дискреті переміщення вимірюють величини зазорів 4 під датчиками 3 C_6 і C_{12} . Установлюють вал 1 в положення, при якому сума величин зазорів $Z_6 + Z_{12} = 2Z$ і суміщають точку O^A переріза вала 1 по А-А з початком O_1^A базової системи координат.

Не змінюючи положення вала 1, вимірюють величину зазору $Z_4(\varphi = 180^\circ)$. Нехай $Z > Z_4(\varphi = 180^\circ)$, а їх різниця дорівнює Δ_1 . Отже відрізок прямої $O_{a_4}^A$ на величину Δ_1 менше величини відрізка $O_{a_2}^A$ і дорівнює $O_{a_4}^A = R - \Delta_1$. Зміщують датчик 3 C_4 по висоті зазору і установлюють його відносно поверхні вала з зазором Z . Основу датчика 3 C_4 буде установлено на колу радіуса $R_1 = O_{a_2}^A + Z$, центр якої співпадає з початком O_1^A базової системи координат /з початками O_1^A, O_2^A, O_3^A , систем координат в перерізі по А-А/.

Вимірюють величину зазору 4 $Z_7(\varphi = 180^\circ)$. Нехай $Z < Z_7(\varphi = 180^\circ)$, а їх різниця Δ_2 . Отже відрізок прямої $O_{a_1}^A$ на величину Δ_2 менше відрізка $O_{a_3}^A$.

Установлюють вал 1 опори 2 на кут повороте $\varphi = 0$, а потім поворотом, наприклад, по годинниковій стрілці установлюють на кут повороту $\varphi = 90^\circ$. Суміщають точку O^A переріза вала 1 з початком базової системи координат. Критерієм суміщення точки O^A з початком O_1^A базової системи координат на куту повороту вала 1 $\varphi = 90^\circ$ в цьому випадку являється перевищення виміряної величини зазору Z_4 під датчиком 3 C_4 на Δ_2 виміряної величини зазору Z_{10} під датчиком 3 C_{10} /так як датчики 3 C_4 і C_{10} установлені по колу радіуса R_1 $Z_4 = Z_{10} - \Delta_2$ /, а під датчиками 3 C_1 і C_7 повинні бути наступні співвідношення величин виміряних зазорів: $Z_4 - \Delta_2 = Z_7 + \Delta_1$ або $Z_1 - (\Delta_1 + \Delta_2) = Z_7$.

Послідовно зміщуючи вал 1 по осям X_1^A і Y_1^A системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$ методом послідовних наближень установлюють потрібні співвідношення величин зазорів 4 C_1, C_4, C_7, C_{10} і суміщають точку O^A переріза вала 1

з початком O_1^A базової системи координат. Зміщують датчик 3 C_1 по висоті зазору і установлюють його з зазором Z відносно поверхні вала 1 /точки a_2 /, а датчик 3 C_7 відносно поверхні вала 1 /точки a_4 / установлюють з зазором $Z + \Delta_1$ і установлюють основи цих датчиків 3 на коло радіуса $R = O_{a_2}^A + Z$ з центром в початку базової системи координат.

В результаті основи датчиків 3 величин зазорів, установлених по осям базової системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$, будуть установлені по згаданому колу радіуса R_1 .

Установлюють вал 1 на кут поворота $\varphi = 0^\circ$ і суміщають точку O^A з початком O_1^A базової системи координат. Для цього зміщують вал 1 регуляторами 11, 12, 13, 14 положення вала 1 по осі X_1^A і осі Y_1^A і методом послідовних наближень під датчиком 3 C_4 установлюють величину зазора 4 $Z_4 = Z + \Delta_1$, під датчиком 3 C_{10} $Z_{10} = Z$, а під датчиком 3 C_1 установлюють величину зазора 4 на Δ_2 більшу величини зазора під датчиком 3 C_7 : $Z_1 - Z_7 = \Delta_2$.

Вимірюють і запам'ятовують величини зазорів Z_1 і Z_7 , які відповідають незміщеному положенню осі обертання вала 1 по осі Y_1^A системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$ на куту $\varphi = 0$ поворота вала 1. Розраховують величини відрізків

$$O^A a_2 = R_1 - Z_1; O^A a_3 = R_1 - Z_7 \quad (3)$$

Нагадаємо, що $O^A a_2 = R$, $O^A a_4 = R - \Delta_1$. В результаті виконаних дій основи датчиків 3 C_1, C_4, C_7, C_{10} установлені по колу радіуса R_1 , центр якого співпадає з початком O_1^A базової системи координат, і визначені відстані від точки O^A до точок a_1, a_2, a_3, a_4 обгинаючої переріза вала по А-А, які на куту поворота вала $\varphi = 0^\circ$ розташовані під центрами основ датчиків 3 C_1, C_4, C_7, C_{10} .

6. Основи датчиків 3 величин зазорів C_3, C_6, C_9, C_{12} установлюють по колу радіуса R_1 , центр якої суміщений з початком O_1^A базової системи координат. Визначають відстані від точки O^A в перерізі вала 1 по А-А до точок b_1, b_2, b_3, b_4 обгинаючої переріза вала 1, які на куту $\varphi = 0$ поворота вала розташовані під центрами основ датчиків 3 величин зазорів C_3, C_6, C_9, C_{12} .

Для виконання цих установок і вимірювань вал 1 опори 2 відносно кута поворота $\varphi = 0^\circ$ поворотом проти годинникової стрілки установлюють на кут $\varphi = 30^\circ$. В результаті точки a_1, a_2, a_3, a_4 розташуються під центрами основ датчиків 3 C_{12}, C_9, C_6, C_3 , відповідно, установлених по осям системи координат $X_2^A O_2^A Y_2^A$ /Фіг. 2/.

Суміщають відрізок прямої максимального розміра $a_2 a_4$ з віссю X_2^A системи координат $X_2^A O_2^A Y_2^A$. Для цього регуляторами 11, 12, 13, 14 положення вала 1 зміщують вал 1 по осі Y_2^A цієї системи координат, наприклад, в інтервалі $\pm Z_{12} / 2$ з вибраною дискретністю ΔZ . На кожній n-й дискреті переміщення вимірюють величину зазора Z_3 / n під датчиком 3 C_3 і величину зазора Z_9 / n під датчиком 3 C_9 і обчислюють їх суму $S / n = Z_3 / n + Z_9 / n$. Установлюють вал 1 опори 2 на дискрету переміщення, на якій $S / n = \min$ і суміщують відрізок прямої максимального розміра $a_2 a_4$ з осью X_2^A .

Після виконаного суміщення може статися, що точка O^A по осі X_2^A зміщена відносно печатка O_1^A базової системи координат. Припускаючи, що точка O^A суміщена з початком O_1^A базової системи координат, датчик 3 C_3 відносно поверхні вала 1 /точки a_4 / установлюють з зазором $Z_3 = R_1 - O^A a_4$, датчик 3 C_9 /над точкою a_2 / - з зазором $Z_9 = R_1 - O^A a_2 = Z$, датчик 3 C_{12} /над точкою a_1 / - з зазором $Z_{12} = R_1 - O^A a_1$, датчик 3 C_6 /над точкою a_3 / - з зазором $Z_6 = R_1 - O^A a_3$.

Поворотом вала 1 по годинниковій стрільці на кут $\varphi = 30^\circ$ точки b_1, b_2, b_3, b_4 повертають під центри основ датчиків 3 величин зазорів C_{12}, C_9, C_6, C_3 , відповідно.

По вимірюванням величин зазорів Z_1, Z_7, Z_4, Z_{10} під датчиками 3 C_1, C_7, C_4, C_{10} точку O^A суміщають з

початком базової системи координат. Незмінюючи положення вала 1 вимірюють і запам'ятовують величини зазорів Z_3, Z_9, Z_6, Z_{12} і обчислюють суми $S_1 = Z_3 + Z_9$ $S_2 = Z_6 + Z_{12}$.

Поворотом вала 1 по годинниковій стрілці на кут $\varphi = 30^\circ$ точки b_1, b_2, b_3, b_4 установлюють під центри основ датчиків з C_1, C_{10}, C_7, C_4 , відповідно. Регуляторами 11, 12, 13, 14 положення вала 1 під датчиком з C_7 установлюють величину зазора $Z_7 = Z_6$, а під датчиком з C_{10} - величину зазора $Z_{10} = Z_9$. Вимірюють величини зазорів Z_1, Z_4 і обчислюють суми $S_3 = Z_4 + Z_{10}$ $S_4 = Z_1 + Z_7$. Так як датчики з C_1, C_4, C_7, C_{10} установлені по колу радіуса R_1 , критерієм того, що після поворота вала 1 з початкового $\varphi = 0^\circ$ кутового положення проти годинникової стрілки на кут $\varphi = 30^\circ$ і суміщення відрізка прямої максимального розміра $a_2 a_4$ з осью X_2^A системи координат $X_2^A O_2^A Y_2^A$ точка O^A співпала з початком базової системи координат, а, отже, основи датчиків з C_3, C_6, C_9, C_{12} були установлені по колу радіуса R_1 , являється рівність сум:

$$S_1 = S_3; S_2 = S_4 \quad (4)$$

Якщо хоча би одна з цих рівностей не виконується, після суміщення відрізка прямої максимального розміра вала 1 $a_2 a_4$ з осью X_2^A точка O^A по осі X_2^A була зміщена відносно початка O_1^A базової системи координат.

Для суміщення точки O^A з початком O_1^A базової системи координат після кожного невиконання рівностей /4/ вал 1 опори 2 з початкового $\varphi = 0^\circ$ кутового положення поворотом проти годинникової стрілки установлюють на кут $\varphi = 30^\circ$. Суміщають відрізок прямої максимального розміра вала 1 $a_2 a_4$ з осью X_2^A і регуляторами 11, 12, 13, 14 положення вала 1 зміщують вал 1 на чергову дискрету ΔZ /варіація положення точки O^A по осі X_2^A може, наприклад, виконуватися в інтервалі $\pm Z_3 / 2$ /.

На кожній дискреті переміщення точки O^A по осі X_2^A виконуються наведені вище дії і перевіряється виконання рівностей /4/. Якщо після n-ї дискрети переміщення рівності /4/ виконуються, точка O^A на цій дискреті була суміщена з початком O_1^A базової системи координат, а основи датчиків з величин зазорів C_3, C_6, C_9, C_{12} були установлені по колу радіуса R_1 .

