

Ишметьев Е.Н.<sup>1,2</sup>, Чистяков Д.В.<sup>1,2</sup>, Панов А.Н.<sup>1,2</sup>, Бодров Е.Э.<sup>2</sup>, Врabel М.<sup>3</sup><sup>1</sup> ЗАО «Консом СКС»<sup>2</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова<sup>3</sup> ООО «ИФМ-электроник»

## СИСТЕМЫ ВИБРОЗАЩИТЫ, ВИБРОКОНТРОЛЯ И ВИБРОДИАГНОСТИКИ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Работа посвящена обзору основных технических решений по разработке мобильных и стационарных систем виброзащиты, виброконтроля и вибродиагностики промышленного оборудования по величине и характеру вибрации, реализуемых компанией ЗАО «Консом СКС». Проведен анализ разработанных и известных в литературе автоматизированных систем диагностики технического состояния электродвигателей, их опорных подшипников, а также промышленных агрегатов, в том числе систем, построенных по принципу анализа вибрации контролируемого механизма. Показано, что при возникновении и развитии дефекта вибрационная картина, наблюдаемая на элементе агрегата, содержащего дефект, изменяется. При этом меняется как общий уровень вибрации, так и амплитуда вибрации на определенных частотах, характерных для конкретного дефекта оборудования. Эти частоты определяются конструкцией, геометрическими и электрическими параметрами объекта. На мониторинге и анализе таких характерных частот основаны автоматизированные системы вибрационной диагностики, разрабатываемые компанией ЗАО «Консом СКС». Системы же виброзащиты и виброконтроля основаны на мониторинге общего уровня вибрации оборудования. Автоматизированные системы вибродиагностики являются наивысшей степенью развития систем мониторинга технического состояния технологического оборудования. Такие системы могут диагностировать дефекты подшипников качения или скольжения, электродвигателей постоянного или переменного тока, редукторов, соединительных муфт, валопроводов и других агрегатов. В работе также приведен обзор аппаратных средств, на основе которых возможно гибкое построение автоматизированной системы виброзащиты, виброконтроля или вибродиагностики в зависимости от требований к самой системе и к контролируемому объекту.

**Ключевые слова:** виброзащита, виброконтроль, вибродиагностика, подшипник, электрический двигатель, мониторинг, акселерометр, умный датчик, световая колонна, направленный микрофон, вибрация, спектральный анализ.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из приоритетных направлений компании ЗАО «Консом СКС» является диагностика технического состояния промышленного оборудования, включающего подшипники качения и скольжения, электродвигатели постоянного и переменного тока, редукторы, соединительные муфты, валопроводы. В технической литературе описано множество систем мониторинга и диагностики технического состояния технологических агрегатов [1-14]. Дефекты, возникающие в процессе работы промышленного оборудования, возможно диагностировать по величине и характеру вибрации. Любое промышленное оборудование, даже находясь в нормальном рабочем состоянии, подвержено вибрации. При возникновении и развитии дефекта вибрационная картина, наблюдаемая на элементе агрегата, содержащего очаг дефекта, изменяется. При этом меняется как общий уровень вибрации, так и амплитуда вибрации на определенных частотах, характерных для конкретного дефекта оборудования. На мониторинге общего уровня вибрации и характерных частот и основаны методики виброзащиты, виброконтроля и вибродиагностики, разработанные специалистами компании ЗАО «Консом СКС» [15].

### ВИБРОЗАЩИТА

Методика защиты оборудования при превышении на нем общего уровня вибрации больше определенного

значения предполагает отключение оборудования в автоматическом режиме с целью предотвращения риска аварии (**рис. 1**). На невращающихся частях агрегата (на подшипниках) устанавливаются датчики вибрации (акселерометры), которые подключены к электронному диагностическому прибору, который при увеличении вибрации больше допустимого уровня производит защитное отключение электродвигателя агрегата от сети питания.

В качестве характеристики общего уровня вибрации агрегата может быть использовано среднеквадратичное значение виброускорения, виброскорости или виброперемещения [16]. Это связано с тем, что среднеквадратичное значение любой из этих трех вибрационных величин характеризует энергию вибрации. Иными словами, среднеквадратичное значение вибрационного параметра прямо пропорционально разрушающей силе вибрации оборудования. Соответственно по увеличению среднеквадратичного значения вибрации можно спрогнозировать и предотвратить поломку оборудования своевременным его отключением. Однако после остановки агрегата обнаружить причину и место возникновения дефекта возможно только традиционным способом – разобрать агрегат и визуально найти элемент оборудования с дефектом. Это является основным ограничением как виброзащиты, так и виброконтроля, определяющим область применения данных методик на оборудовании не слишком критичном к отключению, например, в связи с наличием резервного агрегата, включаемого на время ремонта основного.



