



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,  
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ**

**(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ**

(21), (22) Заявка: **2007127471/22**, **18.07.2007**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
**18.07.2007**

(45) Опубликовано: **10.01.2008**

Адрес для переписки:

**105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, Центр  
защиты интеллектуальной собственности,  
Директору Б.Н. Коробцу**

(72) Автор(ы):

**Деулин Евгений Алексеевич (RU),  
Демихов Константин Евгеньевич (RU),  
Басманов Михаил Сергеевич (RU),  
Ивченко Евгений Александрович (RU),  
Курбатов Владислав Юрьевич (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

**Государственное образовательное  
учреждение высшего профессионального  
образования "Московский государственный  
технический университет имени Н.Э.  
Баумана" (МГТУ им. Н.Э. Баумана) (RU)**

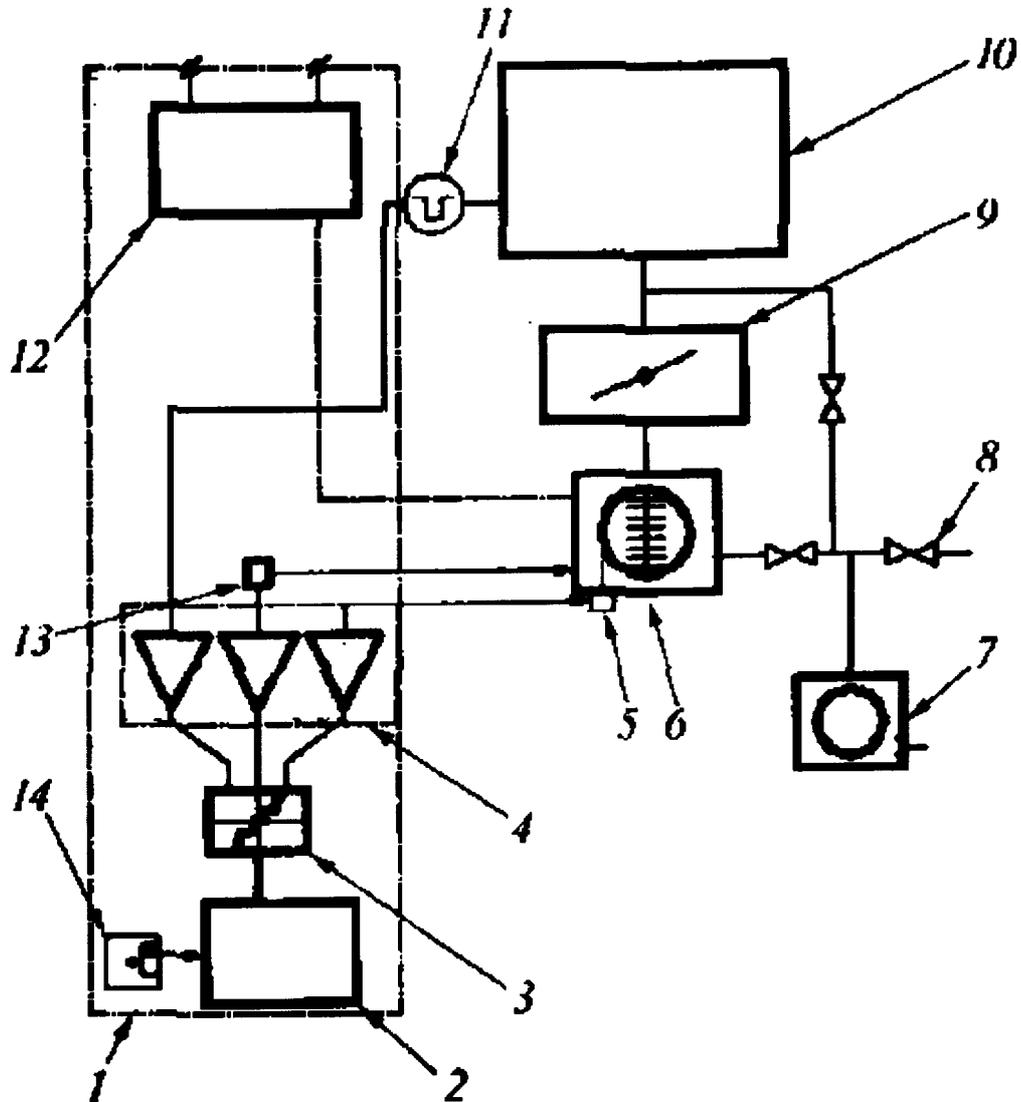
**(54) СТЕНД ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ШАРИКОПОДШИПНИКОВОГО УЗЛА  
ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА**

**Формула полезной модели**

Стенд вибрационной диагностики подшипникового узла турбомолекулярного вакуумного насоса, содержащий наряду с самим диагностируемым насосом также форвакуумный насос предварительного разряжения, систему вакуумных клапанов, вакуумный затвор, вакуумную камеру, датчик впускного давления, датчик вибраций, датчик частоты вращения ротора насоса, состоящий из корпуса и оптопары светодиодного излучателя и фотодиодного приемника с маркерной меткой на роторе насоса, электронный блок питания, нормализации сигналов датчиков и их аналого-цифровых преобразований для ввода в цифровое устройство компьютера с программным обеспечением обработки и мониторинга результатов диагностики, система диагностики подшипникового узла ротора насоса реализована посредством измерения через определенные заданные промежутки времени датчиком вибраций спектра вибрационного сигнала, выделения из общего уровня шума спектра вибрационного сигнала амплитуды на характерной частоте, зависящей от частоты вращения ротора насоса и свидетельствующей о степени износа сепаратора шарикоподшипника, и сопоставления величины амплитуды с допустимой максимальной величиной, определенной заранее для данного типа шарикоподшипника, отличающийся тем, что датчик частоты вращения ротора насоса выполнен с возможностью регулировки углов положения оптопары и поперечного перемещения плоскости оптопары, а сигнал датчика частоты вращения ротора насоса использован для определения указанной характерной частоты по формуле

$$\nu_{bs} = \nu_0 \cdot \left( \frac{D + d}{2 \cdot d_p \cdot \cos \alpha} + 1 \right)$$

