

ВИБРОДИАГНОСТИКА НАСОСНОГО АГРЕГАТА XL 32-20-200 В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Юлия Олеговна Грабатьюк

Студент 4 курса,

кафедра «Метрология и взаимозаменяемость»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: О.В. Умманова,

ассистент кафедры «Метрология и взаимозаменяемость»

Качество любой продукции закладывается при ее проектировании и затем обеспечивается при ее изготовлении. Отклонения от установленного технологического процесса изготовления и сборки ведут к ухудшению качества. С течением времени в процессе эксплуатации в объектах начинают происходить изменения, меняющие их потребительские свойства. Объекты становятся менее надежны. Поэтому возникает серьезная необходимость непрерывного контроля протекающих в объектах внутренних процессов, характеризующих прочностные свойства и степень надежности к любому моменту времени. А так как деталь или машина – не лист чертежной бумаги, а объемное тело (к тому же непрозрачное), то разработка способов получения наиболее полной информации о внутренних свойствах, качестве и происходящих в деталях процессах стала одной из актуальнейших задач сегодняшнего дня.

Именно вибродиагностика позволяет определить остаточный ресурс или прогнозируемый интервал безаварийной работы.

В работе используются измерения вибрации вала насоса. Установлено, что именно измерение вибрации валов позволяет получить информацию о состоянии машины или механизма и используются для разных целей, начиная с обычного контроля за состоянием машин при эксплуатации и в процессе испытаний при приемке продукции и заканчивая диагностированием машин и проведением исследовательских экспериментов.

Описание объекта исследования, его назначение, область применения, условия эксплуатации

Насосы серии XL типа ОН2 – горизонтальные, одноступенчатые, консольные насосы, имеющие один корпус подшипника для амортизации всех сил, действующих на вал насоса и сохраняющие положение ротора в процессе работы. Насосы монтируются на опорных плитах и соединены с приводами упругими муфтами.

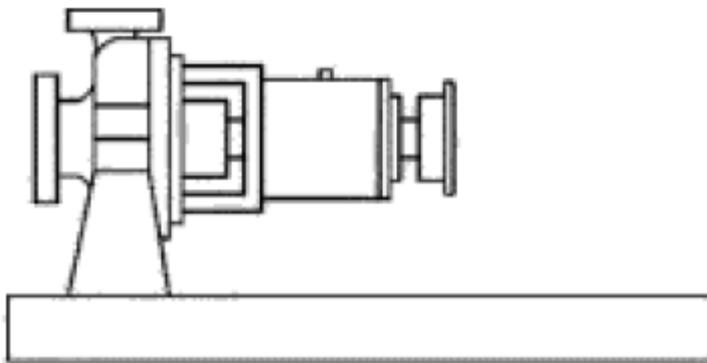
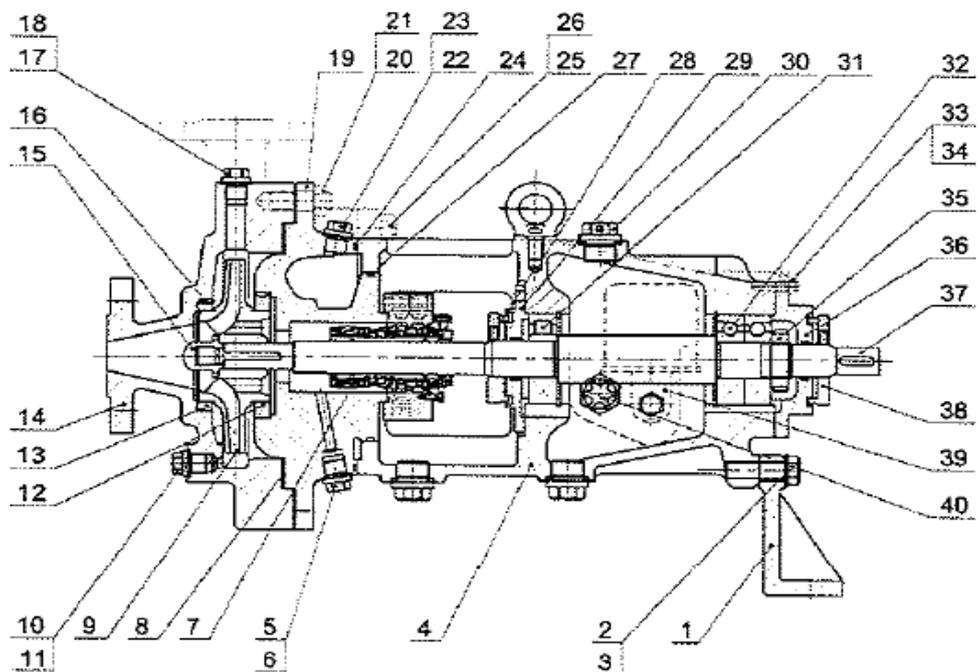


