



# Вибраакустическая диагностика как основа мониторинга технического состояния машин и механизмов

Рассмотрены вопросы и специфика использования терминологии в области контроля технического состояния, диагностики и мониторинга, а также вибраакустического метода неразрушающего контроля в теории и практике технической диагностики и мониторинга состояния оборудования. В связи с этим указываются основные особенности, определяющие технические характеристики систем диагностики и мониторинга состояния с использованием вибраакустического метода, которые разделяют понятия средства контроля, системы диагностирования, системы мониторинга.

Submitted 17.07.17  
 Accepted 22.08.17

Сотрудники  
 ООО НПЦ «Динамика»,  
 г. Омск

V.N. Kostyukov<sup>1</sup>, A. P. Naumenko<sup>1</sup>

## Vibroacoustic Diagnostics as the Basis of Machinery's Health Monitoring

Integration of the results achieved by Russian scientific and technical institutions with developments in the same fields made by foreign countries gave rise to a conflict of interest and misunderstandings, particularly, in condition control, diagnostics and monitoring. The conflict of interest is, mostly, connected to commercial interests of certain firms and companies aimed at selling their product and, consequently, twisting technical diagnostic facts, deliberately or unintentionally. The misunderstanding is caused by foreign countries having a technological gap in certain scientific and technical fields, such as vibroacoustic diagnostics and health monitoring.

The paper is aimed at suggesting basic terminology for diagnostics, monitoring and vibroacoustics and the method of their application in real technological decisions.

The terminology is suggested by regulatory and procedural documents, reference, scientific and guidance literature, including the researches carried out by the authors.

The analysis of terminology used in Russia and abroad revealed that there are differences in understanding the methods of technological solutions of tasks in the fields of technological control, diagnostics, and machinery condition observation. In particular, the term «condition monitoring» is intended to be understood as condition control, not condition observation.

It is shown that the vibration acoustic signal is a random process, and vibroacoustic diagnostics requires analysis of its stochastic characteristics. It is necessary to measure the acceleration, velocity and displacement, since the stochastic characteristics of these vibroacoustic oscillations parameters are statistically independent.

The researches have concluded that real-time condition monitoring systems should provide real-time diagnostics of machinery at such time intervals that machinery condition cannot change from normal to limiting. To minimize the chance of skipping a dangerous condition and ensure reliable by vibroacoustic parameters one should measure vibration acceleration, velocity and displacement with an error which does not exceed 5% in the frequency range of at least 3000Hz.

**Keywords:** condition monitoring, real-time health monitoring system, failure, risk of dangerous condition skipping, error, acceleration, velocity, displacement

Современный уровень развития и достижения науки и техники в различных областях жизнедеятельности человека позволяет решать задачи обеспечения техногенной безопасности на принципиально новом уровне по сравнению с техническими решениями 20–30-летней давности,

которые продолжают использоваться в различных отраслях промышленности на многочисленных производствах.

Одной из основных составляющих, обуславливающей развитие систем мониторинга состояния потенциально опасных для человека технических устройств, является развитие методов

КОСТЮКОВ  
Владимир Николаевич



Научный руководитель,  
 главный конструктор,  
 д.т.н., профессор, академик  
 Российской Инженерной  
 Академии, академик  
 Международной Академии  
 Общественных Наук,  
 лауреат премии Прави-  
 тельства РФ в области  
 науки и техники,  
 специалист III уровня  
 по вибродиагностике,  
 акустической эмиссии,  
 визуальному и измери-  
 тельному контролю

НАУМЕНКО  
Александр Петрович



Заместитель руководителя  
 НОАП, начальник ЛНК,  
 д.т.н., профессор,  
 специалист III уровня  
 по ВД, АЭ, ВИК

и средств НК, технической диагностики, мониторинга технического состояния в реальном времени [1–5].

Другой составляющей с учётом внедре-  
 ния в жизнь современных инфокомму-  
 никационных технологий и решений ста-  
 новится использование этих достижений  
 и в техногенной области деятельности

человека. Прежде всего, это относится к возможностям интернет-технологий и колossalному вычислительному потенциалу современной техники, в том числе — распределённых вычислительных систем.

Понятие «система диагностики» неразрывно связано с определением терминов «диагностика» — область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов» (ГОСТ 20911-89) и «техническое диагностирование», под которым понимают определение технического состояния объекта.

Задачами технического диагностирования являются, во-первых, контроль технического состояния; во-вторых, поиск места и определение причин отказа (неисправности, возникновения дефекта); в-третьих, прогнозирование технического состояния.

Термин «техническое диагностирование» применяют в тех случаях, когда решаемые задачи диагностирования равнозначны или основной задачей является поиск места и определение причин отказа или возникновения неисправности, дефекта [6, 7].

Термин «контроль технического состояния» применяется, когда основной задачей технического диагностирования является определение вида технического состояния [6, 7].

Необходимо отметить, что под видами технического состояния понимают, например, исправное, работоспособное, неисправное, неработоспособное, предельное [6, 7], а по ГОСТ 27.002-2015 [7] ещё и рабочее, нерабочее, опасное состояния и т. п. в зависимости от значений параметров в данный момент времени [6, 7].

Вместе с тем ГОСТ 32106 [8] установлены следующие оценки технического состояния машин и механизмов по параметрам вибрации:

- «ХОРОШО» (до достижения параметром вибрации границы между зонами А и В). Этой оценке должны отвечать агрегаты при приёмочных испытаниях после монтажа или капитального (среднего) ремонта. Оценка соответствует исправному состоянию агрегата и характеризует высокое качество ремонтных и монтажных работ;
- «ДОПУСТИМО» (до достижения параметром вибрации уровня «ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ»). При такой оценке допустима длительная работа агрегата. Она соответствует работоспособному агрегату при малой вероятности его отказа;
- «ТРЕБУЕТ ПРИНЯТИЯ МЕР» (до достижения параметром вибрации уровня «ОСТАНОВ»). При этой оценке допустима непродолжительная работа агрегата. Она предупреждает о приближении технического состояния к предельному, опасному, о наличии развивающихся неисправностей, постепенной утрате работоспособности и росте вероятности отказа;
- «НЕДОПУСТИМО» (по превышению параметром вибрации уровня «ОСТАНОВ»). При такой оценке работа агрегата недопустима. Она свидетельствует о наличии развитых дефектов или высокой скорости их развития, о достижении агрегатом предельного либо опасного состояния с высокой вероятностью отказа.

