Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
"СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫ УНИВЕРСИТЕТ"
САЯНО-ШУШЕНСКИЙ ФИЛИАЛ
институт
Гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических систем и электрических сетей
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ А.А. Ачитаев
"____"_____ 20__ г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ГЭС

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
13.04.02.06 Гидроэлектростанции

Научный руководитель _____ _____ В.В. Луференко
подпись, дата должность инициалы, фамилия
Выпускник _____ И.Н. Топоев
подпись, дата инициалы, фамилия
Рецензент _____ _____ А.В. Силютин
подпись, дата должность инициалы, фамилия
Нормоконтролер _____ А.А. Чабанова
подпись, дата инициалы, фамилия

Саяногорск; Черемушки 2020

АННОТАЦИЯ

К магистерской диссертации, студента 2 курса магистратуры Саяно-Шушенского филиала Сибирского федерального университета на тему "Разработка методов диагностики оборудования вспомогательных систем ГЭС".

В процессе выполнения работы были изучены методы вибродиагностики компрессорного оборудования. Предложен переносной многоканальный диагностический комплекс, позволяющий производить диагностические исследования компрессорного оборудования. В работе была описана методика проведения измерения вибрации поршневого компрессора.

Ключевые слова: методы диагностики, мониторинг, компрессорные установки, вспомогательная система ГЭС.

АВТОРЕФЕРАТ

Магистерская диссертация на тему «Разработка методов диагностики оборудования вспомогательных систем ГЭС» содержит в себе 45 страниц текстового документа, 16 иллюстраций, 4 таблицы и 3 формулы.

Объект исследования: поршневые компрессоры высокого давления.

Целью работы является исследование способов измерения вибрации методами вибродиагностики компрессоров высокого давления.

Задачи, решаемые в ходе выполнения работы:

а) Исследование диагностируемых дефектов компрессора;

б) исследование метода спектра огибающей вибросигнала;

в) Выбор точек измерения и виброанализатора для проведения измерений;

г) Анализ влияния вибрации на поршневые компрессоры.

В настоящее время в гидроэлектростанциях существует переносная система для проведения измерений вибрации в компрессорных установках, позволяющая выполнять требования СТО РусГидро 02.02.122-2015 «Методические указания. Гидроэлектростанции. Порядок оценки состояния вспомогательного оборудования».

Данная работа направлена на исследование вспомогательного оборудования системы пневматического хозяйства, которые также как и другие системы, обеспечивает нормальную работу основного оборудования ГЭС.

Задачи вибродиагностики решаются устройствами двух типов: стационарного и переносного. Стационарные устройства при своих значительных достоинствах способны диагностировать только мобильные, легко демонтируемые агрегаты, что отличает конструкцию малой доли всего оборудования. В связи с этим внимание в данной работе сделан на анализе переносных диагностических устройств.

Контролируемыми параметрами вибрационного состояния являются:

– среднеквадратичное значение виброперемещения;

– среднеквадратичное значение виброскорости;

– среднеквадратичное значение виброускорения.

Достоинство методов вибродиагностики заключается в возможности диагностики оборудования в процессе его работы. Получаемая вибрационная картина (спектрограмма), как совокупность амплитуд гармонических составляющих на определенных частотах. Для сбора и анализа спектрограмм требуется специальная аппаратура желательно с возможностью работы персонала с невысокой подготовкой по вибродиагностике. Вибродиагностика эффективна для машин, в конструкции которых есть вращающиеся элементы (определение дисбаланса), подшипники качения (степень износа), гидрооборудование (степень износа), электродвигатель (ослабление крепления обмоток статора и др.), что соответствует конструктивному исполнению компрессорного оборудования.

По результатам диссертационного исследования опубликовано 2 работы в научных изданиях.

Структура работы состоит из аннотации, автореферата, четырёх глав, заключения.

ABSTRACT

Master's thesis on the topic "Development of methods for diagnostics of equipment of auxiliary HPP systems" contains 38 pages of text document, 16 illustrations, 4 tables and 3 formulas.

Object of research: high-pressure reciprocating compressors.

The purpose of this work is to study the methods of vibration measurement using vibration diagnostics of high-pressure compressors.

Tasks to be solved in the course of the work:

a) Investigation of diagnosed compressor defects;

b) study of the vibration signal envelope spectrum method;

c) Selection of measurement points and vibration analyzer for measurements;

d) Analysis of the impact of vibration on reciprocating compressors.

Currently, hydroelectric power plants have a portable system for measuring vibration in compressor units, which allows them to meet the requirements of STO 02.02.122-2015.

This work is aimed at studying the auxiliary equipment of the pneumatic system, which, like other systems, ensures the normal operation of the main equipment of the HPP.

Vibration diagnostics tasks are solved by two types of devices: stationary and portable. Stationary devices with their significant advantages are able to diagnose only mobile, easily disassembled units, which distinguishes the design of a small proportion of all equipment. In this regard, this paper focuses on the analysis of portable diagnostic devices.

The controlled parameters of the vibration state are:

– RMS value of vibration displacement;

– RMS value of vibration velocity;

– RMS value of vibration acceleration.

The advantage of vibration diagnostics methods is the ability to diagnose equipment during its operation. The resulting vibration pattern (spectrogram), as a set

of amplitudes of harmonic components at certain frequencies. To collect and analyze spectrograms, special equipment is required, preferably with the ability to work with personnel with low training in vibration diagnostics. Vibrodiagnostics is effective for machines that have rotating elements in their design (determination of unbalance), rolling bearings (degree of wear), hydraulic equipment (degree of wear), electric motor (loosening of the stator windings, etc.), which corresponds to the design of compressor equipment.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 8

1 Аналитический обзор 9

1.1 Общие сведения 9

1.2 Пневматическое хозяйство ГЭС 9

1.3 Устройство и принцип работы поршневого компрессора 11

1.4 Вибрационные методы диагностики оборудования 13

1.5 Измеряемые параметры вибрационного состояния 16

1.6 Измерения во временном окне 18

2 Мониторинг технического состояния поршневых компрессоров 20

2.1 Общие положения 20

2.2 Организация мониторинга технического состояния 21

2.3 Диагностируемые признаки поршневых компрессоров 22

2.4 Информационно-измерительная техника для вибродиагностики 24

2.4.1 Измерительные датчики 25

2.4.2 Диагностические комплексы для проведения вибродиагностики 27

2.5 Структура системы мониторинга 35

3 Выбор точек измерения и направление измерений 37

4 Методика анализа амплитуды спектра огибающей вибросигнала 40

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 43

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 44

ВВЕДЕНИЕ

Объектам гидроэнергетики предъявляют высокие требования к безопасности основного оборудования. Обеспечение надежной работы оборудования, то есть его безотказной и безаварийной работы, является одной из важнейшей задачей эксплуатации. Оценка технического состояния любого оборудования выполняется по данным контроля, мониторинга и диагностики технических параметров.

В настоящее время в гидроэлектростанциях существует переносная система для проведения измерений вибрации в компрессорных установках, позволяющая выполнять требования СТО РусГидро 02.02.122-2015 «Методические указания. Гидроэлектростанции. Порядок оценки состояния вспомогательного оборудования».

Данная работа направлена на исследование вспомогательного оборудования системы пневматического хозяйства, которые также как и другие системы, обеспечивает нормальную работу основного оборудования ГЭС.

Цель работы. Исследование способов измерения вибрации методами вибродиагностики компрессоров высокого давления.

Для достижения данной цели сформулированы следующие **задачи**:

- Исследование диагностируемых дефектов компрессора;
- Исследование метода спектра огибающей вибросигнала;
- Выбор точек измерения и виброанализатора для проведения измерений;
- Анализ влияния вибрации на поршневые компрессоры.

Объект исследования: поршневые компрессоры высокого давления.

Практическая ценность.

- Результаты работы могут быть использованы при проведении измерений вибрации поршневых компрессоров;
- Мониторинг и анализ уровня вибраций в точках установки позволяет на ранних стадиях выявить дефекты деталей компрессоров.

1 Аналитический обзор

1.1 Общие сведения

Поршневые компрессоры являются машинами повышенной опасности в связи с работой при высоких давлениях, а постоянные вибрации и нагрев деталей при трении приводит к их неизбежным деформациям. Во время работы поршневых компрессоров неминуемо возникают вибрации [1]. Отслеживание и анализ уровня вибраций в определенных точках установки позволяет на ранних стадиях выявить дефекты деталей агрегата. Своевременная замена поврежденных деталей позволит предотвратить аварии.

Эксплуатируемые на протяжении длительного времени поршневые машины еще более нуждаются в контроле их состояния в связи с истечением срока службы отдельных узлов и деталей, которые имеют различный ресурс эксплуатации. То, что ремонт компрессоров в планово-предупредительном порядке не является экономически обоснованным и эффективным, неоднократно доказано практикой эксплуатации центробежных машин [6]. Поэтому мониторинг технического состояния поршневых компрессоров и переход на эксплуатацию, и обслуживание по их фактическому техническому состоянию является актуальной проблемой.