Рис. 1. Структурная схема автоматизированной системы виброзащиты

Для мониторинга общего уровня вибрации в равной степени могут быть использованы среднеквадратичное значение виброускорения, виброскорости, а также виброперемещения. Однако в ГОСТ [17] регламентируется только среднеквадратичное значение виброскорости.

Поэтому при построении автоматизированных систем виброзащиты и виброконтроля используется именно значение виброскорости.

Кроме того, при появлении и развитии дефекта в оборудовании (например, дефекты подшипников качения или скольжения) температура узла, в котором образовался дефект, начинает расти. Поэтому в дополнение к датчикам вибрации на подшипниковые опоры необходимо также устанавливать датчики температуры для увеличения информативности данных.

#### ВИБРОКОНТРОЛЬ

Так же как и в системе виброзащиты, автоматизированные системы виброконтроля, разрабатываемые ЗАО «Консом СКС», используют регламентированные ГОСТ среднеквадратичные значения виброскорости для мониторинга и контроля технического состояния оборудования. Однако здесь, в отличие от систем виброзащиты, данные о вибрации и температуре подшипников и других узлов и агрегатов, на которых установлены датчики вибрации (акселерометры), выводятся в виде мнемосхемы оператору, осуществляющему мониторинг технологического процесса (рис. 2).

На мнемосхеме параметры вибрации и температуры отображаются по принципу светофора:

- зеленый цвет означает нормальный режим функционирования оборудования;
- желтый цвет означает «Предупреждение»;
- красный цвет означает «Опасность», что говорит о критическом состоянии оборудования и требует принятия соответствующих мер.

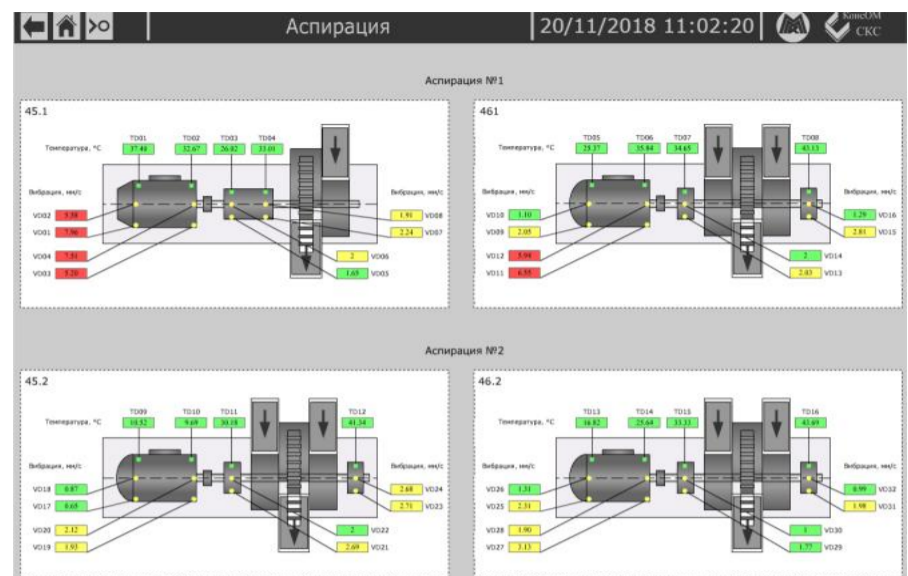


Рис. 2. Мнемосхема автоматизированной системы виброконтроля дымососов, установленных на аспирации горно-обогатительного предприятия

При переключении на мнемосхеме индикаторов с зеленого на желтый или красный ответственный за эксплуатацию оборудования принимает решение о необходимости и целесообразности его остановки.

Альтернативным решением вывода информации о вибрационном состоянии оборудования является использование вместо мнемосхемы светодиодной световой колонны DV1510 производства компании «ifm electronics», внешний вид которой приведен на рис. 3. Световая колонна состоит из пяти сегментов, каждый из которых настраивается по отдельности и может загораться одним из семи основных цветов. Таким образом для небольших объектов возможно настроить до пяти точек контроля на одну лампу, светящихся также по принципу светофора [18].

