УДК621.924.5

СИНТЕЗ ПРИСТРОЮ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ РАДІАЛЬНОГО ПОЛОЖЕННЯ ОСІ ОБЕРТАННЯ ВАЛА СУПЕРПРЕЦИЗІЙНОЇ АЕРОСТАТИЧНОЇ ШПИНДЕЛЬНОЇ ОПОРИ Й АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ

В. О. Тарасов, *докт. техн. наук,*
А.І. Чащін, *докт. техн. наук*
В.В. Науменко

Короткий аналіз і постановка завдання. Досягти високої точності виготовлення різних виробів оптики й механіки, яка вимірюється сотими частками мікрон, за допомогою наявного обладнання, яке сконструйоване на принципах кочення, ковзання, аеростатики й андростатики, неможливо [1; 2; 3; 4; 5]. Необхідно розробляти пристрої з використанням інформаційних технологій, які гарантуватимуть жорстку радіальну стабілізацію положення осі обертання вала шпиндельної опори.

Призначення, склад і принцип роботи пристрою. Пристрій стабілізації радіального положення осі обертання вала суперпрецизійної аеростатичної шпиндельної опори [1] призначений для запобігання радіальному зміщенню осі обертання вала опори щодо прийнятого незміщеного положення в разі дії на вал внутрішніх і зовнішніх збурюючих впливів незалежно від їхньої природи, місця виникнення й застосування. Цей пристрій має виконувати такі функції:

• визначення форми перерізу вала аеростатичної шпиндельної опори площиною установки датчиків величин зазорів, апроксимації некруглого перерізу валу найближчим еліпсом і визначення його параметрів;

• вибір незміщеного положення осі обертання вала опори;

• визначення координат датчиків величин зазорів, корекція величин вимірюваних зазорів на величину некруглості вала;

• рішення ($C_N^2 - 2S$) систем рівнянь для обчислення координат осі обертання вала й відбір координат осі обертання;

• оцінювання координат осі обертання вала опори;

• формування масиву величин опорних зазорів, які відповідають на дискретах кута повороту вала незміщенному положенню осі його обертання;

• створення моменту компенсації, рівного за величиною й протилежного за знаком головному моменту зовнішніх і внутрішніх радіальних збурюючих впливів.

Пристрій (рис. 1) включає в себе два компенсатори радіального навантаження на вал аеростатичної шпиндельної опори. Датчики величин зазорів компенсаторів радіального навантаження (рис. 2) з'єднані зі входами вимірювачів 36 величин зазорів [5] для вимірювання величин зазорів з похибкою, що не перевищує 10^{-2} величини вимірюваного зазору.

Сигнали вимірювачів надходять в ЕОМ 37, оснащену модулем уводу-виводу даних для обміну інформацією із зовнішніми функціональними пристроями. ЕОМ забезпечує знімання, перетворення, обробку й видачу інформації у схему керування відповідно до

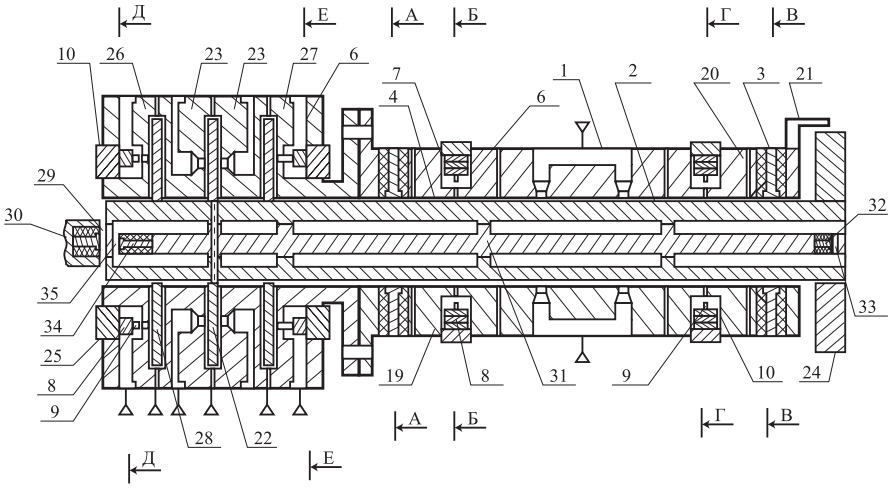

Рис. 1. Суперпрецизійна аеростатична шпиндельна опора

реалізованого способу стабілізації радіального положення осі обертання вала опори.

Як вимірювач кута повороту 21 у пристрої може використовуватися програмний електронно-лічильний тахометр, що формує сигнал нульового кута повороту вала, а також одно-, двох-, чотирьох і так далі кратні двом градусам мітки.