Для оценки качества монтажа нового оборудования целесообразно устанавливать оценку технического состояния «ОТЛИЧНО», которому соответствуют параметры вибрации на 30% ниже границы между зонами А и В [8].

Таким образом, система диагностики должна определять:

1. Вид технического состояния согласно критериям ГОСТ 27.002-2015 или ГОСТ 32106;
  2. Место возникновения и вид неисправности;
  3. Время работы до вероятного перехода в предельное или иное состояние.
- Системы, не удовлетворяющие этим требованиям, не могут называться системами диагностики, а системы, не указывающие вид технического состояния, — системами контроля технического состояния. Такие системы следует называть системами контроля параметров.

Существующая нормативная база достаточно неоднозначно трактует понятие «мониторинг». Так, приведенное в ГОСТ Р ИСО 13372 определение «мониторинг (технического) состояния» (machinery health monitoring): «процесс, обеспечивающий возможность определения текущей эксплуатационной готовности машин и узлов без необходимости их демонтажа или обследования», справедливо в общем смысле, однако не указывает пути решения задачи текущей оценки состояния объекта, которое обеспечивало бы его безопасное функционирование [9]. Более точное определение: «мониторинг состояния» дано в [10]: «Мониторинг состояния — это наблюдение за техническим состоянием агрегата (конструкции, машины, узла, механизма) для определения и предсказания момента его 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».

Однако это определение используется разработчиками аппаратных и программных средств диагностики и мониторинга неохотно, так как требует конкретных технических решений для конкретных технических устройств, требующих серьезной научно-технической проработки и обоснований, фактически обуславливающих проведение научно-исследовательских работ с привлечением значительных материальных и интеллектуальных ресурсов. А это под силу лишь крупным, финансово обеспеченным организациям и предприятиям.

В настоящее время системы, удовлетворяющие приведённой выше терминологии, как в России, так и за рубежом принято называть системами мониторинга технического состояния в реальном времени или *real time health monitoring system*.

Поэтому все системы, обеспечивающие измерение отдельных параметров технических устройств, в т.ч. машин и механизмов, и контролирующие их величины, следует называть системами мониторинга параметров. В случае если системы контролируют параметры на интервалах времени, превышающих время достижения этими параметрами предельных значений, то такие системы следует отнести к техническим средствам контроля параметров (*condition monitoring system*).

Для исключения разногласий и сомнений при проведении классификации систем мониторинга следует использовать критерии, приведенные в ГОСТ Р 53564 [11], поскольку это единственный нормативный документ, представляющий конкретные принципы построения и критерии классификации систем, позволяющий объективно сравнивать технические возможности систем мониторинга технического состояния оборудования производственно-транспортного комплекса различного назначения.

Среди множества факторов, определяющих класс системы мониторинга, следует обратить внимание на такие как статическая и динамическая ошибки распознавания состояния оборудования и риск пропуска отказа. Данной

проблеме посвящено уже достаточно работ [4, 5], поэтому здесь можно лишь отметить, что, например, для систем мониторинга машинного оборудования важно обоснованно и адекватно принципам функционирования машин и механизмов выбирать характеристики вибрационных процессов, обеспечивающие их достоверный технический контроль и диагностику [12–17]. Иными словами, необходимо измерять те параметры и характеристики вибрационных процессов, которые характеризуют вибрацию машин и механизмов и их неисправности. Измерять эти параметры и характеристики необходимо с погрешностью, обеспечивающей минимальный риск пропуска изменения параметров вибрационного процесса и, соответственно, параметров состояния объекта диагностирования [4, 5].

Поясним сказанное на конкретном примере. В табл. 1 приведены нормы вибрации для наиболее распространённых видов оборудования, диагностирование и мониторинг состояния которого осуществляется сегодня в различных отраслях промышленности [8]. Параметр G показывает отношение величин вибропараметров оценок состояний [4, 5].

Из табл. 1 видно, что отношение величин вибропараметра при состояниях «НДП» (не допустимо) / «ТПМ» (требует принятия мер) изменяется от 1,26 до 1,63, т.е. в худшем случае при изменении величины виброскорости всего на 26% насос с подводимой мощностью более 200 кВт перейдёт из состояния «ТПМ» в состояние «НДП». А насос с подводимой мощностью менее 200 кВт при увеличении виброускорения на 33% перейдёт из состояния «ТПМ» в «НДП». Таким образом, если погрешность измерения виброскорости будет составлять  $\pm 13\%$ , а вибоускорения —  $\pm 17\%$ , то средства измерения вибрации могут показывать, что насос находится в состоянии «ТПМ», а на самом деле с учётом погрешности измерений он может находиться в состоянии «НДП».

Табл. 1. Границы зон вибрационного состояния [8]

Параметр	Границы зон	Насос			Электродвигатель			
		Мощность, кВт			Высота оси вала, мм			
		<50	<200	>200	<132	<225	<400	
$a_{RMS}$ , м/с <sup>2</sup>	ТПМ	8	12	16	8	12	16	
	НДП	12	1,50	16	1,33	24	1,50	12
$v_{RMS}$ , мм/с	ТПМ	6,3	8,7	1,29	11,2	4,5	7,1	11,2
	НДП	8,7	1,38	11,2	14,1	1,26	7,1	1,58
$d_{RMS}$ , мкм	ТПМ	18	28		36	14,1	28	36
	НДП	28	1,56	36	1,29	45	1,25	23

В таблице приняты следующие обозначения:

$a_{RMS}$ ,  $v_{RMS}$ ,  $d_{RMS}$  — средние квадратические значения перемещения, скорости, ускорения.