Задачи вибродиагностики решаются устройствами двух типов: стационарного и переносного. Стационарные устройства при своих значительных достоинствах способны диагностировать только мобильные, легко демонтируемые агрегаты, что отличает конструкцию малой доли всего оборудования. В связи с этим внимание в данной работе сделан на анализе переносных диагностических устройств.

1.2 Пневматическое хозяйство ГЭС

Прежде всего, система пневматического хозяйства предназначена для выполнения технологических операций, связанных с системой регулирования

гидроагрегатов. Кроме того, сжатый воздух требуется при ремонте оборудования и сооружений, для различных технических нужд.

Все потребители сжатого воздуха делятся на две группы:

- низкого давления (0,6 – 0,8 МПа), к которым на ГЭС относят: системы торможения агрегатов, системы отжатия воды из камеры рабочего колеса, устройства технических нужд, используемых при эксплуатации и ремонте оборудования и сооружений;
- высокого давления (2,0 – 6,3 МПа), к которым на ГЭС относят масловоздушные котлы МНУ (маслонаполненные установки) системы регулирования гидротурбин [4].

Согласно стандарту СТО РусГидро 02.02.122-2015 «Методические указания. Гидроэлектростанции. Порядок оценки состояния вспомогательного оборудования» потребителями сжатого воздуха пневматического хозяйства являются:

- система торможения агрегатов;
- система технических нужд (для пневматических инструментов, очистки и окраски);
- система создания полыньи;
- пневмогидравлическая аппаратура;
- система отжатия воды из камеры рабочего колеса гидротурбины;
- гидроаккумуляторы МНУ системы регулирования и управления;
- пневматические уплотнения ремонтных затворов;
- воздушные выключатели;
- пневмоприводы масляных включателей и разъединителей;
- система впуска воздуха в камеру рабочего колеса гидротурбины при работе в нестационарных режимах (при необходимости) [1].

Питание устройств, сжатым воздухом обеспечивают компрессорные установки, состоящие из компрессоров и воздухосборников (ресиверов). Компрессорные установки, используемые на ГЭС, работают в прерывистом режиме, включаясь в работу на непродолжительное время.

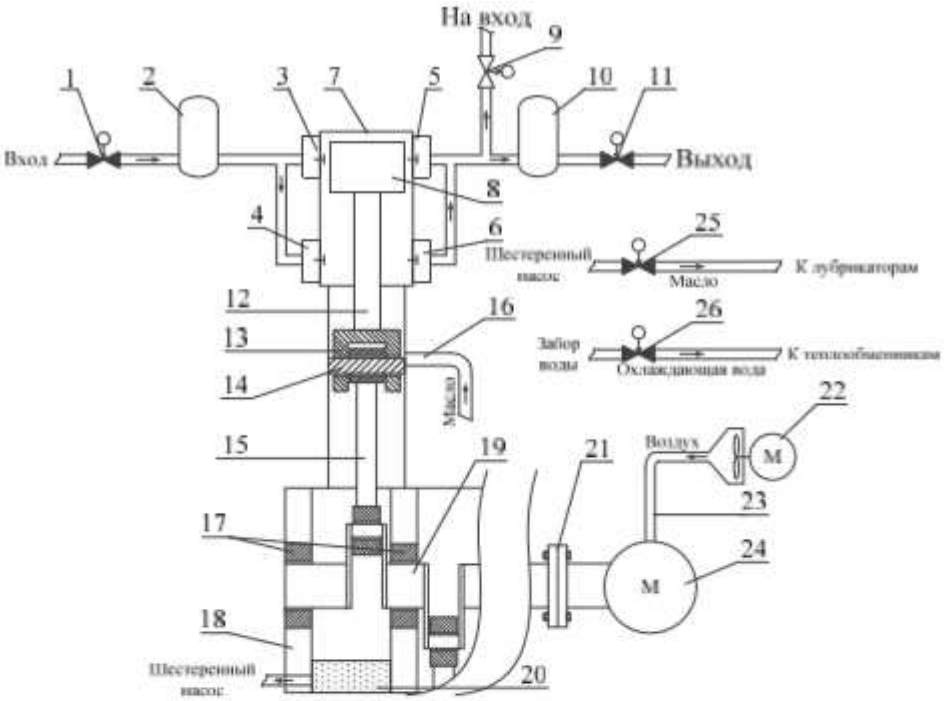
1.3 Устройство и принцип работы поршневого компрессора

В компрессорах происходит преобразования энергии от источника в энергию газа (сжатого воздуха). Полученная энергия приводит к увеличению давления газа (сжатого воздуха) и росту температуры сжимаемого вещества. По принципу действия компрессоры делятся:

- объемные;
- динамические;
- струйные.

Рассмотрим объемные компрессоры. Объемными называются компрессоры, преобразование энергии в которых происходит за счет периодического уменьшения объема рабочей камеры. Уменьшения объема связано с движение одной или двух стенок камеры. Рабочую камеру принято называть цилиндром, движущуюся стенку – поршнем, а компрессоры данного типа – поршневыми [5].

Разделяются компрессоры по количеству цилиндров, направление движения поршней, углом между поршнями и прочим характеристикам. Рассмотрим принцип работы поршневого компрессора двойного действия [5]. На рисунке 1.1 приведена схема данного компрессора.



1 – Входная задвижка
2 – Входной ресивер
3 – Верхний клапан всасывания
4 – Нижний клапан всасывания
5 – Верхний клапан нагнетания
6 – Нижний клапан нагнетания
7 – Цилиндр
8 – Плунжер (поршень)
9 – Аварийный клапан
10 – Выходной ресивер
11 – Выходная задвижка
12 – Шток
13 – Ползун (крейцкопф)
14 – Палец крейцкопфа
15 – Шатун
16 – Канал подачи масла в крейцкопф
17 –Коренные подшипники
18 – Станина
19 – Коленчатый вал
20 – Масло
21 – Соединительная муфта
22 – Двигатель обдува
23 – Обдув главного двигателя
24 – Главный двигатель
25 – Задвижка канала масла
26 – Задвижка канала воды

Рисунок 1.1 – Схема работы поршневого компрессора двойного действия

Входная (1) и выходная (11) задвижки, которые отделяют компрессор от внешней части установки. Во входном ресивере (2) происходит подготовка газа (воздуха) к сжатию. В выходном ресивере (10) происходит обработка газа после сжатия (сглаживание пульсаций давления, возможна установка теплообменника для охлаждения газа). Верхний клапан всасывания (3) закрывается при движении поршня (8) в цилиндре (7) вверх, в это время открывается верхний клапан нагнетания (5). При движении поршня вниз закрывается нижний клапан всасывания (4), а нижний клапан нагнетания (6) открывается. Таким образом,

сжатие газа происходит дважды за цикл.

Аварийный клапан (9) открывается при превышении давления в выходном ресивере. Избыток газа сбрасывается либо в безопасное для людей место, либо на вход компрессора для повторного сжатия. Главный двигатель (24) соединен коленчатым валом (19) компрессора с помощью соединительной муфты (21). На рисунке 1.1 представлено коаксиальное соединение двигателя и компрессора. Коленчатый вал закреплен в станине (18). Для снижения трения вращения коленчатого вала используются подшипники (17). Вращение коленчатого вала приводит в движение шатун (15). Сложное движение шатуна преобразуется в поступательное движение штока (12) с помощью крейцкопфа (13). Соединение крейцкопфа с шатуном осуществляет цилиндрический палец (14). Для снижения трения и охлаждения подшипников и крейцкопфа используют смазочное масло (18), заливающееся в низ станины. Оттуда масло поступает в теплообменники для охлаждения, а после под давлением, создаваемым шестеренчатым насосом, подается на крейцкопф (16) и подшипники. Далее отработанное масло стекает обратно в станину. Охлаждение масла и газа осуществляется в теплообменниках. В роли хладагента используется вода. В нерабочее время возможно перекрыть каналы подачи масла и воды с помощью клапанов (25) и (26) соответственно. Для охлаждения двигателя применяется обдув воздухом по каналу обдува (23). Воздух приводится в движение с помощью турбины, вращаемой вспомогательным двигателем (22). Для эффективности возможно добавление в канал обдува теплообменника, для охлаждения обдувающего воздуха.

1.4 Вибрационные методы диагностики оборудования

Для определения технического состояния компрессорного оборудования существуют различные методы диагностики [6]:

- Органолептический – используют для предварительной оценки состояния установки. Так, в неисправном оборудовании появляются

нехарактерные шумы, стуки, увеличение температуры, по которым судят о характере дефекта.

- Параметрический – (по термогазодинамическим параметрам) широко применяется при контроле за состоянием цилиндропоршневой группы и клапанов, разгерметизации уплотнений и т. п.

В качестве диагностических признаков используются параметры давления и температуры воздуха ступеней компрессора, его производительность, температура и др. Результаты измерений представляются на регистрирующих устройствах. Также к этим параметрам могут измеряться уровень вибрации, температура подшипников, давление масла.

