



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2012114312/28, 11.04.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
11.04.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 11.04.2012

(45) Опубликовано: 27.11.2013 Бюл. № 33

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. Ключников А.В., Сидоров А.В. Применение метода низкочастотной динамической балансировки для прецизионного контроля параметров массо-инерционной асимметрии роторных объектов. - М.: Научтехлитиздат, 2011, №3, с.48-53. RU 2225603 C2, 10.03.2004. RU 2292534 C2, 27.01.2007. SU 1388735 A1, (см. прод.)

Адрес для переписки:

456770, Челябинская обл., г. Снежинск, ул. Васильева, 13, а/я 245, ФГУП "РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина", отдел интеллектуальной собственности, Г.В. Бакалову

(72) Автор(ы):

Ключников Александр Васильевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное унитарное предприятие "РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР - ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ ИМЕНИ АКАДЕМИКА Е.И. ЗАБАБАХИНА" (RU)

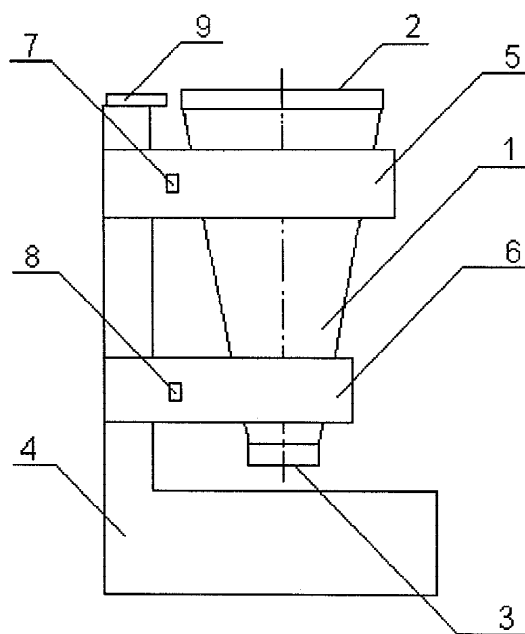
(54) СПОСОБ БАЛАНСИРОВКИ РОТОРА В ОДНОЙ ПЛОСКОСТИ КОРРЕКЦИИ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области балансировочной техники, в частности к динамической балансировке роторов. Способ заключается в следующем. В опоры балансировочного стенда устанавливают ротор, имеющий расположенные на торцах две плоскости коррекции, одна из которых - балансировочная, а другая - пробная, обладающий известными предельно допустимыми параметрами асимметрии - значениями поперечного смещения центра масс и угла отклонения продольной главной центральной оси инерции относительно его геометрической оси. Приводят ротор во вращение, при вращении сначала определяют амплитуды и фазы вибраций обеих опор,

вызванных начальными дисбалансами ротора. Затем, поочередно прикрепляя к каждой из плоскостей коррекции пробные грузы, снова определяют амплитуды и фазы вибраций обеих опор. После этого по полученным результатам рассчитывают коэффициенты балансировочной чувствительности стенда и коэффициенты взаимовлияния плоскостей коррекции. Затем определяют значения и углы начальных дисбалансов в каждой плоскости коррекции, по которым находят начальные значения параметров массо-инерционной асимметрии. При превышении хотя бы одним из них заданного предельно допустимого значения создают балансировочный дисбаланс в балансировочной плоскости коррекции, для создания которого сначала моделируют

появление дисбаланса в балансирующей плоскости коррекции, обеспечивающего исключение начального дисбаланса в этой плоскости коррекции, а затем с учетом коэффициента взаимовлияния плоскостей коррекции моделируют появление дисбаланса в балансирующей плоскости коррекции, обеспечивающего приведение параметров массо-инерционной асимметрии к значениям, не превышающим соответствующих заданных предельно допустимых значений. Технический результат заключается в возможности оптимизации параметров массо-инерционной асимметрии, повышении точности определения остаточных параметров дисбаланса и снижении трудоемкости процесса балансировки. 2 з.п. ф-лы, 5 ил.



Фиг. 1

(56) (продолжение):

15.04.1988. ЕР 1355139 А1, 22.10.2003. Левит М.Е., Рыженков В.М. Балансировка деталей и узлов. - М.: Машиностроение, 1986, с.76-77.

RU 2499985 C1

RU 2499985 C1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**(21)(22) Application: **2012114312/28, 11.04.2012**(24) Effective date for property rights:
11.04.2012

Priority:

(22) Date of filing: **11.04.2012**(45) Date of publication: **27.11.2013 Bull. 33**

Mail address:

**456770, Cheljabinskaja obl., g. Snezhinsk, ul.
Vasil'eva, 13, a/ja 245, FGUP "RFJaTs-VNIITF
im. akadem. E.I. Zababakhina", otdel
intellektual'noj sobstvennosti, G.V. Bakalovu**

(72) Inventor(s):

Kljuchnikov Aleksandr Vasil'evich (RU)

(73) Proprietor(s):

**Federal'noe gosudarstvennoe unitarnoe
predpriatie "ROSSIJSKIJ FEDERAL'NYJ
JaDERNYJ TsENTR - VSEROSSIJSKIJ
NAUChNO-ISSLEDOVATEL'SKIJ INSTITUT
TEKhNICHESKOJ FIZIKI IMENI AKADEMIKA
E.I. ZABABAKhINA" (RU)**

(54) **ROTOR BALANCING METHOD IN ONE CORRECTION PLANE**

(57) Abstract:

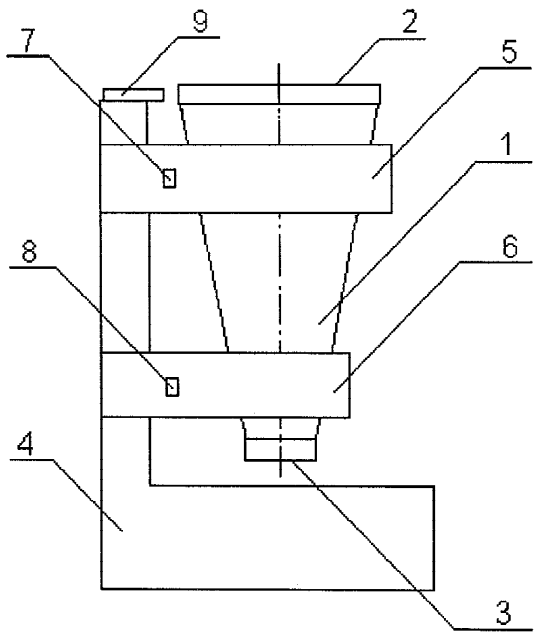
FIELD: machine building.

