

УДК 62-932.2

*МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
ПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА ПО ПАРАМЕТРАМ ВИБРАЦИИ*

**П.С. КУНИНА<sup>1</sup>, Е.И. ВЕЛИЧКО<sup>1</sup>, И.В. БРАТЧЕНКО<sup>2</sup>,  
С. П. КОСТИН<sup>2</sup>, Ю. Н. ЧЕРНОВА<sup>2</sup>, Н.Ю. КЛИМОВА<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Кубанский государственный технологический университет,  
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2;  
факс: (861)259-65-92*

<sup>2</sup> *ООО Грандэкспертинжиниринг, 350000, Российская Федерация,  
г. Краснодар, ул. Кожевенная, 40; факс: (861)2195322*

В статье представлены методы анализа вибраций перекачивающих агрегатов в условиях эксплуатации и реализация алгоритма диагностирования силовой установки по вибропараметрам, а так же наилучшие условия реализации диагностических программ. Освещен метод определения тенденций, с помощью которого осуществляется прогнозирование показателей качества, что дает информацию о степени пригодности объекта диагностики в соответствии с технической документацией. Рассмотрен алгоритм поэлементного диагностирования газоперекачивающего агрегата, который позволяет определить последовательность задач для идентификации конкретного дефекта или неисправности.

**Ключевые слова:** газоперекачивающий агрегат, техническая диагностика, объект диагностики, дефект, вибродиагностика, вибропараметры, алгоритм.

Эффективность обслуживания и ремонта перекачивающих агрегатов магистральных трубопроводов установок достигается не только путем модернизации и разработки новых технических средств, но и применением комплексных методов безразборного контроля работающего оборудования – технической диагностики, важнейшим принципом которой является обеспечение безотказной работы оборудования в течение установленного технической документацией периода.

Поэтому, формирование службы технической диагностики на действующих предприятиях (как индивидуальной, так и групповой) следует рассматривать в жизненном цикле, каждого предприятия, для которого характерны свои проблемы. Это означает, что, в соответствии с концепцией технической диагностики, разработка комплекса мероприятий по обеспечению постоянного контроля технического состояния агрегатов должна базироваться на возможностях среды и носить некоторую функцию ограничения. Решающую роль в этом играет технико–экономическое обоснование принятых решений с

учетом ресурсных и финансовых возможностей предприятия. Выбор методов и средств контроля технологического режима компрессорной установки так же во многом определяется контролепригодностью оборудования, то есть возможностью получения достоверной информации для объективной оценки его работоспособности.

В настоящее время обеспечение нормативного качества проведения ТО и ремонта с использованием методов технической диагностики при обслуживании тяжелого энергетического оборудования перекачивающих станций принципиально возможно тремя путями:

1. применением встроенных в оборудование автоматизированных систем мониторинга;
2. использованием услуг специализированных фирм;
3. организацией собственной службы диагностики, подчиненной главному механику предприятия (в этом случае заключения по дальнейшему использованию оборудования носят не рекомендательный, а обязательный характер).

Конечно, наилучшим условием реализации диагностических программ является приобретение оборудования совместно с автоматическими диагностическими комплексами, включающими в себя измерительные системы и аппаратные средства для оценки и анализа полученных данных. Однако, во многих случаях и на сегодняшний день, за исключением немногих фирм, этого не происходит: оборудование эксплуатируется не по техническому состоянию, а по порочной, как уже показывает опыт эксплуатации, системе ППР; диагностику же (обычно только по вибропараметрам) поручают какой –либо фирме, к сожалению, как показывает практика, не имеющей квалифицированного персонала для ее проведения в полном объеме. Такая ситуация приводит к невозможности оперативной оценки технического состояния оборудования и, как следствие, непредвиденным отказам и опасным ситуациям, которые, не будучи вовремя выявлены, в конечном итоге служат причинами аварий, зачастую с тяжелыми последствиями 5, 6 и 7 классов.

## **Методы анализа вибраций перекачивающих агрегатов в условиях эксплуатации**

В ряде случаев адекватная связь между параметрами спектра и неисправностями в изделии может оказаться весьма сложной для теоретического анализа. Поэтому вполне обосновано использование экспериментальных методов распознавания, базирующихся на наборе статистических данных, отражающих связь между дефектами, обнаруженными при разборке изделия и особенностями спектров, полученных до разборки или в результате испытаний с искусственно созданными неисправностями, связь которых с параметрами спектра изучается.

Обработка результатов измерений возможна двумя методами: определением тенденций и методом сравнения. Рассмотрим кратко суть этих методов.