- Вибрационный – для контроля технического состояния данный метод является наиболее информативным. Он основан в информации, которые содержится в колебательных явлениях под действием механических воздействий, от подвижных частей или поток пульсирующего воздуха.

Рассмотрим данный метод подробнее. Следует отметить, что развитие любого дефекта оборудования приводит не столько к увеличению общего уровня вибрации, сколько к возрастанию амплитуды отдельных гармоник, хотя и незначительно относительно общего уровня вибрации. Поэтому контроль поведения отдельных частотных составляющих позволяет выявлять различные дефекты и следить за ходом их развития.

Среди методов неразрушающего контроля одним из самых действенных считается вибродиагностический – вибродиагностика. Вибродиагностика – это метод технической диагностики, основанный на измерении и анализе параметров вибрации объекта диагностики [5].

Достоинство методов вибродиагностики заключается в возможности диагностики оборудования в процессе его работы. Получаемая вибрационная картина (спектрограмма), как совокупность амплитуд гармонических составляющих на определенных частотах. Для сбора и анализа спектрограмм требуется специальная аппаратура желательно с возможностью работы персонала с невысокой подготовкой по вибродиагностике. Вибродиагностика

эффективна для машин, в конструкции которых есть вращающиеся элементы (определение дисбаланса), подшипники качения (степень износа), гидрооборудование (степень износа), электродвигатель (ослабление крепления обмоток статора и др.), что соответствует конструктивному исполнению компрессорного оборудования.

Рассмотрим существующие методы.

Диагностика по общему уровню вибрации получила распространение за счёт простой оценки технического состояния по общему уровню вибросигнала и, в связи с этим, реализуется персоналом без специальной подготовки по вибродиагностике. За критерий уровня вибрации чаще всего принимается среднеквадратичное значение скорости (СКЗ). Недостаток метода заключается в определении дефектов последней стадии их развития, другими словами проводится предаварийная диагностика объектов. Диагностика дефектов проводится на соответствие общего уровня вибрации нормативным уровням вибрации для определенного типа механизма. При превышении уровня вибрации допустимых норм диагностируемый объект признается неисправным.

Диагностика по спектральным диаграммам предназначена для определения дефектов в середине процесса развития. Метод основан на различимости уровня энергии резонансных колебаний на общей картине частотного распределения всей мощности вибросигнала. Метод требует специального спектроанализатора для получения амплитудного спектра и подготовленного персонала для его анализа. В большинстве нормативных документов по вибрации в качестве нормируемого параметра вибрации принимается СКЗ для контроля технического состояния объекта, а уровень частот – 10…1000Гц.

Диагностика по соотношению пик/фон вибросигнала метод имеет несколько эффективных модификаций для: обнаружения сигнала высокой частоты, измерения ударных импульсов и измерение энергии импульса. Метод позволяет выявлять дефекты на ранних стадиях простыми приборами.

Вибрационная диагностика по энергетическому спектру показывает

распределение энергии сигнала в частной области, по которому можно сделать вывод о техническом состоянии отдельных узлов агрегатов.

Вибродиагностика по акустической эмиссии представляет собой анализ сверхвысокочастотных колебаний (0,1–10 МГц), появляющихся при нарушении структуры металла.

Метод диагностики по спектрам огибающих. Эффективным методом обнаружения дефектов на ранних стадиях из-за помехоустройчивости и тем самым, большей достоверности. Параметры спектра позволяют определить свойства случайной вибрации. Наличие амплитудной модуляции из-за дефектов в узлах трения проявляется по огибающим амплитудам и частотам гармонических составляющих.

В бездефектных узлах трения силы трения и уровень возбуждаемой ими случайной вибрации стабилен во времени. Гармонические составляющие в спектре огибающей вибрации таких узлов отсутствуют. Если силы трения и вибрация из-за дефекта приобретают амплитудную модуляцию, то частота модуляции определяет вид, а глубина модуляции – величину дефекта. В спектре огибающей они определяются частотами и амплитудами появившихся гармонических составляющих.

1.5 Измеряемые параметры вибрационного состояния

В соответствие со стандартом ГОСТ Р 10816-8 – 2016 оценку вибрационного состояния оборудования осуществляется на основе совместных измерений перемещения, скорости и ускорения на корпусах установок [2]. Контролируемыми параметрами являются:

– среднеквадратичное значение виброперемещения, в диапазоне частот от 2 до 200 Гц;

– среднеквадратичное значение виброскорости, в диапазоне частот от 2 до 1000 Гц;

– среднеквадратичное значение виброускорения, в диапазоне частот от 2 до

3000 Гц;

–квантиль уровня 0,97 виброперемещения, в диапазоне частот от 2 до 200 Гц;

–квантиль уровня 0,97 виброускорения, в диапазоне частот от 2 до 10000 Гц;

Среднеквадратичные значения ускорения, скорости или перемещения, а также квантили перемещения и ускорения измеряют на интервале времени, не меньшем четырех периодов вращения вала.

Амплитуды смещения, скорости и ускорения колебаний с синусоидальной формой волны имеют математически точно определенную взаимную связь. Следовательно, при измерении вибраций достаточно определить лишь один из этих параметров, а остальные два могут быть найдены на основе получаемых результатов.

Все три измеряемые величины (перемещение, скорость и ускорение) могут быть определены с помощью единственного преобразователя вибрации, в качестве которого предпочтительно использовать акселерометр. Тогда скорость и перемещение могут быть получены соответственно интегрированием и двойным интегрированием выходного сигнала акселерометра.

Возьмем, например, общее выражение для мгновенного значения ускорения гармонического колебания с максимальной амплитудой A_0 и угловой частотой ω:

$$a = A_0 \sin(\omega t) \qquad (1)$$

Мгновенное значение скорости можно определить путем однократного интегрирования:

$$v = \int A_0 \cdot \sin(\omega t) \cdot dt = -\frac{A_0}{\omega} \cdot \cos(\omega t) \qquad (2)$$

Мгновенное значение смещения находится из выражения (1) путем двукратного интегрирования:

$$d = \iint A_0 \cdot \sin(\omega t) \cdot dt = \int V \cdot dt = -\frac{A_0}{\omega^2} \cdot \sin(\omega t) \qquad (3)$$

Из приведенных выше формул следует, что однократное интегрирование ускорения по времени с целью определения скорости равносильно его делению

на угловую частоту ω, в то время как двукратное интегрирование ускорения для определения смещения соответствует его делению на ω^2. Форма волны и период рассматриваемых колебаний идентичны для смещения, скорости и ускорения. Главное различие этих трех параметров заключается во взаимном фазовом сдвиге их кривых, отображающих зависимость амплитуды от времени.

Чтобы не нарушать целостность корпусов установок датчики следует устанавливать на специальные держатели. Допускается закрепление держателя с помощью других средств (например, клея или магнитов) если эти средства не будут значительно искажать измерения.

Нормы на вибрацию компрессорных агрегатов (компрессор-двигатель) определены в документации завода изготовителя. В случае отсутствия документации двойная амплитуда вибрации подшипников электродвигателей, сочлененных с механизмами, не должна быть выше значений, указанных в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Нормы вибрации компрессорных установок

Синхронная частота вращения, об/мин	3000	1500	1000	750 и менее
Двойная амплитуда колебаний, мкм	30	60	80	95

1.6 Измерения во временном окне

Фазы цикла и временные интервалы измерения параметров вибрации определяют из расчета газодинамики компрессора и циклограммы работы поршневого компрессора на основе анализа зависимости диаграммы движения (поднятия и опускания) запирающих органов клапанов (например, пластин) от угла поворота вала.

На рисунке 1.2 показана циклограмма работы поршневого компрессора в виде зависимости высоты поднятия x запирающих органов (пластин) клапанов от фазы цикла с указанием временных интервалов измерения параметров.

