

В помощь производству**РИСКИ МОНИТОРИНГА ОБОРУДОВАНИЯ
ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

**Д.т.н. В.Н. Костюков, к.т.н. С.Н. Бойченко, д.т.н. А.П. Науменко,
к.э.н. Ан.В. Костюков, к.т.н. Ал.В. Костюков
(Научно-производственный центр «Динамика», г. Омск)**

Системы диагностики и комплексного мониторинга технического состояния (СДМ) оборудования объектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК) являются неотъемлемой составляющей системы обеспечения и управления надежностью сложных технологических комплексов, обеспечивающей безопасную ресурсосберегающую эксплуатацию.

В настоящее время объекты ТЭК различают по степени влияния на безопасность, экономику и экологию страны: объекты технического регулирования (ОТР), опасные производственные объекты (ОПО), критически важные объекты (КВО), стратегически важные объекты (СВО) [1, 2]. Понятно, что для мониторинга технического состояния этих объектов должны использоваться системы различных классов. Принципы построения систем мониторинга изложены в [3, 4] и отражены в стандартах [10–16]. Системы мониторинга должны обеспечивать получение информации о состоянии оборудования (объекта мониторинга) в необходимом количестве и качестве для обеспечения *наблюдения* за его техническим состоянием. По результатам наблюдения СДМ должны *заблаговременно* вырабатывать *управляющие* воздействия, которые обеспечивают необходимый запас *устойчивости* технологической системы, качество ее функционирования, создают необходимый запас ее *техногенной, экологической и экономической безопасности* [17]. Такие системы составляют основу автоматизированных систем управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования в реальном времени в рамках всего предприятия (АСУБЭР) [3].

Для реализации автоматизированных систем управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования необходимо построение СДМ с использованием ряда принципов и следующих наиболее важных свойств и характеристик [11, 13]:

1. Количество и вид используемых методов неразрушающего контроля (МНК).
2. Тип экспертной системы.
3. Объем выявляемых неисправностей.
4. Ошибка статического распознавания состояния оборудования.
5. Ошибка динамического распознавания состояния оборудования.
6. Риск пропуска внезапного отказа.
7. Число измерительных каналов системы.
8. Способ опроса датчиков.

9. Архитектура системы.
10. Тип используемого анализатора сигналов.
11. Тип индикатора состояния.
12. Наличие и уровень диагностической сети.
13. Тип управления.

Эти факторы положены в основу классификации систем, предлагаемых производителями для внедрения на критических объектах, для определения классов оборудования, на которых они могут быть полезны. Совокупность этих взаимосвязанных факторов определяет суть каждой конкретной системы и не допускает произвольных вариаций. Внутри каждого фактора выделяются несколько уровней, оцениваемых в баллах от 2 до 4 (табл. 1).

По количеству и виду используемых МНК различают комплексные системы, использующие набор различных МНК – $R_1 = 1$, и специализированные системы, использующие один из МНК – $R_1 = 2$.

По типу экспертной системы различают: системы поддержки принятия решений (ЭСППР) – $R_2 = 1$; диагностические системы (ЭСД) – $R_2 = 2$, системы индикации состояния (СИС) – $R_2 = 3$. Системы индикации состояния осуществляют только определение технического состояния объекта, без указаний на вид неисправности. Диагностические системы, наряду с определением технического состояния, должны определять одну или несколько причин (вид) неисправного состояния объекта. Экспертные системы поддержки принятия решений включают свойства диагностических систем и должны автоматически выдавать целеуказующие предписания персоналу для предотвращения опасного состояния объекта и приведения его в нормальное состояние.

По объему выявляемых неисправностей различают: системы широкого класса [5], выявляющие неисправности различных узлов агрегата и неисправности в его работе по технологической схеме установки – $R_3 = 1$; системы узкого класса, выявляющие неисправности только одного узла агрегата – $R_3 = 2$, например подшипника.

Статическая ошибка распознавания есть пропуск своевременного распознавания опасного состояния оборудования, вызванный тем, что неисправное состояние оборудования система воспринимает (диагностирует) как исправное. По вероятности ошибки статического распознавания различают: системы низкой ошибки (< 5 %) – $R_4 = 1$, системы средней ошибки (5–30 %) – $R_4 = 2$ и системы высокой ошибки (> 30 %) – $R_4 = 3$.

Классификация по динамической ошибке распознавания (R_5) аналогична классификации по статической ошибке, но здесь под ошибкой понимают пропуск своевременного распознавания опасного состояния оборудования, вызванный тем, что период мониторинга (диагностирования) соизмерим с интервалом развития неисправности от момента ее обнаружения до предельного состояния оборудования. Период мониторинга может достигать нескольких секунд у стационарных систем и нескольких дней и даже лет у переносных систем. Следует отметить, что быстродействие систем мониторинга должно быть существенно выше скорости развития дефектов защищаемого оборудования. Для оценки общей ошибки систем мониторинга вводится

