

УДК 681.518/54+665.625.12

**В.Н. Костюков, Ал.В. Костюков (НПЦ "ДИНАМИКА", Омск)**  
*E-mail: post@dynamics.ru*

## Мониторинг состояния оборудования в реальном времени

*Изложены основные положения мониторинга состояния оборудования в реальном времени и показаны его отличия от off- и on-line мониторинга. Приведены расчетные соотношения для определения показателей достоверности и быстродействия систем мониторинга. Показана необходимость использования скорости изменения диагностических признаков. Введены определения понятий мониторинга и опасности состояния оборудования, статической, динамической ошибок и нуль-мониторинга.*

*The features of Real-time condition monitoring of machinery and its differences from on-line and off-line condition monitoring are considered. Taking into account a human factor, the model of monitoring system was reviewed. This model shows that observability of equipment production complex (PC) in whole can be provided by measurement of diagnostic signals (vibroparameters) and rate of their change, which show accurate within scale, generalized units errors and rates of their growth, residual life and rate of its loss, and also safety of the whole complex. Monitoring allows to transfer failures of equipment and production complexes from the category "sudden" into the category "gradual"; Necessity of failures reduction by ten times and corresponding increase of equipment run-to-failure requires decrease of monitoring mistakes to minimum (zero).*

**Ключевые слова:** мониторинг состояния, опасность состояния оборудования, достоверность и быстродействие, нуль-мониторинг.

**Key words:** condition monitoring, risk condition of equipment, reliability and performance, zero-monitoring.

Мониторинг технического состояния агрегата – наблюдение за процессом изменения его работоспособности в целях 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. Они заключаются в строгом регламентировании интервала мониторинга (см. таблицу) на уровне 10...20 % интервала самого быстрого развития неисправностей в оборудовании производственных комплексов (ПК). Это возможно на базе автоматических систем с функционально неопределенной структурой, которая не зависит от конструкции оборудования для широкого класса агрегатов ПК и содержит многоуровневую экспертную систему. Это позволяет внедрять системы диагностики и мониторинга реально времени (СДМ) в условиях априорной неопределенности, когда часто неизвестны типы подшипни-

ков, число лопаток импеллера и т.д., и минимизировать статическую, динамическую ошибки и риск пропуска отказа оборудования.

Real time мониторинг в общем случае возможен при наличии:

- 1) автоматической измерительной системы с малым временем измерения, существенно меньшим интервала развития неисправности;
- 2) автоматической экспертной системы, осуществляющей анализ и интерпретацию измеренных данных в терминах технического состояния оборудования, его узлов и деталей, документирование и представление диагностического предписания персоналу, непосредственно управляющему оборудованием в течение ограниченного времени;
- 3) автоматической диагностической сети, осуществляющей беспрепятственную доставку предписания и результатов мониторинга действий персонала с оборудованием руководству всех уровней предприятия в реальном времени;
- 4) короткого суммарного временного интервала выполнения всех этапов – для нефтехимических

## Характеристики видов мониторинга

№ п/п	Функция	МОНИТОРИНГ		
		on-line	real time	off-line
1	Подготовка объекта и аппаратуры	Измерения с минимальным интервалом		
2	Измерение информативных параметров и сигнализация		Выполнение всех процедур 1–7 с регламентированным общим интервалом, не превышающим 10–20 % самого короткого интервала развития неисправностей.	Выполнение процедур 1–4 по мере необходимости. Интервал времени не регламентирован. Процедуры 1–4 плохо наблюдаемы!
3	Постановка и документирование диагноза			
4	Оформление диагностического предписания			
5	Доставка персоналу предписания для выполнения корректирующих мероприятий	Интервал времени для процедур 3–7 не регламентирован. Процедуры 3–7 не наблюдаются!		
6	Осуществление корректирующих мероприятий по восстановлению работоспособности объекта		Необходимость автоматизации всех процедур 1–7 для обеспечения минимальной статической $s$ , динамической $d$ ошибок и риска пропуска отказа оборудования: $r = s + d$	Интервал времени для процедур 5–7 не регламентирован. Процедуры 5–7 не наблюдаются!
7	Контроль руководством действий персонала и их коррекция при необходимости			