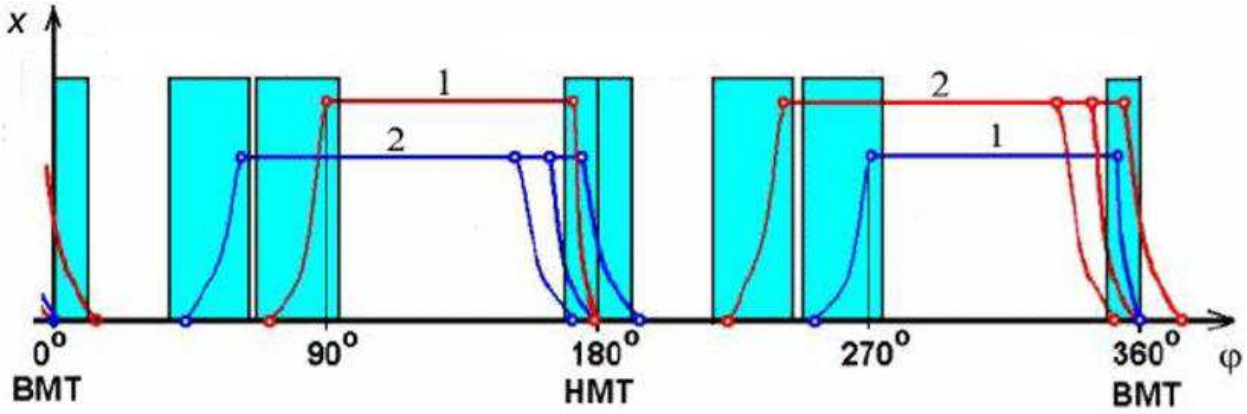


Рисунок 1.2 - Циклограмма работы поршневого компрессора (зависимость высоты поднятия пластины клапана от угла поворота вала)

На рисунке 1.2 под цифрами изображены: 1 - сжатие; 2 - впуск; ВМТ - верхняя мертва точка; НМТ - нижняя мертвая точка

Устанавливают четыре зоны вибрационного состояния:

Зоны А и В: Компрессорные установки, вибрация которых попадает в эти зоны, обычно считают пригодными для дальнейшей эксплуатации без ограничения сроков.

Зона С: Компрессорные установки, вибрация которых попадает в эту зону, обычно рассматривают как непригодные для длительной непрерывной работы. Обычно такие установки могут функционировать ограниченный период времени, пока не появится подходящая возможность для проведения ремонтных работ.

Зона D: Уровни вибрации в данной зоне обычно рассматривают как достаточно серьезные, для того чтобы вызвать повреждение компрессора и присоединенного оборудования.

2 Мониторинг технического состояния поршневых компрессоров

2.1 Общие положения

Функционирующие и вводимые в эксплуатацию поршневые компрессоры в большинстве случаев являются незаменимым оборудованием в технологическом процессе предприятий энергетического комплекса. В Правилах устройства и безопасной эксплуатации компрессорных установок с поршневыми компрессорами, с целью мониторинга состояния указано:

- следует оборудовать контрольно-измерительными приборами для измерения температуры, давления, расхода и других параметров, требующихся для контроля параметров установки;

- в проектной документации для новых или реконструируемых машин следует предусматривать контроль вибрации цилиндров, межступенчатых аппаратов, трубопроводов, подшипников электродвигателей;

- следует предусматривать дополнительные приборы для контроля параметров компрессорных установок, если это необходимо для безопасной эксплуатации, например мониторинга вибрации и пр.

Кроме того, при автоматизированном контроле параметров работы компрессорных установок рекомендуется их оснащать программами контроля, анализа и диагностики, обеспечивающими обработку данных и выдачу обобщенных выводов о работоспособности компрессоров и рекомендаций о проведении регламентных или ремонтных работ.

Эксплуатируемые на протяжении длительного времени поршневые машины еще более нуждаются в контроле их состояния в связи с истечением срока службы отдельных узлов и деталей, которые имеют различный ресурс эксплуатации. То, что ремонт компрессоров в планово-предупредительном порядке не является экономически обоснованным и эффективным. неоднократно доказано практикой эксплуатации центробежных машин [5]. Поэтому мониторинг технического состояния поршневых компрессоров и переход на эксплуатацию и обслуживание по их фактическому техническому

состоянию является актуальной проблемой.

2.2 Организация мониторинга технического состояния

Под мониторингом технического состояния агрегата (мониторинг агрегата) понимают наблюдение и диагностирования технического состояния агрегата (машины, узла, механизма) с целью предсказания и определения момента перехода в предельное состояние. Результат мониторинга агрегата представляет собой совокупность диагнозов составляющих его субъектов (конструкций, машин, узлов, механизмов), получаемых на неразрывно примыкающих друг к другу интервалах времени, в течение которых состояние агрегата существенно не изменяется. Принципиальным отличием мониторинга состояния от мониторинга параметров является наличие интерпретатора результатов диагностирования в терминах технического состояния (экспертная система поддержки принятия решения о состоянии объекта и дальнейшем управлении).

Под техническим диагностированием агрегата понимают процесс получения технического диагноза, включающий диагнозы наиболее важных субъектов, составляющих агрегат (объект диагностирования) и определяющих полноту диагностирования агрегата.

Под диагностическим признаком понимают характеристики физического процесса или сигнала, содержащие информацию о параметрах технического состояния объекта.

Основой для разработки технологии диагностирования поршневых машин является возможность измерения параметров процессов, характеризующих работу машин (давление, температура. расход и др.) и сопровождающих её вибрацию.

2.3 Диагностируемые признаки поршневых компрессоров

При проектировании поршневых компрессоров основными заданными параметрами являются производительность и отношение давлений. При этом характеристикой, отражающей адекватность функционирования компрессора, является зависимость давления в полости нагнетания компрессора от положения поршня.

При производстве компрессоров, как правило, именно в соответствии с этой характеристикой осуществляют приемку изготовленного компрессора и предусматривают места для установки датчиков. Анализ индикаторной диаграммы позволяет выявить правильность функционирования клапанов и появление неисправностей в них, увеличение зазоров между клапанными пластинами, появление утечек, а также увеличение зазоров между поршнем и гильзой, зазоров в узлах кривошипно-ползунного механизма.

Другими информативными параметрами, характеризующими эффективность работы компрессора, являются давление газа на входе и выходе и его температура. Данные параметры можно измерять статическими датчиками, однако динамическая картина (изменение параметров в зависимости от угла поворота вала) может существенно упростить диагностирование.

Одним из важнейших параметров, сопровождающих работу компрессора, является уровень конденсата в сепараторе или ресивере. Установка датчика уровня позволяет предотвратить возникновение гидроударов в полости нагнетания и объяснить отклонения от номинальных значений параметров прочих процессов.

Диагностируемые дефекты поршневых компрессоров.

Дефекты кривошипно-шатунного механизма

- *диагностические признаки:*
- наличие ударных вибраций на временном графике при изменении направления движения шатуна вдоль цилиндра свидетельствует о наличии

увеличенного зазора на коленчатом валу или крейцкопфе;

- если же ударные вибрации наблюдаются только в моменты смены поперечного движения шатуна, то это указывает на наличие увеличенных зазоров только в шатунных подшипниках.

Увеличенный зазор крецкопфа

- *диагностические признаки:*
- появление пика вибрации в спектре датчика, установленного вертикально на крейцкопфе. Помимо определения дефекта крейцкопфа, по изменению спектрального состава сигнала можно судить об остаточном ресурсе работы данного цилиндра.

Дефекты цилиндра (недостаточная компрессия, износ уплотнений и рабочих поверхностей)

- *диагностические признаки:*
- дефекты обнаруживаются по участкам спектров, в которых скорость движения поршня не изменяется во много раз.

Дефекты выпускного клапана

- *диагностические признаки:*
- износ и нарушение фаз газораспределения определяется через анализ колебаний, обусловленных перемещением масс сжатого газа. Диагностическая информация содержится в графике изменения вибрации на участке, где присутствуют колебания с примерно одинаковой амплитудой, но с центральной (нулевой) линией, наклоненной к оси времени. Выводы о наличии дефектов и степени их развития делают по изменению во времени амплитуды и частоты этих колебаний и углу наклона нулевой линии.

Весьма информативным процессом, сопровождающим работу поршневой машины, является вибрация. Современные пьезоакселерометры позволяют измерять не только механические колебания тела, связанные с неуравновешенностью движущихся масс, но и упругие колебания, порождённые соударением различных тел, которые обычно называют *акустическими*. С акустикой обычно связывают представления о волнах,

распространяющихся в различных средах (воздух, жидкости, твердые тела). Частота таких колебаний может находиться в диапазоне от нескольких десятков Гц до нескольких МГц.

Таким образом, виброакустический сигнал на выходе пьезоакселерометра (параметры колебаний различной природы) можно использовать для диагностирования.

Учитывая возвратно-поступательный характер движения основных узлов поршневых машин, для выделения диагностических признаков используют временную селекцию сигналов, полезность и эффективность которой подтверждена на практике. Для выделения сигнала в определенные моменты времени используют датчик угла поворота вала, сигнал от которого обычно поступает в момент нахождения одного из поршней в верхней или нижней мёртвой точке.

Весьма важным является контроль давления, температуры и расхода в масляной системе компрессора. Для этой цели могут быть использованы первичные преобразователи статических величин.

Состояние коренных подшипников чаще всего контролируют по температуре вкладышей. Измерение вибрации коренных подшипников позволяет выявить износ на ранней стадии.

Одним из ответственных узлов поршневого компрессора является клапан. Обычно о его разрушении судят по температуре клапана. Измерение вибрации клапанов позволяет обнаружить неисправности и разрушения клапанов на ранней стадии.