Рис. 1. Насос типа ОН2

Насосы серии XL служат для перекачивания различных видов жидкости с низкой или высокой температурой, нейтральных или агрессивных, чистых или загрязненных механическими примесями и применяются для эксплуатации в технологических процессах с малыми расходами и высокими дифференциальными напорами.

Данная серия насосов предназначена главным образом для эксплуатации на предприятиях нефтяной, нефтехимической, химической, угольной промышленности, нефтедобывающих платформах, электростанциях и предприятиях других отраслей.



- 1 – опора корпуса подшипников; 2 – болт; 3 – шайба; 4 – корпус подшипникового узла; 5 – пробка; 6 – прокладка; 7 – торцовое уплотнение; 8 – прокладка; 9 – рабочее колесо; 10 – пробка; 11 – прокладка; 12 – щелевое кольцо крышки корпуса; 13 – щелевое кольцо корпуса; 14 – корпус; 15 – гайка рабочего колеса; 16 – винт; 17 – пробка; 18 – прокладка; 19 – крышка корпуса; 20 – гайка; 21 – шпилька; 22 – пробка; 23 – прокладка; 24 – уплотнительное кольцо; 25 – шпилька; 26 – гайка; 27 – уплотнительное кольцо; 28 – пыльник; 29 – передняя крышка корпуса подшипникового узла; 30 – вентиляционная пробка; 31 – радиальный роликовый подшипник; 32 – радиально-упорный шариковый подшипник; 33 – болт; 34 – гайка; 35 – гайка; 36 – задняя крышка корпуса подшипникового узла; 37 – вал; 38 – пыльник; 39 – масленка постоянного уровня; 40 – смотровое окно уровня масла.

Рис. 2. Продольный разрез насосного агрегата серии XL

Таблица 1. Рабочие параметры насоса

Номинальный диаметр рабочего колеса	200
Диаметр всасывающего патрубка, мм	32
Диаметр напорного патрубка, мм	20
Подача, м ³ /ч	2,5
Напор, м	50
Давление, МПа	до 2,5 МПа
Температура, °С	90
Частота вращения, об/мин	2950
Мощность, кВт	7,5

Причины возникновения вибрации

Как правило, на производстве возникают ошибки трёх видов, приводящие к авариям:

1. Технические ошибки. Они могут быть обусловлены:

- неправильным проектированием (неверно определены исходные нагрузки, ошибки в расчетах, неправильный выбор материалов и т.д.);
- неправильным изготовлением (заменяли материалы, не выдержали размеры, нарушили заданные режимы обработки, использовали в сборке бракованную деталь и т.п.), - т.е. элементы изделия или конструкции не соответствуют верному проекту;
- неправильной эксплуатацией (например, эксплуатация при нагрузках больше допустимых: через мост, рассчитанный на максимальный грузопоток 50 тонн, из – за закрытия соседнего моста пустили грузопоток 65 тонн).

2. Организационные ошибки. Вызваны тем, что руководитель проекта не предусмотрел организационные меры, предотвращающие перечисленные технические ошибки.