Сигнали керування на групи регуляторів тиску компенсаторів радіального навантаження під час виконання підготовчих операцій набираються на клавіатурі ЕОМ, у модулі вводу-виводу перетворюються в аналогову форму й надходять на пари операційних підсилювачів 38 і 39. При цьому на операційні підсилювачі 38 сигнали надходять на прямі входи, а на підсилювачі 39 – через їхні інвертовані входи. Пари операційних підсилювачів формують рівні за величиною й протилежні за знаком сигнали. Для керування положенням вала опори пари операційних підсилювачів формують чотири сигнали керування: $U_{упр1}$, $U_{упр2}$, $U_{упр3}$, $U_{упр4}$. Сигнали $U_{упр1}$ й $U_{упр2}$ – зміщення вала опори групами регуляторів тиску, установленими в перерізі по Б – Б опори по осях $X^{Б}$ та $Y^{Б}$ системи координат $X^{Б}O^{Б}Y^{Б}$. Сигнали керування $U_{упр3}$ й $U_{упр4}$ забезпечують зміщення вала опори групами регуляторів тиску, установленими в перерізі по Г – Г опори по осях $X^{Г}$ та $Y^{Г}$ системи координат $X^{Г}O^{Г}Y^{Г}$ відповідно. Осі систем координат $X^{Б}O^{Б}Y^{Б}$ і $X^{Г}O^{Г}Y^{Г}$ паралельні осям базових систем координат $X^{A}O^{A}Y^{A}$ та $X^{B}O^{B}Y^{B}$. Виходи кожної пари операційних підсилювачів перемикачами 40 пряме-вимк.-зворотне підключаються до входів диференціальних підсилювачів керування й неузгодженості 41, 42, 43, 44. У положенні

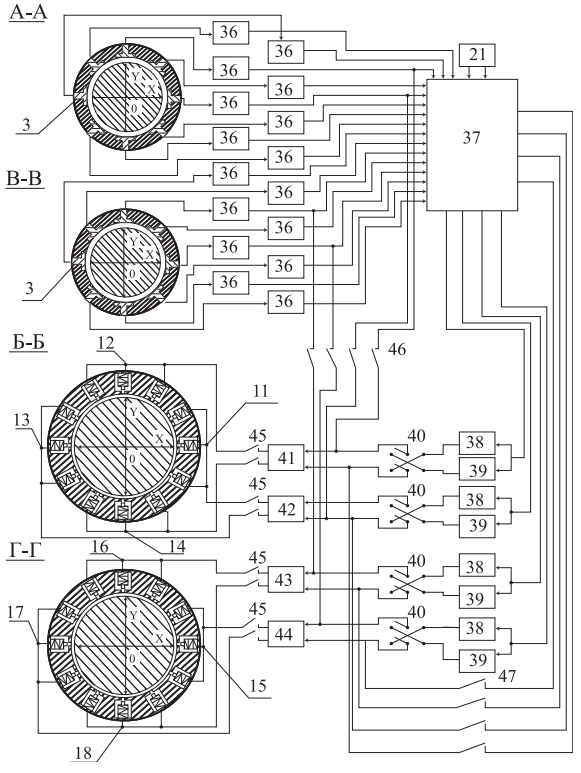

Рис. 2. Функціональна схема пристрою стабілізації радіального положення осі обертання вала суперпрецизійної аеростатичної шпиндельної опори

«пряме» перемикачів 40 при надходженні сигналів керування вал відносно початкового положення зміщається в напрямку позитивної півосі систем координат $X^БO^БY^Б$ та $X^ГO^ГY^Г$, а в положенні «зворотне» – у напрямку від'ємних півосей цих систем координат. Диференціальні підсилювачі сигналів керування й неузгодженості призначені для формування під час підготовки пристрою до роботи протифазних напруг, різниці потенціалів яких пропорційні сигналам керування $U_{упр1}$, $U_{упр2}$, $U_{упр3}$, $U_{упр4}$. У процесі роботи пристрою диференціальні підсилювачі формують сигнали керування на групи регуляторів тиску, що відповідають величинам відхилень поточних величин зазорів під датчиками величин зазорів від величин опорних зазорів, що відповідають незміщеному положенню осі обертання вала на дискретах кута повороту, знак яких визначається напрямком відхилення. Виходи кожного диференціального підсилювача в процесі настроювання пристрою й виконання підготовчих операцій перемикачами 45 увімк.-вимк. відключаються від груп регуляторів тиску, установлених по осях систем координат $X^БO^БY^Б$ та $X^ГO^ГY^Г$.

Напруги, що відповідають кодам величин опорних зазорів під датчиками C_1 і C_3, установленими по осях базової системи координат XOY у перерізі по А – А шпиндельної опори і які відповідають незміщеному положенню осі обертання вала в перерізі по А – А через перемикачі 47 увімк.-вимк., надходять із ЕОМ на перші входи диференціальних підсилювачів 41 і 42 відповідно. На другі входи цих підсилювачів через перемикачі увімк.-вимк. надходять сигнали вимірювачів 36 величин зазорів по датчиках C_1 і C_3, установлених у цьому перерізі відповідно.

Виходи диференціальних підсилювачів 41 і 42 через перемикач увімк.-вимк. з'єднані з п'єзостовпами груп регуляторів тиску, установленими в перерізі по Б – Б шпиндельної опори. До диференціального підсилювача 41 підключені групи регуляторів тиску по осі $Y^Б$ системи координат $X^БO^БY^Б$, до підсилювача 42 – групи регуляторів тиску по осі $X^Б$ цієї системи координат.

