



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) UA

(11) 101906

(13) C2

(51) МПК

F16C 32/04 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(21) Номер заявки: а 2012 01839

(22) Дата подання заявки: 20.02.2012

(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: 13.05.2013

(41) Публікація відомостей про заявку: 10.10.2012, Бюл.№ 19

(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 13.05.2013, Бюл.№ 9

(72) Винахідник(и):

Гриценко Володимир Іллєч (UA),
Тарасов Віктор Олексійович (UA),
Зіненко Володимир Миколайович (UA)

(73) Власник(и):

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-НАВЧАЛЬНИЙ
ЦЕНТР ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
СИСТЕМ НАН УКРАЇНИ ТА МОН УКРАЇНИ,
просп. Академіка Глушкова, 40, м. Київ-187,
03187 (UA)

(74) Представник:

Жук Віктор Олексійович, реєстр. №16

(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою:

UA 15383 A; 05.07.1997
SU 1711681 A3; 07.02.1992
RU 2080214 C1; 27.05.1997
RU 2370344 C1; 20.10.2009
RU 2449185 C1; 02.11.2010
US 4976177 A; 11.12.1990
JP 56150618 A; 21.11.1981
JP 2007162729 A; 28.06.2007

(54) СУМІЩЕНА ШПИНДЕЛЬНА ОПОРА НА ПОСТІЙНИХ МАГНІТАХ

(57) Реферат:

Пристрій належить до машинобудування і може використовуватись при конструюванні авіаційних двигунів. Це досягається тим, що в суміщеній шпіндельній опорі на постійних магнітах, яка включає силові магнітні підвіси, датчики величин зазорів, балансуючі вантажі, опори кочення, блок вибору незміщеного положення і балансування вала суміщеної шпіндельної опори на постійних магнітах, згідно з винаходом, вал суміщеної шпіндельної опори на постійних магнітах виконують складовим з трьох співвісно установлених валів одного діаметра, на середньому валу по його краях в екранах установлені магніти вала у вигляді коротких порожнистих циліндрів з полюсами на зовнішній і внутрішній бокових поверхнях, в цих же перерізах в корпусі суміщеної шпіндельної опори установлені групи силових магнітних відштовхувачів по три паралельно підключених силових магнітних відштовхувачів в кожній групі, кожен силовий магнітний відштовхувач включає установлений в екран магніт силового магнітного відштовхувача, який відкритим полюсом звернутий до однойменного полюса магніту вала, регулювальний гвинт, а між регулювальним гвинтом і магнітом силового магнітного відштовхувача в ізоляторі установлений п'єзоелектричний двигун. Силові магнітні відштовхувачі, які установлені в суміщеній шпіндельній опорі, і магніти вала в цих же перерізах, утворюють два силових магнітних підвіси складового вала суміщеної шпіндельної опори на постійних магнітах. В інших перерізах шпіндельної опори установлені датчики величин зазорів між основами датчиків і крайніми валами складового вала суміщеної шпіндельної опори. Крайні вали складового вала установлені в опори кочення, які установлені у фланцях, прикріплених до корпусу шпіндельної опори. Між датчиками величин зазорів і опорами кочення в крайніх валах складового вала суміщеної шпіндельної опори установлені

UA 101906 C2

балансувальні вантажі. Блок вибору незміщеного положення і балансування суміщеної шпindelної опори на постійних магнітах включає датчики величин зазорів, вимірювачі величин зазорів, вимірювач кута повороту складового вала суміщеної шпindelної опори, обчислювач, операційні підсилювачі, перемикачі "більше-вимк.-менше", вимикачі "увімк.-вимк." групи силових магнітних відштовхувачів. Датчики величин зазорів електрично зв'язані з групами силових магнітних відштовхувачів і з'єднані з входами вимірювачів величин зазорів, а їх виходи з'єднані з входами обчислювача, вихід вимірювача кута повороту вала з'єднаний з входом обчислювача, виходи обчислювача з'єднані з входами пар операційних підсилювачів, а їх виходи через перемикачі "пряме-вимк.-зворотне" з'єднані з входами відповідних диференціальних підсилювачів, виходи яких через перемикачі "увімк.-вимк." з'єднані з відповідними групами силових магнітних відштовхувачів. Досягається розвантаження опори кочення суміщеної опори і енергозберігання.

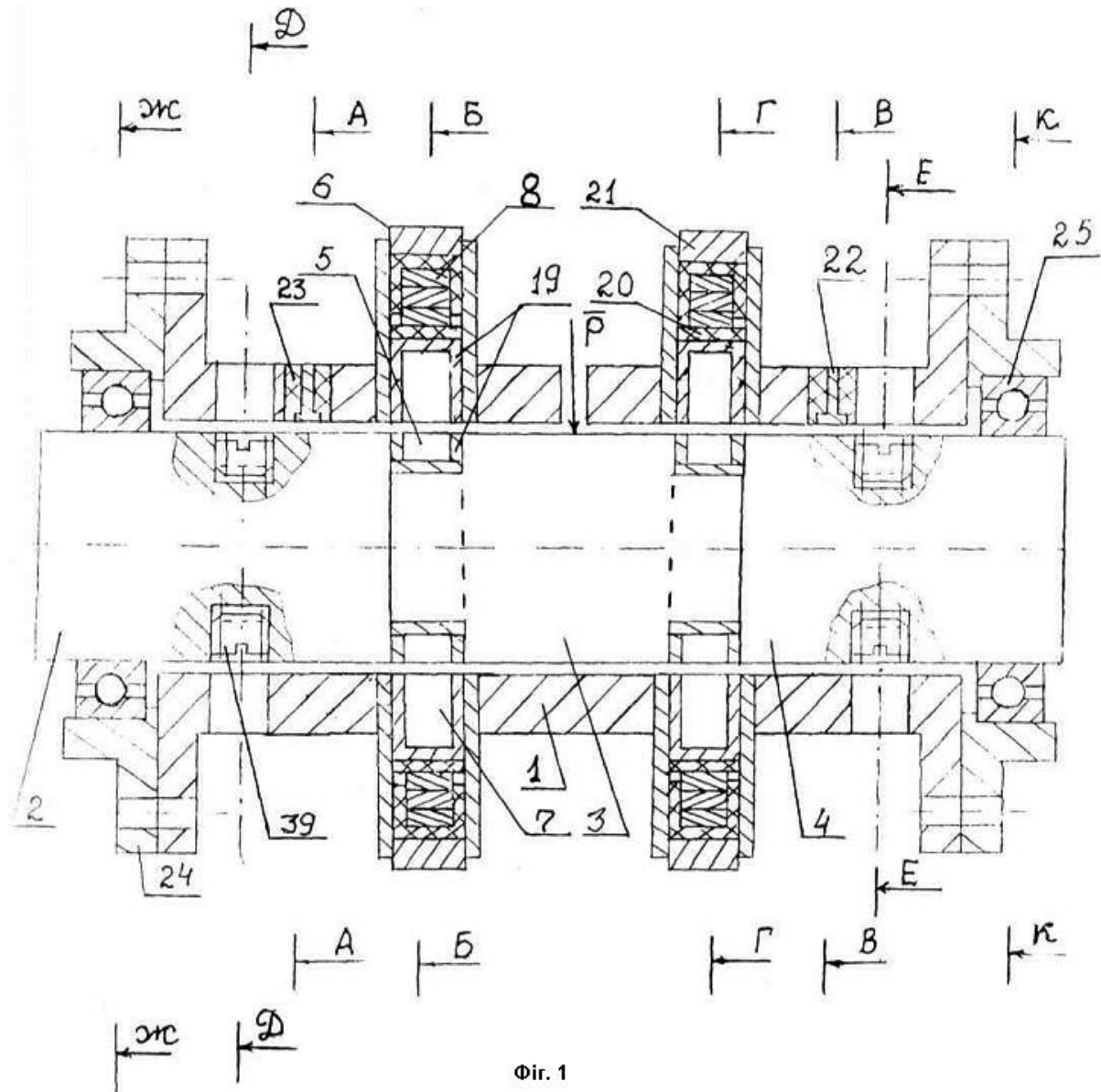


Fig. 1

Винахід належить до машинобудування і може використовуватись в авіаційних двигунах.

Відома суміщена шпindelьна опора [патент України № 15383 А від 05.07.1997 р.] Ця суміщена шпindelьна опора прийнята як прототип.

Суміщена шпindelьна опора прототипу включає опори кочення, між якими по осях двох систем координат в двох перерізах опори установлені датчики величин зазорів між основами цих датчиків і валом опори. Між датчиками величин зазорів також в двох перерізах суміщеної опори установлені однорядні аеростатичні опори з регульованою піднімальною силою, які складаються з регуляторів тиску в газовому шарі під цими однорядними аеростатичними опорами. Регулятори тиску в газовому шарі опори об'єднані в групи регуляторів тиску, які забезпечує управління положенням вала опори прототипу.

Датчики величин зазорів і однорядні аеростатичні опори з примусово регульованою піднімальною силою утворюють компенсатори радіальних навантажень на суміщену шпindelьну опору.

Між однорядними аеростатичними опорами виконана радіальна дворядна аеростатична шпindelьна опора, яка сприймає основне навантаження на суміщену шпindelьну опору.

В склад суміщеної шпindelьної опори входить також блок вибору незміщеного положення осі обертання вала опори, при якому опори кочення працюють без навантаження, блок управління положенням осі обертання вала опори, блок формування опорної напруги і блок управління положенням осі обертання вала суміщеної шпindelьної опори, які забезпечують роботу шпindelьної опори без навантаження опор кочення, диференціальні підсилювачі сигналів неузгодження, які виникають при відхиленні осі обертання вала опори з вибраного незміщеного положення, в системах координат, по осях яких установлені датчики величин зазорів, обчислювач, вимірювач кута повороту.