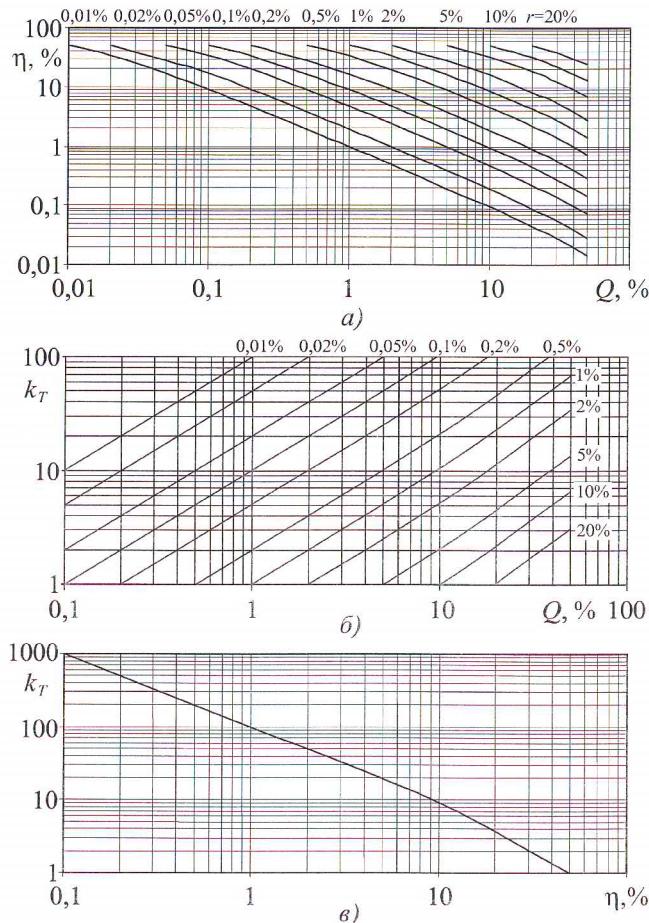
комплексов не более 5...10 мин и исключения субъективного человеческого фактора.

Сформулирован принцип информационной полноты ( $\pi$ -принцип) при выборе диагностических признаков состояния в условиях априорной неопределенности, согласно которому признаки должны составлять полную группу в статистическом смысле, включая как известные признаки, так и дополняющие их до полной группы в избранном базисе сигналов. Это позволяет значительно уменьшить вероятность пропуска дефектов, диагностические признаки которых в данном базисе априорно неизвестны. Наиболее общим и широкополосным базисом сигналов является вибрация, поэтому выводы, полученные для него, будут справедливы и для других базисов сигналов (тока, температуры и т.д.). Применение стационарных систем диагностики и мониторинга позволяет перевести отказы технологических систем из категории внезапных в категорию постепенных, т.е. наблюдаемых. Поскольку любые системы распознавания обладают ненулевой ошибкой  $\eta$ , то возникает задача оценки

требуемой ошибки систем диагностики и мониторинга  $\eta$ , если для технологической системы, имеющей в сложившихся условиях эксплуатации вероятность внезапных отказов  $Q$  и наработку на отказ  $T_Q$ , требуется обеспечить наработку не менее  $T_r$  и риск пропуска отказа не более  $r$ . Получим уравнение связи между наработками на отказ при существующей  $Q$  и требуемой  $r$  вероятностях отказа и числом отказов  $n$ , которое помогает предотвратить СДМ:

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

Номограмма для определения допускаемой ошибки системы диагностики и мониторинга приведена на рис. 1, а. Например, для типичных значений за сутки  $Q = 20\%$ ;  $r = 1\%$  ошибка системы диагностики  $\eta$  не должна превышать 4 %. Номограмма для определения коэффициента увеличения временного интервала  $k_T = T_r / T_Q$  между внезапными необнаруженными отказами агрегатов при вне-



**Рис. 1. Параметры системы мониторинга:**

*а* – допустимая ошибка  $\eta$  при требуемом риске  $r$  и фактической вероятности отказа НХК  $Q$ ; *б* – коэффициент увеличения наработки между внезапными отказами  $k_T$  при внедрении мониторинга и обеспечении требуемого риска отказа НХК  $r$ ; *в* – коэффициент увеличения наработки между отказами  $k_T$  в зависимости от ошибки диагностирования  $\eta$

дрении СДМ приведена на рис. 1, б. Для того же примера интервал между производственными неполадками и аварийными ситуациями возрастает в 24 раза, что объясняет существенный технико-экономический выигрыш от внедрения систем мониторинга. Для оценки экономической эффективности внедрения СДМ представляет практический интерес зависимость коэффициента увеличения времени между отказами  $k_T$  от ошибки распознавания опасных состояний *нефтхимического комплекса* (НХК) системой мониторинга  $\eta$  (рис. 1, в):

$$k_T = 1/\eta - 1.$$

Применение СДМ создает временную избыточность для действий персонала в условиях надвигающегося отказа, что существенно повышает безопасность работы НХК. Например, для типичных значений  $Q = 20\%$ ;  $r = 1\%$  допустимая ошибка системы диагностики  $\eta \leq 4\%$ , при этом интервал между производственными неполадками и аварийными ситуациями возрастает в 24 раза, что объясняет существенный технико-экономический выигрыш от внедрения систем мониторинга [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  $\{Z\}$ :  $r = \min Q\{Z_i\}$ .