где  $\nu_{bs}$  - частота контактирования «шарик-сепаратор», Гц;  $\nu_0$  - частота вращения ротора насоса, Гц;  $D$  - наружный диаметр наружного кольца шарикоподшипника, мм;  $d$  - внутренний диаметр внутреннего кольца шарикоподшипника, мм;  $d_p$  - диаметр шарика шарикоподшипника, мм;  $\alpha$  - угол контакта шарикоподшипника, рад.



RU 69940 U1

RU 69940 U1

Область техники

Полезная модель относится к оборудованию диагностики элементов молекулярных вакуумных насосов для получения глубокого вакуума.

Уровень техники

5 Самым ненадежным элементом турбомолекулярного вакуумного насоса или просто турбомолекулярного насоса (ТМН) является шарикоподшипниковый узел ротора насоса, именно он ограничивает ресурс работы насоса в целом. При выходе из  
10 строя подшипникового узла начинает проявляться сильное радиальное биение, что во время работы насоса может привести к полному разрушению ротора и статора, в этом случае восстановление насоса невозможно. Вдобавок, при такой аварии на установках термоядерного синтеза типа ТОКАМАК, где для создания высокого вакуума используют только турбомолекулярные насосы, возможна авария всей  
15 установки.

ТМН представляет собой целостное устройство, диагностика которого не  
представляется возможным методами непосредственной оценки износа  
подшипникового узла, так как при работе ТМН внутри корпуса насоса находится  
20 вакуум. Но, учитывая тот факт, что подшипник впрессован в основание корпуса ТМН, можно снимать вибрационные сигналы с корпуса и, выделяя частоты сигнала, возмущения на которых создает подшипник при вращении, можно оценивать процесс  
износа в нем.

При открытом доступе к подшипнику есть более точные методы диагностики, но  
25 для впрессованного в корпус ТМН радиально-упорного шарикоподшипника эти методы практически малопригодны.

Наиболее близкой к предлагаемой полезной модели по технической сущности является система стенда, основанная на вибрационном мониторинге по характерным  
30 для шарикоподшипника частотам контактирования

(Статья «Система вибрационной диагностики турбомолекулярных вакуумных насосов», журнал «Контроль. Диагностика» №7, 2004 г., стр.45-48).

Стенд вибрационной диагностики подшипникового узла турбомолекулярного  
вакуумного насоса содержит наряду с самим диагностируемым насосом также  
35 форвакуумный насос, систему вакуумных клапанов, вакуумный затвор, вакуумную камеру, датчик впускного давления, датчик вибрационных ускорений; датчик частоты вращения ротора; электронный блок питания, нормализации сигналов датчиков и их  
аналого-цифровых преобразований в цифровое устройство компьютера с  
программным обеспечением обработки спектрального анализа и мониторинга  
40 результатов диагностики. В стенде система диагностики

подшипникового узла ротора насоса реализована посредством измерения через  
определенные промежутки времени датчиком вибраций спектра вибрационного  
сигнала, выделения из общего уровня шума спектра вибрационного сигнала амплитуд  
на характерных частотах, свидетельствующих о степени износа

45 шарикоподшипникового узла, и сопоставления величин амплитуд с допустимыми максимальными величинами, определенными заранее для данного типа шарикоподшипника. Определение состояния насоса сводится к слежению за амплитудами на частотах контактирования, их анализу и экстраполяции полученных  
50 результатов. При достижении реальных значений амплитуд рассчитанных ранее максимально допустимых значений проводится замена подшипникового узла ротора насоса.

Характерные частоты вибрационного спектра определяются через базовую

частоту - частоту вращения ротора ТМН, которая может меняться в зависимости от уровня подаваемого напряжения, газовой нагрузки, степени износа подшипникового узла. Поэтому для точного определения базовой частоты вращения ротора нужен специальный датчик, который должен крепиться на корпусе ТМН с наименьшим вмешательством в конструкцию вакуумной системы. В указанном прототипном стенде был использован датчик вращения ротора ТМН с ограниченными функциональными возможностями. К недостаткам указанной системы стенда также можно отнести то, что в ней были использованы недостаточно точные формулы определения характерных частот вибрационного спектра, связанных с состоянием сепаратора шарикоподшипника, перетирание которого в первую очередь ведет к выходу из строя подшипникового узла ТМН.

#### Раскрытие полезной модели

Задачей, на решение которой направлена полезная модель, является модернизация стенда с упрощением и с одновременным повышением надежности системы диагностики шарикоподшипникового узла ротора ТМН, как одного из самых критичных его элементов.

