

В результате обработки ВА сигналов подшипников с известными дефектами получены графики ХФ при различных ТС подшипников. Анализ зависимостей (рис. 1) показывает, что параметры ХФ ВА сигналов подшипников качения являются чувствительными к изменению их ТС, причем, состояние подшипника определяется формой ХФ. Поэтому можно однозначно говорить о параметрах ХФ как о диагностических признаках ТС подшипников качения.

Как видно из рис. 1, в качестве основного диагностического признака ХФ можно принять значение ее модуля при некотором фиксированном значении параметра. Или значение параметра ХФ при некотором фиксированном значении модуля.

Также в качестве диагностического признака можно использовать интегральную характеристику ХФ. Для получения интегральной характеристики оценивают площадь под кривой модуля характеристической функции по выражению:

$$S_{|\theta(v)|} = \int |\theta(v)| dv. \quad (3)$$

На способ диагностики механизмов по параметрам ХФ авторами получены патенты РФ [5, 6].

Главным преимуществом применения для диагностирования ХФ вибрации является ее свойство безразмерного инварианта. Это исключает необходимость подбора исправных и неисправных подшипников-эталонов для установления предельных значений параметров и обучения систем диагностики, что существенно сокращает сроки их разработки и внедрения.

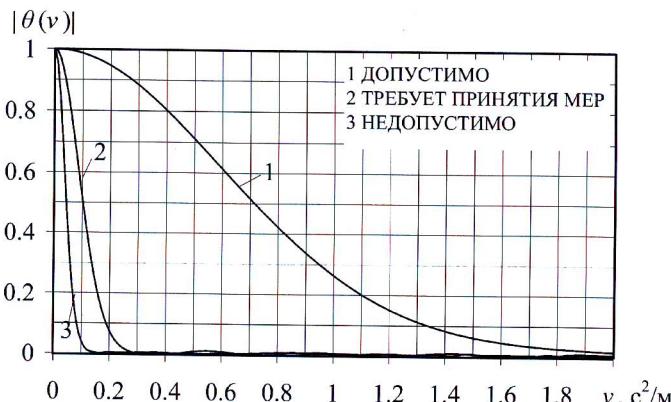


Рис. 1. Зависимость модуля ХФ ВА сигналов от технического состояния подшипников качения

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вешкурцев Ю. М. Прикладной анализ характеристической функции случайных процессов : монография / Ю. М. Вешкурцев. – М.: Радио и связь, 2003. – 201 с.; ил.
2. Костюков В. Н. Повышение операционной эффективности предприятий на основе мониторинга в реальном времени (монография) / В. Н. Костюков, Ан. В. Костюков. – М.: Машиностроение, 2009. – 192 с.
3. Костюков В. Н. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин: Учебное пособие / В. Н. Костюков, А. П. Науменко. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. – 360 с.
4. Костюков В. Н. Мониторинг безопасности производства / В. Н. Костюков. – М.: Машиностроение, 2002. – 224 с.
5. Патент № 2514119. Российская Федерация. Способ вибродиагностики механизмов по характеристической функции вибрации / В. Н. Костюков, А. П. Науменко, С. Н. Бойченко, И. С. Кудрявцева. – № 2012100600/28; заявл. 10.01.2012; опубл. 27.04.2014, Бюл. № 12.
6. Патент № 2517772. Российской Федерации. Способ вибродиагностики механизмов по характеристической функции вибрации / В. Н. Костюков, А. П. Науменко, С. Н. Бойченко, И. С. Кудрявцева. – № 2012143962/28; заявл. 15.10.2012; опубл. 27.05.2014, Бюл. № 12.

## АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА «ЗДОРОВЬЯ» ОБОРУДОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ВЫСОКУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Костюков В. Н., Костюков Ан. В., Костюков Ал. В.,  
Бойченко С. Н., Казарин Д. В.

(ООО НПЦ «ДИНАМИКА», г. Омск, Россия)

Для предприятий с непрерывным циклом производства, где технология работы жестко определена, главной проблемой повышения эффективности является надежность оборудования, что в немалой степени зависит от технологического персонала, который, управляя различными технологическими процессами в реальном времени, часто отрицательно воздействует на его состояние. В совокупности с высокой степенью изношенности основного оборудования, характерной для большинства предприятий производственно-транспортного комплекса, отрицательное воздействие на его состояние со стороны персонала приводит к значительным потерям прибыли от аварий и простоев, а так же высоким затратам на ремонт.