Для низковольтных асинхронных электродвигателей предлагается решение, основанное на использовании малогабаритного беспроводного умного датчика АВВ (рис. 4) [19].

Основные преимущества интеллектуального датчика заключаются в том, что он автономно осуществляет контроль за состоянием электродвигателя; обладает возможностью двустороннего обмена данными, самодиагностики, калибровки; имеет встроенный элемент питания, рассчитанный на срок эксплуатации, равный пяти годам; обмен данными осуществляется по беспроводному протоколу Bluetooth.

Датчик является миниатюрным и имеет габариты 90×55×12 мм. Он устанавливается на охлаждающие ребра электродвигателя и конфигурируется со смартфона или планшета. Данный датчик также обладает защитой от использования неавторизованными пользователями. Датчик имеет три встроенных акселерометра, расположенных ортогонально друг к другу, и термометр. Анализ данных, полученных с умного датчика, происходит с использованием облачных технологий. Информация шифруется и затем передается на защищенный сервер в облако через смартфон или планшет. Работа сервера полностью соответствует политике компьютерной безопасности.

Информация обрабатывается на сервере и в любой момент может быть получена посредством смартфона, планшета или рабочего компьютера любым пользователем, имеющим разрешенный доступ к этой информации. Рассматриваемый интеллектуальный датчик является автономным. Он может быть установлен на ребра охлаждения корпуса электродвигателя без непосредственного подключения к нему.



Рис. 3. Внешний вид 5-сегментной световой колонны



Рис. 4. Использование умного датчика ABB для мониторинга состояния асинхронного электродвигателя

По умолчанию датчик осуществляет измерения каждый час. При необходимости интервал измерений можно настроить. Датчик имеет встроенную память, рассчитанную на хранение измерений за один месяц, при условии выполнения измерений каждый час. Таким образом, один раз в месяц обслуживающий персонал должен сделать обход всех двигателей, на которых установлены интеллектуальные датчики, имея при себе смартфон или планшет с необходимым программным обеспечением. При этом данные с датчика передаются на облачный сервер, где происходит их обработка и анализ.

Интеллектуальный датчик выдает данные о таких параметрах электродвигателя, как:

- температура корпуса электродвигателя;
- индикация состояния подшипников;
- вибрация (общий уровень, мм/с).

Эти данные отображаются на экране смартфона, собирающего информацию с датчика, или смартфона, планшета или рабочего компьютера, подключенного

посредством Интернета к облаку. Информация о состоянии электродвигателя имеет вид, показанный на рис. 5. Диагностическая информация также может быть представлена в виде тренда, как показано на рис. 6.

Еще одним способом вибрационного контроля является использование направленного микрофона USB Noise Meter компании Spl-Lab, внешний вид которого показан на рис. 7 [20].

Направленный микрофон (шумомер) USB Noise Meter предназначен для измерения уровня шума, уровня звукового давления и амплитудно-частотной характеристики с повышенной точностью на всем слышимом диапазоне от 20 Гц до 20 кГц. Источником измеряемого сигнала могут быть как промышленное оборудование, так и акустические системы. Шумомер имеет широкий динамический диапазон измеряемого сигнала в 70 дБ и высокий предельный уровень звукового давления в 150 дБ. Измеряемый сигнал оцифровывается внутри прибора и передается через USB-порт на персональный компьютер, планшет или телефон с операционной системой Android в цифровом виде.

На основе такого направленного микрофона может быть изготовлена стационарная или переносная система виброконтроля. На рис. 8 приведен снимок экрана специализированного программного обеспечения Measuring Center, поставляемого вместе с микрофоном. Программное обеспечение Measuring Center представляет из себя многофункциональный измерительный центр для спектрального анализа звука.