Для решения поставленной задачи модернизируемый стенд отличается от прототипного тем, что датчик частоты вращения ротора насоса, состоящий из корпуса и оптопары светодиодного излучателя и фотодиодного приемника с маркерной черной меткой на роторе насоса, выполнен с возможностью регулировки углов положения оптопары и поперечного перемещения плоскости оптопары, а сигнал датчика частоты вращения ротора насоса использован для оперативного определения характерной частоты, свидетельствующей о степени износа сепаратора шарикоподшипника, по новой формуле:  $v_{bs} = v_0 \cdot (1 + (D+d)/(2d_b \cos\alpha))$ , где  $v_{bs}$  - частота контактирования «шарик-сепаратор», Гц;  $v_0$  - частота вращения ротора насоса, Гц;  $D$  - наружный диаметр наружного кольца шарикоподшипника, мм;  $d$  - внутренний диаметр внутреннего кольца шарикоподшипника, мм;  $d_b$  - диаметр шарика шарикоподшипника, мм;  $\alpha$  - угол контакта шарикоподшипника.

Расширенные функциональные возможности регулировки углов положения оптопары и возможность поперечного перемещения плоскости оптопары датчика вращения ротора ТМН необходимы для удобства и скорости настройки датчика и в то же время для использования его с любым современным ТМН с вертикальным расположением ротора.

#### Перечень чертежей

На фиг.1 - схема стенда вибрационной диагностики;

На фиг.2 - графики снятых через каждые 500 часов работы с корпуса ТМН спектров плотностей мощности вибрационных ускорений с отметкой динамики амплитуды предлагаемой характерной частоты контактирования «шарик-сепаратор»;

На фиг.3-5 - расчетные схемы расположения и траектории движения шарика в шарикоподшипнике для обоснования предлагаемой новой формулы расчета характерной частоты контактирования «шарик-сепаратор».

#### Осуществление полезной модели

На схеме стенда фиг.1 обозначены: 1- электронный блок системы диагностики; 2 - персональный компьютер (ПК); 3 - аналогово-цифровой преобразователь (АЦП); 4 - блок нормализации; 5 - оптический датчик частоты вращения ротора; 6 - диагностируемый ТМН; 7 - форвакуумный насос (насос предварительного разрежения); 8 - система вакуумных клапанов; 9 - вакуумный затвор; 10 - вакуумная камера; 11 - штатный датчик впускного давления; 12 - блок питания ТМН; 13 - датчик

вибрационных ускорений; 14 - программное обеспечение (ПО).

На фиг.2 обозначены: Frequency, Hz - частота спектра, Гц; SPD - спектральная плотность мощности амплитуды вибрационных ускорений в рассматриваемом диапазоне частот;  $\nu_{bs}$  - частота контактирования «шарик-сепаратор».

На фиг.3-5 обозначены схемы для рассмотрения соотношения скоростей движущихся частей шарикоподшипника, необходимые для расчета частот контактирования:  $d$  - диаметр внутреннего кольца шарикоподшипника,  $D$  - диаметр наружного кольца шарикоподшипника,  $d_b$  - диаметр шарика,  $\alpha$  - угол контакта в радиально-упорном шарикоподшипнике,  $C_b$  - длина окружности шарика,  $\nu_0$  - частота вращения ротора ТМН,  $O$  - центр вращения шарикоподшипника.

Для диагностики ТМН схема соединения компонентов вакуумной системы насосов, клапанов и затвора является типовой. По схеме фиг.1 диагностируемый ТМН 6 через свой вакуумный клапан системы 8 соединен с форвакуумный насосом 7 и через вакуумный затвор 9 с вакуумной камерой 10. Форвакуумный насос (насос предварительного разрежения) 7 также через свой вакуумный клапан системы 8 соединен с вакуумной камерой 10. Форвакуумный насос 7 должен работать всегда, без него ТМН 6 не сможет работать, т.к. ТМН создает компрессионную разницу и рассчитан на определенный диапазон рабочих давлений (от  $10^{-1}$  до  $10^{-6}$ ), а до  $10^{-1}$  откачивает форвакуумный насос. Вакуумный затвор 9 - это то же, что и

вакуумные клапаны 8, только он ставится на большом диаметре трубы, а все они (затвор и клапаны) в общем перекрывают трубопроводы, герметизирует, необходимы для техпроцесса откачки вакуумной камеры. Штатный датчик 11 впускного давления - это вакуумный датчик, который используется на любой вакуумной установке, он показывает, до какой степени вакуума откачивает насос в вакуумной камере 10.

Сигналы датчиков 5 с ротора ТМН, 13 с корпуса ТМН и 11 с вакуумной камеры 10 проходят последовательно через блок нормализации 4, далее АЦП 3 в ПК 2 с ПО 14.

Перед установкой датчика 5 частоты вращения на нижнем диске ротора ТМН наносится метка черным цветом, частота мелькания которой при вращении ротора работающего ТМН фиксируется датчиком 5. Конструктивно датчик 5 присоединяется к ТМН снизу, к форвакуумному патрубку (фланцу) ТМН, а от него идет дальнейшая форвакуумная магистраль к форвакуумному насосу 7 предварительного разрежения, который должен непрерывно работать при работе ТМН. Датчик 5 частоты вращения ротора состоит из двух независимых частей: труба-тройник любого размера в зависимости от размера ТМН, снизу герметизируется стеклом; и основная часть датчика, которая находится вне создаваемого вакуума, а свет проходит через стекло до метки и обратно. Благодаря такой конструкции возможен демонтаж датчика даже во время работы системы (труба-тройник остается). (Примечание: в прототипном варианте стенда датчик частоты вращения ротора также присоединялся к ТМН снизу, к форвакуумному патрубку (фланцу) ТМН). Однако его оптические каналы из кварцевого стекла при работе находились внутри насоса, что могло косвенно влиять на рабочие характеристики насоса. При необходимости снятия датчика частоты вращения со стенда приходилось разбирать (разгерметизировать) вакуумную систему, что было крайне нежелательно, так как получение глубокого и чистого вакуума является длительным и многоэтапным процессом).