Основными причинами возникновения аварий на предприятиях производственно-транспортного комплекса являются: отказы технологического оборудования, устройств автоматического контроля, управления и защиты; несоблюдение правил эксплуатации и ошибочные действия обслуживающего персонала; нарушения технологического режима; ошибки при

проектировании; несоблюдение правил техники безопасности при выполнении различного вида работ. Так, например, для предприятий нефтехимии и нефтепереработки наибольшие материальные потери приходятся на аварии, вызываемые поломкой оборудования (примерно 27 % от суммарного экономического ущерба), ошибками операторов (18 %), нарушениями технологического режима (более 18 %), ошибками в проекте (около 12 %) и утечкой газов в атмосферу (около 12 %). Таким образом, не менее половины аварий, так или иначе, связано с отрицательным воздействием человеческого фактора. Если же учесть ошибки проектирования, строительства и негативное поведение окружающих, то окажется, что около 80 % аварий определяется человеческим фактором. Основными же причинами неисправностей, приводящих к нарушению работоспособности и отказу оборудования, являются скрытый характер их зарождения и развития, субъективный контроль качества оборудования и узлов при производстве и ремонте, наличие скрытых ошибок проектирования и монтажа, отсутствие объективного контроля над действиями персонала, ответственного за ведение технологического процесса и работоспособность оборудования. Несмотря на разнообразие возможных причин неисправностей, проблема в большинстве случаев проявляется внешне как внезапный отказ.

Достижение устойчивости производственной системы обеспечивает стабильность и гарантирует безопасность только при наличии наблюдаемости и управляемости, когда все операции наблюдения связаны воедино, а их период ( $T_0$ ) не превышает наиболее короткий интервал критического изменения наблюдаемого процесса ( $T_{critical}$ ) (рис. 1).

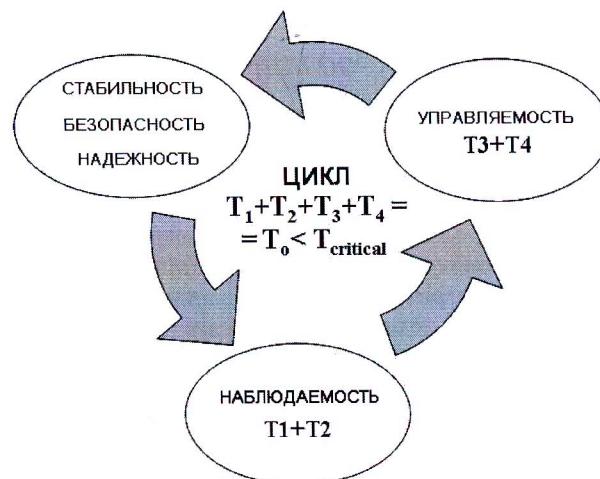


Рис. 1. Зависимость между устойчивостью, стабильностью, наблюдаемостью и управляемостью производственной системы