2.4 Информационно-измерительная техника для вибродиагностики

Современный уровень развития информационно-измерительной техники дает возможность организовать сбор и обработку данных синхронно и асинхронно по множеству каналов с привязкой к углу поворота вала в заданном диапазоне частот - от долей Гц до нескольких МГц. Для вычисления

диагностических признаков используют мощности компьютеров и цифровых сигнальных процессоров. Однако при разработке информационно-вычислительных систем для мониторинга поршневых машин определяющим фактором является стоимость. При этом, как правило, основная проблема состоит в обеспечении взрывобезопасности системы. Учитывая, что скорость развития неисправностей ограниченна, исходя из необходимого периода опроса измерительных каналов

В общем случае структурная схема измерения вибрации состоит из трех элементов на рисунке 2.1.

Рисунок 2.1 – Структурная схема измерения вибрации

2.4.1 Измерительные датчики

При регистрации параметров вибрации применяют два принципа измерения: динамический и кинематический.

Первый основан на измерении на измерении координаты точки контролируемого объекта относительно выбранной неподвижной системы координат. Датчики, использующие этот принцип, относятся к устройствам инерционного действия и осуществляют измерение параметров абсолютной вибрации. Второй – параметров вибрации относительно искусственной неподвижной системы отсчета.

По принципу действия такие датчики делятся на параметрические и генераторные.

В параметрических датчиках под воздействием измеряемой механической величины изменяется какой-либо электрический параметр преобразующего элемента, модулирующий электрическое напряжение или ток, создающиеся

внешним источником. Генераторные датчики осуществляют непосредственное преобразование механической энергии в электрическую.

При вибрационной диагностике узлов компрессорного оборудования используют в основном пьезоэлектрические датчики (акселерометры) (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Достоинства и недостатки пьезоэлектрических датчиков

Достоинства	Недостатки
Высокие метрологические свойствами Широкий амплитудный и частотный диапазон Высокая надежность Сравнительно низкая стоимость	Высокое выходное сопротивление Слабая помехозащищенность

Пьезоэлектрические датчики ускорения (ПДУ) относятся к классу генераторных датчиков инерционного действия. Принцип действия датчика основан на прямом пьезоэффекте, т.е. на генерации электрических зарядов на электродах пьезоэлемента под действием инерционных сил, возникающих в результате вибрации объекта, с закреплённом на нем ПДУ.

Конструкция ПДУ, изображенного на рисунке 2.2, состоит из жестко связанных инерционного 2 и упругого элементов 7, пьезоэлемента 6, токосъемной пластины 3 и корпуса 1. Датчик закрепляется на объекте в точке измерения виброускорения вдоль оси чувствительности датчика, например, при помощи резьбового хвостовика 5. В результате продольной деформации пьезоэлементана на его электродах 4 генерируется электрический заряд.

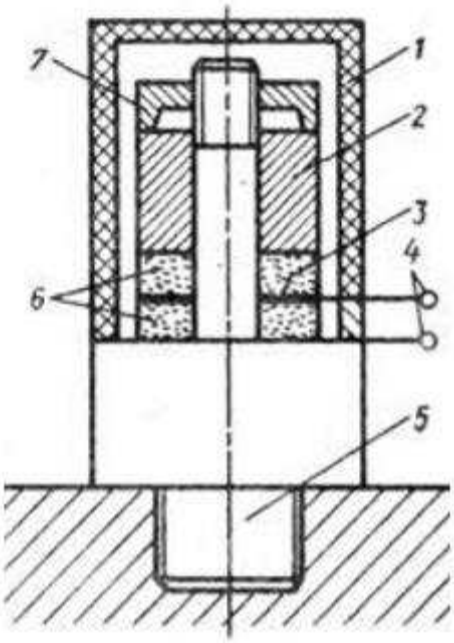


Рисунок 2.2 – Схема акселерометра

2.4.2 Диагностические комплексы для проведения вибродиагностики

Обязательным условием проведения вибродиагностики поршневых машин является использование устройства для многоканального синхронного считывания вибросигналов. Количество необходимых каналов контроля вибрации зависит от типа диагностируемого оборудования, но даже для "простейшего поршневого компрессора" каналов должно быть от 4 и выше.

В соответствии с вышеизложенным требованием для проведения вибрационной диагностики компрессорных установок возможно использование многоканальных анализаторов вибросигналов. В качестве примера рассмотрим оборудование компании "Диамех", переносную диагностическую систему «Изумруд-8» и «Изумруд-16».

Переносной многоканальный диагностический комплекс

Комплекс ИЗУМРУД позволяет проводить комплексные исследования сложных агрегатов. Эти исследования могут включать в себя измерение абсолютной и относительной вибрации, определение температур, тепловых расширений и др. Система позволяет проводить анализ динамических

характеристик оборудования, определять собственные частоты (резонансы) и собственные формы колебаний (моды) фундамента, опор.

Комплексы «Изумруд-8» и «Изумруд-16», изображены на рисунке 2.3 и рисунке 2.4 соответственно.

Рисунок 2.3 – 8-канальный диагностический комплекс «Изумруд-8»

Рисунок 2.4 – 16-канальный диагностический комплекс «Изумруд-16»

Переносная диагностическая система позволяет проводить диагностические исследования крупного вращающегося оборудования, в том

числе компрессорного оборудования. Она определяет абсолютную и относительную вибрацию, температуру, тепломеханические деформации и перемещения различных элементов конструкции одновременно по 16-и каналам.

Ниже в таблице 2.2 приводятся основные параметры комплексов.

Таблица 2.2 – Основные параметры диагностических комплексов

	Изумруд-8	Изумруд-16
Измерительные каналы	8 универсальных, синхронных, параллельных 1 канал тахометра	16 универсальных, синхронных, параллельных 1 канал тахометр
Частотный диапазон	0…10500 Гц	
Динамический диапазон	более 90дБ	
Диапазон частот вращения	3…15000 об/мин	
Параметры подключения	17 мВ…10 В	
Контролируемые параметры	Абсолютная вибрация, относительная вибрация, линейные перемещения, температура, фаза и др.	
Базовое ПО	АЛМАЗ-Монитор, ИЗУМРУД	
Обработка данных	На внешнем ПК	Встроенный пром. ПК
Отображение данных	На внешнем ПК	На внешнем мониторе
Напряжение питания	DC 12 В	AC 220 В / DC 12

Функциональные возможности комплекса:

• Одновременный опрос всех измерительных каналов;

• Вычисление диагностических параметров;

• Архивация результатов измерений совместно с дампами вибросигналов;

• Визуализация результатов на экране дисплея;

• Передача результатов измерений в локальную сеть в течение одного измерительного цикла;

• Вычисление частот и фаз вращения валов, амплитуд и фаз 1 и 2 гармоник, спектров вибросигналов, СКЗ вибросигналов в выбранных полосах частот, средних значений статических параметров (температур, уклонов, расширений и т.п.);

• Снятие амплитудных и фазовых характеристик;

• Снятие амплитудных и фазовых характеристик во время разгона/выбега агрегата;

• Определение контурных вибрационных характеристик во время разгона/выбега;

• Определение динамической жесткости и затухания различных элементов конструкции агрегата (ротор, опоры, фундамент и т.п.);

• Определение температурных полей и температурных градиентов конструкций;

• Определение тепломеханических деформаций;

• Определение линейных перемещений опор и цилиндров;

• Определение относительного расширения и осевого сдвига ротора;

• Определение уклонов опор и цилиндров, высотного положения опор.

Программный комплекс системы включает в себя блок сбора данных и блок отображения информации и анализа данных.

ПО блока сбора данных:

• Проверка и калибровка всех каналов измерений;

• Конфигурирование блока в зависимости от подключенных датчиков и режимов измерения;

• Сбор и математическая обработка данных со всех подключенных каналов одновременно;

• Вычисление диагностических параметров;

• Передача результатов измерений в блок отображения информации и анализа данных.

ПО блока отображения и анализа данных

• Управление работой блоками сбора данных в вычислительной сети;

• Визуализация результатов испытаний, построение трендов и скоростных характеристик в реальном времени во время пусков-остановов агрегатов;

• Просмотр архивов трендов вибрационных данных по всем каналам (тренды частоты вращения, СКЗ в полосах частот, амплитуд и фаз гармоник);

• Просмотр архивов скоростных характеристик;

• Просмотр архивов дампов сигналов и построение траекторий движения (орбит), спектров вибрации и каскадов спектров;

• Просмотр архивов трендов статических параметров синхронно с данными по вибрации;

• Экспорт данных в виде таблиц и графиков;

• Расчет амплитуд и фаз любых гармоник, взаимных спектров, форм сигналов с помощью функций дополнительной сигнальной обработки.

В качестве примера рассмотрим на рисунке 2.5 и на рисунке 2.6 результат испытаний и построение трендов и скоростных характеристик.

