

УДК 681.518.5

Д.А. Васильев, А.В. Лутчев, А.В. Плотников*, В.Н. Федорченко
 ООО «КБ ТЕЗАР», ул. Ленина, 33-52, г. Протвино Московской области, РФ, 142281
 *e-mail: tezar@mail.ru

А.Д. Северинов
 ОАО «Криогенмаш», пр. Ленина, 67, г. Балашиха Московской области, РФ, 143907

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТУРБОДЕТАНДЕРНЫХ АГРЕГАТОВ ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Диагностика состояния роторных машин и оценка степени опасности дефектов, проявляющихся в ходе эксплуатации, являются одним из наиболее эффективных методов повышения надежности оборудования. Сообщается о разработке и внедрении системы контроля технологических параметров турбодетандерных агрегатов, которая включает в себя функции кинематического виброконтроля с использованием бесконтактных датчиков относительных перемещений. Данная система применяется в качестве штатной аппаратуры аварийной защиты турбодетандерных агрегатов и позволяет производить в полном объеме их заводские испытания.

Ключевые слова: Воздухоразделительная установка. Турбодетандерный агрегат. Контроль технологических параметров. Виброконтроль. Датчики относительного перемещения.

D.A. Vasilev, A.V. Lutchev, A.V. Plotnikov, V.N. Fedorchenko, A.D. Severinov

MONITORING SYSTEM OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE TURBO-EXPANDER UNITS FOR THE AIR SEPARATION PLANT

A diagnostics of mechanical condition of rotating machinery and the estimation of a danger of the defects which arise during operation are one of the most effective methods to increase the equipment reliability. The monitoring system of technological parameters for turbo expander units has been developed and introduced. This system includes the functions of a vibration control using the contactless sensors of the displacements. The system is use as the regular equipment for emergency protection of turbo expander units and to use as the equipment for making their full factory tests.

Keywords: Air separation plant. Turbo-expander unit. Vibration control. Sensor of slippage.

1. ВВЕДЕНИЕ

Диагностика состояния роторных машин и оценка степени опасности дефектов, проявляющихся в ходе эксплуатации, является одним из наиболее эффективных методов повышения надежности оборудования. Широко распространенный метод динамического диагностирования, основанный на амплитудно-спектральном анализе сигнала от датчиков виброскорости и виброускорения, в ряде случаев оказывается недостаточным. При попытках раннего обнаружения неисправности и оценке тенденции её роста информация, полученная динамическими методами измерения, может быть неточной и даже ошибочной. Поэтому все большее число специалистов, связанных с эксплуатацией роторных агрегатов, признают целесообразность использования кинематических средств контроля, позволяющих отслеживать траекторию движения ро-

тора в пространстве подшипника и выделять чёткие критерии возникновения аномалий в работе машины.

Внедрение аппаратуры виброконтроля в общую систему контроля технологических параметров, описывающих работу турбодетандерного агрегата (ТДА), приобретает особую важность, так как расширяет возможности реализации алгоритмов автоматического его пуска и антипомпажной защиты.

Нами по заданию ОАО «Криогенмаш» разработана и внедрена система контроля технологических параметров ТДА. Остановимся на описании её возможностей и особенностей.

2. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ

Основными функциями аппаратуры системы контроля технологических параметров СКТП-ТЕЗАР-М