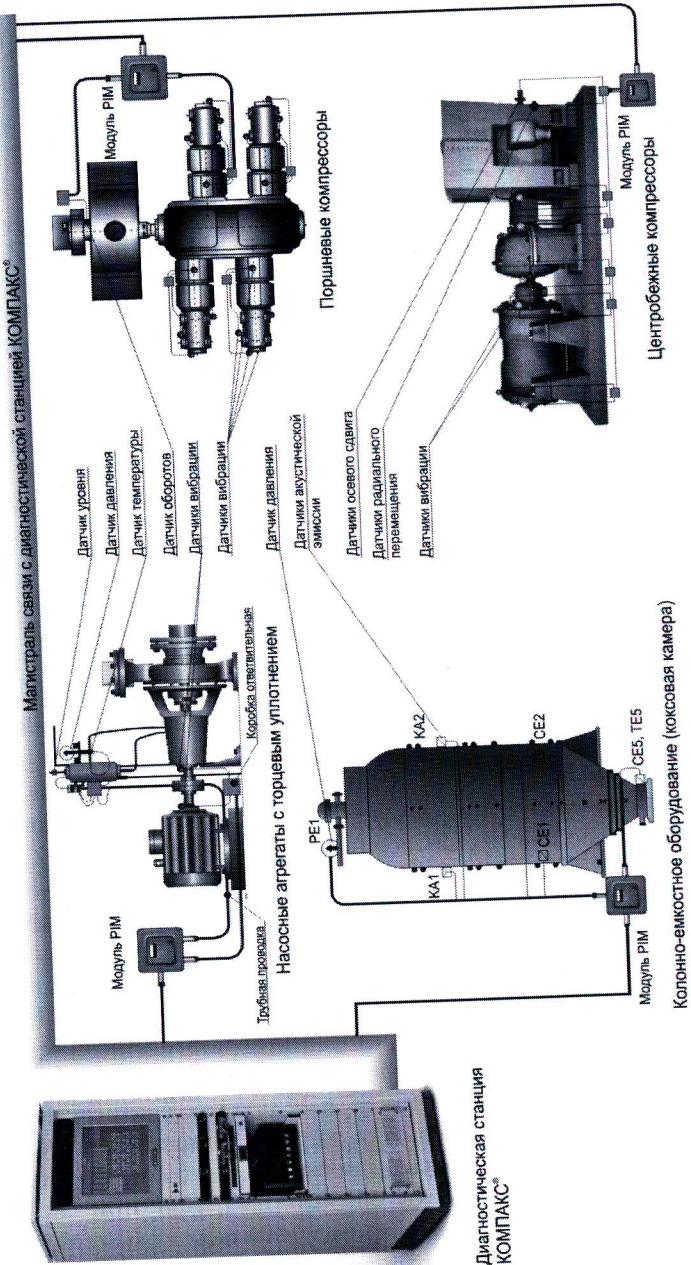
В соответствии с рис. 1 для того чтобы развитие неисправности в оборудовании стало наблюдаемым, необходимо обеспечить непрерывную диагностику с автоматической доставкой объективных результатов, независимо от воли исполнителей, лицам, ответственным за его эксплуатацию, с интервалом не превышающим наиболее короткий интервал ее развития, т.е. необходим мониторинг технического состояния, неисправностей и риска эксплуатации – мониторинг «здоровья».

Наблюдаемость технического состояния – мониторинг «здравья» производственно-транспортного комплекса обеспечивается путем мониторинга входящих в него объектов для определения их текущего технического состояния и предсказания момента перехода в предельное состояние. Результат мониторинга представляет собой совокупность диагнозов объектов мониторинга, составляющих производственно-транспортный комплекс, получаемых на неразрывно примыкающих друг к другу интервалах времени, в течение которых состояние объектов существенно не изменяется.

Мониторинг осуществляется с помощью системы диагностики и мониторинга, которая должна обнаружить неисправности, обеспечить наблюдение за их развитием и своевременно предупредить персонал о необходимости проведения технического обслуживания или вывода оборудования в ремонт с экстренной его остановкой. Существенное повышение надежности на предприятиях производственно-транспортного комплекса без замены оборудования и реконструкции, как показывает опыт, можно обеспечить внедрением систем КОМПАКС® – автоматических средств мониторинга «здравья» оборудования на всех этапах их жизненного цикла.

Система КОМПАКС® имеет распределенную структуру полевой сети, обеспечивающую на единой программно-аппаратной платформе мониторинг технического состояния разнообразного оборудования (рис. 2), используя широкий набор методов неразрушающего контроля, в первую очередь виброакустический, акусто-эмиссионный, вихревоковый, электрический, тепловой и другие методы.

За 25 лет созданы и внедрены более 500 автоматических систем мониторинга «здравья» оборудования в реальном времени (Real-Time Health Monitoring – RTHM) для различных предприятий производственно-транспортного комплекса, которые обнаруживают не только изменение технического состояния объекта мониторинга, но и причины его изменения без участия человека. Эти системы используют алгоритмы экспертной системы поддержки принятия решений реального времени с автоматическим диагностированием неисправностей узлов оборудования. При этом системы автоматически определяют вид и степень опасности неисправностей, автоматически указывают персоналу, какие действия он должен произвести, чтобы их устранить.



**Рис. 2. Структура системы мониторинга «Здоровья» КОМПАКС<sup>®</sup>**  
**для предприятий нефтепереработки**

Замыкание цикла «устойчивость-наблюдаемость-управляемость» производственной системы (см. рис. 1) обеспечивается путем объединения систем мониторинга, эксплуатируемых на различных участках и подразделениях предприятий и охватывающих различные этапы жизненного цикла оборудования (эксплуатация, производство, обслуживание, ремонт, модернизация), посредством диагностической сети, разворачиваемой в масштабах предприятия, в единый комплекс – автоматизированную систему управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатации (АСУ БЭР<sup>TM</sup> КОМПАКС<sup>®</sup>). Пример АСУ БЭР<sup>TM</sup> КОМПАКС<sup>®</sup> одного из промышленных предприятий приведен на рис. 3.