Суміщена шпindelьна опора прототипу працює без навантаження опор кочення за винятком аварійних ситуацій і забезпечує високу точність стабілізації радіального положення осі обертання вала опори, але має складний пристрій управління і енергоємна, так як потребує газ на піддув аеростатичних опор.

Задача, що вирішується, полягає в заміні радіальних однорядних аеростатичних опор з регульованою піднімальною силою і несучої дворядної радіальної аеростатичної опори двома несучими силовими магнітними підвісами, які дозволяють управляти радіальним положенням осі обертання вала суміщеної шпindelьної опори на постійних магнітах і розвантажити опори кочення суміщеної опори, крім того, суміщена шпindelьна опора на постійних магнітах не має потреби в газі на піддув аеростатичних опор, тобто є енергозберігаючою.

Це досягається тим, що в суміщеній шпindelьній опорі на постійних магнітах, яка включає силові магнітні підвіси, датчики величин зазорів, балансуєчі вантажі, опори кочення, блок вибору незміщеного положення і балансування вала суміщеної шпindelьної опори на постійних магнітах, згідно з винаходом, вал суміщеної шпindelьної опори на постійних магнітах виконують складовим з трьох співвісно встановлених валів одного діаметра, на середньому валу по його краях в перерізах по Б-Б і Г-Г суміщеної шпindelьної опори в екранах установлені магніти вала у вигляді коротких порожнистих циліндрів з полюсами на зовнішній і внутрішній бокових поверхнях, в цих же перерізах в корпусі суміщеної шпindelьної опори по осях систем координат $X^B O^B Y^B$ і $X^G O^G Y^G$ симетрично осей цих систем координат установлені групи силових магнітних відштовхувачів по три паралельно підключених силових магнітних відштовхувачів в кожній групі, кожен силовий магнітний відштовхувач включає установлений в екран магніт силового магнітного відштовхувача, який відкритим полюсом звернутий до однойменного полюса магніту вала, регульовальний гвинт, а між регульовальним гвинтом і магнітом силового магнітного відштовхувача в ізоляторі установлений п'єзоелектричний двигун, силові магнітні відштовхувачі, які установлені в перерізі по Б-Б суміщеної шпindelьної опори і магніт вала в цьому перерізі, а також силові магнітні відштовхувачі, які установлені в перерізі по Г-Г суміщеної шпindelьної опори і магніт вала в цьому перерізі утворюють два силових магнітних підвіси складового вала суміщеної шпindelьної опори на постійних магнітах, в перерізах по А-А і В-В суміщеної шпindelьної опори по півосях $+X^A$, $+Y^A$, $+X^B$, $+Y^B$ систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^B O^B Y^B$ установлені датчики величин зазорів між основами датчиків і крайніми валами складового вала суміщеної шпindelьної опори, крайні вали складового вала установлені в опори кочення, які установлені у фланцях, прикріплених до корпусу шпindelьної опори, між датчиками величин зазорів і опорами кочення в перерізах по Д-Д і Е-Е суміщеної шпindelьної опори в крайніх валах складового вала суміщеної шпindelьної опори установлені балансувальні вантажі, блок вибору незміщеного положення і балансування суміщеної шпindelьної опори на постійних магнітах включає датчики величин зазорів, вимірювачі величин зазорів, вимірювач кута повороту складового вала суміщеної шпindelьної опори, обчислювач, операційні підсилювачі,

перемикачі "більше-вимк.-менше", вимикачі "увімк.-вимк.", групи силових магнітних підштовхувачів, причому датчики величин зазорів електрично зв'язані і групами силових магнітних підштовхувачів, причому датчики величин зазорів з'єднані з входами вимірювачів величин зазорів, а їх виходи з'єднані з входами обчислювача, вихід вимірювача кута повороту вала з'єднаний з входом обчислювача, виходи обчислювача з'єднані з входами пар операційних підсилювачів, а їх виходи через перемикачі "пряме-вимк.-зворотне" з'єднані з входами першого, другого, третього і четвертого диференційних підсилювачів, вихід першого диференційного підсилювача через перемикач "увімк. - вимк." з'єднаний з групами 10 і 12 силових магнітних відштовхувачів, установлених по осі Y системи координат $X^B O^B Y^B$, вихід другого диференційного підсилювача через перемикач "увімк.-вимк." з'єднаний з групами 9 і 11 силових магнітних відштовхувачів, установлених по осі X системи координат $X^B O^B Y^B$, вихід третього диференційного підсилювача через перемикач "увімк. - вимк." з'єднаний з групами 14 і 16 силових магнітних відштовхувачів, установлених по осі Y системи координат $X^G O^G Y^G$, вихід четвертого диференційного підсилювача через перемикач "увімк.-вимк." з'єднаний з групами 13 і 15 силових магнітних відштовхувачів, установлених по осі X системи координат $X^G O^G Y^G$.

На Фіг. 1 показана суміщена шпindelьна опора на постійних магнітах. В корпусі 1 опори установлений складовий вал, який складається з трьох співвісно установлених валів 2, 3, 4 одного діаметра. По краях вала 3 в перерізах по Б-Б і Г-Г опори установлені магніти 5 вала. В цих же перерізах опори над магнітами 5 вала по осях систем координат $X^B O^B Y^B$ і $X^G O^G Y^G$ установлені силові магнітні відштовхувачі 6, кожен з яких включає магніт 7 відштовхувача, який для установлення величини зазору між магнітами силових магнітних відштовхувачів і магнітами 3 вала переміщуються п'єзоелектричними двигунами 8. В цих же перерізах по Б-Б і Г-Г по осях систем координат $X^B O^B Y^B$ і $X^G O^G Y^G$ опори рівномірно по окружності установлено по дванадцять силових магнітних відштовхувачів, які в кожному перерізі об'єднані в чотири групи силових магнітних відштовхувачів. Кожна група відштовхувачів розташована симетрично осей систем координат $X^B O^B Y^B$ і $X^G O^G Y^G$ (Фіг. 2), початки яких лежать на осі симетрії внутрішньої поверхні корпусу опори. Групи силових магнітних відштовхувачів і магніт 5 вала в перерізі по Б-Б утворюють силовий магнітний підвіс 17. Групи силових магнітних відштовхувачів і магніт 5 вала в перерізі по Г-Г утворюють силовий магнітний підвіс 18. Таким чином вал шпindelьної опори на постійних магнітах знаходиться у зваженому стані в пружному середовищі магнітного поля магнітних силових підвісів. Отже суміщена шпindelьна опора на постійних магнітах працює без навантаження опор кочення 25, в яких установлений вал 2, 3, 4, що забезпечує її довговічність і надійність. В пружному середовищі повністю збалансований вал не викликає вібрацій корпусу опори.

В перерізах опори по А-А і В-В над валами 2 і 4 в керамічних втулках 23 установлені датчики 22 величин зазорів (Фіг. 3).

Опори кочення 25 установлені у фланцях 24, які прикріплені до торців корпусу 1. В опорах кочення установлені вали 2 і 4 складового вала 2, 3, 4.

Складовий вал опори маси M_1 (Фіг. 4) замінимо плоским диском 38 (Фіг. 5) маси $M_2=M_1$ і установимо його в площині, яка перпендикулярна осі симетрії вала опори і проходить через центр важкості $C_1(x_{C_1}, y_{C_1})$ вала опори (Фіг. 5).

Нехай жорсткість суміщеної опори на постійних магнітах дорівнює c (Н/мкм). Ось симетрії вала опори прийнемо як геометричну вісь обертання диска 38. Тоді $AC=e$ - ексцентриситет диска 38, В початковий момент часу надамо диску кутову швидкість ω . При обертанні диска під дією динамічного навантаження диск зміщується в магнітному полі силових магнітних підвісів. Будемо вважати, що диск зміщується без перекосу. Тоді рух диска буде здійснюватись в горизонтальній площині. Запишемо диференціальні рівняння руху диска.

Систему координат OXYZ зв'яжемо з диском 38 наступним чином. Ось Z сумістимо з геометричною віссю обертання диска. Початок координат (точка O) розмістимо в точку перетину осі симетрії вала з плоскістю диска 38, осі X і Y розміщені в плоскості диска. Точка А - точка, в яку зміщується точка O під дією динамічного навантаження при наданні диску 38 кутовій швидкості ω . Позначимо: α - кут між віссю X і напрямком OA, ϕ - кут між віссю X і прямою, яка проходить через точку А на зміщеній осі симетрії вала під дією динамічного навантаження і центр ваги диска 38 (Фіг. 6).

На диск 38 діють дві зовнішні сили: $\bar{P} = M_2 g$ - сила тяжіння диска і сила А - яка дорівнює різниці сил відштовхування в напрямку OA між магнітами вала і силовими магнітними відштовхувачами, і яка виникає в результаті зміни величин зазорів під силовими магнітними відштовхувачами під дією динамічного навантаження, причому $\bar{F} = c\delta$ (Фіг. 6).

Диференційні рівняння руху диска 38 (Павловский М.А., Теоретическая механика, К.: Высшая школа, 1985 г.)

$$M_2 \ddot{y}_C = -\bar{F} \cos \alpha, \quad M_2 \ddot{y}_C = -\bar{F} \sin \alpha, \quad I_C \ddot{\varphi} = -\bar{F} |KC|, \quad (1)$$

причому: $\bar{F} = Cr$, $r \cos \alpha = x$, $r \sin \alpha = y$, $KC = AC \sin \psi = e \sin(\varphi - \alpha)$, (2)

5 де $\psi = \angle CAK$ (Фіг. 6).

Скориставшись формулами (2), запишемо систему рівнянь (1) у вигляді:

$$M_2 \ddot{x}_C = -cx, \quad M_2 \ddot{y}_C = -cy, \quad I_C \ddot{\varphi} = -cre \sin(\varphi - \alpha). \quad (3)$$

Як витікає з Фіг.6, має місце наступна залежність між координатами точок C і A:

$$x_C = x + e \cos \varphi, \quad y_C = y + e \sin \varphi.$$

10 Отже, $\ddot{x}_C = \ddot{x} - e\ddot{\varphi} \sin \varphi - e\dot{\varphi}^2 \cos \varphi$, $\ddot{y}_C = \ddot{y} + e\ddot{\varphi} \sin \varphi - e\dot{\varphi}^2 \sin \varphi$.