### **1 Метод определения тенденций**

Метод определения тенденций – сравнение временной последовательности измеренных значений для одного агрегата. Путем периодических измерений на исправной машине по возможности с начала ее эксплуатации получают опорные значения спектральных составляющих вибрации. Если в период работы машины, измеряемые значения заметно увеличиваются, то налицо наличие дефектов или повреждений.

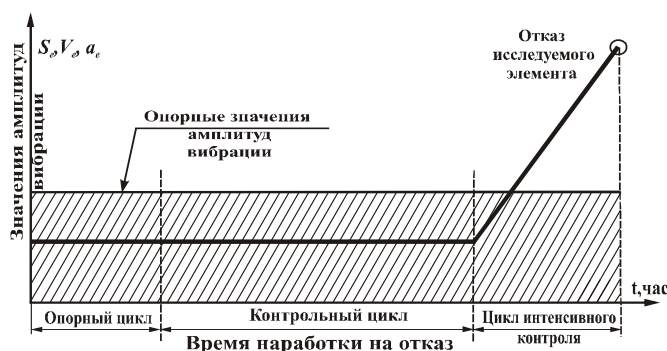


Рисунок 1- Сравнение временной последовательности измеренных значений вибрации

Прогнозирование показателей качества дает информацию о степени пригодности объекта диагностики выполнять свое назначение в будущем. На

основании этой информации и осуществляется планирование процесса эксплуатации объекта: составление графиков ремонта, определение состава запасных частей, время и средства, затрачиваемые на производство ремонтных работ.

## ***2 Метод сравнения***

Суть метода сравнения заключается в вычислении амплитуд спектра вибраций по измеренным характерным координатам, полученной на выходе прибора – анализатора кривой (огibaющей) или линейчатой картины вибрации. В основе поиска неисправностей элементов сложной системы по этому методу лежит проверка параметров по определенной схеме, содержащей поэлементные проверки с комбинационным поиском неисправностей, которые устанавливают порядок поиска по заданной программе (рисунок 2). Если проверяемый элемент оказался исправен, то переходят к следующему. Последовательность перехода при поэлементной проверке принято изображать графически в форме графа логических возможностей, дерева решений, дерева или таблицы отказов. По этому методу сравниваются измеряемые значения одной группы машин. Если полученные данные значительно отличаются от измеренных эталонных для обследуемой машины значений, то следует диагностировать дефект или повреждение. Метод сравнения довольно быстро приводит к надежным результатам и тем самым достоверному контролю технической системы с любого времени отсчета.

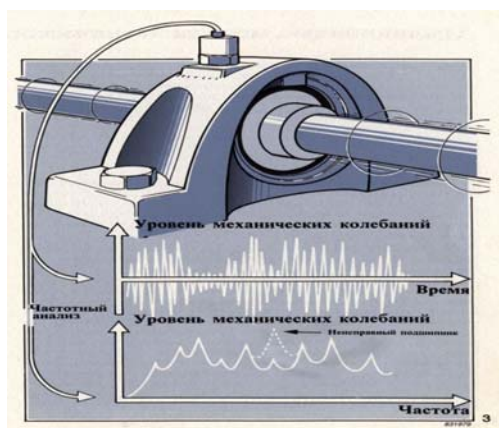


Рисунок 2 – Схема контроля технического состояния агрегата по вибропараметрам

Следует соблюдать определенные условия при проведении измерений на одной группе агрегатов:

- конструкции одной группы агрегатов или узлов толерантны;
- все точки измерений должны находиться на одном и том же месте для однотипных систем;
- условия эксплуатации – скорости вращения валов агрегата и нагрузки при каждом измерении должны быть идентичны.

Осуществление метода сравнения в практической диагностике выполняется тремя путями:

1. использование математических моделей, полученных на основе теоретических предположений, а так же реальных допущений и ограничений;
2. статистических и экспериментальных данных, полученных на основе практического опыта во время эксплуатации, а так же стендовых испытаний отдельных узлов и механизмов;
3. эталонных тест–спектров, представляемых в графической форме, созданных на основе синтеза – анализа и обобщения экспериментальных данных с использованием элементов математического моделирования.

Последний путь – по сути дела создание описательных моделей, предназначенных для статистической обработки экспериментальных данных. Такая модель может не соответствовать истинному механизму процесса, который эти экспериментальные данные порождает. Но сильная сторона описательных моделей в том и заключается, что их можно использовать для качественной и количественной оценки процесса, не зная физической его сути. Такая модель синтеза не ставит задачу получения конкретных данных о вибрации того или иного узла – даются только общие принципы расположения информативных частот и возможное соотношение амплитуд измеряемых параметров, а так же вероятные диапазоны проявления дополнительных, качественно значимых, признаков той или иной неисправности. Очевидно, что инженерам, обслуживающим компрессорные установки, наиболее доступен для понимания именно последний.