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 представим в следующем виде:

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

где  $S_0 = S(n_0, p_0)$  – составляющая, которая характеризует механизм с минимальными, близкими к нулю, обобщенными технологическими и эксплуатационными погрешностями, который работает в диапазоне номинальных скоростных  $n_0$  и нагрузочных  $p_0$  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;  $\partial S / \partial q_j$  – чувствительность обобщенной погрешности  $S$  к  $j$ -й погрешности механизма по соответствующей обобщенной координате  $q_j$ . Здесь и далее для упрощения записи аргумент  $t$  приводится для указания на существенную в данной задаче зависимость параметра от времени на рассматриваемом интервале.

Обобщенную математическую модель системы мониторинга на основе уравнений переменных состояния представим в следующем виде:

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

где  $\{S(t)\}$  – вектор функций старения агрегата размерности  $m$ , каждая составляющая которого характеризует его обобщенный (совокупный) структур-

ный параметр, подлежащий оценке и характеризующий остаточный парциальный ресурс агрегата по этому обобщенному параметру, носит во времени многомодальный характер в силу суммирования частных погрешностей (1);  $\{\dot{S}(t)\}$  – вектор скорости старения (износа, снижения безаварийности, безопасности, остаточного ресурса), также имеющий многомодальный характер;  $\{U\}$  – вектор переменных управления размерности  $(p+k)$ , включающий в себя переменные задания режима работы агрегата  $\{U_p(t)\}$  и факторы воздействия персонала при регулировке и обслуживании объекта  $\{U_k(t)\}$ ;  $\{Y(t)\}$  – вектор диагностических сигналов размерности  $n \geq m$ , измеряемых системой мониторинга.

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.

Элементы матрицы  $[A]$  – случайные процессы, значения которых в каждый момент времени вычисляют по выражению (11). Элементы матриц  $[B]$ ,  $[C]$ ,  $[D]$  являются коэффициентами соответствующих уравнений регрессии. 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; предельное состояние агрегата  $\{S_{\text{НДП}}\}$  (НДП – недопустимо) и опасная скорость его деградации  $\{\dot{S}_{\text{НДП}}\}$  с точностью до масшта-

ба совпадают с критическими значениями диагностических признаков и скоростей их изменения; приращение диагностических сигналов (вибропараметров) пропорционально приращению износа, утрате безопасности и уменьшению остаточного ресурса агрегата и ПК в целом:

$$\begin{aligned}\{\Delta Y\} &= [C]\{\Delta S\}, \{\dot{Y}(t)\} = [C]\{\dot{S}(t)\}, \\ \{Y_{\text{НДП}}\} &= [C]\{S_{\text{НДП}}\}, \{\dot{Y}_{\text{НДП}}\} = [C]\{\dot{S}_{\text{НДП}}\}.\end{aligned}\quad (3)$$

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. Скорость изменения диагностических признаков – вибропараметров однозначно определяется взвешенной суммой скоростей изменения соответствующих погрешностей агрегата. Приращение вектора вибропараметров  $\{\Delta Y_n\}$  прямо пропорционально приращению вектора старения объекта (обобщенных погрешностей – структурных параметров)  $\{\Delta S_m\}$  и приращению исходных диагностируемых погрешностей механизмов агрегата  $\{\Delta X_k\}$ .

Основной задачей синтеза СДМ является синтез ортогональных диагностических признаков  $\{Y_i\}$ , отражающих соответствующим образом сформированные ортогональные классы неисправностей  $\{S_i\}$ . Это соответствует приведению матрицы наблюдения  $[C]$  к диагональной квадратной матрице, устанавливающей взаимно-однозначное (регрессионное) отношение между диагностическим признаком и соответствующей обобщенной погрешностью. И проблема мониторинга состояния заключается в формировании правильной интерпретации этой обобщенной погрешности с учетом частоты появления классов неисправностей. Например, рост виброскорости корпуса центробежного насоса ПК, перекачивающего бензин, соответствует росту обобщенной погрешности "нарушение центровки – дисбаланс". При этом в 85 % случаев наблюдается нарушение центровки и лишь в 10...15 % – дисбаланс. Остальные 5 % роста виброскорости приходятся на другие причины. Наличие такой интерпретации "причина–следствие" (погрешности–вибрация) эквивалентно приведению матрицы наблюдения к диагональной квадратной форме и соответствует мониторингу состояния. Отсутствие такой интерпретации соответствует монито-

рингу 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 диагностических признаков (вибропараметров) служат мерой таких неисправностей согласно (3).