диться как в состоянии «ДОПУСТИМО», так и в состоянии «НДП». Реальная ситуация на рынке вибромониторинга усложняется тем, что в Государственном реестре средств измерений практически невозможно найти датчиков вибрации (акселерометров) с погрешностью измерения менее  $\pm 12\%$  в заданном диапазоне частот. Погрешности измерений отдельных вибропреобразователей могут превышать  $\pm 40\%$ . Понятно, что любая система диагностики и мониторинга с такими датчиками не может быть отнесена ни к системам 1 класса, ни к системам 2 класса, а именно системы с таким классом должны применяться для контроля состояния технических устройств опасных производственных объектов [4, 5, 11]. Исследования в области оценок предельных значений погрешности измерений параметров вибрации [4, 5] показывают, что для достижения вероятности пропуска отказа менее 0,05 погрешность измерений не должна превышать 1%!!!

Поскольку параметры вибрационных процессов, позволяющие достоверно оценивать техническое состояние и диагностировать машины и механизмы, определяют важнейшие характеристики измерительных составляющих систем диагностики и мониторинга, то нельзя не упомянуть некоторые важные понятия, связанные с определением технического состояния и диагностированием по параметрам этих процессов.

В Национальном стандарте ГОСТ Р 56542 [18] введены термины, касающиеся вибромониторинга. Несмотря на то, что введённая терминология может быть и не всеобъемлющая, она раскрывает понятия, связанные с вибромониторингом НК, однако, по сути, отражает сложившуюся ситуацию в области НК и ТД, основанных на анализе вибрации машин, механизмов и других технических устройств.

Проблема заключается в том, что сегодня де-факто существует целая отрасль в области контроля состояния и диагностики механических систем, основанная на регистрации, измерении и анализе параметров вибромониторинга. Ранее этот вид контроля называли вибрационным. За рубежом до сих пор для вибрационного контроля и диагностики **раздельно** используют вибрацию (колебания механической системы как единого целого) и акустические колебания.

В СССР с начала 1960-х гг. (см., например, диссертацию [19]) для диагностирования различных объектов (машин, механизмов, анализа излучаемых ими вибрационных и акустических полей) использовался более сложный вид колебательного процесса — вибромониторинг, т.е. **аддитивные и мультипликативные составляющие акустических и вибрационных колебаний** [12–15, 20]. Такие колебательные процессы и называли вибромониторингом. Учитывая важность анализа такого сложного вида колебательных процессов, в конце 1950-х гг. в Институте машиноведения им. А. А. Благонравова АН СССР был создан отдел вибромониторинга машин, который возглавил д. т. н. М. Д. Генкин.

В 1981 г. в справочнике «Вибрация в технике», том 5 в главе XVII «Вибромониторинг» [21], которая написана М. Д. Генкиным и А. Г. Соколовой, дано определение понятию **вибромониторинг**: это раздел технической диагностики — отрасль знаний, включающая теорию и методы организации процессов распознавания технических состояний машин и механизмов по исходной информации, содержащейся в вибромониторинговом сигнале. При этом «**вибромониторингом**» обобщённо называют физические величины, характеризующие механические колебания (вибрационные, акустические, гидроакустические), сопровождающие функционирование технического объекта» [21].

Таким образом, советским и российским учёным принадлежит приоритет в развитии отрасли контроля состояния объектов, которая использует вибромониторинг, и называется вибромониторингом. Здесь следует пояснить, что использование вибромониторинга для контроля состояния объектов представляет собой вид НК, который невозможно описать или интерпретировать с помощью других известных видов и методов НК [19–21].

Поэтому с учётом принятой в ГОСТ Р 56542 терминологии сегодня под понятием вибраакустический метод НК и ТД следует понимать метод НК, основанный на анализе параметров сигналов, измеренных в процессе регистрации вибраакустических колебаний, возникающих при работе контролируемого объекта [18].

По характеру взаимодействия физических полей с контролируемым объектом вибраакустический метод характеризуется механическими колебаниями — движением точки или механической системы, при котором происходят колебания характеризующих его скалярных величин. Причём причиной изменения координат точки могут быть как изменение координат всего объекта как единого целого, так и изменение в пространстве положения отдельных его участков, например, вследствие деформации этого участка.

В качестве первичных информативных параметров в вибраакустическом методе используются параметры **стохастических** характеристик колебательного процесса (механических колебаний).

Метод использует достаточно ограниченный набор способов получения первичной информации, к которым следует отнести, прежде всего, пьезоэлектрический и значительно реже — электромагнитно-акустический. В последнее время

предпринимаются попытки использовать приборы, основанные на лазерной интерферометрии.

Очевидно, что принятие данной терминологии требует корректировки и модернизации существующих методов и средств контроля технического состояния и диагностирования технических устройств по параметрам вибраакустических сигналов. Принципиальным является существенное расширение диапазона частот анализируемого сигнала, поскольку здесь приходится иметь дело с составляющими акустического сигнала, а его диапазон простирается от единиц до десятков и сотен килогерц. Несмотря на существующие технические средства, включающие как первичные преобразователи, так и вторичную аппаратуру, которые вроде бы и обеспечивают измерения в указанном выше диапазоне частот, тем не менее, проблема обеспечения заданной погрешности измерений остается открытой.