SUBSTANCE: rotor is installed in supports of balancing stand. There are two correction planes on rotor butt-ends, one of the planes is balancing and the other is testing. The rotor has specified maximum allowable asymmetry parameters - values of transverse displacement of masses centre and displacement angle of longitudinal principal axis of inertia at centre of gravity relative to its geometric axis. Rotor rotation is started, during rotation at first amplitudes and phases of vibration of both supports, induced by initial imbalances of rotor, are determined. Then, attaching test weights to each correction planes in sequence, amplitudes and phases of vibration of both supports are determined again. Then by the obtained results coefficients of balancing sensibility of the stand and coefficients of impact of correction planes are calculated. Then determined are values and angles of initial

imbalances in each correction plane, used for determination of initial values of parameters of mass-inertial asymmetry. If at least one of these values exceeds specified admissible limit value, balancing imbalance is created in balancing correction plane. For its creation at first modelled is imbalance in balancing correction plane providing exclusion of initial imbalance in this correction plane, and then, considering coefficients of impact of correction planes, modelled is imbalance in balancing correction plane providing values of parameters of mass-inertial asymmetry not exceeding corresponding specified admissible limit values.

EFFECT: possibility of optimisation of parameters of mass-inertial asymmetry, improving accuracy of residual parameters of imbalance determination and reduction of labour intensity of balancing process.

3 cl, 5 dwg



Фиг. 1

RU 2499985 C1

RU 2499985 C1

Изобретение относится к области динамической балансировки роторов, а именно к контролю параметров массо-инерционной асимметрии роторов и обеспечению соответствия этих параметров предельно допустимым значениям, путем изменения дисбаланса в одной плоскости коррекции.

При компоновке скоростного транспортного средства, выполненного в виде осесимметричного ротора (цилиндра, конуса, усеченного конуса), часто возникает необходимость не только точно знать массу, положение центра масс и моменты инерции ротора, но и обеспечить после его изготовления и сборки заданные в эксплуатационной документации значения параметров массо-инерционной асимметрии, к которым относятся величина поперечного смещения центра масс и угол отклонения продольной главной центральной оси инерции (ГЦОИ) относительно геометрической оси ротора. При этом стремятся в первую очередь минимизировать поперечное смещение центра масс, поскольку его величина существенно влияет на устойчивость движения транспортного средства вокруг центра масс.

Невысокая точность теоретического расчета, неизбежный технологический разброс в определенных пределах характеристик элементов конструкции, компонуемых внутри ротора (масс, моментов инерции, координат установки элементов и грузов, что обусловлено влиянием случайных отклонений указанных характеристик от их расчетных значений), приводит к появлению асимметрии в распределении масс ротора, характеризующейся перекосом продольной ГЦОИ и поперечным смещением центра масс относительно геометрической оси ротора. Это требует применения экспериментальных или расчетно-экспериментальных методов определения указанных параметров массо-инерционной асимметрии с целью их последующего приведения с высокой точностью к заданным нормативам путем корректировки массы ротора. Такая задача возникает при компоновке сухопутных, морских, воздушных, космических транспортных средств, силовая установка которых представляет собой сложный ротор, имеющий в своем составе рамы, отсеки, датчиковую аппаратуру, исполнительные механизмы. Решением задачи определения и приведения с высокой точностью к заданным нормативам параметров массо-инерционной асимметрии является использование динамических балансировочных стендов, обладающих высокой инструментальной точностью, что обеспечивает значительное повышение точности определения указанных параметров по сравнению как с теоретическим расчетом, так и с известными из технической литературы экспериментальными методами с использованием устройств, реализующих, например, методы статической балансировки, физического маятника или крутильных колебаний.

Как правило, в процессе балансировки ротора в одной плоскости коррекции невозможно полностью устранить главный вектор и главный момент дисбалансов, совместив продольную ГЦОИ ротора с его геометрической осью, поэтому задачей балансировщиков является достижение минимальных и не превышающих заданных предельно допустимых значений поперечного смещения центра масс и угла отклонения продольной ГЦОИ от геометрической оси ротора.

Если в ходе балансировочного эксперимента выявляется, что задача приведения одновременно двух указанных параметров массо-инерционной асимметрии контролируемого ротора к значениям, не превышающим заданных предельно допустимых значений нагружением массой в одной плоскости коррекции, невыполнима, ротор бракуют и направляют на перекомпоновку.

Известен способ одноплоскостной балансировки ротора [Основы балансировочной техники. Т.1 // Под ред. проф. В.А.Щепетильникова. - М.: Машиностроение, 1975.

С.184-186], заключающийся в том, что в опоры балансирующего стенда устанавливают ротор, имеющий плоскость коррекции, приводят ротор во вращение, сначала измеряют амплитуды и фазы вибраций опоры, вызванные начальными дисбалансами ротора, затем измеряют амплитуды и фазы вибраций опоры после
5 прикрепления к плоскости коррекции пробного груза, по результатам этих измерений рассчитывают массу и угол установки в плоскости коррекции балансирующего груза.

В процессе балансировки амплитуды и фазы вибраций измеряют для ближайшей к плоскости коррекции опоры. По полученным результатам определяют относительное
10 изменение амплитуды вибрации при вращении ротора с пробным грузом и угол сдвига фазы вибрации, а по этим двум величинам находят коэффициент отношения балансирующего груза к пробному, а также угол, на который следует переместить балансирующий груз от места установки пробного груза. Через коэффициент
15 отношения и массу пробного груза находят массу балансирующего груза, а по значениям углового положения пробного груза и угла сдвига фазы находят угол установки балансирующего груза.

Одновременное измерение амплитуд и фаз вибраций опоры позволяет значительно сократить время балансировки одной плоскости коррекции ротора, исключая
20 аналитическим путем или с использованием векторных построений погрешности измерений указанных параметров.

При уравнивании одной плоскости коррекции ротора способ позволяет выполнить либо статическую балансировку с устранением или уменьшением поперечного смещения центра масс с геометрической оси ротора, либо моментную
25 балансировку с устранением или уменьшением угла отклонения продольной ГЦОИ ротора, однако он не обеспечивает одновременное приведение параметров массо-инерционной асимметрии ротора к значениям, не превышающим предельно допустимых значений.

Известен способ одноплоскостной балансировки роторов, дисбалансы которых сосредоточены в одной плоскости [Левит М.Е., Рыженков В.М. Балансировка деталей и узлов. - М.: Машиностроение, 1986. С.71-76]. Способ заключается в том, что в опоры балансирующего стенда устанавливают ротор, имеющий плоскость коррекции,
30 приводят ротор во вращение, сначала измеряют амплитуды и фазы вибраций опоры, вызванные начальными дисбалансами ротора, затем измеряют амплитуды и фазы
35 вибраций опоры после прикрепления к плоскости коррекции пробного груза, по результатам этих измерений рассчитывают массу и угол установки в плоскости коррекции балансирующего груза.