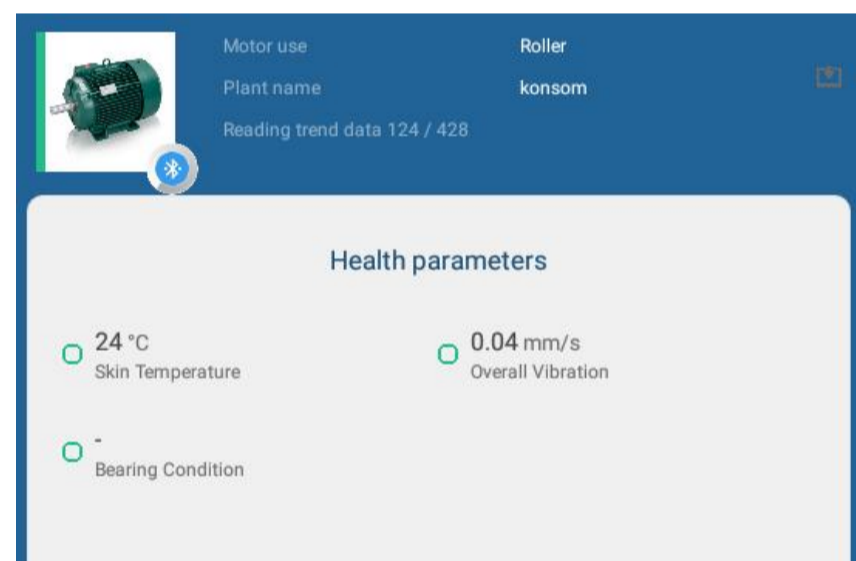


Рис. 5. Диагностическая информация, отображаемая на экране смартфона

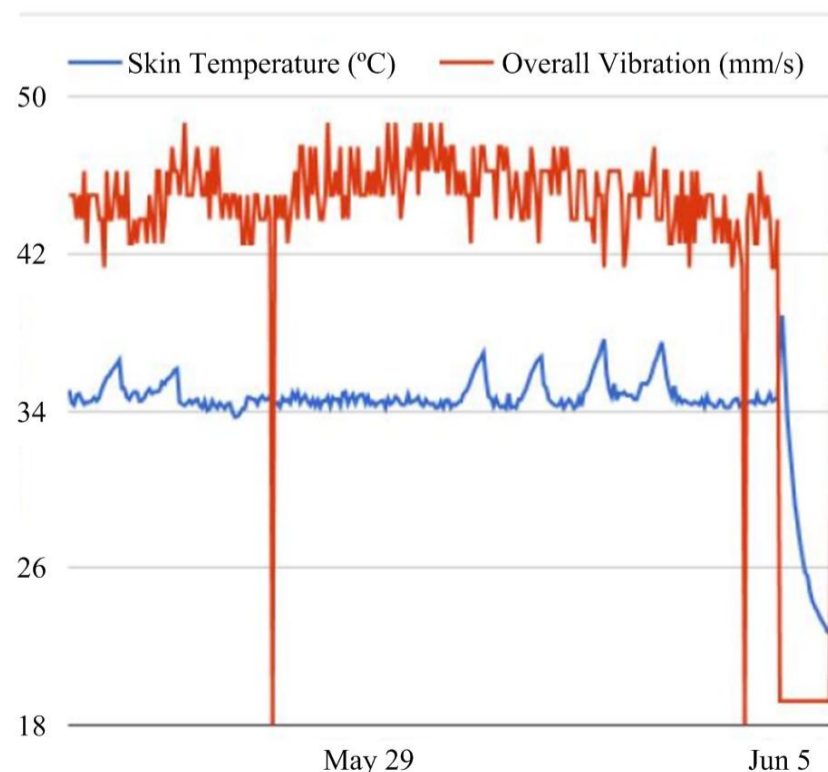


Рис. 6. Тренд вибрации и температуры корпуса двигателя



Рис. 7. Внешний вид направленного микрофона Spl-Lab USB Noise Meter



Рис. 8. Программа Measuring Center для работы с микрофоном Spl-Lab USB Noise Meter

ВИБРОДИАГНОСТИКА

Автоматизированная система вибродиагностики является наиболее развитым и сложным методом мониторинга и диагностики дефектов промышленного оборудования по его вибрации. В основе такой системы лежит одновременный анализ временных сигналов и спектров вибрации. Анализ производится в автоматическом режиме на основании измерений, записываемых, как правило, один раз в сутки и сохраняемых в базе данных.

В качестве аппаратных средств для стационарной автоматизированной системы вибродиагностики, разработанной специалистами ЗАО «Консом СКС», используются акселерометры VSA001 производства ifm electronics, которые подключаются к электронным диагностическим приборам VSE002 также производства «ifm electronics» (см. рис. 1). Измеряемые данные передаются на сервер. Визуализация диагностических данных осуществляется посредством специализированного программного обеспечения «Эверест», которое позволяет просматривать данные удаленно с помощью интернет-браузера.

