

**Запорожец В.В.,
Стадниченко В.Н.,
Трошин О.Н.**

Національний авіаційний університет,
м. Київ, Україна
E-mail: vstadnichenko@bk.ru

**ОСОБЕННОСТИ АППАРАТНОЙ
РЕГИСТРАЦИИ И ОБРАБОТКИ
АКУСТО - ЭМИССИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ
ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ**

УДК 691.891:621.316

В данной статье рассмотрена методология аппаратной регистрации и обработки акустической эмиссии при решении задач идентификации процессов, имеющих место при трении и изнашивании процессов фрикционного контакта. Произведена оценка информативного содержания и погрешностей при регистрации диагностируемых параметров.

Ключевые слова: информационно - диагностическая система, трибосистема, акустическая эмиссия, мониторинг, износ, чувствительность, погрешность.

Введение

Проблемы, требующие решения в ходе исследований по трению и износа существенно изменились. В первую очередь это связано со значительным повышением долговечности и надежности современных триботехнических систем, что в ряде случаев поражает достижениями. Так хорошо известно, что межремонтный ресурс турбированных двигателей внутреннего сгорания производства концерна Фольксваген, еще двадцать лет назад измерялся десятками тысяч километров пробега, сейчас составляет более миллиона километров пробега легкового автомобиля. Такой качественный скачок в увеличении ресурса современных узлов трения стало возможным благодаря новым возможностям в области синтеза, как новых материалов поверхностей фрикционного контакта так и смазочных сред.

В настоящее время только в Германии только в производстве автомобильных дизелей ежегодно появляется свыше 1000 принципиально новых многослойных нанопокрытий и трибостанавливающих составов позволят получить аномально низкие значения интенсивности износа 10^{-9} - 10^{-13} м/м, в дальнейшем наноизносы.

Однако методы оценки износостойкости и прогнозирования ресурса трибосистем практически не изменились с конца 20 века и по своей скорости и точности значительно сдерживают внедрение современных конструктивных и технологических подходов [1, 2, 3]. В настоящее время в очереди на внедрение стоят сотни если не тысячи современных материалов и смазочных сред.

Учитывая вышеупомянутое возникает острая необходимость принципиально новой методологии оценки процессов контактного взаимодействия в реальном времени в трибосистемах, работающих в условиях наноизноса, а также раз работки на ее основе принципиально новой методологии модификации материалов поверхностей фрикционного контакта и управления процессами их самоупорядочения в процессе трения и износа. При этом, по мнению ряда ученых, в том числе Запорожца В.В., одним из наиболее информативных методов дающий информацию о процессах, имеющих место на поверхностях фрикционного контакта является акустическая эмиссия (АЭ) [4].

Анализ работ [5, 6, 7, 8] по использованию метода АЭ в трибодиагностике позволяет сделать вывод, что на данное время отсутствует единая методика выделения информативных сигналов от процессов разрушения в трибосистеме. Во-первых, это касается информативного диапазона частот регистрируемых сигналов и, во-вторых, амплитудной дискриминации сигналов в этом же диапазоне для исключения приема сигналов, не связанных с процессами поверхностного разрушения.

Первая попытка решения данной проблемы сделана в работе [9], где установлено, что сигналы от процессов разрушения в зависимости от механизма разрушения (вязкого или хрупкого) находятся соответственно в диапазонах частот 200 ... 400 кГц и 400 ... 700 кГц. В то время, как в большинстве работ информативный диапазон работ находился в диапазоне 30 ... 300 кГц и именно в этом диапазоне регистрировали максимальные значения АЭ. Это связано с фрикционным взаимодействием трущихся тел на макроуровне, что подтверждается отсутствие корреляционной связи между износом трибосистемы и АЭ [6, 10].

Такой подход к выделению сигнала АЭ от процессов поверхностного разрушения [9], позволил достичь высокого уровня корреляции между скоростью изнашивания и интегральной характеристикой АЭ (усредненной мощности) приведенной к определенному уровню дискриминации [11, 12, 13, 14]. В дальнейшем на этой основе разработан опытный образец малогабаритной информационно-диагностической системы (ИДС), и многофункционального программного обеспечения для решения задач диагностики широкого круга объектов диагностирования (подвижные сопряжения агрегатов авиационной техники, двигателей внутреннего сгорания и т.д.).

