

## МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Костюков В.Н. (Научно-производственный центр «Динамика»)

Мониторинг технического состояния агрегата – наблюдение за процессом изменения его работоспособности с целью предупреждения персонала о достижении предельного состояния – позволяет перевести большинство отказов из категории внезапных для персонала в категорию постепенных за счет раннего их обнаружения и своевременного предупреждения. Мониторинг в реальном времени (РВ-мониторинг) имеет ряд существенных отличий от «*on line/off line*» мониторинга, которые заключаются в строгом регламентировании интервала мониторинга на уровне 10-20% интервала самого быстрого развития неисправностей в оборудовании производственных комплексов (ПК), что возможно на базе автоматических системы диагностики и мониторинга (СДМ) с функционально носопределенной структурой, которая не зависит от конструкции оборудования для широкого класса агрегатов ПК и содержит многоуровневую экспертную систему.

Поскольку любые системы распознавания обладают ненулевой ошибкой  $\eta$ , то возникает задача оценки требуемой ошибки СДМ  $\eta$  для ПК, имеющего в сложившихся условиях эксплуатации вероятность внезапных отказов  $Q$  и наработку на отказ  $T_Q$ , при требуемых наработке не менее  $T$ , и риске пропуска отказа не более  $r$ . Уравнение связи между  $T_Q$ , при существующей  $Q$ , требуемом  $r$  и числом отказов  $n$  имеет вид:

$$T_r = T_Q * [\ln(1 - Q)] / [\ln(1 - r)], n = T_r / T_Q.$$

$$\eta = T_Q / (T_r + T_Q), \eta = [\ln(1 - r)] / [\ln(1 - r) + \ln(1 - Q)], \text{ для } r \ll Q \ll 1, \eta = r / Q.$$

Согласно номограмме для определения допускаемой ошибки СДМ (рис. 1а) для типичных значений за сутки  $Q = 20\%$ ;  $r = 1\%$ , ошибка системы диагностики  $\eta$  не должна превышать 4 %. При этом по номограмме для определения коэффициента увеличения временного интервала  $k_T = T_r / T_Q$  между внезапными необнаруженными отказами агрегатов при внедрении СДМ (рис. 1б) интервал между производственными неполадками и аварийными ситуациями возрастает в 24 раза, что объясняет существенный технико-экономический выигрыш от внедрения СДМ [1]. Для оценки экономической эффективности внедрения СДМ представляет практический интерес зависимость коэффициента увеличения времени между отказами  $k_T$  от ошибки  $\eta$  распознавания опасных состояний (рис. 1в).

$$T_r = T_Q [\ln(1 - Q)] / [\ln(1 - r)], n = T_r / T_Q, k_T = 1/\eta - 1.$$

Эмпирический риск  $r$  является также критерием эффективности управления ПК по минимуму вероятности пропуска отказа для сравнения различных систем и технологий управления с вектором параметров  $\{Z\}$ :  $r = \min Q\{Z\}$ .

Техническое состояние агрегата  $S_1$ , зависящее от режима его работы  $S_0$  и уровня накопленных погрешностей изготовления, ремонта и эксплуатации  $S$ , на основании работ Н.Г. Бруевича представляется в следующем виде:

$$S_1 = S_0 + S(t) = S(n_0, p_0) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial S}{\partial q_j} q_j(t), \quad (1)$$

где  $S_0 = S(n_0, p_0)$  – составляющая, которая характеризует механизм с минимальными, близкими к нулю, обобщенными технологическими и эксплуатационными погрешностями, работающего в диапазоне номинальных скоростных ( $n_0$ ) и грузовых ( $p_0$ ) режимов;  $\Delta q_j = X_j$  -  $j$ -я погрешность механизма, заложенная при

изготовлении ( $t = 0$ ), развивающаяся во времени и определяющая износ, или, в общем случае, степень деградации механизма и степень его старения:  $dS/dq_j$  – чувствительность обобщенной погрешности  $S$  к  $j$ -й погрешности механизма по соответствующей обобщенной координате  $q_j$ .