понятие риска пропуска опасного состояния оборудования – совокупность статической и динамической ошибок и ошибки из-за влияния человеческого фактора, обусловленного несвоевременным выполнением персоналом предписаний системы мониторинга по устранению обнаруженного системой опасного состояния оборудования. По величине риска также различают: системы низкой ошибки ($< 5\%$) – $R_6 = 1$, системы средней ошибки ($5\text{--}30\%$) – $R_6 = 2$, системы высокой ошибки ($> 30\%$) – $R_6 = 3$. Важными факторами классификации являются параметры архитектуры систем. Здесь устанавливается разделение по числу измерительных каналов системы [многоканальные ($R_7 = 1$), одноканальные ($R_7 = 2$)], по способу опроса датчиков [универсальные параллельно-последовательные ($R_8 = 1$), параллельные ($R_8 = 2$), последовательные ($R_8 = 3$)], по архитектуре [распределенные ($R_9 = 1$), сосредоточенные ($R_9 = 2$)]. Последовательные системы осуществляют поочередное измерение сигналов и их обработку. Последовательные измерения могут проводиться как автоматически, так и человеком-оператором (переносные системы). Параллельные системы осуществляют одновременное измерение сигналов и их последующую обработку. Универсальные (параллельно-последовательные) системы имеют смешанную структуру: устанавливаются группы каналов, внутри группы каналы измеряются последовательно и затем осуществляется параллельная обработка выходных сигналов групп и/или наоборот. Вся аппаратура сосредоточенной системы (за исключением датчиков) размещается в одном месте. Аппаратура распределенной системы может размещаться непосредственно в близости или на объекте мониторинга.

По типу используемого анализатора сигналов различают векторные ($R_{10} = 1$) и скалярные ($R_{10} = 2$) системы. В скалярных системах результатом работы анализатора сигналов являются скалярные числа (общий уровень вибрации, температура и т.д.). Векторные системы в результате обработки информации наряду со скалярными значениями должны выдавать одномерные и многомерные массивы, производить спектральную, корреляционную и другую математическую обработку.

По типу индикатора состояния объекта мониторинга различают комплексные ($R_{11} = 1$), многоуровневые ($R_{11} = 2$) и простые ($R_{11} = 3$) системы. Простые индикаторы состояния имеют только функцию отображения состояния объекта. Многоуровневые индикаторы состояния наряду с отображением состояния объекта должны иметь функции отображения состояний и параметров различных его составных частей. Комплексные индикаторы состояния включают в себя функции многоуровневых индикаторов и должны отображать даты пуска/останова систем и агрегатов, их наработку, прогноз остаточного ресурса, а также выводят информацию по следующим каналам: звуковой вывод, печать протоколов, передача данных по сети (публикация на Web-сервере).

По наличию и уровню диагностической сети различают следующие группы систем: автоматическая диагностическая сеть ($R_{12} = 1$); ручная диагностическая сеть, интегрированная с переносными системами ($R_{12} = 2$); ручная диагностическая сеть ($R_{12} = 3$); отсутствие диагностической сети ($R_{12} = 4$). Автоматическая диагностическая сеть должна обеспечивать автоматическое представление на компьютерах удаленных пользователей полной информации о состоянии обо-

рудования при одном обращении к сети, полученной как автоматическими стационарными системами, так и переносными (персональными) системами.

По типу управления системы разделяются на автоматические ($R_{13} = 1$), автоматизированные ($R_{13} = 2$) и ручные ($R_{13} = 3$). Ручные системы выполняют большинство функций мониторинга под управлением человека-оператора. Автоматизированные системы должны выполнять основные функции мониторинга автоматически, а вспомогательные – под управлением человека-оператора. Автоматические системы мониторинга должны выполнять все функции мониторинга автоматически. Человек в автоматических системах может использоваться как звено управления для выдачи управляющих воздействий на объект.

Класс системы определяют по выражению:

$$K = \text{int}[1 + \log_A(\prod R_i)], \quad (1)$$

где K – комплексный показатель, определяющий класс системы; $\prod R_i$ – произведение баллов, соответствующих свойствам системы; int – целая часть числа; A – основание логарифма, определяется критичностью объекта мониторинга, например для ОТР и ОПО $A = 10$ [11]; для КВО предлагается $A = 3$ или $A = e$ ($e = 2,718\dots$ – основание натуральных логарифмов), для СВО рекомендуется $A = 2$. В этом случае уже при произведении $\prod R_i$, равном 3 или 2, класс СДМ равен 2.

Кстати, в [18] основание логарифма не указано именно из соображений последующей классификации систем для разных категорий ответственности объектов.

В табл. 1 приведены примеры расчета класса систем для различных конфигураций аппаратных и программных средств. Уменьшение основания A логарифма до 3 и далее до 2 существенно повышает требования к СДМ, разрешая применять для СВО системы с наилучшими параметрами, для которых все показатели равны единице.

Таблица 1

Примеры расчета класса систем

| Вид классификации | Параметры классификации | Номер системы | | | | | | |
|---|--|---------------|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Количество и вид МНК (R_1) | Комплексные, специализированные (1, 2) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| Тип экспертной системы (R_2) | ЭСППР, ЭСД, СИС (1, 2, 3) | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 |
| Объем неисправностей (R_3) | Широкого класса, узкого (1, 2) | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| Статическая ошибка (R_4) | Низкая, средняя, высокая (1, 2, 3) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Динамическая ошибка (R_5) | Низкая, средняя, высокая (1, 2, 3) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| Риск пропуска внезапного отказа (R_6) | Низкий, средний, высокий (1, 2, 3) | 1 | 2 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 |