Использование предлагаемого датчика 5 частоты вращения ротора ТМН не оказывает практически никакого влияния на характеристики насоса и его работу в целом. В датчиковой оптопаре светодиод и фотодиод подобраны друг к другу в одном

световом спектре, при этом используется зависимость чувствительности фотодиода от частоты принимаемого света, поэтому необходимо, чтобы пик чувствительности приходился именно на ту частоту, с которой излучает светодиод.

5 Диагностика может быть осуществлена путем снятия виброакселерометром (датчиком вибрации) сигнала с основания корпуса ТМН, в которое впресован подшипник, обработки вибросигнала и выделения амплитуды вибрации на характерной частоте.

10 Из графиков снятых через каждые 500 часов с корпуса ТМН вибрационных спектров с горизонтальной линией отметки динамики амплитуды рассматриваемой характерной частоты

контактирования «шарик-сепаратор» (фиг.2) видно как растет амплитуда вибросигнала, что свидетельствует о нарастании износа сепаратора шарикоподшипника.

15 Новая формула частоты контактирования «шарик-сепаратор» рассчитана в зависимости от частоты вращения подшипника. Это частота контактов одной некой точки на шарике с сепаратором при вращении подшипника (см. фиг.3-5).

20 Если рассмотреть движение шарика по неподвижному наружному кольцу, то можно прийти к выводу, что частота контактирования шарика с наружным кольцом равна отношению длин окружностей кольца и шарика помноженная на частоту вращения ротора:

$$25 \quad v'_{\text{бор}} = v'_0 \cdot \frac{C_r}{C_b} = v'_0 \cdot \frac{R_2}{r_b} ;$$

где  $v_{\text{бор}}$  - частота контактирования шарика с наружным кольцом, 1/с;  $v_0$  - частота вращения ротора двигателя ТМН, 1/с;  $C_r$  - длина окружности наружного кольца по дорожке качения, мм;  $C_b$  - длина окружности шарика, мм;  $r_b$  - радиус шарика, мм.

30  $R_1$  - половина наружного диаметра внутреннего кольца, мм;  $D$  - наружный диаметр подшипника, мм;  $d$  - внутренний диаметр подшипника, мм;  $d_b$  - диаметр шарика, мм;  $\alpha$  - угол контакта в радиально-упорном шарикоподшипнике, рад.

$$35 \quad R_2 = \frac{D+d}{4} + \frac{d_b}{2} \cdot \cos \alpha ;$$

где  $R_2$  - половина наружного диаметра внутреннего кольца, мм.

Тогда:

$$40 \quad v'_{\text{бор}} = v'_0 \cdot \frac{D+d+2 \cdot d_b \cdot \cos \alpha}{4} \cdot \frac{4}{2 \cdot d_b \cdot \cos \alpha} ;$$

$$v'_{\text{бор}} = v'_0 \cdot \left( \frac{D+d}{2 \cdot d_b \cdot \cos \alpha} + 1 \right) ;$$

45 Учитывая, что контакты следуют друг за другом, то частоты контактирования шарика с сепаратором и внутренним кольцом равны:

$$v'_{\text{бвр}} = v'_0 \cdot \left( \frac{D+d}{2 \cdot d_b \cdot \cos \alpha} + 1 \right) ;$$

$$50 \quad v'_{\text{бс}} = v'_0 \cdot \left( \frac{D+d}{2 \cdot d_b \cdot \cos \alpha} + 1 \right) ;$$

Частоту контактирования  $v_{\text{бс}}$  шарика с сепаратором по указанной выведенной формуле можно считать наиболее информативной и точной в диагностике отказа

подшипника, так как по статистике подшипник в основном выходит из строя из-за перетираания сепаратора шариками.

(57) Реферат

5 Стенд вибрационной диагностики шарикоподшипникового узла  
турбомолекулярного вакуумного насоса относится к оборудованию диагностики  
элементов молекулярных вакуумных насосов. Задача - модернизация стенда с  
упрощением и с одновременным повышением надежности системы диагностики  
10 шарикоподшипникового узла ротора ТМН, как одного из самых критичных его  
элементов. Датчик частоты вращения ротора насоса выполнен с возможностью  
регулировки углов положения оптопары и поперечного перемещения плоскости  
оптопары, а сигнал датчика частоты вращения ротора насоса использован для  
15 оперативного определения характерной частоты, свидетельствующей о степени износа  
сепаратора шарикоподшипника, по новой формуле:  $\nu_{bs} = \nu_0 \cdot (1 + (D+d)/(2d_b \cos\alpha))$ , где  
 $\nu_{bs}$  - частота контактирования «шарик-сепаратор», Гц;  $\nu_0$  - частота вращения ротора  
насоса, Гц; D - наружный диаметр наружного кольца шарикоподшипника, мм; d -  
внутренний диаметр внутреннего кольца шарикоподшипника, мм;  $d_b$  - диаметр  
20 шарика шарикоподшипника, мм;  $\alpha$  - угол контакта шарикоподшипника. 5 ил.