Представляется целесообразным определить:

- 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 [1, 4, 5];
- степень опасности 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 диагностируемых параметров всех агрегатов ПК;
- степень опасности 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 диагностических признаков согласно обобщенной математической модели (2), (3). Техническое состояние агрегата и ПК в целом определяется максимальной парциальной составляющей вектора диагностических признаков  $Y_{\max}(t)$ , наблюдаемой СДМ среди узлов агрегата и ПК в целом соответственно.

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

$$F = \frac{1}{T} = \max \left( B \frac{\dot{S}_{\text{НДП}}}{S_{\text{НДП}}} \right) = \max \left( B \frac{\dot{Y}_{\text{НДП}}}{Y_{\text{НДП}}} \right). \quad (4)$$

Параметр  $B$  в (4) характеризует качество алгоритма оценки скорости роста измеряемых диагно-

стических признаков. 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 диагностическими признаками, структурными параметрами и остаточным ресурсом:

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

Уравнения (5) полностью определяют динамику состояния агрегатов НХК через динамику диагностических признаков вибрации, температуры и других диагностических признаков и скоростей их изменения (рис. 2). Предложенные модели позволяют учесть различные факторы, влияющие на вибронагруженность агрегата, его работоспособность и остаточный ресурс. Человеческий фактор проявляется в нарушениях режима работы агрегата (гидроудар, кавитация, перекосы и т.д.) и правил его эксплуатации (заливка грязного масла, отсутствие охлаждающей воды и т.д.), что вызывает быстрые тренды и резкие скачки вибрации, температуры, тока и сопровождается быстрой утратой работоспособности агрегатом. Обобщенная динамическая модель технического состояния в практически важном случае квадратной матрицы преобразования погрешностей диагонального вида определяется уравнением

$$\Delta S_i = \frac{\partial S_i}{\partial q_i} \Delta X_i(t), \quad \dot{S}_i = \frac{\partial S_i}{\partial q_i} \dot{X}_i(t). \quad (6)$$

В практических случаях ортогональных диагностических признаков обобщенная динамическая модель вибросигнала имеет вид

$$\Delta Y_i = C_{ii} \Delta S_i(t), \quad \dot{Y}_i = C_{ii} \dot{S}_i(t), \quad (7)$$

а при квадратной диагональной матрице преобразования погрешностей

$$\Delta Y_i = C_{ii} \frac{\partial S_i}{\partial q_i} \Delta X_i, \quad \dot{Y}_i = C_{ii} \frac{\partial S_i}{\partial q_i} \dot{X}_i. \quad (8)$$