Напруги, що відповідають кодам величин опорних зазорів під датчиками C_1 і C_3 величин зазорів, установленими по осях базової системи координат XOY у перерізі по В – В аеростатичної шпиндельної опори і які відповідають незміщеному положенню осі обертання вала в цьому перерізі опори, надходять із ЕОМ на перші входи диференціальних підсилювачів 43 і 44 відповідно. На другі входи диференціальних підсилювачів надходять сигнали вимірювачів 36 величин зазорів по датчиках C_1 і C_3, установлених у перерізі по В – В опори відповідно. Виходи цих диференціальних підсилювачів через перемикачі увімк.-вимк. з'єднані з п'єзостовпами груп регуляторів тиску, установленими в перерізі по Г – Г опори. Виходи диференціального підсилювача 43 з'єднані з групами регуляторів тиску по осі $Y_Г$ системи координат $X^ГO^ГY^Г$, а диференціального підсилювача 44 – з групами регуляторів тиску по осі $X^Г$ цієї системи координат.

Кожна група регуляторів тиску по осях систем координат $X^БO^БY^Б$ і $X^ГO^ГY^Г$ у перерізах по Б – Б та Г – Г опори створює додатковий тиск на вал, рівний за розміром і протилежний за напрямком складовим радіального навантаження на вал у цих перерізах по осях систем координат $X^БO^БY^Б$ і $X^ГO^ГY^Г$.

Пристрій стабілізації радіального положення осі обертання вала реалізує принцип керування по відхиленню, суть якого полягає в тому, що вимірюється керована величина, порівнюється з опорним значенням, а виявлене при цьому відхилення від опорного значення перетворюється в керуючий вплив, який діє на об'єкт керування (у цьому випадку вал) і усуває це відхилення, повертаючи вісь обертання вала опори в незміщене положення. У розглянутому пристрої керованими величинами є величини зазорів під датчиками C_1 і C_3, установленими по осях базових систем

координат XOY у перерізах по А – А і В – В аеростатичної шпиндельної опори. Необхідне значення цих зазорів – їхня рівність величинам опорних зазорів, які відповідають незміщеному положенню осі обертання, а об'єктом керування є вал опори.

Робота пристрою стабілізації радіального положення осі обертання вала суперпрецизійної аеростатичної шпиндельної опори

Роботу цього пристрою доцільно розділити на два етапи:

• підготовчий, на якому реалізується спосіб вимірювання координат осі обертання вала аеростатичної шпиндельної опори. На цьому етапі визначаються параметри еліпсів, які наближають перерізи вала площинами установки датчиків величин зазорів, координати датчиків і координати незміщеного положення осі обертання вала, а також формуються масиви величин опорних зазорів;

• стабілізації радіального положення осі обертання вала суперпрецизійної аеростатичної шпиндельної опори.

Підготовка пристрою до роботи починається з визначення параметрів наближуючих еліпсів. Для цього:

• перемикачі увімк.-вимк. встановлюються в положення вимк., входи диференціальних підсилювачів відключаються від вимірювачів величин зазорів і виходів напруг величин опорних зазорів ЕОМ;

• перемикачі більше-вимк.-менше встановлюються в положення більше або менше, виходи пар операційних підсилювачів підключають до входів диференціальних підсилювачів сигналів керування й неузгодженості;

• перемикачі 45 увімк.-вимк. встановлюються в положення увімк., виходи диференціальних підсилювачів підключаються до відповідних груп регуляторів тиску.

Визначення параметрів наближуючих еліпсів починається із запуску підпрограми *Індикація величин зазорів*. Алгоритм роботи підпрограми включає в себе:

• опитування ЕОМ із установленою частотою вимірювачів величин зазорів по датчиках $C_1 – C_8$, установлених у перерізах по А – А та В – В опори;

• перетворення вихідних напруг вимірювачів у цифрові двійкові коди й відображення їх на екрані дисплея;

• опитування вимірювача кута повороту вала опори й відображення кута повороту вала на екрані дисплея.

Більшу піввісь еліпса, що наближає переріз вала по $A – A$, суміщають з віссю X^A базової системи координат $X^AO^AY^A$. Для цього на довільному куті повороту вала під датчиками C_1 і C_5, установленими по півосям $+Y^A$ та $-Y^A$ системи координат $X^AO^AY^A$, необхідно встановити рівні величини зазорів $Z_1(0) = Z_5(0)$, спостерігаючи їх на екрані дисплея. Якщо для цього вал необхідно зміщати в напрямку півосі $+Y^A$, перемикач пряме-вимк.-зворотне встановлюється в положення «пряме». Якщо для установки рівних величин зазорів вал необхідно зміщати в напрямку півосі $-Y^A$, то перемикач пряме-вимк.-зворотне встановлюється в положення «зворотне».

Установлюється величина коду сигналу керування $U_{упр.1}$ і виконується пуск підпрограми «установка вала 1». Алгоритм роботи цієї підпрограми включає в себе:

• зчитування й пересилання коду сигналу керування $U_{упр.1}$ у модуль вводу-виводу ЕОМ;

• перетворення коду сигналу керування $U_{упр.1}$ у напругу коду сигналу керування й видачу його на прямий вхід операційного підсилювача 38 й інвертуючий вхід операційного підсилювача 39.