3. Недостаток квалификации, в результате чего руководитель или ответственное лицо не были достаточно хорошо обучены для того, чтобы избежать технических и организационных ошибок.

Источники вибрации и шума при эксплуатации:

- 1) Явление кавитации;
- 2) Нарушение центровки валов насоса и электродвигателя;
- 3) Износ подшипников, прогиб вала, повреждение вращающихся деталей;
- 4) Недостаточная прочность фундамента;
- 5) Недостаточная затяжка фундаментных болтов или ослабление крепления основных трубопроводов;
- 6) Плохая балансировка;
- 7) Подача насоса ниже максимально допустимой, т.е. ниже 10% от оптимальной подачи.

Определение измеряемых параметров

Большинство стандартов и нормативных документов по вибрации в качестве нормируемого параметра вибрации для контроля за техническим состоянием машины или механизма устанавливают *СКЗ виброскорости* в диапазоне частот от 10 до 1000Гц. Однако следует сказать, что применение только одного параметра виброскорости сужает частотный диапазон для предварительной оценки состояния оборудования.

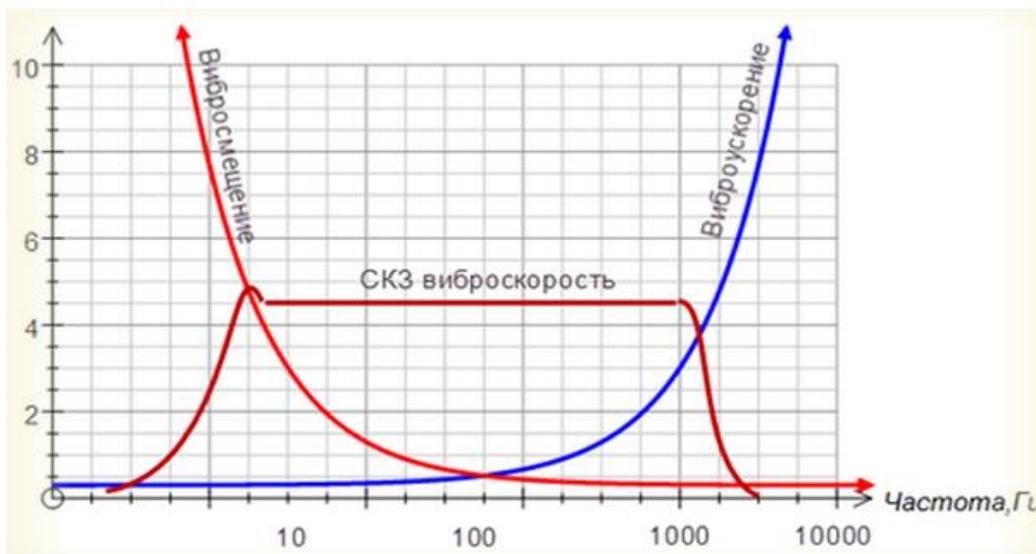


Рис. 3. Частотные характеристики виброускорения, виброперемещения и виброскорости

По кривой виброперемещения видно, что с ростом частоты снижается амплитуда. Это говорит о том, что на низких частотах возбуждаются высокие уровни виброперемещения, а на высоких частотах возбуждаются низкие уровни виброперемещения. Поэтому контролировать вибрацию по параметру виброперемещение наиболее эффективно в низкочастотном диапазоне от 0 до 300 — 500 Гц.

Частотная характеристика виброскорости имеет относительно плоский участок от 10 до 1000—2000 Гц. Поэтому в частотном диапазоне от 10 до 1000 Гц рекомендуется контролировать вибрацию по параметру виброскорости.

Кривая виброускорения выгнута наружу и стремится вверх, это означает, что с ростом частоты возбуждаются высокие уровни виброускорения. Поэтому контролировать вибрацию по параметру виброускорение наиболее эффективно в высокочастотном диапазоне частот свыше 1000—2000 Гц. Использование виброускорения на частотах 100 Гц и ниже не эффективно.