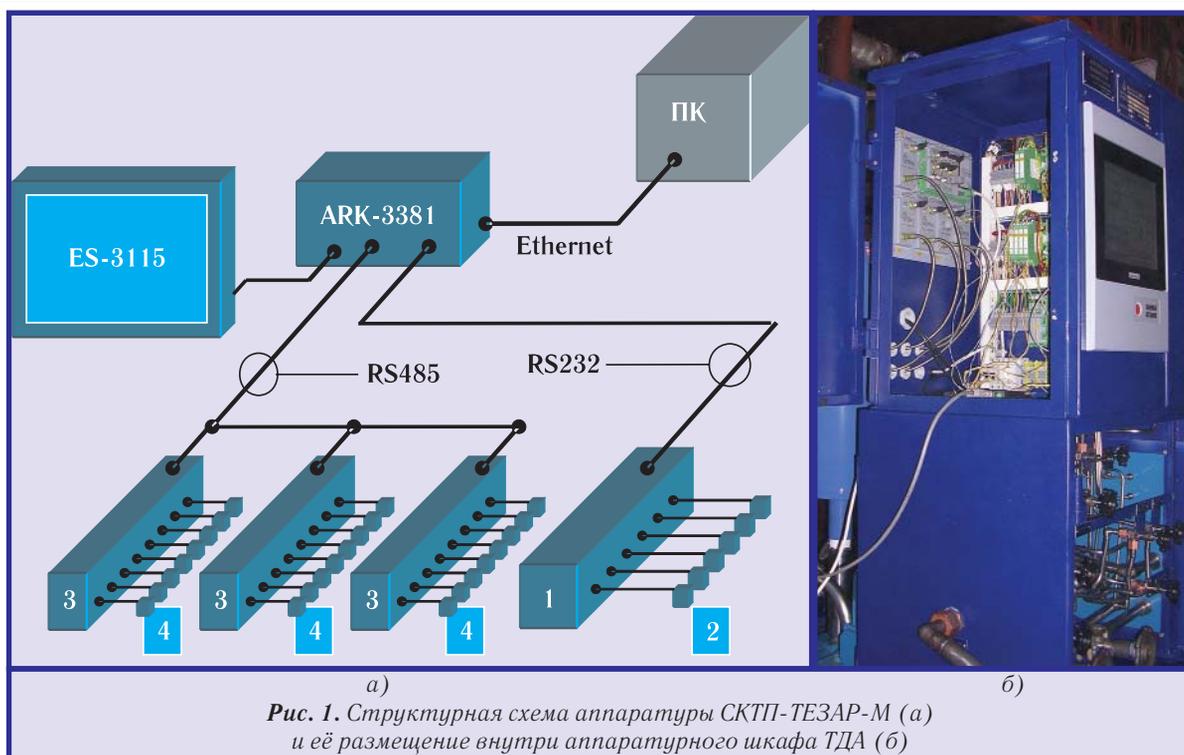


Рис. 1. Структурная схема аппаратуры СКПТ-ТЕЗАР-М (а) и её размещение внутри аппаратного шкафа ТДА (б)

являются:

- контроль частоты вращения ротора ТДА;
- многоканальный контроль относительной вибрации ротора;
- многоканальный контроль давления газовых потоков детандерной и компрессорной частей агрегата;
- многоканальный контроль температуры и давления в системе масляного подвеса ротора;
- управление положением запорно-регулирующей арматуры с реализацией функции автоматического регулирования (стабилизации) давления газа наддува лабиринтового уплотнения.

Структурная схема аппаратуры показана на рис. 1. Наименования и краткие характеристики основных функциональных узлов, входящих в комплект аппаратуры, приведены в табл. 1.

Связь аппаратуры системы контроля с системой

управления верхнего уровня может осуществляться различными способами. Например, предусмотрено дублирование аналоговых сигналов от первичных преобразователей либо возможность использования цифровых линий связи в формате RS485 или 10/100 Base-T Ethernet. Последний вариант (см. рис. 1) применяется для подключения персонального компьютера (ПК) при проведении заводских испытаний ТДА, что позволяет вести дополнительную обработку измеряемых параметров и осуществлять архивацию результатов экспериментов.

3. ПРИНЦИПЫ КИНЕМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Состав аппаратуры кинематического контроля изображен на блок-схеме (см. рис. 2). Основным

Таблица 1. Основные показатели функциональных узлов

Обозначение (рис. 1)	Наименование и краткая характеристика	Производитель
ES-3115	Панель индикации и управления. Промышленный монитор 15" TFT с резистивным сенсорным экраном ELO	Advantech
ARK-3381	Микропроцессорный блок. Промышленный встраиваемый компьютер, 600 МГц, VGA, 512 МВ, HDD флеш-диск, Windows XP Embedded	Advantech
1	Преобразователь кинематических величин измерительный ВС-36 (подробнее см. позицию 3)	КБ ТЕЗАР
2	Измерительный канал относительных перемещений серии TEIS-2 (подробнее см. позицию 3)	КБ ТЕЗАР
3	Преобразователь тока измерительный многоканальный МСС-0824. 8 измерительных каналов 0-25 мА, 2 управляемых токовых выхода 4-20 мА, 8 дискретных входов, 8 дискретных выходов, источник питания 24 В для подключаемых датчиков типа «Метран»	КБ ТЕЗАР
4	Первичные преобразователи давления и температуры с выходом 4-20 мА. Регулируемая арматура. Дискретные входы и выходы	Определяется разработчиком установки

функциональным узлом аппаратуры является преобразователь кинематических величин измерительный ВС-36, который эксплуатируется совместно с измерительными каналами относительных перемещений серии TEIS-2. Измерительный канал представляет собой совокупность бесконтактного вихревого датчика, устанавливаемого в статоре агрегата, и нормирующего преобразователя, выходной сигнал которого (4-20 мА) прямо пропорционален расстоянию между чувствительным элементом датчика и контролируемой поверхностью ротора.

По своему функциональному назначению измерительные каналы в общей схеме кинематического контроля имеют жесткую привязку к объекту измерения:

[A], [B] — каналы измерения радиального виброперемещения ротора в поперечном сечении №1;*
 [C], [D] — каналы измерения радиального виброперемещения ротора в поперечном сечении №2;*
 [S] — канал измерения частоты вращения ротора;
 [Z] — канал измерения осевого сдвига ротора.

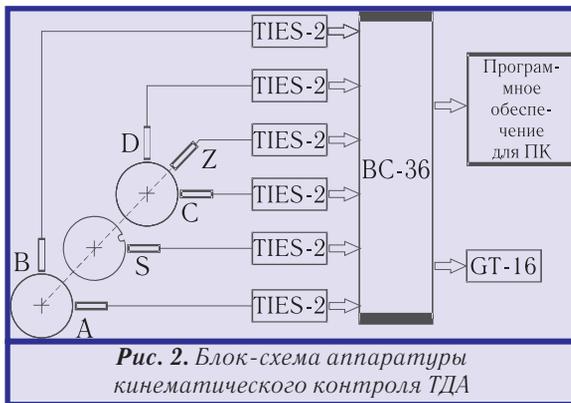


Рис. 2. Блок-схема аппаратуры кинематического контроля ТДА

Основной функцией преобразователя ВС-36 является измерение и обработка входных токовых сигналов 4-20 мА, поступающих от нормирующих преобразователей, и пересчет измеряемых значений в физические единицы: частота вращения — обороты в минуту и перемещение — микроны. Измерения производятся в автоматическом режиме, одновременно по всем измерительным каналам и синхронно с частотой вращения ротора.

Дополнительная функция преобразователя ВС-36 — поддержка работы вспомогательного индикаторного устройства — тестера GT-16, обеспечивающего быструю установку (позиционирование) датчиков относительно поверхности ротора.

Преобразователь ВС-36 обеспечивает передачу всех измеряемых параметров через порт последовательной цифровой связи RS-232. При эксплуатации аппаратуры в составе системы контроля технологических

параметров ТДА мониторинг измеряемых величин осуществляется программными средствами этой системы. В случаях проведения регламентного технического обслуживания (поверка и калибровка) или при автономной эксплуатации изделия может использоваться программное обеспечение, устанавливаемое на персональный компьютер пользователя.

Принцип отображения измеряемых значений относительных виброперемещений ротора представлен на рис. 3. Графический пример относится к идеальному случаю, когда ротор совершает прецессионное движение по эллиптической траектории. При этом частота прецессии ротора совпадает с частотой его вращения. В проекции на измерительные оси [A] и [B] ротор совершает гармонические колебания, которые описываются массивами AC[A] и AC[B], содержащими мгновенные измеренные значения a_i и b_i пространственного положения ротора относительно его среднего положения DC[A] и DC[B], соответственно. Одномерные массивы AC[A] и AC[B] могут быть использованы для восстановления двумерной траектории прецессии ротора в прямоугольной системе координат $b(a)$, так как измерения производятся синхронно и по взаимно перпендикулярным осям. При этом относительное радиальное виброперемещение ротора в данном поперечном сечении уместно описывать двухмерным радиус-вектором $G1$, абсолютная мгновенная величина которого

$$G1_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}.$$

Аналогично для второго поперечного измерительного сечения, образованного измерительными каналами [C] и [D], абсолютная мгновенная величина радиус-вектора $G2$ рассчитывается как

$$G2_i = \sqrt{c_i^2 + d_i^2}.$$

Исходя из знания геометрического положения измерительных каналов радиального виброперемещения, синхронности сбора данных и допущения, что