Вал 1 аеростатичної шпіндельної опори 2 установлюють на кут поворота $\varphi = 0^\circ$, під датчиками з C_1, C_4, C_7, C_{10} установлюють величини зазорів, які відповідають назміщеному положенню осі обертання на цьому куту поворота, і суміщають точку O^A з початком O_1^A базової системи координат. Вимірюють величини зазорів Z_3, Z_6, Z_9, Z_{12} і обчислюють відстані від точки O^A до точок b_1, b_2, b_3, b_4 в перерізі вала 1 по А-А:

$$O^A b_1 = R_1 - Z_{12}; O^A b_2 = R_1 - Z_9; O^A b_3 = R_1 - Z_6; O^A b_4 = R_1 - Z_3 \quad (5)$$

7. Основи датчиків з величин зазорів C_2, C_5, C_8, C_{11} установлюють по колу радіуса R_1 , центр якої суміщений з початком базової системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$. Визначають відстані від точки O^A в перерізі вала 1 по А-А через яку проходить ось обертання вала 1, до точок d_1, d_2, d_3, d_4 обгинаючої переріза вала 1, які на куту $\varphi = 0^\circ$ поворота вала 1 розташовані під центрами основ датчиків з величин зазорів C_2, C_5, C_8, C_{11} .

Для виконання цих установок і вимірювань вал 1 опори 2 поворотом проти годинникової стрілки установлюють на кут $\varphi = 60^\circ$. В результаті точки a_1, a_2, a_3, a_4 розташуються під датчиками з C_{11}, C_8, C_5, C_2 , відповідно, які установлені по осям системи координат $X_3^A O_3^A Y_3^A$ /Фіг. 2/. Суміщають відрізок прямої максимального розміра вала 1 $a_2 a_4$ з осью X_3^A системи координат $X_3^A O_3^A Y_3^A$. Для цього регуляторами 11, 12, 13, 14 положення вала 1 зміщують вал 1 по осі Y_3^A цієї системи координат, наприклад, в інтервалі $\pm Z_{11} / 2$ з вибраною дискретністю ΔZ . На кожній n-й дискреті переміщення вимірюють величину зазора Z_2 / n під датчиком з C_2 і Z_8 / n під датчиком з C_8 і обчислюють їх суму $S / n = Z_2 / n + Z_8 / n$.

Установлюють вал 1 опори 2 на дискрету переміщення, на якій $S / n = \min$ і суміщують відрізок прямої максимального розміру вала 1 $a_2 a_4$ з осью X_3^A . Як і в попередньому випадку, після виконання суміщення може виявитися, що точка O^A по осі X_3^A зміщена відносно початку O_1^A базової системи координат. Припускаючи, що

точка суміщена з початком O_1^A базової системи координат, датчик з C_2 відносно поверхні вала 1 /точки a_4 обгинаючої/ установлюють з зазором $Z_2 = R_1 - O^A a_4$, датчик з C_8 /над точкою $a_2/$ - з зазором $Z_8 = R_1 - O^A a_2$, датчик з C_5 /над точкою $a_3/$ - з зазором $Z_5 = R_1 - O^A a_3$, датчик з C_{11} /над точкою a_{11} - з зазором $Z_{11} = R_1 - O^A a_{11}$.

Поворотом вала 1 проти годинникової стрілки на кут $\varphi = 60^\circ$ точки d_1, d_2, d_3, d_4 повертають під центри основ датчиків з C_{11}, C_8, C_5, C_2 , відповідно. По вимірюванням величин зазорів Z_1, Z_7, Z_4, Z_{10} під датчиками з C_1, C_4, C_7, C_{10} точку O^A суміщають з початком O_1^A базової системи координат. Незмінюючи положення вала 1 вимірюють і запам'ятовують величини зазорів Z_2, Z_8, Z_5, Z_{11} і обчислюють суми $S_1 = Z_2 + Z_8$ і $S_2 = Z_5 + Z_{11}$.

Поворотом вала 1 по годинниковій стрілці на кут $\varphi = 60^\circ$ точки d_1, d_2, d_3, d_4 установлюють під центри основ датчиків з C_1, C_{10}, C_7, C_4 , відповідно. Регуляторами 11, 12, 13, 14 положення вала 1 під датчиком з C_7 установлюють величину зазора $Z_7 = Z_5$, а під датчиком з C_{10} - величину зазора $Z_{10} = Z_8$. Вимірюють величини зазорів Z_1 і Z_4 і обчислюють суми $S_3 = Z_4 + Z_{10}$ і $S_2 = Z_1 + Z_7$.

Як і в попередньому випадку, так як датчики з C_1, C_4, C_7, C_{10} установлені по колу радіуса R_1 , критерієм того, що після поворота вала 1 з початкового $\varphi = 0^\circ$ кутового положення проти годинникової стрілки на кут $\varphi = 60^\circ$ і суміщення відрізка прямої $a_2 a_4$ максимального розміру вала 1 з осью X_3^A системи координат $X_3^A O_3^A Y_3^A$ точка O^A співпала з початком O_1^A базової системи координат, а, отже, основи датчиків з C_2, C_5, C_8, C_{11} були установлені по колу радіуса R_1 , як і раніше, являється рівність сум $S_1 = S_3$ і $S_2 = S_4$.

Якщо хоча би одна з рівностей не виконується, після суміщення відрізка прямої $a_2 a_4$ з осью X_3^A точка O^A по осі X_3^A була зміщена відносно печатка O_1^A базової системи координат. Для суміщення точки O^A з початком O_1^A базової системи координат після кожного невиконання рівностей сум вал 1 опори 2 з початкового $\varphi = 0^\circ$ кутового положення поворотом проти годинникової стрілки установлюють на кут $\varphi = 60^\circ$.

Суміщають відрізок максимального розміру $a_2 a_4$ з осью X_3^A і регуляторами 11, 12, 13, 14 положення вала 1 зміщують вал 1 по осі X_3^A на дискрету ΔZ /варіація положення точки O^A на осі X_3^A може, наприклад, виконуватися в інтервалі $\pm Z_2 / 2/$. На кожній дискреті переміщення точки O^A по осі X_3^A виконують наведені вище дії і перевіряють виконання рівностей сум. Якщо після n-ої дискрети переміщення рівність сум досягнута, точка O^A на цій дискреті була суміщена з початком базової системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$, а основи датчиків з C_2, C_5, C_8, C_{11} , були установлені по колу радіуса R_1 .

Вал 1 опори 2 установлюють на кут поворота $\varphi = 0^\circ$, установлюють під датчиками з C_1, C_4, C_7, C_{10} зазори, які відповідають незміщеному положенню осі обертання вала 1, і суміщають точку O^A з початком O_1^A базової системи координат. Вимірюють величини зазорів Z_2, Z_5, Z_8, Z_{11} і обчислюють відстані від точки O^A до точок d_1, d_2, d_3, d_4 в перерізі вала по А-А:

$$O^A d_1 = R_1 - Z_{11}; O^A d_2 = R_1 - Z_8; O^A d_3 = R_1 - Z_5; O^A d_4 = R_1 - Z_2. \quad (6)$$

8. Розраховують координати датчиків з величин зазорів $C_1 \div C_{12}$ в базовій системі координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$.

Основи датчиків з величин зазорів в результаті виконаних вище дій були установлені по колу радіуса R_1 з центром в початку O_1^A базової системи координат по осям систем координат $X_1^A O_1^A Y_1^A, X_2^A O_2^A Y_2^A, X_3^A O_3^A Y_3^A$, початки яких суміщені, а осі відносно друг друга зсунуті на кут $\varphi = 30^\circ$. Тоді координати датчиків з $C_1 \div C_{12}$ в базовій системі координат приймають вигляд:

$$\begin{aligned}
(x_{c1} = 0, y_{c1} = R_1); \\
(x_{c2} = R_1 \cdot \cos \alpha_2, y_{c2} = R_1 \cdot \sin \alpha_2); \\
(x_{c3} = R_1 \cdot \cos \alpha_1, y_{c3} = R_1 \cdot \sin \alpha_1); \\
(x_{c4} = R_1, y_{c4} = 0); \\
(x_{c5} = R_1 \cdot \cos \alpha_{11}, y_{c5} = R_1 \cdot \sin \alpha_{11}); \\
(x_{c6} = R_1 \cdot \cos \alpha_{10}, y_{c6} = R_1 \cdot \sin \alpha_{10}); \\
(x_{c7} = 0, y_{c7} = R_1); \\
(x_{c8} = R_1 \cdot \cos \alpha_8, y_{c8} = R_1 \cdot \sin \alpha_8); \\
(x_{c9} = R_1 \cdot \cos \alpha_7, y_{c9} = R_1 \cdot \sin \alpha_7); \\
(x_{c10} = -R_1, y_{c10} = 0); \\
(x_{c11} = R_1 \cdot \cos \alpha_5, y_{c11} = R_1 \cdot \sin \alpha_5); \\
(x_{c12} = R_1 \cdot \cos \alpha_4, y_{c12} = R_1 \cdot \sin \alpha_4)
\end{aligned} \quad (7)$$

В перерізі вала 1 по А-А площиною установки датчиків 3 величин зазорів уводять жорстко зв'язану з валом 1 аеростатичної шпindelної опори 2 систему координат $X^A O^A Y^A$, центр якої суміщають з точкою O^A , яка лежить на осі обертання вала, а її осі координат на куту $\varphi = 0^\circ$ поворота вала 1 суміщають з одноіменними осями базової системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$.

Строять функціональну залежність, наприклад у вигляді ортогонального полінома Чебишева n-го ступеня між кутовим положенням точок обгинаючої, по якій поверхня вала 1 пересікається з площиною установки датчик 3, і відстанями від точки O^A до точок цієї обгинаючої. Причому, окремо будується функціональна залежність між кутовим положенням точок частини обгинаючої і відстанями від точки O^A до точок цієї частини обгинаючої, яка лежить над осью X^A системи координат $X^A O^A Y^A$ і якій належать точки $a_2, d_1, b_1, a_1, b_4, a_4, d_4$ і функціональна залежність між кутовим положенням точок частини обгинаючої і відстанями від точки O^A до точок цієї частини обгинаючої, яка лежить під осью X^A системи координат $X^A O^A Y^A$, і якій належать точки $a_2, b_2, d_2, a_3, b_3, d_3, a_4$. В якості кутових положень цих точок приймають кутові положення датчиків 3, під центрами основ яких на куту $\varphi = 0^\circ$ поворота вала ці точки розташовані. Подамо кутові положення згаданих точок і їх відстані від точки O^A у вигляді двох таблиць:

Таблиця 1

α_n	0	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6
l	$O^A a_4$	$O^A b_4$	$O^A d_4$	$O^A a_1$	$O^A b_1$	$O^A d_1$	$O^A a_2$

Таблиця 2

α_n	α_6	α_7	α_8	α_9	α_{10}	α_{11}	α_{12}
l	$O^A a_2$	$O^A b_2$	$O^A d_2$	$O^A a_3$	$O^A b_3$	$O^A d_3$	$O^A a_4$

По відстаням до n=7 точок /у даному прикладі реалізації способу/ на кожній частині обгинаючої і їх кутовим положенням, що складають таблицю 1 і таблицю 2, будують дві функціональні залежності у вигляді поліномів Чебишева /Гутер Р.С., Овчинский Б.В. "Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта", М., Наука, 1970г./:

$$l = f_0 + f_1 \alpha' + f_2 (\alpha')^2 + f_3 (\alpha')^3 + \dots + f_{(n-1)} (\alpha')^{n-1} \quad (8)$$

$$l = k_0 + k_1 \alpha' + k_2 (\alpha')^2 + k_3 (\alpha')^3 + \dots + k_{(n-1)} (\alpha')^{n-1} \quad (9)$$

де α' - кутове положення точки під центром основи датчика 3 величини зазора в системі координат $X^A O^A Y^A$ на куту φ поворота вала 1.