Окончание табл. 1

| Вид классификации | Параметры классификации | Номер системы | | | | | | |
|---|---|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Число измерительных каналов (R_7) | Многоканальные, одноканальные (1, 2) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| Способ опроса датчиков (R_8) | Универсальный, параллельный, последовательный (1, 2, 3) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| Архитектура (R_9) | Распределенная, сосредоточенная (1, 2) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| Тип анализатора сигналов (R_{10}) | Векторный, скалярный (1, 2) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Тип индикатора состояния (R_{11}) | Комплексный, многоуровневый, простой (1, 2, 3) | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| Наличие диагностической сети (R_{12}) | Автоматическая, ручная, нет (1, 2, 3, 4) | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| Тип управления (R_{13}) | Автоматический, автоматизированный, ручной (1, 2, 3) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| | | | | | | | | |
| | Произведение $\prod R_i$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 32 | 384 | 2592 |
| ОТР | $\text{Log}_{10}(\prod R_i) = \text{Lg}(\prod R_i)$ | 0 | 0,3 | 0,5 | 0,6 | 1,5 | 2,6 | 3,4 |
| | Класс (K) | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| ОПО | $\text{Log}_6(\prod R_i) = \text{Lg}(\prod R_i)/0,77$ | 0 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,9 | 3,4 | 4,4 |
| | Класс (K) | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 4 | 5 |
| КВО | $\text{Ln}(\prod R_i) = \text{Lg}(\prod R_i)/0,43$ | 0 | 0,7 | 1,1 | 1,4 | 3,5 | 5,6 | 7,9 |
| | Класс (K) | 1 | 1 | 2 | 2 | 4 | 6 | 8 |
| СВО | $\text{Log}_2(\prod R_i) = \text{Lg}(\prod R_i)/0,3$ | 0 | 1 | 1,6 | 2 | 5 | 8,6 | 11 |
| | Класс (K) | 1 | 2 | 2 | 3 | 6 | 9 | 12 |

Для каждого класса системы устанавливаются границы применения при оснащении энергетических комплексов [11, 13] в соответствии с риском пропуска отказов. Классификация оборудования основана на матрице риска [6, 7, 10], учитывающей вероятность возникновения отказа и его экономические, экологические и техногенные последствия.

Системы мониторинга 1 класса применяются для комплексного мониторинга всей технологической установки, включая объекты первой, второй и третьей категорий с возможностью автоматической блокировки опасных агрегатов и обеспечивают безопасную ресурсосберегающую эксплуатацию оборудования по фактическому техническому состоянию.

Системы 2 класса применяются для мониторинга оборудования второй и третьей категорий с возможностью автоматической блокировки опасных агрегатов и обеспечивают безопасную ресурсосберегающую эксплуатацию оборудования по фактическому техническому состоянию.

Системы 3 класса применяются для мониторинга оборудования третьей категории по фактическому техническому состоянию.

Системы 4 и более низких классов носят вспомогательный характер.

Применение стационарных систем диагностики и мониторинга позволяет перевести отказы технологических систем из категории внезапных в категорию постепенных, т.е. наблюдаемых. В табл. 2 приведен примерный перечень неисправностей машин, заблаговременно автоматически обнаруживаемых и указываемых персоналу системой мониторинга состояния в реальном времени [2, 3, 13].

Поскольку любые системы распознавания обладают не нулевой ошибкой, то возникает задача оценки требуемой ошибки систем диагностики и мониторинга η , если для технологической системы, имеющей в сложившихся условиях эксплуатации вероятность внезапных отказов Q и наработку на отказ T_Q , требуется обеспечить риск пропуска отказа не более r и наработку на отказ не менее T_r . Полагая, что параметры надежности Q и T_Q достигнуты при существующей технологии обслуживания и инструментах наблюдения за состоянием оборудования, т.е., как правило, визуально-измерительный контроль (ВИК) при обходах, в [4] показано, что требуемая вероятность ошибки распознавания дефектного состояния оборудования определяется соотношениями (рис. 1):

$$\eta = [\text{Ln}(1 - r)] / [\text{Ln}(1 - r) + \text{Ln}(1 - Q)].$$

Коэффициент увеличения наработки между отказами (рис. 2):

$$Tr = TQ \cdot [\text{Ln}(1 - Q)] / [\text{Ln}(1 - r)], \quad (2)$$

$$k_T = Tr / TQ, \quad k_T = (1/\eta) - 1.$$

Например, для $\eta = 4\%$ коэффициент увеличения наработки между внезапными необнаруженными отказами агрегатов $k_T = 24$ раза, что объясняет существенное увеличение техногенной, экономической и экологической безопасности при внедрении систем мониторинга. Даже при суммарной ошибке мониторинга в 30% выигрыш составляет не менее двух раз.

Именно резкое сокращение – более чем на порядок – ошибки мониторинга с 30–40% до 1% и менее приводит к резкому росту эффективности, в частности к увеличению межаварийного пробега в десятки и сотни раз, а следовательно, – к радикальному сокращению эксплуатационных затрат и росту вырабатываемой продукции (энергии).