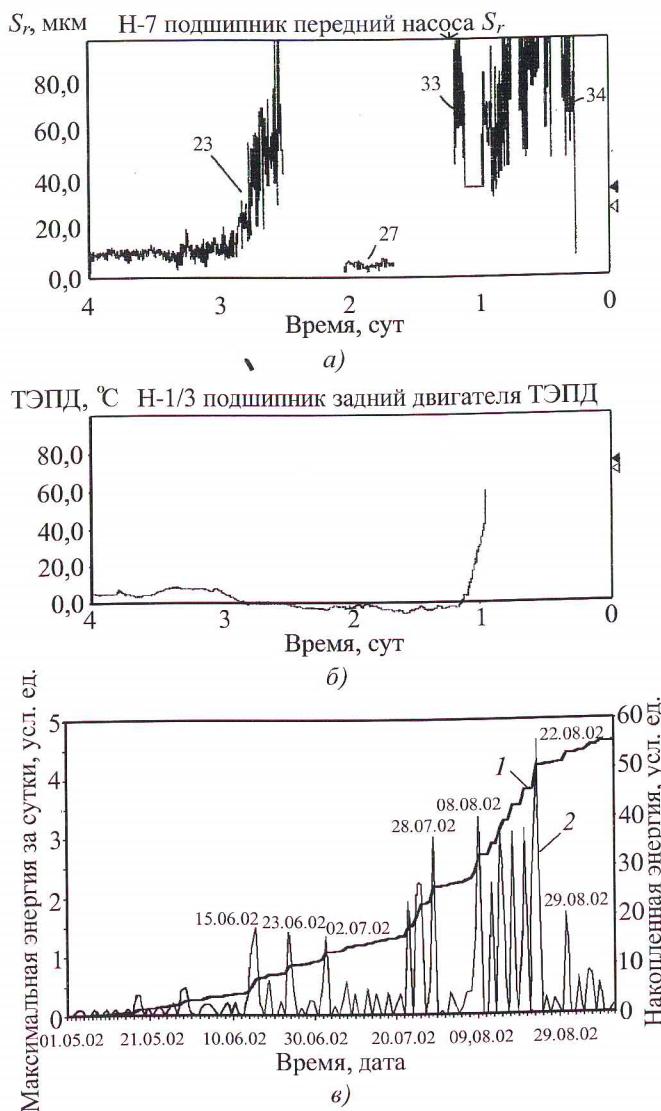


Рис. 2. Экспоненциальные тренды диагностических признаков:

*a* – виброперемещения при ослаблении крепления насоса НК210 ( $S_r$  – перемещения в радиальном направлении; 23, 27, 33 и 34 – участки тренда); *б* – значения температуры подшипника скольжения электродвигателя ВАО500Л-2; *в* – значения энергии акусто-эмиссионных импульсов при разрушении реактора (1 – накопленная энергия; 2 – максимальная энергия за сутки)

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

$$q_0 = \prod_{i=1}^n q_i = q^n \text{ при } q_1 = q_2 = \dots = q_n = q, \quad (9)$$

где  $q_i$  – ошибка диагностики по  $i$ -му диагностическому признаку;  $n$  – число диагностических признаков.

Разработана методика динамической диагностики и прогнозирования опасной деградации состояния агрегатов НХК по фазовой траектории жизни, которая позволяет полностью использовать ресурс оборудования при сохранении его безопасности и ремонтопригодности.

Из (5) для скалярного случая получим оценку параметра скорости роста  $a(t)$  и интервала прогноза  $T(t)$ :

$$a(t) = \frac{1}{(1-n)\tau} \left[ -\frac{\Delta_n^1 Y(t)}{Y(t)} \frac{(n-1)\tau}{(n-1)\tau} \right] = \frac{v_Y(t)}{Y(t)}, \quad (10)$$

$$T(t) = \frac{Y(t)}{v_Y(t)} \ln \frac{Y_{\text{НДП}}}{Y(t)},$$

где  $\tau$  – интервал запаздывания (интервал отсчета тренда);  $Y_{\text{НДП}}$  – критическое значение параметра, соответствующего достижению агрегатом предельного состояния "Недопустимо";  $\Delta_n^1 Y(t) = Y(t) - Y(t - nt)$  – конечная разность 1-го порядка  $n$ -го запаздывания – приращение параметра  $Y$  при запаздывании  $nt$ ;  $v_Y$  – скорость роста вибропараметра.

На рис. 3, *a* представлены тренды виброускорения  $A$  и его скорости  $v_A$  при разрушении подшипника центробежного насоса. Пунктиром по оси абсцисс отмечены точки: первого достижения порога зоны "требует принятия мер" (ТПМ) по скорости роста  $v_A - A$ , второго достижения –  $B$ , третьего предупреждения о высокой скорости роста –  $T(A$  в зоне ТПМ),  $N$  – значение  $A$  достигло зоны НДП.

Первое предупреждение о высокой скорости развития неисправности поступило в 11:52, т.е. за 2 ч 8 мин до достижения значения  $A$  зоны НДП, когда виброускорение было еще в состоянии "Удовлетворительно". Второе предупреждение поступило в 12:30, через 38 мин, когда скорость роста  $v_A$  опять достигла порога ТПМ. Затем в 13:07, когда скорость роста превысила порог НДП, что практически совпало с превышением значения  $A$  предупредительного порога ТПМ. Критическое значение  $A_{\text{НДП}}$  было достигнуто только через 57 мин. Таким образом, введение параметра скорости роста виброускорения  $v_A$  позволило предупредить персонал об опасной тенденции за 1 ч 15 мин до перехода  $A$  в состояние ТПМ и за 2 ч 8 мин достижения им критическо-