В России РТНМ системы оборудования КОМПАКС®, отвечающие требованиям стандартов, эксплуатируются в 12 отраслях промышленности, в том числе на предприятиях топливно-энергетического комплекса (Газпром, Газпромнефть, Роснефть, Лукойл, Сибур, Славнефть, Таиф-НК, «Энел ОГК-5», Альянс и др.), а также на предприятиях Украины, Казахстана, Беларуси, Узбекистана, Болгарии и на железнодорожном транспорте. Всего под круглосуточным мониторингом состояния находится более 17000 машин и агрегатов, более 1700 типов. Автоматические системы мониторинга «здравья» оборудования в реальном времени, повышая производительность диагностики в миллионы раз по сравнению с «ручными» приборами, обеспечивают экономический эффект существенно превышающий 10 р. на 1 р. затрат за счет:

- увеличения техногенной безопасности и межаварийного пробега оборудования в десятки и сотни раз;
  - увеличения межремонтного пробега оборудования в 4 – 6 раз;
  - снижения объемов ремонтов в 8 и более раз;
  - повышения производственной и технологической дисциплины персонала путем непрерывного объективного контроля адекватности его действий по работе с оборудованием; рационального подбора, размещения и загрузки оборудования по минимуму динамических нагрузок и максимуму прогнозируемого ресурса; увеличения коэффициента готовности и коэффициента использования основных производственных фондов в целом.

Автоматизированная система управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования – АСУ БЭР™ КОМПАКС® и созданная на ее основе безопасная ресурсосберегающая технология эксплуатации оборудования в реальном времени Safe-Money-Saving-Real-Time-Maintenance™ (SMSRTM™), опирающаяся на разработанное нормативно-методическое обеспечение мониторинга (10 стандартов, в том числе три федерального уровня), обеспечивают решение важнейшей народнохозяйственной задачи – повышение безопасности и эффективности при достижении минимума затрат на поддержание технологических комплексов в надлежащем техническом состоянии, являются пионерской разработкой отечественной науки и практики, носят прорывной характер для России. Все это