Наиболее сложной проблемой в реальной жизни, как показывает практика, является уменьшение риска пропуска опасного состояния оборудования r , представляющего собой совокуп-

Таблица 2

Перечень неисправностей машин, заблаговременно автоматически обнаруживаемых и указываемых персоналу системой мониторинга состояния в реальном времени

| № | Вид неисправности |
|---|--|
| | <i>Центробежные машины</i> |
| 1 | Подшипник |
| 1 | Недостаток смазки |
| 2 | Перекося |
| 3 | Ослабление |
| 4 | Дефект внешней обоймы |
| 5 | Дефект внутренней обоймы |
| 6 | Дефект тел качения |
| 7 | Дефект сепаратора |
| 2 | Дефекты подшипников скольжения |
| 3 | Недостаток смазки подшипников скольжения |
| 4 | Механизм |
| 1 | Дефекты муфты |
| 2 | Дефекты зубчатых передач |
| 5 | Машина |
| 1 | Нарушение крепления |
| 2 | Дисбаланс ротора |
| 3 | Дефекты рабочего колеса |
| 4 | Срез вала |
| 5 | Недопустимое биение ротора |
| 6 | Недопустимый осевой сдвиг |
| 6 | Агрегат |
| 1 | Нарушение центровки валов |
| 2 | Нарушение крепления к фундаменту и присоединенным конструкциям |
| 7 | Гидрогазодинамические |
| 1 | Кавитация |
| 2 | Гидроудар |
| 3 | Прохват |
| 8 | Электрические |
| 1 | Перегрузка по току |
| 2 | Перекося фаз |
| 3 | Дефекты статора |
| 4 | Дефекты ротора |

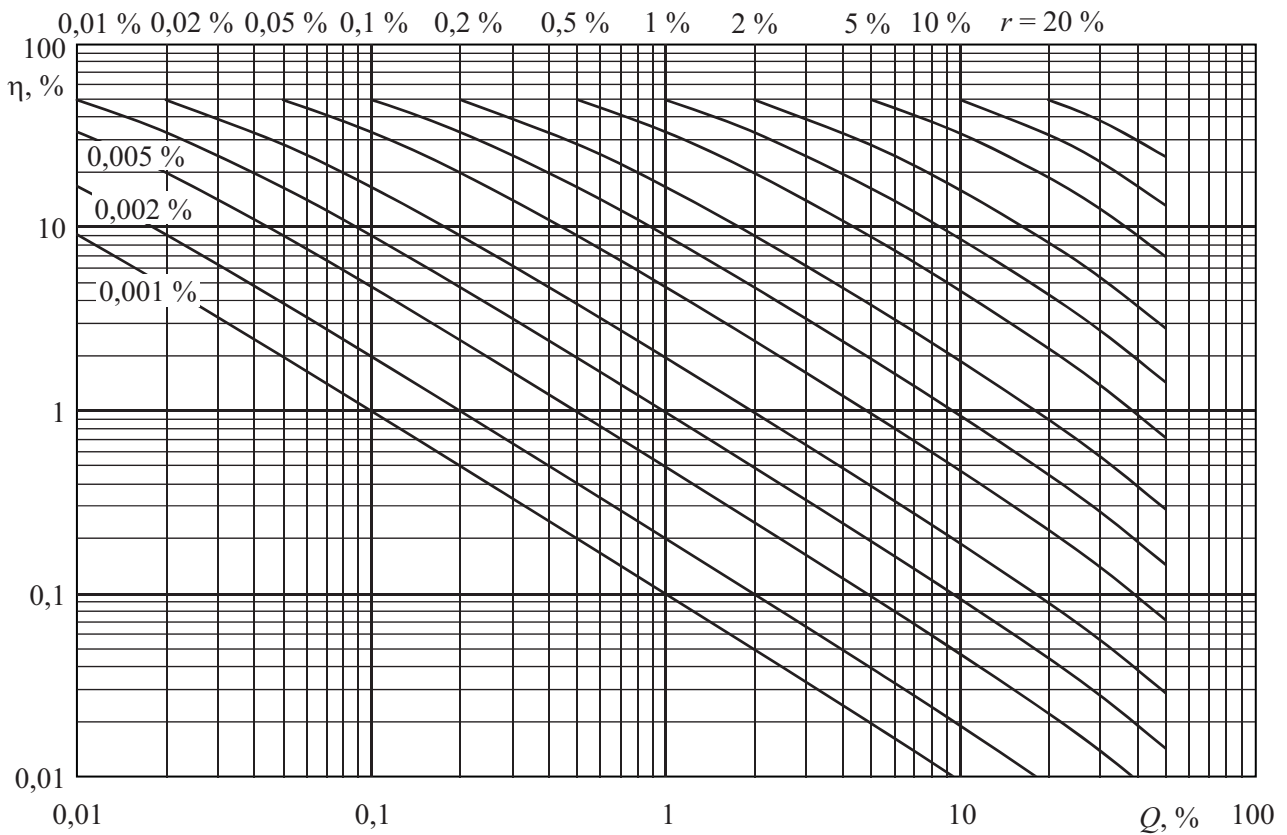


Рис. 1. Допустимая ошибка η системы мониторинга при требуемом риске r и фактической вероятности отказа оборудования ТЭК Q