По значениям амплитуды и фазы вибрации одной из опор находят начальное значение и угловое положение вектора дисбаланса в плоскости коррекции,
40 рассчитывают массу и угол установки балансирующего груза, прикрепление которого к плоскости коррекции обеспечивает устранение действия начального дисбаланса в этой плоскости и, тем самым - устранение смещения центра масс ротора.

Недостатком известного способа является то, что при его использовании не решается задача определения главного момента дисбалансов и, следовательно, угла
45 отклонения продольной ГЦОИ от геометрической оси ротора, в связи с чем отсутствует возможность обеспечения заданного значения данного параметра массо-инерционной асимметрии ротора. Способ применим только к роторам, имеющим
50 форму плоского диска, плоскость коррекции которого находится на незначительном расстоянии от центра масс.

Известен способ балансировки ротора в двух плоскостях [Левит М.Е., Рыженков

В.М. Балансировка деталей и узлов. - М.: Машиностроение, 1986. С.76-77]. Способ заключается в том, что в опоры балансирующего стенда устанавливают ротор, имеющий расположенные на торцах две плоскости коррекции и обладающий известными массой, расстояниями от центра масс до плоскостей коррекции, значениями моментов инерции, приводят ротор во вращение, сначала измеряют амплитуды и фазы вибраций обеих опор, вызванных начальными дисбалансами ротора, затем, поочередно прикрепляя к каждой из плоскостей коррекции пробные грузы, снова измеряют амплитуды и фазы вибраций обеих опор, затем определяют значения и углы векторов начальных дисбалансов в каждой плоскости коррекции.

По значениям и угловым положениям векторов начальных дисбалансов рассчитывают массы и угловые положения балансирующих грузов для каждой плоскости коррекции, установка которых в соответствующей плоскости коррекции обеспечит устранение начального дисбаланса.

В результате устранения действия начальных дисбалансов в обеих плоскостях коррекции известный способ обеспечивает совмещение геометрической оси и продольной ГЦОИ ротора, полностью устраняя поперечное смещение центра масс и угол отклонения продольной ГЦОИ относительно геометрической оси ротора.

Однако он требует не только временной установки пробных грузов, но и постоянной установки балансирующих грузов в двух плоскостях коррекции, что не всегда возможно.

Известен способ балансировки ротора в одной плоскости коррекции [Журнал: «Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика», авторы: Ключников А.В., Сидоров А.В., статья: «Применение метода низкочастотной динамической балансировки для прецизионного контроля параметров массо-инерционной асимметрии роторных объектов». - М.: Научтехлитиздат, 2011, №3. С.48-53]. Данный способ принят за прототип как наиболее близкий по технической сущности к заявляемому способу и имеет наибольшее количество общих существенных признаков с заявляемым способом.

Известный способ заключается в том, что в опоры балансирующего стенда устанавливают ротор, с заданными предельно допустимыми значениями поперечного смещения центра масс и угла отклонения продольной ГЦОИ относительно его геометрической оси, имеющий расположенные на торцах две плоскости коррекции, одна из которых - балансирующая, а другая - пробная, и обладающий известными массой, расстояниями от центра масс до плоскостей коррекции, значениями моментов инерции, приводят ротор во вращение, при вращении сначала измеряют амплитуды и фазы вибраций обеих опор, вызванных начальными дисбалансами ротора, затем, поочередно прикрепляя к каждой из плоскостей коррекции пробные грузы, снова измеряют амплитуды и фазы вибраций обеих опор, после чего по полученным результатам рассчитывают коэффициенты балансирующей чувствительности стенда и коэффициенты взаимовлияния плоскостей коррекции, затем определяют значения и углы векторов начальных дисбалансов в каждой плоскости коррекции, находят начальные значения поперечного смещения центра масс относительно геометрической оси ротора и угла отклонения продольной ГЦОИ относительно геометрической оси ротора (параметров массо-инерционной асимметрии), при превышении хотя бы одним из них, заданного предельно допустимого значения, создают балансирующий дисбаланс в балансирующей плоскости коррекции, предварительно произведя расчет его значения и углового положения, после чего определяют остаточные значения параметров массо-инерционной асимметрии, а затем судят о балансировке ротора

путем сопоставления остаточных и предельно допустимых значений параметров массо-инерционной асимметрии.

После расчета значения и углового положения балансирующего дисбаланса, по известным законам статики производят расчет массы и угла установки балансирующего груза (грузов), обеспечивающего создание балансирующего дисбаланса. Затем устанавливают балансирующий груз в балансирующей плоскости коррекции ротора и повторно контролируют значения параметров остаточной массо-инерционной асимметрии. Повторный контроль параметров заключается в том, что ротор приводят во вращение, измеряют амплитуды и фазы вибраций обеих опор и с использованием ранее определенных коэффициентов балансирующей чувствительности стенда и коэффициентов взаимовлияния плоскостей коррекции рассчитывают значения остаточных дисбалансов, действующих в обеих плоскостях коррекции, по которым определяют значения остаточных параметров массо-инерционной асимметрии.

Способ позволяет обеспечить достижение предельно допустимых значений параметров асимметрии путем установки балансирующего груза (грузов) в одной плоскости коррекции ротора. Способ применим в случае использования дополнительной технологической оснастки для балансировки ротора.

Недостатком известного способа является то, что он не обеспечивает одновременное приведение значений обоих параметров массо-инерционной асимметрии ротора к значениям, не превышающим его предельно допустимых значений, что приводит к увеличению длительности и трудоемкости балансирующего эксперимента, за счет необходимости повторения операций по расчету и установке балансирующих грузов, с последующим контролем остаточных параметров массо-инерционной асимметрии. Необходимость многократного расчета и установки балансирующих грузов и экспериментального контроля параметров остаточной массо-инерционной асимметрии делает способ неудобным для использования в серийном производстве роторов.

Задачей предлагаемого изобретения является приведение значений обоих параметров массо-инерционной асимметрии роторов к значениям, не превышающим заданных предельно допустимых значений, и уменьшение длительности и трудоемкости процесса балансировки.

Техническим результатом изобретения является возможность оптимизации параметров массо-инерционной асимметрии в пределах их допустимых значений, менее трудоемкий контроль остаточных значений массо-инерционной асимметрии за счет сокращения количества балансирующих операций и точность прогнозирования остаточных значений параметров массо-инерционной асимметрии.