Основной страницей специализированного программного обеспечения «Эверест», предоставляющей пользователю диагностическую информацию об объекте мониторинга, является страница «Аналитика», внешний вид которой приведен на рис. 9.

Страница «Аналитика» разделена на четыре колонки:

- Просмотр событий.
- Тренд дефектов.
- Пик-фактор.
- Орбита/Зазор.

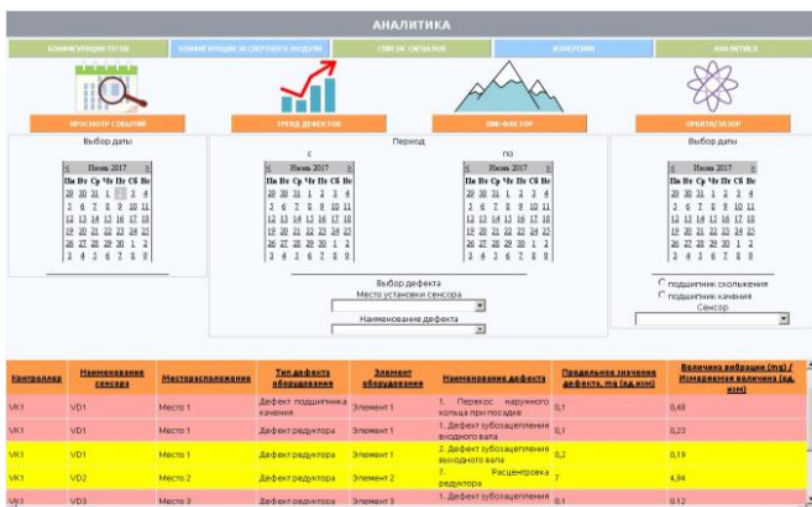


Рис. 9. Основная страница автоматизированной системы вибродиагностики

Вкладка «просмотр» событий предоставляет диагностическую информацию о дефектах оборудования в виде таблицы под названием «Журнал событий». Желтая строка в таблице означает «Предупреждение», красная строка означает – «Опасность», что говорит о критическом состоянии оборудования и требует принятия соответствующих мер. Система, в зависимости от оборудования, на котором она установлена, может быть настроена на распознавание необходимых типов дефектов, полный перечень которых приведен в таблице.

Типы дефектов и соответствующие им наименования дефектов оборудования

Тип дефекта (в зависимости от элемента оборудования)	Наименования дефекта
1. Дефект подшипника качения	1. Перекос наружного кольца при посадке
	2. Неоднородный радиальный натяг
	3. Проскальзывание в посадочном месте
	4. Ослабление крепления подшипника
	5. Задевания в подшипнике и уплотнениях
	6. Обкатывание наружного кольца
	7. Проблемы смазки
	8. Увеличенные зазоры в подшипнике
	9. Износ поверхности наружного кольца
	10. Износ поверхности тел качения
	11. Износ поверхности внутреннего кольца
	12. Дефект группы поверхностей трения
	13. Раковины (сколы) на наружном кольце
	14. Раковины (сколы) на внутреннем кольце
	15. Раковины (сколы) на телах качения
	16. Дефект сепаратора
2. Дефект подшипника скольжения	1. Увеличенный зазор в подшипнике
	2. Дефект шейки вала
	3. Дефект вкладышей
	4. Дефект установки вкладышей
	5. Эллипсность шейки вала
	6. Вибрации масляного клина
3. Дефект редуктора	1. Дефект зубозацепления входного вала
	2. Дефект зубозацепления выходного вала
	3. Износ зубчатой пары входного вала
	4. Износ зубчатой пары выходного вала
	5. Эксцентриситет шестерни входного вала
	6. Эксцентриситет шестерни выходного вала
	7. Расцентровка редуктора
	8. Треснутый (сломанный зуб) на входном валу
	9. Треснутый (сломанный зуб) на выходном валу
4. Дисбаланс и несоосность	1. Дисбаланс валов
	2. Осевая несоосность сочлененных валов
	3. Угловая несоосность сочлененных валов
	4. Дефект и дисбаланс муфт
	5. Дисбаланс и дефекты лопаток вентиляторов
5. Дефект крепления к фундаменту	Ослабление крепления «лапы» двигателя или редуктора
6. Дефект электродвигателей	1. Дефект статора асинхронного/синхронного двигателя
	2. Дефект ротора асинхронного двигателя (обрыв стержня, эксцентриситет)
	3. Дефект обмоток якоря двигателя постоянного тока