25

30

35

40

45

50

**Реферат.**

(57) Стенд вибрационной диагностики шарикоподшипникового узла турбомолекулярного вакуумного насоса относится к оборудованию диагностики элементов молекулярных вакуумных насосов. Задача - модернизация стенда с упрощением и с одновременным повышением надежности системы диагностики шарикоподшипникового узла ротора ТМН, как одного из самых критичных его элементов. Датчик частоты вращения ротора насоса выполнен с возможностью регулировки углов положения оптопары и поперечного перемещения плоскости оптопары, а сигнал датчика частоты вращения ротора насоса использован для оперативного определения характерной частоты, свидетельствующей о степени износа сепаратора шарикоподшипника, по новой формуле:  $\nu_{bs} = \nu_{\theta} \cdot (1 + (D+d)/(2d_b \cos \alpha))$ , где  $\nu_{bs}$  – частота контактирования «шарик-сепаратор», Гц;  $\nu_{\theta}$  – частота вращения ротора насоса, Гц;  $D$  – наружный диаметр наружного кольца шарикоподшипника, мм;  $d$  – внутренний диаметр внутреннего кольца шарикоподшипника, мм;  $d_b$  – диаметр шарика шарикоподшипника, мм;  $\alpha$  – угол контакта шарикоподшипника. 5 ил.

**Референт:** Скобелев М.М.

**2007127471**МПК<sup>8</sup> F04D19/04

**Стенд вибрационной диагностики шарикоподшипникового узла  
турбомолекулярного вакуумного насоса**

Область техники

Полезная модель относится к оборудованию диагностики элементов молекулярных вакуумных насосов для получения глубокого вакуума.

Уровень техники

Самым ненадежным элементом турбомолекулярного вакуумного насоса или просто турбомолекулярного насоса (ТМН) является шарикоподшипниковый узел ротора насоса, именно он ограничивает ресурс работы насоса в целом. При выходе из строя подшипникового узла начинает проявляться сильное радиальное биение, что во время работы насоса может привести к полному разрушению ротора и статора, в этом случае восстановление насоса невозможно. Вдобавок, при такой аварии на установках термоядерного синтеза типа ТОКАМАК, где для создания высокого вакуума используют только турбомолекулярные насосы, возможна авария всей установки.

ТМН представляет собой целостное устройство, диагностика которого не представляется возможным методами непосредственной оценки износа подшипникового узла, так как при работе ТМН внутри корпуса насоса находится вакуум. Но, учитывая тот факт, что подшипник впрессован в основание корпуса ТМН, можно снимать вибрационные сигналы с корпуса и, выделяя частоты сигнала, возмущения на которых создает подшипник при вращении, можно оценивать процесс износа в нем.

При открытом доступе к подшипнику есть более точные методы диагностики, но для впрессованного в корпус ТМН радиально-упорного шарикоподшипника эти методы практически малоприменимы.

Наиболее близкой к предлагаемой полезной модели по технической сущности является система стенда, основанная на вибрационном мониторинге по характерным для шарикоподшипника частотам контактирования

(Статья «Система вибрационной диагностики турбомолекулярных вакуумных насосов», журнал «Контроль. Диагностика» № 7, 2004 г., стр.45-48).

Стенд вибрационной диагностики подшипникового узла турбомолекулярного вакуумного насоса содержит наряду с самим диагностируемым насосом также форвакуумный насос, систему вакуумных клапанов, вакуумный затвор, вакуумную камеру, датчик впускного давления, датчик вибрационных ускорений; датчик частоты вращения ротора; электронный блок питания, нормализации сигналов датчиков и их аналого-цифровых преобразований в цифровое устройство компьютера с программным обеспечением обработки спектрального анализа и мониторинга результатов диагностики. В стенде система диагностики

подшипникового узла ротора насоса реализована посредством измерения через определенные промежутки времени датчиком вибраций спектра вибрационного сигнала, выделения из общего уровня шума спектра вибрационного сигнала амплитуд на характерных частотах, свидетельствующих о степени износа шарикоподшипникового узла, и сопоставления величин амплитуд с допустимыми максимальными величинами, определенными заранее для данного типа шарикоподшипника. Определение состояния насоса сводится к слежению за амплитудами на частотах контактирования, их анализу и экстраполяции полученных результатов. При достижении реальных значений амплитуд рассчитанных ранее максимально допустимых значений проводится замена подшипникового узла ротора насоса.

Характерные частоты вибрационного спектра определяются через базовую частоту - частоту вращения ротора ТМН, которая может меняться в зависимости от уровня подаваемого напряжения, газовой нагрузки, степени износа подшипникового узла. Поэтому для точного определения базовой частоты вращения ротора нужен специальный датчик, который должен крепиться на корпусе ТМН с наименьшим вмешательством в конструкцию вакуумной системы. В указанном прототипном стенде был использован датчик вращения ротора ТМН с ограниченными функциональными возможностями. К недостаткам указанной системы стенда также можно отнести то, что в ней были использованы недостаточно точные формулы определения характерных частот вибрационного спектра, связанных с состоянием сепаратора шарикоподшипника, перетирание которого в первую очередь ведет к выходу из строя подшипникового узла ТМН.

#### Раскрытие полезной модели

Задачей, на решение которой направлена полезная модель, является модернизация стенда с упрощением и с одновременным повышением надежности системы диагностики шарикоподшипникового узла ротора ТМН, как одного из самых критичных его элементов.