Результаты исследований

В состав ИДС с предварительным преобразованием измеряемой физической величины входят следующие основные блоки: входное устройство, измерительный преобразователь (производит обработку измеряемого сигнала и формирует аналоговое значение мощности АЭ), АЦП, блок управления, блок индикации, процессор (или блок вторичной обработки сигналов), запоминающее устройство или ЭВМ.

Одной из важнейших операций, от которой существенным образом зависит точность и чувствительность ИДС, является преобразование аналогового сигнала усредненной мощности АЭ в цифровой сигнал. АЦП предполагает выполнение трех операций: дискретизацию, квантование и цифровое кодирование измеряемой величины и функционально связанной с ней информацией. В ИДС использован АЦП прямого преобразования, построенный по разомкнутой структурной схеме, которая не имеет обратной связи с выхода на вход. В то же время отдельные элементы структурной схемы ИДС охвачены обратной связью, типовая структурная схема, приведена на рис. 1.

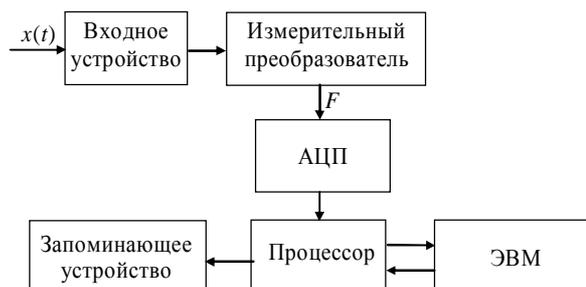


Рис. 1 – Структурная схема одноканальной ИДС прямого действия

Входное устройство для уменьшения помех имеет высокое входное сопротивление. Линейное преобразование входного сигнала $x(t)$ из аналогового в цифровой, с учетом автоматического выбора предела измерений, происходит в АЦП соответствующего уровня разрядности. От уровня разрядности зависит номинальная цена единицы наименьшего разряда, которая связана с разрешением (чувствительностью) ИДС, которая остается постоянной для каждого предела измерений.

В зависимости от разделительной способности и точности в отсчетном устройстве ИДС предусмотрено определенное число десятичных разрядов отсчета измерения диагностируемого параметра (усредненной спектральной мощности), от которой также зависит чувствительность ИДС.

Достоинством выбранной схемы ИДС является возможность функционального преобразования измеряемой физической величины x в другую физическую величину F , более пригодную для последующего аналого - цифрового преобразования с учетом корреляционной связи с процессами разрушения поверхностных слоев.

Одним из этапов работы АЦП является дискретизация сигнала по времени $x_o(t)$ в виде m мгновенных значений x_q , или отсчетов сигнала $x(t)$.

Интервал времени $\Delta t_q = t_{q+1} - t_q$ между двумя смежными моментами дискретизации t_q и t_{q+1} (шаг дискретизации), он может быть постоянным $\Delta t = \text{const}$ (равномерная дискретизация) или переменным (неравномерная дискретизация). В ИДС применяется АЦП с равномерной дискретизацией (задается из условий механизма разрушений в трибосистеме), как более простой для аппаратной реализации.

Процедура дискретизации сигнала $x(t)$ происходит в АЦП путем умножения функции $x(t)$ на вспомогательную периодическую последовательность $y(t)$ достаточно коротких тактовых импульсов с периодом Δt . Как тактовые используются прямоугольные импульсы амплитудой U_0 и продолжительностью τ_0 , которая значительно меньше, чем период Δt . Таким образом, дискретный сигнал $x_o(t)$ с интервалом Δt представляется произведением:

$$x_o(t) = x(t)y(t).$$

Квантование по уровню обеспечивается путем представления непрерывной по значению величины x в виде конечного числа дискретных уровней квантования x_{k1} , где $1 = \overline{1, n}$, которые создают шкалу квантования.