Автоматизированная система вибродиагностики позволяет также строить тренд выбранного дефекта оборудования, график пик-фактора, график орбиты вала (в случае подшипника скольжения), измерять радиальный зазор в подшипнике (в случае подшипника качения), а также просматривать любые сигналы, как временные, так и спектры (прямой спектр и спектр огибающей), в режиме online в широком диапазоне частот. Кроме того, система позволяет делать необходимые измерения вручную, сохранять их и удалять. Все предоставляемые системой функции делают ее мощным и гибким средством вибрационной диагностики в руках специалиста.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены основные типы систем оценки технического состояния оборудования по его вибрационной картине. Показано, что при возникновении и развитии дефектов в оборудовании, будь то подшипники качения или скольжения, электродвигатели постоянного или переменного тока, редукторы, соединительные муфты, валопроводы, вибрационная картина агрегата или узла изменяется. Поэтому принцип построения автоматизированных систем виброзащиты, виброконтроля и вибродиагностики основан на регистрации изменений в вибрационной картине, будь то увеличение среднеквадратичного значения вибрации или увеличение вибрации на определенных частотах, характерных для различных дефектов оборудования. В работе приведен обзор аппаратных средств, на основе которых возможно гибкое построение автоматизированной системы виброзащиты, виброконтроля или вибродиагностики в зависимости от требований к самой системе или контролируемому объекту.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования / С.И. Лукьянов, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.С. Сарваров, М.Ю. Петушков, В.Р. Храмшин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №4. С. 129-136.
2. M. Byrtus, J. Sobra, M. Krizek, T. Kavalir, V. Kindl, K. Hruska. Dynamic load of induction machine due to rotor's eccentricity and bearing clearance. 18th European Conference on Power Electronics and Applications, 2016, DOI: 10.1109/EPE.2016.7695684.
3. R. Mistry; B. Finley; S. Kreitzer; R. Queen. Influencing factors on motor vibration & rotor critical speed in design, test and field applications. Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, 2014, DOI: 10.1109/PCICon.2014.6961887.
4. Орлов А.В. Вибрация в радиальном роликовом подшипнике, вызываемая износом // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 4. С. 63-69.
5. Степанов П.И., Лагуткин С.В., Никитин Ю.Р. Комплекс-

ная токовая и вибродиагностика электромеханических систем // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. № 2 (22). С. 160-165.

6. Леонтьев М.К., Снеткова Е.И., Дегтярев С.А. Динамика неуравновешенного ротора на роликовом подшипнике // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 1. С. 95-105.
7. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: учеб. пособие. СПб.: СПбГМТУ, 2004. 156 с.
8. Adams M.L. Rotating Machinery Vibration: From Analysis to Troubleshooting. 2nd edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. 476 p.
9. Zhanlu Yang, Shanming Wang, Jianfeng Hong, Jingsong Li. Analysis of electromagnetic exciting force and vibration of rotating armature permanent magnet synchronous motor // The Journal of Engineering. 2018, no.17, pp. 1903–1908.
10. Xiaowang Chen, Zhipeng Feng. Time-Frequency Analysis of Torsional Vibration Signals in Resonance Region for Planetary Gearbox Fault Diagnosis Under Variable Speed Conditions // IEEE Access. 2017, vol. 5, pp. 21918–21926.
11. Yumei Liu, Ningguo Qiao, Congcong Zhao, Jiaojiao Zhuang. Vibration Signal Prediction of Gearbox in High-Speed Train Based on Monitoring Data // IEEE Access. 2018, vol. 6, pp. 50709–50719.
12. Salman Abdi, Danilo Llano, Ehsan Abdi, Paul Malliband, Richard McMahon. Experimental analysis of noise and vibration for large brushless doubly fed machines // The Journal of Engineering. 2017, no.13, pp. 724–728.
13. Zhiqiang Huo, Yu Zhang, Pierre Francq, Lei Shu, Jianfeng Huang. Incipient Fault Diagnosis of Roller Bearing Using Optimized Wavelet Transform Based Multi-Speed Vibration Signatures // IEEE Access. 2017, vol. 5, pp. 19442–19456.
14. Dong Wang, Kwok-Leung Tsui, Qiang Miao. Prognostics and Health Management: A Review of Vibration Based Bearing and Gear Health Indicators // IEEE Access. 2018, vol. 6, pp. 665–676.
15. Ishmetyev E.N., Logunova O.S., Panov A.N., Cistyakov D.V., Bodrov E.E. Stationary automatic vibration control and analysis systems: application experience. Journal of Computational and Engineering Mathematics, 2017, vol.4, no. 1, pp. 3-15.
16. Неразрушающий контроль: справочник в 7 т. / под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2005. Т. 7. Кн. 2. 829 с.
17. ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Ч. 1. Общие требования. Минск: ИПК Издательство стандартов, 1998. 16 с.
18. Operating instructions. 5-segment signal lamp DV15x0, DV25x0, 2018. 22 p.
19. Возможность применения интеллектуального датчика для диагностирования состояния электродвигателя / А.Н. Панов, Е.Э. Бодров, С.И. Бодрова, В.О. Михеева, А.А. Лысенко // Автоматизированные технологии и производства. 2018. № 1(17). С. 14-17.
20. USB Noise Meter (Pro Edition) – конденсаторный микрофон для замера АЧХ и уровня шума [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://spl-lab.ru/ru/products/microphones/usb-noise-meter-pro-edition.html> (дата обращения: 10.12.2018).

Поступила в редакцию 16 января 2019 г.

## VIBRATION PROTECTION, CONTROL AND ANALYSIS SYSTEMS FOR INDUSTRIAL APPLICATION

Evgeniy N. Ishmetiev

D.Sc. (Engineering), Director of Strategic Development, CJSC “KonsOM SKS”, Magnitogorsk, Russia. E-mail: eni@konsom.ru.

Dmitry V. Chistyakov

Ph.D. (Social Sciences), Executive Director, CJSC “KonsOM SKS”, Magnitogorsk, Russia. E-mail: dvc@konsom.ru.

Aleksandr N. Panov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Innovation, CJSC “KonsOM SKS”, Magnitogorsk, Russia. E-mail: panov.a@konsom.ru.

Evgeniy E. Bodrov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor of the Electronics and Microelectronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: forheartist@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7316-8213>.

Mikhal Vrabel

Sales Director, "IFM-electronics", Moscow, Russia. E-mail: [michal.vrabel@ifm.com](mailto:michal.vrabel@ifm.com).

This paper describes basic CJSC “Konsom SKS” technical solutions overview for industrial equipment vibration protection, control and analysis systems, which can be mobile or stationary, and measure object vibration to determine its condition. The research group carried out analysis of known similar systems for diagnostics of electric motors, bearings and other units including those systems that use mechanism vibration analysis. It was shown that when the defect occurs in some part of the equipment, the vibration pattern there is changed. And not only overall vibration increases but also the vibration on specific frequencies is characteristic for a particular defect. Those frequencies depend on geometric and electric parameters of the mechanism. The automated vibration analysis systems developed by CJSC “Konsom SKS” are based on monitoring and analysis of those frequencies. On the other hand, vibration protection and vibration control systems are based on monitoring of the mechanism overall vibration. The automated vibration analysis systems are high end monitoring systems. These systems can diagnose defects in a roller or a sliding bearing, an AC or DC electric motor, gearbox, coupling, shaft etc. The paper also shows an overview of firmware that could be used interchangeably in vibration protection, vibration control and vibration analysis systems depending on the application.

**Keywords:** vibration protection, vibration control, vibration analysis, bearing, electric motor, monitoring, accelerometer, smart sensor, signal lamp, noise meter, vibration, spectral analysis.