Підставив значення \ddot{x} і \ddot{y} в рівняння (3) знаходимо

$$M_2 \ddot{x} - M_2 e \ddot{\varphi} \sin \varphi - M_2 e \dot{\varphi}^2 \cos \varphi = -cx, \quad M_2 \ddot{y} - M_2 e \ddot{\varphi} \cos \varphi - M_2 e \dot{\varphi}^2 \sin \varphi = -cy, \\ I_C \ddot{\varphi} = -ce \ddot{\varphi} \sin(\varphi - \alpha).$$

Звідки

15 $\ddot{x} + \frac{c}{M_2} x = e \ddot{\varphi} \sin \varphi + e \dot{\varphi}^2 \cos \varphi$, $\ddot{y} + \frac{c}{M_2} y = e \ddot{\varphi} \cos \varphi + e \dot{\varphi}^2 \sin \varphi$,

$$\ddot{\varphi} = -\frac{ceq}{I_C} r \sin(\varphi - \alpha). \quad (4)$$

Система рівнянь (4) вирішується приблизно. В правій частині третього рівняння стоїть утвір $e \sin(\varphi - \alpha)$. Вважаємо, що цей утвір малий. Тепер третє рівняння системи (4) приймає вигляд $\ddot{\varphi} = 0$. Приймаючи до уваги початкові умови руху; при $t=0$, $\varphi=0$, $\dot{\varphi}=\omega$, знаходимо $\dot{\varphi} = \omega$ і

20 $\omega = \alpha t$, (5)

тобто обертання диска 38 здійснюється рівномірно.

Використовуючи формулу (5), запишемо два перших рівняння системи (4) у вигляді

$$\ddot{x} + k^2 x = h \cos \omega t, \quad \ddot{y} + k^2 y = h \sin \omega t, \quad (6)$$

де: $c/M_2 = k^2$; $ew^2 = h$.

25 Результат рішення системи (6):

$$x = \frac{e\omega^2}{k^2 - \omega^2} \cos \omega t, \quad y = \frac{e\omega^2}{k^2 - \omega^2} \sin \omega t, \quad (7)$$

тобто точка A здійснює гармонічні коливання з круговою частотою ω і амплітудою $\frac{e\omega^2}{k^2 - \omega^2}$.

Після піднесення кожної з формул (7) в квадрат і підсумовування знаходимо

$$x^2 + y^2 = \frac{e^2 \omega^4}{(k^2 - \omega^2)^2}.$$

30 Так як величина зміщення осі обертання вала $r^2 = x^2 + y^2$, знаходимо

$$r = \frac{e\omega^2}{k^2 - \omega^2}. \quad (8)$$

Обчислимо зміщення центра тяжкості C диска 38 від точки O. $OC = r + e$. Тоді

$$OC = \frac{ek^2}{k^2 - \omega^2}; \quad (9)$$

35 При малій кутовій швидкості обертання диска 38, тобто при $\omega \ll k$, на основі формул (8) і (9) отримуємо $|OC| \rightarrow 0$ (Фіг. 6). При великій кутовій швидкості обертання диска 38, тобто при $\omega \rightarrow k$, $|OC| \rightarrow 0$, що відповідає Фіг. 7.

У міру збільшення кутової швидкості ω диска відстань OC (див. 9) по модулю зменшується, тобто диск 38 в пружному (магнітному полі силових магнітних підвісів) самостійно центрується (при $\omega \rightarrow \infty$ $|OC| \rightarrow 0$), і його центр тяжкості необмежено наближається до геометричної осі обертання.

Перепишемо формулу (11) у вигляді $\frac{|OC|}{e} = \frac{k^2}{|k^2 - \omega^2|}$. Якщо кутова швидкість диска 38

значно більше його кругової частоти власних коливань, то $|OC|/e$ - мала величина. В випадку $\omega=k$ має місце явище резонансу і відстань ОС необмежено зростає. В дійсності ОС обмежено силами опору руху.

5 Резонансна кутова швидкість обертання диска 38, при якій його зміщення в магнітному полі досягає максимального значення, являється критичною кутовою швидкістю обертання, а відповідне число обертів диска за хвилину - критичним числом обертів. Так як при резонансі

$\omega_{кр}=k$, а $k = \sqrt{c/M_2}$, то $\omega_{кр} = \sqrt{c/M_2}$. Отже

$$n_{кр.38} = \frac{30}{\pi} \omega_{кр.38} = \frac{30}{\pi} \sqrt{c/M_2} \cdot (10)$$

10 Якщо в процесі балансування центри тяжкості дисків переміщуються на геометричну вісь обертання, то навіть на кутових швидкостях обертання вала $\omega_{об.}$ близьких до критичних, величина зміщення геометричної осі обертання $r \rightarrow 0$, а вібрації корпусу шпиндельної опори на постійних магнітах не виникають. Балансування вала опори виконується шляхом вимірювання і усунення зміщення геометричної осі обертання вала в двох перерізах опори. Якщо вал суміщеної шпиндельної опори на постійних магнітах збалансований з високою точністю,

15 геометрична вісь обертання вала зберігає своє радіальне положення, яке вибрано як незміщене, при визначеному радіальному навантаженні. Назвемо це радіальне навантаження радіальною стійкістю збалансованого вала. При незміщеному положенні геометричної осі обертання вала суміщеної опори вона працює без навантаження опор кочення. Тому, якщо

20 діапазон радіальних навантажень не виходить за межі радіальної стійкості збалансованого вала, вона працює без зміщення геометричної осі обертання вала, а, отже, без навантаження опор кочення.

Винахід пояснюється кресленнями.

Фіг. 1 - радіальна шпиндельна опора на постійних магнітах (осьовий переріз).

25 Фіг. 2 - силові магнітні підвіси в перерізах по Б-Б і Г-Г опори.

Фіг. 3 - датчики величин зазорів в перерізах по А-А і В-В опори.

Фіг. 4 - вал опори в силових магнітних підвісах.

Фіг. 5 - зміщення геометричної осі обертання в плоскості диска.

30 Фіг. 6 - положення незміщеної геометричної осі обертання вала, зміщене положення геометричної осі обертання вала і центру мас розбалансованого вала.

Фіг. 7 - ілюстрація процесу самоцентрування диска.

Фіг. 8 - функціональна схема пристрою вибору незміщеного положення і балансування складового вала суміщеної шпиндельної опори на постійних магнітах.

35 Фіг. 9 - величина і напрямок зміщення геометричної осі обертання вала опори в плоскості установки датчиків величин зазорів.

Фіг. 10 - установлення величин зазорів в опорах кочення.

Суміщена шпиндельна опора на постійних магнітах включає (Фіг. 1) корпус 1 опори, установлений складовий вал 2, 3, 4, що складається з співвісно з'єднаних вала 2, вала 3, вала 4 одного діаметра. По краях вала 3 в перерізах опори по Б-Б і Г-Г установлені магніти 5 вала, які

40 виготовлені в формі порожнистих циліндрів з полюсами на внутрішній і зовнішній бокових поверхнях. В цих же перерізах над магнітами 5 вала установлені силові магнітні відштовхувачі 6, кожен з яких включає магніт 7 силового магнітного відштовхувача і п'єзоелектричний двигун 8, який служить для переміщення магніту 7 силового магнітного відштовхувача для зміни величини зазору між магнітом 5 вала і магнітом 7, а, отже, для регулювання сили

45 відштовхування.

В корпусі 1 опори в перерізах по Б-Б і Г-Г установлені по дванадцять силових магнітних відштовхувачів 6, які в кожному перерізі об'єднані в чотири групи 9, 10, 11, 12 і 13, 14, 15, 16 (по три в кожній групі) паралельно з'єднаних силових магнітних відштовхувачів 6 (Фіг. 2). В загальному випадку в цих перерізах може бути установлено n силових магнітних

50 відштовхувачів, де n кратно чотирьом.

Групи 9, 10, 11, 12 силових магнітних відштовхувачів і магніт 5 вала в перерізі по Б-Б опори утворюють силовий магнітний підвіс 17, групи 13, 14, 15, 16 і магніт 5 вала в перерізі по Г-Г утворюють силовий магнітний підвіс 18 (Фіг. 2).

Групи 9, 10, 11, 12 і 13, 14, 15, 16 силових магнітних відштовхувачів установлюють симетрично осей систем координат $X^B O^B Y^B$ і $X^G O^G Y^G$. Таким чином вал опори знаходиться у зваженому стані в пружному середовищі магнітного поля магнітних силових підвісів.

Для концентрації магнітного поля в зазорах між магнітами 5 і 7 магніти 5 вала і магніти 7 силових магнітних відштовхувачів установлені в екрани 19. П'єзоелектричні двигуни 8 установлені в ізолятори 20. 21 - регульовальний гвинт для установлення початкового положення магнітів 7 силових магнітних відштовхувачів.

В перерізах по А-А і В-В опори по осях систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^B O^B Y^B$, початки яких лежать на осі симетрії внутрішньої поверхні корпусу 1 опори, установлені датчики 22 величин зазорів між основами датчиків і валами 2 і 4 вала 2, 3, 4 опори. Датчики 22 установлені в керамічних втулках 23 (Фіг. 1, 3).

В фланцях 24, які прикріплені до торців корпусу 1 установлені опори 25 кочення, в яких установлені вали 2 і 4 складового вала 2, 3, 4 суміщеної шпіндельної опори.

Блок 26 вибору незміщеного положення і балансування складового вала суміщеної шпіндельної опори на постійних магнітах включає вимірювачі 27 величин зазорів (Фіг. 8), які забезпечують вимірювання величин зазорів з погрешністю, яка не перевищує $10^{-3} + 10^{-2}$ величини зазору, що вимірюється (Гриневич Б.Ф. Компенсационно-мостовые измерительные устройства с емкостными датчиками, К.: Наукова Думка, 1987.)