З виходів операційних підсилювачів напруга через перемикач пряме-вимк.-зворотне, диференціальний підсилювач 41 сигналів керування й неузгодженості, перемикач увімк.-вимк. надходить на п'єзостовпи груп регуляторів тиску по півосях $+Y^A$ та $-Y^A$ системи координат $X^AO^AY^A$. П'єзостовпи груп регуляторів тиску підключені до диференціального підсилювача в протифазі так, що в положенні «пряме»

перемикача пряме-вимк.-зворотне тиск на вал групи регуляторів тиску, установлених по осі $-Y^A$, збільшується, а групи регуляторів тиску, установлених по півосі $+Y^A$, зменшується. Вал зміщається в напрямку півосі $+Y^A$.

Для переміщення вала в напрямку півосі $-Y^A$ перемикач пряме-вимк.-зворотне встановлюється в положення «зворотне» й виконується пуск підпрограми «*установка вала*».

Виконується пуск підпрограми *«індикація величин зазорів»*. З екрана дисплея зчитуються значення величин зазорів $Z_1(0)$ та $Z_5(0)$. Якщо $Z_1(0) \neq Z_5(0)$, виконуються пуски підпрограм «установка вала 1 і «індикація величин зазорів». Методом послідовних наближень установлюють $Z_1(0) = Z_5(0)$. Величина коду сигналу керування $U_{упр.1}$, що забезпечує виконання цієї рівності, запам'ятовується.

Не змінюючи положення вала, з екрана дисплея зчитуються величини зазорів $Z_3(0)$ і $Z_7(0)$ під датчиками C_3 і C_7, установленими по півосях $+X^A$ і $-X^A$ системи координат $X^AO^AY^A$. З дискретністю $\Delta\varphi$ вал установлюється відносно початкового положення на кути $\Delta\varphi$, $2\,\Delta\varphi$, $3\,\Delta\varphi$,…, $k\,\Delta\varphi$,…, $360° - \Delta\varphi$ ... На кожній дискреті кута повороту вала, підбираючи величину сигналу керування $U_{упр.1}(k\,\Delta\varphi)$, установлюються рівні величини зазорів під датчиками C_1 і C_5 $Z_1(k\,\Delta\varphi) = Z_5(k\,\Delta\varphi)$. Сигнали керування $U_{упр.1}(k\,\Delta\varphi)$ запам'ятовуються. При цьому на кожному куті повороту вала під датчиком C_7 величини зазору, установленим по півосі $-X^A$ системи координат $X^AO^AY^A$ у перерізі по $A - A$ опори, установлюється величина зазору $Z_7(k\,\Delta\varphi) = Z_7(0)$. Для цього набирають код сигналу керування $U_{упр.2}(k\,\Delta\varphi)$, який визначає тиск на вал груп регуляторів тиску, установлених по півосях $+X^Б$ і $-X^Б$ системи координат $X^БO^БY^Б$. Виконується пуск підпрограми «*установка вала 2*». Сигнал керування $U_{упр.2}$ з ЕОМ надходить на прямий вхід операційного підсилювача 38 і інвертуючий вхід операційного підсилювача 39, виходи яких через перемикач пряме-вимк.-зворотне, диференціальний підсилювач 42, перемикач увімк.-вимк. підключені до п'єзостовпів груп регуляторів тиску, установлених по півосях $+X^Б$ і $-X^Б$ системи координат $X^БO^БY^Б$ у перерізі по $Б - Б$ опори. У положенні перемикача «пряме-вимк.–зворотне» вал зміщається в напрямку півосі $+X^Б$, а в положенні «зворотне» – у напрямку півосі $-X^Б$ на величину, що відповідає величині сигналу керування.

Виконується пуск підпрограми «*індикація величин зазорів*». З екрана дисплея зчитується величина зазору $Z_7(k\,\Delta\varphi)$. Якщо $Z_7(k\,\Delta\varphi) \neq$ $\neq Z_7(0)$, то змінюючи сигнал керування й виконуючи запуски підпрограми «*установка вала 2*», методом послідовних наближень установлюється $Z_7(k\,\Delta\varphi) = Z_7(0)$, а сигнал $U_{упр.2}(k\,\Delta\varphi)$ запам'ятовується.

Не змінюючи сигналів керування $U_{упр.1}(k\,\Delta\varphi)$ і $U_{упр.2}(k\,\Delta\varphi)$, виконується пуск підпрограми «*індикація величин зазорів*». З екрана дисплея зчитується й запам'ятовується величина зазору $Z_3(k\,\Delta\varphi)$ під датчиком C_3, установленим по осі $+X^A$ системи координат $X^AO^AY^A$.

Вал шпиндельної опори встановлюється на кут повороту $\varphi = k\,\Delta\varphi$, на якому $Z_3(k\,\Delta\varphi) =$ $= \min$. На ЕОМ набираються коди сигналів керування, при яких на куті повороту $\varphi =$ $= k\,\Delta\varphi$ виконувалося $Z_1(k\,\Delta\varphi) = Z_5(k\,\Delta\varphi)$, $Z_3(k\,\Delta\varphi) = \min$, і виконується пуск підпрограм «*установка вала 1*» і «*установка вала 2*». У результаті зазори під датчиками C_1, C_5 і C_3 задовольнятимуть цим рівностям.

Не змінюючи кутового положення вала, запускаються підпрограми «*індикація величин зазорів*» і «*установка вала 1*». Вал зміщають у напрямку півосі $+Y^A$ базової системи координат $X^AO^AY^A$ і встановлюють під датчиком C_1 величину зазору $Z_1(k\,\Delta\varphi)/2$.