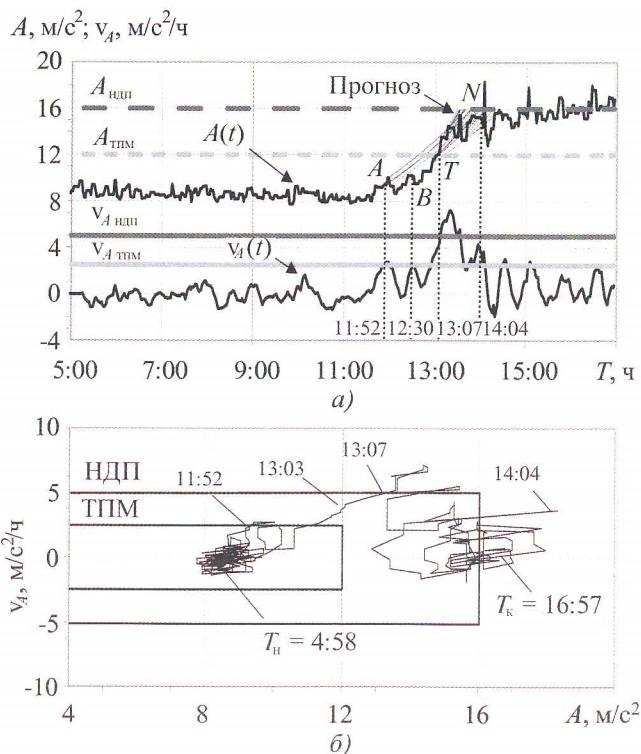


Рис. 3. Диагностика и прогнозирование состояния насосного агрегата:

*а* – прогноз разрушения подшипника по трендам виброускорения  $A(t)$  и скорости его роста  $v_A(t)$ ; *б* – диагностика на фазовой плоскости  $A-v_A$  ( $T_n$  и  $T_k$  – соответственно момент времени начала и конца тренда)

го значения  $A_{\text{НДП}}$ . Тонкими линиями показана аппроксимация тренда виброускорения с различных начальных точек на интервале времени, когда значение  $v_A$  превысило предупредительный порог до момента достижения виброускорением порога  $A_{\text{НДП}}$ . Данные линии прогноза определены с помощью выражения (10) и показывают разброс интервалов прогноза в зависимости от начальной точки прогноза и значения скорости тренда.

На приведенных графиках отсчеты трендов берутся через интервал  $\tau = 1,5$  мин. При  $n = 10$  интервал наблюдения составляет 13,5 мин, а максимальный интервал прогноза  $T_n = 128$  мин, что в  $128/13,5 = 9,48$  раз больше. Такая глубина прогноза стала возможной благодаря эффективной математической модели.

На рис. 3, *б* показана правая полуплоскость фазовой плоскости в координатах  $A - v_A$ , по которой движется точка с координатами  $[A(t); v_A(t)]$  при деградации состояния агрегата, имеющего тренды

(рис. 2, *а*). Там же указаны границы зон, разделяющие состояния "Удовлетворительно", "Требует принятия мер" и "Недопустимо" по значениям виброускорения и скорости роста в соответствии с изложенной методикой [3, 4]. Движение точки напоминает броуновское, особенно в начале траектории, когда состояние агрегата было удовлетворительное и "блуждания" точки были сосредоточены в достаточно узкой зоне. При активизации процесса разрушения подшипника фазовая траектория точки покидает допустимую область, ограниченную уровнями  $A_{\text{TPI}} - v_A_{\text{TPI}}$ , и уходит в зону состояний НДП, в которой ее координаты превышают граничные значения  $A_{\text{НДП}} - v_A_{\text{НДП}}$ . Дальнейший размах ее "блужданий" значительно возрастает – агрегат "пошел вразнос".

Непрерывное измерение в реальном времени нового независимого диагностического признака – скорости роста тренда – почти в 2,5 раза увеличило интервал времени, в течение которого персонал ПК может предотвратить аварию, производственную неполадку и перевести объект в безопасное состояние без нарушения нормального функционирования технологического процесса. Максимальный интервал прогноза почти в 10 раз превышает интервал наблюдения при ошибках прогноза менее 15 %. Такая глубина прогноза стала возможной благодаря эффективной математической модели. Полученные научные результаты лежат в основе методик диагностирования, новизна которых подтверждена 8 патентами и авторскими свидетельствами на изобретения. Методики применяются в качестве алгоритмов в программном обеспечении автоматических адаптивных СДМ. Практическая реализация изложенных теоретических подходов в системах комплексного мониторинга КОМПАКС®, использующих различные методы диагностирования – вибраакустические, акусто-эмиссионные, тепловые, электрические и др., обеспечила их широкую инсталляцию – более 400 за последние 15 лет, часто почти под открытым небом, на предприятиях крупнейших нефтегазовых компаний, а также за рубежом, на отечественном и импортном оборудовании более 1000 типов, в различных географических и климатических зонах.

## Выводы

- Предложено в качестве переменных состояния агрегата использовать детерминированные парциальные функции старения и их скорости, оп-

ределяемые 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, наблюдаемых системой диагностики и мониторинга (СДМ) среди агрегатов, составляющих комплекс.

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

4. Получены аналитические оценки и построены номограммы 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 процентов и менее (нуль-мониторинг).