Для решения поставленной задачи модернизируемый стенд отличается от прототипного тем, что датчик частоты вращения ротора насоса, состоящий из корпуса и оптопары светодиодного излучателя и фотодиодного приемника с маркерной черной меткой на роторе насоса, выполнен с возможностью регулировки углов положения оптопары и поперечного перемещения плоскости оптопары, а сигнал датчика частоты вращения ротора насоса использован для оперативного определения характерной частоты, свидетельствующей о степени износа сепаратора шарикоподшипника, по новой формуле:  $v_{bs} = v_0 \cdot (1 + (D+d)/(2d_b \cdot \cos\alpha))$ , где  $v_{bs}$  – частота контактирования «шарик-сепаратор», Гц;  $v_0$  – частота вращения ротора насоса, Гц;  $D$  – наружный диаметр наружного кольца шарикоподшипника, мм;  $d$  – внутренний диаметр внутреннего кольца шарикоподшипника, мм;  $d_b$  – диаметр шарика шарикоподшипника, мм;  $\alpha$  - угол контакта шарикоподшипника.

Расширенные функциональные возможности регулировки углов положения оптопары и возможность поперечного перемещения плоскости оптопары датчика вращения ротора ТМН необходимы для удобства и быстроты настройки датчика и в то же время для использования его с любым современным ТМН с вертикальным расположением ротора.

#### Перечень чертежей

На фиг.1 - схема стенда вибрационной диагностики;

На фиг.2 – графики снятых через каждые 500 часов работы с корпуса ТМН спектров плотностей мощности вибрационных ускорений с отметкой динамики амплитуды предлагаемой характерной частоты контактирования «шарик-сепаратор»;

На фиг.3-5 – расчетные схемы расположения и траектории движения шарика в шарикоподшипнике для обоснования предлагаемой новой формулы расчета характерной частоты контактирования «шарик-сепаратор».

#### Осуществление полезной модели

На схеме стенда фиг.1 обозначены: 1- электронный блок системы диагностики; 2 - персональный компьютер (ПК); 3 - аналогово-цифровой преобразователь (АЦП); 4 - блок нормализации; 5 - оптический датчик частоты вращения ротора; 6 - диагностируемый ТМН; 7 - форвакуумный насос (насос предварительного разрежения); 8 - система вакуумных клапанов; 9 - вакуумный затвор; 10 - вакуумная камера; 11 - штатный датчик впускного давления; 12 - блок питания ТМН; 13 - датчик вибрационных ускорений; 14 - программное обеспечение (ПО).

На фиг.2 обозначены: Frequency, Hz – частота спектра, Гц; SPD – спектральная плотность мощности амплитуды вибрационных ускорений в рассматриваемом диапазоне частот;  $\nu_{bs}$  – частота контактирования «шарик-сепаратор».

На фиг.3-5 обозначены схемы для рассмотрения соотношения скоростей движущихся частей шарикоподшипника, необходимые для расчета частот контактирования:  $d$  – диаметр внутреннего кольца шарикоподшипника,  $D$  – диаметр наружного кольца шарикоподшипника,  $d_b$  – диаметр шарика,  $\alpha$  - угол контакта в радиально-упорном шарикоподшипнике,  $C_b$  - длина окружности шарика,  $\nu_0$  – частота вращения ротора ТМН,  $O$  – центр вращения шарикоподшипника.

Для диагностики ТМН схема соединения компонентов вакуумной системы насосов, клапанов и затвора является типовой. По схеме фиг.1 диагностируемый ТМН 6 через свой вакуумный клапан системы 8 соединен с форвакуумный насосом 7 и через вакуумный затвор 9 с вакуумной камерой 10. Форвакуумный насос (насос предварительного разрежения) 7 также через свой вакуумный клапан системы 8 соединен с вакуумной камерой 10. Форвакуумный насос 7 должен работать всегда, без него ТМН 6 не сможет работать, т.к. ТМН создает компрессионную разницу и рассчитан на определенный диапазон рабочих давлений (от  $10^{-1}$  до  $10^{-6}$ ), а до  $10^{-1}$  откачивает форвакуумный насос. Вакуумный затвор 9 - это тоже что и

вакуумные клапаны 8, только он ставится на большом диаметре трубы, а все они (затвор и клапаны) в общем перекрывает трубопроводы, герметизирует, необходимы для техпроцесса откачки вакуумной камеры. Штатный датчик 11 впускного давления - это вакуумный датчик, который используется на любой вакуумной установке, он показывает, до какой степени вакуума откачивает насос в вакуумной камере 10.

Сигналы датчиков 5 с ротора ТМН, 13 с корпуса ТМН и 11 с вакуумной камеры 10 проходят последовательно через блок нормализации 4, далее АЦП 3 в ПК 2 с ПО 14.

Перед установкой датчика 5 частоты вращения на нижнем диске ротора ТМН наносится метка черным цветом, частота мелькания которой при вращении ротора работающего ТМН фиксируется датчиком 5. Конструктивно датчик 5 присоединяется к ТМН снизу, к форвакуумному патрубку (фланцу) ТМН, а от него идет дальнейшая форвакуумная магистраль к форвакуумному насосу 7 предварительного разрежения, который должен непрерывно работать при работе ТМН. Датчик 5 частоты вращения ротора состоит из двух независимых частей: труба-тройник любого размера в зависимости от размера ТМН, снизу герметизируется стеклом; и основная часть датчика, которая находится вне создаваемого вакуума, а свет проходит через стекло до метки и обратно. Благодаря такой конструкции возможен демонтаж датчика даже во время работы системы (труба-тройник остается). (Примечание: в прототипном варианте стенда датчик частоты вращения ротора также присоединялся к ТМН снизу, к форвакуумному патрубку (фланцу) ТМН. Однако его оптические каналы из кварцевого стекла при работе находились внутри насоса, что могло косвенно влиять на рабочие характеристики насоса. При необходимости снятия датчика частоты вращения со стенда приходилось разбирать (разгерметизировать) вакуумную систему, что было крайне нежелательно, так как получение глубокого и чистого вакуума является длительным и многоэтапным процессом).