У цьому положенні вала виконується пуск підпрограми *«сума зазорів X^A »*. Алгоритм цієї підпрограми включає в себе:

• обчислення й формування масиву сум

$$S_X^A(j) = Z_3(j) + Z_7(j), \quad (j = 0, 1, 2, ...);$$

• формування масиву кодів сигналів керування $U_{упр.1}(j)$, які відповідають *j*-й сумі величин зазорів.

Із кроком ΔY вал зміщається в напрямку півосі $-Y^A$.На кожному *j*-му кроці зміщення вала виконується пуск підпрограми «*сума зазорів* X^A» і формується масив сум $S_X^A(j) = Z_3(j) + Z_7(j)$, і масив кодів сигналів керування $U_{упр.1}(j)$, що задають положення вала по осі Y^A на *j*-му кроці.

Після переміщення вала з початкового положення в напрямку півосі $-Y^A$ на величину Z_1 (k $\Delta\varphi$) зчитується код сигналу керування, який відповідає мінімальній сумі $S_X^A(j) = \min$.

На ЕОМ набирається код сигналу керування $U_{упр.1}(j)$, який відповідає $S_X^A(j) = \min$, виконується пуск підпрограми *«установка вала 1»*. У результаті переріз вала по А – А буде встановлено симетрично осі X^A базової системи координат $X^AO^AY^A$. При цьому більша вісь еліпса в перерізі вала по А – А буде сполучена з віссю Х цієї системи координат.

Не змінюючи кутового положення вала й виконуючи пуски підпрограм *«індикація величин зазорів»* і *«установка вала 2»*, мала вісь еліпса в перерізі вала по А – А суміщається з віссю Y^A системи координат $X^AO^AY^A$. Отже, переріз вала по А – А буде встановлено симетрично осей цієї системи координат.

Виконується пуск підпрограми *«індикація величин зазорів»*. Датчики $C_1 - C_8$ зміщають по висоті зазору й установлюють із однаковими зазорами відносно поверхні вала:

$$Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_4 = Z_5 = Z_6 = Z_7 = Z_8 = Z.$$

Центр еліпса, що наближає переріз вала по А – А, приймається як точка осі обертання вала з координатами [$X^A = 0$, $Y^A = 0$], а кут повороту вала φ = k $\Delta\varphi$, на якому осі наближуючого еліпса були суміщені з осями системи $X^AO^AY^A$ координат, приймається як нульовий ($\varphi = 0$) кута повороту вала.

Далі обчислюється ексцентриситет наближуючого еліпса. Для цього вал установлюється на кут повороту $\varphi = 90^\circ$. При цьому по черзі виконується пуск підпрограм *«індикація величин зазорів» і «установка вала 2»*.

Під датчиками C_1 і C_5, C_3 і C_7 установлюють рівні величини зазорів $Z_1^{\phi=90^\circ} = Z_5^{\phi=90^\circ}$, $Z_3^{\phi=90^\circ} = Z_7^{\phi=90^\circ}$ і суміщують осі наближуючого еліпса з осями системи координат $X^AO^AY^A$.

У пам'ять ЕОМ уводиться значення *R* радіуса вала, прийнятого як мала піввісь еліпса *b*, і виконується пуск підпрограми *«ексцентриситет 1»*. Алгоритм роботи підпрограми включає в себе:

• опитування вимірювача величини зазору по датчику C_1, установленому по півосі $+Y^A$;

• розрахунок величини α великої півосі наближуючого еліпса;

• розрахунок напівфокусної відстані *c* і ексцентриситету *e* наближуючого еліпса;

• уточнення параметрів наближуючого еліпса.

Для такого уточнення вал установлюється на кут повороту $\varphi = 45^\circ$. За наведеною вище методикою під датчиками C_2 і C_6, C_4 і C_8 установлюються рівні величини зазорів:

$$Z_2^{\phi=45^\circ} = Z_6^{\phi=45^\circ},\ Z_4^{\phi=45^\circ} = Z_8^{\phi=45^\circ}.$$

Виконується пуск підпрограми *«корекція малої півосі наближуючого еліпса 1»*. Алгоритм підпрограми включає в себе:

• розрахунок величин зазорів під датчиками C_1, C_3, C_5, C_7 у перерізі вала по *A – A* відповідно до виразу (1):

$$Z_{1розр}^{\varphi=45^\circ} = Z_1 - \left[\sqrt{\frac{b^2}{1 - e^2\cos^2(\alpha_1 - 45^\circ)}} - \right.$$

$$\left. - \sqrt{\frac{b^2}{1 - e^2\cos^2\alpha_1}}\right],$$

$$Z_{3розр}^{\varphi=45^\circ} = Z_3 + \left[a - \sqrt{\frac{b^2}{1 - e^2 \cos^2(\alpha_3 - 45^\circ)}} \right],$$

$$Z_{5\text{розр}}^{\varphi=45^\circ} = Z_5 - \left[\sqrt{\frac{b^2}{1 - e^2 \cos^2(\alpha_5 - 45^\circ)}} - \right.$$

$$\left. - \sqrt{\frac{b^2}{1 - e^2 \cos^2 \alpha_5}} \right],$$

$$Z_{7розр}^{\varphi=45^\circ} = Z_7 + \left[a - \sqrt{\frac{b^2}{1 - e^2 \cos^2(\alpha_7 - 45^\circ)}} \right]. \qquad (1)$$