9. Для снижения статической ошибки и сокращения сроков внедрения систем РВ-мониторинга до нескольких месяцев нужны безэталонные методы диагностики и стандартные процедуры формирования диагностических признаков, инвариантных к типу оборудования.

10. Снижение динамической ошибки мониторинга требует существенного превышения темпов мониторинга, т.е. не только измерений, но и постановки диагноза и его исполнения, над темпами развития неисправностей в производственных комплексах. Это исключает использование ручного труда посредством автоматизации всех процедур мониторинга от измерения параметров и автоматизации диагностического вывода о состоянии оборудования до его беспрепятственной и своевременной доставки и представления на всех уровнях управления производственным комплексом.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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.

3. Руководящий документ. Центробежные электроприводные насосные и компрессорные агрегаты, оснащенные системами компьютерного мониторинга для предупреждения аварий и контроля технического состояния КОМПАКС: Эксплуатационные нормы вибрации / НПЦ "Динамика"; утв. Госгортехнадзором РФ, Минтопэнерго РФ 22.09. М., 1994. 7 с.

4. СА 003-001-05. Центробежные насосные и компрессорные агрегаты опасных производств. Эксплуатационные нормы вибрации: Стандарт ассоциации "Ростехэкспертиза", Ассоциации нефтепереработчиков и нефтехимиков, НПС "Риском". Сер. 03; согласован Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору РФ. М.: Компрессорная и химическая техника, 2005. 27 с.

5. СА 003-001-05. Системы мониторинга агрегатов опасных производственных объектов. Общие технические требования: Стандарт ассоциации "Ростехэкспертиза", Ассоциации нефтепереработчиков и нефтехимиков, НПС "Риском". Сер. 03; согласован Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору РФ. М.: Компрессорная и химическая техника, 2005. 43 с.

# Контроль. Диагностика

TESTING. DIAGNOSTICS



3<sub>(141)</sub> 2010  
март

## ООО «НПК «ЛУЧ»

Россия, 143930, Московская область,  
г. Балашиха, мкр. Салтыковка, ш. Ильича, д. 1  
Тел./факс: (495) 22-99-600 (многоканальный)  
Тел.: (495) 961-0903  
E-mail: luch@luch.ru <http://www.luch.ru>  
Интернет-магазин: <http://www.td-luch.ru>



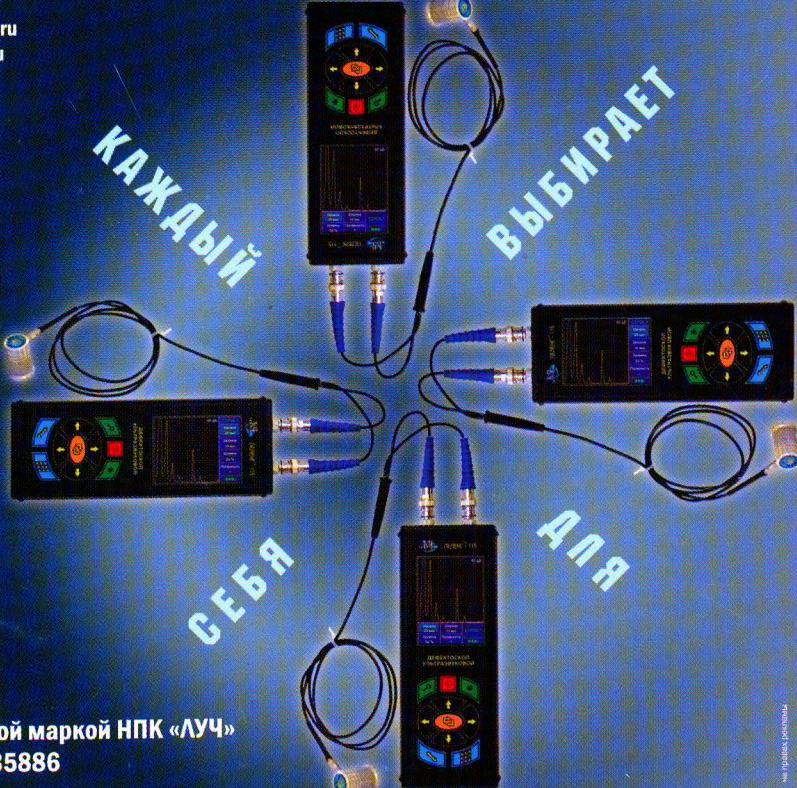
## ДЕФЕКТОСКОП УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПЕЛЕНГ™ - 115

99 999 руб.

СУПЕР ЦЕНА!