Напруги з вимірювачів 27 величин зазорів, які відповідають величинам зазорів, що вимірюються, надходять в обчислювач 28. Обчислювач 28 забезпечує:

- вибір незміщеного положення осі обертання вала 2, 3, 4;
- розрахунок величини зміщення геометричної осі обертання вала опори під дією динамічного навантаження.

Як обчислювач 28 може використовуватись комп'ютер, оснащений пристроєм уводу-виводу інформації для зв'язку з зовнішніми функціональними елементами.

29 - вимірювач кута повороту вала опори, за який може використовуватись обертальний трансформатор.

Сигнали управління для установки геометричної осі обертання вала в незміщене положення з обчислювача 28 знаходять на пари операційних підсилювачів 30 і 31 (на прямий вхід операційного підсилювача 30 і інвертуючий вхід операційного підсилювача 31).

Перемикачі 32 "пряме-вимк.-зворотне" служать для забезпечення зміни напрямку переміщення вала 2, 3, 4 опори по відповідній осі систем координат $X^B O^B Y^B$ і $X^G O^G Y^G$.

33, 34, 35, 36 - диференційні підсилювачі сигналів управління, які надходять з пар 30 і 31 операційних підсилювачів сигналів управління.

Вимикачі 37 "увімк.-вимк." служать для відключення диференційних підсилювачів 33, 34, 35, 36 від груп 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 силових магнітних відштовхувачів при настроюванні пристрою.

На кресленнях також позначені: диск 38, маса якого дорівнює масі вала опори; 39 - балансируючі вантажі.

Причому датчики 22 величин зазорів з'єднані з входами вимірювачів 27 величин зазорів, а їх виходи з'єднані з входами обчислювача 28, вихід вимірювача 29 кута повороту вала з'єднаний з входом обчислювача 28, виходи обчислювача 28 з'єднані з входами пар операційних підсилювачів 30 і 31, а їх виходи через перемикачі 32 "пряме - вимк. - зворотне" з'єднані з входами першого, другого, третього і четвертого диференційних підсилювачів 33, 34, 35, 36, вихід першого диференційного підсилювача 3 через перемикач 37 "увімк.-вимк." з'єднаний з групами 10 і 12 силових магнітних відштовхувачів, установлених по осі Y^B системи координат $X^B O^B Y^B$, вихід другого диференційного підсилювача 34 через перемикач 37 "увімк.-вимк." з'єднаний з групами 9 і 11 силових магнітних відштовхувачів, установлених по осі X^B системи координат $X^B O^B Y^B$, вихід третього диференційного підсилювача 35 через перемикач 37 "увімк.-вимк." з'єднаний з групами 14 і 16 силових магнітних відштовхувачів, установлених по осі Y^G системи координат $X^G O^G Y^G$, вихід четвертого диференційного підсилювача 36 через перемикач 37 "увімк.-вимк." з'єднаний з групами 13 і 15 силових магнітних відштовхувачів, установлених по осі X^G системи координат $X^G O^G Y^G$.

Працює суміщена шпіндельна опора на постійних магнітах наступним чином. Перший етап - підготовка пристрою до роботи. Перемикачі 32 "пряме-вимк.-зворотне" установлюються в положення "вимк.". Вимикачі 37 "увімк.-вимк." установлюються в положення "увімк.". Виконується пуск підпрограми обчислювача 28 "Установка рівних колових зазорів в опорах кочення". Вал 2, 3, 4 опори установлюють на фіксований кут повороту. З обчислювача 28 подають сигнал управління $U_{\text{упр.2}}$, який через пару операційних підсилювачів 30 і 31, перемикач 32 "пряме - вимк. - зворотне" в положенні "пряме", диференційний підсилювач 34 надходить на групи 9 і 11

силових магнітних відштовхувачів, установлених по осі X^B системи координат $X^B O^B Y^B$. Вал зміщують в напрямку півосі $+X^B$ (Фіг. 10). Величина зазору під датчиком 22 величини зазору C_2 , установленого по півосі $+X^A$, зменшується. Сигнал управління $U_{впр.1}$ збільшують до величини, при якій величина зазору Z_2 під датчиком 22 C_2 не зменшується, тобто зазор в опорі кочення 25 в перерізі по Ж-Ж опори в напрямку півосі $+X^A$ повністю вибраний. Запам'ятовується величина зазору Z_{2min} . Перемикач 32 установлюють в положення "зворотне" і змінюють полярність сигналу управління на диференційний підсилювач 34, Вал 2, 3, 4 опори буде зміщуватись в напрямку півосі $-X^A$. Збільшують сигнал управління $U_{впр.1}$ до величини, при якій величина зазору під датчиком 22 C_2 не зростає, тобто зазор в опорі 25 кочення в напрямку півосі $-X^A$ буде вибраний. Величина зазору Z_{2max} запам'ятовується. Розраховується величина зазору під датчиком 22 C_2 , при якій коловий зазор в опорі кочення 25 по осі X^A системи координат $X^A O^A Y^A$ на фіксованому куту повороту однаковий

$$Z_{C_2} = (Z_{2max} - Z_{2min}) / 2.$$

Вимикач 37 установлюють в положення "вимк." і відключають операційний підсилювач 34 від груп 9 і 11 силових магнітних відштовхувачів. Регульовальними гвинтами 21 силових магнітних відштовхувачів груп 9 і 11 відштовхувачів, змінюючи величини зазорів між магнітом вала 5 вала і магнітами 7 силових магнітних відштовхувачів, під датчиком 22 C_2 установлюють величину зазору Z_{C_2} .

3 обчислювача 28 подають сигнал управління $U_{впр.1}$, який через пару операційних підсилювачів 30 і 31, перемикач 32 "пряме-вимк.-зворотне" в положенні "пряме", диференційний підсилювач 33 надходить на групи 10 і 12 силових магнітних відштовхувачів, установлених по осі X^B системи координат $X^B O^B Y^B$. Вал зміщують в напрямку півосі $+Y^B$. Величина зазору під датчиком 22 величини зазору C_1 , установленого по півосі $+Y^B$, зменшується. Сигнал управління U_1 збільшують до величини, при якій величина зазору Z_1 під датчиком 22 C_1 не зменшується, тобто зазор в опорі кочення 25 в перерізі по Ж-Ж опори в напрямку півосі $+Y^A$ повністю вибраний. Запам'ятовується величина зазору Z_{1min} . Перемикач 32 установлюють в положення "зворотне" і змінюють полярність сигналу управління на диференційний підсилювач 33. Вал 2, 3, 4 опори буде зміщуватись в напрямку півосі $-Y^B$. Збільшують сигнал управління $U_{впр.1}$ і до величини, при якій величина зазору під датчиком 22 C_1 не зростає, тобто зазор в опорі 25 кочення в напрямку півосі $-Y^B$ буде вибраний. Величина зазору Z_{1max} запам'ятовується. Розраховується величина зазору під датчиком 22 C_1 , при якій коловий зазор в опорі кочення 25 по осі Y^B системи координат $X^B O^B Y^B$ на фіксованому куту повороту однаковий

$$Z_{C_1} = (Z_{1max} - Z_{1min}) / 2.$$

Вимикач 37 установлюють в положення "вимк." і відключають операційний підсилювач 33 від груп 10 і 12 силових магнітних відштовхувачів. Регульовальними гвинтами 21 силових магнітних відштовхувачів груп 10 і 12 відштовхувачів, змінюючи величини зазорів між магнітом вала 5 вала і магнітами 7 силових магнітних відштовхувачів, під датчиком 22 C_1 установлюють величину зазору Z_{C_1} .

3 обчислювача 28 подають сигнал управління $U_{впр.3}$, який через пару операційних підсилювачів 30 і 31, перемикач 32 "пряме-вимк.-зворотне" в положенні "пряме", диференційний підсилювач 36 надходить на групи 13 і 15 силових магнітних відштовхувачів, установлених по осі X^G системи координат $X^G O^G Y^G$. Вал зміщують в напрямку півосі $+X^G$. Величина зазору під датчиком 22 величини зазору C_4 , установленого по півосі $+X^G$, зменшується. Сигнал управління $U_{впр.3}$ збільшують до величини, при якій величина зазору Z_4 під датчиком 22 C_4 не зменшується, тобто зазор в опорі кочення 25 в перерізі по К-К опори в напрямку півосі $+X^G$ повністю вибраний. Запам'ятовується величина зазору Z_{4min} . Перемикач 32 установлюють в положення "зворотне" і змінюють полярність сигналу управління на диференційний підсилювач 36. Вал 2, 3, 4 опори буде зміщуватись в напрямку півосі $-X^G$. Збільшують сигнал управління $U_{впр.3}$ до величини, при якій величина зазору під датчиком 22 C_4 не зростає, тобто зазор в опорі 25 кочення в напрямку півосі $-X^G$ буде вибраний. Величина зазору Z_{4max} запам'ятовується. Розраховується величина зазору під датчиком 22 C_4 , при якій коловий зазор в опорі кочення 25 по осі X^G системи координат $X^G O^G Y^G$ на фіксованому куті повороту однаковий

$$Z_{C_4} = (Z_{4max} - Z_{4min}) / 2.$$

Вимикач 37 установлюють в положення "вимк." і відключають операційний підсилювач 36 від груп 14 і 16 силових магнітних відштовхувачів. Регульовальними гвинтами 21 силових магнітних відштовхувачів груп 13 і 15 відштовхувачів, змінюючи величини зазорів між магнітом вала 5, вала і магнітами 7 силових магнітних відштовхувачів, під датчиком 22 C_4 установлюють величину зазору Z_{C_4} .

3 обчислювача 28 подають сигнал управління $U_{\text{упр.4}}$, який через пару операційних підсилювачів 30 і 31, перемикач 32 "пряме-вимк.-зворотне" в положенні "пряме", диференційний підсилювач 35 надходить на групи 14 і 16 силових магнітних відштовхувачів, установлених по осі Y^F системи координат $X^F O^F Y^F$. Вал зміщують в напрямку півосі $+Y^F$. Величина зазору під датчиком 22 величини зазору C_3 , установленого по півосі $+Y^F$, зменшується. Сигнал управління $U_{\text{упр.4}}$ збільшують до величини, при якій величина зазору Z_3 під датчиком 22 C_3 не зменшується, тобто зазор в опорі кочення 25 в перерізі по К-К опори в напрямку півосі $+Y^F$ повністю вибраний. Запам'ятовується величина зазору $Z_{3\text{min}}$. Перемикач 32 установлюють в положення "зворотне" і змінюють полярність сигналу управління на диференційний підсилювач 35. Вал 2, 3, 4 опори буде зміщуватись в напрямку півосі $-Y^F$. Збільшують сигнал управління $U_{\text{упр.4}}$ до величини, при якій величина зазору під датчиком 22 C_3 не зростає, тобто зазор в опорі 25 кочення в напрямку півосі $-Y^F$ буде вибраний. Величина зазору $Z_{3\text{max}}$ запам'ятовується. Розраховується величина зазору під датчиком 22 C_3 , при якій коловий зазор опори кочення 25 по осі Y^B системи координат $X^B O^B Y^B$ на фіксованому куту повороту однаковий

$$Z_{C_3} = (Z_{3\text{max}} - Z_{3\text{min}}) / 2$$

Вимикач 37 установлюють в положення "вимк." і відключають операційний підсилювач 35 від груп 9 і 11 силових магнітних відштовхувачів. Регульовальними гвинтами 21 силових магнітних відштовхувачів груп 14 і 16 відштовхувачів, змінюючи величини зазорів між магнітом вала 5 вала і магнітами 7 силових магнітних відштовхувачів, під датчиком 22 C_3 установлюють величину зазору Z_{C_3} . У відповідності з алгоритмом роботи підпрограми величини зазорів під датчиками 22 C_1 , C_2 , C_3 , C_4 відображаються на екрані дисплея.

Розраховується жорсткість шпindelної опори на постійних магнітах. Нехай після установки рівних величин зазорів під датчиками 22 величин зазорів величини зазорів під магнітами 7 відштовхувачів 6 груп силових магнітних відштовхувачів 9×6 , установлених по осях систем координат $X^B O^B Y^B$ і $X^F O^F Y^F$ складають, наприклад, 100 мкм. В обчислювач 28 уводять магнітну індукцію $B_{\text{від}}$ магнітів 7 силових магнітних відштовхувачів, магнітну індукцію магнітів 5 вала $B_{\text{вала}}$, площу полюсів S_M магнітів відштовхувачів 7 і магнітів 5 вала, магнітну постійну μ_0 , довжини l_m , величини зазорів l_3 , при яких будуть розраховуватись сили відштовхування. Вал опори навантажують в напрямку півосей $-Y^A$ і $-Y_1^B$ систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^B O^B Y^B$ і під датчиками 22 C_1 і C_3 установлюють, наприклад, величини зазорів 110 мкм. Розраховуються сили відштовхування між силовим магнітним відштовхувачем 6 і магнітом 5 вала для зазорів 90 мкм і 110 мкм по формулі

$$R = \frac{B_{\text{від}}^2 S_M}{\mu_0 [1 + 2l_3 / \theta_0 l_{m,\text{від}}]^2} + \frac{B_{\text{вала}}^2 S_M}{\mu_0 [1 + 2l_3 / \theta_0 l_{m,\text{вала}}]^2}, (11)$$

де θ_0 - магнітна жорсткість.

Розраховують сили відштовхування між групами 10 і 12, 14 і 16 силових магнітних відштовхувачів і магнітами вала по формулі

$$R_{\text{від.групи}} = R + 2R \sin \pi / 3. (12)$$

Розраховують різниці сил відштовхування між групами 10 і 12, 14 і 16 силових магнітних відштовхувачів в напрямку півосей $+Y^B$ і $+Y^F$

$$VR_1 = R_{90}^{+Y^B} - R_{110}^{-Y^B}, VR_2 = R_{90}^{+Y^F} - R_{110}^{-Y^F}. (13)$$

Обчислюється жорсткість радіальної шпindelної опори на постійних магнітах

$$c = (VR_1 + VR_2) / 10. (14)$$

Виконується пуск підпрограми обчислювача 28 "Розрахунок критичних швидкостей обертання". У відповідності з алгоритмом роботи підпрограми розраховуються критичні кутові швидкості планшайби $\omega_{\text{кр.пл.}}$ і вала $\omega_{\text{кр.вала}}$.

Вал шпindelної опори установлюється на кут повороту $\varphi=0$. Виконується пуск підпрограми обчислювача "Вимірювання і оцінювання величин зазорів 1". У відповідності з алгоритмом роботи підпрограми обчислювач 28 N раз опитує вимірювачі 27 величин зазорів по сигналах датчиків 22 C_1, C_2 і C_3, C_4 . Обчислюються асимптотично незміщені оцінки $\hat{Z}_1^{\varphi=0}$, $\hat{Z}_2^{\varphi=0}$, $\hat{Z}_3^{\varphi=0}$,

$\hat{Z}_4^{\varphi=0}$ величин цих зазорів. Складовому валу 2, 3, 4 опори задається кутова швидкість обертання ω_1 , яка задовольняє умовам: $\omega_1 \ll \omega_{\text{кр.пл.}}$; $\omega_1 \ll \omega_{\text{кр.вала}}$. Виконується пуск підпрограми обчислювача "Вимірювання і оцінювання величин зазорів 2". У відповідності з алгоритмом роботи підпрограми обчислювач на N обертах вала на куту повороту $\varphi=0$ опитує вимірювачі 27

величин зазорів по сигналах датчиків 22 C_1 , C_2 і C_3 , C_4 . обчислюються асимптотично незміщені оцінки $\hat{z}_{1\omega_1}^{\varphi=0}$, $\hat{z}_{2\omega_1}^{\varphi=0}$, $\hat{z}_{3\omega_1}^{\varphi=0}$, $\hat{z}_{4\omega_1}^{\varphi=0}$ величин цих зазорів:

$$\hat{z}_{1\omega_1}^{\varphi=0} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N z_{1\omega_1}^{\varphi=0}(n), \quad \hat{z}_{2\omega_1}^{\varphi=0} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N z_{2\omega_1}^{\varphi=0}(n), \quad \hat{z}_{3\omega_1}^{\varphi=0} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N z_{3\omega_1}^{\varphi=0}(n), \quad \hat{z}_{4\omega_1}^{\varphi=0} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N z_{4\omega_1}^{\varphi=0}(n) \quad (15)$$

Виконується пуск підпрограми обчислювача 28 "Розрахунок величини зміщення геометричної осі обертання вала опори і кута нахилу векторів динамічного навантаження до осей X^A і X^B систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^B O^B Y^B$ ". У відповідності з алгоритмом роботи підпрограми на куту $\varphi=0$ повороту вала обчислюються величини відхилень $VX_{\omega_1}^A$, $VY_{\omega_1}^A$, $VX_{\omega_1}^B$, $VY_{\omega_1}^B$ величин зазорів під датчиками 22 C_1 , C_2 і C_3 , C_4 на кутовій швидкості обертання ω_1 відносно величин зазорів під цими датчиками при незміщеному положенні геометричної осі обертання вала на тому ж куту $\varphi=0$ повороту вала. Розраховуються величини зміщення r і r_1 геометричної осі обертання вала в площинах установки датчиків 22 величин зазорів і кут нахилу динамічного навантаження до осей X^A і X^B систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^B O^B Y^B$ (Фіг. 9):

$$VX^A(\omega_1) = \hat{z}_{2\omega_1}^{\varphi=0} - \hat{z}_{1\omega_1}^{\varphi=0}; \quad VY^A(\omega_1) = \hat{z}_{1\omega_1}^{\varphi=0} - \hat{z}_{2\omega_1}^{\varphi=0}; \quad VX^B(\omega_1) = \hat{z}_{4\omega_1}^{\varphi=0} - \hat{z}_{3\omega_1}^{\varphi=0}; \\ VY^B(\omega_1) = \hat{z}_{3\omega_1}^{\varphi=0} - \hat{z}_{4\omega_1}^{\varphi=0};$$

$$r = \sqrt{(VX^A(\omega_1))^2 + (VY^A(\omega_1))^2}; \quad r_1 = \sqrt{(VX^B(\omega_1))^2 + (VY^B(\omega_1))^2} \quad (16)$$

$$\alpha = \arcsin \frac{VY^A}{VX^A}; \quad \alpha_1 = \arcsin \frac{VY^B}{VX^B}.$$

Методом послідовних наближень виконується балансування вала опори, наприклад, балансувальними тягарцями. Послідовно виконується пуск підпрограми "Балансування". У відповідності з алгоритмом роботи підпрограми на кожному кроці балансування на кутовій швидкості ω_1 обчислювач 28 N раз опитує вимірювачі 27 величин зазорів. Обчислюються оцінки $\hat{z}_{1\omega_1}^{\varphi=0}$, $\hat{z}_{2\omega_1}^{\varphi=0}$, $\hat{z}_{3\omega_1}^{\varphi=0}$, $\hat{z}_{4\omega_1}^{\varphi=0}$. Обчислюється різниці по нормі між оцінками величин зазорів, які відповідають незміщеному положенню геометричної осі обертання вала і оцінками цих величин зазорів чергового кроку балансування на ω_1 кутовій швидкості ω_1 :

$$\|\cdot\| = \sqrt{(\hat{z}_{1\omega_1}^{\varphi=0} - \hat{z}_{1\omega_1}^{\varphi=0})^2 + (\hat{z}_{2\omega_1}^{\varphi=0} - \hat{z}_{2\omega_1}^{\varphi=0})^2}; \quad \|\cdot\| = \sqrt{(\hat{z}_{3\omega_1}^{\varphi=0} - \hat{z}_{3\omega_1}^{\varphi=0})^2 + (\hat{z}_{4\omega_1}^{\varphi=0} - \hat{z}_{4\omega_1}^{\varphi=0})^2} \quad (17)$$

Добиваються мінімуму норм (17). В результаті на кутовій швидкості ω_1 геометрична вісь обертання вала займе близьке до незміщеного положення або незміщене положення при рівності нулю норм (17). Якщо норми (17) не рівні нулю на швидкості обертання ω_1 вала, підвищують швидкість обертання вала з кроком $V\omega$. На черговому дискретному значенні кутової швидкості виконується пуск підпрограми "Балансування", Досягають рівності нулю норм (17). Вал шпindelльної опори буде збалансований з високою точністю, центр інерції складового вала 2, 3, 4 буде лежати на геометричній осі обертання вала опори. Обертання вала опори без зміщення буде здійснюватись навколо геометричної осі обертання.

Визначають радіальну стійкість відцентрованого вала. Виконують пуск підпрограми "Визначення радіальної стійкості відцентрованого вала". При нерухомому валу 2, 3, 4 опори на фіксованому куту повороту послідовно навантажують вал силою \bar{P}_1 , \bar{P}_2 , \bar{P}_3 , ... (Фіг. 1) в напрямку півосей $-Y^A$ і $-Y^B$ систем координат $X^A O^A Y^A$ і $X^B O^B Y^B$ і під датчиками 22 C_1 і C_3 послідовно установлюють величини зазорів 105 мкм, 110 мкм, 115 мкм, 120 мкм, 125 мкм (при початковій величині зазорів під цими датчиками і круговому зазорі в опорах кочення 50 мкм). Відповідно зазори між магнітами 5 вала і магнітами 7 силових магнітних відштовхувачів 12 і 16 будуть дорівнювати 95 мкм, 90 мкм, 85 мкм, 80 мкм, 75 мкм. На кожний з названих дискрет зміщення вала 2,3,4 опори подають сигнали управління $U_{впр.2}$ і $U_{впр.4}$ на групи 10, 12 і 14, 16 силових магнітних відштовхувачів і під датчиками 22 C_1 і C_3 установлюють початкові величини зазорів 100 мкм. Сигнали управління $U_{впр.2}(1)$, $U_{впр.2}(2)$, $U_{впр.2}(3)$, $U_{впр.2}(4)$, $U_{впр.2}(5)$ на групи 10 і 12 відштовхувачів, які викликають додаткову силу відштовхування для установки під датчиком 22 C_1 (Фіг. 8) початкових величин зазорів (100 мкм) складають таблицю 1.

Таблиця 1

$\bar{P}_1(H)$	$\bar{P}_1/2$	$\bar{P}_2/2$	$\bar{P}_3/2$	$\bar{P}_4/2$	$\bar{P}_5/2$
$U_{\text{упр.2}}(B)$	$U_{\text{упр.2}}(1)$	$U_{\text{упр.2}}(2)$	$U_{\text{упр.2}}(3)$	$U_{\text{упр.2}}(4)$	$U_{\text{упр.2}}(5)$

Будують функціональну залежність $\bar{P}_{\text{відш.}}^{-Y^A} = f(U_{\text{упр.2}})$ сили відштовхування в напрямку півосі $+Y^A$ системи координат $X^A O^A Y^A$ від сигналу управління $U_{\text{упр.2}}$. Для цього зміст таблиці 1 апроксимують ортогональним поліномом Чебишева:

$$\bar{P}_{\text{відш.}}^{-Y^A} = a_1 U_{\text{упр.2}}(1) + a_2 U_{\text{упр.2}}^2 + a_3 U_{\text{упр.2}}^3 + a_4 U_{\text{упр.2}}^4 + a_5 U_{\text{упр.2}}^5, \quad (18)$$

- Збалансованому валу 2, 3, 4 суміщеної шпindelьної опори задають робочу кутову швидкість обертання $\bar{\omega}_{\text{роб.}}$. На кутах повороту вала ϕ_0 на групи 10, 12 і 14, 16 силових магнітних відштовхувачів подають сигнали управління $U_{\text{упр.2}}$, $U_{\text{упр.4}}$, $U_{\text{упр.2}}+VU$, $U_{\text{упр.4}}+2VU$; $U_{\text{упр.2}}+2VU$, $U_{\text{упр.4}}+2VU$; ... які збільшуються з дискретою VU . На екрані дисплея спостерігають величину зазору під датчиком 22 C_1 після подачі кожної дискрети сигналів управління. Нехай зміщення збалансованого вала на "к" мкм вважається допустимим зміщенням вала суміщеної опори під дією радіального навантаження. В момент часу, коли величина зазору під датчиком 22 C_1 досягне величини $Z_{\text{поч.}}+k$, де $Z_{\text{поч.}}$ початкова величина зазору під датчиком 22 C_1 , при величині сигналу управління $U_{\text{упр.2}}$, який відповідає зміщенню вала опори на "к" мкм, розраховується сила відштовхування, під дією якої збалансований вал опори був виведений з незміщеного положення, по ортогональному поліному Чебишева. Тоді запас суміщеної шпindelьної опори по самоцентруванню дорівнює

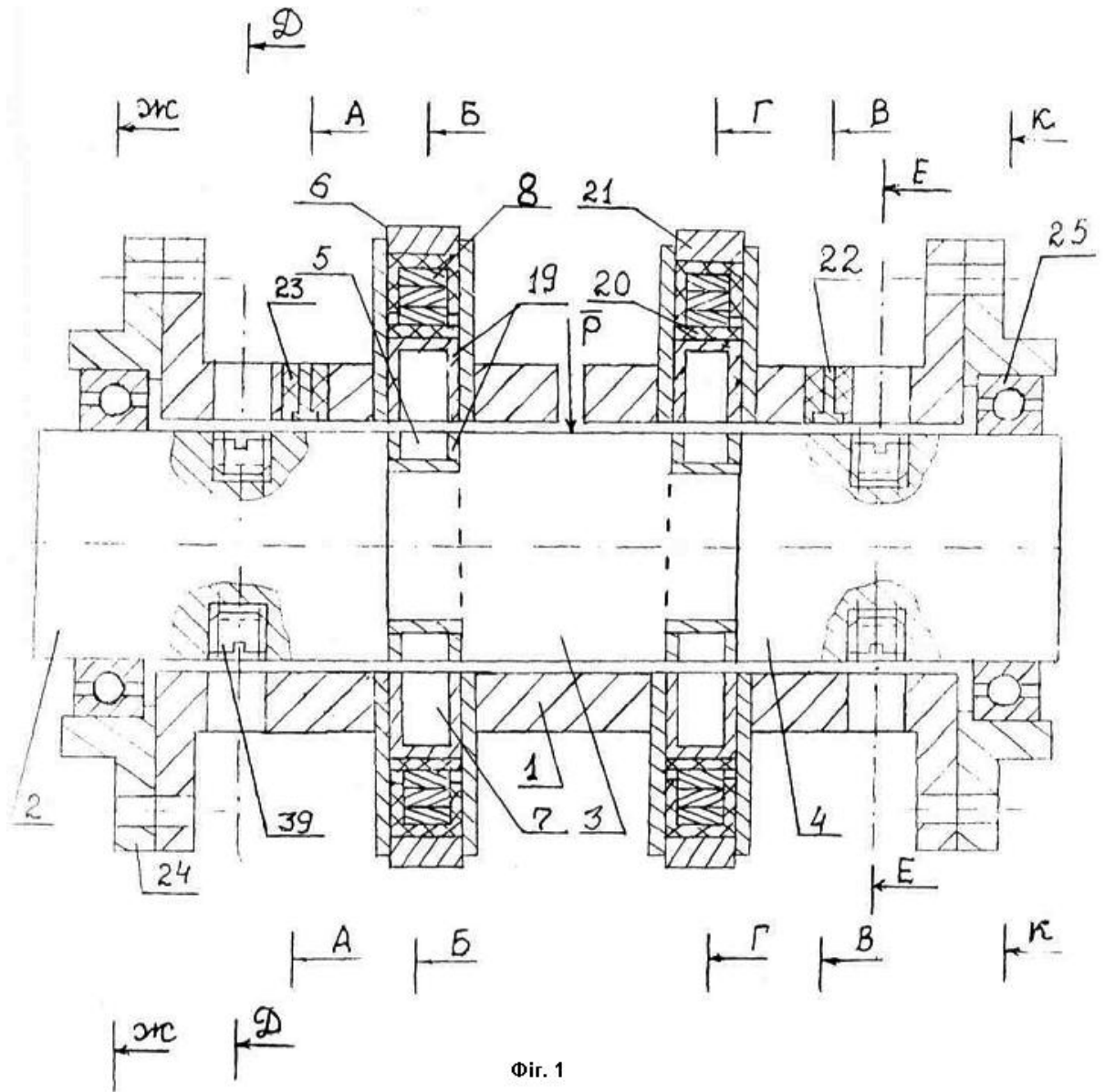
$$\bar{P}_{\text{відш.}}^{-Y^A}(k) = a_1 U_{\text{упр.2}}(k) + a_2 U_{\text{упр.2}}^2(k) + a_3 U_{\text{упр.2}}^3(k) + a_4 U_{\text{упр.2}}^4(k) + a_5 U_{\text{упр.2}}^5(k). \quad (19)$$

- Це значить, що якщо навантаження на вал суміщеної шпindelьної опори на постійних магнітах не перевищує $2 \bar{P}_{\text{відш.}}^{-Y^A}$, зміщення осі обертання вала опори за рахунок радіальної стійкості збалансованого вала не перевищить "к" мкм.

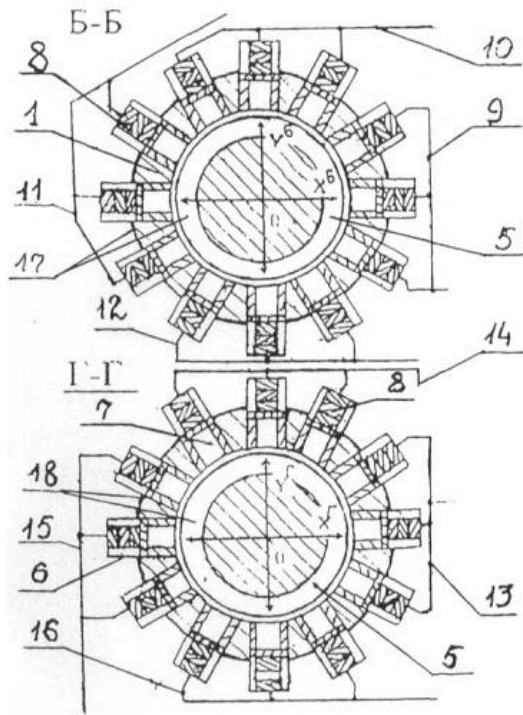
ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

- Суміщена шпindelьна опора на постійних магнітах, яка включає силові магнітні підвіси, датчики величин зазорів, балансувачі вантажі, опори кочення, блок вибору незміщеного положення і балансування вала суміщеної шпindelьної опори на постійних магнітах, яка **відрізняється** тим, що вал суміщеної шпindelьної опори на постійних магнітах виконаний складовим з трьох співвісно установлених валів одного діаметра, на середньому валу по його краях в екранах установлені магніти вала у вигляді коротких порожнистих циліндрів з полюсами на зовнішній і внутрішній бокових поверхнях, над магнітами вала в корпусі суміщеної шпindelьної опори установлені групи силових магнітних відштовхувачів по три паралельно підключених силових магнітних відштовхувачів в кожній групі, кожен силовий магнітний відштовхувач включає установлений в екран магніт силового магнітного відштовхувача, який відкритим полюсом звернутий до однойменного полюса магніту вала, регульовальний гвинт, а між регульовальним гвинтом і магнітом силового магнітного відштовхувача в ізоляторі установлений п'єзоелектричний двигун, силові магнітні відштовхувачі, групи силових магнітних відштовхувачів суміщеної шпindelьної опори на постійних магнітах, по зовнішніх сторонах силових магнітних підвісів установлені датчики величин зазорів між основами датчиків і крайніми валами складового вала суміщеної шпindelьної опори, крайні вали складового вала установлені в опори кочення, які установлені у фланцях, прикріплених до корпусу шпindelьної опори, між датчиками величин зазорів і опорами кочення суміщеної шпindelьної опори в крайніх валах складового вала суміщеної шпindelьної опори установлені балансувальні вантажі, блок вибору незміщеного положення і балансування суміщеної шпindelьної опори на постійних магнітах включає датчики величин зазорів, вимірювачі величин зазорів, вимірювач кута повороту складового вала суміщеної шпindelьної опори, обчислювач, операційні підсилювачі, перемикачі "більше-вимк.-менше", вимикачі "увімк.-вимк.", групи силових магнітних відштовхувачів, причому датчики величин зазорів електрично зв'язані з групами силових магнітних відштовхувачів, причому датчики величин зазорів з'єднані з входами вимірювачів величин зазорів, а їх виходи з'єднані з входами обчислювача, вихід вимірювача кута повороту вала з'єднаний з входом обчислювача, виходи обчислювача з'єднані з входами пар операційних

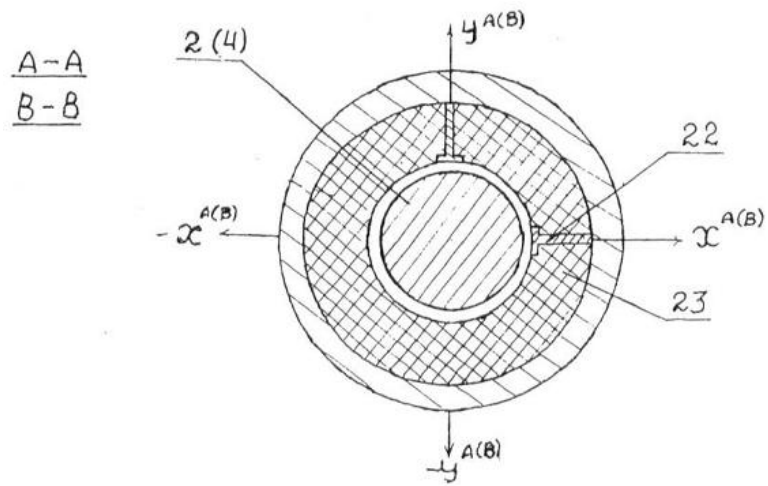
підсилювачів, а їх виходи через перемикачі "пряме-вимк.-зворотне" з'єднані з входами першого, другого, третього і четвертого диференційних підсилювачів, виходи яких через перемикачі "увімк.-вимк." з'єднані з відповідними групами силових магнітних відштовхувачів.