Обобщенная математическая модель СДМ на основе уравнений переменных состояния определяется как:

$$\{\dot{S}(t)\} = [A]\{S(t)\} + [B]\{U\}, \quad \{Y(t)\} = [C]\{S(t)\} + [D]\{U\}, \quad (2)$$

где  $\{S(t)\}$  – вектор функций старения агрегата размерности  $m$ , каждая составляющая которого характеризует его обобщенный (совокупный) структурный параметр, подлежащий оценке и характеризующий остаточный парциальный ресурс агрегата по этому обобщенному параметру, носит во времени многомодальный характер в силу суммирования частных погрешностей (1);  $\{\dot{S}(t)\}$  – многомодальный вектор скорости старения (износа, остаточного ресурса и т.д.);  $\{U\}$  – вектор переменных управления размерности ( $p+k$ ) включает в себя переменные задания режима работы агрегата  $\{U_p(t)\}$  и факторы воздействия персонала на объект  $\{U_k(t)\}$ ;  $\{Y(t)\}$  – вектор диагностических сигналов размерности  $n \geq m$ , измеряемых СДМ.

Матрицы  $[A]$ ,  $[B]$ ,  $[C]$ ,  $[D]$  представляют собой соответственно:

- квадратную матрицу системы  $[A] = [a_{ij}]$ ;
- прямоугольную матрицу управления  $[B] = [b_{ij}]$ , которая определяет влияние действий персонала на состояние агрегата;
- матрицу наблюдения (матрица выхода)  $[C] = [c_{ij}]$ , которая определяет наблюдаемость внутреннего состояния;
- переходную матрицу  $[D] = [d_{ij}]$ , которая определяет влияние на параметры вибрации агрегата действий персонала по управлению режимом работы и обслуживанию.

Система мониторинга (2) вполне управляема как производственный комплекс и наблюдаема при совпадении рангов матриц  $[A]$  и  $[C]$  и отсутствии в последней нулевых столбцов. Размерность вектора  $\{S(t)\}$  (матрицы  $[A]$ ), которая определяет степень реальной наблюдаемости состояния агрегата, рекомендуется выбирать исходя из причин и статистики отказов агрегатов каждого типа. Составляющие  $\{S(t)\}$ , как правило, недоступны для непосредственного наблюдения и оцениваются по косвенным измерениям. Вектор управления  $\{U\}$  изменяется спорадически при пуске-останове агрегата и техобслуживании. Между этими моментами  $\{U\} = \text{const}$ . Полная косвенная наблюдаемость состояния агрегатов ПК при мониторинге достигается измерением диагностических сигналов и скоростей их изменения во времени в силу их независимости:

$$\{\Delta Y\} = [C]\{\Delta S\}, \quad \{\dot{Y}(t)\} = [C]\{\dot{S}(t)\}, \quad \{Y_{[1]}\} = [C]\{S_{[1]}\}, \quad \{\dot{Y}_{[1]}\} = [C]\{\dot{S}_{[1]}\}. \quad (3)$$

где предельное состояние агрегата  $\{S_{\text{над}}\}$  и опасная скорость его деградации  $\{\dot{S}_{\text{над}}\}$  с точностью до масштаба совпадают с критическими значениями диагностических признаков (ДП) и скоростей их изменения; приращение диагностических сигналов (вибропараметров) пропорционально приращению износа, утрате безопасности и уменьшению остаточного ресурса агрегата и ПК в целом

Каждая  $i$ -я обобщенная погрешность выражает парциальную функцию старения агрегата. Ее изменения во времени (тренд) представляют собой сумму трендов входящих структурных параметров  $X_i(t)$  и, в общем, носят многомодальный характер. Приращение вектора вибропараметров  $\{\Delta Y_n\}$  прямо пропорционально приращению вектора старения объекта (обобщенных погрешностей – структурных па-

раметров)  $\{AS_m\}$  и приращению исходных диагностируемых погрешностей механизмов агрегата  $\{AX_k\}$ .

Основной задачей синтеза СДМ является синтез ортогональных ДП  $\{Y_i\}$ , отражающих соответствующим образом сформулированные ортогональные классы неисправностей  $\{S_i\}$ . Это соответствует приведению матрицы наблюдения  $[C]$  к диагональной квадратной матрице, устанавливающей взаимнооднозначное (регрессионное) отношение между ДП и соответствующей обобщенной погрешностью, и проблема мониторинга состояния заключается в формировании правильной интерпретации этой обобщенной погрешности с учетом частоты появления классов неисправностей. Наличие интерпретации «причина-следствие» (погрешность-вибрация) эквивалентно приведению матрицы наблюдения к диагональной квадратной форме и соответствует мониторингу состояния. Отсутствие такой интерпретации соответствует мониторингу параметра (вибрации, температуры и т.д.). Часто неисправности агрегатов (разрушения поверхностей трения, ослабление крепления и т.д.) неизмеримы в сильных шкалах (отношения, интервалов). В этих случаях значения измеряемых ДП (вибропараметров) служат мерой таких неисправностей согласно (3).