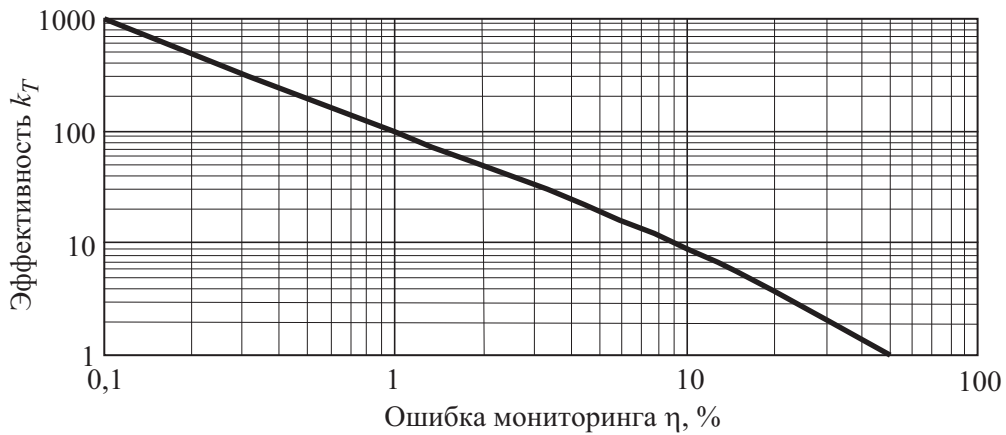


Рис. 2. Коэффициент увеличения наработки между отказами k_T в зависимости от ошибки мониторинга η

ность ошибок СДМ – η и человеческого фактора (ЧФ) h . В свою очередь, ошибка СДМ η является суммой статической S и динамической d ошибок:

$$r = 1 - (1 - S)(1 - d)(1 - h),$$

а приближенная оценка при $(S, d, r, h) < 0,1$ может быть получена по формулам:

$$\eta \approx S + d; \quad r \approx \eta + h \approx S + d + h. \tag{3}$$

Следует отметить, что ошибка из-за влияния человеческого фактора аналогична динамической ошибке, поскольку увеличивает интервал запаздывания адекватной реакции персонала на предупреждения СДМ. Опасное состояние оборудования может быть предотвращено персоналом, если предупреждения СДМ доводятся неукоснительно, без задержек, независимо от его воли и желаний, а иногда, если необходимо, то и принудительно через управляющее воздействие руководителя более высокого уровня управления. Именно для этого СДМ должны содержать встроенную автоматическую экспертную систему поддержки принятия решений о техническом состоянии объекта и дальнейшем управлении ($R_2 = 1$), выявлять широкий класс неисправностей ($R_3 = 1$), быть автоматическими ($R_{13} = 1$), обладать комплексным индикатором состояния с речевым предупреждением ($R_{11} = 1$) и автоматической диагностической сетью ($R_{12} = 1$), представляющей руководству объективную картину технического состояния оборудования в реальном времени. Без выполнения этих условий иметь приемлемый риск ($r < 5\%$) не возможно. На уменьшение ошибок пропуска отказов направлены и другие показатели классификации. При синтезе любой системы мониторинга для распознавания технического состояния объекта важнейшим является выбор показателя, достижение которым некоторого критического значения позволяет считать, что объект перешел из одного состояния в другое. При этом не важно, что это за показатель (диагностический признак) – векторный или скалярный, измеряемый в каких-либо шкалах или вычисляемый, непрерывный или дискретный, оцениваемый экспертами в баллах и т.п. Важно, достигает он или нет критического значения [19]. Так обстоит дело в случае статического распознавания, характеризующегося статической ошибкой S – вероятностью пропуска опасного состояния объекта, когда фактор времени не является существенным. Иначе обстоит дело, когда осуществляют мониторинг состояния объекта, которое меняется во времени. В этом случае наличие статической ошибки распознавания приводит к неопределенности определения момента перехода объекта в неблагоприятное состояние, которая добавляется к неопределенности, обусловленной дискретным характером наблюдения (мониторинга), называемой ошибкой динамического распознавания d . Соответственно увеличивается и риск пропуска опасного состояния r .

Вероятность ошибки динамического распознавания опасного состояния оборудования (динамическая ошибка) определяется вероятностью своевременного покрытия интервалом мониторинга τ моментов наступления состояний «Требуется принятия мер (ТПМ)» t_T и «Недопустимо (НДП)» t_H на интервале развития неисправности T_H и равна отношению интервала мониторинга τ к интервалу развития неисправности T_H [18]: $d = \tau / T_H$. Наличие статической ошибки S приводит к запаздыванию момента обнаружения состояния ТПМ на интервал $\tau_T = t_{TS} - t_T$, а состояния НДП на интервал $\tau_H = t_{HS} - t_H$. Фактически динамическая ошибка d увеличивается на величину запаздывания, вызванную наличием статической ошибки d_S . При наличии статической ошибки S динамическая ошибка резко возрастает вследствие запаздывания момента времени правильного распознавания состояния ТПМ t_{TS} и НДП t_{HS} на интер-

валы τ_T и τ_H соответственно, и тогда динамическая ошибка постановки диагноза d_0 определится как:

$$d_0 = d + d_S; \quad d_S = d_{ST} + d_{SH}; \quad d_{ST} = \tau_T/T_H; \quad d_{SH} = \tau_H/T_H, \quad (4)$$

где d_{ST} и d_{SH} – дополнительные составляющие динамических ошибок постановки диагноза за счет наличия запаздываний момента обнаружения состояний «Требуется принятия мер» и «Недопустимо» соответственно.

Рассмотрим два примера наиболее типичных трендов (траекторий деградации состояния) [4].