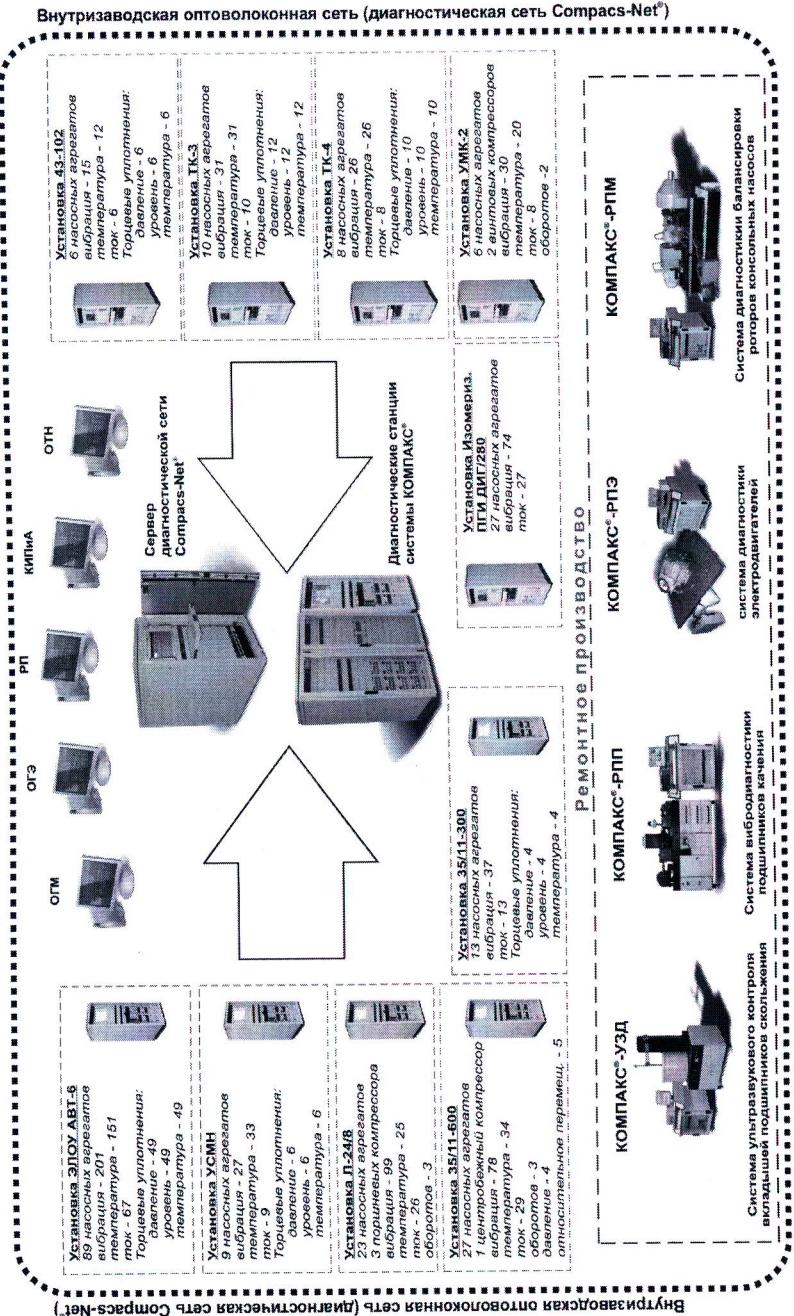


Рис. 3. АСУ БЭР™ КОМПАКС®

достигается без реконструкции производственно-технологической базы и связанных с этим огромных затрат, благодаря тому, что стоимость систем мониторинга, реализующих безопасную ресурсосберегающую технологию эксплуатации оборудования, в десятки и сотни раз ниже стоимости диагностируемых процессов и оборудования, что особенно актуально для отечественной экономики на современном этапе, и обеспечивает перевооружение предприятий на экологически чистой ресурсосберегающей основе.

Новизна и мировой уровень технологии подтверждены более 120 свидетельствами и патентами на способы и устройства диагностики, программное обеспечение, промышленные образцы и товарные знаки, в том числе зарубежными. Значимость работы подтверждена премией Правительства Российской Федерации в области науки и техники.

Для повышения безопасности и эффективности предприятий производственно-транспортного комплекса и, как следствие, экономического развития и обороноспособности страны целесообразно внести в действующие Федеральные законы, нормы и правила, а также подзаконные акты требование «Об обязательном оснащении комплексов оборудования опасных производств Российскойами автоматическими системами мониторинга неисправностей и риска, выполненные в соответствии с действующими Стандартами, исключающими человеческий фактор и вероятность реализации «кибервойн»».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костюков В. Н., Махутов Н. А., Костюков А. В. Мониторинг состояния и рисков эксплуатации оборудования в реальном времени – основа промышленной безопасности // Сб.: Федеральный справочник: Т. 26. – М.: НП «Центр стратегического партнерства», 2012. – С. 321 – 326.
2. Костюков В. Н. Мониторинг безопасности производства. – М.: Машиностроение, 2002. – 224 с.: ил.
3. Костюков В. Н., Бойченко С. Н., Костюков А. В. Автоматизированные системы управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (АСУ БЭР – КОМПАКС®). – М.: Машиностроение, 1999.
4. Костюков В. Н., Науменко А. П. Основы вибраакустической диагностики и мониторинга машин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. – 378 с.
5. Костюков В. Н., Костюков Ал. В., Стариков В. А. Мониторинг состояния токоприемников МВПС с помощью системы интеллектуальных датчиков // Датчики и Системы. – 2007. – № 10. – С. 33 – 38.
6. Костюков В. Н., Костюков А. В. Самодиагностика измерительного канала с пьезодатчиком // Датчики и Системы. – 2013. – № 12. – С. 26 – 30.
7. Костюков В. Н. Мониторинг безопасности производства. – М.: Машиностроение, 2002. – 224 с.
8. Костюков В. Н., Костюков А. В. Повышение операционной эффективности предприятий на основе мониторинга в реальном времени. – М.: Машиностроение, 2009. – 192 с.

9. ГОСТ Р 53563–2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Порядок организации. – М.: Стандартинформ, 2010. – 8 с.

10. ГОСТ Р 53564–2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Требования к системе мониторинга. – М.: Стандартинформ, 2010. – 20 с.