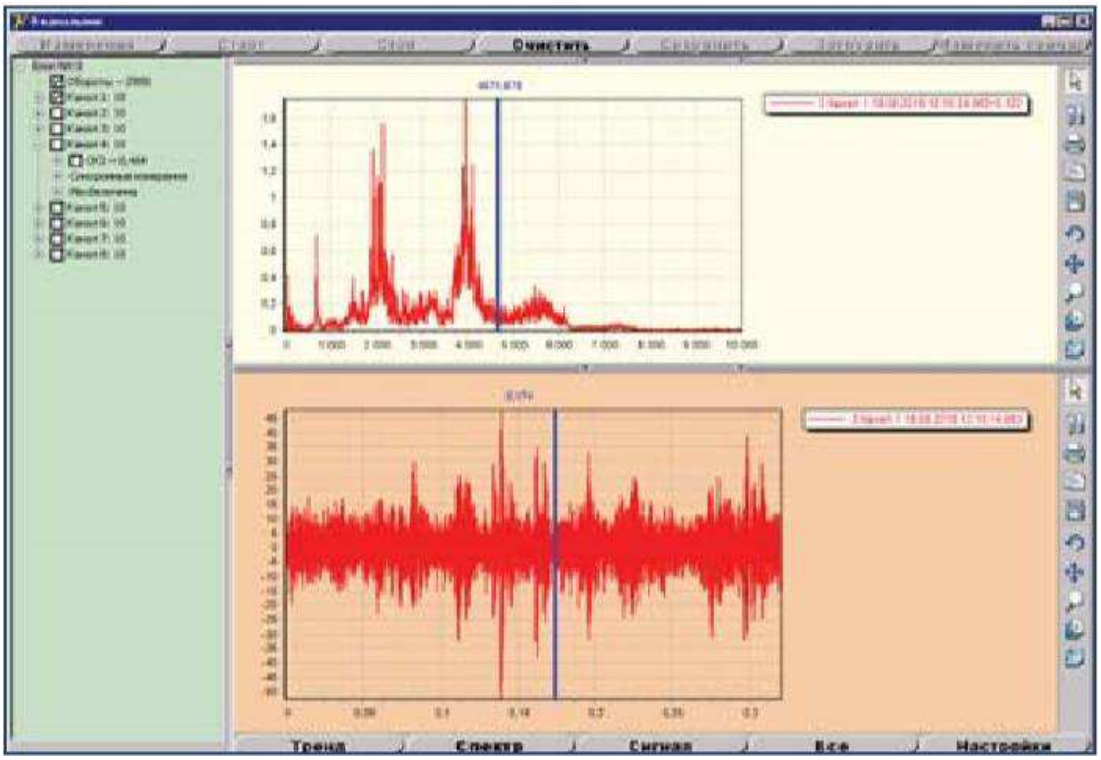


Рисунок 2.5 – Визуализация результатов испытаний, построение трендов и скоростных характеристик.

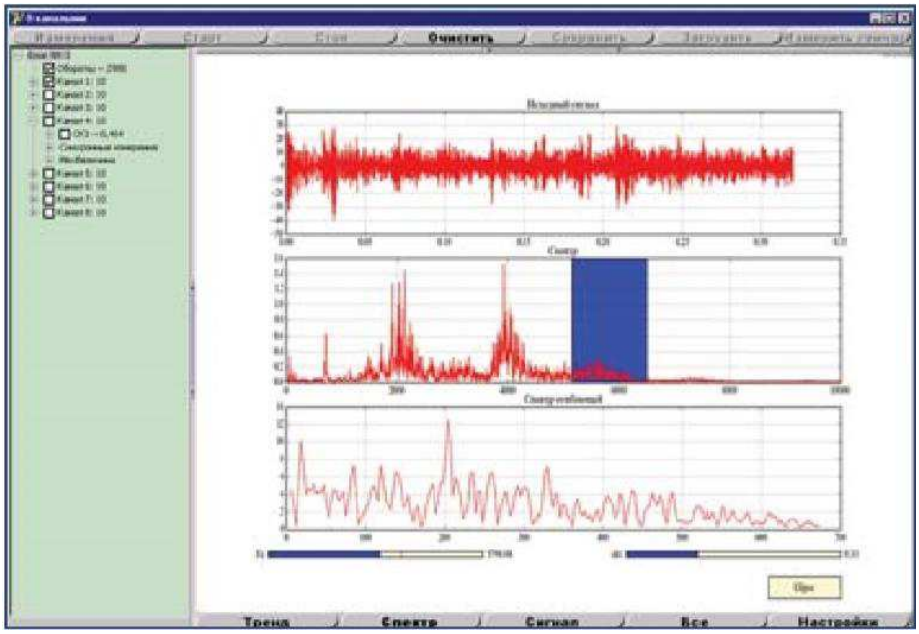


Рисунок 2.6 –Результаты испытаний, построение трендов и скоростных характеристик.

Переносная система для виброконтроля ОНИКС компании Диамех

В качестве примера на рисунке 2.7 изображен внешний вид анализатора вибрации ОНИКС.

Рисунок 2.7 – Анализатор вибрации ОНИКС.

Анализатор вибрации ОНИКС необходим для обработки и анализа

получаемого вибросигнала. Портативный прибор вибродиагностики компании ДИАМЕХ, воплотил в себе новую концепцию построения систем онлайн диагностики с использованием переносных виброанализаторов. Теперь вся информация о техническом состоянии агрегата доступна на экране прибора, анализ результатов измерений и оценка изменений текущего состояния агрегата происходит непосредственно в момент измерений. Виброанализатор ОНИКС представляет новый стандарт современной вибродиагностики, ориентированной на сокращение временных затрат и своевременное принятие решений о техническом состоянии оборудования.

Ниже в таблице 2.3 приведены основные параметры.

Таблица 2.3 – Основные параметры диагностической системы

	ОНИКС
Измерительные каналы	2 канала вибрации (синхронные, независимые) 1 канал тахометра
Частотный диапазон	2…40000 Гц
Динамический диапазон	более 100 дБ
Основные функции обработки	Общий уровень Форма сигнала Дамп временного сигнала Спектр Спектр огибающей Спектр собственных частот Спектр 1/3 октавный Разгон / Выбег Амплитуда / Фаза Пик-фактор Эксцесс
Основные режимы работы	Анализатор вибрации Онлайн диагностика Балансировочный прибор
Контролируемые параметры	Абсолютная вибрация, относительная вибрация, линейные перемещения, температура, фаза и др.
Операционная система	Win CE 6.0
Подключение к ПК	Ethernet 10/100 Мбит/с

Онлайн диагностика

• Анализ изменений вибрационного состояния в реальном времени;

• Хранение в памяти прибора настроек часто используемых замеров;

• 2-канальный анализ, кросс-спектры;

• 2-канальный модальный анализ;

• Создание эталонов технического состояния;

• Сравнение замеров с эталонами;

• Анализ динамики, построение трендов;

• Планировщик замеров;

• Построение орбит;

• Анализ полных спектров;

• Прогноз технического состояния на основании трендов;

• Построение дампов, обработка дампов;

• Генерация диагностических отчетов в формате MS Office в приборе.

Анализ переходных процессов синхронно по 2 каналам

• Получение АФЧХ;

• Коррекция фазовой характеристики;

• Диаграмма Боде;

• Временные спектральные характеристики в 3D;

• Частотные спектральные характеристики;

• Отображение спектрограмм;

• Запись формы сигнала при переходном процессе;

• Разгон-выбег во временной области.

Достоинствами данной системы являются:

- Наличие всех комплектующих на Российском рынке;
- Относительная дешевизна;
- Наличие программного обеспечения, который облегчает обработку и анализ данных.

Недостатками системы являются:

- Необходимость периодического разворачивания данного комплекса;

- Большой объем работ и время, которое уходит на установку датчиков;

2.5 Структура системы мониторинга

Стационарная система мониторинга, включает диагностическую станцию с комплектом аппаратуры, обеспечивающим:

- измерение параметров любых физических величин;
- передачу измеренной и обработанной информации в диагностическую сеть через сетевое оборудование;
- вывод информации о результатах работы экспертной системы поддержки принятия решений о состоянии объекта и дальнейшем управлении;
- сохранение информации о результатах работы системы;
- сохранение и отображение трендов диагностических признаков;

В диагностическую станцию может передаваться информация из переносной диагностической системы.

Сбор данных

Диагностическая станция стационарной системы позволяет принимать аналоговые и цифровые данные и выдавать цифровые управляющие сигналы по дифференциальным каналам.

Экспертная система поддержки принятия решения системы основывается на анализе параметров физических процессов, характеризующих работу машин (давление, температура газа и т.п.) и сопровождающих её (вибрацию, температура узлов), изображена на рисунке 2.8.

Рисунок 2.8 – Экспертная система принятия решений.

Система мониторинга технического состояния по опыту эксплуатации

Важнейшим источником сокращения издержек производства является ресурсосберегающая эксплуатация оборудования на основе непрерывного мониторинга его технического состояния в реальном времени, что позволяет:

- предотвращать неожиданные неисправности и остановки производства;
- непрерывно, в автоматическом режиме, получать и использовать объективную информацию о техническом состоянии оборудования;
- контролировать и корректировать действия персонала в реальном времени путем интегрирования информации систем в единой диагностической сети, с единой базой данных параметров мониторинга на неразрывно примыкающих друг к другу интервалах времени, в течение которых состояние оборудования существенно не изменяется.