Исторически сложилось так, что при измерении вибрации согласно требованиям ГОСТ 2954 [22] диапазон частот, погрешность измерений в котором нормировалась, составляет от 10 до 1000 Гц. Вместе с тем, большинство нормативных документов, включая отечественные и зарубежные стандарты [23–31], ограничиваются не только диапазоном измеряемых частот, но и ука-

зывают один параметр, характеризующий вибрацию, — виброскорость (табл. 2). В некоторых случаях нормируется и виброперемещение в диапазоне до 200 Гц.

Такой подход к анализу вибраактивности технических устройств можно использовать лишь для выявления низкочастотных дефектов, которые проявляются в диапазоне до 1000 Гц. Однако многие дефекты и неисправности возбуждают вибраакустические колебания на частотах, которые существенно превышают указанный диапазон. Например, у асинхронных электродвигателей нарушение симметрии электромагнитного поля проявляется на частотах, кратных произведению числа пазов (например, 48 шт.) на частоту вращения (например, 49 Гц). Таким образом, данная проблема с электродвигателем будет проявляться на частоте 2352 Гц и её гармониках (4704, 7056 Гц), да и модулированных гармониками частоты вращения и удвоенной частоты сети ( $2352 \pm 49$ ,  $2352 \pm 100$ ,  $2352 \pm 98$ ,  $2352 \pm 200$  Гц и т.д.). Мультиплитатор компрессора с частотой вращения выходного вала  $12000 \text{ мин}^{-1}$  будет генерировать вибрацию на частотах, существенно превышающих 1000 Гц: 30 зубьев умножим на 200 Гц и получим зубцовую частоту 6000 Гц, которая к тому же будет модулирована частотами

Табл. 2. Параметры вибрации, используемые для оценки вибраактивности оборудования [31]

Стандарт	Год	Критерии	Диапазон частот, Гц	Тип машин
VDI 2056	1964	$d_{\text{P-P}}$ $V_{\text{RMS}}$	2,5–10 10–1000	Поршневые машины тип K, M, G, T, D, S
ISO 2372	1974	$d_{\text{PEAK}}$ $V_{\text{RMS}}$	2,5–10 10–1000	Поршневые машины тип I–VI
DLI Eng. Corp.	1988	$d_{\text{P-P}}$ $V_{\text{PEAK}}$ , $a_{\text{RMS}}$	10–1000	Поршневые машины
ISO 10816-6	1995	$d_{\text{RMS}}$ , $V_{\text{RMS}}$ , $a_{\text{RMS}}$	2–1000	Поршневые машины тип 1–7
ГОСТ ИСО 10816-1	1997	$d_{\text{RMS}}$ , $V_{\text{RMS}}$ , $a_{\text{RMS}}$	10–1000	Статорные элементы машин
ГОСТ 25364	1997	$V_{\text{RMS}}$	10–1000	Агрегаты паротурбинные стационарные
ГОСТ 30576	1998	$d_{\text{RMS}}$ , $V_{\text{RMS}}$ , $a_{\text{RMS}}$	10–1000	Насосы центробежные питательные тепловых электростанций
ГОСТ ИСО 10816-3	1999	$d_{\text{RMS}}$ , $V_{\text{RMS}}$	10–1000	Центробежные насосы, электродвигатели
ГОСТ 31351	2007	$d_{\text{RMS}}$ , $V_{\text{RMS}}$ , $a_{\text{RMS}}$ , $d_{\text{PEAK}}$ , $a_{\text{PEAK}}$	10–1000	Вентиляторы промышленные
ГОСТ 31349	2007	$d_{\text{RMS}}$ , $V_{\text{RMS}}$ , $a_{\text{RMS}}$	10–1000	Электроагрегаты генераторные переменного тока
ГОСТ Р МЭК 60034-14	2008	$d_{\text{RMS}}$ , $V_{\text{RMS}}$ , $a_{\text{RMS}}$	2–1000	Машины электрические врачающиеся
ГОСТ 32106	2013	$d_{\text{RMS}}$ $V_{\text{RMS}}$ $a_{\text{RMS}}$	2–200 2–1000 2–3000	Центробежные и винтовые насосные и компрессорные агрегаты
ISO 10816-8 ГОСТ ИСО 10816-8	2014 2016	$d_{\text{RMS}}$ , $V_{\text{RMS}}$ , $a_{\text{RMS}}$	2–1000	Поршневые компрессоры $120–1800 \text{ мин}^{-1}$
ГОСТ Р 56233	2014	$d_{\text{RMS}}$ , $d_{\alpha}$ $V_{\text{RMS}}$ $a_{\text{RMS}}$ , $a_{\alpha}$	2–200 2–100 2–10000	Поршневые компрессоры

В таблице приняты следующие обозначения:

$d_{\text{PEAK}}$ ,  $V_{\text{PEAK}}$ ,  $a_{\text{PEAK}}$  — пиковые значения: наибольшее абсолютное значение экстремумов колеблющейся величины в рассматриваемом интервале времени;

$d_{\text{P-P}}$  — размах: разность между наибольшим и наименьшим значениями колеблющейся величины в рассматриваемом интервале времени;

$d_{\alpha}$ ,  $a_{\alpha}$  —  $\alpha$ -квантили виброперемещения и виброскорения.

или интегрирования, являются статистически независимыми или ортогональными параметрами [1–3, 31–35].

В качестве примера приведены сигналы и спектры виброускорения (рис. 1, 2) и виброскорости (рис. 3, 4), полученные с помощью пьезоакселерометра, установленного на подшипнике электродвигателя, который имел недопустимые дефекты. Основная часть колебательной энергии сосредоточена в высокочастотной области в диапазоне от 4 до 5 кГц, что показывает спектр виброускорения (рис. 2). При этом СКЗ виброускорения составляет  $37 \text{ м/с}^2$ , что превышает величину зоны вибрационного состояния, соответствующую состоянию НДП, более чем в два раза [8]. В тоже время СКЗ виброскорости составляет  $6,3 \text{ мм/с}$ , что меньше уровня ТПМ для двигателей с высотой центра менее 225 мм (табл. 1). После замены подшипника величина СКЗ виброускорения уменьшилась в 10 раз и составила  $3,7 \text{ м/с}^2$  (рис. 5). Несмотря на то, что при проведении ремонта проводились разборка электродвигателя и его центровка, которые могли повлиять на величину несоосности валов и качество крепления, т.е. могли быть причиной изменения низкочастотной вибрационной активности агрегата, величина СКЗ виброскорости изменилась на 5% и составила  $6,12 \text{ мм/с}$  (рис. 6), что сопоставимо с погрешностью измерений системы мониторинга и диагностики [1] и статистической изменчивостью сигнала.