## О ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ТРЕБОВАНИЯХ К СИСТЕМАМ ВИБРОКОНТРОЛЯ И МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТУРБОАГРЕГАТОВ ТЭС И АЭС

Куменко А. И., Кузьминых Н. Ю.

(ООО НПЦ «ДИНАМИКА», г. Омск, Россия)

**Аннотация.** Выполнен анализ нормативных документов – стандартов ИСО, и аналогичных им российских ГОСТ, в том числе: ISO 13379-2:2014 (ГОСТ Р ИСО 13379-2–2016). Контроль состояния и диагностика машин. Методы интерпретации данных и диагностирования. Часть 2. Подход на основе данных измерений; ISO 13373-3:2015 (ГОСТ Р ИСО 13373-3–2016) Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 3. Руководство по диагностике машин. Вибрационный контролю состоянию по параметрам вибрации; ISO 13373-9:2015 (ГОСТ Р ИСО 13373-9–2016). Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 9. Методы диагностирования электродвигателей. Отмечены недостатки этих документов и сформулированы предложения по их совершенствованию.

**Keywords:** spectr, the shaft sensors, defects, shafting line, support, turbine unit, oil film, bearings, static and dynamics properties, misalignments of supports, alignments of the rotors, monitoring of technical condition.

### О терминологии

Перечисленные стандарты опираются на терминологические словари согласно соответствующим действующим ГОСТ и ИСО [1 – 6]. Анализ содержания общей терминологии этих словарей показывает ряд противоречий, терминологических недомолвок, а так же отсутствие важнейших сегодня понятий. Во-первых, с точки зрения диагностики и контроля технического состояния ряд терминов отсутствует. Во-вторых, ряд терминов по разному трактуется в данных словарях. В-третьих, отдельные термины следует пояснить более глубоко. Приведем для примера некоторые важные термины, которые по-разному трактуются в разных документах или не достаточно корректно отражены в документах (табл. 1, 2).

Отсутствуют многие важные понятия, абсолютная и относительная вибрации вала, всплытие вала, а так же такие как статические и динамические силы в подшипнике, вибрационные напряжения, предельное состояние и др. Не обсуждается тепловое состояние машины, и терминология,

### 1. Противоречия в нормативной документации

№	Термин	ГОСТ 24346–80	ГОСТ Р ИСО 2041–2012	Комментарий
		ISO 1925:2001	ISO 2041:2009	
1	Колебания	Колебания значений кинематической или динамической величины, характеризующей механическую систему	Изменение, обычно во времени величины в некоторой системе отсчета, когда значение становится то больше, то меньше некоторого заданного значения	Процесс, который характеризуется многократным поочередным возрастанием или убыванием параметра во времени, называется колебательным или просто колебаниями (Справочник по вибрации в технике, т. 1)
2	Вибрация	Движение точки или механической системы, при котором происходят колебания, характеризующие его скалярных величин	Движение механической системы (точки механической системы), при котором происходят периодические или случайные колебания, характеризующей его величины относительно положения равновесия	Вибрация – почти синоним слов механические колебания. Следует упомянуть о малых колебаниях для большинства задач диагностики и оценки технического состояния
3	Динамическая жесткость Dynamic stiffness (комплексная жесткость)	Отношение амплитуды гармонической вынуждающей силы к комплексной амплитуде перемещения при гармонической вынужденной вибрации линейной системы	Отношение комплексной силы в заданной точке механической системы к комплексному перемещению в той же, или иной точке	Хотя матрица жесткости имеет обычно обратную матрицу податливости, определения не соответствуют по смыслу друг другу. Понятия статической динамической жесткости и податливости даны не в терминах механики. Необходимо более общее определение, принятное в механике
4	Динамическая податливость Dynamic compliance (комплексная податливость)	Величина, обратная комплексной жесткости	«Частотно-зависимое отношение спектра (спектральной плотности) перемещения к спектру (спектральной плотности) силы. Недобоваримое определение	



# XXI ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

28 ФЕВРАЛЯ - 2 МАРТА 2017



# СБОРНИК ТРУДОВ



РОССИЙСКОЕ ОБЩЕСТВО  
ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ  
ДИАГНОСТИКЕ

XXI ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ  
И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

**СБОРНИК ТРУДОВ**

28 февраля – 2 марта 2017 г.