На основании выше сказанного, следует, что для оценки технического состояния машин и механизмов обязательно нужно использовать виброскорость в частотном диапазоне от 10 до 2000 Гц. Если частота источника вибрации (например, масляная вибрация подшипника качения) находится в низкочастотном диапазоне от 0,5 до 500 Гц, то дополнительно к параметру виброскорости необходимо контролировать вибрацию по виброперемещению.

Известно, что вибрацию можно представить в виде простейших периодических колебаний, которые в свою очередь есть ни что иное, как гармонические колебания. График этих колебаний в зависимости от времени представляет собой синусоиду (рисунок 4). Время между двумя последующими, в точности схожими положениями колеблющейся точки (или тела) называют **периодом колебания (T)**.

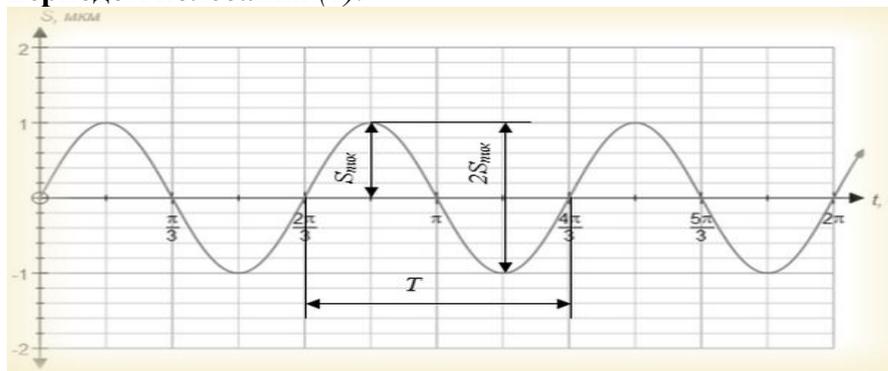


Рис. 4. График гармонических колебаний

Частота колебания связана с периодом через соотношение:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Что же касается величины колебания, то она может быть описана, согласно ГОСТ 10816-1-97, тремя основными параметрами: **виброперемещением** (s), **виброскоростью** (v) и **виброускорением** (a). Эти параметры имеют определенные математические соотношения друг к другу при рассмотрении гармонических (простейших) колебаний. Если вибрация точки (или тела) имеет чисто продольную форму колебаний вдоль одной оси (x), то мгновенное *смещение* (*виброперемещение*) от исходного положения может быть описано математическим уравнением:

$$s(t) = S_{\text{пик}} \sin(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

где $S_{\text{пик}}$ – амплитуда перемещений;

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота;

t – время.

Изменение смещения во времени является *скоростью* (*виброскорость*) движения точки (или тела). Поэтому колебания так же можно описать через скорость (v):

$$v(t) = \frac{ds(t)}{dt} = \omega S_{\text{пик}} \cos(\omega t + \varphi) = V_0 \cos(\omega t + \varphi), \quad (3)$$

где $V_0 = \omega S_{\text{пик}}$.

Таким образом, виброперемещение может быть преобразовано в скорость посредством дифференцирования.

Дифференцирование сопровождается умножением амплитуды на частоту, поэтому *амплитуда виброскорости* на определенной частоте пропорциональна перемещению (s) умноженному на частоту (f). При фиксированном смещении скорость с увеличением частоты возрастет в два раза, а если частоту увеличить в 10 раз, то скорость возрастет в 10 раз.

На графике гармонических колебаний (рисунок 5) видно, что амплитуда скорости больше амплитуды перемещения.