9. В статистиці на кожному дискретному куту поворота вала 1 $\varphi = 0^\circ, \Delta\varphi, 2\Delta\varphi, 3\Delta\varphi, \dots, 360^\circ - \Delta\varphi$, аеростатичної шпindelної опори 2 розраховують координати осі обертання вала 1 /точки O^A /, регуляторами 11, 12, 13, 14 положення вала 1 зміщують вал 1 опори 2 і суміщають ось обертання вала 1 з початком O_1^A базової системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$. Запам'ятовують сигнали управління $U_{упр.1}^B(k \cdot \Delta\varphi)$ і $U_{упр.2}^B(k \cdot \Delta\varphi)$ / $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ / , які в статистиці на дискретних кутах поворота забезпечують установку осі обертання вала 1 в незміщене положення

/суміщення точки O^A з початком O_1^A базової системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$ /.

На кожному дискретному куту поворота вала 1 після установки його осі обертання у незміщене положення вимірюють і запам'ятовують величини зазорів стабілізації $Z_1^A(k \cdot \Delta\varphi)$, $Z_4^A(k \cdot \Delta\varphi)$, $Z_7^A(k \cdot \Delta\varphi)$, $Z_{10}^A(k \cdot \Delta\varphi)$ / $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ / під датчиками 3 величин зазорів, установлених по осям базової системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$.

Виконання наведених вище дій на куту $\varphi = 0^\circ$ поворота вала 1 частково відрізняється від виконання цих же дій на наступних дискретах кута поворота вала 1. Так як основи усіх датчиків 3 величин зазорів $C_1 - C_{12}$ були установлені по колу радіуса R_1 з центром в початку O_1^A базової системи координат, довжини відрізків прямих $O^A a_1$, $O^A a_2$, $O^A a_3$, $O^A a_4$ відомі, для суміщення осі обертання вала 1 /точки O^A / з початком O_1^A базової системи координат під датчиками 3 C_1, C_4, C_7, C_{10} регуляторами 11, 12, 13, 14 положення вала 1 опори 2 установлюють наступні величини зазорів, відповідно: $Z_1 / 0 / = R_1 - O^A a_1$; $Z_4 / 0 / = R_1 - O^A a_4$; $Z_7 / 0 / = R_1 - O^A a_3$; $Z_{10} / 0 / = R_1 - O^A a_2$.

Сигнали управління $U_{упр1}^B / 0 /$ і $U_{упр2}^B / 0 /$ на регулятори 11, 12, 13, 14 положення вала 1, подачею яких на ці регулятори ось обертання вала 1 була суміщена з початком O_1^A базової системи координат, і величини зазорів $Z_1^A / 0 /$, $Z_4^A / 0 /$, $Z_7^A / 0 /$, $Z_{10}^A / 0 /$ запам'ятовують.

Вал 1 опори 2 поворотом, наприклад, проти годинникової стрілки установлюють на черговий кут $\varphi = \Delta\varphi$. В системі координат $X^A O^A Y^A$, жорстко зв'язаній з валом 1 в його перерізі по $A - A$, на куту поворота $\varphi = \Delta\varphi$ визначають кутове положення точок частин обгинаючих, які розташувались під центрами основ датчиків 3 $C_1 - C_{12}$. Для спрощення викладу будемо вважати, що вал 1 шпindel'ної опори 2 нерухомий, а на кут $\varphi = \Delta\varphi$ поворотом по годинниковій стрільці установлюють системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$, $X_2^A O_2^A Y_2^A$, $X_3^A O_3^A Y_3^A$ разом з установленими по їх осям датчиками 3 $C_1 - C_{12}$ величин зазорів навколо їх початків. Тоді кутове положення точок частини обгинаючої під центрами основ датчиків 3 $C_1, C_2, C_3, C_{11}, C_{12}$, розташованих у верхній напівплощині базової системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$ у рухомій системі координат $X^A O^A Y^A$ при установці вала на кут φ розраховується по наступному правилу.

Для датчика 3 C_3 :

1. Обчислюється різниця між кутом установки датчика 3 C_3 α_1 в базовій системі координат і кутом φ поворота вала 1: $\alpha_1 - \varphi$.

2. Виконується перевірка: $\alpha_1 - \varphi \geq 0$. Якщо ця нерівність виконується, кутове положення точки в рухомій системі координат $X^A O^A Y^A$, що розташувалась під центром основи датчика 3 C_3 після установки вала 1 на кут φ $\alpha'_1 = \alpha_1 - \varphi$.

3. Якщо $\alpha_1 - \varphi < 0$, кутове положення точки в рухомій системі координат $X^A O^A Y^A$, яка розташувалась під центром основи датчика 3 C_3 після установки вала 1 на кут φ $\alpha'_1 = 360^\circ + \alpha_1 - \varphi$. Тут α'_1 - кутове положення точки обгинаючої в системі координат $X^A O^A Y^A$, яка на куту поворота вала 1 φ розташувалась під центром основи датчика 3 C_3 , кутове положення якого в базовій системі координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$ $\alpha_1 = \alpha_{C3}$.

По цій же схемі розраховуються кутові положення α'_2 , α'_3 , α'_4 , α'_5 точок обгинаючої в системі координат $X^A O^A Y^A$ на куту φ поворота вала 1 під датчиками 3 C_1, C_2, C_{11}, C_{12} , відповідно.

Кутові положення точок в рухомій системі координат $X^A O^A Y^A$, розташованих під центрами основ датчиків 3 C_9, C_8, C_7, C_6, C_5 , установленими по одній осі з датчиками 3 $C_3, C_2, C_1, C_{12}, C_{11}$, після установки вала 1 на угол φ розраховуються по наступному правилу. Під датчиком 3 C_9 : якщо $180^\circ \geq \alpha'_1 \geq 0^\circ$, $\alpha'_7 = \alpha'_1 + 180^\circ$, якщо $360^\circ > \alpha'_1 > 180^\circ$, $\alpha'_7 = \alpha'_1 - 180^\circ$.

Під датчиками 3 C_8, C_7, C_6, C_5 , C_5 відповідно маємо:

$180^\circ \geq \alpha'_2 \geq 0^\circ$, $\alpha'_8 = \alpha'_2 + 180^\circ$, $360^\circ > \alpha'_2 > 180^\circ$, $\alpha'_8 = \alpha'_2 - 180^\circ$;

$$\begin{aligned} 180^\circ \geq \alpha'_3 \geq 0^\circ, \alpha'_9 &= \alpha'_3 + 180^\circ, 360^\circ > \alpha'_3 > 180^\circ, \alpha'_9 = \alpha'_3 - 180^\circ; \\ 180^\circ \geq \alpha'_4 \geq 0^\circ, \alpha'_{10} &= \alpha'_4 + 180^\circ, 360^\circ > \alpha'_4 > 180^\circ, \alpha'_{10} = \alpha'_4 - 180^\circ; \\ 180^\circ \geq \alpha'_5 \geq 0^\circ, \alpha'_{11} &= \alpha'_5 + 180^\circ, 360^\circ > \alpha'_5 > 180^\circ, \alpha'_{11} = \alpha'_5 - 180^\circ. \end{aligned}$$

Нагадаємо, що тут $\alpha_1 = \alpha_{C3}, \alpha_2 = \alpha_{C2}, \alpha_3 = \alpha_{C1}, \alpha_4 = \alpha_{C12}, \alpha_5 = \alpha_{C11}, \alpha_6 = \alpha_{C10}, \alpha_7 = \alpha_{C9}, \alpha_8 = \alpha_{C8}, \alpha_9 = \alpha_{C7}, \alpha_{10} = \alpha_{C6}, \alpha_{11} = \alpha_{C5}, \alpha_{12} = \alpha_{C4}$.

Наприклад, після установки вала 1 на кут $\varphi = \Delta\varphi = 3^\circ$: $\alpha'_1 = 27^\circ, \alpha'_2 = 57^\circ, \alpha'_3 = 87^\circ, \alpha'_4 = 117^\circ, \alpha'_5 = 147^\circ, \alpha'_6 = 177^\circ, \alpha'_7 = 207^\circ, \alpha'_8 = 237^\circ, \alpha'_9 = 267^\circ, \alpha'_{10} = 297^\circ, \alpha'_{11} = 327^\circ, \alpha'_{12} = 357^\circ$.

Кутове положення точки в рухомій системі координат $X^A O^A Y^A$, розташованої під центром основи датчика 3 C_4 після повороту вала 1 на кут φ $\alpha'_{12} = 360^\circ - \varphi$. Кутове положення точки в цій же системі координат, розташованої під датчиком 3 C_{10} після установки вала 1 на кут φ $\alpha'_6 = 180^\circ - \varphi$, якщо $\varphi \leq 180^\circ$ або $\alpha'_6 = 360^\circ + 180^\circ - \varphi$, якщо $\varphi > 180^\circ$.

Нехай на кути повороту вала 1 $\varphi = \Delta\varphi = 3^\circ$ ось обертання вала 1 /точка O^A / змістилась відносно початка O_1^A базової системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$, наприклад, із-за деформації поля тиска в газовому шарі аеростатичної шпіндельної опори 2 погіршеннями розмірів і форми її виготовлення.