Таким образом, ухудшение состояния и значительный дефект подшипника проявились в виброускорении и абсолютно никак не проявились в виброскорости. Поэтому при измерении только виброскорости данный дефект был бы пропущен, что создало бы предпосылки возникновения внезапного инцидента или аварии. В то же время при использовании параметров вибрации,

приведённых в [8, 36], данная ситуация исключается, поскольку указанные стандарты требуют проводить измерение виброускорения, виброскорости, виброперемещения, скоростей их изменения с верхней границей частотного диапазона от 3 до 10 кГц.

Данный пример показывает, что виброускорение и виброскорость, как и виброскорость и виброперемещение, а тем более и виброускорение и виброперемещение, являются параметрами вибрации, которые невзаимозаменяемы с точки зрения оценки стохастических свойств колебательных процессов и независимо друг от друга характеризуют различные непересекающиеся классы неисправностей [1–3, 12–14].

Резюмируя изложенное, можно констатировать следующее:

1. Сегодня нормативно закреплено понятие «вибраакустический метод неразрушающего контроля», под которым понимают метод, основанный на анализе параметров стохастических характеристик сигналов, измеренных в процессе регистрации вибраакустических колебаний, возникающих при работе контролируемого объекта [2, 18].
2. Системами мониторинга технического состояния в реальном времени являются системы, которые обеспечивают оценку вида состояния объекта, определяют место возникновения и вид неисправности, оценивают остаточный ресурс объекта, причём выполняют все эти операции в реальном времени, т.е. в темпе проводимых измерений, на неразрывно примыкающих друг к другу интервалах времени, в течение которых состояние агрегата не может измениться от нормально-го до предельного [1, 11].
3. Для минимизации вероятности пропуска опасного состояния оборудования

(не более 0,05), в частности по параметрам вибрации, необходимо, чтобы система мониторинга и диагностики обладала вероятностями ошибок статического распознавания состояния оборудования не более 0,01, динамического — не более 0,001 [4, 5].

4. С целью повышения достоверности определения технического состояния необходимо проводить измерение всех трёх основных параметров вибраакустических колебаний — виброперемещения, виброскорости, виброускорения, причём последний параметр должен измеряться минимум в диапазоне до 3000 Гц. При этом предпочтительно проводить измерения до 10 кГц с погрешностью, не превышающей единиц процентов [1, 2, 8, 36].
5. Учитывая номенклатуру нормированных величин вибраакустического сигнала, их диапазоны частот, критерии оценки для контроля состояния центробежных насосных и компрессорных агрегатов, следует использовать стандарт ГОСТ 32106 [8], а для контроля состояния стационарных поршневых компрессоров — ГОСТ Р 56233 [36].

#### Литература

1. Костюков В.Н. Мониторинг безопасности производства. — М.: Машиностроение, 2002. — 224 с.
2. Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы вибраакустической диагностики и мониторинга машин: учебное пособие./Министерство образования и науки РФ, Омский гос. тех. ун-т; НПЦ «Динамика». — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. — 378 с.
3. Науменко А.П. Научно-методические основы вибродиагностического мониторинга поршневых машин в реальном времени: дисс. д.т.н. — Омск: ОГТУ. 2012. — 423 с.
4. Костюков В.Н., Науменко А.П., Ткаченко А.А. Концепция выбора и обоснование систем мониторинга состояния оборудования компрессорных станций. — Компрессорная техника и пневматика. 2015. № 7. С. 33–42

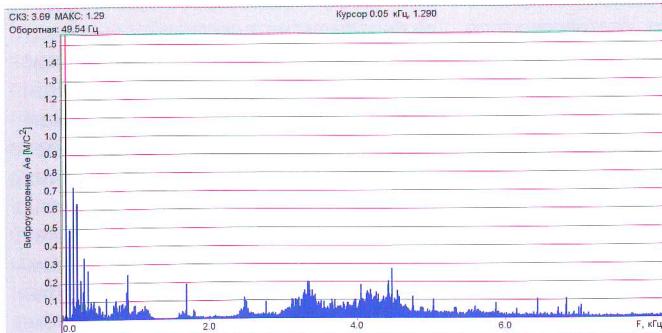


Рис. 5. Спектр виброускорения исправного подшипника имеет низкоуровневые спектральные составляющие в диапазоне от 1 до 7 кГц