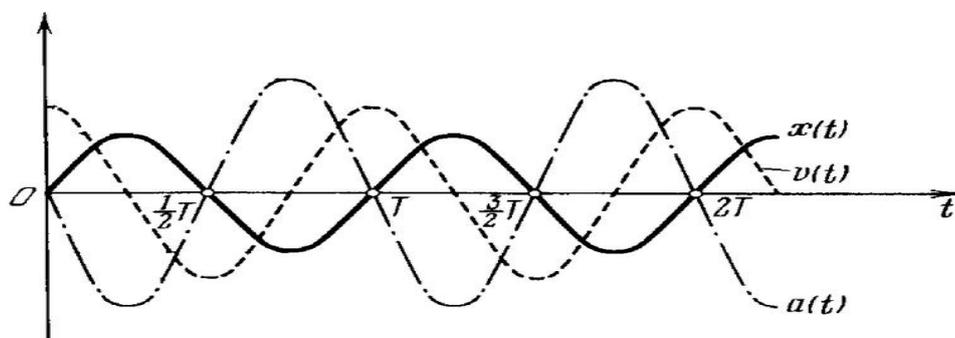


Рис. 5. Гармонические колебания перемещения, скорости и ускорения

В реальных условиях такими графики, как правило, не получаются. Т.к. параметры вибрации измеряются в процессе эксплуатации центробежного насоса, то возникают шумы, которые влияют на измерительную информацию, снимаемую в результате измерений.

Примерами таких шумов являются всплески напряжения на линиях питания, молнии, изменения окружающей температуры, солнечная активность и т.д. Такие помехи при попадании в датчики и интерфейсные схемы сказываются на их выходных сигналах. При этом они влияют либо на чувствительные элементы датчиков, либо на их выводы, либо на электронные компоненты в схеме. Очевидно, что для интерференционных сигналов датчик и интерфейсная схема играют роль принимающих устройств.

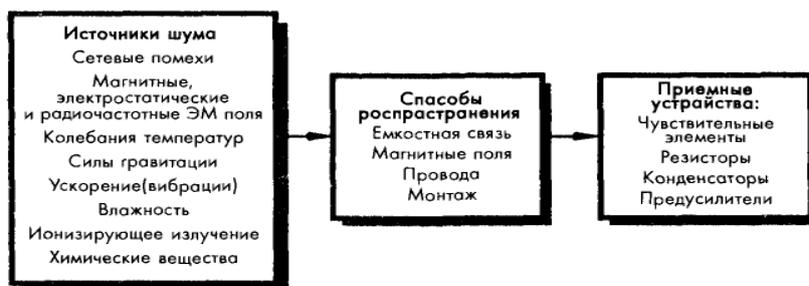


Рис. 6. Источники вносимых шумов и способы их распространения

Если измерять только виброперемещение, шумы будут оказывать большое влияние, но если совместно с датчиками виброперемещения поставить датчики виброскорости, суммарные «полезные сигналы», снимаемые с датчиков будут значительно превышать помехи.

С.К.О. погрешности определения виброперемещения:

$$\sigma_{S_o} = \sigma[\Delta_S] + \sigma[\Delta_{Sk}] - 2r_k \sqrt{\sigma[\Delta_S]\sigma[\Delta_{Sk}]} \quad (4)$$

С.К.О. погрешности определения виброскорости:

$$\sigma_{V_o} = \sigma[\Delta_V] + \sigma[\Delta_{Vk}] - 2r_k \sqrt{\sigma[\Delta_V]\sigma[\Delta_{Vk}]} \quad (5)$$

«Полезные сигналы» $\sigma[\Delta_S]$ и $\sigma[\Delta_V]$ коррелируют между собой, а помехи $\sigma[\Delta_{Sk}]$ и $\sigma[\Delta_{Vk}]$ не коррелируют, т.е. мы условно можем задать:

$\sigma[\Delta_S] = \sigma[\Delta_V] = R_{SV}$, тогда получим результирующее С.К.О.