В нашем случае квантование обеспечивает сравнение измеряемой величины с ценой единицы наименьшего разряда АЦП, в данном процессе это измерение задается равномерно с интервалом:

$$\Delta x_{kl} = x_{k(l+1)} x_{kl}.$$

Конечный результат квантования измеряемой величины x_q (является кодом АЦП – эта величина связана с величиной информации о процессах разрушения) подается как число n_q минимальных (наименьших) интервалов квантования $\Delta x_{k\min} = \Delta x_k$, то есть:

$$x_q = n_q \Delta x_k,$$

где Δx_k – номинальная цена единицы наименьшего разряда кода (дискретность, или шаг квантования).

Квантование в ИДС заключается в представлении интегральной величины квантовых уровней за интервал времени шага дискретизации, которая отражает изменение скорости накопления повреждений (износа) в диагностируемой трибосистеме. Таким образом, в ИДС жесткий алгоритм преобразования аналогового сигнала АЭ предусматривает установление фиксированного уровня дискриминации сигналов АЭ от процессов разрушения в ограниченной полосе пропускания от 200 кГц и более в соответствии с амплитудно - частотной характеристикой датчика.

Жесткий алгоритм работы АЦП предусматривает установление полосы дискретизации приема сигналов по времени регистрации и квантование их уровня.

Заданная в ИДС дискриминация обусловлена величиной апертурной ошибки (интервал времени $T_{an} = t'_q - t_q$, в котором сохраняется неопределенность между заданным и реальным отсчетом мгновенного значения сигнала $x(t)$).

Она связана с конечным (не нулевым) временем преобразования в АЦП любого мгновенного значения входного сигнала и его изменение за время преобразования в АЦП. Схематически появление данной ошибки показано на рис. 2.

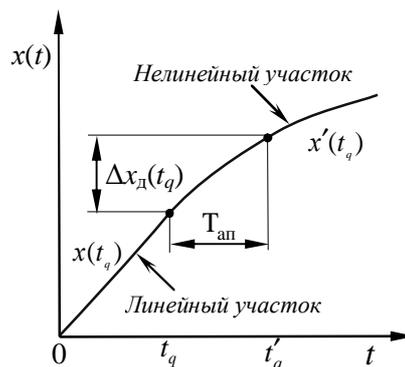


Рис. 2 – К пояснению апертурной ошибки

Аппаратная ошибка (динамическая) $\Delta x_d(t_q)$ в момент дискретизации t_q равна:

$$\Delta x_d(t_q) = x(t'_q) - x(t_q).$$

Погрешность запаздывания можно оценить по формуле:

$$\Delta x_d(t_q) = x'(t_q) T_{an},$$

где $x'(t_q)$ – скорость изменения функции (сигнала) $x(t)$ в точке t_q .

Для уменьшения аппаратной ошибки в ИДС рабочая скорость АЦП подбиралась исходя из максимальной скорости изменения (частотного спектра) входного сигнала. Кроме того, максимальное значение времени преобразования T_{an} в АЦП обеспечивается таким, чтобы максимальная ошибка измеряемого сигнала $\Delta x_{d\max}$ за этот период времени не превышала уровень квантования Δx_k . То есть условие дискретизации в ИДС записывается как:

$$|\Delta x_{d\max}| \leq \Delta x_k.$$

Теоретические и лабораторные исследования в трибодиагностике позволили создать опытный образец ИДС контроля, который прошел испытания на машинах трения с моделированием различных видов повреждаемости трибосистем, рис. 3. Эти исследования показали высокую корреляционную связь между измеряемым параметром (усредненная мощность АЭ) и мерой повреждения трибосистем (скоростью изнашивания).

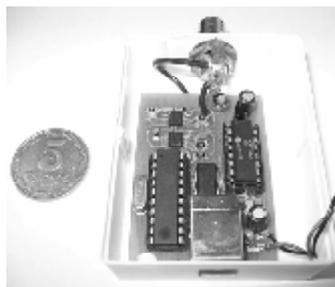


Рис. 3 – Блок регистрации и обработки сигналов АЭ в ИДС

Возможности современной элементной базы по данному направлению исследований позволяют уменьшить размеры блока регистрации ИДС контроля до 2 см^2 и менее. В качестве чувствительного элемента ИДС используются пьезоэлектрические преобразователи, которые имеют малые размеры, а также возможно использование пленочных преобразователей по аналогии с теми, что использовались на космическом челноке «Буран». Блок регистрации и обработки ИДС может встраиваться в конструктивный диагностируемый элемент, с предыдущей адаптацией по питанию, а также с возможностью использования своего источника питания за счет минимальных собственных энергозатрат. Накопление информации о повреждаемости осуществляется в соответствующем блоке, который может размещаться на объекте диагностирования.