Можно показать, что для линейной траектории деградации технического состояния $Y = kt$ динамические ошибки определяются выражениями:

$$d_{STL} = \frac{S}{1-S} \frac{1}{G-1}; \quad d_{SHL} = \frac{S}{1-S} \frac{G}{G-1}, \quad d_{SL} = \frac{S}{1-S} \frac{G+1}{G-1}, \quad (5)$$

где S – вероятность ошибки статического распознавания; G – отношение уровня диагностического признака «Останов» при достижении состояния «Недопустимо» (НДП) к уровню диагностического признака «Предупреждение» при достижении состояния «Требуется принятия мер» (ТПМ); d_{STL} – увеличение динамической ошибки определения состояния ТПМ при линейном тренде; d_{SHL} – увеличение динамической ошибки определения состояния НДП при линейном тренде; d_{SL} – увеличение суммарной динамической ошибки при линейном тренде.

Выражения (5) показывают, что при линейном тренде деградации состояния объекта увеличение динамической ошибки определения состояния НДП в G раз больше, чем увеличение динамической ошибки определения состояния ТПМ:

$$d_{SHL} = G d_{STL}. \quad (6)$$

Для трендов экспоненциального типа $Y = A \exp(\alpha t)$, $Y' = \alpha A \exp(\alpha t)$. Увеличение динамической ошибки определения состояния ТПМ d_{STE} и НДП d_{SHE} оказываются равны между собой d_{STHE} :

$$d_{STE} = d_{SHE} = d_{STHE} = \frac{S}{1-S} \frac{\sqrt{G}}{G-1}. \quad (7)$$

Увеличение суммарной динамической ошибки при экспоненциальном тренде d_{SE} :

$$d_{SE} = \frac{S}{1-S} \frac{2\sqrt{G}}{G-1}. \quad (8)$$

В табл. 3 приведены значения дополнительных динамических погрешностей для линейных и экспоненциальных трендов при крайних значениях $G = 1,25$ и $2,5$, наиболее часто встречающихся в стандартах [8, 9, 12, 14] в процентах от интервала развития неисправностей T_H от состояния ТПМ до состояния НДП. При $G = 1,25$ дополнительная динамическая ошибка d_S более чем в 9 раз превышает статическую.

Таблица 3

**Значения дополнительных динамических погрешностей
для линейных и экспоненциальных трендов при крайних значениях G в процентах
от интервала T_H развития неисправностей от состояния ТПМ до состояния НДС**

| Статическая ошибка, S , % | 1 | | 4 | | 6 | | 10 | |
|--|------|------|------|-----|------|------|------|------|
| | 1,25 | 2,5 | 1,25 | 2,5 | 1,25 | 2,5 | 1,25 | 2,5 |
| G | 1,25 | 2,5 | 1,25 | 2,5 | 1,25 | 2,5 | 1,25 | 2,5 |
| Экспоненциальный тренд, дополнительная динамическая ошибка оценки момента НДС, d_{SHE} , % | 4,5 | 1,1 | 18,6 | 4,4 | 28,6 | 6,7 | 49,7 | 11,6 |
| Линейный тренд, дополнительная динамическая ошибка оценки момента НДС, d_{SHL} , % | 5 | 1,65 | 20,8 | 6,9 | 31,9 | 10,6 | 55 | 18,3 |
| Экспоненциальный тренд, общая дополнительная динамическая ошибка, d_{SE} , % | 8,9 | 2,1 | 37,2 | 8,8 | 57,1 | 13,5 | 98,4 | 23,2 |
| Линейный тренд, общая дополнительная динамическая ошибка, d_{SL} , % | 8,9 | 2,3 | 37,5 | 9,7 | 57,5 | 14,9 | 99 | 25,7 |

Наиболее сильно статическая ошибка распознавания увеличивает дополнительную динамическую ошибку при минимальном коэффициенте $G = Y_H / Y = 1,25$ для линейного тренда d_{SHL} . Уже при статической ошибке $S = 1$ % (уровень фактора $R_4 = 1$) дополнительная динамическая ошибка оценки состояния НДС $d_{SHL} > 5$ %. С учетом выражения для риска пропуска опасного состояния (3) последний также оказывается заведомо больше 5 %. То есть по этим факторам: $R_5 \geq 2$ и $R_6 \geq 2$, $\prod R_i \geq 4$ при прочих факторах, равных 1, и класс СМ для ОПО равен 1, для КВО – 2, а для СВО – 3. Если $S = 6$ % ($R_4 = 2$), общая динамическая ошибка для трендов обоих типов при $G = 1,25$ превышает 30 %. С учетом выражения для риска пропуска опасного состояния (3) последний также оказывается заведомо больше 30 %. То есть по этим факторам: $R_4 = 2$, $R_5 = 3$ и $R_6 = 3$, $\prod R_i \geq 18$ и класс СМ для ОПО равен 2, для КВО – 3, а для СВО – 5. Такую СДМ можно применять для оборудования 2-й категории ОПО и не рекомендуется применять для оборудования КВО и СВО.