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{S_o} + \sigma_{V_o} = R_{SV}^2 + \sigma[\Delta_{Sk}] - 2r_k \sqrt{R_{SV}\sigma[\Delta_{Sk}]} + \sigma[\Delta_{Vk}] - 2r_k \sqrt{R_{SV}\sigma[\Delta_{Vk}]} \quad (6)$$

По ГОСТ ИСО 10817-1-2002: «Для определения общей траектории движения вала и его среднего положения во времени рекомендуется применять два датчика, расположенных под углом 90° друг к другу в одной плоскости измерений»

Для того, чтобы получить достоверную и наиболее полную информацию о состоянии вала в процессе его вращения необходимо установить по 2 датчика виброперемещения и виброскорости.

Тогда формула для С.К.О. примет вид:

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{S_o} + \sigma_{V_o} = 4R_{SV}^2 + \Delta k, \quad (7)$$

где $\Delta k = 2(\sigma[\Delta_{Sk}] - 2r_k \sqrt{R_{SV}\sigma[\Delta_{Sk}]}) + 2(\sigma[\Delta_{Vk}] - 2r_k \sqrt{R_{SV}\sigma[\Delta_{Vk}]})$ - некоррелированные сигналы.

Первое слагаемое R_{sv}^2 наглядно показывает эффективность применения совместно

датчиков виброскорости и виброускорения.

Согласно ГОСТ Р ИСО 13373-1-2009 «Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 1. Общие методы», для контроля виброперемещения центробежного насоса применяются вихретоковый, индуктивный или оптический датчик.

Рассмотрим каждый из них подробнее.

Индуктивные датчики

Индуктивные датчики служат для бесконтактного получения информации о перемещениях рабочих органов машин, механизмов, роботов и т.п. и преобразования этой информации в электрический сигнал.

Индуктивный датчик распознает и соответственно реагирует на все токопроводящие предметы. Индуктивный датчик является бесконтактным, не требует механического воздействия, работает бесконтактно за счет изменения электромагнитного поля.

Преимущества:

- нет механического износа, отсутствуют отказы, связанные с состоянием контактов;
- отсутствует дребезг контактов и ложные срабатывания;
- высокая частота переключений до 3000 Hz;
- устойчив к механическим воздействиям.

Недостатки:

- сравнительно малая чувствительность;
- зависимость индуктивного сопротивления от частоты питающего напряжения;
- значительное обратное воздействие датчика на измеряемую величину (за счет притяжения якоря к сердечнику).

Вихретоковые датчики

Вихретоковые датчики предназначены для бесконтактного измерения вибрации перемещения и частоты вращения электропроводящих объектов.

Они применяются для диагностики состояния промышленных турбин, компрессоров, электромоторов. Наиболее часто объектом контроля является осевое смещение и радиальная вибрация вала ротора относительно корпуса.

Преимущества:

- практически безынерционен в звуковом диапазоне частот;
- пределы измерения амплитуд виброперемещения простираются от мкм до мм в зависимости от диаметра катушки;
- частотный диапазон – от нуля до сотен кГц;
- прост и надежен по конструкции;
- не чувствителен к поперечным вибрациям.

Недостатки:

- сравнительно большая погрешность измерений из – за влияния жестких условий эксплуатации большинства реальных объектов (высокая температура, давление, влажность и т. д.)

Оптические датчики

Оптические датчики имеют широкую сферу применения, в том числе служат для точного бесконтактного определения положения объекта в пространстве, скорости его движения.

Оптический бесконтактный датчик регистрирует изменение светового потока в контролируемой области, связанное с изменением положения в пространстве каких-либо движущихся частей механизмов и машин, отсутствия или присутствия объектов. Благодаря большим расстояниям срабатывания оптические бесконтактные датчики нашли широкое применение в промышленности и не только.

Преимущества:

- высокая точность, чувствительность и быстродействие;
- большая дальность действия;
- отсутствие механического контакта с измеряемым объектом;
- нечувствительность к материалу измеряемого объекта и его отражательной способности;
- нечувствительность к электромагнитным помехам;
- способность работать при высоких температурах.