Данное конструктивное решение ИДС контроля позволяет накапливать информацию за все время эксплуатации объекта контроля с учетом выполнения ремонтно - профилактических работ на нем. То есть перейти на эксплуатацию контролируемых объектов по техническому состоянию.

ИДС позволяет, регистрировать величину износа начиная с отделения первой частицы с поверхности трения, это по сути нанотехнология в измерении скорости изнашивания. При регистрации повреждений уровень сигнала возрастает на порядки. Таким образом, использование ИДС заданной структурной схемы позволяет выявить дефекты на ранней стадии их развития.

Преобразование аналогового сигнала в цифровой сигнал в использованном в ИДС АЦП имеет ряд особенностей. Механизм квантования сигналов можно представить следующей схемой, рис. 4. Регистрации измерения сигналов АЭ оценивается кодом АЦП (относительных единицах n) относительными единицами, которые представляют собой уровень усредненной мощности АЭ. Время усреднения определяется частотой среза фильтра низких частот.

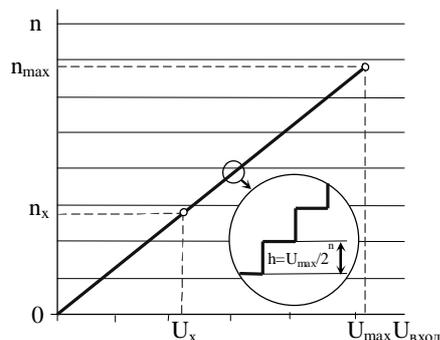


Рис. 4 – Схема преобразования аналогового сигнала усредненной спектральной мощности в цифровой сигнал

Цифровое кодирование в АЦП осуществлялось двоичным кодом. Двоичный код использован поскольку он близок к оптимальному по времени вычислительных операций [15]. Критерием оптимальности двоичного кода является минимизация произведения системы исчисления h на количество разрядов l . т.е. при данной системе кодирования hl стремится к минимуму.

Весьма важным для оценки метрологических характеристик ИДС является оценка статистических и динамических ошибок измерения сигналов АЭ. Пути уменьшения динамической ошибки (апертурного времени) рассмотрено выше по тексту.

В общем виде основная статистическая погрешность АЦП имеет три составляющих: аддитивная, мультипликативная и нелинейная. Аддитивная составляющая основной погрешности приводит к параллельному смещению градуировочной характеристики АЦП, мультипликативная составляющая - к откло-

нению реальной градуировочной характеристики АЦП от номинальной, а нелинейная составляющая - к отклонению реальной градуировочной характеристики АЦП от прямой линии (рис. 4). Для уменьшения аддитивной и мультипликативной составляющих основной погрешности в ИДС используется операции «Установка нуля» и «Калибровка», которые выполняются автоматически. Погрешность нелинейности уменьшается периодически проведением калибровок для фиксированного калибровочного значения опорного сигнала, который в каждый момент времени измерений формирует опорный сигнал и на выходе микроконтроллера.

Результаты использования ИДС при проведении лабораторных и стендовых испытаний показали, что исключить полностью аддитивную и мультипликативную составляющие погрешности АЦП в полной мере не удается, что обусловлено следующими причинами:

- изменением этих составляющих погрешности во времени, ибо они «плывут» после установки нуля и калибровки до начала измерений;
- изменением климатических факторов (влажность, температура), при которых выполнялась установка нуля и калибровка.

Тем не менее, использование встроенной системы диагностики технического состояния агрегатов существенным образом снижает аддитивные и мультипликативные погрешности ИДС.