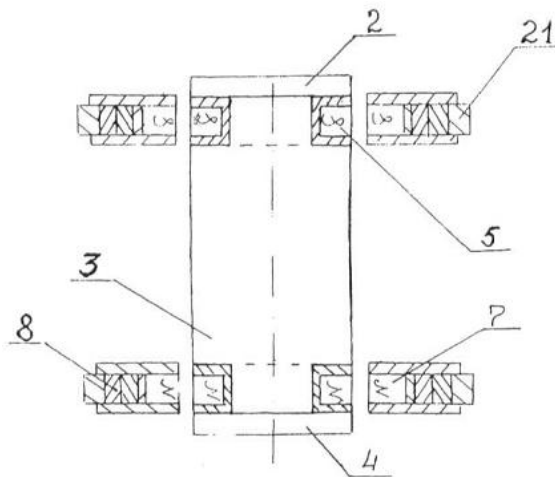
Фиг. 1



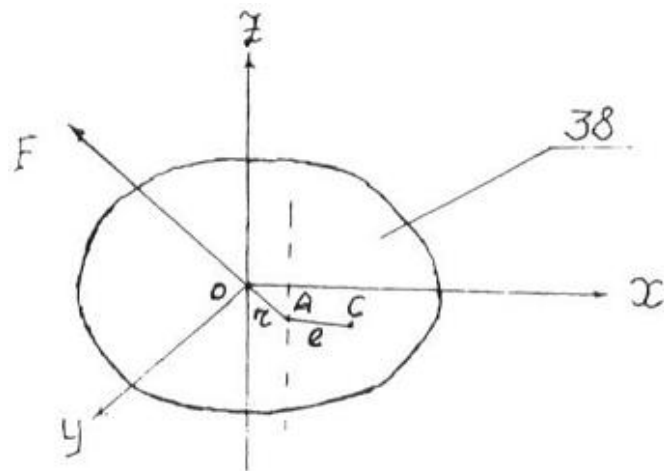
Фиг. 2



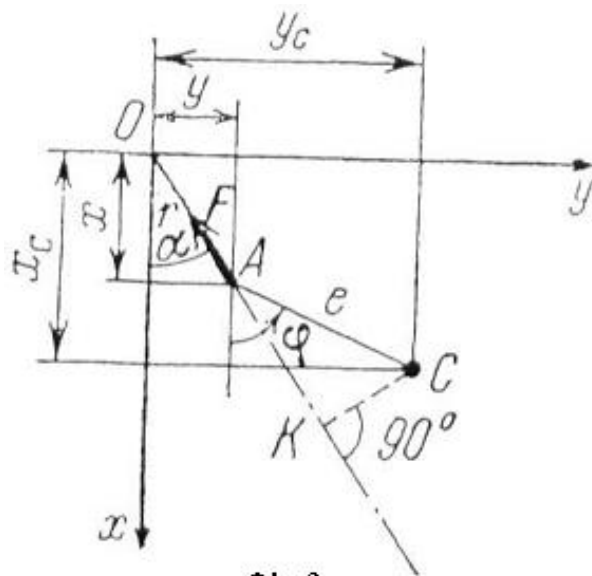
Фиг. 3



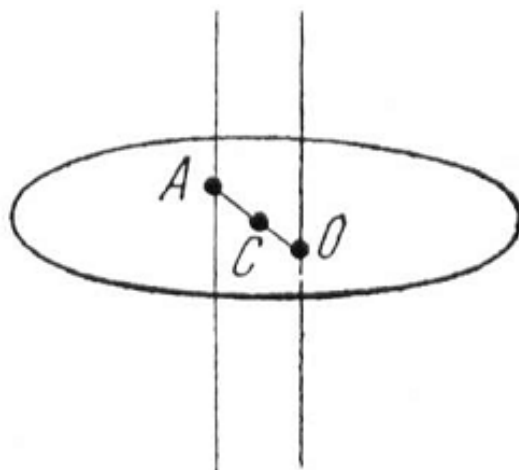
Фиг. 4



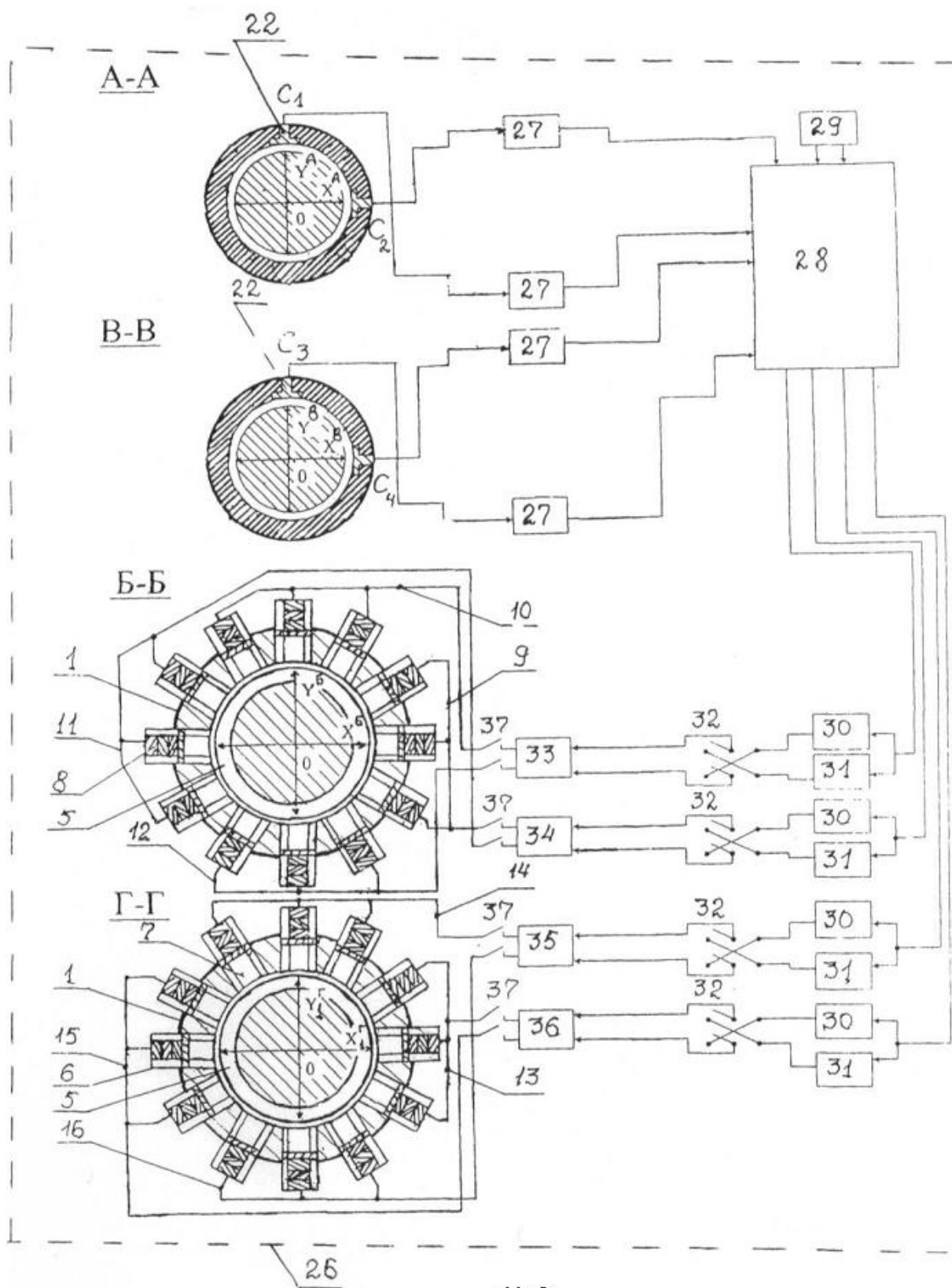
Фиг. 5



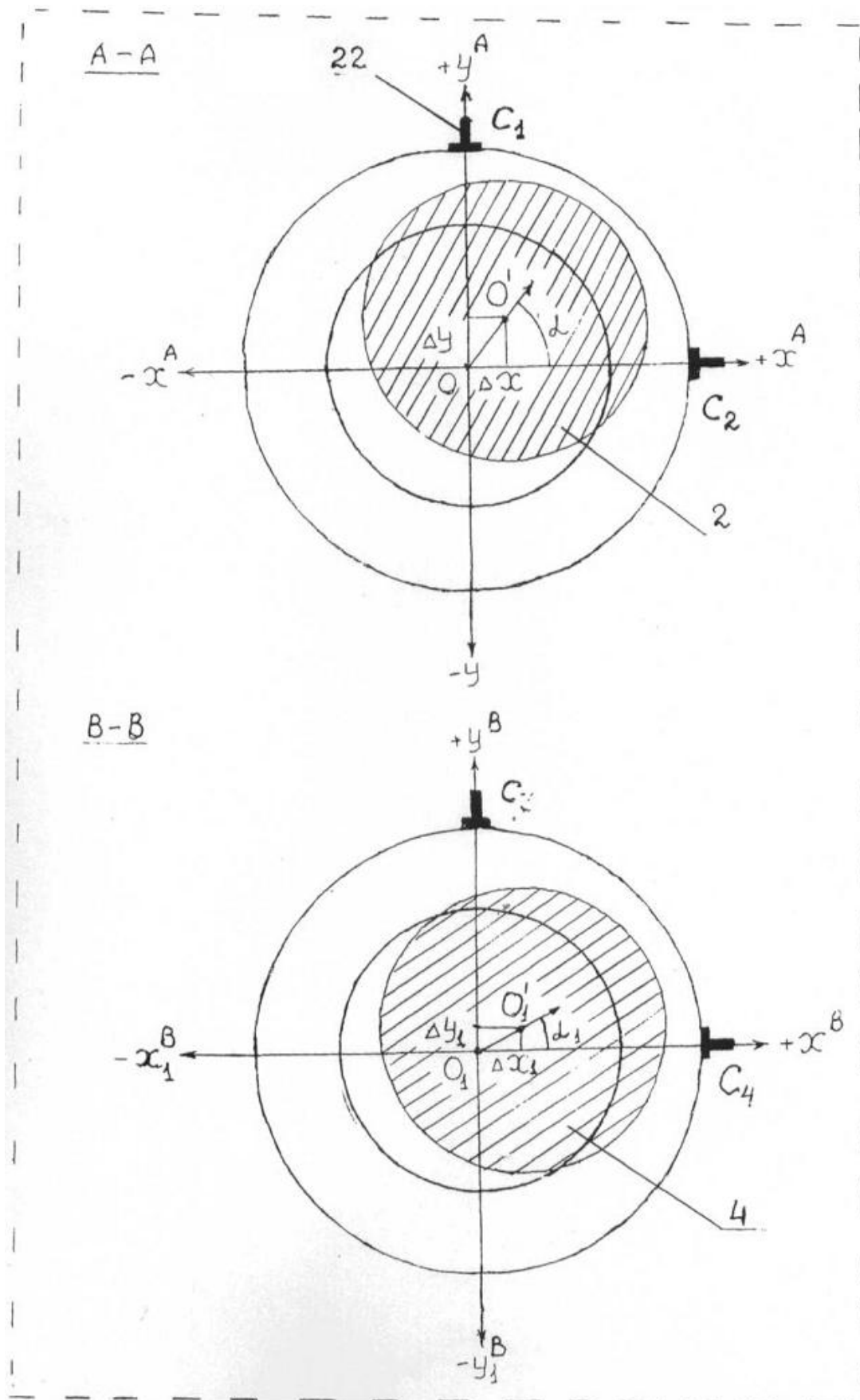
Фиг. 6



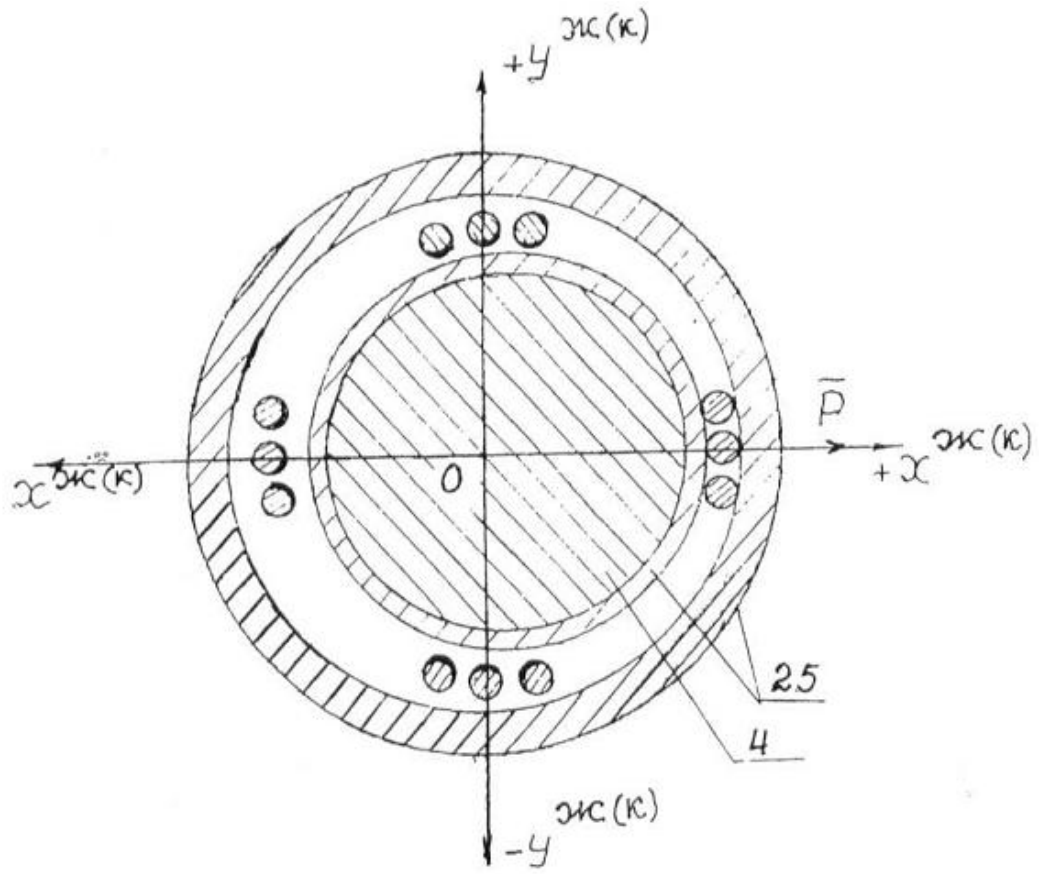
Фиг. 7



Фиг. 8



Фиг. 9



Фиг. 10

Комп'ютерна верстка Г. Паяльніков

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601