Целесообразно определять: техническое состояние агрегата в соответствии с парциальной составляющей его вектора состояния  $\{S(t)\}$ , которая имеет максимальное значение  $S_{max}(t)$  среди всех диагностируемых параметров данного агрегата; опасность технического состояния агрегата – в соответствии с парциальной составляющей  $\dot{S}_{max}(t)$ , которая является максимальной среди всех скоростей износа диагностируемого агрегата; техническое состояние комплекса агрегатов ПК – в соответствии с парциальной составляющей его вектора состояния, которая имеет максимальное значение  $S_{max}(t)$  среди всех ДП всех агрегатов ПК; опасность состояния ПК – в соответствии с парциальной составляющей  $\dot{S}_{max}(t)$ , которая является максимальной среди всех скоростей износа всех агрегатов ПК.

Аналогичные формулировки справедливы и в пространстве ДП согласно обобщенной математической модели (2), (3). Техническое состояние агрегата и ПК в целом определяется максимальной парциальной составляющей вектора ДП  $Y_{max}(t)$ , наблюданной СДМ среди узлов агрегата и ПК в целом соответственно.

Опасность состояния агрегата и ПК в целом определяется максимальной парциальной составляющей скорости роста тренда вибропараметра  $\dot{Y}_{max}(t)$ , наблюданной СДМ среди всех скоростей по узлам агрегатов. Необходимое быстродействие СДМ определяется максимальной скоростью утраты работоспособности и минимальным запасом предельного состояния диагностируемого агрегата:

$$F = \frac{1}{T} = \text{Max} \left( B \frac{\dot{S}_i}{S_i} \frac{A_i}{A} \right) = \text{Max} \left( B \frac{\dot{Y}_i}{Y_i} \frac{A_i}{A} \right). \quad (4)$$

Параметр  $B$  в (4) характеризует качество алгоритма оценки скорости роста измеряемых ДП. Предложенные модели и определения лежат в основе способов диагностики и СДМ с функционально неопределенной структурой, новизна которых подтверждена патентами на изобретения.

Разработана динамическая модель состояния и вибрации агрегата на интервале жизни с учетом человеческого фактора, которая устанавливает экспоненциальную форму связи между ДП, структурными параметрами и остаточным ресурсом:

$$\{\dot{Y}\} = [a]e^{[a]^T} \{Y_0\}; \{\dot{S}\} = [C]^{-1}[a]e^{[a]^T} \{Y_0\}. \quad (5)$$

Уравнения (5), полностью определяют динамику состояния агрегатов ПК через динамику ДП вибрации, температуры и др. и скоростей их изменения. Предложенные модели позволяют учесть различные факторы, влияющие на вибонагруженность агрегата, его работоспособность и остаточный ресурс. Человеческий фактор проявляется в нарушениях режима работы агрегата (гидроудар, кавитация и т.д.) и правил его эксплуатации (использование грязного масла, отсутствие охлаждающей жидкости и т.д.), что вызывает быстрые тренды и резкие скачки вибрации, температуры, тока и сопровождается быстрой утратой работоспособности агрегатом.

Таким образом, скорости изменений трендов вибропараметров дополняют пространство ортогональных ДП, что позволяет увеличить достоверность постановки диагноза и снизить ошибку диагностики  $q_0$ :

$$q_0 = \prod_{i=1}^n q_i = q^n, \quad \text{при } q_1 = q_2 = \dots = q_n = q, \quad (6)$$

где  $q_i$  – ошибка диагностики по  $i$ -му ДП;  $n$  – число независимых ДП.

Практическая реализация изложенных теоретических подходов в системах комплексного мониторинга КОМПАКС® [1, 2], использующих различные методы диагностирования – виброакустические, акусто-эмиссионные, тепловые, электрические и др., обеспечило их широкую инсталляцию – более 400 за последние 15 лет часто почти под открытым небом, на предприятиях крупнейших компаний: ОАО «ГАЗПРОМ», ОАО «ЛУКОЙЛ», ОАО «РОСНЕФТЬ», ОАО «РЖД» и др., а также за рубежом, на отечественном и импортном оборудовании более 1000 типов, в различных географических и климатических зонах.

#### *Выводы.*

1. Предложено в качестве переменных состояния агрегата использовать парциальные функции старения и их скорости, определяемые обобщенными погрешностями, структурными параметрами и скоростями их роста.

2. Предложено оценивать *техническое состояние ПК и опасность* потери им работоспособности, соответственно, по минимальной остаточной работоспособности и максимальной скорости ее потери.