Технический результат достигается тем, что в способе балансировки ротора в одной плоскости коррекции в опоры балансирующего стенда устанавливают ротор, с заданными предельно допустимыми значениями параметров массо-инерционной асимметрии - поперечного смещения центра масс и угла отклонения продольной ГЦОИ относительно его геометрической оси, имеющих расположенные на торцах две плоскости коррекции, одна из которых - балансирующая, а другая - пробная, и обладающий известными массой, расстояниями от центра масс до плоскостей коррекции, значениями моментов инерции, приводят ротор во вращение, при вращении сначала измеряют амплитуды и фазы вибраций обеих опор, вызванных начальными дисбалансами ротора, затем, поочередно прикрепляя к каждой из плоскостей коррекции пробные грузы, снова измеряют амплитуды и фазы вибраций

5
10
15
20
обеих опор, после чего по полученным результатам рассчитывают коэффициенты балансирующей чувствительности стенда и коэффициенты взаимовлияния плоскостей коррекции, определяют значения и углы векторов начальных дисбалансов в каждой плоскости коррекции, находят начальные значения параметров массо-инерционной асимметрии - поперечного смещения центра масс и угла отклонения продольной ГЦОИ относительно геометрической оси ротора, при превышении хотя бы одним из них, заданного предельно допустимого значения, создают балансирующий дисбаланс в балансирующей плоскости коррекции, предварительно произведя расчет его значения и углового положения, после чего определяют остаточные значения параметров массо-инерционной асимметрии, а затем судят о балансировке ротора путем сопоставления остаточных и заданных предельно допустимых значений параметров массо-инерционной асимметрии, согласно изобретению, при создании балансирующего дисбаланса сначала моделируют появление дисбаланса в балансирующей плоскости коррекции, обеспечивающего исключение начального дисбаланса в этой плоскости коррекции, затем с учетом коэффициента взаимовлияния плоскостей коррекции моделируют появление дисбаланса в балансирующей плоскости коррекции, обеспечивающего приведение значений поперечного смещения центра масс и угла отклонения продольной ГЦОИ относительно геометрической оси ротора к значениям, не превышающим соответствующих заданных предельно допустимых значений.

25
30
Также согласно изобретению, с целью минимизации погрешностей определения амплитуд и фаз вибраций опор при использовании жестко соединяемой с ротором технологической оснастки, пробные грузы прикрепляют дважды к каждой из плоскостей коррекции в двух взаимно противоположных угловых положениях, с последующим усреднением результатов измерений, причем одна из плоскостей коррекции принадлежит технологической оснастке.

35
40
Кроме того, с целью минимизации погрешностей определения коэффициентов балансирующей чувствительности стенда и коэффициентов взаимовлияния плоскостей коррекции при использовании жестко соединяемой с ротором технологической оснастки, измерение вибраций опор при вращении ротора в исходном состоянии выполняют дважды, при этом второе измерение выполняют после отсоединения технологической оснастки, разворота ротора на 180 градусов вокруг своей оси и его повторного жесткого соединения с технологической оснасткой.

45
50
Моделирование балансирующих дисбалансов с использованием коэффициентов взаимовлияния плоскостей коррекции позволяет подтвердить возможность достижения значений параметров массо-инерционной асимметрии, не превышающих предельно допустимых, при балансировке ротора в одной плоскости коррекции и более точно определить массу и угол установки балансирующего груза, без осуществления дополнительных балансирующих операций.

При использовании технологической оснастки прикрепление пробных грузов дважды к каждой из плоскостей коррекции в двух взаимно противоположных угловых положениях, с последующим усреднением результатов измерений, позволяет уменьшить погрешности измерений, вызванные возможным смещением центра плоскости коррекции относительно оси вращения.

55
Также при использовании технологической оснастки измерения вибраций опор при вращении ротора в исходном состоянии выполняют дважды, при этом второе измерение выполняют после отсоединения технологической оснастки, разворота ротора на 180 градусов вокруг своей оси и его повторного жесткого соединения с

технологической оснасткой, что позволяет уменьшить погрешности, вызванные возможным перекосом геометрической оси ротора относительно оси вращения технологической оснастки.

Способ может быть реализован как на горизонтальном, так и на вертикальном балансировочном стенде.

Наличие в заявляемом изобретении признаков, отличающих его от прототипа, позволяет считать его соответствующим условию «новизна».

Новые признаки, которые содержит отличительная часть формулы изобретения, не выявлены в изобретениях аналогичного назначения, на этом основании можно сделать вывод о соответствии заявляемого изобретения условию «изобретательский уровень».

На фиг.1 показан ротор, установленный в опоры вертикального балансировочного стенда.

На фиг.2 показана векторная диаграмма для балансировочной плоскости, в которой действует дисбаланс \vec{B} , характеризуемый значением B и углом α в связанной с ротором системе координат.

На фиг.3 показана векторная диаграмма для пробной плоскости коррекции, в которых действует дисбаланс \vec{H} , характеризуемый значением H и углом β в связанной с ротором системе координат.

На фиг.4 показана расчетная схема ротора с действующими в двух - балансировочной (B) и пробной (H) - плоскостях коррекции дисбалансами. Также показаны параметры массо-инерционной асимметрии ротора, наличие которой обуславливает появление дисбалансов в балансировочной и пробной плоскостях коррекции вращающегося в опорах несбалансированного ротора.

На фиг.5 показаны векторные диаграммы дисбалансов, действующих в плоскостях коррекции в процессе и после приведения значений параметров массо-инерционной асимметрии ротора к значениям, не превышающим заданных предельно допустимых значений.

Способ реализуется следующим образом. Ротор 1 (фиг.1), имеющий две плоскости коррекции, одна из которых является балансировочной 2, то есть предназначена как для временной установки пробных, так и для постоянной установки балансировочных грузов, а другая - пробной 3, то есть используется только для временной установки пробных грузов, устанавливаются и приводят во вращение в опорах 5 и 6 стенда 4, имеющего датчики 7 и 8, измеряющие вибрации соответственно опор 5 и 6, и датчик 9 фиксирующий фазы вибраций опор 5 и 6. На постоянной рабочей частоте вращения ротора 1 измеряют амплитуды (A) и фазы (φ) вибраций опор 5 и 6 с помощью датчиков 7, 8 и 9.

При отсутствии у ротора 1 пробной плоскости коррекции 3 эта плоскость может быть образована за счет использования различных вариантов технологической оснастки (на чертеже не показана), жестко соединенной с ротором. В этом случае функцию пробной плоскости коррекции будет выполнять плоскость коррекции, образованная технологической оснасткой, расположенная на известном расстоянии от центра масс ротора и обладающая известным радиусом установки пробных грузов.

Также ротор 1 имеет заданные предельно допустимые значения параметров массо-инерционной асимметрии и обладает известными массой, расстояниями от центра масс до плоскостей коррекции 2 и 3, радиусами установки балансировочных грузов r_b и r_n в плоскостях коррекции 2 и 3 и значениями аксиального и экваториального моментов инерции.