для левшей и правшей



ПЕЛЕНГ™ является зарегистрированной торговой маркой НПК «ЛУЧ»  
Поворот изображения защищен патентом РФ №35886

# Контроль. Диагностика

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ

Главный редактор  
В.В. Клюев – проф., акад. РАН

Заместители главного редактора:  
В.Г. Шевалдыкин – д-р техн. наук  
П.Е. Клейзер

Редакционный совет:

Б.В. Артемьев	В.И. Матвеев
В.Т. Бобров	Г.А. Нуждин
О.Н. Будадин	К.В. Подмастерьев
В.П. Вавилов	А.В. Полупан
В.А. Голенков	Ю.С. Степанов
Э.С. Горкунов	Л.Н. Степанова
И.Н. Жесткова	В.В. Сухоруков
Г.В. Зусман	В.М. Труханов
В.В. Коннов	Ю.К. Федосенко
Н.Н. Коновалов	М.В. Филинов
Н.В. Коршакова	В.Е. Шатерников
В.Н. Костюков	Г.С. Шелихов
Н.Р. Кузелев	

Ответственные за подготовку  
и выпуск номера:

П.Е. Клейзер  
Д.А. Елисеев  
С.В. Сидоренко  
А.Г. Ганженко

Журнал входит в перечень изданий,  
утвержденных ВАК РФ для публикации  
трудов соискателей ученых степеней.  
При перепечатке материалов ссылка на  
журнал "Контроль. Диагностика"  
обязательна.

За содержание рекламных материалов  
ответственность несет рекламирующий.

Журнал зарегистрирован в Федеральной  
службе по надзору в сфере массовых  
коммуникаций, связи и охраны культурного  
наследия Российской Федерации.  
Свидетельство о регистрации  
ПИ № ФС77-32268

Журнал распространяется по подписке,  
которую можно оформить в издастельстве  
или в любом почтовом отделении.  
Индексы по каталогам агентств:

"Роспечать" – 47649;  
"Пресса России" – 29075;  
"Почта России" – 60260.

Тел.: (499) 268 36 54; 268 69 19;  
(495) 514 76 50  
Факс: (499) 269 48 97; 268 85 26  
[Http://www.mashin.ru](http://www.mashin.ru); [www.td-j.ru](http://www.td-j.ru)  
E-mail: [td@mashin.ru](mailto:td@mashin.ru), [kpost@rambler.ru](mailto:kpost@rambler.ru)



Издательство  
МАШИНОСТРОЕНИЕ



2010

3 (141) март



ЖУРНАЛ РОССИЙСКОГО ОБЩЕСТВА ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ  
И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

## СОДЕРЖАНИЕ

### ● Контроль, диагностика за рубежом

Ланге Ю.В. По страницам иностранных журналов . . . . . 5

### ● Теория, методы, приборы, технологии

Базулин А.Е. Система калибровки ультразвуковых  
пьезоэлектрических преобразователей "АВГУР 5.4".

Часть II. Погрешности измерения основных параметров . . . . . 8

Воронкова Л.В., Носов В.А. Ультразвуковая дефектоскопия  
сварных соединений чугунных труб – реальная возможность . . . . . 20

Петерсен Т.Б., Шемякин В.В. Акустическая эмиссия при соударении  
твердых тел. Часть 2 . . . . . 23

Тэтэр В.Ю., Щедрин В.И., Сидоров Е.Н., Буяльский К.Л.,  
Тэтэр А.Ю. Фактор Куртозиса как диагностический признак  
неисправностей подшипника. . . . . 28

Соловей В.О., Кузьбожев А.С., Шкулов С.А.

Методы моделирования коррозионного растрескивания  
под напряжением с контролем роста трещин на образцах . . . . . 35

Баурова Н.И. Влияние наноструктурных дефектов углеродных  
волокон на точность диагностирования . . . . . 40

Костюков В.Н., Костюков А.В. Мониторинг состояния  
оборудования в реальном времени . . . . . 43

Зацепин Н.Н. Магнитные поля внутренних и поверхностных  
дефектов в сварном валике ферромагнитного соединения.  
Часть 1 . . . . . 51

Ибрагимов З.С. О возможности идентификации горящих  
углеводородов по эмиссионному спектру огня в УФ-диапазоне  
с нейтрализацией влияния аэрозоля атмосферы. . . . . 59

Пономарев А.А., Слободян С.М. Система автоматического  
контроля лазерной плазмы при воздействии на материалы . . . . . 62

Клюев С.В., Шкатов П.Н. Теоретическое исследование  
электромагнитных процессов при комбинированной  
вихревокомагнитной дефектоскопии . . . . . 64