• опитування вимірювачів величин зазорів по датчиках C_1, C_3, C_5, C_7 і порівняння обмірюваних значень із їхніми розрахунковими значеннями відповідно до (2):

$$Z_{1вим}^{\varphi=45^\circ} = Z_{1розр}^{\varphi=45^\circ} \;;\; Z_{3вим}^{\varphi=45^\circ} = Z_{3розр}^{\varphi=45^\circ} \;;$$
$$Z_{5вим}^{\varphi=45^\circ} = Z_{5розр}^{\varphi=45^\circ} \;;\; Z_{7вим}^{\varphi=45^\circ} = Z_{7розр}^{\varphi=45^\circ} \;; \qquad (2)$$

• варіювання величини радіуса R вала в діапазоні $R \pm 3\sigma$ з кроком ΔR, розрахунок на кожному кроці варіації норми (3):

$$\| \cdot \| = \sqrt{\left[Z_{1вим}^{\varphi=45^\circ} - Z_{1розр}^{\varphi=45^\circ}(j) \right]^2 + \left[Z_{3вим}^{\varphi=45^\circ} - Z_{3розр}^{\varphi=45^\circ} \right]^2 + \left[Z_{5вим}^{\varphi=45^\circ} - Z_{5розр}^{\varphi=45^\circ} \right]^2 + \left[Z_{7вим}^{\varphi=45^\circ} - Z_{7розр}^{\varphi=45^\circ} \right]^2} \qquad (3)$$

За малу піввісь еліпса приймається величина радіуса R(j), при якому на j-му кроці варіації норма (3) прийняла б мінімальне значення.

Повторно виконується пуск підпрограми *«ексцентриситет 1»*. Розраховуються уточнені значення великої півосі a, напівфокусна відстань *c* й ексцентриситет *e* наближуючого еліпса. Виконується пуск підпрограми *«обчислення координат датчиків 1»*. Вихідними даними для роботи підпрограми є:

• Z – величина зазору, з яким датчики $C_1 - C_8$ на куті повороту φ = 0 були встановлені відносно поверхні вала;

• кути α_i установки датчиків $C_1 - C_8$ (у системі координат $X^A O^A Y^A$).

Відповідно до співвідношень для розрахунку координат датчиків $C_1 - C_8$ величин зазорів у системах координат *XOY* та $X_1 O_1 Y_1$

$$\left[X_{C_1} = 0, Y_{C_1} = R + \Delta\Xi_1 + Z_1 \right];$$
$$\left[X_{C_5} = 0,\ Y_{C_5} = -\left(R + \Delta\Xi_5 + Z_5\right) \right];$$
$$\left[X_{(1)C_2} = R + \Delta\Xi_2 + Z_2,\ Y_{(1)C_2} = 0 \right];$$
$$\left[X_{(1)C_6} = -\left(R + \Delta\Xi_6 + Z_6\right),\ Y_{(1)C_6} = 0 \right];$$
$$\left[Z_{C_3} = R + \Delta\Xi_3 + Z_3,\ Y_{C_3} = 0 \right];$$
$$\left[X_{C_7} = -\left(R + \Delta\Xi_7 + Z_7\right),\ Y_{C_7} = 0 \right];$$
$$\left[X_{(1)C_4} = 0,\ Y_{(1)C_4} = -\left(R + \Delta\Xi_4 + Z_4\right) \right]. \qquad (4)$$

Розраховуються й записуються в пам'ять координати датчиків:

$$\left[X_{C_1}^A,\ Y_{C_1}^A\right],\ \left[X_{(1)C_2}^A,\ Y_{(1)C_2}^A\right],$$
$$\left[X_{C_3}^A,\ Y_{C_3}^A\right],\ \left[X_{(1)C_4}^A,\ Y_{(1)C_4}^A\right],$$
$$\left[X_{C_5}^A,\ Y_{C_5}^A\right],\ \left[X_{(1)C_6}^A,\ Y_{(1)C_6}^A\right],$$
$$\left[X_{C_7}^A,\ Y_{C_7}^A\right],\ \left[X_{(1)C_8}^A,\ Y_{(1)C_8}^A\right]$$

у перерізі по $A - A$ шпиндельного вузла. Використовуючи сигнали керування $U_{упр.3}$ і $U_{упр.4}$ підпрограми «*установка вала 3», «установка вала 4*», «*сума зазорів* X^B», «*ексцентриситет 2», «обчислення координат датчиків 2»,* обчислюються параметри *a*, *c*, *e* еліпса, що наближає переріз вала по *Б – Б*, і координати встановлених у цьому перерізі датчиків:

$$\left[X_{C_1}^B,\ Y_{C_1}^B\right],\ \left[X_{(1)C_2}^B,\ Y_{(1)C_2}^B\right],$$
$$\left[X_{C_3}^B,\ Y_{C_3}^B\right],\ \left[X_{(1)C_4}^B,\ Y_{(1)C_4}^B\right],$$
$$\left[X_{C_5}^B,\ Y_{C_5}^B\right],\ \left[X_{(1)C_6}^B,\ Y_{(1)C_6}^B\right],$$
$$\left[X_{C_7}^B,\ Y_{C_7}^B\right],\ \left[X_{(1)C_8}^B,\ Y_{(1)C_8}^B\right].$$

Закінчується підготовчий етап роботи пристрою формуванням масиву опорних зазорів, що відповідають незміщеному положенню осі обертання вала на дискретах кута його повороту.