Пиковые значения регистрируемых параметров АЭ связаны с величиной информации о скорости накопления повреждений в диагностируемом объекте. С точки зрения получения информации о кинетике процессов изнашивания с использованием обработки сигналов АЭ, наиболее приемлемой является организация непрерывного режима записи информации в виде файлов (рис. 5) с последовательной записью и сохранением каждого результата измерения в устройстве запоминания (жестком диске компьютера). По оси абсцисс записывается номер измерения, а по оси ординат величина усредненной мощности сигналов АЭ.

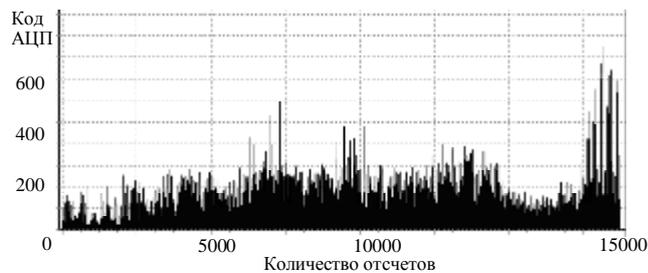


Рис. 5 – Один файл информации об измерении меры повреждения усредненной мощности сигналов АЭ диагностируемого объекта, сохраняемый в блоке накопления информации

После определенного уровня наработки диагностируемого объекта, проводится построение итоговых интегральных характеристик изнашивания трибосистем во времени испытаний и их анализ. Переход ко времени на оси абсцисс осуществляется перемножением количества отсчетов на время дискретизации одного отсчета.

Метрологическая оценка измерительного тракта ИДС проведенного на основании методики [15], а также после реализации мероприятий по снижению погрешностей изложенных выше показали, что погрешности измерения мощности сигналов АЭ и связанной с ней информации о скорости изнашивания трибосистем находится на уровне 0,7 %. Величина погрешности зависит также от характера зависимости меры повреждения и измеряемым диагностируемым параметром (линейная, нелинейная зависимость).

Статистическая погрешность из-за конечной продолжительности наблюдения случайного процесса без знания вида корреляционной функции δ_f оценивается по формуле:

$$\delta_f \sqrt{\theta} = \sqrt{2 \sum_1^n \frac{1}{v!} [\Phi_v(\xi)] / [\Phi(\xi)]},$$

где $\theta = T/\tau_{кx}$, T – продолжительность наблюдения;

$\tau_{кx}$ – интервал корреляции исследуемой функции $x(t)$;

$\Phi_v(\xi) - v - a$ – производная интеграла вероятности $\Phi(\xi)$, $\xi = \frac{x}{\sigma_x}$;

$$\Phi(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{1}{2\xi^2}} d\xi.$$

Определение $\Phi_v(\xi)$ осуществляют с помощью полиномов Эрмита, [16].

Практические расчеты показывают, что данный вид погрешности δ_f в среднем не превышает 1,2 %.

В работе [17] показано, что при ограничении длительности регистрации сигналов АЭ, величина погрешности энергии и мощности сигналов при различных механизмах разрушения поверхностного слоя не превышает 0,002 %.

Оценка границ допустимых значений основных погрешностей ИДС, приводится по формуле [15]:

$$\delta_{od} = \pm \sum_{i=1}^n |\delta_{odi}|,$$

где среди составляющих погрешностей δ_{odi} могут быть как аддитивные, так и мультипликативные.

Метод АЭ является косвенным методом и для того чтобы представить результаты в единицах измерения износа необходимо установить взаимосвязь износа и интегральной характеристики АЭ в виде параметра удельной эмиссионной активности [18], величина износа в данной работе определялась весовым методом, который имеет свою погрешность.

Определение этих погрешностей, которые носят инструментальный характер связанных, с использованием ИДС связаны с определением взаимосвязи информационного параметра регистрируемого в процессе диагностики подвижных сопряжений с величиной их скорости изнашивания [18].