По отриманим кутовим положенням $\alpha'_1 \div \alpha'_{12}$ точок обгинаючої під центрами основ датчиків 3 $C_1 \div C_{12}$ на кути $\varphi = \Delta\varphi$ повороту вала 1 і функціональним залежностям /8/ і /9/ визначають відстані $l_1 \div l_{12}$ від центрів основ датчиків 3 до зміщеної осі обертання вала 1 в його перерізі по А-А:

$$\begin{aligned} l_1 &= l_1(\varphi) + Z_1(\varphi), l_2 = l_2(\varphi) + Z_2(\varphi); \\ l_3 &= l_3(\varphi) + Z_3(\varphi), l_4 = l_4(\varphi) + Z_4(\varphi); \\ l_5 &= l_5(\varphi) + Z_5(\varphi), l_6 = l_6(\varphi) + Z_6(\varphi); \\ l_7 &= l_7(\varphi) + Z_7(\varphi), l_8 = l_8(\varphi) + Z_8(\varphi); \quad (10) \\ l_9 &= l_9(\varphi) + Z_9(\varphi), l_{10} = l_{10}(\varphi) + Z_{10}(\varphi); \\ l_{11} &= l_{11}(\varphi) + Z_{11}(\varphi); \\ l_{12} &= l_{12}(\varphi) + Z_{12}(\varphi); \end{aligned}$$

Тут $Z_n / \varphi /$ - величина зазора 4, виміряна під n-им датчиком 3 на кути φ повороту вала $l_1(\varphi) \div l_{12}(\varphi)$ - відстані від точки O^A до точок під центрами основ датчиків 3 $C_1 \div C_{12}$ на кути φ повороту вала 1.

Координати /7/ датчиків 3 $C_1 - C_{12}$ величин зазорів були визначені в базовій системі координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$. Отже координати осі обертання вала 1 будуть визначені в цій системі координат.

По координатам пари i-го і k-го датчиків 3 величин зазорів, установлених не по одній вісі кожної з систем координат $X_1^A O_1^A Y_1^A, X_2^A O_2^A Y_2^A, X_3^A O_3^A Y_3^A$, і отриманим відстаням $l_1 \div l_{12}$ від їх центрів до осі обертання вала 1 /точки O^A / визначають координати осі обертання вала 1 в базовій системі координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$ з $/C_n^2 - 6/$ систем алгебраїчних квадратних рівнянь;

$$\begin{cases} l_i^2 = (x_{C_i} - x_{O^A})^2 + (y_{C_i} - y_{O^A})^2 \\ l_k^2 = (x_{C_k} - x_{O^A})^2 + (y_{C_k} - y_{O^A})^2 \end{cases} \quad (11)$$

де: $i = 1, N-1; k = 1, N, N$ - число датчиків 3, установлених по осям систем координат в перерізі вала 1 по А-А.

В результаті отримують $2/C_{12}^2 - 6/ = 2p$ пар коренів систем рівнянь /11/, "р" пар з яких являються координатами осі обертання вала 1. з $2/C_{12}^2 - 6/ = 2p$ пар коренів систем рівнянь вигляду /11/ $[x_1 / \varphi /, y_1 / \varphi /, [x_2 / \varphi /, y_2 / \varphi /, \dots, [x_{2p} / \varphi /, y_{2p} / \varphi /]$ тут для скорочення замість $x_{O^A(n)}(\varphi)$ і $y_{O^A(n)}(\varphi)$ уведено $x_n / \varphi /$ і $y_n / \varphi /$

необхідно визначити $C_{12}^2 - 6 = p$ пар коренів, які являються координатами осі обертання вала 1 аеростатичної шпіндельної опори 2,

Нехай $[x_1 / \varphi /, y_1 / \varphi /]$ і $[x_2 / \varphi /, y_2 / \varphi /]$ - корені першої системи рівнянь $/i = 1, k = 2/$, $[x_3 / \varphi /, y_3 / \varphi /]$ і $[x_4 / \varphi /, y_4 / \varphi /]$ - корені другої системи рівнянь $/i = 1, k = 3/$ і так далі.

Припускають, що корінь $x_1/\varphi/$ першої системи рівнянь являється координатою осі обертання вала 1. Обчислюють різності по нормі між коренем $x_1/\varphi/$ і коренями $x_3/\varphi/$ і $x_4/\varphi/$ другої системи рівнянь:

$$\begin{aligned} \|I_1^{(1)}\| &= \sqrt{[x_1(\varphi) - x_3(\varphi)]^2} \\ \|I_2^{(1)}\| &= \sqrt{[x_1(\varphi) - x_4(\varphi)]^2} \end{aligned} \quad (12)$$

Порівнюють норму $\|I_1^{(1)}\|$ з нормою $\|I_2^{(1)}\|$. Якщо $\|I_2^{(1)}\| < \|I_1^{(1)}\|$, корінь $x_3/\varphi/$ вважають другою координатою осі обертання вала 1. В противному разі другою координатою вала 1 вважають корінь $x_4/\varphi/$.

Нехай в якості координати осі обертання прийнятий корінь $x_3/\varphi/$. Обчислюють різність по нормі між першою координатою осі обертання по осі X_1^A системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$ $x_1/\varphi/$ і третьою координатою $x_3/\varphi/$, а також між першою координатою $x_1/\varphi/$ і коренями $x_5/\varphi/$ і $x_6/\varphi/$ третьої системи рівнянь, складеною, наприклад, на вимірюванням першого і четвертого датчиків $i=1, k=4/$:

$$\|I_1^{(1)}\| = \sqrt{[x_1(\varphi) - x_3(\varphi)]^2 + [x_1(\varphi) - x_5(\varphi)]^2} \quad (13)$$

$$\|I_2^{(1)}\| = \sqrt{[x_1(\varphi) - x_3(\varphi)]^2 + [x_1(\varphi) - x_6(\varphi)]^2} \quad (14)$$

Порівнюють норму $\|I_1^{(1)}\|$ з нормою $\|I_2^{(1)}\|$. Якщо $\|I_2^{(1)}\| > \|I_1^{(1)}\|$, корінь $x_5/\varphi/$ вважають тоєтьою координатою осі обертання вала по осі X_1^A . Інакше третьою координатою осі обертання вала 1 по осі X_1^A вважають корінь $x_6/\varphi/$.

Нехай в якості третьої координати вибраний корінь $x_6/\varphi/$. Тоді на черговому кроці порівнюють норми:

$$\begin{aligned} \|I_1^{(1)}\| &= \sqrt{[x_1(\varphi) - x_3(\varphi)]^2 + [x_1(\varphi) - x_6(\varphi)]^2 + [x_1(\varphi) - x_7(\varphi)]^2} \\ \|I_2^{(1)}\| &= \sqrt{[x_1(\varphi) - x_3(\varphi)]^2 + [x_1(\varphi) - x_6(\varphi)]^2 + [x_1(\varphi) - x_8(\varphi)]^2} \end{aligned} \quad (15)$$

і по тому же правилу вибирають четверту координату по осі X_1^A . Нехай в якості четвертої координати вибраний корінь $x_7/\varphi/$. Наведену вище процедуру продовжують до тих пір, поки в якості координати осі обертання вала 1 не буде вибраний один з пари коренів $x_{2p-1}(\varphi)$ або $x_{2p}/\varphi/$ останньої системи рівнянь:

$$\begin{aligned} \|I_1^{(1)}\| &= \sqrt{[x_1(\varphi) - x_3(\varphi)]^2 + [x_1(\varphi) - x_6(\varphi)]^2 + [x_1(\varphi) - x_7(\varphi)]^2 + \dots + [x_1(\varphi) - x_{2p-1}(\varphi)]^2} \\ \|I_2^{(1)}\| &= \sqrt{[x_1(\varphi) - x_3(\varphi)]^2 + [x_1(\varphi) - x_6(\varphi)]^2 + [x_1(\varphi) - x_8(\varphi)]^2 + \dots + [x_1(\varphi) - x_{2p}(\varphi)]^2} \end{aligned} \quad (16)$$

Як і раніше, порівнюють норму $\|I_1^{(1)}\|$ з нормою $\|I_2^{(1)}\|$. Якщо $\|I_2^{(1)}\| < \|I_1^{(1)}\|$, координати $x_1/\varphi/$, $x_3/\varphi/$, $x_6/\varphi/$, $x_7/\varphi/$, ..., $x_{2p}/\varphi/$ осі обертання вала 1, які обчислені по "Р" системам запам'ятовують.

Припускають, що корінь $x_2/\varphi/$ першої системи рівнянь являється координатою осі обертання вала 1 і повторюють наведену вище процедуру відбору координат осі обертання вала 1 з коренів систем рівнянь. В кінці цієї процедури будуть порівнюватися норми:

$$\begin{aligned} \|I_1^{(2)}\| &= \sqrt{[x_2(\varphi) - x_4(\varphi)]^2 + [x_2(\varphi) - x_5(\varphi)]^2 + [x_2(\varphi) - x_8(\varphi)]^2 + \dots + [x_2(\varphi) - x_{2p-1}(\varphi)]^2} \\ \|I_2^{(2)}\| &= \sqrt{[x_2(\varphi) - x_4(\varphi)]^2 + [x_2(\varphi) - x_5(\varphi)]^2 + [x_2(\varphi) - x_8(\varphi)]^2 + \dots + [x_2(\varphi) - x_{2p}(\varphi)]^2} \end{aligned} \quad (17)$$

Порівнюють норму $\|I_1^{(2)}\|$ з нормою $\|I_2^{(2)}\|$ і, якщо $\|I_1^{(2)}\| < \|I_2^{(2)}\|$, координати $x_2/\varphi/$, $x_4/\varphi/$, $x_5/\varphi/$, $x_8/\varphi/$, ..., $x_{2p-1}/\varphi/$ осі обертання вала 1, по яким була обчислена норма $\|I_1^{(2)}\|$ запам'ятовують.

Порівнюють меншу норму з /16/ з меншою нормою з /17/. Якщо $\|I_1^{(2)}\| < \|I_2^{(1)}\|$, координатами осі обертання вала 1 по осі X_1^A базової системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$ являються корені $x_2/\varphi/$, $x_4/\varphi/$, $x_5/\varphi/$, $x_8/\varphi/$, ..., $x_{2p-1}/\varphi/$.

В противному разі координатами вала 1 по осі X_1^A являються корені $x_1/\varphi/$, $x_3/\varphi/$, $x_6/\varphi/$, $x_7/\varphi/$, ..., $x_{2p}/\varphi/$.

Координати осі обертання вала 1 по осі Y_1^A відповідають вибраним координатам по осі X_1^A . В результаті отримують "Р" пар координат осі обертання вала 1 аеростичної шпindelної опори 2, отриманих в результаті рішення систем алгебраїчних рівнянь другого ступеня з двома невідомими.

В силу наявності погрішностей установки датчиків 3 величин зазорів, погрішностей вимірювання величин зазорів і погрішності установки вала 1 опори 2 на дискретні кути поворота виміряні координати осі обертання вала 1 будуть випадковим чином розкидані в околу точки, через яку проходить ось обертання вала 1. Для отримання дійсних координат вала 1 отримані координати осі обертання вала 1 огладжують по методу найменших квадратів.