3. Предложено оценивать необходимое быстродействие СДМ по критерию *наблюдаемости* максимальной скорости потери остаточной работоспособности производственным комплексом.

4. Получены аналитические оценки и построены nomограммы для определения максимальной допускаемой ошибки диагностики технического состояния агрегатов ПК при существующем потоке отказов и требуемом риске пропуска отказа.

5. Сформулирован критерий эффективности управления состоянием агрегатов ПК по минимуму вероятности пропуска отказа, аварии или производственной неполадки.

6. Получены аналитические оценки увеличения ресурса безопасного пробега ПК в зависимости от уменьшения максимальной ошибки СДМ.

7. РВ-мониторинг позволяет перевести отказы оборудования и производственных комплексов из категории внезапных в категорию постепенных.

8. Необходимость снижения отказов в десятки раз и соответствующего увеличения межаварийных пробегов оборудования требует снижения ошибок мониторинга до единиц % и менее (*нуль-мониторинг*).

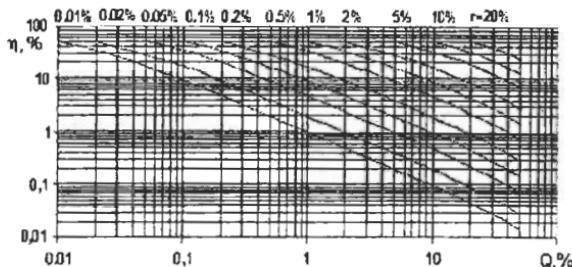
9. Снижение статической ошибки и сокращение сроков внедрения систем РВ-мониторинга до нескольких месяцев требует разработки безэталонных методов диагностики и стандартных процедур формирования ДП, инвариантных к типу оборудования.

10. Снижение динамической ошибки мониторинга требует существенного превышения темпов мониторинга (не только измерений, но и постановки диагноза и его исполнения) над темпами развития неисправностей в производственных комплексах.

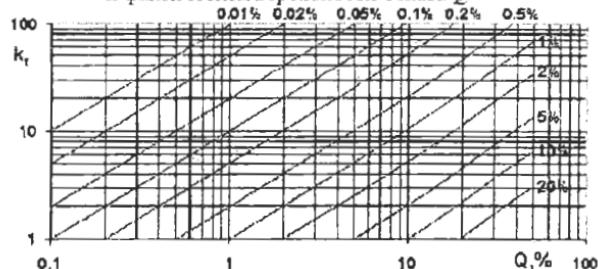
#### Литература:

1. Костюков В.Н. Мониторинг безопасности производства. — М.: Машиностроение, 2002. 224 с.

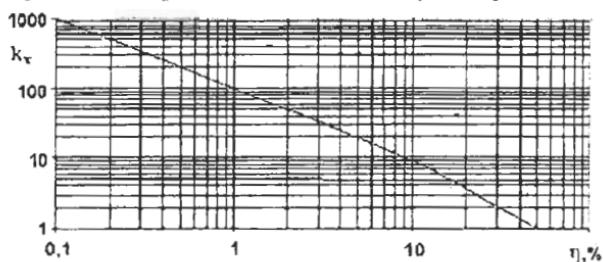
2. Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Костюков А.В. Автоматизированные системы управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (АСУ БЭР — КОМПАКС). М.: Машиностроение, 1999. 163 с.



а) допустимая ошибка  $\eta$  при требуемом риске  $r$  пропуска отказа и фактической вероятности отказа  $Q$



б) коэффициент увеличения наработки между внезапными отказами  $k_t$  при внедрении мониторинга и обеспечении требуемого риска отказа  $r$



в) коэффициент увеличения наработки между отказами  $k_t$  в зависимости от ошибки диагностирования  $\eta$

Рис. 1. Параметры системы мониторинга



Московский государственный технический  
университет им. Н.Э. Баумана

Кафедра «Поршневые двигатели»



Сборник научных трудов  
Международной конференции Двигатель-2010,  
посвященной  
180-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана

Московский государственный технический  
университет им. Н.Э. Баумана

Кафедра “Поршневые двигатели”

**Сборник научных трудов  
международной конференции  
Двигатель-2010,  
посвященной 180-летию  
МГТУ им. Н.Э. Баумана**

Под редакцией Н.А. Иващенко,  
В.А. Вагнера, Л.В. Грехова

Москва  
2010

УДК 621.43

ББК 31.365

**Сборник научных трудов  
международной конференции Двигатель-2010,  
посвященной 180-летию  
МГТУ им. Н.Э. Баумана**

**Сборник научных трудов международной конференции Двигатель-2010, посвященной 180-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана // Под редакцией Н.А. Иващенко, В.А. Вагнера, Л.В. Грехова – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 424 с.**

Сборник сформирован на базе докладов по проблемам двигателестроения Международной конференции Двигатель-2010, посвященной 180-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана, проводившейся 16 октября 2010 г. в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана. Статьи посвящены исследованиям в области теории двигателей, рабочих процессов, их конструированию, диагностики и эксплуатации, газовой динамики, наддуву, топливной аппаратуры и управления, проблемам применения альтернативных топливах. В сборник собрано 115 статей по актуальным темам двигателестроения.