Проведенная авторами в работе [14], позволила установить, что погрешности данного метода находятся в пределах величины, удельной эмиссионной активности испытываемых материалов в данной работе она находилась в пределах 2 ... 2,5 % [18], которая связана как с физико-механическими свойствами материалов, так и с масштабом процесса изнашивания. Поскольку в этом случае испытаниям подвергались материалы, близкие по своим физико-механическим свойствам, масштабы изменения этих пределов определены не были. Дальнейшие исследования, проведенные на материалах которые существенным образом отличаются по своим физико - механическим свойства показали, что параметры удельной эмиссионной активности могут отличаться на порядки [19].

Принятый в ИДС подход к приему, обработке и регистрации сигналов АЭ, позволил регистрировать и разделять по уровням сигналы от износа различных по своим физико-механическим свойствам элементов и установить уровень сигнала от микроповреждений поверхностного слоя, который в дальнейшем приводит к отделению частиц износа и таким образом обосновано установить уровень амплитудной дискриминации, рис. 6.

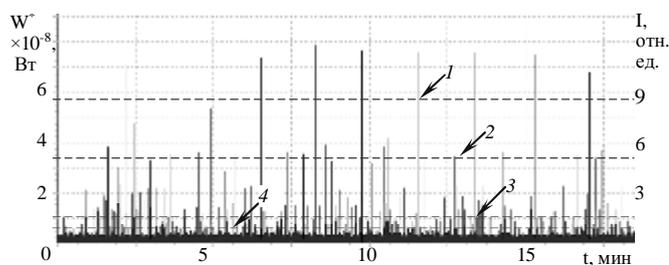


Рис. 6 – Диаграмма изменения усредненной мощности сигналов АЭ $W_{ср}$ по времени:

- 1 – средний уровень при отделении частиц износа БрАЖ 9-4;
- 2 – средний уровень при отделении частиц износа стали Сталь 40;
- 3 – средний уровень от микродефектов и пластической деформации поверхностных слоев;
- 4 – уровень дискриминации по амплитуде

Итак, метод трибодиагностики с использованием АЭ достаточно точный, и погрешности системного характера существенно не влияют на него. Это предопределяет условия использования метода АЭ для технической диагностики и прогнозирования расчета повышения ресурса техники, которая эксплуатируется после использования новых материалов.

Выводы

Результаты экспериментальных исследований по оценки эффективности ИДС на основе метода АЭ работающего по жесткому алгоритму приема и обработки диагностируемого сигнала обеспечивает достаточную точность при регистрации различных видов повреждений подвижных сопряжений из-за уменьшения погрешностей системного характера, которые присущи приборам АЭ, которые широко распространены в настоящее время.