Згідно методу найменших квадратів найбільш імовірними значеннями координат осі обертання вала 1 опори 2 на куту φ поворота вала 1 будуть координати точки, для якої сума квадратів відхилень від "р" точок, заданих "р" парами координат осі обертання вала 1, отриманих в результаті рішення "р" систем рівнянь /11/, буде найменшою:

$$\sum_{i=1}^p \{ [x(\varphi) - x_i(\varphi)]^2 + [y(\varphi) - y_i(\varphi)]^2 \} = \min \quad (18)$$

Прирівнявши похідні від /18/ нулю, отримують оцінки координат осі обертання вала 1 на куту φ його поворота;

$$\begin{aligned} \hat{x}_{O^A}(\varphi) &= \hat{x}(\varphi) = \frac{\sum_{i=1}^p x_i(\varphi)}{p}; \\ \hat{y}_{O^A}(\varphi) &= \hat{y}(\varphi) = \frac{\sum_{i=1}^p y_i(\varphi)}{p}. \end{aligned} \quad (19)$$

В данному прикладі оцінка кожної координати виконується по $p = C_{12}^2 - 6 = 60$ вимірювань, що забезпечує високу точність визначення осі обертання. В загальному випадку точність вимірювання може бути підвищена шляхом установки датчиків 3 по осям $k > 3$ систем координат. Крім того, це дозволяє зробити поступки по точності вимірювань і установлення.

Якщо $\hat{x}_{O^A}(\varphi)$ і $\hat{y}_{O^A}(\varphi)$ не рівні нулю або відрізняються від нуля на величину, яка більше устанавленого порога Δ , подають сигнали управління $U_{упр1}^B(\varphi)$ і $U_{упр2}^B(\varphi)$ на регулятори 11, 12, 13, 14 положення вала 1 і обчислюють оцінки координат осі обертання. Методом послідовних наближень суміщають вісь обертання вала 1 /точку O^A / з початком O_1^A , базової системи координат. Сигнали управління запам'ятовують. Вимірюють і запам'ятовують величини зазорів стабілізації $Z_1^A / \varphi /$, $Z_4^A / \varphi /$, $Z_7^A / \varphi /$, $Z_{10}^A / \varphi /$ під датчиками з C_1 , C_4 , C_7 , C_{10} , які відповідають незміщеному положенню осі обертання вала на куту φ поворота.

Вал 1 опори 2 послідовно устанавлюють на кути поворота $\varphi = 2\Delta\varphi$, $3\Delta\varphi$, $4\Delta\varphi$, ..., $360^\circ - \Delta\varphi$. В результаті отримують масив сигналів управління і масив величин зазорів стабілізації, які на дискретних кутах поворота відповідають незміщеному положенню осі обертання вала 1 в перерізі по А-А опори 2:

$$\begin{aligned} &[U_{упр.1}^B(O), U_{упр.2}^B(O)]; \\ &[U_{упр.1}^B(\Delta\varphi), U_{упр.2}^B(\Delta\varphi)]; \\ &[U_{упр.1}^B(2\Delta\varphi), U_{упр.2}^B(2\Delta\varphi)]; \dots, \\ &[U_{упр.1}^B(360^\circ - \Delta\varphi), U_{упр.2}^B(360^\circ - \Delta\varphi)]. \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} &[Z_1^A(O), Z_4^A(O), Z_7^A(O), Z_{10}^A(O)]; [Z_1^A(\Delta\varphi), Z_4^A(\Delta\varphi), Z_7^A(\Delta\varphi), Z_{10}^A(\Delta\varphi)]; \\ &[Z_1^A(2\Delta\varphi), Z_4^A(2\Delta\varphi), Z_7^A(2\Delta\varphi), Z_{10}^A(2\Delta\varphi)]; \\ &[Z_1^A(3\Delta\varphi), Z_4^A(3\Delta\varphi), Z_7^A(3\Delta\varphi), Z_{10}^A(3\Delta\varphi)]; \dots, \\ &[Z_1^A(360^\circ - \Delta\varphi), Z_4^A(360^\circ - \Delta\varphi), Z_7^A(360^\circ - \Delta\varphi), Z_{10}^A(360^\circ - \Delta\varphi)]. \end{aligned} \quad (21)$$

10. Всі наведені вище дії без змін виконують для перерізів по В-В і Г-Г аеростатичної шпindelльної опори 2. В результаті отримують масив сигналів управління

$$\begin{aligned} &[U_{упр.1}^Г(O), U_{упр.2}^Г(O)]; \\ &[U_{упр.1}^Г(\Delta\varphi), U_{упр.2}^Г(\Delta\varphi)]; \\ &[U_{упр.1}^Г(2\Delta\varphi), U_{упр.2}^Г(2\Delta\varphi)]; \dots, \\ &[U_{упр.1}^Г(360^\circ - \Delta\varphi), U_{упр.2}^Г(360^\circ - \Delta\varphi)]. \end{aligned} \quad (22)$$

і масив величин зазорів стабілізації:

$$\begin{aligned} & [Z_1^B(O), Z_4^B(O), Z_7^B(O), Z_{10}^B(O)] ; [Z_1^B(\Delta\varphi), Z_4^B(\Delta\varphi), Z_7^B(\Delta\varphi), Z_{10}^B(\Delta\varphi)] ; \\ & [Z_1^B(2\Delta\varphi), Z_4^B(2\Delta\varphi), Z_7^B(2\Delta\varphi), Z_{10}^B(2\Delta\varphi)] ; \\ & [Z_1^B(3\Delta\varphi), Z_4^B(3\Delta\varphi), Z_7^B(3\Delta\varphi), Z_{10}^B(3\Delta\varphi)] ; \dots, \\ & [Z_1^B(360^\circ - \Delta\varphi), Z_4^B(360^\circ - \Delta\varphi), Z_7^B(360^\circ - \Delta\varphi), Z_{10}^B(360^\circ - \Delta\varphi)] \end{aligned} \quad (23)$$

11. Балансують вал 1 аеростатичної шпindelної опори 2.

Для виконання балансування валу 1 опори 2 задають обертання з номінальною швидкістю. На регулятори 11-18 положення вала 1 на дискретах стабілізації $\varphi = 0, \Delta\varphi, 2\Delta\varphi, 3\Delta\varphi, \dots, 360^\circ - \Delta\varphi$ подають відповідні сигнали управління з масивів /20/ і /22/, які запобігають в статиці зміщення осі обертання вала 1 відносно початків O_1^A і O_1^B базових систем координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$ і $X_1^B O_1^B Y_1^B$. В динаміці, якщо вал 1 опори 2 розбалансований, динамічне навантаження буде урівноважуватися тільки зростанням головного вектора сил тиску в газовому шарі опори 2 при зміщенні вала 1 у цьому газовому шарі.

На довільному куту поворота вала 1, наприклад, $\varphi = 0$ вимірюють величини зазорів $Z_1^{A(B)} / O / \div Z_{12}^{A(B)} / O /$ під датчиками з $C_1 \div C_{12}$ величин зазорів в перерізах по А-А і В-В опори 2. Отримують у відповідності з /19/ оцінки $\hat{X}_A^D / O /$, $\hat{Y}_A^D / O /$ і $\hat{X}_B^D / O /$, $\hat{Y}_B^D / O /$ координат осі обертання вала 1 в цих перерізах. Визначають напрямок динамічного навантаження /Фіг. 5/:

$$\gamma^{A(B)} = \arctg \frac{\hat{Y}_{A(B)}^D(O)}{\hat{X}_{A(B)}^D(O)} \quad (24)$$

і величину L зміщення осі обертання відносно початків O_1^B і O_1^A базових систем координат в перерізах по А-А і В-В опори 2:

$$L^{A(B)} = \sqrt{[\hat{X}_{A(B)}^D(O)]^2 + [\hat{Y}_{A(B)}^D(O)]^2} \quad (25)$$

Балансують вал 1, наприклад, балансувальними вагами. Методом послідовних наближень установлюють центр ваги вала 1 на його ось обертання. Отже ліквідується один з факторів, які збурюють радіальне положення осі обертання. Піднімальна сила регуляторів 11÷18 може майже повністю використовуватися для компенсації зовнішнього радіального навантаження.

12. Стабілізують радіальне положення осі обертання вала 1 для чого на дискретах кута поворота вала 1 /на дискретах стабілізації/ $360^\circ - \Delta, \Delta\varphi - \Delta, 2\Delta\varphi - \Delta, 3\Delta\varphi - \Delta, \dots, 360^\circ - \Delta\varphi - \Delta$, з випередженням на величину Δ затримки спрацювання регуляторів 11÷18 положення вала 1, порівнюють поточні величини зазорів $Z_1^A / t /$, $Z_4^A / t /$, $Z_7^A / t /$, $Z_{10}^A / t /$ під датчиками з C_1, C_4, C_7, C_{10} з відповідними величинами $Z_1^A / k \cdot \Delta\varphi /$, $Z_4^A / k \cdot \Delta\varphi /$, $Z_7^A / k \cdot \Delta\varphi /$, $Z_{10}^A / k \cdot \Delta\varphi /$ зазорів стабілізації для переріза по А-А опори 2, а також поточні значення величин зазорів $Z_1^B / t /$, $Z_4^B / t /$, $Z_7^B / t /$, $Z_{10}^B / t /$ під датчиками з C_1, C_4, C_7, C_{10} , установленими в перерізі по В-В опори 2, з відповідними величина зазорів стабілізації $Z_1^B / k \Delta\varphi /$, $Z_4^B / k \Delta\varphi /$, $Z_7^B / k \Delta\varphi /$, $Z_{10}^B / k \Delta\varphi /$.

При відхиленні поточних величин зазорів на дискретах стабілізації від відповідних зазорів стабілізації виробляються сигнали управління $U_{упр1}^B / k \cdot \Delta\varphi - \Delta /$, $U_{упр2}^B / k \cdot \Delta\varphi - \Delta /$, $U_{упр3}^B / k \cdot \Delta\varphi - \Delta /$, на регулятори 11÷14 положення вала 1, які установлені в перерізі по Б-Б опори 2, і сигнали управління $U_{упр1}^G / k \cdot \Delta\varphi - \Delta /$, $U_{упр2}^G / k \cdot \Delta\varphi - \Delta /$, $U_{упр3}^G / k \cdot \Delta\varphi - \Delta /$, $U_{упр4}^G / k \cdot \Delta\varphi - \Delta /$ на регулятори 15÷18 положення вала 1, які установлені в перерізі по Г-Г опори 2 і запобігають зміщенню осі обертання вала 1 аеростатичної шпindelної опори 2 відносно початків O_1^A і O_1^B базових систем координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$ і $X_1^B O_1^B Y_1^B$.