Использование предлагаемого датчика 5 частоты вращения ротора ТМН не оказывает практически никакого влияния на характеристики насоса и его работу в целом. В датчиковой оптике светодиод и фотодиод подобраны друг к другу в одном световом спектре, при этом используется зависимость чувствительности фотодиода от частоты принимаемого света, поэтому необходимо, чтобы пик чувствительности приходился именно на ту частоту, с которой излучает светодиод.

Диагностика может быть осуществлена путем снятия виброакселерометром (датчиком вибрации) сигнала с основания корпуса ТМН, в которое впесован подшипник, обработки вибросигнала и выделения амплитуды вибрации на характерной частоте.

Из графиков снятых через каждые 500 часов с корпуса ТМН вибрационных спектров с горизонтальной линией отметки динамики амплитуды рассматриваемой характерной частоты

контактирования «шарик-сепаратор» (фиг.2) видно как растет амплитуда вибросигнала, что свидетельствует о нарастании износа сепаратора шарикоподшипника.

Новая формула частоты контактирования «шарик-сепаратор» рассчитана в зависимости от частоты вращения подшипника. Это частота контактов одной некой точки на шарике с сепаратором при вращении подшипника (см. фиг.3-5).

Если рассмотреть движение шарика по неподвижному наружному кольцу, то можно прийти к выводу, что частота контактирования шарика с наружным кольцом равна отношению длин окружностей кольца и шарика помноженная на частоту вращения ротора:

$$\nu_{bor} = \nu_0 \cdot \frac{C_r}{C_b} = \nu_0 \cdot \frac{R_2}{r_b},$$

где  $\nu_{bor}$  – частота контактирования шарика с наружным кольцом, 1/с;  $\nu_0$  – частота вращения ротора двигателя ТМН, 1/с;  $C_r$  – длина окружности наружного кольца по дорожке качения, мм;  $C_b$  – длина окружности шарика, мм;  $r_b$  – радиус шарика, мм.

$R_1$  – половина наружного диаметра внутреннего кольца, мм;  $D$  – наружный диаметр подшипника, мм;  $d$  – внутренний диаметр подшипника, мм;  $d_b$  – диаметр шарика, мм;  $\alpha$  – угол контакта в радиально-упорном шарикоподшипнике, рад.

$$R_2 = \frac{D+d}{4} + \frac{d_b}{2} \cdot \cos\alpha;$$

где  $R_2$  – половина наружного диаметра внутреннего кольца, мм.

Тогда:

$$\nu_{bor} = \nu_0 \cdot \frac{D+d+2 \cdot d_b \cdot \cos\alpha}{4} \cdot \frac{4}{2 \cdot d_b \cdot \cos\alpha};$$

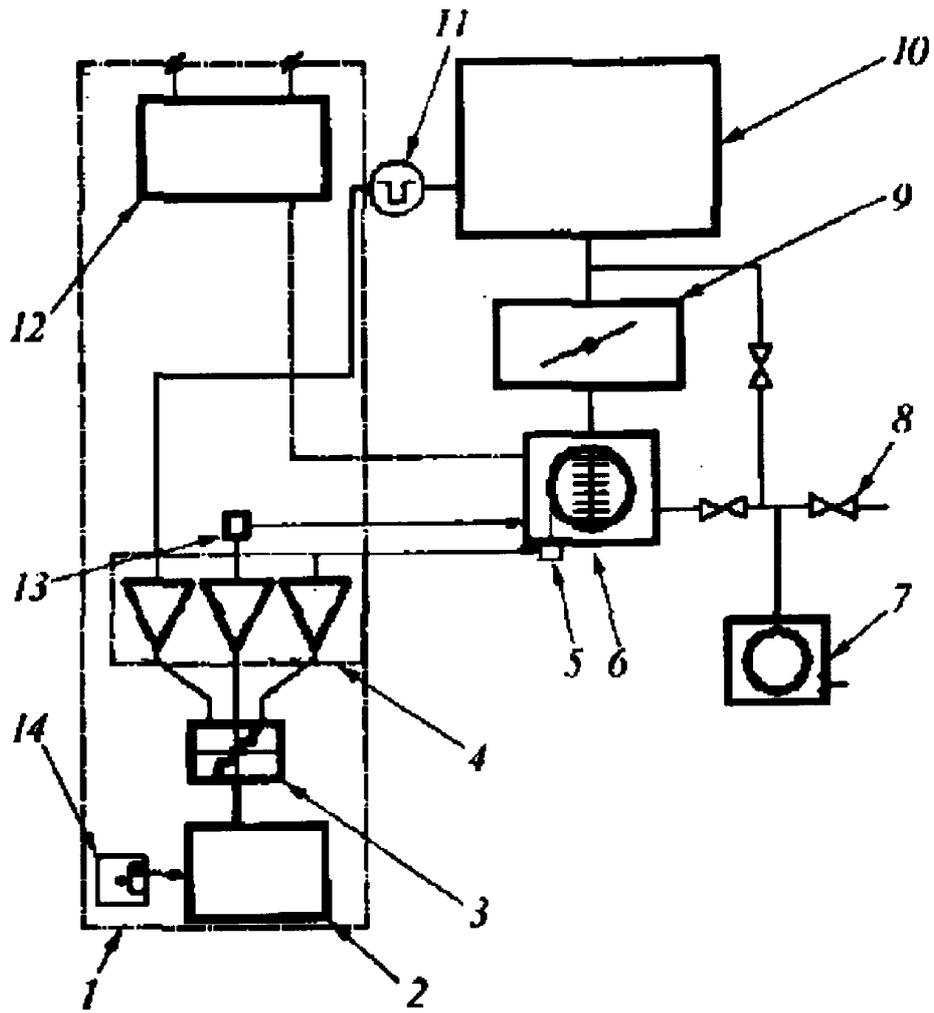
$$\nu_{bor} = \nu_0 \cdot \left( \frac{D+d}{2 \cdot d_b \cdot \cos\alpha} + 1 \right);$$