Недостатки:

- трудности при установке, из-за наличия двух компонентов (приёмник и излучатель);
- чувствительность к степени загрязнения внешней среды (степень загрязнения не имеет значения только для инфракрасных датчиков).

Таким образом, был проведен анализ датчиков и выбраны датчики:

- для измерения виброперемещения: вихретоковый датчик AP2400A–V производства ООО «ГлобалТест»;

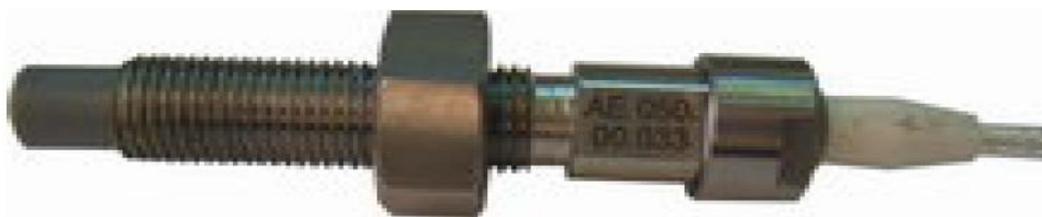


Рис. 7. Вихретоковый датчик AP2400–V

- для измерения виброскорости: индуктивный датчик MM-0002 компании Brüel & Kjær.



Рис. 8. Магнитный датчик MM – 0002

Патентный анализ

В ходе выполнения работы был также произведен патентный анализ в таких базах, как www.fips.ru, www.eapo.org и www.rupto.ru. Были найдены следующие документы.

Найдено достаточно много патентных документов, что говорит о том, что вибродиагностика в настоящее время является перспективными и развивающимися направлением.

Выводы

В работе был разработан новый способ вибродиагностики насосного агрегата с использованием четырех датчиков (2-х вихретоковых датчиков для измерения виброперемещения и 2-х индуктивных датчиков для измерения виброскорости). Для этого были определены измеряемые параметры вибрации, которые полностью удовлетворяли бы рабочим характеристикам насоса. Проведен сравнительный анализ датчиков для вибродиагностики, выбраны подходящие для данных условий эксплуатации. Проведен расчет измерительного канала. Также был произведен анализ патентов на подобную тематику («Вибродиагностика насоса») в российских и зарубежных открытых патентных базах данных. Однако не было найдено ни одного патента, в котором совместно измерялись бы и виброперемещение, и виброскорость. Исходя из этого можно сделать заключение о том, что разработанный метод пока не имеет аналогов.

Литература

1. *Земельман М.А.* Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств. – М.: Издательство стандартов, 1972. – 198 с.
2. *Горшков А.М.* Насосы. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1947. – 188 с.
3. *Новицкий П.В., Зограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991 г – 302.
4. *Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В.* и др. Неразрушающий контроль и диагностика. – М.: Машиностроение, 2003. – 656.
5. *Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Филинов В.Н.* и др. Том III – 7 «Измерение, контроль, испытания и диагностика» (Энциклопедия «Машиностроение» в сорока томах). – М.: Машиностроение, 1996. – 464.
6. ГОСТ ИСО 10816 – 1 – 97 «Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования»
7. ГОСТ ИСО 7919 – 1 – 2002 «Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на вращающихся валах. Общие требования»
8. ГОСТ Р ИСО 13373-1-2009 «Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 1. Общие методы»
9. ГОСТ 25275 – 82 «Приборы для измерения вращающихся машин. Общие технические требования»
10. ГОСТ Р 53565 – 2009 «Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Вибрация центробежных насосных и компрессорных агрегатов»
11. ГОСТ 32601 – 2013 «Насосы центробежные для нефтяной, нефтехимической и газовой промышленности. Общие технические требования»
12. «Регламент технического обслуживания и диагностического контроля насосных агрегатов» Транснефть, Москва, 2003 г.
13. www.fips.ru – Информационно – поисковая система Федерального Института Промышленной Собственности
14. www.eapo.org – Евразийская патентная организация
15. www.rupto.ru – Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент)