

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРИБОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

© 2016 С.С. Шмыров<sup>1</sup>, И.Д. Ибатуллин<sup>1</sup>, А.А. Минаев<sup>1</sup>, А.В. Скользнев<sup>1</sup>, А.В. Иващенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный технический университет

<sup>2</sup> Самарский филиал научно-исследовательского института радио

Статья поступила в редакцию 20.09.2016

Приводится описание методов и приборов акустикоэмиссионного контроля качества поверхностей трения. Показаны основные преимущества и области применения диагностической системы, позволяющей оперативно выявлять дефекты на ответственных поверхностях деталей машин. Показаны достоинства применения мультиагентной системы сбора данных.

*Ключевые слова:* акустическая эмиссия, шероховатость, адаптивные технологии, спектр, колесо, диагностика.

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что микрогеометрия деталей пар трения машин, выражаемая чаще всего высотой и шагом микронеровностей, определяет многие эксплуатационные свойства поверхностей трения: контурную площадь контакта, маслоемкость, абразивность, коэффициент трения, прирабатываемость и др. Однако традиционный метод оценки шероховатости за счет сканирования поверхности алмазным щупом, хотя и позволяет получать качественную профилограмму и данные о многих параметрах микрогеометрии поверхностей, но также обладает рядом недостатков, включая высокую стоимость профилометров, относительно большую длительность измерений, сложность технического обслуживания, невозможность применения на месте обработки деталей, высокую чувствительность к различным загрязнениям на поверхности. В то время как во многих случаях необходимо получить пусть приблизительную, но объективную и быструю оценку шероховатости поверхности, не прибегая к трудоемким лабораторным анализам. Это относится как к этапу изготовления деталей машин, так и к этапу их эксплуатации.

В лаборатории наноструктурированных покрытий СамГТУ разрабатываются приборы и экспрессные методики контроля шероховатости, основанные на регистрации и обработке сигналов

*Шмыров Сергей Сергеевич, аспирант, кафедры «Технология машиностроения». E-mail: id\_ildar@mail.ru*

*Ибатуллин Ильдар Дугласович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения».*

*E-mail: id\_ildar@mail.ru*

*Минаев Антон Андреевич, аспирант кафедры «Технология машиностроения».*

*Скользнев Антон Вячеславович, аспирант кафедры «Технология машиностроения».*

*Иващенко Антон Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные системы и технологии» Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева.*

акустической эмиссии (АЭ), генерируемых процессом трения о поверхность измерительного зонда. Этот принцип был положен в основу создания пьезоэлектрических профилометров, первый из которых в нашей стране был создан почти семь десятилетий назад в ЛИТМО. В настоящее время профилометры с пьезоэлектрическими преобразователями на основе титаната бария выпускаются многими ведущими фирмами в области приборостроения.

### 1. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИКОЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ШЕРОХОВАТОСТИ НА ЭТАПЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Практически важным применением акустикоэмиссионного контроля является оперативная оценка чистоты поверхности деталей либо в процессе механической обработки, либо непосредственно после нее. Такой контроль позволит подойти к решению проблемы создания адаптивных технологий, когда устанавливается обратная связь между текущими параметрами качества обрабатываемых поверхностей и технологическим процессом обработки. Однако известные способы непрерывного контроля качества поверхностей в процессе обработки [А.С. №1252651 и др.], когда датчик акустической эмиссии связан с обрабатываемой деталью или режущим инструментом не могут обеспечить высокой точности измерения получаемой шероховатости. В СамГТУ предложено обрабатывать сигнал АЭ, полученный в результате трения об обрабатываемую поверхность зонда, прижатого к поверхности с заданной нагрузкой и движущийся относительно нее с заданной скоростью. Данный метод оценки шероховатости реализуется по следующим этапам.

1. Производят ощупывание контролируемой поверхности детали щупом с заданной скоростью и усилием прижатия щупа к поверхности.

При этом возможны варианты. В первом варианте равномерно перемещают щуп относительно неподвижной поверхности. Во втором варианте поверхность равномерно перемещается относительно неподвижного щупа. В третьем варианте щуп и поверхность являются подвижными и перемещаются относительно друг друга с заданной скоростью. Второй вариант ощупывания контролируемой поверхности обеспечивает возможность контроля шероховатости поверхности равномерно вращающейся детали в процессе механической обработки (точения, шлифования и т.д.), что невозможно реализовать другими способами.

2. Получают электрический сигнал акустической эмиссии, возникающий в результате трения щупа о поверхность. Физическая сущность получения сигнала акустической эмиссии при трении щупа о поверхность заключается в возникновении колебаний щупа из-за столкновений неровностей поверхности детали с поверхностью щупа, которые регистрируется пьезоэлектрическим датчиком виброускорений, в виде всплесков напряжения, генерируемого датчиком. Причем с увеличением скорости относительного перемещения щупа относительно поверхности и высоты неровностей увеличивается амплитуда колебаний щупа и соответственно амплитуда всплесков напряжения, генерируемых датчиком. Это выгодно отличает заявляемый способ от существующих щуповых методов измерений тем, что позволяет контролировать шероховатость на цилиндрических поверхностях быстровращающихся деталей. Уменьшение шага неровностей приводит к учащению столкновений щупа с неровностями и, соответственно, к учащению всплесков, генерируемых датчиком, что позволяет оценивать шаг неровностей по периоду следования сигналов акустической эмиссии.

3. Усиливают сигнал акустической эмиссии и преобразовывают его в электрический сигнал, пропорциональный величине шероховатости контролируемой поверхности и передают его на записывающий или показывающий прибор. Для оценки шероховатости грубых поверхностей усиление сигнала допускается не производить вследствие того, что сигнал акустической эмиссии, генерируемый датчиком, может иметь достаточно большие для последующей обработки величины. Преобразование сигналов акустической эмиссии в электрический сигнал, пропорциональный параметрам шероховатости выполняется следующим образом. Вначале эмпирически получают калибровочную зависимость амплитуды сигналов акустической эмиссии от шероховатости поверхности при заданных величинах усилия прижатия к поверхности и скорости перемещения щупа. Для калибровки используются эталонные образцы шероховатости, при этом диапазон шероховатостей эталонных образцов

должен охватывать диапазон подлежащих измерению значений шероховатости. Полученные эмпирическим путем данные аппроксимируют (например, с использованием метода наименьших квадратов) в виде непрерывной функции в координатах «амплитуда сигнала акустической эмиссии - шероховатость». Далее полученную функцию используют в качестве вышеупомянутой калибровочной зависимости.

4. Определяют среднее значение периода следования сигналов акустической эмиссии  $T_{\text{аэ}}$  и оценивают средний шаг неровностей  $s_m$  как произведение линейной скорости перемещения щупа по поверхности  $v$  на период следования сигналов акустической эмиссии, т.е.  $s_m = v[\text{м/с}] \cdot T_{\text{аэ}}[\text{с}] \cdot 10^6[\text{мкм}]$ . Справедливость данного выражения обусловлена тем, что каждый пик сигнала акустической эмиссии возникает вследствие соударения вершины щупа с единичной неровностью на ощупываемой поверхности. Таким образом, расчетная величина  $s_m$  характеризует расстояние между соседними вершинами неровностей, удары о которые генерируют импульсы акустической эмиссии.

Устройство для реализации способа (рис. 1) включает: корпус 1, внутри которого размещен датчик колебаний щупа, состоящий из упругого элемента 2 (изготовленного, например, из пружинной стали 65Г), с наклеенным на него пьезоэлементом 3 (например, PKGS-00LD). Щуп 4 представляет собой стержень, заостренный под углом (например,  $60^\circ$ ), вставленный в гнездо упругого элемента 2. Для стабилизации усилия прижима щупа к ощупываемой поверхности предусмотрена пружина 5, вставляемая во внутреннюю полость корпуса и закрываемая крышкой 6 корпуса. Сигнал от пьезоэлемента 3 по проводу 7 поступает на вход электронного блока 8. От электронного блока сигнал поступает на вход записывающего прибора 9, соединенного (например, посредством USB порта) с показыва-

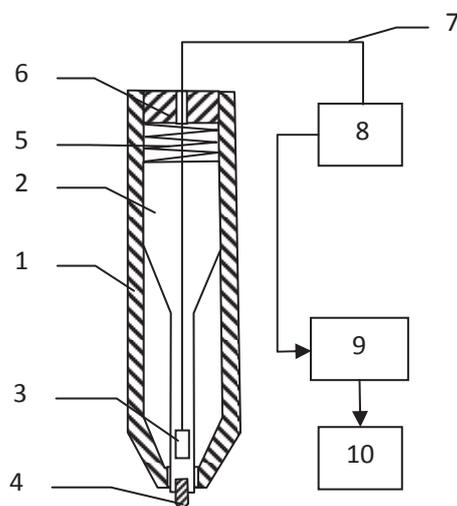
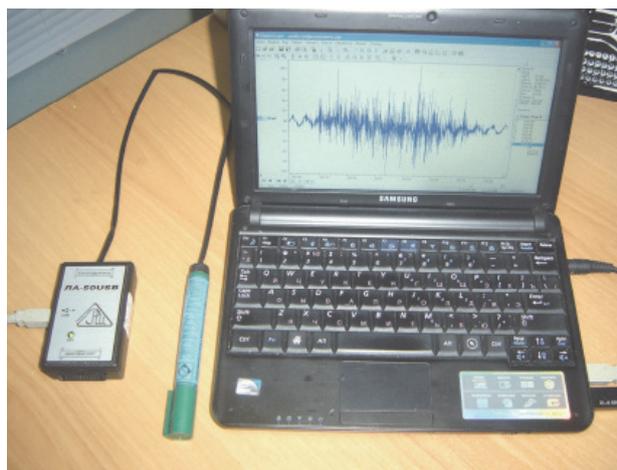


Рис. 1. Схема портативного АЭ профилометра



**Рис. 2.** Макет акустикоэмиссионного профилометра

ющим прибором 10 (например, персональным компьютером).

Корпус выполнен в виде полой детали, внутри которой размещен датчик колебаний щупа. Корпус служит для защиты датчика колебаний щупа от механических повреждений и загрязнений. Внешняя форма корпуса выбирается в зависимости от сферы применения устройства (например, цилиндрическая форма для охвата рукой, форма прямоугольного параллелепипеда для фиксации в резцедержателе токарного станка, конуса Морзе для установки в патроне станка с числовым программным управлением).

Щуп имеет форму стержня и выполнен из металла (например, латуни), имеющего меньшую твердость, чем ощупываемая им поверхность для предотвращения ее повреждения (царапания).

В качестве пьезоэлемента используются стандартные малогабаритные датчики (например, датчик удара или датчик виброускорений), преобразующие интенсивность механических колебаний в переменный электрический сигнал.

Электронный блок служит для усиления и калибровки сигнала датчика колебаний щупа и включает блок питания, усилитель и калибрующий узел. Калибрующий узел служит для обеспечения пропорциональности электрического сигнала, подаваемого на записывающий прибор, амплитуде сигналов акустической эмиссии, полученных при ощупывании поверхности. Если калибровочная зависимость имеет вид близкий



**Рис. 3.** Вариант изготовления АЭ профилометра в виде измерительной головки для станка с ЧПУ

к линейному, то функцию калибрующего узла может выполнять делитель, изготовленный из подстроечного резистора. В этом случае регулировкой подстроечного резистора добиваются соответствия значения шероховатости показаниям записывающего или показывающего прибора.

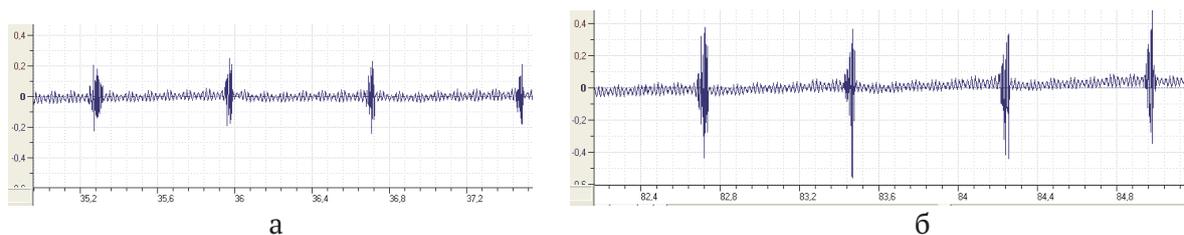
В качестве записывающего и показывающего прибора можно использовать любые стандартные самописцы и вольтметры, или компьютер, соединенный с системой сбора данных (например, E14-140, E14-440, La-50USB и др.) и оснащенный соответствующим программным обеспечением (например, ADCLab или PowerGraph).

Разработана конструкция АЭ профилометра в виде измерительной головки для станков с ЧПУ (рис. 3). Данное устройство намечается использовать при создании адаптивных технологий финишной обработки поверхностей, например, шлифования, при котором длительность выхаживания поверхности будет определяться не жестким регламентом, а фактически достигнутой чистотой поверхности, определяемой по текущим показаниям АЭ профилометра.

Характер сигналов АЭ при использовании данного типа профилометров показан на рисунке 4, из которого видно, что амплитуда сигналов растет с повышением шероховатости поверхности.

## 2. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИКОЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ШЕРОХОВАТОСТИ НА ЭТАПЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДЕТАЛЕЙ ПАР ТРЕНИЯ

При эксплуатации деталей пар трения акустикоэмиссионные методы позволяют эффективно выявлять возникающие на поверхности дефекты. Так, например, при эксплуатации колесных пар на поверхностях катания не допускаются ползуны глубиной более 1 мм, выщербины глубиной более 10 мм или длиной более 25 мм (для пассажирских



**Рис. 4.** АЭ сигнал, полученный при трении латунного щупа о стальную поверхность с шероховатостью  $R_a = 3,2$  мкм (а) и  $R_a = 6,3$  мкм (б)

вагонов), навары более 0,5 мм, трещины и др. дефекты. Для того чтобы применить акустикоэмиссионный метод оперативной оценки качества поверхностей катания вагонных колес возникла необходимость решения следующих задач. Во-первых, щуп при сканировании поверхности не должен ее деформировать (царапать), поэтому он изготавливается из материала менее твердого (и менее износостойкого). Во-вторых, необходимо обеспечить непрерывный контакт щупа при высоких скоростях скольжения, для чего можно увеличить силу прижатия щупа и/или уменьшить его массу. Однако нагружение щупа – неэффективный путь обеспечения чувствительности датчика, поскольку приводит к быстрому изнашиванию щупа. В-третьих, диагностика должна вестись по всей ширине поверхности катания, что для обычных щуповых методов является сложной задачей. В-четвертых, средства диагностики должны легко интегрироваться в существующие конструкции вагонных тележек и быть простыми, надежными и в то же время современными и наукоемкими.

Для решения данных проблем было предложено использовать в качестве зонда металлическую щетку с мягким стальным или латунным ворсом (проволокой диаметром 0,15 мм). Ширина и профиль ворса щетки выбирается в соответствии с профилем и шириной поверхности катания вагонных колес. При этом широкий ряд равномерно распределенных проволок образует плоский зонд. Сила прижатия щетки выбирается небольшой (до 5 Н). При этом в условиях смазывания колес скорость изнашивания ворса не превышает допустимой величины. Для преобразования сигналов акустической эмиссии в электрический сигнал использовали миниатюрный пьезоэлемент PKGS-00LD, приклеенный

к обратной стороне щетки. Каждая проволока играет роль щупа, сканирующего поверхность. Попадание даже одной или нескольких проволок на дефектный участок отражаются на общем фоне регистрируемого сигнала.

Для выявления чувствительности акустикоэмиссионного датчика проведены экспериментальные исследования с использованием цилиндрических образцов с различным состоянием поверхности, включая: 1) образец с шероховатостью Ra=10 мкм, соответствующей поверхности новых колес; 2) образец с выщербинами до 1 мм (допустимый дефект); 3) образец, аналогичный предыдущему, но имеющий единичный дефект, моделирующий поперечную трещину глубиной 1 мм, оставленный остро заточенным зубилом. Диаметр образцов составлял 25 мм. Частота вращения 950 мин<sup>-1</sup>, что соответствует линейной скорости около 4,5 км/час. При испытаниях оценивали спектр полученного сигнала (см. рис. 5).

В полученных спектрах наиболее заметные отличия видны не в области частот вращения образца, а в области более высоких частот, близких к 1350 Гц, соответствующих частоте столкновений ворсинок зонда с выступами неровностей.

В качестве системы сбора и обработки измерительных данных предложено использовать распределенную мультиагентную беспроводную сеть датчиков. Каждый датчик-агент состоит из следующих конструктивных модулей: первичный преобразователь; согласующий усилитель; аналого-цифровой преобразователь; управляющий микроконтроллер; модуль беспроводной передачи данных.

Структурная схема датчика-агента беспроводной технологии сбора и обработки данных диагностики представлена на рис. 6.

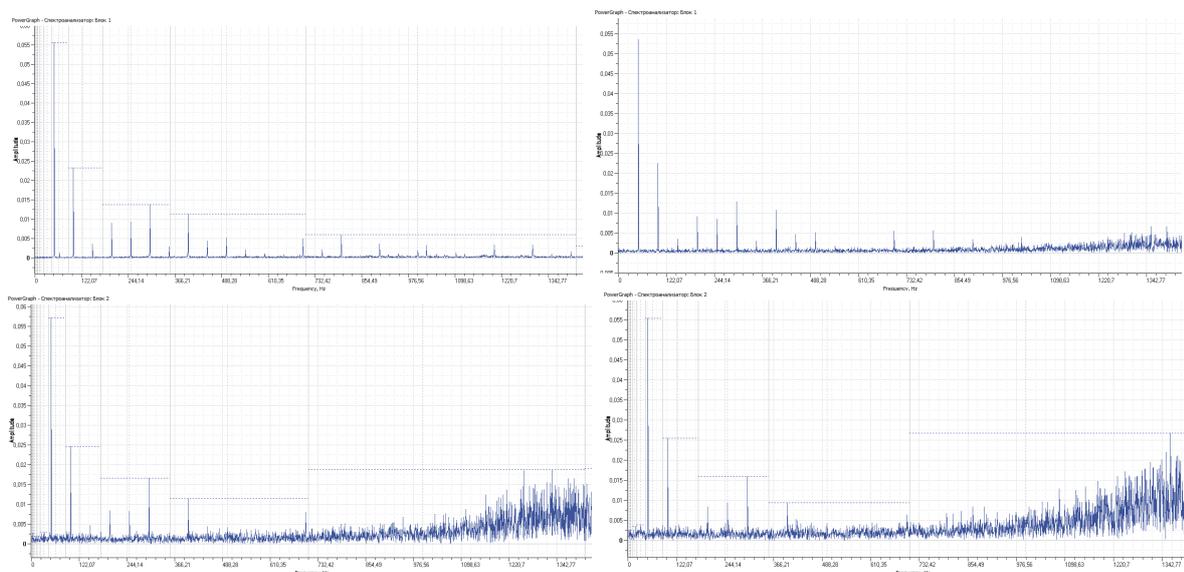


Рис. 5. Спектр сигналов АЭ:

- а – до соприкосновения зонда с поверхностью;
- б – на неповрежденной поверхности; в – на поверхности, поврежденной в допустимых пределах;
- г – на поверхности с критическим дефектом

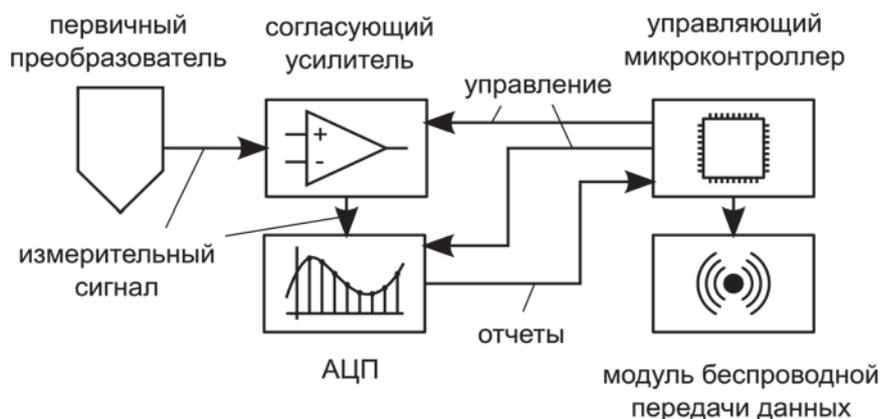


Рис. 6. Структурная схема датчика-агента беспроводной технологии сбора и обработки данных диагностики

Поступающий с первичного преобразователя измерительный сигнал, проходя через согласующий усилитель, поступает на аналого-цифровой преобразователь. Коэффициент усиления согласующего усилителя и частота дискретизации сигнала управляется с микроконтроллера. Микроконтроллер собирает дискретные временные отчеты сигнала с аналого-цифрового преобразователя и обрабатывает их. Для обеспечения связи датчика-агента в пределах системы сбора и обработки используется модуль беспроводной передачи данных. Предполагается организация с помощью модулей беспроводной связи ячеистой топологии взаимодействия между структурными составляющими системы, что обеспечит значительное увеличение максимального расстояния передачи данных и обеспечит внутри сети связь типа «каждый-с-каждым». Датчики-агенты, использующие беспроводную связь для информационного взаимодействия, позволят значительно упростить внедрение рассматриваемой технологии в эксплуатацию по причине отсутствия необходимости монтажа проводной инфраструктуры, охватывающей все узлы сбора данных.