Нехай у процесі роботи пристрою корекція

положення осі обертання вала здійснюється з дискретністю $\Delta\varphi = 1^\circ$. Для формування масиву опорних зазорів вал послідовно встановлюється на кути повороту:

$$\varphi_1 = 0^\circ,\ \varphi_2 = 1^\circ,\ \ldots,\ \varphi_j = (j-1)\Delta\varphi,\ \ldots,\ \varphi_J = 360^\circ - \Delta\varphi_1.$$

На кожній дискреті кута повороту виконується пуск підпрограми «*обчислення координат осі обертання вала 1»* і *«обчислення координат осі обертання вала 2».* У результаті одержують оцінки координат осі обертання вала у двох перерізах, наприклад, на куті повороту вала:

$$\varphi_1 = 0^\circ : \left[\hat{X}_1^A(0), \hat{Y}_1^A(0)\right] \text{ та } \left[\hat{X}_1^B(0), \hat{Y}_1^B(0)\right].$$

Отримані оцінки координат осі обертання вала порівнюються з координатами $\left[X_1^A = 0,\ Y_1^A = 0,\right]$ та $\left[X_1^B = 0,\ Y_1^B = 0,\right]$ незміщеного положення осі обертання вала. Якщо не виконується умова $\left[\hat{X}_1^A(0) = 0,\ \hat{Y}_1^A(0) = 0\right]$ і $\left[\hat{X}_1^B(0) = 0,\ \hat{Y}_1^B(0) = 0\right]$, то на куті повороту вала $\varphi 1 = 0^\circ$ виконується пуск підпрограм *«індикація величин зазорів»*, *«установка вала 1», «установка вала 2», «установка вала 3», «установка вала 4», «обчислення координат осі обертання вала 1»* і *«обчислення координат осі обертання вала 2»* і за допомогою методу послідовних наближень вісь обертання вала аеростатичної шпиндельної опори встановлюється в незміщене положення.

Не змінюючи положення вала, виконується пуск підпрограми *«формування масиву опорних зазорів»*. Алгоритм роботи підпрограми включає в себе:

• опитування вимірювачів величин зазорів по датчиках C_1 і C_3, установлених по осях систем координат $X^AO^AY^A$ та $X^BO^BY^B$, і перетворення їхніх вихідних напруг у цифрові двійкові коди;

• запис двійкових кодів величин опорних зазорів $Z_1^A(j\Delta\varphi),\ Z_3^A(j\Delta\varphi),\ Z_1^B(j\Delta\varphi),\ Z_3^B(j\Delta\varphi)$ у масив величин опорних зазорів.

У цьому випадку двійкові коди величин опорних зазорів $Z_1^A(0), Z_3^A(0),\ Z_1^B(0), Z_3^B(0)$ засилаються в пам'ять і утворюють перші чотири елементи масиву опорних зазорів, які відповідають незміщеному положенню осі обертання вала на куті повороту $\varphi 1 = 0^\circ$. У результаті в пам'яті обчислювача буде сформовано масив опорних зазорів для заданих дискрет кута повороту вала опори:

$$\varphi = 0^\circ :\ Z_1^A(0), Z_3^A(0),\ Z_1^B(0), Z_3^B(0), \ldots;$$

$$\Delta\varphi 1 :\ Z_1^A(j\Delta\varphi_1),\ Z_3^A(j\Delta\varphi_1),\ Z_1^B(j\Delta\varphi_1),\ Z_3^B(j\Delta\varphi_1), \ldots;$$

$$\varphi_J = 360^\circ - \Delta\varphi_1 :$$

$$Z_1^A(360^\circ - \Delta\varphi_1), Z_3^A(360^\circ - \Delta\varphi_1);$$

$$Z_1^B(360^\circ - \Delta\varphi_1), Z_3^B(360^\circ - \Delta\varphi_1).$$

Для переведення пристрою в режим стабілізації радіального положення осі обертання вала опори перемикач «більше-вимк.-менше» встановлюється в положення «вимк.», а перемикачі 46 і 47 «увімк.-вимк». установлюються в положення «увімк.». Входи диференціальних підсилювачів підключаються до вимірювачів величин зазорів по датчиках C_1 і C_3, установлених у перерізах по $A - A$ й $B - B$ опори, і до виходів напруг опорних зазорів ЕОМ. Виконується пуск підпрограми *«компенсація радіальних навантажень»*. Відповідно до алгоритму роботи підпрограми в момент її пуску величини опорних зазорів $Z_1^A(0), Z_3^A(0), Z_1^B(0), Z_3^B(0)$ для кута повороту $\varphi = 0$ зчитуються з масиву опорних зазорів.