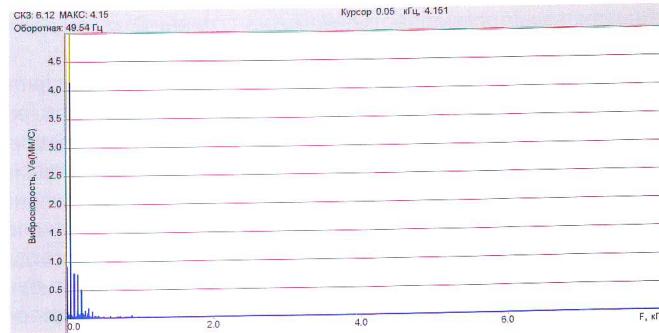


Рис. 6. Спектр виброскорости при отсутствии дефекта подшипника

5. Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Науменко А.П. и др. Риски мониторинга оборудования топливно-энергетического комплекса. — Новое в российской электроэнергетике. 2014. № 3. С. 30–44.
6. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2016.
7. ГОСТ 20911–89. Техническая диагностика. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2009.
8. ГОСТ 32106–2013. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Вибрация центробежных насосных и компрессорных агрегатов. — М.: Стандартинформ, 2014.
9. ГОСТ Р ИСО 13372–2013 Контроль состояния и диагностика машин. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2014.
10. Системы мониторинга агрегатов опасных производственных объектов. Общие технические требования (СА 03-002-04): стандарт ассоциации «Ростехэкспертиза», ассоциации нефтехимиков и нефтепереработчиков и НПС РИСКОМ. — М.: Химическая техника, 2005. — 42 с.
11. ГОСТ Р 53564–2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Требования к системам мониторинга. — М.: Стандартинформ, 2010.
12. Науменко А.П. Методология вибрационной диагностики поршневых машин. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2007. № 4. С. 85–95.
13. Науменко А.П. Вибрационная модель диагностического сигнала поршневого компрессора. — Динамика систем, механизмов и машин. 2009. № 2. С. 39–44.
14. Костюков В.Н., Науменко А.П. Обобщенная модель механизма формирования и структуры вибрационного сигнала поршневой машины. — В кн.: XXI Всеросс. конф. по неразрушающему контролю и технической диагностики / Сборник трудов. — М.: «Спектр», 2017, с. 187–196.
15. Kostyukov V.N., Naumenko A.P. The Piston Compressor: The Methodology of the Real-Time Condition Monitoring. — J. Phys: Conf. Ser. 2012. V. 364. No. 1.
16. Костюков В.Н., Науменко А.П. Оценка риска выбора нормативных величин диагностических признаков. — Динамика систем, механизмов и машин. 2014. № 4. С. 150–154.
17. Kostyukov V.N., Naumenko A.P. Risk assessment selection of guideline values of diagnostic signs. — In: 12th Intern. Conf. on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies (CM 2015/MFPT 2015). — Oxford (UK): BINDT, Curran Associates, Inc., 2015, p. 241–245.
18. ГОСТ Р 56542–2015. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. — М.: Стандартинформ, 2016.
19. Аллилуев В.А. Исследование и разработка метода диагностики цилиндроворшневой группы тракторного дизеля на основе вибрационных характеристик/Автореф. дис. канд. техн. наук. — Л.: ЛСХИ, 1968. — 20 с.
20. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Вибрационная диагностика машин и механизмов. — М.: Машиностроение, 1987. — 288 с.
21. Вибрация в технике/Справочник. Т. 5. Измерения и испытания // под ред. М.Д. Генкина. — М.: Машиностроение, 1981. — 496 с.
22. ГОСТ ISO 2954–2014. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Требования к средствам измерений. — М.: Стандартинформ, 2015.
23. ГОСТ 30576–98. Насосы центробежные питательные тепловых электростанций. Нормы вибрации и общие требования к проведению измерений. — М.: Изд-во стандартов, 2000.
24. ГОСТ 25364–97. Агрегаты паротурбинные стационарные. Нормы вибрации опор валоприводов и общие требования к проведению измерений. — М.: Изд-во стандартов, 1998.
25. ГОСТ 31349–2007 (ИСО 8528–9:1995). Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Измерение вибрации и оценка вибрационного состояния. — М.: Стандартинформ, 2008.
26. ГОСТ 31351–2007 (ИСО 14695:2003). Вентиляторы промышленные. Измерения вибрации. — М.: Стандартинформ, 2008.
27. ГОСТ ИСО 10816-1-97. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Ч. 1. Общие требования. — М.: Изд-во стандартов, 1998.
28. ГОСТ Р ИСО 10816-3-99. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Ч. 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скорости от 120 до 15 000 мин<sup>-1</sup>. — М.: Стандартинформ, 2005.
29. ГОСТ Р МЭК 60034-14-2008. Машины электрические вращающиеся. Ч. 14. Механическая вибрация некоторых видов машин с высотой оси вращения 56 мм и более. Измерения, оценка и пределы вибрации. — М.: Стандартинформ, 2009.
30. ГОСТ Р ИСО 10816-8-2016. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Ч. 8. Установки компрессорные поршневые. — М.: Стандартинформ, 2016.
31. Науменко А.П. Нормативно-методическое обеспечение вибродиагностического мониторинга поршневых компрессоров. — Химическая техника. 2015. № 11. С. 9–11.
32. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. — М.: Физматгиз, 1962. — 564 с.
33. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы/Учеб. для вузов. — М.: Сов. радио, 1977. — 608 с.
34. Левин Б.Р. Теория случайных процессов и её применение в радиотехнике. — М.: Сов. радио, 1957. — 496 с.
35. Костюков В.Н., Науменко А.П. Решения проблем безопасной эксплуатации поршневых машин. — Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 3. С. 27–36, 1-я, 4-я с. обложки.
36. ГОСТ Р 56233–2014. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Вибрация стационарных поршневых компрессоров. — М.: Стандартинформ, 2015.

Статья получена 17 июля 2017 г.,  
в окончательной редакции — 22 августа

## От редакции

Эта статья была уже сверстана, когда в редакцию пришло сообщение. В память о Владимире Николаевиче мы приводим фрагменты его интервью газете «Коммерческие вести» от 29.01.2014, читайте

— НПЦ «Динамика» был основан в 1991 году. На тот момент вы уже занимались нефтепереработкой?

— Выросли мы из отраслевого НИИ. В связи с прекращением финансирования нам было поручено заняться проблемами ПО «Омскнефтеоргсинтез» — повысить надёжность оборудования. Завод перерабатывал ≈ 20 млн. т/год, существенно больше проектной мощности, что приводило к стрессовому состоянию как производства, так и руководства. Через год поставили первую систему, опыт оказался удачным:

система показала разрушение, которое обычными средствами не выявлялось. Весной 1991 года нам поручили восемь агрегатов.