Описываемая технология диагностики железнодорожного состава осуществляет сбор и обработку множество измерительных потоков, которые находятся в определенной взаимосвязи друг с другом. Так, например, частотные характеристики сигналов, получаемые с колес платформы, имеют составляющие, которые определяются не только качественными характеристиками этих колес, но и профилем железнодорожного полотна, вибрациями силовой установки, амортизацией платформы и многих других факторов. Таким образом, существует необходимость проведения совокупного анализа измеряемых параметров. В таком случае, при осуществлении обработки информации на центральном узле необходимо организовать непрерывную передачу измерительных временных отчетов от датчиков-агентов к системе обработки. Однако при использовании беспроводной связи в качестве средства пере-

дачи потоков данных возникает проблема ограниченности количества каналов беспроводных протоколов. Как правило, количество каналов передачи стандартизированных беспроводных протоколов ограничивается несколькими десятками. В связи с этим предлагается использовать мультиагентный принцип обработки данных, при котором диагностические информационные потоки обрабатываются внутри среды датчиков-агентов путем их взаимодействия между собой. В результате обработки данных каждый датчик-агент получает агрегированную информацию о состоянии механизмов, которая при помощи определенных заранее паттернов наделяется конкретной величиной значимости. Описываемые паттерны представляют собой структуру, определяющую методы агрегирования и взаимного анализа диагностических данных, а также зависимость степени значимости от их конкретных значений. Степень значимости результатов обработки определяет необходимость журналирования на сервере и/или оповещения управляющего персонала.

Исходя из проведения совокупного анализа диагностических параметров предполагается об-

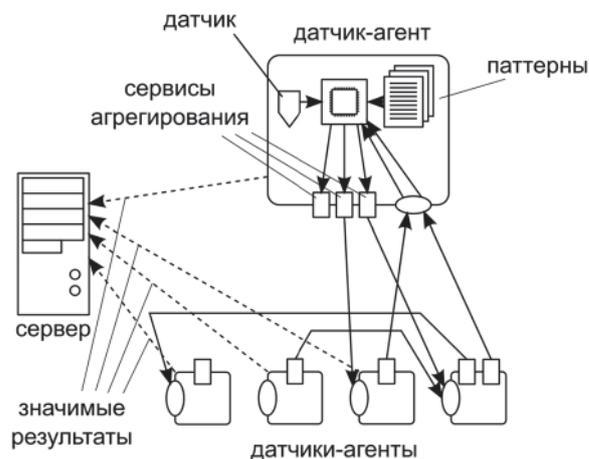


Рис. 7. Информационно-логическая модель мультиагентной технологии сбора и обработки данных

мен между датчиками-агентами агрегированной информацией, выделенной ими в результате обработки временных отчетов. Для осуществления данного обмена в интерфейсе взаимодействия датчиков-агентов предусмотрен инструментарий для публикации сервисов агрегирования данных, а также их использования. Через сервисы агрегирования данных датчики-агенты имеют возможность запросить информацию, необхо-

диму для комплексного анализа показателей в соответствии с обрабатываемым паттерном. Информационно-логическая модель мультиагентной технологии сбора и обработки данных представлена на рис. 7.

Таким образом, представленная технология решает задачи сбора и обработки данных диагностики с использованием мультиагентной сети датчиков.

## USING THE TRIBOACOUSTIC EMISSION FOR QUALITY CONTROL OF SURFACES OF FRICTION

© 2016 S.S. Shmyrov<sup>1</sup>, A.A. Minaev<sup>1</sup>, A.V. Skolznev<sup>1</sup>, I.D. Ibatullin<sup>1</sup>,  
A.V. Ivaschenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Samara State Technical University

<sup>2</sup> Samara Branch of Research Radio Institute

The description of methods and devices of acoustic-emission quality control of surfaces of friction is provided. The main advantages and scopes of the diagnostic system allowing quickly to reveal defects on responsible surfaces of details of machines are shown. Advantages of use of multiagent system of data collection are shown.

*Keywords:* acoustic emission, roughness, adaptive technologies, range, wheel, diagnostics.

---

*Sergey Shmyrov, Graduate Student at the Mechanical Engineering Technology Department.*

*Ildar Ibatullin, Doctor of Technics, Professor at the Mechanical Engineering Technology Department.*

*E-mail: id\_ildar@mail.ru*

*Anton Minaev, Graduate Student at the Mechanical Engineering Technology Department.*

*Anton Skolznev, Graduate Student at the Mechanical Engineering Technology Department.*

*Anton Ivaschenko, Doctor of Technics, Professor at the Information Systems and Technology Department, Samara University.*