Литература

1. Подмастерьев К.В. Автоматизированная система сбора и анализа данных при трибомониторинге / К.В. Подмастерьев, В.В. Мишин, Е.В. Пахолкин, В.В. Марков // Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики: Материалы междунар. научн.-практ. конф. – Новочеркасск: НПО «Темп», 2001. – Ч. 3. – С. 40-42.
2. Основи трібології / В.А. Войтов, В.Н.Стадниченко, О.М.Трошін та ін.: Під заг. ред. В.А. Войтова – Харків: ХДТУСГ ім. Петра Василенка, – 2008. – 342 с.
3. Технические средства диагностирования: Справочник / В.В. Клюев, П.П. Пароменко, В.Е. Абрамчук и др.: Под общ. ред. В.В. Клюева. – М: Машиностроение, – 1989. – 672 с.
4. Сарычев Г.А. Анализ акустического излучения при фрикционном взаимодействии твердых тел / Г.А. Сарычев, В.М. Щавелин, В.Н. Баранов // Трение и износ, – 1985.Т. 6, №1. – С. 39-47.
5. Свириденко А.И. Акустические и электрические методы в триботехнике. А.И. Свириденко, Н.К. Мышкин, Т.Ф. Калмыкова и др.: Под ред. Белого В.А. – Мн.: Наука и техника. – 1987. – 280 с.
6. Баранов А.В. Ультразвуковой мониторинг работы трибосопряжений / А.В. Баранов, С.В. Тарасевич, В.А. Вагнер. // Ползуновский вестник – Барнаул: АГТУ. – 2012. – №1 – С. 23-27.
7. Маркова Л.Ф. Перспективы развития трибодиагностики / Л.Ф. Маркова // Трение и износ. – 2006. – Т. 11, №7. – С. 175-184.
8. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении / Под общей редакции Семашко Н.А. – М.: Машиностроение. – 2002. – 240 с.
9. Березняков А.И. О взаимосвязи характеристик акустического излучения поверхности трибосопряжения с трибологическими параметрами / А.И. Березняков, В.Н. Стадниченко // Трение и износ. – 1998. – Т. 19, №3. – С. 312-317.
10. Лебедев В.М. Акустические исследования работы трибосопряжений, смазываемых пластичными смазочными материалами / В.М. Лебедев, А.В. Баранов // Долговечность трущихся деталей машин. – М.: Машиностроение. – 1988. – №3. – С. 234-243.
11. Filonenko S.F. Research of influence of thermal resistance of elements of trybosystem on wear-proofness of friction units / S.F. Filonenko, V.N. Stadnichenko, O.N. Troshin // Proceeding of the forth world congress “Aviation in the XXI-st century” “Safety in aviation and space technology, NAU, – 2010. Volume 1. – P. 12.1-12.4.
12. Запорожец В.В. Методология ускоренной оценки износостойкости образцов с электроискровыми покрытиями / В.В. Запорожец, В.Н. Стадниченко // Проблемы трибології. – 2010. – №4. – С. 25-32.
13. Стадніченко В.М. Прогнозування ресурсу трібосистем з використанням інформативних параметрів акустичної емісії / В.М. Стадніченко, М.Г. Стадніченко, В.В. Варваров // «Новітні технології для захисту повітряного простору»: Матеріали Шостої наукової конференції ХУПС. – 2010 – С. 55.
14. Запорожець В.В. Прискорена методика визначення зносостійкості нанопокриттів в трібосистемах з використанням інформативних параметрів акустичної емісії / В.В. Запорожець, В.М. Стадніченко, О.М. Трошін та ін. // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – №3(25). – 2010. – С. 19-24.
15. Цифрові вимірювальні прилади / В.М. Чинков. – Харків: НТУ «ХП», –2008. – 508 с.
16. Вероятностный анализ систем автоматического управления Н.А. Лившиц, В.Н. Пугачев – М.: Советское радио, – 1963. – 896 с.
17. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении / Под общ. ред. Семашко Н.А. – М.: Машиностроение, – 2002. – 240 с.
18. Запорожец В.В., Стадниченко В.Н. Идентификация “наноизносных” режимов трения с использованием метода акустической эмиссии.// Технологические системы, - 2012. - №4. - С. 42-56.
19. Запорожец В.В., Стадниченко В.Н., Трошин О.Н. Теоретические и экспериментальные основы акустико-эмиссионной идентификации механизмов изнашивания и прогнозирования ресурса трибосистем. // Проблемы трибології. – 2013р. - № 1. – С. 16-29.

Поступила в редакцію 13.01.2014

Zaporozhetz V.V., Stadnychenko V.N., Troshin O.N. **Features of hardware acquisition and processing of acoustic-emission radiation in the identification of friction and wear.**

This article describes the methodology of hardware acquisition and processing of acoustic emission in the solution of problems of identification processes taking place at the friction and wear of friction contact surfaces. The evaluation of informative content and errors in registration diagnosed parameters.

Key words: information and diagnostic system, tribosystem, acoustic emission, monitoring, depreciation, sensitivity, accuracy.