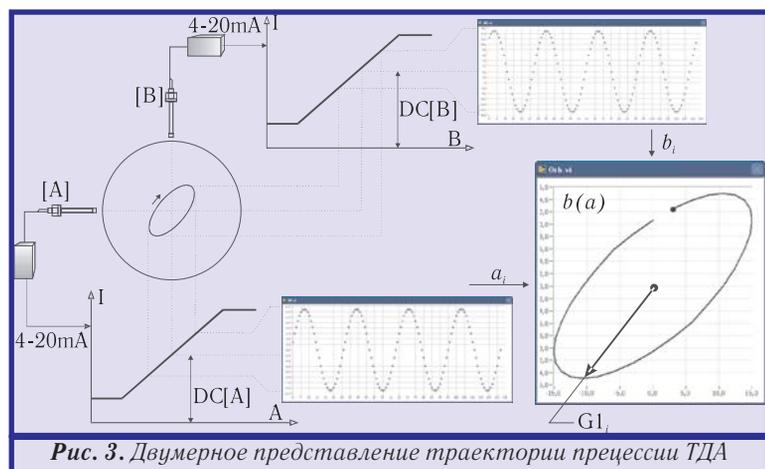


Рис. 3. Двумерное представление траектории прецессии ТДА

* Датчики, образующие одно поперечное измерительное сечение, должны быть установлены под углом 90 друг к другу. Датчики каналов [A] и [C] (каналов [B] и [D] соответственно) должны устанавливаться в одной плоскости продольного сечения агрегата.

контролируемый вал в зоне измерения не является гибким, система контроля обеспечивает мониторинг трёхмерной формы движения ротора. На рис. 4 (слева) приведён реальный графический пример восстановленной трёхмерной орбиты движения центральной оси

ротора. Прямые линии, прочерченные между орбитами сечений G1 и G2, соединяют точки (мгновенные отсчёты), полученные синхронно. Совокупность данных линий создаёт наглядное представление о трёхмерной форме прецессии центральной оси ротора. В приведённом примере центральная ось ротора совершает движение по конической траектории. Случай конической прецессии наглядно показывает, сколь необъективна может быть информация, полученная только от одного измерительного сечения, тем более, если оно пространственно совпадает с узлом конического вихря. Наличие двух измерительных сечений качественно расширяет возможности мониторинга и позволяет производить оценку характера и величины виброперемещений «жёсткого вала» в любых произвольно взятых сечениях G1' и G2', отличных от измерительных сечений G1 и G2 (см. рис. 4).

Статистика наблюдений за амплитудными характеристиками вибрации показывает, что количественный критерий организации аварийной защиты (когда действующее значение амплитуд G1 и G2 сравнивается с некоторой уставочной величиной) эффективен только в случаях «неисправности» самого несущего подшипника, т.е. в случаях, когда имеет место потеря устойчивости либо в осевом (пневмомолот), либо в радиальном направлении (например, нарастающий полускоростной вихрь). Но события, развивающиеся по данному сценарию, редки. Более того, разработчик машины всегда учитывает эти факторы, конструктивно закладывая определенный запас противодействия им. В то же время, часто встречается ситуация, когда аномалия, возникающая вне зоны опор, представляет реальную нара-

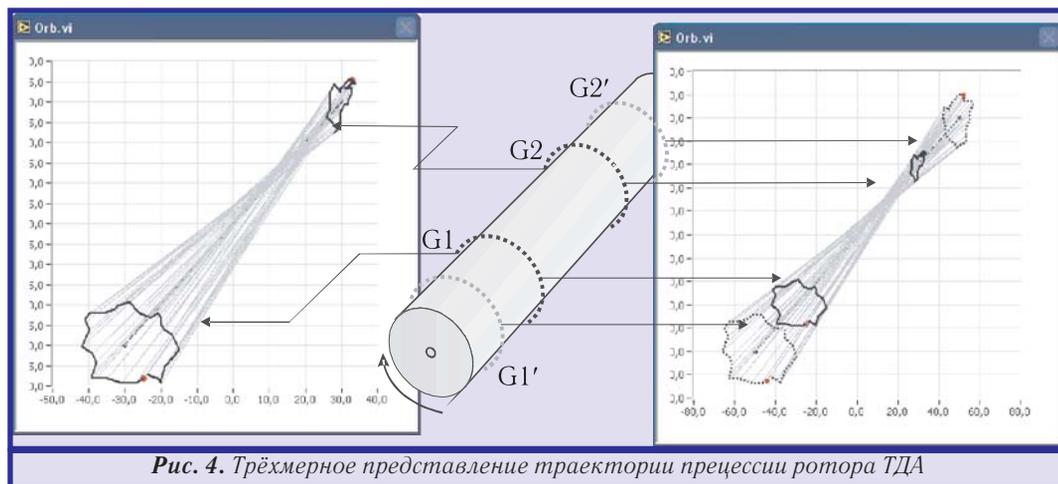


Рис. 4. Трёхмерное представление траектории прецессии ротора ТДА

стающую опасность для функционирования агрегата. Хотя начальное проявление её не столь велико для того, чтобы вызвать повышенную вибрацию. В этом случае только кинематический метод прямого наблюдения за траекторией прецессии ротора является чувствительным индикатором, фиксирующим даже малые и кратковременные динамические изменения состояния машины.

4. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И МОНИТОРИНГ

Программное обеспечение системы контроля технологических параметров строится на основе SCADA-пакета «LabVIEW 7.1. Professional Development System» фирмы «National Instruments». Программное обеспечение представляет собой исполняемую программу (EXE-приложение), устанавливаемую на флеш-диск встраиваемого компьютера ARK-3381.

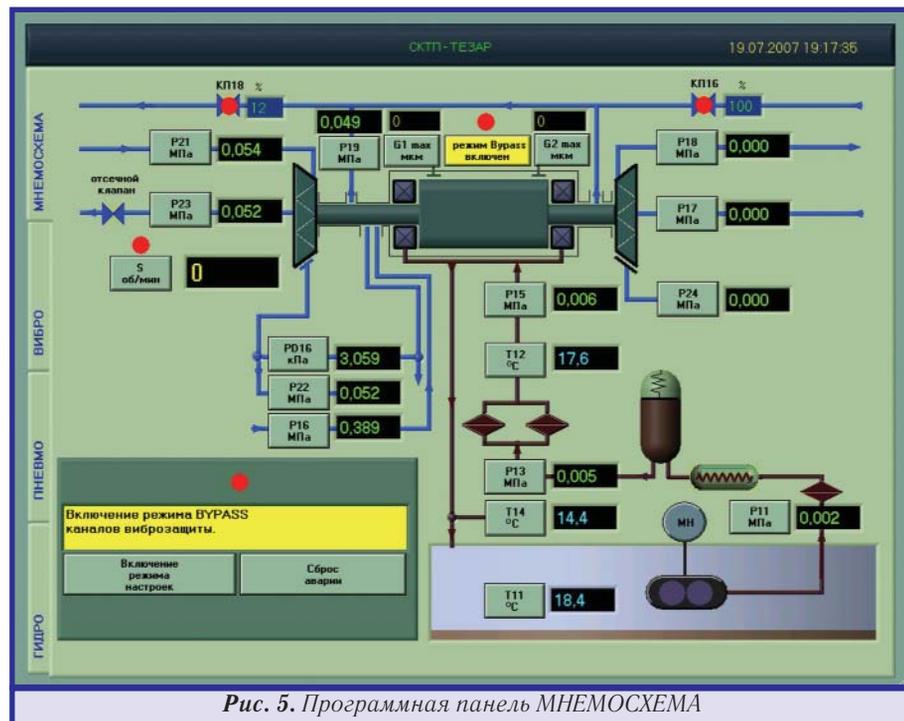


Рис. 5. Программная панель МНЕМОСХЕМА

Она автоматически инициализируется при подаче питающего напряжения и не требует какого-либо проведения ручных пусковых операций. На рис. 5 показана структура основной программной панели, отображающей цифровые индикаторы измеряемых параметров, расположенные в поле мнемосхемы ТДА.

Дополнительные программные панели содержат графическую информацию в виде временных трендов всех измеряемых величин, описывающих работу ТДА за предшествующие 30 мин. Графическая информация сохраняется при аварийных остановках ТДА, что позволяет использовать её по принципу «чёрного ящика» для анализа аварийной ситуации.

Исполняемая программа обеспечивает защиту от попыток несанкционированного доступа неподготовленного пользователя к внутрисистемной информации. Для подготовленного пользователя доступны подпрограммы для проведения настроек аварийных уровней и их блокировок, настроек масштабирующих коэффициентов измерительных каналов, а также подпрограммы, обеспечивающие удобство метрологического обслуживания системы контроля.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используемый метод мониторинга технологических параметров ТДА хорошо зарекомендовал себя на практике, благодаря свойственной ему информативности и эргономичности. Применение SCADA-пакета для создания исполняемой программы даёт возможность быстро и гибко реагировать на пожелания конечного пользователя и учитывать технические нюансы различных агрегатов.

Мониторинг кинематических параметров, обеспечивающий наблюдение за формой и величиной прецессии вала, а также другими показателями (в режиме заводских испытаний), позволяет производить оценку качества балансировки вала и несущей способности опор, отслеживать динамику изменения нагрузок в пусковых режимах и режиме приработки машины, а в режиме штатной эксплуатации — аварийное слежение за кинематическими параметрами.

В настоящее время диагностические функции системы контроля используются при проведении заводских испытаний всех ТДА, выпускаемых ОАО «Криогенмаш».