Учитывая, что контакты следуют друг за другом, то частоты контактирования шарика с сепаратором и внутренним кольцом равны:

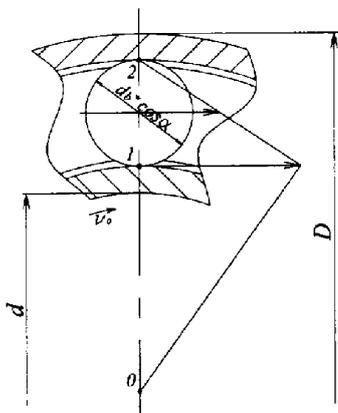
$$\nu_{bir} = \nu_0 \cdot \left( \frac{D+d}{2 \cdot d_b \cdot \cos\alpha} + 1 \right);$$

$$\nu_{bs} = \nu_0 \cdot \left( \frac{D+d}{2 \cdot d_b \cdot \cos\alpha} + 1 \right);$$

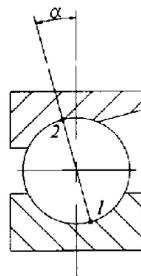
Частоту контактирования  $\nu_{bs}$  шарика с сепаратором по указанной выведенной формуле можно считать наиболее информативной и точной в диагностике отказа подшипника, так как по статистике подшипник в основном выходит из строя из-за перетиранья сепаратора шариками.



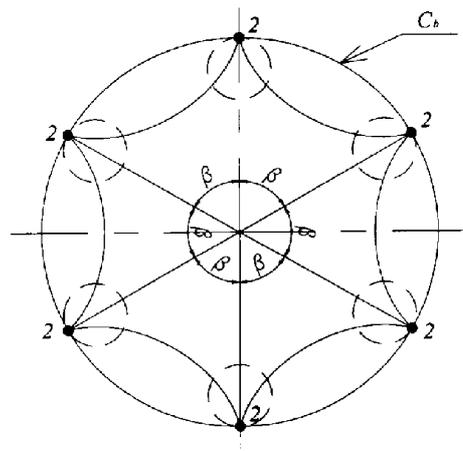
Фиг. 1



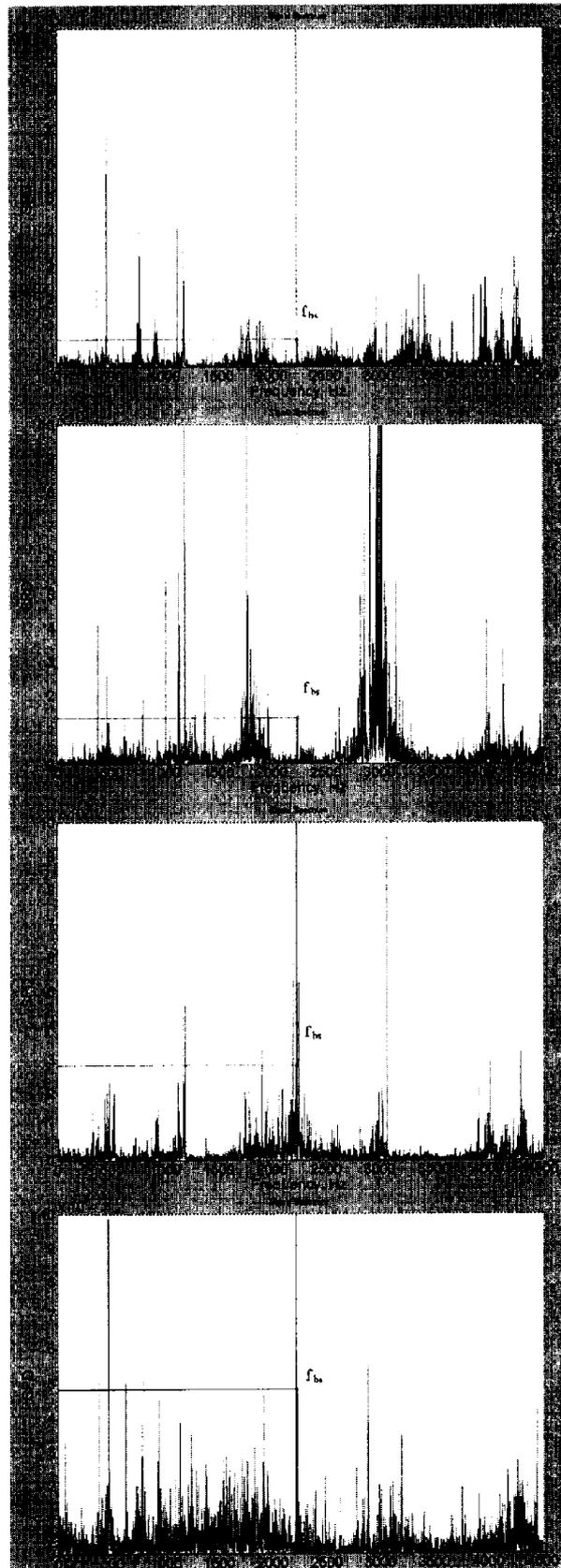
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг.2