Примером СДМ 1 класса является стационарная система мониторинга состояния оборудования КОМПАКС® (рис. 3), которая предназначена для обеспечения безопасной экологически чистой ресурсосберегающей эксплуатации оборудования взрывопожароопасных производств, предупреждения аварий, производственных неполадок и управления техническим состоянием оборудования путем непрерывного компьютерного мониторинга. Система обеспечивает в автоматическом режиме, без участия человека, диагностику, мониторинг и прогноз технического состояния агрегатов с выдачей предписаний по ближайшим неотложным действиям с оборудованием технологическому персоналу в операторную установки и руководству предприятия посредством диагностической сети.

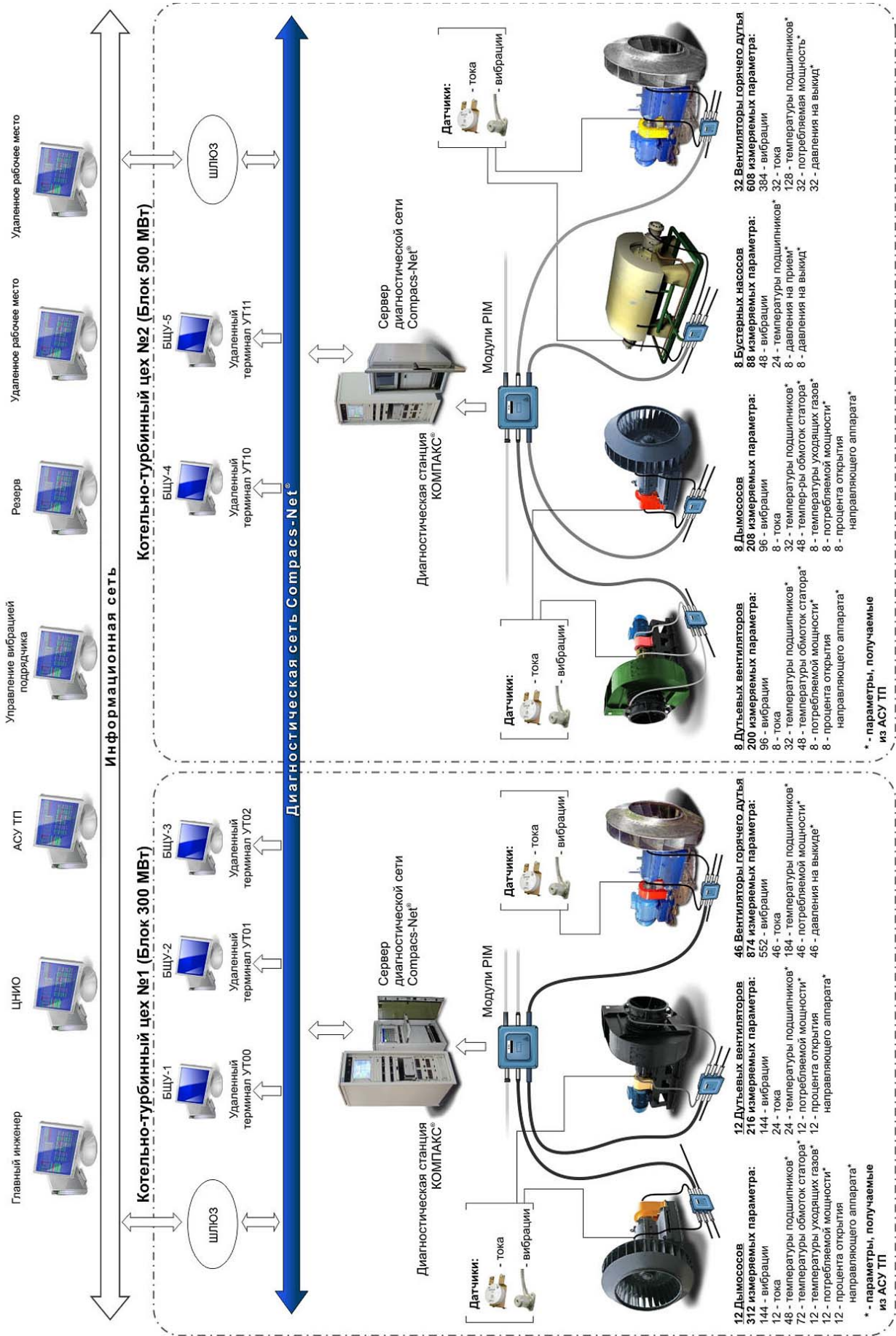


Рис. 3. Структурная схема эксплуатации оборудования по техническому состоянию на основе технологии АСУ БЭРТМ КОМПАКС®

Постоянный мониторинг, т.е. диагностика технического состояния основных неисправностей с вероятностью, близкой к 1, на непрерывно примакающих интервалах времени, исключает пропуск неблагоприятных тенденций изменений технического состояния оборудования без его остановки и позволяет своевременно обнаружить дефекты и неполадки основных узлов, принять оперативные меры по восстановлению их работоспособности, приостановить развитие надвигающихся неисправностей.

В системе реализованы следующие основные принципы построения СДМ первого класса, соответствующие требованиям ГОСТ Р 53564:

Принцип достаточности определяет выбор минимального числа датчиков, обеспечивающих наблюдаемость технического состояния оборудования.

Принцип самодиагностики измерительных и управляющих каналов системы обеспечивает легкий пуск ее в эксплуатацию, простоту обслуживания и ремонта отдельных каналов, высокую надежность системы.

Принцип структурной гибкости и программируемости обеспечивает реализацию оптимальной параллельно-последовательной структуры системы.