В ходе балансировочного эксперимента ротор 1 сначала приводят во вращение в исходном состоянии, то есть с начальными дисбалансами, измеряют, с помощью датчиков 7, 8 и 9, амплитуды и фазы вибраций опор, обусловленные начальной асимметрией ротора 1. После останова ротора 1 в одной из плоскостей коррекции 2 или 3, например, в балансировочной плоскости коррекции 2 устанавливают первый пробный груз известной массы m_B в известном угловом положении φm_B на известном радиусе r_B . Снова приводят ротор 1 во вращение, измеряют амплитуды и фазы вибраций опор 5 и 6, поступающих от датчиков 7 и 8, после чего ротор 1 останавливают. Снимают первый пробный груз и прикрепляют во второй, например, пробной плоскости коррекции 3 второй пробный груз известной массы m_H в известном угловом положении φm_H на известном радиусе r_H . Вновь приводят ротор 1 во вращение, измеряют амплитуды и фазы вибраций опор, с помощью датчиков 7, 8 и 9.

Затем, в ходе обработки полученных данных, выделяют амплитуды и фазы вибраций опор, обусловленные только наличием пробных грузов, установленных на соответствующих плоскостях коррекции, тем самым, исключая влияние начальных дисбалансов на результаты измерений. После чего рассчитывают коэффициенты балансировочной чувствительности стенда 4 и коэффициенты взаимовлияния плоскостей коррекции 2 и 3, по формулам:

$$K_B = \frac{A_B^{mB}}{m_B r_B};$$

$$K\varphi_B = \varphi_B^{mB} - \varphi m_B;$$

$$K_H = \frac{A_H^{mH}}{m_H r_H};$$

$$K\varphi_H = \varphi_H^{mH} - \varphi m_H;$$

$$K_{HB} = \frac{A_H^{mB} m_H r_H}{A_H^{mH} m_B r_B};$$

$$K_{BH} = \frac{A_B^{mH} m_B r_B}{A_B^{mB} m_H r_H};$$

где A_B - амплитуда вибрации опоры 5 при вращении ротора с начальным дисбалансом;

A_H - амплитуда вибрации опоры 6 при вращении ротора с начальным дисбалансом;

A_B^{mB} - амплитуда вибрации опоры 5 при наличии пробного груза в балансировочной плоскости коррекции 2;

φ_B^{mB} - фаза вибрации опоры 5 при наличии пробного груза в балансировочной плоскости коррекции 2;

A_B^{mH} - амплитуда вибрации опоры 5 при наличии пробного груза в пробной плоскости коррекции 3;

A_H^{mB} - амплитуда вибрации опоры 6 при наличии пробного груза в балансировочной плоскости коррекции 2;

A_H^{mH} - амплитуда вибрации опоры 6 при наличии пробного груза в пробной плоскости коррекции 3;

φ_H^{mH} - фаза вибрации опоры 6 при наличии пробного груза в пробной плоскости

коррекции 3;

K_B - коэффициент балансирующей чувствительности стэнда 1 к значению дисбаланса в балансирующей плоскости коррекции 2;

5 K_{φ_B} - коэффициент балансирующей чувствительности стэнда 1 к углу дисбаланса в балансирующей плоскости коррекции 2;

K_H - коэффициент балансирующей чувствительности стэнда 1 к значению дисбаланса в пробной плоскости коррекции 3;

10 K_{φ_H} - коэффициент балансирующей чувствительности стэнда 1 к углу дисбаланса в пробной плоскости коррекции 3;

K_{HB} - коэффициент влияния балансирующей плоскости коррекции 2 на пробную плоскость коррекции 3 при наличии дисбаланса в балансирующей плоскости коррекции 2;

15 K_{BH} - коэффициент влияния пробной плоскости коррекции 3 на балансирующую плоскость коррекции 2 при наличии дисбаланса в пробной плоскости коррекции 3.

Затем с использованием полученных коэффициентов, а также значений амплитуд и фаз вибраций опор, полученных при вращении ротора с начальными дисбалансами, определяют значения (B , H) и угловые положения (α , β) векторов начальных дисбалансов \vec{B} и \vec{H} , соответственно действующих в балансирующей (фиг.2) и пробной (фиг.3) плоскостях коррекции, по формулам:

$$B_{\Sigma} = \frac{A_B}{K_B}; \alpha_{\Sigma} = \varphi_B - K_{\varphi_B};$$

$$25 \quad H_{\Sigma} = \frac{A_H}{K_H}; \beta_{\Sigma} = \varphi_H - K_{\varphi_H};$$

где φ_B и φ_H - фазы вибрации соответственно опор 5 и 6 при вращении ротора 1 с начальными дисбалансами;

$$30 \quad B_H = H_{\Sigma} \cdot K_{BH}; \alpha_H = \beta_{\Sigma} + 180^{\circ};$$

$$H_B = B_{\Sigma} \cdot K_{HB}; \beta_H = \alpha_{\Sigma} + 180^{\circ};$$

$$B = \sqrt{B_{\Sigma}^2 + B_H^2 - 2B_{\Sigma} \cdot B_H \cdot \cos(\alpha_{\Sigma} - \alpha_H)};$$

$$35 \quad \alpha = \arctg \frac{\sin \alpha_{\Sigma} - \sin \alpha_H}{\cos \alpha_{\Sigma} - \cos \alpha_H};$$

$$H = \sqrt{H_{\Sigma}^2 + H_B^2 - 2H_{\Sigma} \cdot H_B \cdot \cos(\beta_{\Sigma} - \beta_H)};$$

$$40 \quad \beta = \arctg \frac{\sin \beta_{\Sigma} - \sin \beta_H}{\cos \beta_{\Sigma} - \cos \beta_H}.$$

По значениям и углам начальных дисбалансов, а также по известным массе, расстояниям от центра масс до плоскостей коррекции 2 и 3, значениям аксиального и экваториального моментов инерции ротора, находят начальные значения поперечного смещения центра масс и угла отклонения продольной главной центральной оси инерции относительно геометрической оси ротора, которыми являются радиус-вектор начального поперечного смещения центра масс ($\vec{\rho}$) и вектор-угол ($\vec{\gamma}$) отклонения продольной ГЦОИ 10 от геометрической оси 11 (фиг.4) ротора 1, по формулам:

$$50 \quad \vec{\rho}_{нач} = \frac{\vec{B} + \vec{H}}{M};$$

$$\vec{\gamma}_{\text{нач}} = \frac{1}{2} \arcsin \frac{2 \cdot (\vec{B} \cdot x_B - \vec{H} \cdot x_H)}{I_3 - I_a},$$

где M - масса ротора;

\vec{B} - вектор начального дисбаланса, действующего в балансировочной плоскости коррекции 2 радиусом r_B ;

\vec{H} - вектор начального дисбаланса, действующего в пробной плоскости коррекции 3 радиусом r_H ;

x_B - расстояние от центра масс ротора 1 до балансировочной плоскости коррекции 2;

x_H - расстояние от центра масс ротора 1 до пробной плоскости коррекции 3;

I_3 - экваториальный момент инерции ротора 1;

I_a - аксиальный момент инерции ротора 1.