— Был ли хоть кто-то, на кого вы могли равняться в этой работе?

— Проблема в том и заключалась, что хоть сколько-то схожих с нашей систем в то время не было. Мы предлагали методы диагностики вибрационной...

— С теми восемью системами все удалось?

— Мы внедрили, решив при этом еще две задачи, ранее не представленные в мировой практике: высокочастотные сигналы наших датчиков передавались на расстояние выше 300 м; нами впервые были использованы только что появившиеся тогда ПК.

На ОНПЗ это было оценено по достоинству — «Организуйте фирму и продолжайте с нами работать».

К сожалению, в представлении государства мы — обычновенные коммерсанты: кто-то водкой торгует, кто-то — пивом, а мы — системы изобретаем.

В.Н. Костюков, 29.01.2014

— Какой свой проект вы назвали бы самым интересным?

— Омский НПЗ. Так получилось, что это предприятие — не только флагман нефтепереработки, но и флагман умных людей. Несмотря на все перестройки, Сибнефти, «Газпром нефти» и так далее, там до сих пор сохраняется та школа, которая была заложена основателем завода Александром Малунцевым и его последователями Виктором Рябовым, Иваном Лицкевичем.

Полный текст интервью на <http://kvnews.ru/gazeta/2014/yanvar/-3/67772>

ЕЖЕКВАРТАЛЬНЫЙ ЖУРНАЛ

# В МИРЕ НК

ISSN 1609-3178



В МИРЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

2017. Том 20. № 3



Тема номера:  
Вибродиагностика

**И.о. главного редактора:**

В.А. Сясько

(Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург)

**Редакционный совет:**

В.А. Бритвин (ООО «Ультракрафт», г. Череповец)

В.П. Вавилов (Национальный исследовательский Томский политехнический ун-т)

В.Л. Венгринович (Институт прикладной физики НАН Беларусь, г. Минск)

В.А. Галанович (ОАО «РЖД», г. Москва)

Н.Н. Коновалов (ОАО «НТЦ

«Промышленная безопасность», г. Москва)

Ю.Н. Посьтайко (УОНКТД, г. Киев)

М.Ю. Тульский (ПАО «Газпром»),

Санкт-Петербург)

В.Г. Шевальдышин (РОНКТД, г. Москва)

С.В. Шаблов (г. Москва)

**Редколлегия:**

М.Я. Грудский (зам. гл. редактора)

К.В. Гоголинский, Г.Я. Дымкин,

Е.Ф. Кретов, А.А. Майоров,

А.А. Марков, И.Б. Московченко,

И.В. Павлов, В.Е. Прохорович,

М.В. Розина

**Арт-директор:**

Д.В. Гаенко

**Верстка, препресс:**

Э.Б. Степанова

«В мире неразрушающего контроля», 2017, Том 20, №3

Подписан к печати 23.08.2017.

Редакция не несет ответственности за достоверность информации, опубликованной в рекламных объявлениях.

Содержание публикуемых статей может не отражать мнение редакции.

Зарегистрирован в Государственном Комитете Российской Федерации по печати. Свидетельство ПИ № ФС77-61651 от 7 мая 2015 г. Установочный тираж 2000 экз. Цена договорная.

Оригинал-макет изготовлен ООО «Свен». Отпечатано в типографии «L-Print».

Учредитель: ООО «Свен».

Журнал включен в РИНЦ, Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ.

Сведения о журнале ежегодно печатаются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

**Индекс для подписки по каталогам:**

«Роспечать» — 29976,

«Урал-Пресс» — 29976,

«Пресса России» — 42304.

© ООО «Свен», 2017

**Россия, 194017, Санкт-Петербург,**  
пр. Удельный, д. 5

Тел. +7 (812) 670 7609

+7 (812) 670 7611

**Editor-in-Chief**

**Vladimir A. Syasko**

Deputy Editor-in-Chief

**Michael Ya. Grudsky**

External relations manager

**Elena Grudskaya**

**NDT World**

5 Udelny Pr., St. Petersburg

194017, Russia

Tel. +7(812) 670 7609

+7(812) 670 7611

editor@ndtworld.com

www.ndtworld.com

## Vibration Diagnostics

V.N. Kostyukov, A.P. Naumenko. Vibroacoustic Diagnostics as the Basis of Machinery's Health Monitoring .....	4
V.N. Kostyukov, E.V. Tarasov. Fatigue Degradation Evaluation of Details and Substructures of Dynamic Equipment in Operation by Vibration Parameters .....	11
V.N. Kostyukov, Al.V. Kostyukov, S.N. Boychenko, A.V. Schelkanov, E.A. Burda. Complex Application of Vibration Diagnostics and Partial Discharges Methods at Various Stages of Dynamic Equipment Operation.....	15
V.N. Kostyukov, Al.V. Kostyukov, E.V. Tarasov, D.V. Kazarin. Automatic Health Monitoring of the Equipment for the Production and Transport Complex.....	19
A.A. Redushev, A.N. Tsyplenkov, E.V. Toporov, O.V. Shukov. Vibration Velocity Sensor AV02 with HART Protocol .....	23

## Personal Certification

D.I. Galkin, O.R. Ahmedova, G.A. Bazarova. Good Example (Best Practice) of the Digital Economy Implementation in Nondestructive Testing.....	27
--	----

## Abstracts

M.V. Rozina, T.Yu. Sharapova, A.S. Suzhaeva. Abstracts of the Articles Published in Other Sources .....	32
T.Yu. Sharapova. Internet News .....	35