Все это обеспечивается мониторингом технического состояния оборудования и переходом на эксплуатацию по фактическому техническому состоянию. Система мониторинга технического оборудования позволяет целенаправленно и надёжно контролировать состояние оборудования, в том числе поршневых компрессоров.

3 Выбор точек измерения и направление измерений

Расположение датчиков вибрации на поршневом компрессоре выглядит следующим образом.

Каждый цилиндр поршневого компрессора оснащен одним-тремя датчиками вибрации, один из которых установлен непосредственно на компрессоре, а один или два цилиндровых датчика установлены на коробках клапанов. Кроме того, один датчик вибрации обычно устанавливается вертикально на траверсе цилиндра, чтобы можно было контролировать величину вертикального зазора между поверхностями скольжения. Для контроля состояния основных подшипников в зоне подшипника установлен по крайней мере один датчик вибрации. [2]

Измерения производят в следующих направлениях:

компрессор с V-образным расположением цилиндров:

- в каждой точке измерений на фундаменте, корпусе, устройстве выравнивания пульсаций и трубопроводе в трех взаимно перпендикулярных направлениях X, Y и Z, как показано на рисунке 3.1;
- на каждом цилиндре в трех взаимно перпендикулярных направлениях X1 (перпендикулярно штоку поршня), Y1 (перпендикулярно к штоку поршня) и Z1 (параллельно штоку поршня), как показано на рисунке 3.1.

Указанные точки используют для всех компрессоров с V-образным расположением цилиндров, рассмотрены на рисунке 3.1, где под цифрами изображены:

1– болтовое крепление;

2 – угол корпуса;

3 – фланец цилиндра;

4 – устройство выравнивания пульсаций.

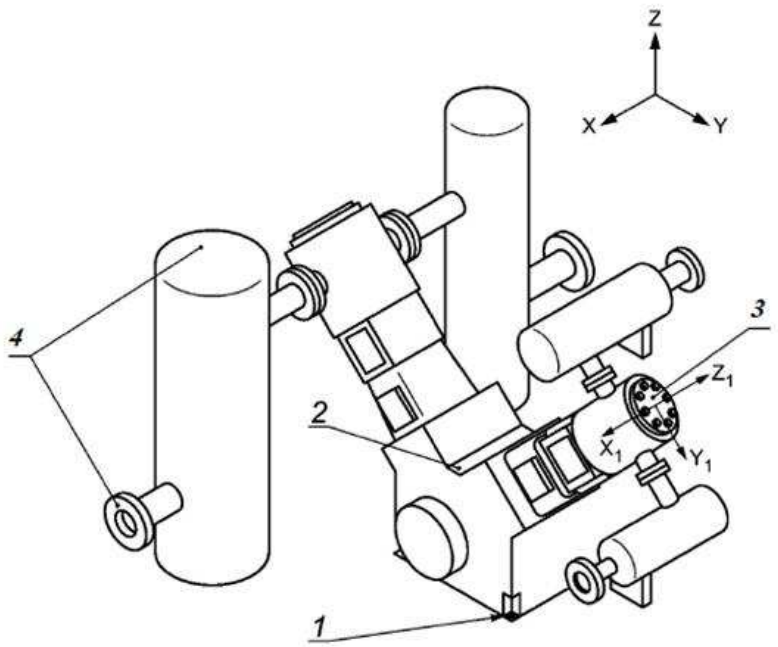


Рисунок 3.1 – Точки измерений на компрессоре с V-образным расположением цилиндров.

Указанные точки используют для всех компрессоров с W -образным расположением цилиндров, рассмотрены на рисунке 3.2, где под цифрами изображены:

1– болтовое крепление;

2 – угол корпуса;

3 – фланец цилиндра;

4 – устройство выравнивания пульсаций.

Измерения производят в следующих направлениях:

Компрессор с W-образным расположением цилиндров:

- в каждой точке измерений на фундаменте, корпусе, устройстве выравнивания пульсаций и трубопроводе в трех взаимно перпендикулярных направлениях X, Y и Z, как показано на рисунке 3.2;

- на каждом цилиндре в трех взаимно перпендикулярных направлениях X1 (перпендикулярно штоку поршня), Y1 (перпендикулярно к штоку поршня) и Z1 (параллельно штоку поршня), как показано на рисунке 3.2.

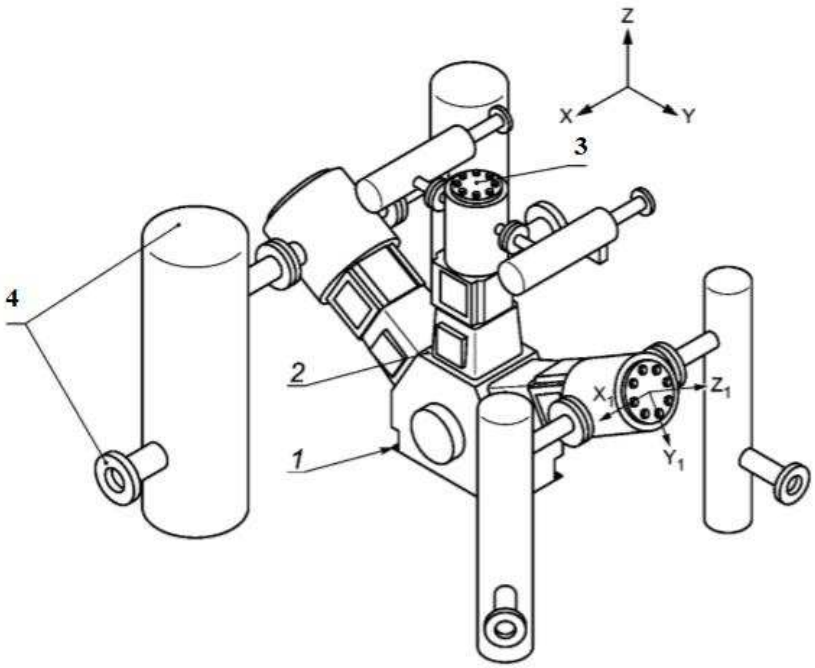


Рисунок 3.2 – Точки измерений на компрессоре с W-образным расположением цилиндров.

4 Методика анализа амплитуды спектра огибающей вибросигнала

Развитие любого дефекта оборудования приводит не столько к увеличению общего уровня вибрации, сколько к возрастанию амплитуды отдельных гармоник, хотя и незначительно относительно общего уровня вибрации. Поэтому контроль поведения отдельных частотных составляющих позволяет выявлять различные дефекты и следить за ходом их развития.

С помощью методики анализа амплитуды спектра огибающей вибросигнала диагностируют развитие дефекта. Спектральный анализ является основным методом вибродиагностики, позволяя обнаружить ряд выраженных периодических частотных составляющих, напрямую связанных с динамикой взаимодействия узлов и деталей исследуемого агрегата, а также составляющие, возбуждаемые определенными дефектами агрегата.

Ниже на рисунке 4.1 приведён пример обработки сигнала по методу амплитуды спектра огибающей вибросигнала.

Рисунок 4.1 – Обработка сигнала по методу амплитуды спектра огибающей вибросигнала.

Метод огибающей высокочастотной вибрации состоит в том, что выделяют низкочастотную составляющую (красная пунктирная линия) из

общего спектра высокочастотной вибрации и проводят её частотный анализ. Его использование перспективно и для выявления некоторых дефектов поршневых компрессоров.

В качестве примера рассмотрен тренд максимальных значений виброускорения, полученный от датчика, установленного на нагнетательном клапане, и характерный для процесса разрушения клапана, на рисунке 4.2

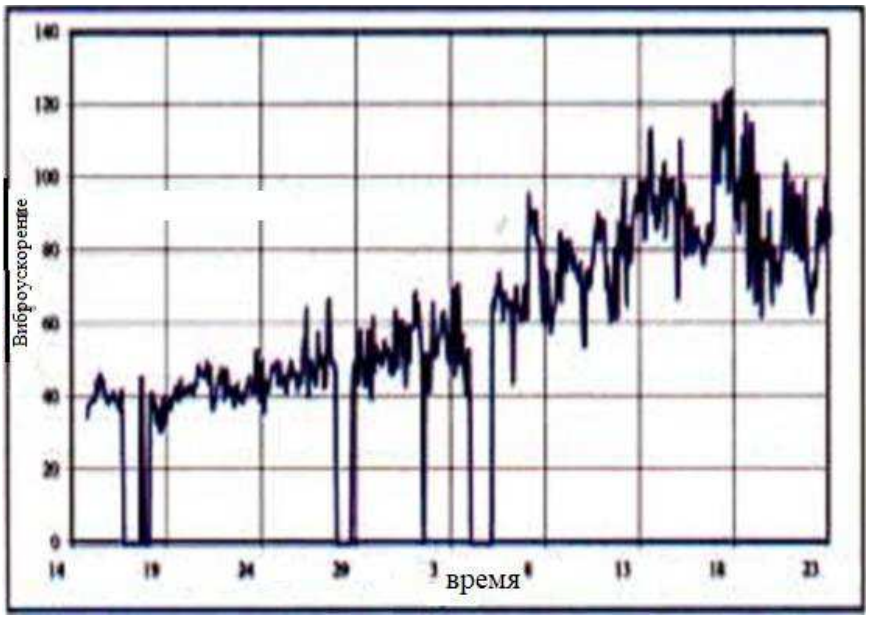


Рисунок 4.2 – Тренд максимальных значений виброускорения.