Если величина поперечного смещения центра масс $\rho_{\text{нач}}$ и угол $\gamma_{\text{нач}}$ отклонения продольной ГЦОИ 10 от геометрической оси 11 ротора 1 не превышают своих заданных предельно допустимых значений (соответственно $\rho_{\text{доп}}$ и $\gamma_{\text{доп}}$), то балансировочный эксперимент завершают и оформляют протокол балансировки, в котором указывают полученные значения массо-инерционной асимметрии.

В случае если значение хотя бы одного из указанных начальных параметров массо-инерционной асимметрии ротора 1 превышает соответствующее предельно допустимое значение, то изменяют дисбаланс в балансировочной плоскости коррекции 2, создав балансировочный дисбаланс $\vec{B}_{\text{БАЛ}}$ путем установки в этой плоскости коррекции балансировочного груза. Массу и угол установки балансировочного груза определяют с помощью значений вектора балансировочного дисбаланса $\vec{B}_{\text{БАЛ}}$.

Для определения значений вектора балансировочного дисбаланса $\vec{B}_{\text{БАЛ}}$ сначала устраняют действие начального дисбаланса \vec{B} в балансировочной плоскости коррекции 2 путем моделирования в этой плоскости дисбаланса $\vec{B}_{\text{КОМП}}$, равного по значению, но противоположного по направлению начальному дисбалансу \vec{B} , компенсирующего действие дисбаланса \vec{B} в указанной плоскости коррекции. В результате геометрическая ось 11 и продольная ГЦОИ 10 ротора 1 будут приведены к режиму квазистатической неуравновешенности, когда указанные оси пересекаются не в центре масс. При этом в пробной плоскости коррекции возникнет дополнительный дисбаланс $\vec{H}_{\text{ДПЛ1}}$, образовавшийся в результате влияния балансировочной плоскости коррекции 2 с действующим в этой плоскости дисбалансом $\vec{B}_{\text{КОМП}}$ на пробную плоскость коррекции 3, значение которого находят по формуле:

$$H_{\text{ДПЛ1}} = B_{\text{КОМП}} \cdot K_{\text{НВ}},$$

а угловое положение дополнительного дисбаланса $\vec{H}_{\text{ДПЛ1}}$ будет противоположным угловому положению дисбаланса $\vec{B}_{\text{КОМП}}$, так как он образован в результате взаимовлияния плоскостей коррекции.

После определения параметров дополнительного дисбаланса $\vec{H}_{\text{ДПЛ1}}$ находят значение и угловое положение дисбаланса $\vec{H}_{\text{КОМП}}$ в пробной плоскости коррекции 3, путем геометрического сложения векторов двух дисбалансов, действующих в этой плоскости - начального \vec{H} и дополнительного $\vec{H}_{\text{ДПЛ1}}$ по формуле:

$$\vec{H}_{КОМП} = \vec{H} + \vec{H}_{ДПЛ1}$$

Затем моделируют создание дисбаланса $\vec{B}_{КОРР}$ в балансировочной плоскости коррекции в противоположном направлении дисбалансу $\vec{H}_{КОМП}$, при этом в пробной плоскости коррекции возникает дисбаланс $\vec{H}_{КОРР}$, значение которого уравнивается со значением $\vec{B}_{КОРР}$, с помощью коэффициента взаимовлияния плоскостей коррекции.

Для этого сначала определяют значение дисбаланса $\vec{B}_{КОРР}$ по формуле:

$$B_{КОРР} = \frac{H_{КОМП}}{1 - K_{НВ}},$$

а затем определяют значение $\vec{H}_{ДПЛ2}$, на которое увеличилось значение дисбаланса

$\vec{H}_{КОМП}$, в результате действия дисбаланса $\vec{B}_{КОРР}$ в балансировочной плоскости коррекции, по формуле:

$$H_{ДПЛ2} = B_{КОРР} \cdot K_{НВ},$$

после чего определяют значение дисбаланса $\vec{H}_{КОРР}$, возникшего в результате увеличения дисбаланса $\vec{H}_{КОМП}$ на значение $\vec{H}_{ДПЛ2}$, по формуле:

$$\vec{H}_{КОРР} = \vec{H}_{КОМП} + \vec{H}_{ДПЛ2}.$$

В результате, геометрическая ось 11 ротора 1 и его продольная ГЦОИ 10 будут приведены к режиму моментной неуравновешенности, когда дисбалансы $\vec{B}_{КОРР}$ и $\vec{H}_{КОРР}$, действующие в плоскостях коррекции 2 и 3, равны по значению, но противоположны по направлению, а указанные оси 10 и 11 пересекаются в центре масс, что указывает на отсутствие поперечного смещения центра масс с геометрической оси 11 ротора 1 и, соответственно, не превышению предельно допустимых значений данного параметра.

Далее рассчитывают ожидаемое (в режиме моментной неуравновешенности) значение $\gamma_{КОРР}$ угла отклонения продольной ГЦОИ 10 от геометрической оси 11 ротора 1, по формуле:

$$\gamma_{КОРР} = \frac{1}{2} \arcsin \frac{2 \cdot B_{КОРР} \cdot L}{I_3 - I_2}$$

где L - расстояние между плоскостями коррекции 2 и 3.

В случаях, когда значение $\gamma_{КОРР}$ не превышает своего предельно допустимого значения $\gamma_{ДОП}$, определяют значение $B_{БАЛ}$ и угловое положение $\alpha_{БАЛ}$ вектора балансировочного дисбаланса $\vec{B}_{БАЛ}$, используя соответствующие параметры

смоделированных в балансировочной плоскости коррекции 2 векторов дисбалансов $\vec{B}_{КОРР}$ и $\vec{B}_{КОМП}$. После чего по значению вектора балансировочного дисбаланса $\vec{B}_{БАЛ}$

определяют массу балансировочного груза, установку которого производят в угловом положении, соответствующем угловому положению $\vec{B}_{БАЛ}$. Для определения массы и угла установки балансировочного груза используют формулы:

$$B_{БАЛ} = \sqrt{B_{КОМП}^2 + B_{КОРР}^2 + 2B_{КОМП} \cdot B_{КОРР} \cdot \cos(\alpha_{КОМП} - \alpha_{КОРР})};$$

$$m_{БАЛ} = \frac{B_{БАЛ}}{r_B},$$

$$\alpha_{\text{БАЛ}} = \arctg \frac{\sin \alpha_{\text{КОМП}} + \sin \alpha_{\text{КОРР}}}{\cos \alpha_{\text{КОМП}} + \cos \alpha_{\text{КОРР}}},$$

5 где $\alpha_{\text{КОМП}}$ - угловое положение дисбаланса $\vec{B}_{\text{КОМП}}$, а $\alpha_{\text{КОРР}}$ - угловое положение дисбаланса $\vec{B}_{\text{КОРР}}$.