Пристрій стабілізації радіального положення осі обертання вала 1 аеростатичної шпindelної опори 2 працює наступним чином.

1. Визначають точки a_2 і a_4 /Фіг. 2/ максимального розміра вала 1 в площині установки датчиків з величин зазорів $C_1 \div C_{12}$ в перерізі по А-А вала 1/ такі, що довжина відрізка прямої $a_2 a_4$, що з'єднує ці точки і проходить через печатки систем координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$, $X_2^A O_2^A Y_2^A$, $X_3^A O_3^A Y_3^A$, являється максимальним розміром переріза вала 1 площини установки цих датчиків 3.

Для визначення точок a_2 і a_4 вал 1 установлюють на довільний кут поворота. Виконують пуск підпрограми "Індикація величин зазорів" обчислювача 22. Обчислювач 22 двійкові коди величин зазорів з виходів вимірювачів

21 величин зазорів по сигналам датчиків 3 величин зазорів $C_1 \div C_{12}$, установлених в перерізах по А-А і В-В опори 2, перетворює в десятичні, які відображаються на екрані дисплея. Під датчиками 3 C_1 і C_7 установлюють рівні величини зазорів $Z_1 = Z_7$.

Для цього виконують пуск підпрограми "Установлення вала 1" і уводять в обчислювач 22 числове значення сигналу управління $U_{упр2}^B$. Напруга з вихода обчислювача 22, яка відповідає сигналу $U_{упр2}^B$, надходить на входи операційних підсилювачів 24 і 25, а з їх виходів через вимикач 26 "увімк.-вимк." надходить на вхід операційного підсилювача 27 і далі через вимикач 28 "увімк.-вимк." в положенні "увімк." надходить на регулятори 11 і 13 положення вала 1. Вал 1 опори 2 буде зміщений по осі Y_1^A . Послідовно, виконуючі пуски названих вище підпрограм, під датчиками 3 C_1 і C_7 установлюють рівні величини зазорів.

Враховують і запам'ятовують величини зазорів Z_4 і Z_{10} під датчиками 3 C_4 і C_{10} . По показанням вимірювача 40 кута поворота, що надходять в обчислювач 22, вал 1 послідовно установлюють на кути поворота $\Delta\varphi, 2 \cdot \Delta\varphi, 3 \cdot \Delta\varphi, \dots, 360^\circ - \Delta\varphi$. На кожній дискреті сигналами управління $U_{упр2}^B$ установлюють рівні величини зазорів $Z_1 = Z_7$. Виконують пуски підпрограм "Індикація величин зазорів", "Установлення вала 1" і уводять в

обчислювач 22 числове значення сигналу управління $U_{упр1}^B$, який через операційні підсилювачі 24 і 25, вимикач 26 "увімк.-вимк.", операційний підсилювач 27, вимикач 28 "увімк.-вимк." надходить на регулятори 12 і 14

положення вала 1. Вал 1 зміщується по осі X_1^A базової системи координат. На кожному дискретному куту поворота вала 1 установлюють $Z_{10} / k \cdot \Delta\varphi = Z_{10}$. Зраховують і запам'ятовують величину зазора $Z_{10} / k \cdot \Delta\varphi$.

Вал 1 установлюють на кут φ , на якому $Z_4 / \varphi = \min$.

Не змінюючи кутового положення вала 1, виконуючі пуски підпрограм "Індикація величин зазорів" і "Установлення вала 1", сигналом управління $U_{упр2}^B$ з дискретністю ΔZ зміщують вал 1 по осі Y_1^A базової системи координат в інтервалі $\pm Z_1 / 2$. На кожній n-й дискреті переміщення зраховують з екрана дисплея величини зазорів $Z_4 / n \cdot \Delta Z$ і $Z_{10} / n \cdot \Delta Z$ і обчислюють їх суму. Вал 1 установлюють на дискрету переміщення, на якій $S / n \cdot \Delta Z = Z_4 / n \cdot \Delta Z + Z_{10} / n \cdot \Delta Z = \min$. Точки a_2 і a_4 максимального розміра вала 1 будуть установлені під центри основ датчиків 3 C_4 і C_{10} . Отже відрізок прямої максимального розміра $a_2 a_4$ буде суміщений з осью X_1^A базової системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$ і буде проходити через її початок X_1^A .

Точку O^A переріза вала 1, яка співпадає з початком O_1^A базової системи координат, приймають в якості точки осі обертання вала 1. Це значить, що ця точка в процесі обертання вала 1 повинна залишатися нерухомою.

Не змінюючи кутового положення вала 1, виконують пуск підпрограми "Індикація величин зазорів" і по екрану дисплея, зміщують датчики 3 $C_1 \div C_{12}$ по висоті зазора і установлюють їх з зазором Z відносно поверхні вала 1.

Радіус $O_{a_2}^A$ кола з центром в точці O^A приймають рівним розрахунковій величині радіуса R вала 1 опори 2.

Основи датчиків 3 C_1, C_4, C_7, C_{10} установлюють по колу радіуса $R_1 = O_{a_2}^A + Z$ центр якої суміщений з початком базової системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$. Визначають відстані від точки O^A до точок a_1, a_3, a_4 на обгинаючій переріза вала 1 по А-А, які на куту поворота $\varphi = 0$ розташовані під центрами основ датчиків 3 C_1, C_4, C_7 .

Для цього вал 1 опори 2 по показанням вимірювача 40 кута поворота установлюють на кут $\varphi = 180^\circ$. Перевіряють виконання критерію суміщення точки O^A з початком O_1^A базової системи координат для чого виконують пуск підпрограми "Обчислення сум 1^A ". Обчислюються і відображаються на екрані дисплея суми $Z_3 + Z_9 = 2Z$ і $Z_6 + Z_{12} = 2Z$. Рівність цих сум свідчить про те, що точка O^A суміщена з початком O_1^A базової системи координат. В противному разі виконують пуски підпрограм "Установлення вала 1", уводять в обчислювач 22 сигнали управління $U_{упр1}^B, U_{упр2}^B$ і зміщують вал 1 по осі Y_2^A з дискретністю ΔZ . Виконують пуски підпрограм "Обчислення сум 1^A " і добиваються виконання рівності $Z_3 + Z_9 = 2Z$. Виконують пуски тих же підпрограм і сигналами управління $U_{упр1}^B$ і $U_{упр2}^B$ зміщують вал 1 по осі X_2^A , добиваються виконання рівності $Z_6 + Z_{12} = 2Z$ і суміщують точку O^A з початком базової системи координат.

Виконують пуск підпрограми "Індикація величин зазорів". Враховують з екрана дисплея величину зазора $Z_4 / \varphi = 180^\circ /$ і порівнюють величини зазорів $Z_4 / \varphi = 180^\circ /$. Нехай $Z_4 / \varphi = 180^\circ / < Z$. Розраховують їх різницю Δ_1 . Обчислюють і запам'ятовують довжину відрізка $O_{a_4}^A = R - \Delta_1$.

Виконують пуск підпрограми "Індикація величин зазорів", зміщують датчик з C_4 по висоті зазора і установлюють його з зазором Z відносно поверхні вала 1 і установлюють його основу на коло радіуса $R_1 = O_{a_2}^A + Z$. Основи датчиків з C_4 і C_{10} установлені на коло радіуса R_1 . Не змінюючи кутового положення вала 1, зраховують з екрана дисплея величину зазора $Z_7 / \varphi = 180^\circ /$. Якщо, наприклад, $Z_7 / \varphi = 180^\circ / > Z$, а їх різниця рівна Δ_2 , відрізок прямої $O_{a_1}^A$ на Δ_2 менше відрізка прямої $O_{a_3}^A$.

По показанням вимірювача 40 кута поворота вал 1 установлюють на кут поворота $\varphi = 0$, а потім поворотом по годинниковій стрілці установлюють на кут $\varphi = 90^\circ$. Суміщують точку O^A з початком O_1^A базової системи координат. Для цього виконують пуски підпрограм "Індикація величин зазорів" і "Установлення вала 1". Сигналами управління $U_{упр.1}^B$ і $U_{упр.2}^B$ з установленою дискретністю зміщують вал 1 по осям X_1^A і Y_1^A базової системи координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$. Методом послідовних наближень добиваються /у відповідності з критерієм суміщення точки O^A з початком O_1^A базової системи координат/ виконання рівностей: $Z_4 = Z_{10} - \Delta_2$ і $Z_1 - \Delta_1 + \Delta_2 = Z_7$ і суміщують точку O^A з початком базової системи координат.

Виконують пуск підпрограми "Індикація величин зазорів", зміщують датчик з C_1 по висоті зазора і установлюють його з зазором Z відносно поверхні вала 1, а датчик з C_7 установлюють з зазором $Z + \Delta_1$ і установлюють основи цих датчиків по колу радіуса R_1 .

По показанням вимірювача 40 кута повороту вал 1 установлюють на кут $\varphi = 0$ і суміщують точку O^A з початком O_1^A базової системи координат. Для цього виконують пуски підпрограм "Індикація величин зазорів", "Установлення вала 1" і по сигналам $U_{упр.1}^B$ і $U_{упр.2}^B$ регуляторами 11, 12, 13, 14 положення вала 1 під датчиками з C_4 і C_{10} установлюють зазори $Z_4 = Z + \Delta_1$, $Z_{10} = Z$, під датчиком з C_1 установлюють зазор, який на Δ_2 більше зазора під датчиком з C_7 .

Враховують з екрана дисплея і запам'ятовують в пам'яті обчислювача 22 /в масиві величин зазорів стабілізації/ величини зазорів $Z_1^A / 0 /$, $Z_4^A / 0 /$, $Z_7^A / 0 /$, $Z_{10}^A / 0 /$, які відповідають незміщеному положенню осі обертання вала 1 на куту $\varphi = 0$ його поворота. По врахуванню значенням величин зазорів Z_1 і Z_7 розраховують величини відрізків у відповідності з /3/. Значення величин відрізків $O_{a_1}^A, O_{a_2}^A, O_{a_3}^A, O_{a_4}^A$ запам'ятовують в пам'яті обчислювача 22.

Основи датчиків величин зазорів з C_3, C_6, C_9, C_{12} установлюють по колу радіуса R_1 . Визначають відстані $O_{b_1}^A, O_{b_2}^A, O_{b_3}^A, O_{b_4}^A$ від точки O^A до точок b_1, b_2, b_3, b_4 обгинаючої переріза вала I, розташованих на куту $\varphi = 0$ поворота під центрами основ цих датчиків з.