## REFERENCES

- Lukyanov S.I., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Sarvarov A.S., Petushkov M.Ju., Khramshin V.R. Development and implementation of intelligent systems for diagnosing the technical condition of electrical equipment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol.16, no. 4, pp. 129-136. (In Russian)
- M. Byrtus, J. Sobra, M. Krizek, T. Kavalir, V. Kindl, K. Hruska. Dynamic load of induction machine due to rotor's eccentricity and bearing clearance. 18th European Conference on Power Electronics and Applications, 2016. DOI: 10.1109/EPE.2016.7695684.
- R. Mistry; B. Finley; S. Kreitzer; R. Queen. *Influencing factors on motor vibration & rotor critical speed in design, test and field applications*. Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, 2014. DOI: 10.1109/PCICon.2014.6961887.
- Orlov A.V. Vibration in the radial roller bearing due to worn. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability], 2013, no. 4, pp. 63-69. (In Russian)
- Stepanov P.I., Lagutkin S.V., Nikitin Ju.R. Integrated current and vibration diagnostics of electromechanical systems. *Intellektualnye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production], 2013, no. 2(22), pp. 160-165. (In Russian)
- Leont'ev M.K., Snetkova E.I., Degtjarev S.A. Dynamics of unbalanced rotor on a roller bearing. *Vestnik Moskovskogo aviacionnogo instituta* [Bulletin of Moscow Aircraft Institute], 2013, vol. 20, no. 1, pp. 95-105. (In Russian)
- Barkov A.V., Barkova N.A. *Vibracionnaja diagnostika mashin i oborudovaniya. Analiz vibracii* [Vibration diagnostics of machines and equipment. Vibration analysis]. St. Petersburg, Spbgmtu Publ., 2004. 156 p. (In Russian)
- Adams M.L. *Rotating Machinery Vibration: From Analysis to Troubleshooting*. 2nd edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. 476 p.
- Zhanlu Yang, Shanming Wang, Jianfeng Hong, Jingsong Li. Analysis of electromagnetic exciting force and vibration of rotating armature permanent magnet synchronous motor. *The Journal of Engineering*. 2018. no.17 pp. 1903–1908.
- Xiaowang Chen, Zhipeng Feng. Time-Frequency Analysis of Torsional Vibration Signals in Resonance Region for Planetary Gearbox Fault Diagnosis Under Variable Speed Conditions. *IEEE Access*. 2017, vol. 5, pp. 21918–21926.
- Yumei Liu, Ningguo Qiao, Congcong Zhao, Jiaojiao Zhuang. Vibration Signal Prediction of Gearbox in High-Speed Train Based on Monitoring Data. *IEEE Access*. 2018, Vol. 6, pp. 50709–50719.
- Salman Abdi, Danilo Llano, Ehsan Abdi, Paul Malliband, Richard McMahon. Experimental analysis of noise and vibration for large brushless doubly fed machines. *The Journal of Engineering*. 2017, no. 13, pp. 724–728.
- Zhiqiang Huo, Yu Zhang, Pierre Francq, Lei Shu, Jianfeng Huang. Incipient Fault Diagnosis of Roller Bearing Using Optimized Wavelet Transform Based Multi-Speed Vibration Signatures. *IEEE Access*. 2017, vol. 5. pp. 19442–19456.
- Dong Wang, Kwok-Leung Tsui, Qiang Miao. Prognostics and Health Management: A Review of Vibration Based Bearing and Gear Health Indicators. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6, pp. 665–676.

15. Ishmetyev E.N., Logunova O.S., Panov A.N., Cistyakov D.V., Bodrov E.E. Stationary automatic vibration control and analysis systems: application experience. *Journal of Computational and Engineering Mathematics*, 2017, vol.4, no. 1, pp. 3-15.
16. *Nerazrushajushhij kontrol* [Nondestructive Inspection]. reference guide in 7 vol. under edition of V.V. Kluev, vol. 7, book 2. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 2005. 829 p. (In Russian)
17. GOST ISO 10816-1-97. Vibration. Monitoring the state of the machines as measured by vibration on non-rotating parts. Part 1. General requirements. Minsk, ИПК Publishing house of standards, 1998. 16 p. (in Russian)
18. Operating instructions. 5-segment signal lamp DV15x0, DV25x0, 2018. 22 p.
19. Panov A.N., Bodrov E.E., Bodrova S.I., Miheeva V.O., Lysenko A.A. The possibility of using an intelligent sensor to diagnose the state of the electric motor. *Avtomatizirovannye tehnologii i proizvodstva* [Automated technology and production], 2018, no. 1(17), pp. 14-17. (In Russian)
20. USB Noise Meter (Pro Edition) – condenser microphone for measuring the frequency response and noise level [Electronic resource]. Available at: <http://spl-lab.ru/ru/products/microphones/usb-noise-meter-pro-edition.html>.

---

Ишметьев Е.Н. Чистяков Д.В. Панов А.Н. Бодров Е.Э., Врabel М. Системы виброзащиты, виброконтроля и вибродиагностики промышленного оборудования // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 1(42). С. 67-73. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-67-73](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-67-73)

Ishmetiev E.N., Chistyakov D.V., Panov A.N., Bodrov E.E., Vrabel M. Vibration Protection, Control and Analysis Systems for Industrial Application. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 1(42), pp. 67-73. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1\(42\)-67-73](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-1(42)-67-73)

---