Материалы сборника адресованы специалистам в области проектирования, исследования и эксплуатации поршневых и комбинированных двигателей, студентам и аспирантам.

ISBN 5-7038-1452-9  
2010

© МГТУ им. Н.Э. Баумана,

Принято к исполнению 26/10/2010  
Исполнено 26/10/2010

Заказ № 4652  
Тираж 170 экз.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Базанчук Г.А., Грехов Л.В., Іващенко Н.А.</b> Вклад ИМТУ-МВТУ в развитие технического образования в России.	9
<b>Полежай В. Г.</b> Научная публицистика В.И. Гриневецкого в годы первой мировой войны.	16
<b>I. КОНСТРУИРОВАНИЕ, ПРОЧНОСТЬ, ДИНАМИКА, ТРИБОЛОГИЯ</b>	
<b>Баранов А.В., Вагнер В.А., Тарасевич С.В., Маломыжев О.Л.</b> Диагностические характеристики акустического излучения при трении металлов	21
<b>Вальехо Мальдоноадо П.Р., Гришин Д.К.</b> Влияние двухстадийной топливоподачи в высокооборотном малоразмерном дизеле на теоретический износ шатунной шейки коленчатого вала	26
<b>Гармай А.С.</b> Разработка опытно-промышленного образца низкотемпературной солнечной энергоустановки для производства, прежде всего, электроэнергии с тепловым Солнечным коллектором и двигателем с внешним подводом теплоты, мощностью 5-10 кВтЭ и более.	30
<b>Гармай А.С., Гальченко В.П.</b> Модернизация двигателей внутреннего сгорания, газотурбинных двигателей с использованием плазмоэлектрохимической технологии для обеспечения работы на различных углерод-водородсодержащих топливах, включая местные топлива, природный газ и синтез-газ.	34
<b>Горшаков А.А., Кривцов А.В., Сайгаков Е.А., Сморкалов Д.В.</b> Исследование влияния величины относительного смещения на боковую силу и крутящий момент в дезаксиальных двигателях	38
<b>Горшаков А.А., Кривцов А.В., Сайгаков Е.А., Сморкалов Д.В.</b> Исследование влияния радиуса кривошипа к длине шатуна на боковую силу и крутящий момент	42
<b>Гон А.Н.</b> Выбор детерминированной модели усталостной долговечности при расчете деталей поршневых двигателей на переменные нагрузки	44
<b>Григорьев Е.А.</b> Обобщенный расчет уравновешенности двигателей	49
<b>Девянин С.Н., Савастенко Э.А., Камышников Р.О.</b> Влияние конструктивной схемы коленчатого вала на степень неравномерности крутящего момента двигателя спортивного мотоцикла	51
<b>Каукаров А.К., Некрасов В.Г., Мурзагалиев А.Ж., Куанышев М.К., Мухтаров А.Т., Каракаев А.К.</b> Кривошипно-кулисный кинематический механизм ДВС с цилиндро-поршневой группой на основе твердой смазки	55
<b>Костюков В.Н.</b> Мониторинг состояния оборудования в реальном времени	59
<b>Матвеенко В.В., Пылев В.А.</b> Разработка теоретических стационарных экономичных моделей эксплуатации автотракторных дизелей для системы прогнозирования ресурсной прочности поршней	64
<b>Москвичев Ю.П., Панин В.И., Агеев С.В., Чайнов Н.Д., Мягков Л.Л.</b> Новые конструкционные материалы – гранульные композиты и эффективность их применения в двигателестроении	67
<b>Мурзин В.С., Романов В.А., Сапожников С.Б., Хозенюк Н.А.</b> Расчетная оценка нагруженности картера дизельного двигателя промышленного трактора	71
<b>Науменко А.П.</b> О некоторых моделях структуры виброакустических сигналов поршневых машин	75
<b>Никишин В.Н., Никишин И.А.</b> Определение погрешностей измерения осе-	75