References

1. Podmasteriev K.V., Mishin V.V., Pakholkin E.V., Markov V.V. Avtomatizirovannaya sistema sbora i analiza danih pri tribomonitoringe. Teoriya, metody i sredstva izmereniy, kontrolya i diafgnostiki: Materialy mejdunarod. nauchn.-prakt. konf. Novochoerkassk. NPO «Temp», 2001. Ch. 3. S. 40-42.
2. Osnovy tribologiy. V.A. Voytov, V.N. Stadnichenko ta in.: Pid zag. red. V.A. Voytova. Kharkiv: KhDTUSG im. Petra Vasilenks, 2008. 342 S.
3. Tekhnicheskie sredstva diagnostirovaniya: spravochnik. V.V. Kluev, P.P. Paromenko, V.E. Abramchuk i dr. Pod obsh. red. V.V. Klueva. M: Mashinostroenie, 1989. 672 s.
4. Sarychev G.A., Shavelin V.M. Analiz akusticheskogo izlucheniya pri frikzionnom vzaimodeystvii tverdykh tel. Trenie i iznos, 1985.T. 6, №1. S. 39-47.
5. Sviridenok A.I., Myshkin N.K. Akusticheskie i elektricheskie metody v tribotekhnike. Pod red. Belogo V.A. Mn.: Nauka i tekhnika. 1987. 280 s.
6. Baranov A.V., Tarasevich S.V., Vagner V.A. Ultrozvukovoy monitoring raboty tribosopryajeniy. Polzunovskiy vestnik. Barnaul: AGTU. 2012. №1 S. 23-27.
7. Markova L.F. Perspektivy razvitiya tribodiagnostiki. Trenie i iznos. 2006. T. 11, №7. S. 175-184.
8. Akusticheskaya emissiya v eksperimentalnom materialovedenii. Pod obshey redaktziey Semashko N.A. M.: Mashinostroenie. 2002. 240 s.
9. Beryaznikov A.I., Stadnichenko V.N. O vzaimosvyazi kharakteristik akusticheskogo izlucheniya poverkhnosti tribosopryajeniya s tribologicheskimi parametrami. Trenie i iznos. 1998. T. 19, №3. S. 312-317.
10. Lebedev V.M., Baranov A.V. Akusticheskie issledovaniya raboty tribosopryajeniy, smazivaemikh plastichnimy smazochnimy materialami. Dolgovechnost trushikhhsya detaley mashin. M.: Mashinostroenie. 1988. №3. S. 234-243.
11. Filonenko S.F., Stadnichenko V.N, Troshin O.N. Research of influence of thermal resistance of elements of trybosystem on wearproofness of friction units. Proceeding of the forth world congress "Aviation in the XXI-st century" "Safety in aviation and space technology, NAU, 2010. Volume 1. P. 12.1-12.4.
12. Zaporozhetz V.V., Stadnichenko V.N. Metodologiya uskorennoy otzhenki iznosostoykosti obratzov s elektroiskrovimiy pokritiyami. Problemi tribologii. 2010. №4. S. 25-32.
13. Stadnichenko V.M., Stadnichenko N.G., Varvarov V.V. Prognozuvannya resursu tribosystem z vikoristanniyam informatyvnikh parametriv akusticheskoy emissii «Novitni tekhnologii dlya zakhistu povitryanogo prostoru»: Materialy Shstoi naukovo konferentsii KhUPS. 2010 S. 55.
14. Zaporozhetz V.V., Stadnichenko V.N., Troshin O.N. Priskorena metodika viznachennya znosostoykosti nanopokrittiv v tribosistemakh z vikoristanniyam informatyvnikh parametriv akusticheskoy emissiy. Zbirnik naukovikh pratz Kharkivskogo Universitetu Povitryanykh Sil. №3(25). 2010. S. 19-24.
15. Chinkov V.M. Tzifrovi vimiruvslny prilady. Kharkiv: NTU «KhPI», 2008. 508 s.
16. Livshitz N.A., Pugachev V.N. Veroyatnostniy analiz system avtomaticheskogo upravleniya. M.: Sovetskoye radio, 1963. 896 s.
17. Akusticheskaya emissiya v eksperimentalnom materialovedenii. Pod obsh. red. Semashko N.A. M.: Mashinostroenie, 2002. 240 s.
18. Zaporozhetz V.V., Stadnichenko V.N. Identifikatziya "nanoznosnykh" rejimov treniya s ispolzovaniem metoda akusticheskoy emissiy. Tekhnologicheskije systemy, 2012. №4. S. 42-56.
19. Zaporozhetz V.V., Stadnichenko V.N., Troshin O.N. Teoreticheskie i eksperimentalnye osnovy akustiko-emissionnoy identifikatzii mekhanizmov sznashivaniya i prognozirovaniya resursa tribosystem. Problemi tribologii. 2013. № 1. S. 16-29.