Москва, 2017

УДК [681.518.54+620.19](035)

ББК 30.82-5я2

Д25

Д25      **XXI Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике: сборник трудов.** Москва, 28 февраля – 2 марта 2017 г. – М.: Издательский дом «Спектр», 2017. – 364 с.: ил.

ISBN 978-5-4442-0125-1

DOI 10.14489/4442-0125-1

Сборник содержит научные труды (тезисы и доклады), представленные на XXI Всероссийской конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике. Изложены результаты работ ученых и специалистов российских и зарубежных фирм – мировых лидеров по производству средств неразрушающего контроля и технической диагностики. В состав сборника вошли работы по: акустической эмиссии; вибродиагностике; акустическим, магнитным, электромагнитным, оптическим, тепловым, микроволновым и радиационным методам неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики (ТД); методам НК и ТД при оценке техногенной безопасности; обучению, аттестации и сертификации.

УДК[681.518.54+620.19](035)

ББК 30.82-5я2

## НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

# ХХI ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

## СБОРНИК ТРУДОВ

28 февраля – 2 марта 2017 г.

Корректор *А.И. Евсейчев*

Инженер по компьютерному макетированию *А.И. Евсейчев*

Художественное оформление *Н.И. Смольянина*

ISBN 978-5-4442-0125-1



9 785444 201251

Сдано в набор 31.01.2017 г. Подписано в печать 15.02.2017 г.

Формат 60×90  $\frac{1}{16}$ . Бумага офсетная. Гарнитура Times.

Печать цифровая. Уч.-изд. л. 23. Тираж 200 экз. Заказ № 02112

ООО «Издательский дом «СПЕКТР»,  
119048, Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1. Тел.: (495) 514 76 50.  
[Http://www.idspektr.ru](http://www.idspektr.ru). E-mail: [info@idspektr.ru](mailto:info@idspektr.ru)

Отпечатано в типографии ООО «Паблит»  
127282, Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1

ISBN 978-5-4442-0125-1

© РОНКТД, 2017

### Секция 3

## ВИБРОДИАГНОСТИКА

**Руководители секции: Г. В. Зусман, В. Н. Костюков**

1. Новая методика диагностирования подшипниковых узлов рельсово-подвижного состава в процессе движения <i>Басакин В. В., Костюков В. Н., Костюков А. В., Казарин Д. В.</i> . . . . .	145
2. Методика диагностики электротехнических устройств, содержащих обмотки и магнитопровод <i>Городнов А. В., Засухин В. В., Рущинский В. Н., Тренин С. А.</i> . . . . .	152
3. Совершенствование методов и средств вибродиагностики колесно-моторных блоков подвижного состава <i>Зайцев А. В., Костюков А. В., Казарин Д. В.</i> . . . . .	155
4. Результаты экспериментальных исследований, подтверждающие возможность регистрации механических колебаний намагниченных тел с помощью внешней обмотки <i>Засухин В. В., Рущинский В. Н., Тренин С. А.</i> . . . . .	163
5. Вибрационный измерительный и диагностический канал КД8700 и резонансный метод контроля подшипников <i>Зусман Г. В.</i> . . . . .	163
6. Опыт применения параметров характеристической функции для диагностики и мониторинга технического состояния подшипников качения <i>Костюков В. Н., Костюков А. В., Бойченко С. Н.</i> . . . . .	165
7. Автоматические системы мониторинга «здоровья» оборудования производственно-транспортного комплекса, обеспечивающие высокую безопасность и эффективность <i>Костюков В. Н., Костюков Ан. В., Костюков А. В., Бойченко С. Н., Казарин Д. В.</i> . . . . .	167
8. О дополнительных требованиях к системам виброконтроля и мониторинга технического состояния турбоагрегатов ТЭС и АЭС <i>Куменко А. И., Кузьминых Н. Ю.</i> . . . . .	174
9. Критерии надежности и мониторинг технического состояния мощных турбоагрегатов с использованием статических и динамических сил в опорах валопроводов <i>Куменко А. И., Кузьминых Н. Ю., Тимин А. В.</i> . . . . .	181
10. Мониторинг распределенной неуравновешенности экспериментального ротора с использованием датчиков вала <i>Куменко А. И., Кузьминых Н. Ю., Тимин А. В.</i> . . . . .	186
11. Обобщенная модель механизма формирования и структуры виброакустического сигнала поршневой машины <i>Науменко А. П., Костюков В. Н.</i> . . . . .	187