Для цього вал 1 по показанням вимірювача 40 кута поворота поротом проти годинникової стрілки установлюють на кут поворота $\varphi = 30^\circ$ /Фіг. 2/. Суміщують відрізок прямої максимального розміра $a_2 a_4$ осью X_2^A системи координат $X_2^A O_2^A Y_2^A$. Виконують пуск підпрограм "Індикація величин зазорів" і "Установлення вала 1". По сигналам управління $U_{упр.1}^B$ і $U_{упр.2}^B$ регуляторами 11, 12, 13, 14 положення вала 1 з установленою дискретністю ΔZ зміщують вал 1 по осі Y_2^A . На кожній n-й дискреті переміщення з екрана дисплея зраховують величини зазорів $Z_3 / n /$ і $Z_9 / n /$ і обчислюють їх суму $S / n /$. Установлюють вал 1 на дискрету, для якої $S / n / = \min$ і суміщують відрізок прямої $a_2 a_4$, якому належить точка O^A , з осью X_2^A системи координат $X_2^A O_2^A Y_2^A$.

Припускаючи, що в результаті виконаного суміщення точка O^A сумістилась з початком O_1^A базової системи координат, виконують пуск підпрограм "Індикація величин зазорів" і зміщують датчики з по висоті зазора.

Установлюють під датчиками з C_3, C_6, C_9, C_{12} наступні величини зазорів:
 $Z_3 = R_1 - O_{a_4}^A$; $Z_6 = R_1 - O_{a_3}^A$; $Z_9 = R_1 - O_{a_2}^A$; $Z_{12} = R_1 - O_{a_1}^A$.

По показанням вимірювача 40 кута поворота поворотом вала 1 по годинниковій стрілці на кут $\varphi = 30^\circ$ точки b_1, b_2, b_3, b_4 повертають під центри основ датчиків з C_{12}, C_9, C_6, C_3 відповідно.

Виконують пуски підпрограм "Індикація величин зазорів". "Установлення вала 1" і по сигналам управління $U_{упр1}^B$ і $U_{упр2}^B$ регуляторами 11, 12, 13, 14 положення вала 1 під датчиками з C_1, C_7, C_4, C_{10} установлюють величини зазорів, рівні величинам зазорів стабілізації $Z_1^A / 0$, $Z_7^A / 0$, $Z_4^A / 0$, $Z_{10}^A / 0$, і суміщають точку O^A з початком O_1^A базової системи координат.

Не змінюючи кутового положення вала 1 виконують пуск підпрограми обчислювача 22 "Обчислення сум Z^A ". В результаті будуть обчислені суми $S_1 = Z_3 + Z_9$ і $S_2 = Z_6 + Z_{12}$. Величини зазорів Z_6 і Z_9 запам'ятовують.

По показанням вимірювача 40 кута поворота поворотом вала 1 по годинниковій стрілці точки b_1, b_2, b_3, b_4 установлюють під центри основ датчиків з C_1, C_{10}, C_7, C_4 , відповідно. Виконують пуски підпрограм "Індикація величин зазорів" і "Установлення вала 1". Сигналами управління $U_{упр1}^B$ і $U_{упр2}^B$ під датчиком з C_7 установлюють зазор, рівний Z_6 , а під датчиком з C_{10} зазор, рівний зазору Z_9 . Виконують пуск підпрограми "Обчислення сум Z^A ". В результаті будуть обчислені суми $S_3 = Z_4 + Z_{10}$ і $S_4 = Z_1 + Z_7$. Перевіряють виконання рівностей /4/, які являються критерієм того, що після поворота вала 1 з початкового $\varphi = 0$ кутового положення проти годинникової стрілки на кут $\varphi = 30^\circ$ і суміщення відрізка прямої $a_2 a_4$ з осью X_2^A системи координат $X_2^A O_2^A Y_2^A$ точка O^A співпала з початком O_1^A базової системи координат, а датчики з C_3, C_6, C_9, C_{12} були установлені по колу радіуса R_1 .

Якщо критерій /4/ виконується, по показанням вимірювача 40 кута поворота вал 1 опори 2 установлюють на кут поворота $\varphi = 0^\circ$. Виконують пуски підпрограм "Індикація величин зазорів". "Установлення вала I" і під датчиками з C_1, C_4, C_7, C_{10} установлюють величини зазорів, рівні величинам зазорів стабілізації $Z_1^A / 0$, $Z_4^A / 0$, $Z_7^A / 0$, $Z_{10}^A / 0$. З екрана дисплея зраховують значення величин зазорів Z_3, Z_6, Z_9, Z_{12} . По врахованим величинам зазорів розраховують величини відрізків $O^A b_1, O^A b_2, O^A b_3, O^A b_4$ і запам'ятовують їх в пам'яті обчислювача 22.

Якщо критерій /4/ не виконується, після суміщення відрізка прямої $a_2 a_4$ з осью X , варіують положення цього відрізка на осі X_2^A і методом послідовних наближень, повторюючи наведені вище дії, досягають виконання критерію /4/.

Основи датчиків з величин зазорів C_2, C_5, C_8, C_{11} установлюють по колу радіуса R_1 . Визначають відстані $O^A d_1, O^A d_2, O^A d_3, O^A d_4$, від точки O^A до точок d_1, d_2, d_3, d_4 обгинаючої переріза вала 1 по А-А, розташованих на куту $\varphi = 0^\circ$ поворота вала 1 під центрами основ цих датчиків з.

Для цього вал 1 по показанням вимірювача 40 кута поворота поворотом проти годинникової стрілки установлюють на кут поворота $\varphi = 60^\circ$. Суміщають відрізок прямої максимального розміру $d_2 d_4$ з осью X_3^A системи координат $X_3^A O_3^A Y_3^A$. Виконують пуски підпрограм "Індикація величин зазорів" і "Установлення вала I". Сигналами управління $U_{упр1}^B$ і $U_{упр2}^B$ на регулятори 11, 12, 13, 14 положення вала 1 з установленною дискретністю ΔZ зміщують вал по осі Y_3^A . На кожній n -ій дискреті переміщення зраховують величини зазорів Z_2 / n і Z_8 / n і обчислюють їх суму S / n . Установлюють вал 1 по осі Y_3^A на дискрету, для якої $S / n = \min$ і суміщають відрізок прямої $a_2 a_4$, якому належить точка O^A , з осью X_3^A системи координат $X_3^A O_3^A Y_3^A$.

Припускаючи, що в результаті виконаного суміщення точка O^A сумістилась з початком O_1^A базової системи координат, виконують пуск підпрограми "Індикація величин зазорів", зміщують датчики з C_2, C_5, C_8, C_{11} по висоті зазору і установлюють під ними наступні величини зазорів

$$Z_2 = R_1 - O^A a_3, Z_5 = R_1 - O^A a_3, Z_8 = R_1 - O^A a_2, Z_{11} = R_1 - O^A a_1.$$

По показанням вимірювача 40 кута поворота вал 1 поворотом по годинниковій стрільці установлюють на кут 60° і повертають точки d_1, d_2, d_3, d_4 під центри основ датчиків з C_{11}, C_8, C_5, C_2 , відповідно.

Виконують пуски підпрограм "Індикація величин зазорів", "Установлення вала 1" і сигналами управління на регулятори 11, 12, 13, 14 положення вала 1 під датчиками з C_1, C_7, C_4, C_{10} установлюють величини зазорів, рівні величинам зазорів стабілізації $Z_1^A / O / , Z_4^A / O / , Z_7^A / O / , Z_{10}^A / O /$. і суміщають точку O^A з початком O_1^A базової системи координат.

Не змінюючи кутового положення вала 1 виконують пуск підпрограми "Обчислення суми 4^A ". В результаті будуть обчислені суми величин зазорів $S_1 = Z_2 + Z_8$ і $S_2 = Z_5 + Z_{11}$. Величини зазорів Z_5 і Z_8 запам'ятовують.

По показанням вимірювача 40 кута поворота поворотом вала 1 по годинниковій стрільці точки d_1, d_2, d_3, d_4 установлюють під центри основ датчиків з C_1, C_{10}, C_7, C_4 , відповідно. Виконують пуски підпрограм "Індикація величин зазорів", "Установлення вала 1" сигналами управління $U_{упр.1}^B$ і $U_{упр.2}^B$ під датчиком з C_7 установлюють зазор, рівний зазору Z_5 , а під датчиком з C_{10} зазор, рівний зазору Z_8 . Виконують пуск підпрограми "Обчислення сум 5^A ".

В результаті будуть обчислені суми $S_3 = Z_4 + Z_{10}$ і $S_4 = Z_1 + Z_7$.

Перевіряють виконання критерію /4/ того, що після поворота вала 1 з початкового $\varphi = 0^\circ$ кутового положення проти годинникової стрілки на кут $\varphi = 60^\circ$ і суміщення відрізка прямої максимального розміру $a_2 a_4$ з осью X_3^A системи координат $X_3^A O_3^A Y_3^A$ точка O^A співпала з початком O_1^A базової системи координат, а датчики з C_2, C_5, C_8, C_{11} , були установлені по колу радіуса R_1 .

Якщо критерій /4/ виконується, по показанням вимірювача 40 кута поворота вал 1 опори 2 установлюють на кут поворота $\varphi = 0^\circ$. Виконують пуски підпрограм "Індикація величин зазорів", "Установлення вала 1" і під датчиками з C_1, C_4, C_7, C_{10} установлюють зазори, рівні величинам зазорів стабілізації $Z_1^A / O / , Z_4^A / O / , Z_7^A / O / , Z_{10}^A / O /$. Величини зазорів Z_1, Z_5, Z_8, Z_{11} вимірюють і запам'ятовують пам'яті обчислювача 22.

Якщо критерій /4/ не виконується, після суміщення відрізка прямої максимального розміру $a_2 a_4$ з осью X_3^A , варіюють положення цього відрізка на осі X_3^A і методом послідовних наближень, повторюючи наведені вище дії, досягають виконання критерію /4/.

Обчислюють відстані від точки O^A до точок d_1, d_2, d_3, d_4 в перерізі вала по А-А у відповідності з /6/.

Розраховуються координати датчиків з $C_1 \div C_{12}$ в базовій системі координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$. Для цього в обчислювач 22 уводять величину радіуса R_1 і кутові положення $\alpha_1 - \alpha_{12}$ цих датчиків з. Виконують пуск підпрограми "Розрахунок координат датчиків 1". Розраховують і запам'ятовують в пам'яті обчислювача 22 координати датчиків з $C_1 \div C_{12}$ у відповідності з /7/.