После чего проводят корректировку массы ротора 1, прикрепив балансировочный груз к балансировочной плоскости 2, обеспечив тем самым приведение обоих параметров массо-инерционной асимметрии к значениям, не превышающим предельно допустимых.

10 В случаях, когда значение $\gamma_{\text{КОРР}}$ будет превышать предельно допустимое значение $\gamma_{\text{доп}}$, рассчитывают предполагаемое значение $\rho|_{\gamma=\gamma_{\text{доп}}}$ поперечного смещения центра масс с оси симметрии 11 (минимально возможное для ротора 1), которое может быть достигнуто путем изменения дисбаланса в балансировочной плоскости коррекции 2 для уменьшения значения угла отклонения продольной ГЦОИ 10 до предельно допустимого значения $\gamma_{\text{доп}}$ по формуле:

$$20 \rho|_{\gamma=\gamma_{\text{доп}}} = \frac{H_{\text{КОМП}} + \frac{(I_z - I_a) \cdot \frac{\sin 2\gamma_{\text{доп}}}{2} - H_{\text{КОМП}} \cdot X_H}{X_B + K_{\text{НВ}} \cdot X_H} \cdot (K_{\text{НВ}} - 1)}{M}.$$

25 В случаях, когда полученное значение $\rho|_{\gamma=\gamma_{\text{доп}}}$ будет превышать заданное предельно допустимое значение $\rho_{\text{доп}}$, балансировочный эксперимент прекращают, а ротор 1 бракуют и направляют изготовителю на перекомпоновку. В ином случае, то есть когда полученное значение поперечного смещения центра масс ротора 1 не превышает своего предельно допустимого значения, определяют значение вектора дисбаланса $\vec{B}_{\text{КОРР}}|_{\gamma=\gamma_{\text{доп}}}$, сонаправленного вектору $\vec{B}_{\text{КОРР}}$ и обеспечивающего достижение значения $\rho|_{\gamma=\gamma_{\text{доп}}}$ по формуле:

$$35 B_{\text{КОРР}}|_{\gamma=\gamma_{\text{доп}}} - H_{\text{КОМП}} + \frac{(I_z - I_a) \cdot \frac{\sin 2\gamma_{\text{доп}}}{2} - H_{\text{КОМП}} \cdot X_H}{X_B + K_{\text{НВ}} \cdot X_H} \cdot (K_{\text{НВ}} - 1),$$

при этом благодаря взаимовлиянию плоскостей коррекции значение дисбаланса $\vec{H}_{\text{КОРР}}$ изменится на величину $\vec{H}_{\text{ДПЛЗ}}$ (на чертеже не показан) в результате действия дисбаланса $\vec{B}_{\text{КОРР}}|_{\gamma=\gamma_{\text{доп}}}$ в балансировочной плоскости коррекции, значение которой определяют по формуле:

$$45 H_{\text{ДПЛЗ}} = B_{\text{КОРР}}|_{\gamma=\gamma_{\text{доп}}} \cdot K_{\text{НВ}}.$$

Затем определяют значение $B_{\text{БАЛ}}|_{\gamma=\gamma_{\text{доп}}}$ и угловое положение $\alpha_{\text{БАЛ}}|_{\gamma=\gamma_{\text{доп}}}$ вектора балансировочного дисбаланса $\vec{B}_{\text{БАЛ}}|_{\gamma=\gamma_{\text{доп}}}$, используя соответствующие параметры смоделированных в балансировочной плоскости коррекции 2 векторов дисбалансов $\vec{B}_{\text{КОРР}}|_{\gamma=\gamma_{\text{доп}}}$ и $\vec{B}_{\text{КОМП}}$. После чего по значению вектора балансировочного дисбаланса

$B_{\text{БАЛ}}|_{\gamma=\gamma_{\text{доп}}}$ определяют массу балансировочного груза, установку которого производят в угловом положении, соответствующем угловому положению

5 $\vec{B}_{\text{БАЛ}}|_{\gamma=\gamma_{\text{доп}}}$. Для определения значения балансировочного дисбаланса, массы и угла установки балансировочного груза используют формулы:

$$B_{\text{БАЛ}}|_{\gamma=\gamma_{\text{доп}}} = \sqrt{B_{\text{КОМП}}^2 + B_{\text{КОРР}}^2|_{\gamma=\gamma_{\text{доп}}} + 2B_{\text{КОМП}} \cdot B_{\text{КОРР}}|_{\gamma=\gamma_{\text{доп}}} \cdot \cos(\alpha_{\text{КОМП}} - \alpha_{\text{КОРР}}|_{\gamma=\gamma_{\text{доп}}})},$$

$$10 \quad m_{\text{БАЛ}}|_{\gamma=\gamma_{\text{доп}}} = \frac{B_{\text{БАЛ}}|_{\gamma=\gamma_{\text{доп}}}}{r_B},$$

$$15 \quad \alpha_{\text{БАЛ}}|_{\gamma=\gamma_{\text{доп}}} = \arctg \frac{\sin \alpha_{\text{КОМП}} + \sin \alpha_{\text{КОРР}}|_{\gamma=\gamma_{\text{доп}}}}{\cos \alpha_{\text{КОМП}} + \cos \alpha_{\text{КОРР}}|_{\gamma=\gamma_{\text{доп}}}}.$$

После чего проводят корректировку массы ротора 1, прикрепив балансировочный груз к балансировочной плоскости 2, обеспечив тем самым приведение обоих параметров массо-инерционной асимметрии к значениям, не превышающим предельно допустимых.

При такой последовательности действий обеспечивается приведение одновременно двух параметров массо-инерционной асимметрии ротора - величины поперечного смещения центра масс и угла отклонения продольной ГЦОИ от геометрической оси ротора - к значениям, не превышающим соответствующих предельно допустимых значений (заданных в эксплуатационной документации на ротор) с обеспечением минимального смещения центра масс с геометрической оси и, соответственно, сокращением числа операций балансировки и время балансировки ротора, а также обеспечивается повышение информативности процесса балансировки ротора и точности вычисления массы и углового положения балансировочного груза.

Экспериментальное опробование, проведенное на вертикальном балансировочном стенде с опорами, выполненными в виде конических газостатических подшипников, подтвердило высокую точность и эффективность способа.

35 Прикрепление пробных грузов дважды к каждой из плоскостей коррекции в двух взаимно противоположных угловых положениях, с последующим усреднением результатов измерений позволяет уменьшить погрешности, вызванные возможным поперечным смещением центров плоскостей коррекции с оси вращения, связанные со смещением центров окружностей, по которым расположены места для установки балансировочных и пробных грузов.

40 Выполнение измерений вибраций опор, дважды, при вращении ротора, жестко соединенного с технологической оснасткой в исходном состоянии и после разворота ротора на 180 градусов вокруг своей оси с его повторным жестким соединением с технологической оснасткой, а затем с последующим усреднением полученных значений, позволяет уменьшить погрешности, связанные с неидеальностью изготовления сопрягаемых поверхностей ротора и оснастки, возможным перекосом оси симметрии ротора относительно оси вращения технологической оснастки.