## Magnetic Inspection

A.P. Gopkalo, G.Ya. Bezlyudko, V.A. Nekhotiashchiy. Estimation of the residual strength of AISI304 steel under static and cyclic loading using coercive force measurements .....	39
H.F. Khorlo, A.A. Lukina, S.V. Savluk, R.N. Solomakha, G.Ya. Bezlyudko. Assessment of the Current Fatigue State of a Metal Tower of Wind-Driven Generator Installation on Measurements of the Metal Magnetic Characteristic — Coercive Force .....	46

## Metrology

P.V. Solomenchuk, N.I. Smirnova. Electrical Conductivity Measurement Non-Ferrous Metal: Instruments and Metrological Assurance .....	54
A.F. Ostrivnay, A.A. Lobashev. Metrological Assurance of Mechanical Stress Measurements .....	58

## NDT in the Railways

V.N. Kostyukov, Al.V. Kostyukov, D.V. Kazarin, A.V. Zaytsev. Vibration Monitoring of Wheel-Motor Units of Electric Rolling Stock .....	63
V.F. Tarabrin, D.M. Sheglov, O.N. Kislyakovskiy. Innovative Application of Visual and Instrumental Testing and Optical Inspection for Complex Diagnostics of Infrastructure Facilities for Railway Transport .....	68

## РЕКЛАМА

Кропус .....	обл. 2
Твема .....	обл. 3
ACK-РЕНТГЕН .....	обл. 4
ATG .....	c. 1
АКС .....	c. 36–37
Константа .....	c. 53
Марстар .....	c. 29 Helling .....
Физприбор .....	c. 62 NDT Russia .....
Формула НК .....	c. 38 12 <sup>th</sup> ECNDT.....
	c. 30

## Вибродиагностика

В.Н. Костюков, А.П. Науменко. Вибраакустическая диагностика как основа мониторинга технического состояния машин и механизмов.....	4
В.Н. Костюков, Е.В. Тарасов. Контроль усталостной деградации деталей и узлов динамического оборудования в эксплуатации по параметрам вибрации .....	11
В.Н. Костюков, Ал.В. Костюков, С.Н. Бойченко, А.В. Щелканов, Е.А. Бурда. Комплексное применение методов вибродиагностики и частичных разрядов на различных этапах эксплуатации динамического оборудования .....	15
В.Н. Костюков, Ал.В. Костюков, Е.В. Тарасов, Д.В. Казарин. Автоматический мониторинг «здоровья» оборудования производственно-транспортного комплекса .....	19
А.А. Редюшев, А.Н. Цыпленков, О.В. Шуков, Е.В. Топоров. Датчик виброскорости AV02 с протоколом HART .....	23

## Сертификация персонала

Д.И. Галкин, О.Р. Ахмедова, Г.А. Базарова. Пример внедрения цифровой экономики в неразрушающем контроле .....	27
--	----

## Рефераты

М.В. Розина, Т.Ю. Шарапова, А.С. Сужаева. Рефераты статей в научной периодике .....	32
Т.Ю. Шарапова. Новости Интернета .....	35

## Магнитный контроль

А.П. Гопкало, Г.Я. Безлюдько, В.А. Нехотящий. Оценка остаточной прочности стали AISI304 при статическом и циклическом нагружении по измерениям коэрцитивной силы .....	39
Н.Ф. Хорло, А.А. Лукина, С.В. Савлук, Р.Н. Соломаха, Г.Я. Безлюдько. Оценка текущего усталостного состояния металлической башни ветроэлектрической установки по измерениям магнитной характеристики металла — коэрцитивной силы .....	46

## Метрология

П.В. Соломенчук, Н.И. Смирнова. Измерение удельной электрической проводимости цветных металлов, приборы и средства метрологического обеспечения .....	54
А.Ф. Остривной, А.А. Лобашев. Метрологическое обеспечение измерений механического напряжения .....	58

## НК на железнодорожном транспорте

В.Н. Костюков, Ал.В. Костюков, Д.В. Казарин, А.В. Зайцев. Вибрационный контроль колёсно-моторных блоков электроподвижного состава .....	63
В.Ф. Тарабрин, Д.М. Щеглов, О.Н. Кисляковский. Инновационное применение визуально-измерительного и оптического контроля в системе комплексной диагностики объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта .....	68

## СПОНСОРЫ ЖУРНАЛА



**Кропус**  
Ведущий производитель современных средств неразрушающего контроля и технической диагностики



**Твема**  
Системотехника и приборостроение, программирование и мат. обеспечение средств НК, компьютерные обучающие системы



**ATG**  
Комплексные решения для НК: производство, обучение и сертификация персонала, инспекции, консалтинг

## Колонка главного редактора



Тема этого номера журнала нетипична для специализированного издания по неразрушающему контролю. И тем приятнее держать в руках номер, посвящённый вибродиагностике. Ставящая сложнейшие задачи корреляционно-регрессивного анализа параметров вибрации для оценки технического состояния исследуемых объектов, вибродиагностика позволяет своевременно обнаружить недопустимые вибрации, тем самым обеспечивая нашу безопасность. Авторы многих статей номера пытаются найти пути прогнозирования состояния контролируемых объектов: подшипников качения, колесно-редукторных блоков или их узлов, прочих объектов по результатам измерительного НК.

Третий номер журнала приурочен к открытию выставки «Дефектоскопия 2017» в Тюмени, старейшем русском городе, на гербе которого серебром написан девиз: «от сего града начинается». Много веков назад именно отсюда началось плавание по рекам Сибири, сегодня в «нефтегазовой столице России» развиты наука и промышленность, многогранная культура. Мы будем рады видеть технических специалистов Сибири на нашей выставке, в процессе обмена знаниями выигрывают обе стороны!

Уважаемые читатели, нам будет интересно знать Ваше мнение о публикациях и о возможных темах номеров на следующий год. Пишите, но не забывайте Пушкина: «Чтение — вот лучшее учение!»

Б.А. Сасько



**ACK-RЕНТГЕН**  
Надежный поставщик оборудования и расходных материалов для цифровой и классической радиографии европейского качества