Также в качестве примера приведены на рисунке 4.3 и рисунке 4.4, амплитудно-частотные характеристики сигналов, характеризующие исправное и неисправное состояние клапанов для этих типов компрессоров.

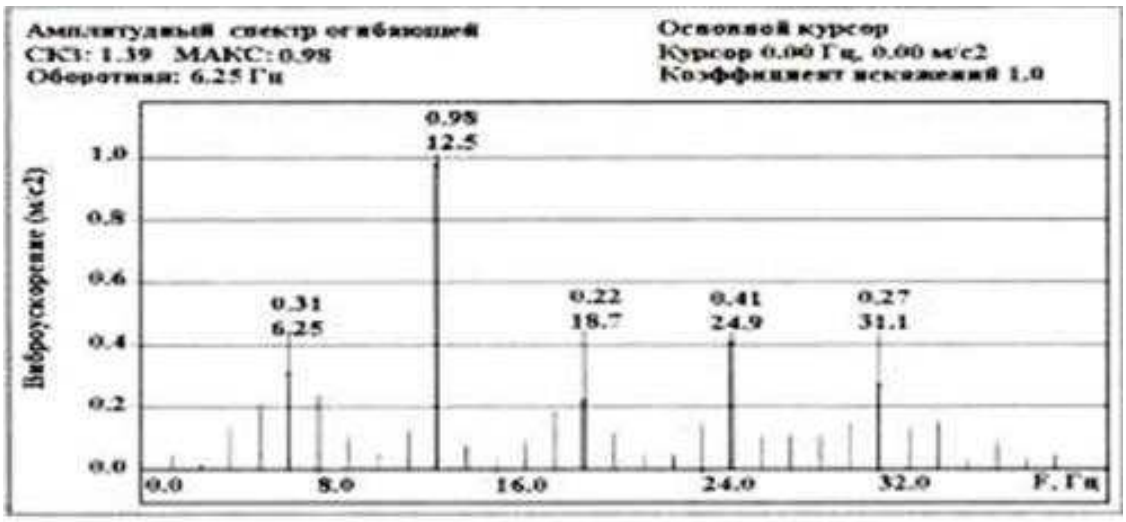


Рисунок 4.3 – Спектральные признаки исправного клапана поршневого компрессора.

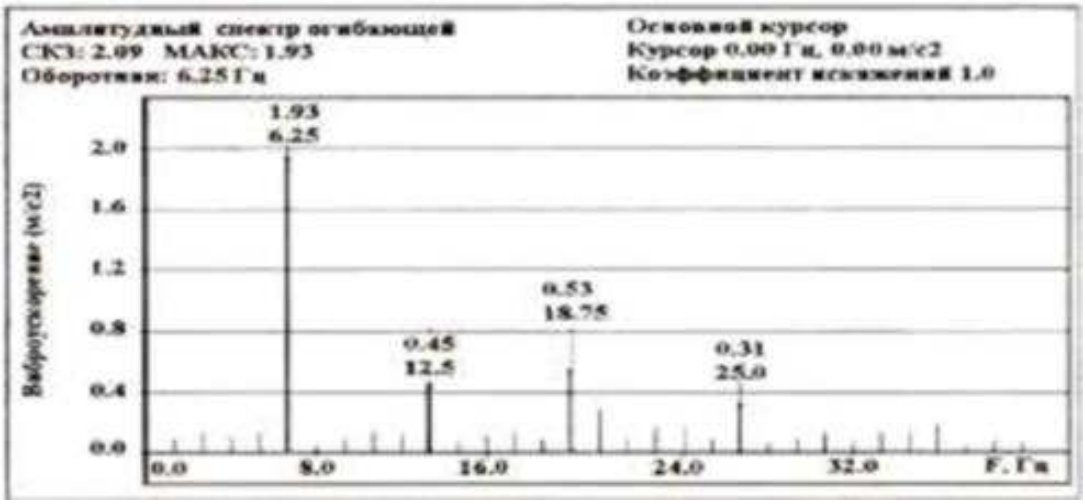


Рисунок 4.4 – Спектральные признаки неисправного клапана поршневого компрессора.

Выделение огибающей вибросигнала от датчиков, установленных в различных точках компрессора, позволяет наглядно представлять процессы, происходящие в компрессорах. Особенно эффективно огибающая работает при её синхронизации с угловым положением коленчатого вала. Для выделения огибающей используются специально разработанные алгоритмы, позволяющие получать сигнал, несущий максимально возможную информацию о состоянии узлов и деталей компрессора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующих положениях:

1. Показано, что согласно нормативно-техническим документам эксплуатационный персонал обязан производить измерение вибрации в компрессорных установках и в зависимости от полученных результатов должна быть дана оценка технического состояния компрессорного оборудования.
2. Рассмотрены существующие вибрационные методы диагностики оборудования. Более подробно рассмотрен метод технической диагностики, основанный на измерении и анализе параметров вибрации объекта диагностики.
3. Рассмотрены основные принципы проведения мониторинга технического состояния оборудования, в том числе компрессорного.
4. Проведен анализ по диагностируемым дефектам поршневых компрессоров.
5. Проведён анализ по измерительным устройствам (датчикам) для измерения вибрационного состояния.
6. Предложен переносной многоканальный диагностический комплекс, позволяющий производить диагностические исследования крупного вращающегося оборудования, в том числе компрессорного оборудования.
7. Рассмотрена методика проведения измерения вибрации поршневого компрессора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. СТО РусГидро 02.02.122-2015 Методические указания гидроэлектростанции. Порядок оценки состояния вспомогательного оборудования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rushydro.ru/upload/iblock/134/115_STO-RusGidro-02.03.129_2015_Metod-Ukazaniya-po-organizatsii-obsledovanij.pdf

2. ГОСТ Р ИСО 10816-8 – 2016 . Национальный стандарт Российской Федерации. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/1200142487

3. ГОСТ 24346-80 Вибрация, термины и определения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.internet-law.ru/gosts/gost/23718

4. Дудченко Л.Н. Вспомогательное оборудование гидроэлектростанций. Учебное пособие. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 107 с.

5. Диагностика поршневых компрессоров и двигателей внутреннего сгорания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://vibrocenter.ru/vibro04.htm

6. Гриб В.В. Анализ современных методов диагностирования компрессорного оборудования нефтегазохимических производств [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.vibration.ru/diagn_kompres.shtml

7. Р.В. Жуков Разработка метода технического диагностирования поршневых компрессоров химических производств: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Р.В. Жуков. – Москва, 2000. – 16с.

8. Д.Р. Клагиш, А.И. Полежаева. Система диагностики гидроагрегата. Недостатки и предложения по улучшению эффективности их работы // Гидроэлектростанции в XXI веке: Сборник материалов VI Всероссийской

научно-практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов. – Саяногорск; Черемушки, 2019. – С. 146–152.

9. Костюков В. Н., Науменко А.П. Вибродиагностика поршневых компрессоров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.dynamics.ru/publications/articles/vibrodiagnostika-porshnevyh-kompressorov.html

10. Фролов К.В. Вибрация в технике. Справочник (в 6-ти томах) Т.6. М.: Машиностроение, 1981 – 456 с.

11. Ю.С.Васильева, Д.С.Щавелева. Гидроэнергетическое и вспомогательное оборудование гидроэлектростанций. Справочное пособие. Т.2. Вспомогательное оборудование гидроэлектростанций. М.; Энергоатомиздат, 1990.

12. Лукьянов А.В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. – Иркутск.: Изд-во ИрГТУ – 1999 -228 с.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
"СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫ УНИВЕРСИТЕТ"
САЯНО-ШУШЕНСКИЙ ФИЛИАЛ
институт
Гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических систем и электрических сетей
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ А.А. Ачитаев
"02" 07 20__ г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ГЭС

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
13.04.02.06 Гидроэлектростанции

Научный руководитель	_____	ЗГИЭ	В.В. Луференко
	подпись, дата	должность	инициалы, фамилия
Выпускник	02.07.2020г.		И.Н. Топоев
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент	_____	инженер СНО	А.В. Силютин
	подпись, дата	должность	инициалы, фамилия
Нормоконтролер	02.07.20.		А.А. Чабанова
	подпись, дата		инициалы, фамилия

Саяногорск; Черемушки 2020