50 Формула изобретения

1. Способ балансировки ротора в одной плоскости коррекции, заключающийся в том, что в опоры балансировочного стенда устанавливают ротор, с заданными предельно допустимыми значениями параметров массо-инерционной асимметрии,

имеющий расположенные на торцах две плоскости коррекции, одна из которых - балансирующая, а другая - пробная, и обладающий известными массой, расстояниями от центра масс до плоскостей коррекции, значениями моментов инерции, приводят ротор во вращение, при вращении сначала определяют амплитуды и фазы 5 вибраций обоих опор, вызванных начальными дисбалансами ротора, затем, поочередно прикрепляя к каждой из плоскостей коррекции пробные грузы, снова определяют амплитуды и фазы вибраций обоих опор, после чего по полученным результатам рассчитывают коэффициенты балансирующей чувствительности стенда 10 и коэффициенты взаимовлияния плоскостей коррекции, определяют значения и углы векторов начальных дисбалансов в каждой плоскости коррекции, находят начальные значения параметров массо-инерционной асимметрии ротора, при превышении хотя бы одним из них заданного предельно допустимого значения создают балансирующий дисбаланс в балансирующей плоскости коррекции, 15 предварительно произведя расчет его значения и углового положения, после чего определяют остаточные значения параметров массо-инерционной асимметрии, а затем судят о балансировке ротора путем сопоставления остаточных и заданных предельно допустимых значений параметров массо-инерционной асимметрии, отличающийся тем, что при создании балансирующего дисбаланса сначала моделируют появление дисбаланса в балансирующей плоскости коррекции, обеспечивающего исключение 20 начального дисбаланса в этой плоскости коррекции, затем с учетом коэффициента взаимовлияния плоскостей коррекции моделируют появление дисбаланса в балансирующей плоскости коррекции, обеспечивающего приведение значений параметров массо-инерционной асимметрии ротора к значениям, не превышающим соответствующих заданных предельно допустимых значений.

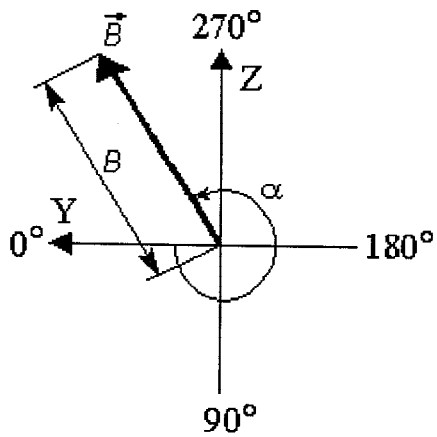
2. Способ по п.1, отличающийся тем, что при использовании жестко соединяемой с ротором технологической оснастки пробные грузы прикрепляют дважды к каждой из 30 плоскостей коррекции в двух взаимно противоположных угловых положениях, с последующим усреднением результатов измерений, причем одна из плоскостей коррекции принадлежит технологической оснастке.

3. Способ по п.1 или п.2, отличающийся тем, что при использовании жестко соединяемой с ротором технологической оснастки измерение вибраций опор при 35 вращении ротора в исходном состоянии выполняют дважды, при этом второе измерение выполняют после отсоединения технологической оснастки и разворота ротора на 180 градусов вокруг своей оси и его повторного жесткого соединения с технологической оснасткой.

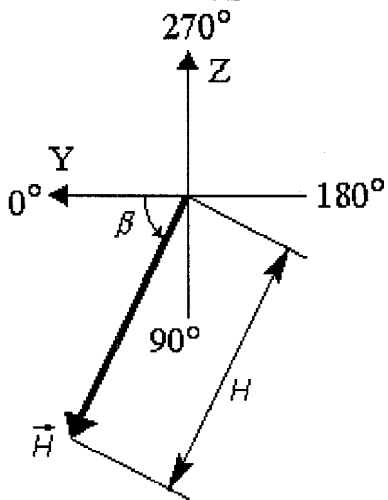
40

45

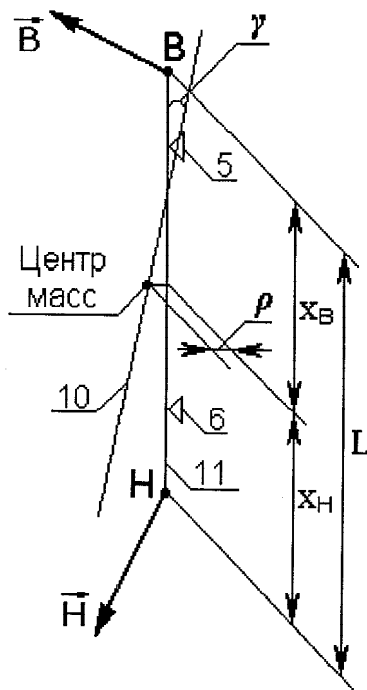
50



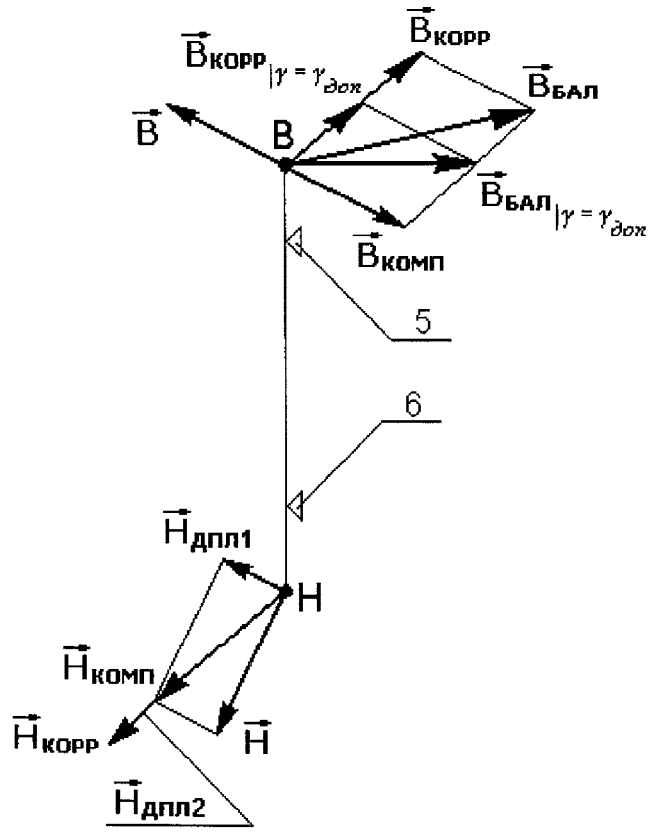
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5