Будують функціональну залежність між кутовим положенням точок обгинаючої переріза вала 1 по А-А, яка лежить над осью X^A системи координат $X^A O^A Y^A$, і відстанями від точки O^A до цих точок і функціональну залежність між кутовим положенням точок обгинаючої переріза вала 1 по А-А, яка лежить під осью X^A системи координат $X^A O^A Y^A$, і відстанями від точки O^A до цих точок.

Для побудови цих функціональних залежностей в обчислювач 22 уводять вміст таблиці 1 і 2 і виконують пуск підпрограми "Функціональні залежності 1". Розраховуються функціональні залежності /8/ і /9/.

Вал 1 по показанням вимірювача 40 кута поворота установлюють на кут $\varphi = \Delta\varphi$. В обчислювач 22 уводять кут поворота вала 1 $\varphi = \Delta\varphi$ і кутові положення датчиків з $C_1 \div C_{12}$ $\alpha_1 \div \alpha_{12}$ в базовій системі координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$. Виконується пуск підпрограми "Обчислення відстаней від центрів основ датчиків до осі обертання вала 1". Розраховується кутові положення точок в рухомій системі координат $X^A O^A Y^A$, що розташувались під центрами основ датчиків з $C_1 \div C_{12}$. Вимірюються величини зазорів $Z_1 / \varphi \div Z_{12} / \varphi /$ під датчиками з і розраховуються відстані $\ell_1^{(\varphi)} - \ell_{12}^{(\varphi)}$ від центрів основ датчиків з до осі обертання вала 1 у відповідності з /10/.

Виконують пуск підпрограми "Розрахунок координат вала 1". Вирішуються $C_{12}^2 - 6$ алгебраїчних квадратних рівнянь /11/, Отримують $2/C_{12}^2 - 6/$ пар коренів цих рівнянь, з $2/C_{12}^2 - 6/$ коренів рівнянь /11/ відбирають $/C_{12}^2 - 6/$ пар координат осі обертання вала 1, отримують оцінки $\hat{X}_{O^A}(\varphi)$ і $\hat{Y}_{O^A}(\varphi)$ координат осі обертання вала 1 на куту $\varphi = \Delta\varphi$ повороту вала 1 у відповідності з/19/.

Якщо оцінки $\hat{X}_{O^A}(\varphi)$ і $\hat{Y}_{O^A}(\varphi)$ відрізняються від нуля, тобто ось обертання вала 1 /точка O^A / відхилилась від печатка O_1^A базової системи координат, виконують пуск підпрограм "Індикація величин зазорів" і "Установлення вала 1". Зміщують вал 1 по осям X_1^A і Y_1^A . Обчислюють нові значення оцінок координат осі обертання вала 1 і суміщають ось обертання з початком O_1^A базової системи координат.

Виконують пуск підпрограми "Формування масивів 1". Сигнали управління $U_{упр1}^B(\varphi), U_{упр2}^B(\varphi)$ і виміряні величини зазорів $Z_1^A / \varphi /, Z_4^A / \varphi /, Z_{10}^A / \varphi /$, які відповідають незміщеному положенню осі обертання вала 1, запам'ятовують у відповідних масивах пам'яті обчислювача 22.

По показанням вимірювача 40 кута поворота вал 1 послідовно установлюють на кути поворота $\varphi = 2 \cdot \Delta\varphi, \varphi = 4 \cdot \Delta\varphi, \dots, \varphi = 360^\circ - \Delta\varphi$, і виконують наведені вище дії. В результаті в пам'яті обчислювача 22 буде сформований масив сигналів управління /20/ і масив величин зазорів стабілізації /21/.

Усі наведені вище дії, виконуючі пуски підпрограм "Індикація величин зазорів", "Установлення вала 2", "Обчислення сум 1^B ", "Обчислення сум 2^B ", "Обчислення сум 3 ", "Обчислення сум 4^B ", "Обчислення сум 5^B ". "Розрахунок координат датчиків 2", "Функціональні залежності 2", "Обчислення відстаней від центрів основ датчиків до осі обертання вала 2", "Розрахунок координат осі обертання вала 2", "Формування масивів 2" виконують для переріза по В-В аеростатичної шпindel'ної опори 2. В результаті в пам'яті обчислювача 22 буде сформований масив сигналів управління /22/ і масив величин зазорів стабілізації /23/.

Балансують вал 1 аеростатичної шпindel'ної опори 2. Для виконання балансування вимикачі 28 "увімк.-вимк." установлюють в положення "увімк." і підключають диференціальні підсилювачі 27 до регуляторів 11 - 18 положення вала 1. Вимикачі 37 "робота - вимк." установлюють в положення "вимк.". Виконують пуск підпрограми

"Балансування". При повороті вала на кути $\varphi = 360^\circ - \Delta, \Delta\varphi - \Delta, 2 \cdot \Delta\varphi - \Delta, 3 \cdot \Delta\varphi - \Delta, \dots$

Сигнали управління $U_{упр1}^B(\varphi), U_{упр2}^B(\varphi)$ і $U_{упр1}^G(\varphi), U_{упр2}^G(\varphi)$ надходять на вхід відповідних операційних підсилювачів 24 і 25. З виходів операційних підсилювачів 24 і 25 через вимикачі 26 сигнали надходять на входи відповідних диференціальних підсилювачів 27 і далі, через вимикачі 28 на відповідні регулятори 11 - 18 положення вала 1, що в статисти забезпечує незміщене положення осі обертання.

На установленому куту поворота вала 1, наприклад, $\varphi = 0$ обчислювач 22 опитує вимірювачі 21 величин зазорів. Розраховуються оцінки координат обертання вала 1 в перерізах по А-А і В-В опори 2 на куту $\varphi = 0$ поворота вала 1 і розраховуються напрямки і величини зміщення осі обертання в цих перерізах у відповідності з /24/ і /25/.

Балансують вал 1 балансувальними вагами 38 і запобігають зміщенню вала 1 під дією динамічного навантаження.

Для стабілізації радіального положення осі обертання вала 1 аеростатичної шпindel'ної опори 2 пристрій стабілізації установлюють в режим "Робота" Для цього перемикач 37 "робота-вимк." установлюють в положення "робота", а вимикачі 26 і 28 установлюють в положення "вимк.". Виконують пуск підпрограми обчислювача 22 "Стабілізація". Поточне значення кута поворота вала 1 з вимірювача 40, що надходить в обчислювач 22,

безперервно порівнюється з кутами стабілізації $\varphi = 360^\circ - \Delta, \Delta\varphi - \Delta, 2 \cdot \Delta\varphi - \Delta, 3\Delta\varphi - \Delta, \dots, 360^\circ - \Delta\varphi - \Delta$. При порівнянні поточного значення кута поворота вала 1 $\varphi/t/$ з кутом стабілізації, напруги, які відповідають величинам зазорів стабілізації

$Z_1^A / k \cdot \Delta\varphi /, Z_4^A / k \cdot \Delta\varphi /, Z_7^A / k \cdot \Delta\varphi /, Z_{10}^A / k \cdot \Delta\varphi /, Z_1^B / k \cdot \Delta\varphi /, Z_4^B / k \cdot \Delta\varphi /, Z_7^B / k \cdot \Delta\varphi /, Z_{10}^B / k \cdot \Delta\varphi /,$ з виходів обчислювача 22 надходять на перші входи відповідних диференціальних підсилювачів 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36. На другі входи цих підсилювачів надходять сигнали з виходів вимірювачів 21 величин зазорів по сигналам

датчиків $3C_1, 3C_4, 3C_7, 3C_{10}$, установлених по осям базових систем координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$ і $X_1^B O_1^B Y_1^B$. При відхиленні на дискретах стабілізації величин зазорів під цими датчиками з від величин зазорів стабілізації на виходах диференціальних підсилювачів 29 ÷ 36 виникають сигнали неузгодження

$U_{упр1}^B / k \cdot \Delta\varphi /, U_{упр2}^B / k \cdot \Delta\varphi /, U_{упр3}^B / k \cdot \Delta\varphi /, U_{упр4}^B / k \cdot \Delta\varphi /,$

$U_{упр1}^G / k \cdot \Delta\varphi /, U_{упр2}^G / k \cdot \Delta\varphi /, U_{упр3}^G / k \cdot \Delta\varphi /, U_{упр4}^G / k \cdot \Delta\varphi /,$

які через перемикач 37 надходять на відповідні регулятори 11 ÷ 18 положення вала 1 запобігають зміщенню осі обертання вала 1 з початків O_1^A і O_1^B , базових систем координат $X_1^A O_1^A Y_1^A$ і $X_1^B O_1^B Y_1^B$.



Fig. 1

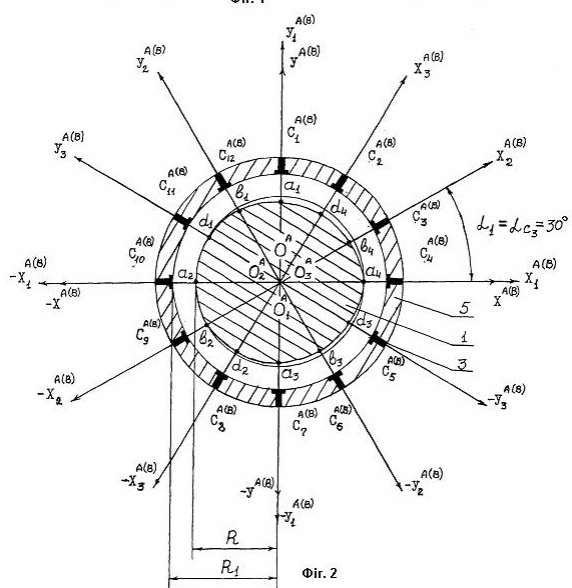


Fig. 2

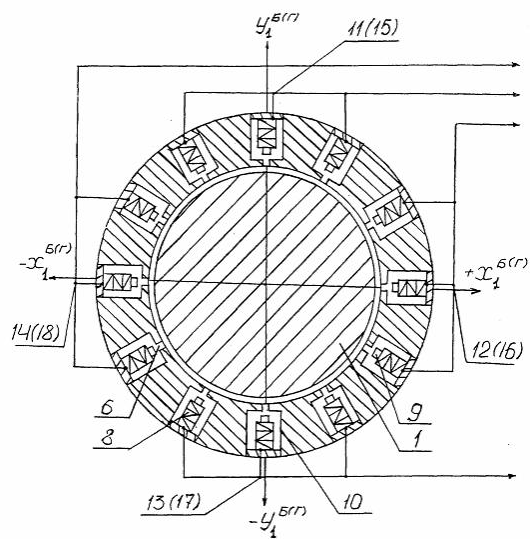


Fig. 3