Выводы

1. Исследованы свойства оценок классов систем мониторинга объектов топливно-энергетического комплекса, показана необходимость тщательного учета взаимосвязи факторов классификации между собой для правильного определения объектов энергетики, на которых могут быть использованы конкретные СДМ.

2. Предложены уточнения критериев классификации для объектов технического регулирования (ОТР), опасных производственных объектов (ОПО), критически важных объектов (КВО) и стратегически важных объектов (СВО).

3. Показано существенное влияние ошибки статического распознавания технического состояния оборудования первого рода на динамическую ошибку распознавания первого рода, которое растет обратно пропорционально уменьшению отношения критических значений диагностических признаков, соответствующих техническим состояниям «Недопустимо» и «Требуется принятия мер».

4. Показано, что внедрение СДМ целесообразно даже при большом риске пропуска отказа: при $r \leq 30\%$ увеличение времени безаварийной работы ОПО составляет не менее двух раз.

Литература

1. **Махутов Н.А.** Техногенная безопасность: диагностика и мониторинг потенциально опасного оборудования и рисков его эксплуатации / Н.А. Махутов, М.М. Гаденин. В сб.: Федеральный справочник: т. 26. М.: НП «Центр стратегического партнерства», 2012.

2. **Костюков В.Н.** Мониторинг состояния и рисков эксплуатации оборудования в реальном времени – основа промышленной безопасности / В.Н. Костюков, Н.А. Махутов, А.В. Костюков. В сб.: Федеральный справочник: т. 26. М.: НП «Центр стратегического партнерства», 2012.

3. **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.

4. **Костюков В.Н.** Мониторинг безопасности производства. М.: Машиностроение, 2002.

5. **Костюков В.Н., Науменко А.П.** Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин: Учебное пособие. Рекомендовано УМО вузов РФ по образованию в области приборостроения для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки 200100 – «Приборостроение». Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011.

6. **Костюков А.В., Костюков В.Н.** Повышение операционной эффективности предприятий на основе мониторинга в реальном времени. М.: Машиностроение, 2009.

7. **Костюков В.Н., Костюков Ал.В., Костюков Ан.В.** Повышение эффективности производства на основе внедрения автоматических систем диагностики и мониторинга состояния машин КОМПАКС // Химическая техника. 2002. № 2.

8. **ГОСТ Р ИСО 10816-1-97.** Вибрация. Оценка состояния машин по результатам измерений вибрации на не вращающихся частях. Общие требования. М.: Госстандарт России, 1997.

9. **ГОСТ Р ИСО 10816-3-99.** Вибрация. Оценка состояния машин по результатам измерений вибрации на не вращающихся частях. Ч. 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15 000 мин⁻¹. М.: Госстандарт России, 1999.

10. **ГОСТ Р 53563-2009.** Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Порядок организации. М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2010.

11. **ГОСТ Р 53564-2009.** Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Требования к системам мониторинга. М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2010.

12. **ГОСТ Р 53565-2009.** Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Вибрация центробежных насосных и компрессорных агрегатов. М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2010.

13. **СА 03-002-05.** Системы мониторинга агрегатов опасных производственных объектов. Общие технические требования: стандарт ассоциации «Ростехэкспертиза», ассоциации нефтехимиков и нефтепереработчиков и НПС РИСКОМ / Колл. авт. М.: Химическая техника, 2005. (Согласован Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору РФ письмом № 11-16/219 от 1 февраля 2005 г.)

14. **СА 03-001-05.** Центробежные насосные и компрессорные агрегаты опасных производств. Эксплуатационные нормы вибрации: стандарт ассоциации «Ростехэкспертиза», ассоциации нефтехимиков и нефтепереработчиков и НПС РИСКОМ / Колл. авт. М.: Химическая техника, 2005. (Согласован Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору РФ письмом № 11-16/219 от 1 февраля 2005 г.)

15. **СТО-03-002-08** Мониторинг оборудования опасных производств. Порядок организации: сб. стандартов НПС РИСКОМ // Мониторинг оборудования опасных производств. Стандарт организации / Колл. авт. М.: 2008.
16. **СТО 03-003-08** Мониторинг опасных производств. Термины и определения: сб. стандартов НПС РИСКОМ // Мониторинг оборудования опасных производств. Стандарт организации / Колл. авт. М.: 2008.
17. **Костюков В.Н.** Комплексный мониторинг технологических объектов опасных производств / В.Н. Костюков, С.Н. Бойченко, А.П. Наumenко, Е.В. Тарасов // Контроль и диагностика. 2008. № 12.
18. Сборник задач по теории вероятностей, математической статистике и теории случайных функций / Под ред. А.А. Свешникова. М.: Наука, 1970.
19. **Загоруйко Н.Г.** Методы распознавания и их применение. М.: Советское радио, 1972.

| | |
|-----------------------|--|
| Корректурa | Грошева Г.Н. |
| Верстка | Софейчук Л.В. |
| Объем | 3,7 уч.-изд. л. |
| Подписано к выпуску | 26.03.14 |
| Адрес редакции | 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 17, корп. Т, комн. 511 |
| Телефон/факс | (495) 362-7589 |
| E-mail | avs@energo-press.ru |
| Отдел распространения | Галтева Елена Федоровна |
| Интернет | www.energo-press.info |