В реальных условиях все детали конструкции агрегатов изготавливаются и измеряются с некоторыми погрешностями (ошибками) которые регламентируются стандартами, нормами, техническими условиями и системой допусков и посадок. Зачастую интересующий параметр сложным образом зависит от погрешностей ряда других параметров, поэтому методическими основами синтеза являются:

- использование детерминированных связей основных, комбинационных и субгармонических частот спектра вибраций с кинематикой конструкции агрегата и режимами его работы;
- статистические данные об изменении модуляций амплитуд на информативных частотах;
- применение принципа суперпозиции при расшифровке данных, полученных приборами.

Однако, при обследовании агрегата следует иметь в виду, что в связи с неравномерностью скоростей вращения валов, происходящих по различным причинам, опорные частоты могут отклоняться от номинального значения на величину  $\pm 10\%$  частотного диапазона, поэтому возможна и некоторая флуктуация информационных частот, что следует учитывать при расшифровке виброграмм.

### ***Реализация алгоритма диагностирования силовой установки по вибропараметрам***

Как уже отмечалось ранее, газоперекачивающий агрегат представляет собой сложный объект диагностирования, в котором необходимо выделить элементы, с точностью до которых желательно проводить поиск дефектов. Такими элементами могут быть системы, подсистемы, узлы, функциональные блоки и даже отдельные детали, работоспособность которых оценивается на основе анализа спектра вибраций и идентификации полученных данных с возможностью возникновения или развития той или иной неисправности.

Построение алгоритма диагностирования базируется на многошаговых процедурах, на каждом шаге которых выполняется одна или несколько

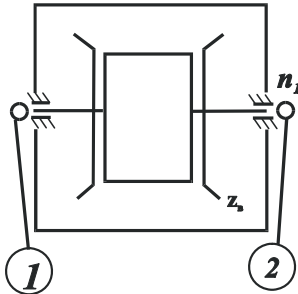
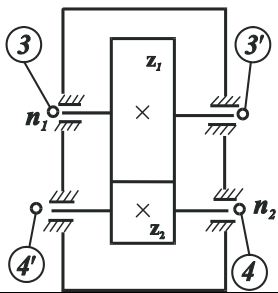
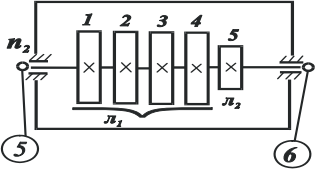
элементарных проверок, являющихся частичным решением поставленной задачи. Объединение этих фрагментов в одну систему контроля дает представление о техническом состоянии агрегата в целом. Поэтому, как при ручной обработке информации, так и в процессе разработки систем мониторинга используют некоторый набор программ диагностики каждого конкретного узла (или элемента), по которым, на основании результатов обследования, и выдается заключение о возможности дальнейшей эксплуатации оборудования. Для эффективного проведения процедур диагностики необходимо сложный объект диагностирования расчленить на такие составные части, с точностью до которых (на установленном уровне диагностики - первом, втором или третьем) целесообразно проводить поиск дефектов и неисправностей. В свою очередь, каждый выделенный узел (или агрегат) следует рассматривать как информационный блок, в состав которого входят элементарные объекты, исправное состояние которых определяет работоспособность технической системы в целом. При расчленении агрегата на блоки следует включать в один блок все элементы, входящие в контур обратной связи, что существенно упрощает задачу поиска дефектов с глубиной до отдельных элементов, так как неисправности последних при отсутствии обратных связей всегда различны между собой.

Разбивка (классификация) агрегата на составные части позволяет идентифицировать колебания, по принадлежности к отдельным узлам. Удобство такой классификации заключается в непосредственной связи вибрации с ее источником и возможностью прогнозирования в общих чертах структуры и характера вибрации. По сути дела это один из вариантов построения дерева решений. Рассмотренная постановка проблемы поэлементного диагностирования газоперекачивающего агрегата позволяет определить последовательность задач, возникающих при идентификации конкретного дефекта или неисправности. Такой системный подход позволит в реальных условиях при наличии неизбежных ограничений, отклонений от заданного технологического режима, всевозможных помех и погрешностей