Валу опори задається обертання з номінальною швидкістю. По передньому фронту першої мітки нульового кута повороту вала, що надходить із вимірювача кута повороту вала після пуску підпрограми, коди цих опорних зазорів перетворюються в напруги опорних

зазорів і надходять на перші входи відповідних диференціальних підсилювачів, а з пам'яті ЕОМ зчитуються коди опорних зазорів для чергової (другої) дискрети стабілізації радіального положення осі обертання вала опори.

На другі входи диференціальних підсилювачів постійно надходять вихідні напруги вимірювачів величин зазорів по датчиках C_1 і C_3 в перерізах по $A-A$ й $B-B$ опори. У разі відхилення поточних величин зазорів $Z_1^A(t), Z_3^A(t), Z_1^B(t), Z_3^B(t)$ від відповідних величин опорних зазорів у межах кута повороту вала $0 \le \varphi \le \Delta\varphi_1$ на виходах диференціальних підсилювачів виникає різниця потенціалів, пропорційна величинам відхилень поточних величин зазорів від відповідних опорних зазорів, а знаки різниці потенціалів на виходах диференціальних підсилювачів визначаються напрямком відхилення поточного значення величини зазору від опорного.

По передньому фронту першої одноградусної мітки коди величин опорних зазорів $Z_1^A(\Delta\varphi_1)$, $Z_3^A(\Delta\varphi_1)$, $Z_1^B(\Delta\varphi_1)$, $Z_3^B(\Delta\varphi_1)$ перетворюються в напруги опорних зазорів і надходять на перші входи диференціальних підсилювачів, а з масиву опорних зазорів зчитуються чергові коди величин опорних зазорів $Z_1^A(2\Delta\varphi_1)$, $Z_3^A(2\Delta\varphi_1)$, $Z_1^B(2\Delta\varphi_1)$, $Z_3^B(2\Delta\varphi_1)$. Описаний вище процес повторюється на кожному оберті вала при надходженні чергової мітки, що відповідає обраній дискреті стабілізації.

У разі використання високоточних вимірювачів величин зазорів і застосування ефективних методів оцінювання вимірів величина радіального зміщення осі обертання вала суперпрецизійної шпиндельної опори може не перевищувати 0,01 мкм. Середньоквадратична похибка стабілізації величин опорних зазорів під датчиками C_1 або C_3 обчислюється за вимірами одного оберту вала:

$$\sigma_{1(3)} = \sqrt{\frac{\sum_{j=0}^{J}\left[Z^A_{1(3)}(j\Delta\varphi_1) - Z^A_{1(3)вимір.}(j\Delta\varphi_1)\right]^2}{J}},$$

де $Z^A_{1(3)}(j\Delta\varphi_1)$ – обмірювана величина зазору під датчиком $C_1(C_3)$ на j-й дискреті стабілізації.

Тоді $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_3^2}$

Таким чином здійснюється жорстка радіальна стабілізація осі обертання вала суперпрецизійної аеростатичної шпиндельної опори. Осьову стабілізацію її буде розглянуто в наступному номері цього журналу.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Пинегин С.В., Орлов А.В., Табачников Ю.Б.* Прецизионные опоры качения и опоры с газовой смазкой – М.: Машиностроение, 1984.

2. *Гутер Р.С, Овчинский Б.В.* Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта. – М.: Наука, 1970 .

3. *Гриневич Б.Ф.* Измерительные компенсационно-мостовые устройства с емкостными датчиками. – К.: Наук. думка, 1987 .

4. *Шейнберг С.А.* Опоры скольжения с газовой смазкой. – М.: Машиностроение, 1979.

5. *Тарасов В.А., Зиненко В.Н., Бурляй Ю.И.* Технология устойчивости системы стабилизации радиального положения оси вращения вала суперпрецизионной аэростатической шпиндельной опоры К / В.А. Тарасов, *В.Н. Зиненко, Ю.И. Бурляй* // Автоматизація виробничих процесів. – 2004. – №2(19).

6. *Тарасов В.О., Левін І.О.* Технологія і автоматизація способу вимірювання координат осі обертання вала аеростатичної шпиндельної опори / *В.О. Тарасов, І.О. Левін* // Науково-технічна інформація. – № 1(47), 2011. – С. 53–59.

7. Пат. № 57411 Україна. Пристрій стабілізації радіального положення осі обертання радіальної аеростатичної опори / *Тарасов В.О., Левін І.О.* Опубл. 25.02.2011. Бюл. №4/211.

8. Пат. № 98995 Україна. Пристрій стабілізації радіального положення осі обертання вала радіальної аеростатичної опори / *Тарасов В.О., Левін І.О.* Опубл. 2012.

9. Алгоритм інформаційного синтезу траєкторії переміщення круглого робочого інструмента дугоподібною шліфувальною поверхнею / *Чащін А.І., Науменко В.В.* // Науково-технічна інформація – №2 (56), 2013.

10. Пат. № 70106А Украина. Прецизионная шпиндельная опора / *Тарасов В.А., Зиненко В.Н.* Опубл. 2004.

11. Пат. №69126А Украина. Способ стабилизации положения оси вращения вала аэростатической шпиндельной опоры / *Тарасов В.А., Зиненко* В.Н. Опубл. 2004.

12. Пат. №98995 Україна. Пристрої стабілізації радіального положення осі обертання вала радіальної аеростатичної опори / *Тарасов В.О., Левін І.О.* Опубл. 2012.