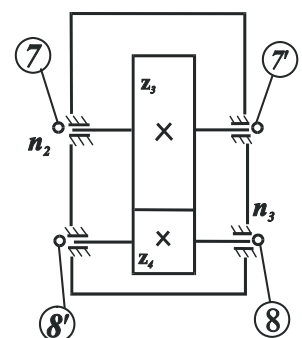
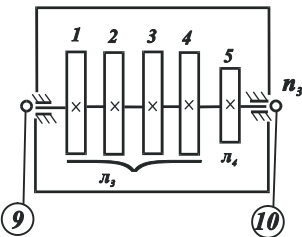
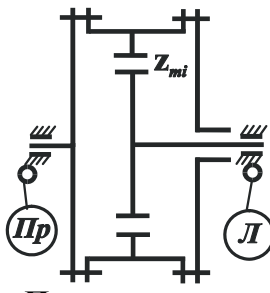
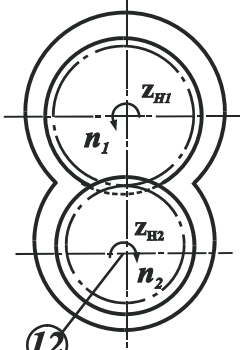
измерительной аппаратуры добиться наибольшей эффективности анализа технического состояния газоперекачивающего агрегата. Принцип задачи разделения агрегата на отдельные блоки и пути ее решения удобно пояснить на примере электроприводного центробежного компрессора К-380-103-1 (табл.1, рис. 3,) –это уже давно устаревший тип компрессора, но на примере его кинематической схемы легко показать детализацию расчетной схемы вибропараметров.

Этот вид газоперекачивающего агрегата выбран потому, что в его кинематическую схему входит наибольшее, по сравнению с другими компрессорными установками, количество функциональных блоков.

Таблица 1- Кинематические параметры компрессора К-380-103-1

Наименование узла	Кинематическая схема узла	Основные кинематические параметры	Опорные частотные характеристики
	Местонахождение измерительных точек		
Электродвигатель N=5300 кВт		Число оборотов вала $n_1 = 3000 \text{ об/мин}$	$f_{\text{об1}} = 50 \text{ Гц}$
		Число лопаток вентилятора $Z_6 = 12$	$f_6 = 600 \text{ Гц}$
		Число зубцов ротора $Z_p = 28$	$f_{zp} = 1400 \text{ Гц}$
		Число полюсов $T_p = 2$	$f_{i2} = 100 \text{ Гц}$
Мультипликатор ЦНД		Число оборотов валов $n_1 = 3000 \text{ об/мин}$ $n_2 = 8550 \text{ об/мин}$	$f_{1\text{об}} = 50 \text{ Гц}$ $f_{2\text{об}} = 142,6 \text{ Гц}$
		Передаточное отношение $U = 1/2,85$	–
		Число зубьев $Z_1 = 97$ $Z_2 = 34$	$f_{z1} = 4850 \text{ Гц}$ $f_{z2} = 7130 \text{ Гц}$
Цилиндр низкого давления (ЦНД)		Число оборотов вала $n_2 = 8550 \text{ об/мин}$	$f_{2\text{об}} = 142,6 \text{ Гц}$
		Число лопаток на 1 ступени сжатия (на каждом диске) $Z_{л1} = 24$	$f_{л1} = 3432 \text{ Гц}$



		Число лопаток на второй ступени сжатия $Z_{л2}=11$	$f_{л2}=1568,6\text{Гц}$
Мультипликатор ЦВД		Число оборотов валов $n_2 = 8550\text{об/мин}$ $n_3 = 18395\text{ об/мин}$	$f_{2об}=14266\text{Гц}$ $f_{3об}=306,8\text{Гц}$
		Передаточное отношение $U=1/2,15$	–
		Число зубьев $Z_3=71$ $Z_4=33$	$f_{z3}=10124,6\text{Гц}$ $f_{z4}= 8510,8\text{Гц}$
Цилиндр высокого давления (ЦВД)		Число оборотов вала $n_3 = 18935\text{ об/мин}$	$f_{3об}= 306,8\text{Гц}$
		Число лопаток на 1 ступени сжатия (на каждом диске) $Z_{л3} = 24$	$f_{л3}= 7363,2\text{Гц}$
		Число лопаток на второй ступени сжатия $Z_{л4}=11$	$f_{л4}= 3374,8\text{Гц}$
Зубчатые муфты  М1 М2 М3 М4	 <p>Пр-правая опора Л – левая опора</p>	Число оборотов вала: $n_{1М} = 3000\text{ об/мин}$ $n_{2М} = n_{3М} = 8550\text{ об/мин}$ $n_4 = 18395\text{ об/мин}$	$f_{1М} = 50\text{Гц}$ $f_{2М}=f_{3М}=$ $=142,6\text{Гц}$ $f_{4М} = 306,8\text{Гц}$
		$Z_{1М}=56$	$f_{z1М} = 2800\text{Гц}$
		$Z_{2М}=56$	$f_{z2М} = 7985\text{Гц}$
		$Z_{3М}=44$	$f_{z3М} = 6274\text{Гц}$
		$Z_{4М}=32$	$f_{z4М} = 9818\text{Гц}$
Масло-насос шестеренчатый		Число оборотов вала: $n_{1н} = 3000\text{об/мин}$ $n_{2н} = 1568\text{об/мин}$	$f_{об1н} = 50\text{ Гц}$ $f_{об2н} = 26,1\text{Гц}$
		$Z_{1н}=23$	$f_{z1н} = 1150\text{Гц}$
		$Z_{2н}=44$	$f_{z2н} = 1150\text{Гц}$

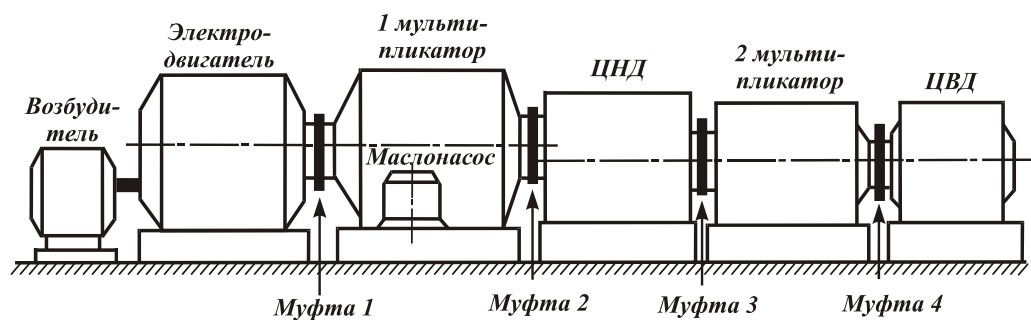


Рисунок 3– Компоновочная схема компрессора К-380-103-1

Затем, для каждого диагностируемого блока строится дерево отказов на основании которого и осуществляется поэлементная проверка в соответствии с некоторым определенным набором процедур диагностирования.

Такая процедура последовательного расчета базовых и функциональных частот с учетом флуктуаций чисел оборотов двигателей дает, как правило, весьма хороший результат.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кунина П.С., Величко Е.И., Павленко П.П. Диагностика энергетического оборудования трубопроводного транспорта нефти и газа Краснодар: Издательский Дом-Юг, 2010. - 552 с. ISBN 978-5-91718-082-3
2. Барзилович Е. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем.— М.: Высшая школа, 1982. — 231 с.
3. Биргер А.А. Техническая диагностика. – М.: Наука, 1987. – 240 с.

#### REFERENCES

1. Kunina P.S., Velichko E. I. Pavlenko P. P. Diagnostics of power equipment of pipeline transport of oil and gas. Krasnodar: Publishing House-South, 2010. – 552 p. ISBN 978-5-91718-082-3
2. Barzilovich E.Y. Model maintenance of complex systems —Moscow: High School, 1982. — 231 p.
3. Birger A. A. Technical diagnostics. –Moscow.: Science, 1987. – 240 p.

*METHODS OF CONTROL OF TECHNICAL CONDITION OF PUMPING UNIT  
VIBRATION PARAMETERS*

**P. S. KUNINA<sup>1</sup>, E. I. VELICHKO<sup>1</sup>, I. V. BRATCHENKO<sup>2</sup>,  
S. P. KOSTIN<sup>2</sup>, YU. N. CHERNOVA<sup>2</sup>, N.YU. KLIMOVA<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Kuban State Technological University,  
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072;  
Fax: (861)259-65-92*

<sup>2</sup> *LLC Grandexpertengineering, 40, Kojevonnaya St.,  
Krasnodar, Russian Federation, 350000;  
Fax: (861)219-53-22*

Methods of the analysis of vibrations of the pumping-over units in service conditions and realization of algorithm of diagnosing of the power plant in vibroparameters, and also the best conditions of implementation of diagnostic programs are presented in article. The method of definition of tendencies by means of which forecasting of indicators of quality is carried out that gives information on degree of suitability of object of diagnostics in compliance with technical documentation is lit. The algorithm of bit-by-bit diagnosing of the gas-distributing unit which allows to define sequence of tasks for identification of concrete defect or malfunction is considered.

**Key words:** gas-distributing unit, technical diagnostics, object of diagnostics, defect, vibration diagnostics, vibroparameters, algorithm.